



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**  
**ΦΟΡΤΙΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΕ ΚΤΗΡΙΑ**  
**ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ**  
**ΣΤΑ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**ΜΑΡΙΑΝΝΑ Ε. ΣΤΑΜΑΤΙΑΔΟΥ**  
Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:**  
**Κ.ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ**  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2014





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**  
**ΦΟΡΤΙΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΕ ΚΤΗΡΙΑ**  
**ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ**  
**ΣΤΑ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**ΜΑΡΙΑΝΝΑ Ε. ΣΤΑΜΑΤΙΑΔΟΥ**

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ**  
**ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

1. Κ.ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.  
(Επιβλέπων)
2. Μ. ΦΟΥΝΤΗ, Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Εμ. ΡΟΓΔΑΚΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.

**ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ**  
**ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

1. Κ.ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
2. Εμ. ΡΟΓΔΑΚΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Μ. ΦΟΥΝΤΗ, Καθ. Ε.Μ.Π.
4. Κ. ΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
5. Δ. ΧΟΥΝΤΑΛΑΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
6. Αθ. ΣΑΓΙΑ, Καθ. Ε.Μ.Π.
7. Ειρ. ΚΟΡΩΝΑΚΗ, Επικ. Καθ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2014



Η έγκριση της Διδακτορικής Διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Μηχανολόγων  
Μηχανικών του Ε. Μ. Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων της  
συγγραφέως (Ν.5343/1932, Άρθρο 202)

---

Σταματιάδου Ε. Μαριάννα

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός, Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

© 2014 – Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Στην Οικογένεια μου  
και σε όλους όσους κατάλαβαν  
και στήριξαν την προσπάθεια αυτή.

*“Προσπάθησε να μάθεις κάτι για τα πάντα και τα πάντα για κάτι”*

*Thomas Henry Huxley*



# Ευχαριστίες

Με την ευκαιρία της ολοκλήρωσης της Διδακτορικής μου Διατριβής, θα ήθελα να ευχαριστήσω ειλικρινώς ορισμένους ανθρώπους, οι οποίοι ήταν σημαντικοί αρωγοί, ο καθένας με τον τρόπο του, στην πορεία αυτή. Η διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης, της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Κρίνω λοιπόν σκόπιμο, να ευχαριστήσω ειλικρινά τον επιβλέποντα Καθηγητή Ε.Μ.Π., Κίμωνα Αντωνόπουλο, ο οποίος με εισήγαγε στα θέματα αποθήκευσης και εξοικονόμησης ενέργειας, αρχής γενομένης με την επίβλεψη της Διπλωματικής μου εργασίας στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών το 2004. Τον ευχαριστώ για την καίρια συμβολή του στην απόφασή μου να εκπονήσω διδακτορική διατριβή στο Ε.Μ.Π, καθώς και την διαρκή υποστήριξή του καθ'όλη την πορεία αυτή.

Ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη νιώθω και θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στην Καθηγήτρια Ε.Μ.Π., Μαρία Φούντη, η οποία είχε ενεργό ρόλο στην επίβλεψη της εργασίας μου. Την ευχαριστώ για την πολύπλευρη μέριμνά της μέχρι την ολοκλήρωση της διατριβής μου, την συνεχή επιστημονική και ερευνητική καθοδήγηση της πάνω σε θέματα εξοικονόμησης ενέργειας, καθώς και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε όλα αυτά τα χρόνια. Η ηθική, και όχι μόνο, στήριξή της και η εξάισια συνεργασία μαζί της όλο αυτόν τον καιρό με κάνουν να νιώθω μεγάλη ευγνωμοσύνη.

Ιδιαίτερα επίσης ευχαριστώ τον Καθηγητή Ε.Μ.Π., Εμμανουήλ Ρογδάκη, για τη συμβολή του και την καθοδήγησή του στην περάτωση της διατριβής μου, ως μέλος της συμβουλευτικής τριμελούς επιτροπής. Η εκπόνηση μιας διατριβής είθισται επίπονη διαδικασία, σίγουρα όμως η υποστήριξη που δίνει η τριμελής επιτροπή βοηθούν να ξεπεραστούν όποια επιστημονικά προβλήματα και αντιξοότητες.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την επταμελή εξεταστική επιτροπή για την πρόθυμη συμμετοχή τους στην κρίση της διδακτορικής μου διατριβής και τη συνεργασία.

Κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής, είναι ευχάριστο να συναναστρέφεται κανείς με ανθρώπους που καταλαβαίνουν αυτή τη διαδικασία και είναι σε θέση να βοηθήσουν επί της ουσίας. Για αυτό το λόγο, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συνάδελφους και φίλους μου από το εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., οι οποίοι συνέβαλλαν στο ευχάριστο κλίμα μέσα στον εργασιακό χώρο αλλά και στην άριστη συνεργασία, όποτε αυτή χρειάστηκε.

Ιδιαίτερη μνεία και ένα μεγάλο ευχαριστώ αξίζουν οι Δρ. Δημήτρης Κατσουρίνης και Δρ. Δημήτρης Γιαννόπουλος, συνάδελφοι με τους οποίους μοιράστηκα το Γραφείο Αρ.2 όλα αυτά τα χρόνια. Οι εποικοδομητικές συμβουλές και παρατηρήσεις τους καθ'όλη την πορεία μου, ήταν σημαντικές για την ερευνητική μου δραστηριότητα και εξέλιξη. Η ηθική τους

συμπαράσταση και η κατανόηση σε προσωπικό και εργασιακό επίπεδο ήταν παραπάνω από πολύτιμη για μένα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνάδελφο Γιάννη Μανδηλαρά, για την παραδειγματική συνεργασία μας, καθώς η συνεισφορά του οποίου (κυρίως σε πειραματικές μετρήσεις) βοήθησε στα θεμέλια της διατριβής μου.

Όμως, το πιο μεγάλο “ευχαριστώ”, δικαιωματικά το οφείλω στην οικογένεια μου. Η διατριβή αυτή αφιερώνεται στους γονείς μου και στον αδερφό μου, καθώς με την βοήθειά τους και την ηθική και υλική στήριξή τους, υπερέβαλαν εαυτόν και κατάφεραν να με διαμορφώσουν ως ολοκληρωμένη προσωπικότητα και να μου παρέχουν τα απαραίτητα εφόδια για να φτάσω ως εδώ. Τέλος, την ίδια ευγνωμοσύνη νιώθω και για τον σύζυγο μου και τον ευχαριστώ για την κατανόηση, την υποστήριξη και την αγάπη που μου έχει δείξει όλα αυτά τα χρόνια. Ως μηχανικός, τα λόγια είναι δύσκολα, η ευγνωμοσύνη όμως μεγάλη.

M.Σ.  
Ιούλιος, 2014

# Σύνοψη

Ο σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η ανάπτυξη και εφαρμογή υπολογιστικών εργαλείου για την προσομοίωση και ανάλυση της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων, τα οποία εμπεριέχουν Υλικά Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ) μέσα στο δομικά τους υλικά. Έμφαση δίνεται σε κτήρια ελαφριάς κατασκευής και στην ενδεχόμενη επίδραση που έχουν τα ΥΑΦ, ως προς την μείωση των ψυκτικών φορτίων του κτηρίου. Κίνητρο για την έρευνα αυτή αποτελεί η ανάγκη ενεργειακής μελέτης καινοτόμων τεχνολογιών, οι οποίες θα βοηθήσουν στην ανάπτυξη αποδοτικότερων συστημάτων, με απώτερο στόχο την αναβάθμιση του κτηριακού τομέα, τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, την προώθηση «καθαρών» πηγών ενέργειας, τον περιορισμό της παγκόσμιας ρύπανσης του περιβάλλοντος. Ειδικά, ο στόχος για κτήρια χαμηλής ή σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης επιβάλλει τον εκ των προτέρων υπολογισμό των ψυκτικών και θερμικών φορτίων, ώστε να εξασφαλιστεί η θερμική άνεση για τους ενοίκους. Η ακριβής προσομοίωση και μοντελοποίηση τέτοιων συστημάτων κρίνεται απαραίτητη, ώστε να βοηθηθεί η διεξόδυση των ΑΠΕ στην καθημερινότητα και να επιτευχθούν οι εθνικοί και παγκόσμιοι στόχοι που έχουν θεσπιστεί για την κλιματική αλλαγή. Στην παρούσα εργασία, αρχικά αναπτύσσεται μεθοδολογία εισαγωγής Υλικών Αλλαγής Φάσης σε υπολογιστικό εργαλείο. Το υπολογιστικό εργαλείο απαρτίζεται από δυο ξεχωριστά πακέτα ενεργειακής προσομοίωσης: ο κώδικας, ο οποίος αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, γραμμένος στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, ο οποίος περιγράφει μονοδιάστατα το φαινόμενο της αλλαγής φάσης σε δομικό στοιχείο, εισάγεται στο περιβάλλον ενός εμπορικού πακέτου ενεργειακής προσομοίωσης (TRNSYS), το οποίο είναι υπεύθυνο για τον υπολογισμό της επίδρασης όλων των υπολοίπων χαρακτηριστικών του κτηρίου και του περιβάλλοντα χώρου. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε επικυρώνεται και επαληθεύεται με πειραματικές μετρήσεις από πραγματική πιλοτική κατοικία. Η μοντελοποίηση της πιλοτικής κατοικίας εστιάζει στην επίδραση των ΥΑΦ στη μείωση των ψυκτικών φορτίων της οικίας. Έμφαση δίνεται στην διερεύνηση τριών κατηγοριών-παραμέτρων, οι οποίες ενδέχεται να επηρεάζουν την απόδοση των ΥΑΦ. Οι κατηγορίες αυτές αφορούν τις ιδιότητες του ΥΑΦ, τις συνθήκες λειτουργίας και χρήσης της κατοικίας και το τοπικό κλίμα. Προτείνεται το βέλτιστο σενάριο για κάθε κατηγορία, ώστε η απόδοση του ΥΑΦ να είναι η μέγιστη, σύμφωνα τις συνθήκες που επικρατούν.

**Λέξεις κλειδιά:** Ενεργειακή προσομοίωση κτηρίου, Μοντέλα προσομοίωσης, Υλικά αλλαγής φάσης, Αποθήκευση ενέργειας, Κτήρια ελαφριάς κατασκευής, Συνθήκες λειτουργίας κτηρίου, βελτιστοποίηση

# Περίληψη

Η έρευνα περί Υλικών Αλλαγής Φάσης ( ΥΑΦ ) ως συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας χρονολογείται από τη δεκαετία του 1940, ωστόσο, η πρακτική εφαρμογή τους στον τομέα των κατασκευών προκαλεί το ενδιαφέρον μόλις τις τελευταίες δεκαετίες, λόγω της σταδιακής μείωσης του κόστους τους. Κύριο γνώρισμα και πλεονέκτημα της εφαρμογής των ΥΑΦ σε δομικά στοιχεία, είναι η αύξηση της θερμικής μάζας, χωρίς μεταβολή στο πάχος των στοιχείων.

Η δημιουργία εξειδικευμένων υπολογιστικών εργαλείων για τον ακριβή υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας και τα φαινόμενα αποθήκευσης ενέργειας σε κτήρια και δομικά στοιχεία που περιέχουν ΥΑΦ, είναι απαραίτητη, καθώς όλο και περισσότερες εφαρμογές με ΥΑΦ σε κτήρια εμφανίζονται. Πρόσφατα, η ερευνητική τάση έχει στραφεί από την εξέταση των μεμονωμένων στοιχείων που περιέχουν ΥΑΦ, στην εξέταση περιπτώσεων πλήρους κλίμακας, όπως είναι τα κτήρια (οικίσκοι ή ακόμη και ολόκληρες κατοικίες). Κύριος στόχος παραμένει η αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης των ΥΑΦ. Πειραματικές μελέτες δείχνουν μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, όταν εγκαθίστανται γυψοσανίδες με ΥΑΦ σε δοκιμαστικούς χώρους, φθάνοντας περίπου το 15%, όσον αφορά τα συνολικά φορτία θέρμανσης/ψύξης. Ειδικά για την περίπτωση των κτηρίων ελαφριάς κατασκευής, τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι οι γυψοσανίδες με ΥΑΦ συμβάλλουν θετικά στη θερμική άνεση των ενοίκων.

Ο σκοπός της παρούσας διατριβής είναι να προσφέρει μια ολιστική προσέγγιση για την μοντελοποίηση της μη γραμμικής μεταβολής της ειδικής θερμοχωρητικότητας των ΥΑΦ κατά την αλλαγή φάσης, και να αξιολογήσει τη θερμική συμπεριφορά ενός κτηρίου ελαφριάς κατασκευής (πλήρους κλίμακας), του οποίου οι εσωτερικοί τοίχοι και τα χωρίσματα είναι γυψοσανίδες οι οποίες εμπεριέχουν ΥΑΦ. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός εξειδικευμένου εργαλείου προσομοίωσης, το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής, και πρόκειται για ένα συνδυασμό του εμπορικού υπολογιστικού πακέτου ενεργειακής προσομοίωσης TRNSYS και της γλώσσας προγραμματισμού MATLAB. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την εισαγωγή υπολογισμού της αλλαγής φάσης σε ένα υπάρχον υπολογιστικό εργαλείο παρουσιάζεται ενδελεχώς στα κεφάλαια που ακολουθούν και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εισαγωγή οποιασδήποτε καινοτόμου τεχνολογίας σε υπάρχον μοντέλο. Ο στόχος της διατριβής είναι να δημιουργηθεί ένα εργαλείο που επιτρέπει την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των ΥΑΦ μαζί με την ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς του κτηρίου, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα χαρακτηριστικά του( π.χ. σκίαση, χρήση και λειτουργία, τοποθεσία, αερισμός, συστήματα κλιματισμού κλπ ).

Το εργαλείο προσομοίωσης που αναπτύχθηκε, πρώτα επικυρώνεται και επαληθεύεται σε σχέση με πειραματικά δεδομένα, τα οποία προέκυψαν από την παρακολούθηση των κλιματικών συνθηκών, καθώς και της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα και τη ροή θερμότητας μέσω της τοιχοποιίας του κτηρίου. Το υπό εξέταση κτήριο είναι υπαρκτό και κατασκευασμένο στην περιοχή της Αμφιλοχίας. Στην συνέχεια χρησιμοποιείται για την

εξαγωγή συμπερασμάτων, όσον αφορά την μείωση των ετήσιων ψυκτικών φορτίων της συγκεκριμένης κατοικίας λόγω των γυψοσανίδων με ΥΑΦ, καθώς και την επίδραση των χαρακτηριστικών του κελύφους, του ΥΑΦ και του τοπικού κλίματος σε αυτήν.

Στην παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή, οι γυψοσανίδες με ΥΑΦ αντικαθίστανται από απλές γυψοσανίδες, προκειμένου να αξιολογηθεί η συμβολή του ΥΑΦ στην μείωση των απαιτούμενων φορτίων του κτηρίου για την περίοδο ενός χρόνου. Επίσης, μελετάται η συμβολή των ΥΑΦ στην μείωση της ψυκτικής περιόδου, σε επίπεδο ημερών. Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι που εξετάζονται είναι: i) το εύρος της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης των ΥΑΦ, το οποίο εμπεριέχει η γυψοσανίδα , ii) διάφορες παράμετροι του κτηρίου, όπως αεροστεγανότητα και υγρασία, iii) συνθήκες λειτουργίας και χρήση του κτηρίου και iv) διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Τέλος, τα βέλτιστα σενάρια για διάφορους συνδυασμούς των παραπάνω παραμέτρων παρουσιάζουν την ιδανική περίπτωση εξοικονόμησης ενέργειας για την παρούσα κατοικία.

# Abstract

The investigation of Phase Change Materials (PCMs) as thermal energy storage systems dates back to the 1940s, however, their practical application in construction regained interest during the last decades, due to their gradual cost reduction. The concept of PCM implementation is associated with ability of building elements, not only to exhibit increased levels of heat resistance, but also to display high values of heat capacities.

Towards this direction, the development of dedicated computational tools to accurately predict heat transfer and energy storage phenomena in buildings and building components containing PCMs is essential. Over the last decades, several studies have numerically investigated the thermal behaviour of building elements containing PCM under different thermal conditions. Many of them use existing building energy simulation tools such as TRNSYS, Energy Plus, ESP-r, BSim, Fluent, RADCOOL, COMSOL or other developed codes. Specifically, many in-house codes that simulate the PCM effect in TRNSYS platform are available in the literature.

Recently, research has been directed from PCM component examination to full scale test cases (cells or model rooms with one or more PCM walls) covering experimental data and/or numerical predictions, primarily aiming to evaluate the energy performance of PCM passive applications. Experimental studies show a reduction of energy consumption when PCM wallboards are installed in test rooms, reaching approximately 15% in total heating loads and achieving a maximum cost saving of about 30% over conventional non-PCM base-case. Focusing on lightweight buildings, experimental data showed that PCM wallboards contributed to the thermal comfort of occupants and smoothed out the wall temperature fluctuations.

The aim of this thesis is to provide a holistic approach to the modelling of the non-linear thermal phase change process of a PCM and to evaluate the thermal behaviour of a purposely built full scale lightweight building combining a hybrid steel frame with dry wall systems incorporating PCMs. This is accomplished by using a dedicated simulation tool, based on a coupled TRNSYS and MATLAB solver. The methodology used for the introduction of the PCM simulation in an existing computational tool is developed in this thesis. The goal is to have a tool that allows assessment of the PCM behaviour along with the analysis of the thermal behaviour of a building, taking into account all the features and characteristics (e.g. shading, occupancy profiles, location, HVAC etc) of a full scale building in operation.

The test case considered is a demo house built in Amfilochia- Greece, that comprises a load-bearing steel frame, combined with gypsum plasterboard wall assemblies. PCMs are incorporated in all internal walls and internal partitions. It is a two-storey building with a typical Greek family residential arrangement plan and measures 12,33 m width, 9,90 m length and 8,47 m height, with a total surface of approximately 152 m<sup>2</sup>, while the heated

area is 128,42 m<sup>2</sup>. On the ground floor, there is a kitchen, a boiler/storage room, a utility room and the main living room, while on the 1st floor, the master and auxiliary bedrooms are separated by the bathroom. Gypsum or PCM plasterboards are installed in double cladding layers in accordance with the Greek fire-resistance, thermal and sound insulation requirements.

The solver is firstly validated against experimental data obtained through a 12-month monitoring period of the house, as the temperature and heat flux through building components along with the indoor air temperatures are continuously monitored. Overall, the numerical results obtained with the proposed model yield a good representation of the measured values. These results validate the performance of the TRNSYS-MATLAB model in large scale buildings and give confidence for its implementation for the prediction of the overall house performance. In order to assess the energy demand of the building and to quantify the PCM effect, the annual cooling loads are under examination.

In the computational comparative study carried out in this thesis, the PCM plasterboards are replaced by plain gypsumboards, in order to evaluate the PCM impact in the annual cooling demands of the building and the span of the cooling period. Parametric studies are carried out in order to investigate the possibility of higher energy savings and to determine their impact on the energy efficiency of the building. The parameters under investigation are: i) the phase change temperature range of the PCM, which is in the plasterboard, ii) various parameters of the building, such as infiltration and humidity, iii) occupancy profiles and use of the building and iv) different climate conditions. The optimized scenarios, for different combinations of the aforementioned parameters, are shown at the end of the simulations.

The calculated numerical results for the energy saving in cooling demand are in full agreement with those found in the literature. Focusing on cooling loads, it is evident that when full-scale buildings are under examination, the reduction of the energy demand is between 20% - 35%. A crucial parameter that affects the results is the weather conditions, showing that the decrease in energy demand can be maximized if the appropriate melting point of the PCM is selected.

The test case examined in this work is one of the very few studying a whole two-storey, residential building, in which most of the rooms are covered with PCM wallboards. Usually, a test cell or one room inside a building is under examination, as found in literature. Such a full scale building allows for the direct examination of different parameters which may affect the PCM influence, such as the elevation of a room, its orientation and dimensions. Moreover, since the building is continuously monitored, experimental measurements can provide critical data for further numerical studies.

# Πίνακας Περιεχομένων

---

<b>Εισαγωγή</b>	1
1. Εισαγωγή	2
1.1. Το ενεργειακό πρόβλημα ως κίνητρο για έρευνα	2
1.1.1. Ενεργειακό πρόβλημα και κτηριακός τομέας	6
1.1.2. Ενεργειακό πρόβλημα και «κτήρια μηδενικής κατανάλωσης»	7
1.2. Σκοπός και στόχος της διατριβής	9
1.3. Διάρθρωση διατριβής	10
1.4. Δημοσιεύσεις	11
Βιβλιογραφία 1 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου	14
<b>Υλικά Αλλαγής Φάσης</b>	19
2. Εισαγωγή	20
2.1. Αρχή Λειτουργίας ΥΑΦ	20
2.2. Ιδιότητες Υλικών Αλλαγής Φάσης	21
2.2.1. Θερμοδυναμικές ιδιότητες ( <i>thermodynamic properties</i> )	22
2.2.2. Φυσικές ιδιότητες ( <i>physical properties</i> )	23
2.2.3. Κινητικές ιδιότητες ( <i>kinetic properties</i> )	25
2.2.4. Χημικές ιδιότητες ( <i>chemical properties</i> )	26
2.2.5. Οικονομικές ιδιότητες ( <i>economic properties</i> )	26
2.3. Ταξινόμηση των Υλικών Αλλαγής Φάσης	27
2.3.1. Οργανικά Υλικά Αλλαγής Φάσης	29
2.3.2. Ανόργανα Υλικά Αλλαγής Φάσης	30
2.3.3. Εύτηκτα Μίγματα	31
2.4. Μέθοδοι μέτρησης θερμικών ιδιοτήτων ΥΑΦ	32
2.4.1. Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης -ΔΘΣ ( <i>Differential Scanning Calorimetry -DSC</i> )	32
2.4.2. Διαφορική Θερμική Ανάλυση-ΔΘΑ ( <i>Differential thermal analysis-DTA</i> )	32
2.4.3. Μέθοδος T-history ( <i>T-history Method</i> )	32
2.5. Ενσωμάτωση ΥΑΦ σε παθητικά συστήματα αποθήκευσης λαυθάνουσας θερμότητας	33
2.5.1. Ενσωμάτωση ΥΑΦ σε νέα τοιχοποιία	33
2.5.2. Προσάρτηση ΥΑΦ σε υπάρχουσα τοιχοποιία	35



2.6.	Επισκόπηση των βασικών παθητικών συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (LHTES) με ΥΑΦ για κτηριακές εφαρμογές	35
2.6.1.	Γυψοσανίδες ενισχυμένες με ΥΑΦ	37
2.6.2.	Τοιχοποιία με ΥΑΦ	39
2.6.3.	Πλινθοδομή με ΥΑΦ	40
2.6.4.	Συστήματα κονιαμάτων ενισχυμένα με ΥΑΦ	42
2.6.5.	Τοίχος Trombe με ΥΑΦ	44
2.6.6.	Ενισχυμένα Παράθυρα και διαχωριστικά με ΥΑΦ	46
2.7.	Σύνοψη κεφαλαίου - Συμπεράσματα	48
	Βιβλιογραφία 2 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου	50
	<b>Μηχανισμοί Μετάδοσης Θερμότητας &amp;</b>	<b>55</b>
	<b>Αριθμητική Επίλυση Αλλαγής Φάσης</b>	<b>55</b>
3.	Εισαγωγή	56
3.1.	Φαινόμενα Μεταφοράς Θερμότητας – Εφαρμογή σε κτήρια	56
3.1.1.	Μετάδοση θερμότητας μέσω αγωγής	57
3.1.2.	Μετάδοση θερμότητας μέσω συναγωγής	57
3.1.3.	Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία	58
3.1.4.	Μετάδοση θερμότητας σε κτήρια	59
3.2.	Υλικά Αλλαγής Φάσης και Ειδική θερμοχωρητικότητα	62
3.2.1.	Περιοχή Αισθητής Θερμότητας	62
3.2.2.	Περιοχή Λανθάνουσας Θερμότητας	63
3.3.	Αριθμητικές Μέθοδοι για την μοντελοποίηση της Αλλαγής Φάσης Υλικών	64
3.3.1.	Μέθοδος της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας	69
3.3.2.	Μέθοδος της ενθαλπίας	70
3.3.3.	Μέθοδος της θερμικής πηγής	72
3.4.	Σύνοψη κεφαλαίου - Συμπεράσματα	73
	Βιβλιογραφία 3 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου	74
	<b>Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Εισαγωγής ΥΑΦ σε υπολογιστικά εργαλεία</b>	<b>77</b>
4.	Εισαγωγή	78
4.1.	Μοντελοποίηση Υλικών Αλλαγής Φάσης σε δομικά στοιχεία – Αναγκαιότητα και Πολυπλοκότητα του φαινομένου	78
4.2.	Παρουσίαση τρέχουσα κατάστασης – Υπολογιστικά Μοντέλα	80
4.2.1.	Λογισμικό δυναμικής θερμικής προσομοίωσης κτηρίων - TRNSYS	81
4.2.2.	Κώδικες για τη μοντελοποίηση ΥΑΦ με χρήση του λογισμικού TRNSYS	82
4.3.	Αναλυτική περιγραφή της Μεθοδολογίας	84
4.3.1.	Μοντελοποίηση Υλικών αλλαγής φάσης σε δομικά στοιχεία – 1D	85

4.3.2.	Προσαρμογή της Μεθοδολογίας για μοντελοποίηση κτηρίων	89
4.4.	Επικύρωση Ενοποιημένου Υπολογιστικού Μοντέλου και Συγκριτική του Αξιολόγηση με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας	91
4.4.1.	Περιγραφή Εξεταζόμενης Περίπτωσης και πειραματικά δεδομένα	91
4.4.2.	Υπολογιστικά αποτελέσματα – Επικύρωση ενοποιημένου μοντέλου	96
4.4.3.	Συγκριτική αξιολόγηση	101
4.4.4.	Επαλήθευση απόδοσης και λειτουργίας των "PCM Types" στην εξεταζόμενη περίπτωση	102
4.5.	Σύνοψη κεφαλαίου - Συμπεράσματα	104
	Βιβλιογραφία 4 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου	108
	<b>Μελέτη Περίπτωσης: Κτήριο ελαφριάς κατασκευής με ΥΑΦ στα δομικά στοιχεία</b>	111
5.	Εισαγωγή	112
5.1.	Μελέτη Περίπτωσης: Οικία ελαφριάς κατασκευής	112
5.2.	Γεωμετρία	113
5.3.	Κατασκευαστικά στοιχεία	113
5.3.1.	Εσωτερικοί και εξωτερικοί τοίχοι	113
5.3.2.	Οροφή και πάτωμα	115
5.3.3.	Θερμο-φυσικές ιδιότητες υλικών τοιχοποιίας	116
5.3.4.	Παραμετρική μελέτη	118
5.4.	Κλιματικές συνθήκες	119
5.4.1.	Παραμετρική μελέτη	120
5.5.	Εσωτερικά φορτία και σχετικές παράμετροι	123
5.5.1.	Υγρασία	123
5.5.2.	Θερμικά κέρδη από ανθρώπους και συσκευές	124
5.6.	Συνθήκες Λειτουργίας	124
5.6.1.	Διαφυγές λόγω αεροστεγανότητας	125
5.6.2.	Φυσικός αερισμός	126
5.6.3.	Κλιματισμός	126
5.6.4.	Συνδυασμός φυσικού και μηχανικού αερισμού	127
5.7.	Βέλτιστο Σενάριο Λειτουργίας	129
5.8.	Επαλήθευση υπολογιστικού εργαλείου στην μελέτη περίπτωσης	129
	Βιβλιογραφία 5 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου	132
	<b>Θερμική Συμπεριφορά κτηρίου ελαφριάς κατασκευής με ΥΑΦ στα δομικά στοιχεία – Παραμετρική Ανάλυση</b>	135
6.	Εισαγωγή	136
6.1.	Δείκτες αποτελεσμάτων	136
6.2.	Σενάριο αναφοράς (χωρίς ΥΑΦ)	136

6.3.	Τρέχουσα κατάσταση πιλοτικής κατοικίας (Βασικό Σενάριο)	139
6.3.1.	Σύγκριση με σενάριο αναφοράς	140
6.4.	Αποτελέσματα Παραμετρικών Μελετών	142
6.4.1.	Παραμετρική μελέτη - Αποτελέσματα: Θερμοκρασία αλλαγής φάσης του ΥΑΦ	143
6.4.2.	Παραμετρική μελέτη - Αποτελέσματα: Υγρασία	146
6.4.3.	Παραμετρική μελέτη - Αποτελέσματα: Συνθήκες λειτουργίας	148
6.4.4.	Παραμετρική μελέτη - Αποτελέσματα: Κλιματικές Συνθήκες	160
6.5.	Βέλτιστο Σενάριο Λειτουργίας	164
	Βιβλιογραφία 6 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου	168
	<b>Συμπεράσματα</b>	169
7.	Εισαγωγή	170
7.1.	Συμπεράσματα σχετικά με τη μεθοδολογία	170
7.2.	Συμπεράσματα σχετικά με τη μελέτη περίπτωσης	172
7.3.	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	174
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	177

# Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 Εξέλιξη των ενεργειακών πηγών από τον 15 <sup>ο</sup> αιώνα έως σήμερα (Grubler, 2008)	2
Εικόνα 1.2 Ιστορία της πρωτογενούς ενέργειας ανά πηγή [Nakićenović et al., 1998, Grubler, 2008]	3
Εικόνα 1.3 Παγκόσμια εκπομπή CO <sub>2</sub> (energy-related) ανά καύσιμο (Sieminski, 2013)	4
Εικόνα 1.4 Ποσοστά Ανεργίας για τις χώρες EU-18, EU-28, Ιαπωνία, ΗΠΑ (Eurostat, 2014)	5
Εικόνα 1.5 Προβλέψεις παγκόσμιοι μεριδίου ανά πηγή καυσίμου, έως το 2040 [IEA, 2013]	6
Εικόνα 2.1 Λειτουργία αποθήκευσης αισθητής (αριστερά) και λανθάνουσας (δεξιά) θερμότητας (Mehling and Cabeza, 2007)	20
Εικόνα 2.2 Διαχωρισμός φάσεων ένυδρου άλατος σε τρεις διακριτές φάσεις με διαφορετική συγκέντρωση νερού και πυκνότητας η καθεμία (δεξιά) και αντίστοιχο διάγραμμα φάσεων (αριστερά) (Paksoy, 2007).	24
Εικόνα 2.3 Τζελ ένυδρου άλατος για αντιμετώπιση του διαχωρισμού φάσεων: CaCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O με κυτταρίνη (Paksoy, 2007).	24
Εικόνα 2.4 Τυπική καμπύλη ψύξης PCM χωρίς και με υπόψυξη.	25
Εικόνα 2.5 Ταξινόμηση των Υλικών Αλλαγής Φάσης σε οργανικά, ανόργανα και εύτηκτα υλικά (Sharma et al., 2009)	28
Εικόνα 2.6 Θερμοκρασία και ενθαλπία τήξης για τις διάφορες ομάδες των ΥΑΦ (Li et al., 2012)	28
Εικόνα 2.7 Απεικόνιση του Phase Change Frame Wall (PCFW) (Zhang et al., 2005).	40
Εικόνα 2.8 Σχηματική αναπαράσταση του τούβλου με ΥΑΦ και τον οριακών συνθηκών (Alawadhi, 2008)	41
Εικόνα 2.9 Πειραματικοί οικίσκοι a) πλινθοδομής, b) πλινθοδομής με RT-27 c) πλινθοδομής με RT-27 και πολυουρεθάνη, d) πλινθοδομή με κυψελωτούς πλίνθους [58].	42
Εικόνα 2.10 Σχηματική απεικόνιση του Trombe Wall με ΥΑΦ (Tyagi and Buddhi, 2007)	45
Εικόνα 2.11 Στοιχεία του ηλιακού τοίχου (Mehling and Cabeza, 2008).	46
Εικόνα 2.12 Παράθυρα με PCM σκίαση (Mehling, 2004)	47
Εικόνα 2.13 Απεικόνιση ενεργειακά αποδοτικού PCM παραθύρου (Ismail and Henríquez, 2001)	47
Εικόνα 3.1 Σύγκριση θερμοκρασιακής διακύμανσης σε κτήρια βαριάς και ελαφριάς κατασκευής αντίστοιχα (Baker, 2009)	59
Εικόνα 3.2 Ιδεατή καμπύλη ενθαλπίας συναρτήσσει της θερμοκρασίας για ΥΑΦ	61
Εικόνα 3.3 Πρακτική καμπύλη ενθαλπίας συναρτήσσει της θερμοκρασίας για ΥΑΦ	61
Εικόνα 3.4 Περιοχές αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, κατά τη διαδικασία αλλαγής φάσης του υλικού	63
Εικόνα 3.5 Περιοχές αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, κατά τη διαδικασία αλλαγής φάσης του υλικού	64
Εικόνα 4.1 Εσωτερικοί και εξωτερικοί παράγοντες που επηρεάζουν ένα κτήριο (Soares et al., 2013)	79
Εικόνα 4.2 Μετάδοση θερμότητας σε πολυστρωματικό τοίχο, ο οποίος εμπεριέχει ΥΑΦ	86
Εικόνα 4.3 Οριακή συνθήκη στο τοίχωμα για τη μεταφορά θερμότητας	88
Εικόνα 4.4 Απεικόνιση της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε	90
Εικόνα 4.5 Πρότυπος οικισμός στην περιοχή Alicante στην Ισπανία	91
Εικόνα 4.6 Πιλοτικά σπίτια με φυσική πέτρα στην πρόσοψη	92

Εικόνα 4.7 Σχηματική απεικόνιση των επιπέδων τα οποία απαρτίζουν α) την τοιχοποιία και β) τη διαμόρφωση της πόρτας των πιλοτικών οικίσκων.	93
Εικόνα 4.8 Σχηματική απεικόνιση των αισθητήρων θερμότητας και των θέσεων που αυτοί κατέχουν σε έναν από τους πιλοτικούς οικίσκους	95
Εικόνα 4.9 Θερμοκρασιακή διακύμανση στο εσωτερικό των οικίσκων για τις δυο περιπτώσεις (με και χωρίς ΥΑΦ). Μέτρηση στο εσωτερικό της Ανατολικής πλευράς.	96
Εικόνα 4.10 Εξάρτηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας της φυσικής πέτρας με ΥΑΦ σε σχέση με θερμοκρασία	97
Εικόνα 4.11 Μετρήσεις θερμοκρασίας και υπολογιστικά αποτελέσματα ενοποιημένου μοντέλου - Πιλοτικά Σπίτια / περίπτωση χωρίς ΥΑΦ	99
Εικόνα 4.12 Μετρήσεις θερμοκρασίας και υπολογιστικά αποτελέσματα ενοποιημένου μοντέλου - Πιλοτικά Σπίτια / περίπτωση με ΥΑΦ	100
Εικόνα 4.13 Επίδραση εφαρμογής ΥΑΦ στην πρόσοψη με τη φυσική πέτρα	101
Εικόνα 4.14 Διακύμανση εσωτερικής θερμοκρασίας των ΥΑΦ οικίσκων με χρήση των μοντέλων: Type 204, Type 313, Type 260 και Ενοπ. Μοντέλο MATLAB-TRNSYS	102
Εικόνα 5.1 Φωτογραφία της πιλοτικής κατοικίας στην Αμφιλοχία	112
Εικόνα 5.2 Κατόψεις πιλοτικής κατοικίας α) ισόγειο και β) πρώτος όροφος	113
Εικόνα 5.3 Διαστρωμάτωση εξωτερικής τοιχοποιίας	114
Εικόνα 5.4 Διαστρωμάτωση εσωτερικής τοιχοποιίας για δωμάτιο με υψηλή υγρασία	114
Εικόνα 5.5 Διαστρωμάτωση εσωτερικής τοιχοποιίας με γυψοσανίδες ΥΑΦ	115
Εικόνα 5.6 Οι εσωτερικοί τοίχοι και τα χωρίσματα με γυψοσανίδες ΥΑΦ	115
Εικόνα 5.7 Διαστρωμάτωση της οροφής στο καθιστικό	116
Εικόνα 5.8 Διαστρωμάτωση πατώματος που εφάπτεται με το έδαφος	116
Εικόνα 5.9 Προσδιορισθείσα πειραματική καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας της γυψοσανίδας κατά (α) την θέρμανση και (β) την ψύξη (Mandilaras et al., 2013)	118
Εικόνα 5.10 Προσδιορισθείσα πειραματική καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας της γυψοσανίδας με αλλαγή φάση στους 26 οC	119
Εικόνα 5.11 Ετήσια διακύμανση της θερμοκρασίας για την περιοχή Στάνος στην Αμφιλοχία	120
Εικόνα 5.12 Ετήσια διακύμανση εξωτερικής θερμοκρασίας για την Αμφιλοχία, τιμές μετρήσεων από μετεωρολογικό σταθμό	121
Εικόνα 5.13 Σύγκριση διακύμανσης εξωτερικής θερμοκρασίας για την Αμφιλοχία, από τα δυο διαθέσιμα αρχεία	122
Εικόνα 5.14 Ετήσια διακύμανση εξωτερικής θερμοκρασίας για την Αθήνα, τιμές από αρχείο TRNSYS	123
Εικόνα 5.15 Διακύμανση θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα για το καθιστικό (μετρήσεις και προβλεπόμενες τιμές)	131
Εικόνα 5.16 Διακύμανση θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα για το υπνοδωμάτιο (μετρήσεις και προβλεπόμενες τιμές)	131
Εικόνα 6.1 Σενάριο Αναφοράς (χωρίς ΥΑΦ): ετήσια διακύμανση απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου (kWh)	138
Εικόνα 6.2 Σενάριο Αναφοράς (χωρίς ΥΑΦ): Κατανομή ετήσιου απαιτούμενου φορτίου (kWh) ανά δωμάτιο	138
Εικόνα 6.3 Βασικό σενάριο (με ΥΑΦ): Ψυκτικό φορτίο κατά τη διάρκεια του έτους	139

Εικόνα 6.4 Βασικό σενάριο (με ΥΑΦ): κατανομή απαιτούμενου φορτίου (kWh) ανά δωμάτιο και μήνα	140
Εικόνα 6.5 Κατανομή φορτίου ανά δωμάτιο: σύγκριση βασικού σεναρίου με σενάριο αναφοράς	141
Εικόνα 6.6 Προσδιορισθείσα πειραματική καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας της γυψοσανίδας με αλλαγή φάσης στους 26 οC	144
Εικόνα 6.7 Παραμετρική μελέτη θερμοκρασία αλλαγής φάσης: Ετήσιο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο, σύγκριση για γυψοσανίδες με ΥΑΦ στους 24 οC και στους 26 οC αντίστοιχα.	145
Εικόνα 6.8 Παραμετρική μελέτη θερμοκρασία αλλαγής φάσης: Κατανομή απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου για τα δωμάτια, σύγκριση για γυψοσανίδες με ΥΑΦ στους 24 οC και στους 26 οC αντίστοιχα.	146
Εικόνα 6.9 Παραμετρική μελέτη υγρασίας: Ετήσιο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο ανά δωμάτιο	147
Εικόνα 6.10 Παραμετρική μελέτη υγρασίας: Σύγκριση δυο περιπτώσεων	148
Εικόνα 6.11 Παραμετρική μελέτη Διαφυγών λόγω αεροστεγανότητας: Κατανομή απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου για τρεις περιπτώσεις	150
Εικόνα 6.12 Παραμετρική μελέτη Διαφυγών λόγω αεροστεγανότητας: Διακύμανση θερμοκρασιών εσωτερικού αέρα στο καθιστικό (LVR) για τρεις περιπτώσεις, με ενεργοποιημένη την ψύξη στους 26 οC	151
Εικόνα 6.13 Παραμετρική μελέτη Κλιματισμού: % Εξοικονόμησης ενέργειας για την περίπτωση ΚΛ1, ανά μήνα	155
Εικόνα 6.14 Παραμετρική μελέτη Κλιματισμού: % Εξοικονόμησης ενέργειας για την περίπτωση ΚΛ2, ανά μήνα	156
Εικόνα 6.15 Παραμετρική μελέτη Κλιματισμού: % Εξοικονόμησης ενέργειας για την περίπτωση ΚΛ3, ανά μήνα	156
Εικόνα 6.16 Σύγκριση διακύμανσης εξωτερικής θερμοκρασίας για την Αμφιλοχία, από τα δυο διαθέσιμα αρχεία	161
Εικόνα 6.17 Ετήσια διακύμανση εξωτερικής θερμοκρασίας για την Αθήνα, τιμές από αρχείο TRNSYS	162
Εικόνα 6.18 Παραμετρική μελέτη Κλιματικές Συνθήκες: Κατανομή ψυκτικού φορτίου ανά μήνα, με αρχείο εισόδου καιρού από Meteororm & από μετρήσεις.	163
Εικόνα 6.19 Βέλτιστα Σενάρια: Ψυκτικό φορτίο για την περίπτωση του εργαζόμενου ζευγαριού, για Αθήνα και Αμφιλοχία	166
Εικόνα 6.20 Βέλτιστα Σενάρια: Ψυκτικό φορτίο για την περίπτωση του ηλικιωμένου ζευγαριού, για Αθήνα και Αμφιλοχία	167

# Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 Κυριότερα κριτήρια επιλογής ΥΑΦ ((Tyagi and Buddhi, 2007, Soares et al., 2013)	22
Πίνακας 2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Οργανικών ΥΑΦ (Pasupathy et al., 2008, Sharma et al., 2009)	30
Πίνακας 2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Ανόργανων ΥΑΦ (Pasupathy et al., 2008, Sharma et al., 2009)	31
Πίνακας 2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Ανόργανων ΥΑΦ (Pasupathy et al., 2008, Sharma et al., 2009)	31
Πίνακας 3.1 Κύρια χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αριθμητικών μεθόδων επίλυσης προβλημάτων αλλαγής φάσης	68
Πίνακας 4.1 Θερμικές Ιδιότητες των στρωμάτων στον τοίχο και της πόρτας	93
Πίνακας 4.2 Θερμικές ιδιότητες του Bateig azul και του Bateig azul με ΥΑΦ.	94
Πίνακας 4.3 Συγκεντρωτικά ορισμένα από τα στοιχεία που εισήχθησαν στο TRNBuild για τη διεξαγωγή της προσομοίωσης.	98
Πίνακας 4.4 Συγκριτική αξιολόγηση μοντέλων προσομοίωσης ΥΑΦ στην πλατφόρμα TRNSYS	106
Πίνακας 5.1 Θερμοφυσικές ιδιότητες στρωμάτων τοιχοποιίας	117
Πίνακας 5.2 Σενάρια παραμετρικής μελέτης για τις προσομοιώσεις της πιλοτικής κατοικίας	128
Πίνακας 6.1 Θερμοφυσικές ιδιότητες απλής γυψοσανίδας σε σύγκριση με την γυψοσανίδα με ΥΑΦ, για το σενάριο αναφοράς	137
Πίνακας 6.2 Σενάριο Αναφοράς (χωρίς ΥΑΦ): Απαιτούμενο Ψυκτικό φορτίο, ανά μήνα και ετήσιο	137
Πίνακας 6.3 Βασικό σενάριο (με ΥΑΦ): Απαιτούμενο Ψυκτικό φορτίο, ανά μήνα και ετήσιο	139
Πίνακας 6.4 Ψυκτικό απαιτούμενο φορτίο για το βασικό σενάριο	141
Πίνακας 6.5 Θερμοκρασία εξωτερικού και εσωτερικού αέρα για κάθε δωμάτιο (μέση και μέγιστη)	142
Πίνακας 6.6 Παράμετροι και τιμές για κάθε παραμετρική ανάλυση	143
Πίνακας 6.7 Παραμετρική μελέτη θερμοκρασία αλλαγής φάσης: Απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο για 24 οC και 26 οC ανά μήνα και ετήσια	144
Πίνακας 6.8 Παραμετρική μελέτη Διαφυγών λόγω αεροστεγανότητας: Ετήσιο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο για τρεις περιπτώσεις	149
Πίνακας 6.9 Παραμετρική μελέτη Φυσικού Αερισμού: Εξεταζόμενες περιπτώσεις	152
Πίνακας 6.10 Παραμετρική μελέτη Φυσικού Αερισμού: Αριθμός ημερών ψύξης συνολικά και ανά δωμάτιο, για τρεις περιπτώσεις, σύγκριση με Β.Σ. και Σ.Α.	153
Πίνακας 6.11 Παραμετρική μελέτη Κλιματισμού: Εξεταζόμενες περιπτώσεις	154
Πίνακας 6.12 Παραμετρική μελέτη Κλιματισμού: Ετήσιο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο για δυο περιπτώσεις	154
Πίνακας 6.13 Παραμετρική μελέτη Συνδυασμού ΦΑ και ΚΛ: Εξεταζόμενες περιπτώσεις	157
Πίνακας 6.14 Παραμετρική μελέτη Συνδυασμού ΦΑ και ΚΛ: Ετήσιο ψυκτικό φορτίο και % εξοικονόμησης	158
Πίνακας 6.15 Παραμετρική μελέτη Συνδυασμού ΦΑ και ΚΛ: Ετήσιο ψυκτικό φορτίο και % εξοικονόμησης ανά δωμάτιο	159

Πίνακας 6.16 Παραμετρική μελέτη Συνδυασμού ΦΑ και ΚΛ: Αριθμός ημερών για ψύξη, ανά δωμάτιο και συνολικά	160
Πίνακας 6.17 Παραμετρική μελέτη Κλιματικές Συνθήκες: Μέση, χαμηλή και μέγιστη τιμή εξωτερικής θερμοκρασίας ανά μήνα για τα δυο αρχεία καιρού στην Αμφιλοχία	162
Πίνακας 6.18 Παραμετρική μελέτη Κλιματικές Συνθήκες: Ετήσιο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο για τρεις περιπτώσεις	163
Πίνακας 6.19 Βέλτιστα Σενάρια: Εξεταζόμενες περιπτώσεις	165
Πίνακας 6.20 Βέλτιστα Σενάρια: Ετήσιο ψυκτικό φορτίο και % εξοικονόμησης για τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν, σύγκριση με το Β.Σ. και το Σ.Α.	166









# Εισαγωγή

## Περιεχόμενα 1<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

---

1.	Εισαγωγή	2
1.1.	Το ενεργειακό πρόβλημα ως κίνητρο για έρευνα	2
1.2.	Σκοπός και στόχος της διατριβής	9
1.3.	Διάρθρωση διατριβής	10
1.4.	Δημοσιεύσεις	11
	<b>Βιβλιογραφία 1<sup>ου</sup> Κεφαλαίου</b>	<b>14</b>

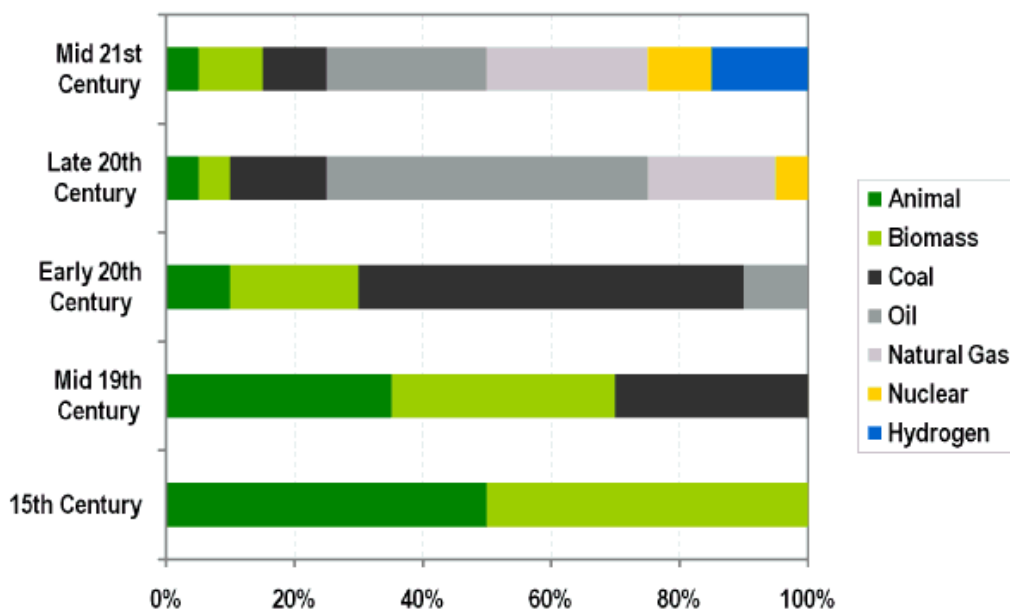
---

## 1. Εισαγωγή

Η ζωή δεν είναι παρά μια συνεχόμενη διαδικασία ενεργειακής μετατροπής και μετασχηματισμού. Η έννοια της ενέργειας συνδέεται με τον άνθρωπο από την πρώτη στιγμή της ύπαρξής του πάνω στη Γη. Τα επιτεύγματα της ανθρώπινης κοινωνίας έχουν επιτευχθεί σε μεγάλο βαθμό, μέσω της αποτελεσματικής και εκτεταμένης αξιοποίησης των διαφόρων μορφών ενέργειας, επικουρώντας στην επέκταση των ικανοτήτων και της εφευρετικότητας του ανθρώπου. Όμως η κρίση στον ενεργειακό τομέα, με όλες τις συνιστώσες που αυτή συνδέεται (πολιτικές, οικονομικές, περιβαλλοντικές), χρήζει επιτακτικά λύσεων. Ο σύγχρονος κόσμος έχει κάθε δυνατότητα, λαμβάνοντας υπόψιν τις νέες τεχνολογίες, να εκμεταλλευτεί τις μεγαλύτερες προκλήσεις που τον ταλανίζουν, με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει ουσιαστικό κέρδος, εξασφαλίζοντας για τις νέες γενιές ένα καλύτερο μέλλον στην οικονομία και στο περιβάλλον.

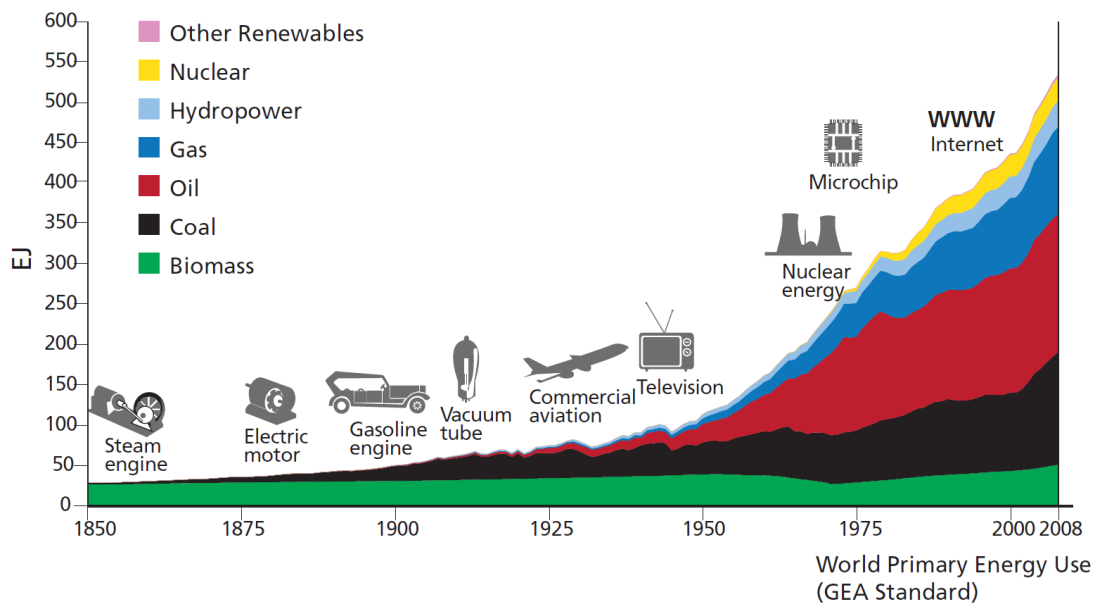
### 1.1. Το ενεργειακό πρόβλημα ως κίνητρο για έρευνα

Μέχρι τον 19ο αιώνα, οι ανάγκες του ανθρώπου και των κοινωνιών καλύπτονται εξολοκλήρου με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (νερόμυλοι και ανεμόμυλοι), όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.1. Η εκμετάλλευση της ενέργειας, η οποία είναι προς το παρόν άφθονη και οι ανθρώπινες απαιτήσεις ακόμη μικρές, είναι το όχημα, το οποίο μαζί με την ανάπτυξη των ψυχο-πνευματικών του ικανοτήτων του, δίνουν στην ανθρωπότητα τη δυνατότητα να εξελιχθεί. Η ενέργεια είναι απαραίτητη για τη συνέχιση της ανθρώπινης και της οικονομικής ανάπτυξης και θα καθορίσει την πορεία και την τεχνολογική εξέλιξη του ανθρώπου στο μέλλον, μόνο που οι πρώτες ανησυχίες τόσο για τις επιπτώσεις στον ίδιο και στο περιβάλλον, όσο και για την τελική κατάληξη αυτής της πορείας, πολλαπλασιάζονται και ενισχύονται με εκθετικούς ρυθμούς.



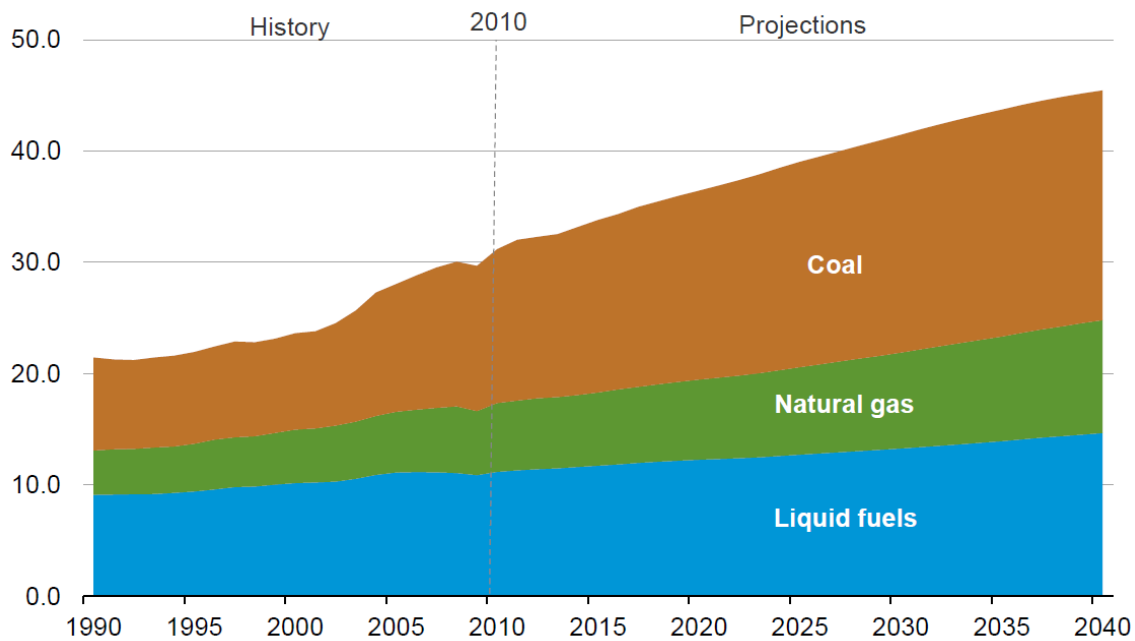
Εικόνα 1.1 Εξέλιξη των ενεργειακών πηγών από τον 15ο αιώνα έως σήμερα (Grubler, 2008)

Με την βιομηχανική επανάσταση, τα ορυκτά καύσιμα (γαιάνθρακες, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) γίνονται οι πρωτεύουσες πηγές ενέργειας για τις ανθρώπινες κοινωνίες. Η ενέργεια ενισχύει τις κοινωνίες και τροφοδοτεί τις σαρωτικές οικονομικές αλλαγές που έχουν αλλάξει τον παγκόσμιο χάρτη τους τελευταίους δύο αιώνες. Συνάμα με τις αλλαγές στην οικονομία, αλλάζει και το «μείγμα» της πρωτογενούς ενέργειας που τις τροφοδοτεί (βλ. Εικόνα 1.2). Η ανάπτυξη του σύγχρονου κόσμου μπορεί να ταυτοποιηθεί με τη συνεχώς αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση και τις νέες τεχνολογίες. Οι νέες μορφές ενέργειας και η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών για την καλύτερη εκμετάλλευση της παραγόμενης ενέργειας, μετατοπίζουν το ενεργειακό ισοζύγιο και κατ' επέκταση το «μείγμα» των διαθέσιμων πόρων. Η εικόνα δείχνει σαφώς αυτή την μετατόπιση της παγκόσμιας πρωτογενούς ενέργειας με δύο σαφείς στιγμές ανάπτυξης: η πρώτη αφορά την μετάβαση της εξάρτησης από τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας προς τον άνθρακα και στη συνέχεια στο πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Η δεύτερη φάση αφορά την εκμετάλλευση της υδροηλεκτρικής ενέργειας, της βιομάζας και της πυρηνικής ενέργειας κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, με συνδυασμένο μερίδιο σχεδόν 22%. Οι νέες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια είναι ακόμη δυσδιάκριτες στην εικόνα.



**Εικόνα 1.2 Ιστορία της πρωτογενούς ενέργειας ανά πηγή [Nakićenović et al., 1998, Grubler, 2008]**

Παρά την ταχεία αυτή αύξηση της συνολικής χρήσης ενέργειας, πάνω από τρία δισεκατομμύρια άνθρωποι εξακολουθούν να βασίζονται σε στερεά καύσιμα, όπως η παραδοσιακή βιομάζα, τα απόβλητα και το κάρβουνο για οικιακή χρήση και θέρμανση. Η προκύπτουσα ατμοσφαιρική ρύπανση οδηγεί σε πάνω από δύο εκατομμύρια πρόωρους θανάτους ετησίως, κυρίως γυναικών και παιδιών [Brunekreef and Holgate, 2002]. Τέλος, περίπου το 20% του παγκόσμιου πληθυσμού δεν έχει ακόμα πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια [IEA, 2013]. Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων είναι απαραίτητη για την αποφυγή μιας μελλοντικής προοπτικής με υψηλό οικονομικό και κοινωνικό κόστος, ακολουθούμενο με αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε όλες τις κλίμακες.



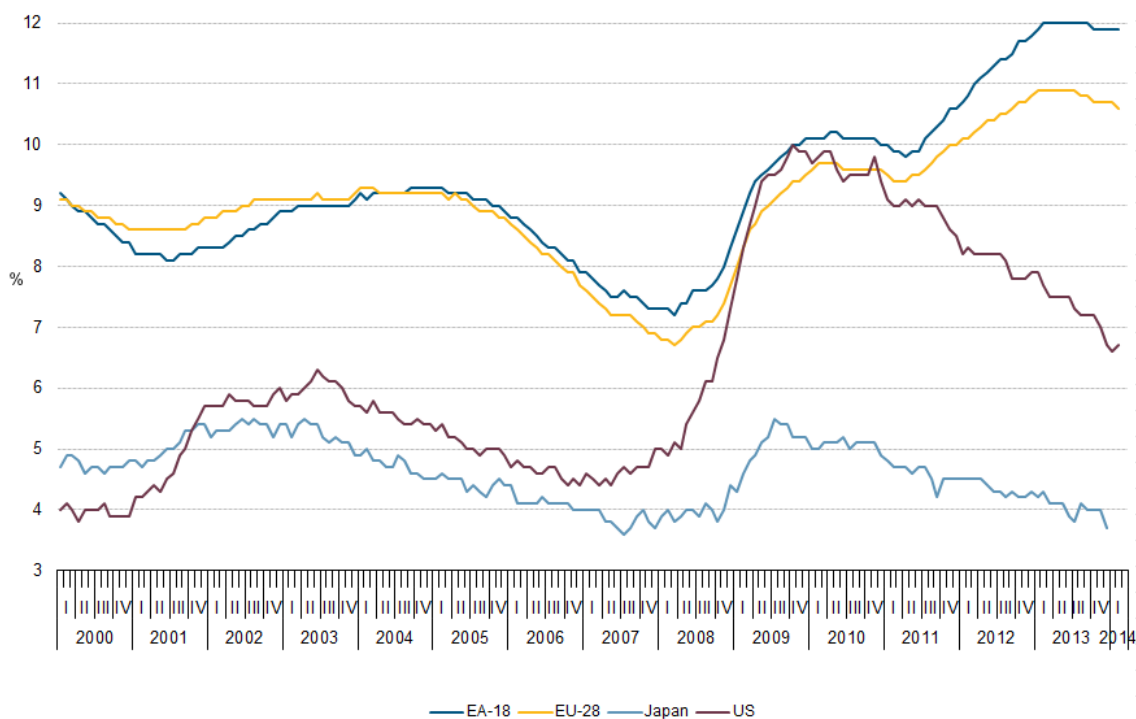
**Εικόνα 1.3 Παγκόσμια εκπομπή CO<sub>2</sub> (energy-related) ανά καύσιμο (Sieminski, 2013)**

Τα πράγματα όμως φαίνεται πως αρχίζουν να αλλάζουν τον τελευταίο καιρό καθώς δυο μεγάλες κρίσεις που ξεσπούν σε παγκόσμιο επίπεδο φαίνεται να φέρνουν καθοριστικές αλλαγές στον τομέα της ενέργειας.

Η πρώτη κρίση (1973) φέρνει την ανθρωπότητα αντιμέτωπη με μεγάλα περιβαλλοντικά προβλήματα. Η ενδεχόμενη αύξηση στην θερμοκρασία του πλανήτη πάνω από 5 °C στη διάρκεια του αιώνα είναι το σοβαρότερο από αυτά και δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί διαφορετικά παρά μόνο με περιορισμό των εκπομπών CO<sub>2</sub> που προκαλούν το πρόβλημα (βλ. Εικόνα 1.3). Σήμερα, το 95% της ατμοσφαιρικής ρύπανσης οφείλεται στη χρήση συμβατικών καυσίμων (άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) από τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Προκειμένου να μειωθούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου οι κυβερνήσεις πλέον αναγκάζονται να προχωρήσουν σε συμφωνίες με στόχο την εφαρμογή μιας αυστηρότερης, παγκόσμιας περιβαλλοντικής πολιτικής. Στην προ-Κιότο περίοδο, η ενεργειακή πολιτική στοχεύει κυρίως στην υλοποίηση ενός προσιτού, αξιόπιστου και ασφαλούς ενεργειακού συστήματος, προκειμένου να διευκολυνθούν οι ενεργειοβόρες βιομηχανικές διεργασίες. Το 1997 εκδόθηκε το πρωτόκολλο του Κιότο, σύμφωνα με το οποίο οι συμμετέχουσες χώρες δεσμεύονται για την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Συνεπώς, η αλλαγή του κλίματος και η ανάγκη μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου γίνονται σημαντικοί πυλώνες των ενεργειακών πολιτικών κατά την περίοδο μετά τη συνθήκη του Κιότο.

Ταυτόχρονα, η γεωπολιτική αστάθεια, όπως ο πόλεμος στο Ιράκ, η ενεργειακή κρίση κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 2000 και η διαμάχη περί του φυσικού αερίου μεταξύ της Ρωσίας και της Ουκρανίας αναδεικνύει τον διεθνή χαρακτήρα του ενεργειακού συστήματος και την εξάρτηση των μεμονωμένων χωρών από αυτό. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) πλέον θεωρούνται ως μέσο για τη μείωση των επιπτώσεων στο παγκόσμιο κλίμα

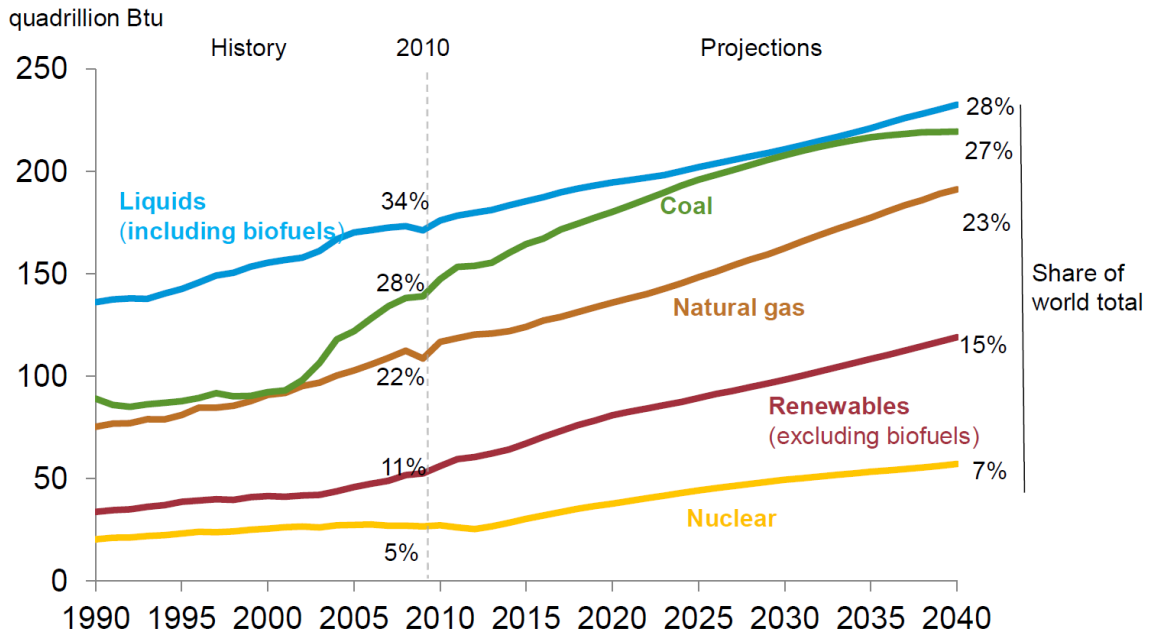
καθώς και στη μείωση της εξάρτησης των εθνικών ενεργειακών συστημάτων από την εισαγωγή ξένου πετρελαίου και φυσικού αερίου. Αυτή η υλοποίηση οδηγεί σε μια ώθηση στην έρευνα για τεχνολογίες που σχετίζονται με τις ανανεώσιμες πηγές. Μια δεύτερη κινητήρια δύναμη για την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών αποδεικνύεται, όσο κι αν φαίνεται απίθανο, η οικονομική κρίση. Οι επενδύσεις στην πράσινη τεχνολογία μεταφράζονται σε χιλιάδες νέες θέσεις εργασίας, ανακουφίζοντας την οικονομία και δίνοντας μια διέξοδο στο πρόβλημα (βλ. Εικόνα 1.4). Ήδη αρκετές χώρες προωθούν την πράσινη τεχνολογία ως λύση στα σοβαρά προβλήματα της απασχόλησης. Η βιομηχανία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας της Γερμανίας, που έχει τζίρο 192δισ. ευρώ και απασχολεί ήδη 250.000 ανθρώπους, αναμένεται να προσφέρει έως το 2020 περισσότερες θέσεις εργασίας από τη γερμανική αυτοκινητοβιομηχανία, τη μεγαλύτερη βιομηχανία της χώρας σήμερα. Ενώ η Μεγάλη Βρετανία σχεδιάζει να δαπανήσει έως το 2020, 80 δισ. ευρώ σε ανεμογεννήτριες, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο 160.000 νέες θέσεις εργασίας. Στην άλλη μεριά του Ατλαντικού, ο Μπάρακ Ομπάμα υπόσχεται να επενδύσει τη δεκαετία 2010-2020, 150 δισ. δολάρια σε μια καθαρή ενεργειακή οικονομική πολιτική, η οποία θα βοηθήσει τον ιδιωτικό τομέα να δημιουργήσει 5 εκατομμύρια νέες “πράσινες” θέσεις εργασίας, μετά την κρίση του 2008 [Negro et al., 2012].



**Εικόνα 1.4 Ποσοστά Ανεργίας για τις χώρες EU-18, EU-28, Ιαπωνία, ΗΠΑ (Eurostat, 2014)**

Ωστόσο, παρόλο που εδώ και πολλά χρόνια αρκετά χρήματα έχουν επενδυθεί προκειμένου να επιταχυνθεί η ανάπτυξη, διάδοση και εφαρμογή των τεχνολογιών ΑΠΕ, τα στοιχεία από διάφορες χώρες δείχνουν ότι πρόκειται για μια πολύ αργή και επίπονη διαδικασία [del Río and Unruh, 2007, Foxon et al., 2005, Negro et al., 2007, Rao and Kishore, 2010, Raven and Verbong, 2004, Söderholm et al., 2007]. Η οικοδόμηση των νέων και καινοτόμων ενεργειακών συστημάτων δεν είναι μια ομαλή και γρήγορη διεργασία (βλ. Εικόνα 1.5).

Πολύ συχνά, ανακύπτουν συγκεκριμένες δυσκολίες που παρεμποδίζουν την ανάπτυξη και εφαρμογή τους. Στην βιβλιογραφία, τέτοιες δυσκολίες χαρακτηρίζονται ως «αστοχίες του συστήματος» [Smith, 2000, Jacobsson and Johnson, 2000, Klein Woolthuis et al., 2005], «ατέλειες του συστήματος» [van Mierlo et al., 2010] ή «συστημικά προβλήματα» [Farla et al., 2010, Alkemade et al., 2011].



Εικόνα 1.5 Προβλέψεις παγκόσμιου μεριδίου ανά πηγή καυσίμου, έως το 2040 [IEA, 2013]

### 1.1.1. Ενεργειακό πρόβλημα και κτηριακός τομέας

Ενώ οι περισσότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου παράγονται από τον τομέα των μεταφορών, η μεγαλύτερη χρήση της ενέργειας στις αστικές περιοχές προέρχεται από τον κτηριακό τομέα [Norman et al., 2006]. Το 2009, ο οικιακός τομέας αντιστοιχούσε στο 18% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, και το 21% των συνολικών εκπομπών CO<sub>2</sub> στις Ηνωμένες Πολιτείες ((U.S. Energy Information Administration, 2011). Ο κρίσιμος ρόλος των αστικών περιοχών στη διαμόρφωση της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης δίνει αφορμή στην περαιτέρω εξέταση του κτηριακού τομέα σε μεγαλύτερη πλέον κλίμακα (Parshall et al., 2010). Όταν λαμβάνεται υπόψη ο κύκλος ζωής και το αποτύπωμα των εκπομπών, τα κτήρια ευθύνονται για ένα σημαντικό ποσοστό των εκπομπών που σχετίζονται με την ενέργεια. Εκτός από την ενέργεια που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία, λαμβάνεται υπόψη και η ενέργεια που χρησιμοποιείται στην εξόρυξη, την επεξεργασία, την κατασκευή και τη μεταφορά των οικοδομικών υλικών, καθώς και η ενέργεια που καταναλώνεται για την κατασκευή και τον παροπλισμό των κτηρίων. Έχει υπολογιστεί ότι τα κτήρια σε όλο τον κόσμο αντιπροσωπεύουν περίπου το ένα τρίτο των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου [Levine et al. 2007, Levermore, 2008], ενώ ο Clift [Clift, 2007] υποστηρίζει ότι οι μεγαλύτερες προοπτικές για τη μείωση των εκπομπών έγκειται στην βελτίωση του υφιστάμενου κτηριακού τομέα.



Στο πλαίσιο αυτό, η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έθεσε φιλόδοξους στόχους για την εξοικονόμηση ενέργειας και την αλλαγή του κλίματος ως το 2020: μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 20 %, αύξηση του μεριδίου των ΑΠΕ κατά 20 %, και βελτίωση κατά 20 % της ενεργειακής απόδοσης [EC – European Commission. COM, 2010]. Η ενεργειακή απόδοση και η εξοικονόμηση ενέργειας είναι τα πιο άμεσα και οικονομικά αποτελεσματικούς τρόπους για την αντιμετώπιση των πολιτικών για την ενέργεια και το κλίμα της ΕΕ, συμβάλλοντας παράλληλα στη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου και τη μείωση των ενεργειακών λογαριασμών για τους πολίτες [EC – European Commission. SEC, 2010, Beccali et al., 2007, Santamouris et al., 2013 ] .

Οι μεγαλύτερες δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας και καλύτερης ενεργειακής απόδοσης εντοπίζονται στον κτηριακό τομέα (τόσο στις οικίες όσο και στον τριτογενή τομέα) [Clift, 2007, Ardente et al., 2011], ο οποίος ευθύνεται για το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας της ΕΕ (42%), και τις αντίστοιχες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (35%) [EC – European Commission. SEC, 2007]. Ως εκ τούτου , η μείωση της χρήσης ενέργειας, η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στον κτηριακό τομέα αποτελούν σημαντικά μέτρα προς την εξοικονόμηση.

Η κατανάλωση ενέργειας στον οικιακό τομέα διακρίνεται σε μεγάλες ομάδες ανά τελική χρήση, όπως θέρμανση και ψύξη χώρων, ζεστό νερό χρήσης, ηλεκτρικές συσκευές και φωτισμός. Το μέγεθος της χρήσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το τοπικό κλίμα, την κατασκευή της οικίας, τις οικιακές συσκευές, τα συστήματα ελέγχου ενέργειας των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης, τις τοπικές αγορές ενέργειας καθώς και τα χαρακτηριστικά των νοικοκυριών και τις συμπεριφορές/συνθήκες λειτουργίας τους (Cramer et al., 1984, Hirst et al., 1982, Perez-Lombard et al., 2008, Shimoda et al., 2007 και Swan και Ugursal, 2009). Είναι μείζονος σημασίας η σαφής κατανόηση της οικιακής κατανάλωσης ενέργειας και είναι βασική αναγκαιότητα και προϋπόθεση μιας αποτελεσματικής ενεργειακής πολιτικής (Brounen et al., 2012 και Hirst, 1980).

### 1.1.2. Ενεργειακό πρόβλημα και «κτήρια μηδενικής κατανάλωσης»

Το ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί για τα κτήρια μηδενικής κατανάλωσης ή κτήρια μηδενικής καθαρής ενέργειας (Net zero energy buildings- NZEB). Από το 1970, η έννοια της καθαρής ενέργειας έχει εφαρμοστεί σε πολλούς διαφορετικούς τομείς, από τα ορυκτά καύσιμα [Cleveland, 2005] και την πυρηνική ενέργεια ως τις ΑΠΕ [Crawford and Treloar, 2004]. Η έννοια της καθαρής ενέργειας συγκρίνει το ποσό της ενέργειας που διοχετεύεται στην κοινωνία από μια τεχνολογία ως προς τη συνολική ενέργεια που απαιτείται για την μετατροπή της σε χρήσιμη μορφή (δηλ. πρώτη ύλη, εκμετάλλευση, μετατροπή, κλπ.). Στον κτηριακό τομέα, η καθαρή ενέργεια συχνά αναφέρεται στο ποσοστό της κατανάλωσης της ενέργειας σε ένα κτήριο ως προς την ενέργεια που παράγεται από συστήματα ΑΠΕ, τα οποία είναι συνδεδεμένα με αυτό. Οι όροι “ZEBs” (κτήρια μηδενικής ενέργειας) και “NZEBs” (κτήρια μηδενικής καθαρής ενέργειας) έχουν εγκριθεί από διάφορους ερευνητές [Li et al., 2013]. Λεπτομερείς ορισμοί και περιγραφές έχουν δώσει οι Marszał [Marszał et al., 2011] και Sartori [Sartori et al., 2012]. Αρκετές χώρες έχουν θεωρούν την εξάπλωση των ZEBs ως την λύση για την οικοδόμηση του

μέλλοντος με απώτερο σκοπό την επίτευξη των ενεργειακών εθνικών στόχων. Για παράδειγμα, το «Πρόγραμμα περί Τεχνολογίας Κτηρίων» (Building Technology Program) των ΗΠΑ, καθώς και η Οδηγία της ΕΕ για την «Ενεργειακή Απόδοση των Κτηρίων» καθιστούν σαφές την επένδυση σε ανάλογες λύσεις για τον κτηριακό τομέα [Sartori et al., 2012, “Directive 2010/31/EU (recast),” 2010, “Concerted Action | Energy Performance of Buildings Directive,” n.d.]]. Επιπλέον, μια σειρά από μελέτες περιπτώσεων, σε παγκόσμια κλίμακα, αποδεικνύουν ότι τα ZEBs είναι δυνατόν να βοηθήσουν στην μείωση της εξάντλησης των ενεργειακών πόρων και την υποβάθμιση του περιβάλλοντός μας [Minor and Hallinan, 2011, Marszal and Heiselberg, 2011, Fong and Lee, 2012, Zhu et al., 2009, Deng et al., 2011, Bojić et al., 2011].

Σε γενικές γραμμές, η μελέτη περί ZEBs υιοθετεί δύο στρατηγικές: i) την ελαχιστοποίηση της ανάγκης για χρήση ενέργειας στα κτίρια (κυρίως για θέρμανση και ψύξη), μέσω μέτρων-τεχνολογιών μεγαλύτερης ενεργειακής απόδοσης, και ii) την υιοθέτηση των ΑΠΕ και άλλων ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών για την κάλυψη των ελάχιστων ενεργειακών αναγκών [Li et al., 2013].

Στην διεύθυνση των ZEBs στην αγορά, τα μέτρα ενεργειακής απόδοσης είναι αναγκαία καθώς τις περισσότερες φορές, οι επιλογές για την επιτόπου παραγωγή ενέργειας είναι περιορισμένες (π.χ. ανεπαρκής χώρος για ηλιακά συστήματα [Fong and Lee, 2012]). Πολλές αναπτυγμένες, αλλά και αναπτυσσόμενες χώρες, έχουν τα δικά τους πρότυπα ενέργειας περί κτηρίων και οι εθνικές κατευθυντήριες γραμμές έχουν αναπτυχθεί ειδικά για να ταιριάζουν, μεταξύ άλλων, με τα τοπικά κλίματα καθώς και τις επικρατούσες συνήθειες σχεδιασμού και κατασκευή κατοικιών. Για παράδειγμα, η Ευρωπαϊκή Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτηρίων, η οποία θέτει απαιτήσεις μέχρι το τέλος του 2020 όλα τα νέα κτήρια στις χώρες της ΕΕ, να είναι «κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης» [“Directive 2010/31/EU (recast),” 2010]. Παρόμοιες απαιτήσεις θέτουν και το πρότυπο της ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) στις ΗΠΑ [ASHRAE Standard 90.1, 2007] και το Πρότυπο για την Ενεργειακή Απόδοση των Δημοσίων Κτηρίων στην Κίνα [Energy Foundation China, 2005].

Ως σημείο εκκίνησης, οι αρχιτέκτονες και οι μηχανικοί έχουν την τάση να αναπτύσσουν μέτρα για την ενεργειακή απόδοση στα κτήρια και τις υπηρεσίες του κτηρίου, έτσι ώστε να ανταποκρίνονται (μερικές φορές να υπερβαίνουν) τις ενεργειακές απαιτήσεις του κτηρίου. Σε γενικές γραμμές, τα μέτρα ενεργειακής απόδοσης που έχουν σημαντική επίδραση στην ενεργειακή κατανάλωση μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες (τα μέτρα αυτά μπορούν επίσης να εφαρμοστούν σε υφιστάμενα κτήρια) [Lam et al., 2008, Wan et al., 2011, Yildiz and Arsan, 2011 ]:

- Κέλυφος κτηρίου: θερμική μόνωση, θερμική μάζα, κουφώματα/υαλοπίνακες και πράσινες στέγες
- Εσωτερικές συνθήκες: συνθήκες λειτουργίας και εσωτερικά θερμικά φορτία (λόγω φωτισμού και εξοπλισμού/ηλεκτρικές συσκευές)
- ΗΜ Συστήματα: HVAC (θέρμανση, αερισμός και κλιματισμός), ηλεκτρολογικές υπηρεσίες (συμπεριλαμβανομένου του φωτισμού) και συστήματα μεταφοράς (ανελκυστήρες και κυλιόμενες κλίμακες).

Η ενεργειακή μελέτη των προαναφερθεισών παραμέτρων, αποτελεί κλειδί για την επίτευξη του στόχου των ZEBs. Ενώ μέχρι πρότινος, η εμπειρία και οι συνήθειες πρακτικές αποτελούσαν αιτιολόγηση των επιλογών για όλες τις παραπάνω παραμέτρους, με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, νέων υλικών και νέων απαιτήσεων είναι απαραίτητη η υπολογιστική προσομοίωση των κτηρίων κατά τη φάση ενεργειακής μελέτης. Η ραγδαία αύξηση των τελευταίων χρόνων στην επιστήμη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, επικουρεί στην χρήση των μεθόδων υπολογιστικής προσομοίωσης, μέσω εργαλείων ενεργειακής απόδοσης κτηρίων. Έτσι, ενώ αρχικά οι μέθοδοι υπολογιστικής προσομοίωσης τέτοιων εργαλείων αφορούν βασικές εφαρμογές και τεχνολογίες, με την πάροδο των χρόνων είναι επιτακτική η ανάγκη εξέλιξης των εργαλείων αυτών ώστε να καλύπτονται όλες οι νέες τεχνολογίες..

## 1.2. Σκοπός και στόχος της διατριβής

---

Με στόχο την επίτευξη ενός βιώσιμου μέλλοντος, τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου αλλά και την διατήρηση των συνθηκών άνεσης μέσα στα κτήρια, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, σε συνδυασμό με την παραγωγή πράσινης ενέργειας από τις ΑΠΕ, έρχονται να παίξουν καθοριστικό ρόλο, συμβάλλοντας στη βελτίωση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης ενός συστήματος. Η αποθήκευση ενέργειας συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος μέσω της εξομάλυνσης των φορτίων αιχμής αλλά και τη μετατόπιση τους. Η παρούσα μελέτη εστιάζει στη συμβολή της αποθήκευσης της λανθάνουσας θερμότητας, μέσω των Υλικών Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ), σε θέματα εξοικονόμησης και -μακροπρόθεσμα- μείωση της παγκόσμιας ρύπανσης του περιβάλλοντος.

Υπάρχει κάποια σύγχυση σχετικά με την πρακτικότητα της ενσωμάτωσης των ΥΑΦ στα κτήρια με στόχο τον έλεγχο της εσωτερικής θερμοκρασίας. Κατά καιρούς, έχουν ανακύψει σοβαρά ζητήματα σχετικά με πιθανούς ανασταλτικούς παράγοντες για την επιτυχή διάδοση και αποδοχή των ΥΑΦ. Για παράδειγμα, υπήρξαν ανησυχίες για την μακροπρόθεσμη σταθερότητα [Zalba et al., 2003], το υψηλό κόστος των υλικών ενθυλάκωσης [Inaba and Tu, 1997], τον εύφλεκτο χαρακτήρα [Banu et al., 1998], τη διάβρωση και τις διαρροές [Zalba et al., 2003, Kosny et al., n.d.]. Για όλους τους λόγους που προαναφέρθηκαν, είναι σημαντικότερο από ποτέ η υπολογιστική προσομοίωση και εξέταση της ενσωμάτωσης των ΥΑΦ μέσα στα δομικά στοιχεία των κτηρίων. Είναι απαραίτητο και αναγκαίο να είναι γνωστή η ενδεχόμενη επίδρασή τους στην μείωση των ψυκτικών ή θερμικών φορτίων, αλλά και η λεπτομερής λειτουργία του, ώστε να είναι δυνατή η επιλογή του κατάλληλου υλικού. Η παρούσα διατριβή πραγματεύεται αυτή ακριβώς τη διερεύνηση.

Η απόδοση των ΥΑΦ εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, με πιο αξιοσημείωτους τις κλιματικές συνθήκες, τη χρήση του κτηρίου και τα χαρακτηριστικά του ίδιου του ΥΑΦ. Είναι σημαντικό να μπορούν να προβλεφθούν σωστά όλοι οι παραπάνω παράγοντες, ώστε η θετική συμβολή του ΥΑΦ να είναι η μέγιστη. Το κύριο ερευνητικό ερώτημα της διατριβής είναι: "Πως ορίζεται η βέλτιστη εφαρμογή των ΥΑΦ σε κτήρια σε δεδομένη γεωγραφική περιοχή;"

Για να απαντηθεί το ερώτημα, θα ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα:

- Διερευνώνται τα μοντέλα και οι μέθοδοι που σχετίζονται με τη διαδικασία της αλλαγής φάσης .
- Αναπτύσσεται ένα υπολογιστικό μοντέλο για την προσομοίωση της λειτουργίας ΥΑΦ, το οποίο εμπεριέχεται σε δομικό υλικό .
- Το υπολογιστικό μοντέλο επικυρώνεται και επαληθεύεται ως προς την αξιοπιστία του με χρήση πειραματικών δεδομένων.
- Εφαρμογή του μοντέλου σε εφαρμογή περίπτωσης .
- Εξέταση της επίδρασης των σημαντικότερων παραμέτρων (κλιματικές συνθήκες, λειτουργία κτηρίου, ιδιότητες ΥΑΦ) ως προς την μείωση ψυκτικών φορτίων.
- Προτεινόμενη βέλτιστη λειτουργία για διαφορετικά σενάρια.

### 1.3. Διάρθρωση διατριβής

---

Η διατριβή περιλαμβάνει τα ακόλουθα επτά κεφάλαια, όπως περιγράφονται παρακάτω:

#### **Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή**

Το κεφάλαιο αυτό διαπραγματεύεται την ανάγκη μελέτη των ΥΑΦ, εντάσσοντας την έρευνα μέσα στο ευρύτερο ενεργειακό πρόβλημα, παγκοσμίως. Αναλύονται οι περιβαλλοντικοί λόγοι, οι οποίοι ωθούν τις εκάστοτε εθνικές κυβερνήσεις να θεσπίσουν Οδηγίες για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Περιγράφεται πως τα κτήρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο προς την πορεία αυτή και συγκεκριμένα, δίνεται έμφαση στον ρόλο των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, και ειδικότερα στα ΥΑΦ. Τέλος, συζητείται το επίκεντρο της έρευνας και παρουσιάζεται ο ερευνητικός σκοπός και στόχος της διατριβής καθώς και τα επιμέρους βήματα που ακολουθούνται.

#### **Κεφάλαιο 2. Υλικά Αλλαγής Φάσης**

Το κεφάλαιο αυτό παρέχει στον αναγνώστη τις βασικές πληροφορίες σχετικά με τη χρήση των ΥΑΦ ως συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας στα κτήρια. Περιγράφονται οι διάφοροι τύποι ΥΑΦ, τα υλικά και η ταξινόμηση τους. Γίνεται αναφορά στις μεθόδους μέτρησης των ιδιοτήτων των ΥΑΦ, ενώ παρουσιάζονται και οι τρόποι εισαγωγής τους μέσα στα δομικά στοιχεία. Τέλος, στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται και εξετάζονται προηγούμενες μελέτες που έχουν διεξαχθεί σχετικά με ΥΑΦ, εστιάζοντας σε μοντέλα που αναπτύχθηκαν για θερμική αποθήκευση, ρύθμιση της θερμοκρασίας και θέρμανση χώρου στον κτηριακό τομέα

#### **Κεφάλαιο 3. Μηχανισμοί Μετάδοσης Θερμότητας & Αριθμητική Επίλυση Αλλαγής Φάσης**

Το κεφάλαιο αυτό εξετάζει τη θεωρία, τις αριθμητικές μεθόδους και τις βασικές έννοιες που σχετίζονται με τη λειτουργία των υλικών αλλαγής φάσης. Έμφαση δίνεται στη μέθοδο περιγραφής της αλλαγής φάσης, παραθέτοντας και τις σχετικές εξισώσεις. Τέλος, γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθόδων αυτών, παρουσιάζοντας μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα.

#### **Κεφάλαιο 4. Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Εισαγωγής ΥΑΦ σε υπολογιστικά εργαλεία**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μεθοδολογία, η οποία αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του υπολογιστικού μοντέλου προσομοίωσης ΥΑΦ που εμπεριέχεται σε δομικό υλικό. Περιγράφονται οι κύριες εξισώσεις του κώδικα, ενώ το μοντέλο επικυρώνεται σε περίπτωση οικίσκου απλής γεωμετρίας, για τον οποίο υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα.

#### **Κεφάλαιο 5. Μελέτη Περίπτωσης: Κτήριο ελαφριάς κατασκευής με Υλικά Αλλαγής Φάσης στα δομικά στοιχεία**

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται αναλυτικά η μελέτη περίπτωσης που θα εξετασθεί. Πρόκειται για κτήριο ελαφριάς κατασκευής, για το οποίο υπάρχουν πειραματικές μετρήσεις, τόσο για την θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα όσο και για τις κλιματικές συνθήκες. Γίνεται λεπτομερής αναφορά στις παραμέτρους, οι οποίες δύναται να επηρεάσουν την απόδοση του ΥΑΦ, ενώ τέλος, το υπολογιστικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, επαληθεύεται στην μελέτη περίπτωσης.

#### **Κεφάλαιο 6. Θερμική Συμπεριφορά κτηρίου ελαφριάς κατασκευής με ΥΑΦ στα δομικά στοιχεία – Παραμετρική Ανάλυση**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, για κάθε παράμετρο, όπως αυτές ορίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αναλύονται τα αποτελέσματα μέσω γραφημάτων και πινάκων, δίνοντας έμφαση στην εξοικονόμηση ψυκτικού φορτίου, αναλόγως την περίπτωση. Τέλος, παρουσιάζονται τα βέλτιστα αποτελέσματα τεσσάρων αντιπροσωπευτικών σεναρίων που υιοθετήθηκαν.

#### **Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα**

Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει τα κυριότερα συμπεράσματα που συνεπάγονται από την ερευνητική μελέτη των προηγούμενων κεφαλαίων, η οποία αφορά τόσο την ανάπτυξη της μεθοδολογίας υπολογιστικού μοντέλου για προσομοίωση ΥΑΦ, το οποίο εμπεριέχεται σε δομικά στοιχεία, όσο και την εφαρμογή των ΥΑΦ για μείωση των ψυκτικών φορτίων ενός κτηρίου.

#### **1.4. Δημοσιεύσεις**

---

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διατριβής, προέκυψαν οι παρακάτω δημοσιεύσεις, τόσο σε Διεθνή περιοδικά ή συνέδρια με κρίση και Διεθνή σεμινάρια, όσο και σε Ελληνικά περιοδικά, συνέδρια και ημερίδες:

Stamatiadou, M., Katsourinis, D., Founti, M., Antonopoulos, K.A., 2013. Investigation of natural ventilation impact on the effectiveness of PCM boards installed in a Mediterranean Residential Building, in: Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable Energy Storage in Buildings. Presented at the SESB 2013, Trinity College, Dublin, Ireland, pp. 252–255.

Mandilaras, I., Stamatiadou, M., Katsourinis, D., Zannis, G., Founti, M., 2013. Experimental thermal characterization of a Mediterranean residential building with PCM gypsum board walls. *Building and Environment* 61, 93–103.

Romero-Sánchez, M.D., Guillem-López, C., López-Buendía, A.M., Stamatiadou, M., Mandilaras, I., Katsourinis, D., Founti, M., 2012. Treatment of natural stones with Phase Change Materials: Experiments and computational approaches. *Applied Thermal Engineering* 48, 136–143.

Stamatiadou, M., Katsourinis, D., Founti, M., 2012. Evaluation of simulation models integrating PCM into building walls using TRNSYS platform, in: *Proceedings of the 6th European Thermal Sciences Conference “Eurotherm 2012”*, September 04 - 07, 2012, Poitiers – Futuroscope, France

Stamatiadou, M., Katsourinis, D., Founti, M., Antonopoulos, K., 2011. Introducing a Composite Computational Model for the Investigation of Thermal Energy Storage in Building Walls Treated with PCMs, participation in Eurotherm 93 Seminar: Thermal energy storage and transportation: materials, systems and applications, 16-18 November 2011, Bordeaux – France.

Stamatiadou, M., Katsourinis, D., Founti, M., 2011, On the Development of Computational Models for the Integrated Simulation of Buildings Thermal Behaviour: Focusing on the Phase Change Material Effect, in: *Proceedings of the the 24th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems - ECOS2011*, July 4-7, 2011, Novi Sad, Serbia.

Romero-Sánchez, M.D., Stamatiadou, M., Katsourinis, D., Founti, M., López-Buendía, A.M., 2010. Experimental and Numerical Investigation of Thermal Energy Storage in Natural Stone Treated with PCMs, in: *Proceedings of 2010 CIB World Congress*, May 10-13, The Lowry, Salford Quays-United Kingdom

Stamatiadou M., Antonopoulos K., Founti M., 2009. Energy savings using floor tiles with Phase Change Materials in a S. European country, *Proceedings of the 11th International Conference on Thermal Energy Storage*, June 14-17 2009 Stockholm-Sweden, paper No.37

Σταματιάδου, Μ., Μανδηλαράς, Ι., Κατσουρίνης, Δ., Φούντη, Μ., 2011. Ανάπτυξη υπολογιστικού μοντέλου στο MATLAB για την προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς υλικών, εστιάζοντας στην επίδραση των Υλικών Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ), δημοσίευση άρθρου στην Τεχνική Επιθεώρηση – Τεύχος 235, Σελ. 17, Δεκέμβριος 2011

Σταματιάδου, Μ., Βουρλιωτάκης, Γ., Φούντη, Μ., Αντωνόπουλος, Κ., 2010. Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε κτήρια βασισμένο σε δυναμικά δομικά στοιχεία και ΑΠΕ, Παρουσίαση στο 4ο Εθνικό Συνέδριο: Η Εφαρμογή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας προς ένα Φιλόδοξο και Αξίопιστο Εθνικό Πρόγραμμα Δράσης, RENES 2010, 10-12 Μαΐου 2010, Αθήνα

Σταματιάδου, Μ., Βουρλιωτάκης, Γ., Φούντη, Μ., Αντωνόπουλος, Κ., 2010. Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε κτήρια βασισμένο σε δυναμικά δομικά στοιχεία και ΑΠΕ, άρθρο

στο Δελτίο Πανελληνίου Συλλόγου Διπλωματούχων Μηχανολόγων – Ηλεκτρολόγων (Π.Σ.Δ.Μ.-Η), Οκτώβριος 2010, Σελ. 8-20

Βουρλιωτάκης, Γ., Σταματιάδου, Γιαννόπουλος, Δ., Μ., Φούντη, Μ., 2010. Καινοτόμες τεχνολογίες δικτύωσης μονάδων μικρο-ΣΗΘ για ενεργειακά αποδοτικές και βιώσιμες συνοικίες, Παρουσίαση στο 4ο Εθνικό Συνέδριο: Η Εφαρμογή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας προς ένα Φιλόδοξο και Αξιοπίστο Εθνικό Πρόγραμμα Δράσης, RENES 2010, 10-12 Μαΐου 2010, Αθήνα

Βουρλιωτάκης, Γ., Σταματιάδου, Γιαννόπουλος, Δ., Μ., Φούντη, Μ., 2010. Καινοτόμες τεχνολογίες δικτύωσης μονάδων μικρο-ΣΗΘ για ενεργειακά αποδοτικές και βιώσιμες συνοικίες, άρθρο στο Δελτίο Πανελληνίου Συλλόγου Διπλωματούχων Μηχανολόγων – Ηλεκτρολόγων (Π.Σ.Δ.Μ.-Η), Νοέμβριος-Δεκέμβριος 2010, Σελ. 8-24

Σταματιάδου Μ., Γιαννόπουλος Δ., Παπαρσένος Γ. και Φούντη Μ. 2006, Επιλογή αλυσίδας παραγωγής υγρών βιοκαυσίμων στην Ελλάδα μέσω μεθοδολογίας πολυκριτηριακής υποστήριξης αποφάσεων, Ημερίδα IENE: «Υγρά Βιοκαύσιμα – Από το χωράφι στο αυτοκίνητο», 2006, Αθήνα.

- Alkemade, F., Hekkert, M.P., Negro, S.O., 2011. Transition policy and innovation policy: Friends or foes? *Environmental Innovation and Societal Transitions* 1, 125–129. doi:10.1016/j.eist.2011.04.009
- Ardente, F., Beccali, M., Cellura, M., Mistretta, M., 2011. Energy and environmental benefits in public buildings as a result of retrofit actions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 460–470. doi:10.1016/j.rser.2010.09.022
- ASHRAE Standard 90.1, 2007. ASHRAE Standard 90.1-2007, Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, SI Edition. ed. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
- Banu, D., Feldman, D., Haghghat, F., Paris, J., Hawes, D., 1998. Energy-Storing Wallboard: Flammability Tests. *Journal of Materials in Civil Engineering* 10, 98–105. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(1998)10:2(98)
- Beccali, M., Cellura, M., Mistretta, M., 2007. Environmental effects of energy policy in sicily: The role of renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, 282–298. doi:10.1016/j.rser.2005.02.001
- Bojić, M., Nikolić, N., Nikolić, D., Skerlić, J., Miletić, I., 2011. Toward a positive-net-energy residential building in Serbian conditions. *Applied Energy* 88, 2407–2419. doi:10.1016/j.apenergy.2011.01.011
- Brounen, D., Kok, N., Quigley, J.M., 2012. Residential energy use and conservation: Economics and demographics. *European Economic Review, Green Building, the Economy, and Public Policy* 56, 931–945. doi:10.1016/j.euroecorev.2012.02.007
- Brunekreef, B., Holgate, S.T., 2002. Air pollution and health. *The lancet* 360, 1233–1242.
- Cellura, M., Guarino, F., Longo, S., Mistretta, M., Orioli, A., 2013. The role of the building sector for reducing energy consumption and greenhouse gases: An Italian case study. *Renewable Energy* 60, 586–597. doi:10.1016/j.renene.2013.06.019
- Cleveland, C.J., 2005. Net energy from the extraction of oil and gas in the United States. *Energy* 30, 769–782. doi:10.1016/j.energy.2004.05.023
- Clift, R., 2007. Climate change and energy policy: The importance of sustainability arguments. *Energy, ECOS 05. 18th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation, and Environmental Impact of Energy Systems ECOS 05* 32, 262–268. doi:10.1016/j.energy.2006.07.031
- Concerted Action | Energy Performance of Buildings Directive, n.d.
- Cramer, J.C., Hackett, B., Craig, P.P., Vine, E., Levine, M., Dietz, T.M., Kowalczyk, D., 1984. Structural-behavioral determinants of residential energy use: Summer electricity use in Davis. *Energy* 9, 207–216. doi:10.1016/0360-5442(84)90108-7
- Crawford, R.H., Treloar, G.J., 2004. Net energy analysis of solar and conventional domestic hot water systems in Melbourne, Australia. *Solar Energy, Solar World Congress 2001* 76, 159–163. doi:10.1016/j.solener.2003.07.030
- Del Río, P., Unruh, G., 2007. Overcoming the lock-out of renewable energy technologies in Spain: The cases of wind and solar electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, 1498–1513. doi:10.1016/j.rser.2005.12.003
- Deng, S., Dalibard, A., Martin, M., Dai, Y.J., Eicker, U., Wang, R.Z., 2011. Energy supply concepts for zero energy residential buildings in humid and dry climate. *Energy Conversion and Management, 9th International Conference on Sustainable Energy Technologies (SET 2010)* 52, 2455–2460. doi:10.1016/j.enconman.2010.12.054
- Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), 2010.
- EC – European Commission. COM, 2010. 639 final - Energy 2020 – A strategy for competitive, sustainable and secure energy - European Environment Agency (EEA) [WWW Document]. URL <http://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2010-639-final-energy> (accessed 4.14.14).
- EC – European Commission. SEC, 2007. 1729, a lead market initiative for Europe. Action plan for sustainable construction, annex I.
- EC – European Commission. SEC, 2010. 1346 final, commission staff working document, state of play in the EU energy policy.
- Energy Foundation China, 2005. The National Standard Design Standard for Energy Efficiency of Public Building [WWW Document]. URL <http://www.efchina.org/Reports-en/the-national-standard-design-standard-for-energy-efficiency-of-public-building-amendment-supporting-research> (accessed 4.28.14).



- Estiri, H., 2014. Building and household X-factors and energy consumption at the residential sector: A structural equation analysis of the effects of household and building characteristics on the annual energy consumption of US residential buildings. *Energy Economics* 43, 178–184. doi:10.1016/j.eneco.2014.02.013
- Eurostat, 2014. Unemployment statistics - Statistics Explained [WWW Document]. URL [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics\\_explained/index.php/Unemployment\\_statistics](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Unemployment_statistics) (accessed 4.10.14).
- Evolution of Energy Sources [WWW Document], n.d. URL <http://people.hofstra.edu/geotrans/eng/ch8en/conc8en/evolenergy.html> (accessed 4.11.14).
- Fang, Z., Li, N., Li, B., Luo, G., Huang, Y., n.d. The effect of building envelope insulation on cooling energy consumption in summer. *Energy and Buildings*. doi:10.1016/j.enbuild.2014.03.030
- Farla, J., Alkemade, F., Suurs, R.A.A., 2010. Analysis of barriers in the transition toward sustainable mobility in the Netherlands. *Technological Forecasting and Social Change*, Issue includes a Special Section on “Infrastructures and Transitions” 77, 1260–1269. doi:10.1016/j.techfore.2010.03.014
- Fong, K.F., Lee, C.K., 2012. Towards net zero energy design for low-rise residential buildings in subtropical Hong Kong. *Applied Energy*, (1) Green Energy; (2) Special Section from papers presented at the 2nd International Energy 2030 Conf 93, 686–694. doi:10.1016/j.apenergy.2012.01.006
- Foxon, T.J., Gross, R., Chase, A., Howes, J., Arnall, A., Anderson, D., 2005. UK innovation systems for new and renewable energy technologies: drivers, barriers and systems failures. *Energy Policy* 33, 2123–2137. doi:10.1016/j.enpol.2004.04.011
- GEA Writing Team, 2012. *Global Energy Assessment Toward a Sustainable Future*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Grubler, A., 2008. Energy transitions. *Encyclopedia of Earth*, Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment, Washington, DC.
- Hirst, E., 1980. Review of data related to energy use in residential and commercial buildings. *Management Science* 26, 857–870.
- Hirst, E., Goeltz, R., Carney, J., 1982. Residential energy use: Analysis of disaggregate data. *Energy Economics* 4, 74–82. doi:10.1016/0140-9883(82)90024-X
- IEA, 2013. *World Energy Outlook 2013 (Executive Summary)*.
- Inaba, H., Tu, P., 1997. Evaluation of thermophysical characteristics on shape-stabilized paraffin as a solid-liquid phase change material. *Heat and Mass Transfer* 32, 307–312. doi:10.1007/s002310050126
- Jacobsson, S., Johnson, A., 2000. The diffusion of renewable energy technology: an analytical framework and key issues for research. *Energy Policy* 28, 625–640. doi:10.1016/S0301-4215(00)00041-0
- Klein Woolthuis, R., Lankhuizen, M., Gilsing, V., 2005. A system failure framework for innovation policy design. *Technovation* 25, 609–619. doi:10.1016/j.technovation.2003.11.002
- Kośny, J., Yarbrough, D., Miller, W., Petrie, T., Childs, P., Syed, A.M., Leuthold, D., n.d. PCM-Enhanced Building Envelopes in Current ORNL Research Projects.
- Lam, J.C., Wan, K.K.W., Tsang, C.L., Yang, L., 2008. Building energy efficiency in different climates. *Energy Conversion and Management* 49, 2354–2366. doi:10.1016/j.enconman.2008.01.013
- Levermore, G.J., 2008. A review of the IPCC Assessment Report Four, Part 1: The IPCC process and greenhouse gas emission trends from buildings worldwide. *Building Services Engineering Research and Technology* 29, 349–361. doi:10.1177/0143624408096263
- Levine, M., D. Ürge-Vorsatz, K. Blok, L. Geng, D. Harvey, S. Lang, G. Levermore, A. Mongameli Mehlwana, S. Mirasgedis, A. Novikova, J. Rilling, H. Yoshino, : Residential and commercial buildings. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 2007.
- Li, D.H.W., Yang, L., Lam, J.C., 2013. Zero energy buildings and sustainable development implications – A review. *Energy* 54, 1–10. doi:10.1016/j.energy.2013.01.070
- Marszal, A.J., Heiselberg, P., 2011. Life cycle cost analysis of a multi-storey residential Net Zero Energy Building in Denmark. *Energy* 36, 5600–5609. doi:10.1016/j.energy.2011.07.010
- Marszal, A.J., Heiselberg, P., Bourrelle, J.S., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., Napolitano, A., 2011. Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings* 43, 971–979. doi:10.1016/j.enbuild.2010.12.022
- Minor, J., Hallinan, K., 2011. ML-11-C006 Renewable Energy Design and Performance of LEED EB Platinum Building for Zero Energy Performance. *ASHRAE Transactions* 117, 43.
- Nakićenović, N., Grübler, A., McDonald, A., 1998. *Global Energy Perspectives*. Cambridge University Press.

- Negro, S.O., Alkemade, F., Hekkert, M.P., 2012. Why does renewable energy diffuse so slowly? A review of innovation system problems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 3836–3846. doi:10.1016/j.rser.2012.03.043
- Negro, S.O., Hekkert, M.P., Smits, R.E., 2007. Explaining the failure of the Dutch innovation system for biomass digestion—A functional analysis. *Energy Policy* 35, 925–938. doi:10.1016/j.enpol.2006.01.027
- Norman, J., MacLean, H.L., Kennedy, C.A., 2006. Comparing high and low residential density: Life-cycle analysis of energy use and greenhouse gas emissions. *Journal of Urban Planning and Development* 132, 10–21. doi:10.1061/(ASCE)0733-9488(2006)132:1(10)
- Parshall, L., Gurney, K., Hammer, S.A., Mendoza, D., Zhou, Y., Geethakumar, S., 2010. Modeling energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions at the urban scale: Methodological challenges and insights from the United States. *Energy Policy, Special Section on Carbon Emissions and Carbon Management in Cities with Regular Papers* 38, 4765–4782. doi:10.1016/j.enpol.2009.07.006
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., Pout, C., 2008. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings* 40, 394–398. doi:10.1016/j.enbuild.2007.03.007
- Rao, K.U., Kishore, V.V.N., 2010. A review of technology diffusion models with special reference to renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 1070–1078. doi:10.1016/j.rser.2009.11.007
- Raven, R., Verbong, G., 2004. Ruling out innovations - Technological regimes, rules and failures: The cases of heat pump power generation and bio-gas production in the Netherlands. *Innovation Management, Policy and Practice* 6, 178–198.
- Santamouris, M., Paravantis, J.A., Founda, D., Kolokotsa, D., Michalakakou, P., Papadopoulos, A.M., Kontoulis, N., Tzavali, A., Stigka, E.K., Ioannidis, Z., Mehilli, A., Matthiessen, A., Servou, E., 2013. Financial crisis and energy consumption: A household survey in Greece. *Energy and Buildings* 65, 477–487. doi:10.1016/j.enbuild.2013.06.024
- Sartori, I., Napolitano, A., Voss, K., 2012. Net zero energy buildings: A consistent definition framework. *Energy and Buildings* 48, 220–232. doi:10.1016/j.enbuild.2012.01.032
- Shimoda, Y., Asahi, T., Taniguchi, A., Mizuno, M., 2007. Evaluation of city-scale impact of residential energy conservation measures using the detailed end-use simulation model. *Energy* 32, 1617–1633. doi:10.1016/j.energy.2007.01.007
- Sieminski, A., 2013. Energy: Where We're Headed by 2040. EIA - US Census Bureau Public Information [WWW Document]. URL [http://www.census.gov/newsroom/cspan/world\\_energy/](http://www.census.gov/newsroom/cspan/world_energy/) (accessed 4.10.14).
- Smith, K., 2000. Innovation as a systemic phenomenon: Rethinking the role of policy. *Enterprise and Innovation Management Studies* 1, 73–102.
- Söderholm, P., Ek, K., Pettersson, M., 2007. Wind power development in Sweden: Global policies and local obstacles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, 365–400. doi:10.1016/j.rser.2005.03.001
- Swan, L.G., Ugursal, V.I., 2009. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 1819–1835. doi:10.1016/j.rser.2008.09.033
- U.S. Energy Information Administration, 2011. Annual Energy Review.
- Van Mierlo, B., Leeuwis, C., Smits, R., Woolthuis, R.K., 2010. Learning towards system innovation: Evaluating a systemic instrument. *Technological Forecasting and Social Change* 77, 318–334. doi:10.1016/j.techfore.2009.08.004
- Wan, K.K.W., Li, D.H.W., Lam, J.C., 2011. Assessment of climate change impact on building energy use and mitigation measures in subtropical climates. *Energy* 36, 1404–1414. doi:10.1016/j.energy.2011.01.033
- World Economic Forum, 2013. Energy Vision 2013- Energy transitions: Past and Future [WWW Document]. Energy Vision 2013 Energy transitions: Past and Future | World Economic Forum. URL <http://www.weforum.org/reports/energy-vision-2013-energy-transitions-past-and-future> (accessed 4.10.14).
- Yıldız, Y., Arsan, Z.D., 2011. Identification of the building parameters that influence heating and cooling energy loads for apartment buildings in hot-humid climates. *Energy* 36, 4287–4296. doi:10.1016/j.energy.2011.04.013
- Zalba, B., Marín, J.M., Cabeza, L.F., Mehling, H., 2003. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied thermal engineering* 23, 251–283.

- Zerefos, S.C., Tassas, C.A., Kotsiopoulos, A.M., Founda, D., Kokkini, A., 2012. The role of building form in energy consumption: The case of a prismatic building in Athens. *Energy and Buildings* 48, 97–102. doi:10.1016/j.enbuild.2012.01.014
- Zhu, L., Hurt, R., Correa, D., Boehm, R., 2009. Comprehensive energy and economic analyses on a zero energy house versus a conventional house. *Energy* 34, 1043–1053. doi:10.1016/j.energy.2009.03.010





# Υλικά Αλλαγής Φάσης

## Περιεχόμενα 2<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

---

2.	Εισαγωγή	20
2.1.	Αρχή Λειτουργίας ΥΑΦ	20
2.2.	Ιδιότητες Υλικών Αλλαγής Φάσης	21
2.3.	Ταξινόμηση των Υλικών Αλλαγής Φάσης	27
2.4.	Μέθοδοι μέτρησης θερμικών ιδιοτήτων ΥΑΦ	32
2.5.	Ενσωμάτωση ΥΑΦ σε παθητικά συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας	33
2.6.	Επισκόπηση των βασικών παθητικών συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (LHTES) με ΥΑΦ για κτηριακές εφαρμογές	35
2.7.	Σύνοψη κεφαλαίου - Συμπεράσματα	48
	Βιβλιογραφία 2ου Κεφαλαίου	50

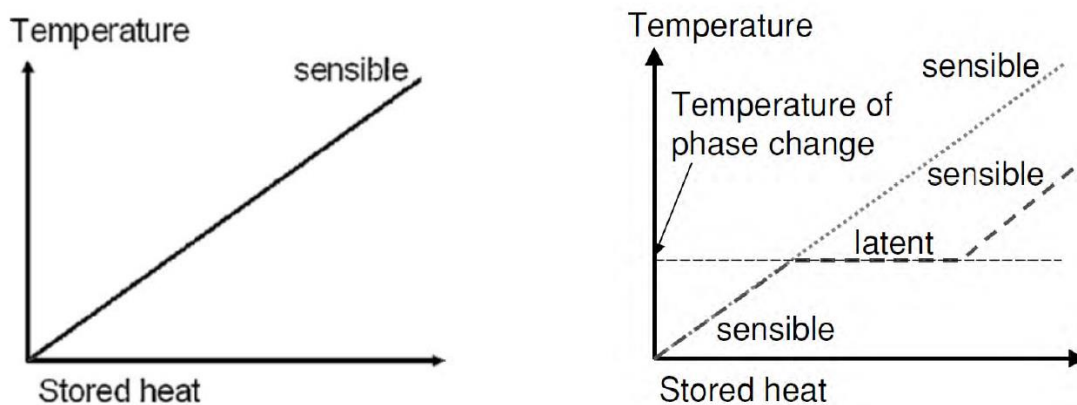
---

## 2. Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο δίνει μια γενική αναφορά στα Υλικά Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ), με έμφαση στα ΥΑΦ εκείνα, τα οποία χρησιμοποιούνται σε κτηριακές εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται ο ορισμός και η ταυτότητα των ΥΑΦ, οι κατηγορίες υλικών στις οποίες ανήκουν, στις επιθυμητές τους ιδιότητες, ενδεχομένως τα προβλήματα και μειονεκτήματα που εμφανίζουν και την αντιμετώπισή τους. Συνοπτική αναφορά γίνεται στα ΥΑΦ που κυκλοφορούν στην αγορά. Η επιλογή του κατάλληλου ΥΑΦ για συγκεκριμένο σύστημα ή εγκατάσταση αποθήκευσης θερμικής ενέργειας είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων. Το υλικό πρέπει να χαρακτηρίζεται από ορισμένες ιδιότητες θερμοδυναμικής, κινητικής και χημικής φύσεως, να αποτελεί συμφέρουσα οικονομική λύση και να διαθέτει εμπορική επάρκεια. Όμως, ένα υλικό που χρησιμοποιείται ως ΥΑΦ σπάνια συγκεντρώνει όλες τις απαραίτητες ιδιότητες ώστε να είναι πλήρως αποδοτικό, κάνοντας επιτακτική την ανάγκη για τη μελέτη της βέλτιστης λύσης για την περίπτωση, η οποία εξετάζεται.

### 2.1. Αρχή Λειτουργίας ΥΑΦ

Η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας (*Latent Heat Storage - LHS*) και η αποθήκευση αισθητής θερμότητας (*Sensible Heat Storage - SHS*) είναι οι δύο κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση θερμότητας στο κτηριακό περιβάλλον. Η θερμοχημική αποθήκευση θερμότητας είναι ακόμη μια υποσχόμενη τεχνική, ωστόσο, βρίσκεται ακόμη στο στάδιο της έρευνας. Η SHS είναι απλούστερη, φθηνότερη και πιο ώριμη τεχνολογία σε σύγκριση με την LHS και για αυτό άλλωστε χρησιμοποιείται περισσότερο στα κτήρια. Η αρχή της SHS είναι ότι η θερμότητα που προστίθεται ή αφαιρείται από ένα μέσο αποθήκευσης θερμότητας, οδηγεί σε μια αλλαγή στη θερμοκρασία του (βλ. Εικόνα 2.1). Παράδειγμα SHS είναι η θερμότητα που αποθηκεύεται στο τοιχώματα βαριάς κατασκευής (π.χ. σκυροδέματος) κατά τις ημέρες υψηλών θερμοκρασιών. Το μειονέκτημα της SHS είναι η χαμηλή ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας ανά όγκο του μέσου αποθήκευσης και συνεπώς η χαμηλή απόδοση του συστήματος (Mehling and Cabeza, 2007).



Εικόνα 2.1 Λειτουργία αποθήκευσης αισθητής (αριστερά) και λανθάνουσας (δεξιά) θερμότητας (Mehling and Cabeza, 2007)

Με τον όρο Υλικά Αλλαγής Φάσης - ΥΑΦ (**Phase Change Materials - PCM**) ορίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται ως μέσα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας (LHS). Η μεταφορά της θερμικής ενέργειας λαμβάνει χώρα όταν το υλικό μεταβαίνει από τη στερεή κατάσταση στην υγρή ή το αντίθετο. Η διαδικασία αυτή καλείται αλλαγή φάσης και συνιστά μία ενδόθερμη (ή εξώθερμη) διαδικασία, καθώς το ΥΑΦ απορροφά (ή απελευθερώνει) θερμότητα προς μετασχηματισμό του (Dincer and Rosen, 2002). Αρχικά, τα ΥΑΦ συμπεριφέρονται ως συμβατικά υλικά αποθήκευσης, η θερμοκρασία των οποίων αυξάνεται καθώς απορροφούν θερμότητα. Όταν η θερμοκρασία τους αγγίζει την τιμή της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης, παύει να αυξάνει, ενώ η απορρόφηση θερμότητας συνεχίζει. Η απορρόφηση και αποθήκευση της λανθάνουσας πλέον θερμότητας, προκαλεί την αναδιάρθρωση των χημικών δεσμών και κατ' επέκταση την τήξη και τον μετασχηματισμό του στερεού υλικού σε υγρό. Η θερμοκρασία του υλικού παραμένει σταθερή ωστόσο ολοκληρωθεί η διαδικασία της τήξης. (Sharma and Sagara, 2005, Sharma et al., 2009). Η αποθήκευση σε λανθάνουσα μορφή έχει το πλεονέκτημα της μεγαλύτερης θερμικής αποθήκευσης ανά μονάδα όγκου σε σύγκριση με τη SHS.

Η διαφορά της τάξης μεγέθους μεταξύ αισθητής και λανθάνουσας θερμικής ενέργειας ενός υλικού φαίνεται ξεκάθαρα με τη σύγκριση της αισθητής θερμικής ενέργειας του τσιμέντου (1.0 kJ/kgK) με την λανθάνουσα θερμότητα του χλωριούχου ασβεστίου (190.0 kJ/kg) κατά την αλλαγή φάσης (Ip, 1998). Συνεπώς, τα ΥΑΦ έχουν πολύ μεγαλύτερη δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε σύγκριση με τα παραδοσιακά υλικά κατασκευής και η ελευθερία που δίνει το εύρος θερμοκρασιών που παράγονται τα υλικά, δίνει την ευχέρεια εφαρμογής των ΥΑΦ σε πλήθος περιπτώσεων, ώστε η θερμοκρασία τήξης τους να είναι σύμφωνη με το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής τους. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται η ευκαιρία στην περαιτέρω έρευνα σχετικά με τους τρόπους αξιοποίησης αυτού του μοναδικού χαρακτηριστικού, το οποίο είναι ευεργετικό για τη μείωση της παγκόσμιας ρύπανσης του περιβάλλοντος, μέσω της μειωμένης ενεργειακής ζήτησης στα κτήρια.

Στις κτηριακές εφαρμογές, η διαφορά θερμοκρασίας που θα προκαλέσει την δέσμευση θερμότητας ή την απελευθέρωση της από τα ΥΑΦ κατά τις θερμές περιόδους, είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ημέρας και νύχτας. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η χαμηλή θερμοκρασία του περιβάλλοντος στερεοποιεί τα ΥΑΦ, ώστε να είναι σε θέση να αποθηκεύσουν τη θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η αρχή λειτουργίας τους είναι μια μορφή **free cooling**, επειδή δεν υπάρχει βοήθεια από μηχανολογικό εξοπλισμό (Zalba et al., 2004). Για τις περιπτώσεις κατά τις οποίες η διαφορά θερμοκρασίας δεν είναι επαρκής για να κρυώσει το ΥΑΦ, ένα ενεργό σύστημα (**active system**) πρέπει να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να βοηθήσει στη διατήρηση του κύκλου λειτουργίας (διαδικασία τήξης και στερεοποίησης).

## 2.2. Ιδιότητες Υλικών Αλλαγής Φάσης

---

Οι ιδιότητες που προϋποθέτουν την επιτυχή χρήση των ΥΑΦ σε συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (ειδικά αναφερόμενοι σε κτηριακές εφαρμογές) μπορούν να χωριστούν σε 5 βασικές κατηγορίες: ιδιότητες θερμοδυναμικές, φυσικές, κινητικές, χημικές και

οικονομικά στοιχεία των ΥΑΦ (Lane, 1986, Kenisarin and Mahkamov, 2007, Tyagi and Buddhi, 2007, Pasupathy et al., 2008, Sharma et al., 2009, Agyenim et al., 2010, Baetens et al., 2010, Cabeza et al., 2011, Osterman et al., 2012, Zhou et al., 2012). Από την άλλη, τα ΥΑΦ θα πρέπει να έχουν και ιδιότητες φιλικές προς το περιβάλλον, ώστε να μειώνουν το ενεργειακό αποτύπωμα των συστημάτων, μέσα στα οποία βρίσκονται, κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους (Soares et al., 2013). Ο Πίνακας 2.1 συνοψίζει τα κυριότερα κριτήρια επιλογής κατάλληλου ΥΑΦ.

**Πίνακας 2.1 Κυριότερα κριτήρια επιλογής ΥΑΦ ((Tyagi and Buddhi, 2007, Soares et al., 2013)**

<b>Θερμοδυναμικές και Φυσικές Ιδιότητες</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης στο επιθυμητό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας</li> <li>- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα και καλή μεταφορά θερμότητας</li> <li>- Υψηλή λανθάνουσα θερμότητα κατά την αλλαγή ανά μονάδα μάζας</li> <li>- Υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα και υψηλή πυκνότητα</li> <li>- Ομοιογενής τήξη και μακροπρόθεσμη θερμική σταθερότητα</li> <li>- Ισορροπία φάσεων και όχι διαχωρισμός</li> <li>- Μικρή μεταβολή του όγκου κατά την αλλαγή φάσης</li> <li>- Χαμηλή τάση ατμών σε θερμοκρασία λειτουργίας</li> </ul>
<b>Κινητικές Ιδιότητες</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Μικρό ή καθόλου φαινόμενο υπόψυξης</li> <li>- Υψηλός ρυθμός κρυστάλλωσης</li> </ul>
<b>Χημικές Ιδιότητες</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Πλήρης αναστρέψιμος κύκλος τήξης / στερεοποίησης</li> <li>- Μακροπρόθεσμη χημική σταθερότητα και καμία διάβρωση μετά από ένα μεγάλο αριθμό κύκλων τήξης / στερεοποίησης</li> <li>- Συμβατότητα με άλλα υλικά κατασκευής</li> <li>- Μη τοξικό, μη εύφλεκτο και μη εκρηκτικό</li> </ul>
<b>Οικονομικά Στοιχεία</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Σε αφθονία και εμπορικά διαθέσιμο</li> <li>- Καλή σχέση απόδοσης-τιμής</li> </ul>
<b>Περιβαλλοντικά Στοιχεία</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Μη ρυπογόνο</li> <li>- Εγκαταστάσεις διαχωρισμού από τα άλλα υλικά και δυνατότητα ανακύκλωσης</li> <li>- Περιορισμένες επιπτώσεις στο περιβάλλον</li> </ul>

### 2.2.1. Θερμοδυναμικές ιδιότητες (*thermodynamic properties*)

Η θερμοκρασία αλλαγής φάσης του υλικού που επιλέγεται για συγκεκριμένα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας πρέπει να ανήκει στο επιθυμητό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας. Για τα κτήρια, το εύρος αυτό θα επηρεάσει τις εσωτερικές συνθήκες άνεσης του χώρου.

Το ΥΑΦ θα πρέπει να διαθέτει υψηλή λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης, ειδικά σε ογκομετρική βάση, προκειμένου να ελαχιστοποιείται το φυσικό μέγεθος της ενεργειακής



μονάδας, ενώ η θερμική αγωγιμότητα του τόσο στην στερεά όσο και στην υγρή του φάση θα πρέπει να είναι ιδιαίτερος υψηλή προκειμένου να ενισχύονται οι λειτουργίες της φόρτισης και αποφόρτισης του ενεργειακού συστήματος (Tyagi and Buddhi, 2007).

Μιλώντας για ενεργειακά συστήματα γενικά, υπάρχουν δυο τρόποι βελτίωσης της μεταφοράς θερμότητας, ώστε να μεγιστοποιηθεί η θερμική αγωγιμότητα (Mehling and Cabeza, 2008, Cabeza et al., 2011):

- Με χρήση μεταφοράς μάζας, δηλαδή συναγωγής. Η τελευταία συμβαίνει κατά την υγρή φάση και γι' αυτό ενεργεί μονό όταν η θερμότητα μεταφέρεται στο ΥΑΦ. Όταν αφαιρείται, η στερεοποίηση συμβαίνει στην επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας.
- Με αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη αντικειμένων μεγαλύτερης αγωγιμότητας στο ΥΑΦ. Παραδείγματα αποτελούν τα μεταλλικά πλέγματα ή οι μεταλλικές πλάκες.

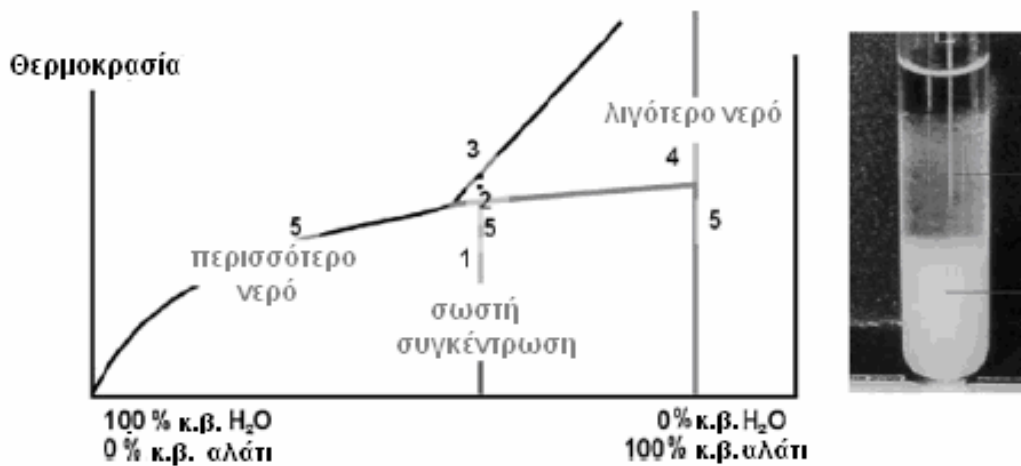
### 2.2.2. Φυσικές ιδιότητες (*physical properties*)

---

Είναι απαραίτητο, το ΥΑΦ, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί, να εξασφαλίζει την αμελητέας συχνότητας και μεγέθους μεταβολές του όγκου του υλικού (διαστολή-συστολή) κατά την αλλαγή φάσης και τη μικρή τάση ατμών στο εύρος λειτουργίας του. Ο διαχωρισμός φάσεων, αλλιώς γνωστός και ως δυσαρμονική τήξη, είναι πρόβλημα για τα PCM που αποτελούνται από διαφορετικά συστατικά. Στην Εικόνα 2.2 επεξηγείται το φαινόμενο με ένα ένυδρο άλας ως παράδειγμα (Paksoy, 2007).

Το ένυδρο άλας αποτελείται από δυο συστατικά, το αλάτι και το νερό. Αρχικά η απλή φάση του άλατος θερμαίνεται από το σημείο 1 (στέρεο) έως το 2. Από το σημείο 3 και πάνω, όπου η γραμμή του υγρού ξεπερνιέται, το υλικό είναι εξ ολόκληρου υγρό. Ανάμεσα στα σημεία 2 και 3 έχουμε το σχηματισμό 2 φάσεων, της υγρής και μιας μικρής ποσότητας φάσης με λιγότερο νερό (σημείο 4). Το αποτέλεσμα της διαφορετικής πυκνότητας των 2 αυτών φάσεων είναι ο μακροσκοπικός διαχωρισμός τους, αρά και οι διαφορές στις συγκεντρώσεις των χημικών που σχηματίζουν το ΥΑΦ (σημείο 5).

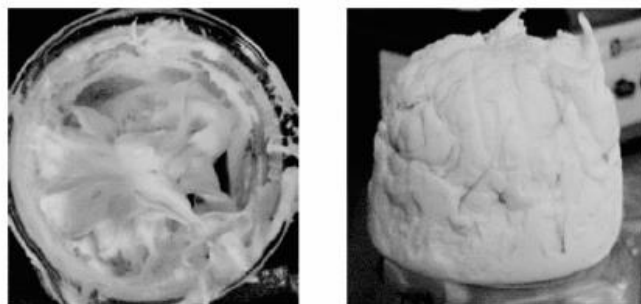
Μειώνοντας τη θερμοκρασία του μίγματος τόσο ώστε να φτάσει κάτω από τη θερμοκρασία τήξης, η λανθάνουσα θερμότητα που στερεοποιεί το PCM πολλές φορές δεν απελευθερώνεται. Αντιθέτως, για να απελευθερωθεί και να σχηματιστεί ξανά το στέρεο ΥΑΦ, θα χρειαζόταν σωστή συγκέντρωση των χημικών συστατικών σε ολόκληρο το μίγμα. Αυξάνοντας τη θερμοκρασία του μίγματος τόσο ώστε να μεταπέσει εξ ολόκληρου στην υγρή περιοχή (σημείο 3), οι διαφορετικές φάσεις αναμιγνύονται μεταξύ τους ξανά μέσω του φαινομένου της μοριακής διάχυσης. Η ανάμιξη του μίγματος μπορεί να πραγματοποιηθεί μετά από ώρες ή ακόμη και μέρες, αν δεν γίνει με τεχνητό τρόπο.



Εικόνα 2.2 Διαχωρισμός φάσεων ένυδρου άλατος σε τρεις διακριτές φάσεις με διαφορετική συγκέντρωση νερού και πυκνότητας η καθεμία (δεξιά) και αντίστοιχο διάγραμμα φάσεων (αριστερά) (Paksoy, 2007).

Ο διαχωρισμός φάσης μπορεί να είναι ένα σημαντικό εμπόδιο για τη χρήση των ΥΑΦ σε κτήρια. Για να ενσωματωθούν εύκολα τα ΥΑΦ σε κατασκευές κτηρίων, είναι απαραίτητη η σταθερή συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας (διαδικασία τήξης και στερεοποίησης), λόγω των χιλιάδων κύκλων που απαιτούνται κατά τη διάρκεια της ζωής ενός κτηρίου (π.χ. αρκετές δεκαετίες) (Sharma et al., 2009).

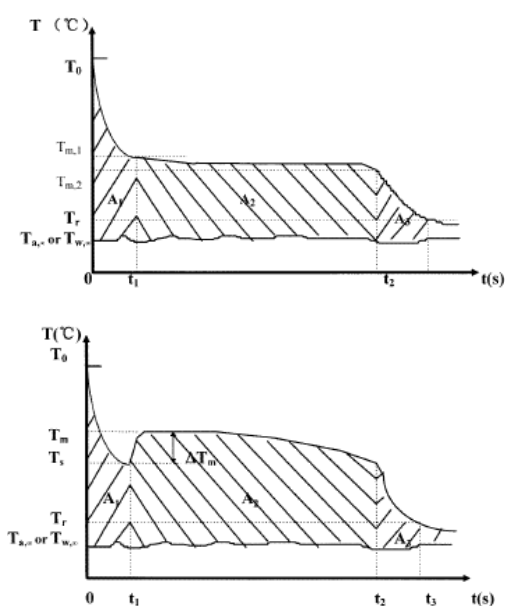
Ο διαχωρισμός φάσεων, τις περισσότερες φορές, μπορεί να ξεπεραστεί με τη χρήση ειδικών πρόσθετων υλικών μορφής τζελ (Paksoy, 2007). Τα τελευταία σχηματίζουν λεπτά πλέγματα μέσα στο ΥΑΦ σχηματίζοντας έτσι μικρούς θαλάμους που περιορίζουν το μακροσκοπικό διαχωρισμό των φάσεων με διαφορετικές πυκνότητες. Μίγματα αυτού του είδους, όταν θερμανθούν σε θερμοκρασία υψηλότερη της απαιτούμενης για τήξη, ομογενοποιούνται κανονικά μέσω μοριακής διάχυσης (βλ. Εικόνα 2.3). Σε κάποιες άλλες περιπτώσεις το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με την προσθήκη χημικών στο αρχικό ΥΑΦ. Τα χημικά αυτά αλλάζουν το διάγραμμα φάσεων του ΥΑΦ με τέτοιο τρόπο ώστε τελικά να αποτρέπουν εντελώς την εμφάνιση των διαφορετικών φάσεων.



Εικόνα 2.3 Τζελ ένυδρου άλατος για αντιμετώπιση του διαχωρισμού φάσεων:  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  με κυτταρίνη (Paksoy, 2007).

### 2.2.3. Κινητικές ιδιότητες (*kinetic properties*)

Είναι απαραίτητη η αμελητέα συχνότητα εμφάνισης του φαινομένου της υπόψυξης (*supercooling* ή *subcooling*). Θεωρητικά, η θερμοκρασία τήξης και η θερμοκρασία στερεοποίησης ενός ιδανικού ΥΑΦ ταυτίζονται. Πρακτικά όμως, πολλά ΥΑΦ δεν στερεοποιούνται αμέσως, όταν η θερμοκρασία γίνει μικρότερη από αυτήν της στερεοποίησης. Το φαινόμενο αυτό, κατά το οποίο ένα ρευστό ψύχεται σε θερμοκρασία χαμηλότερη από τη θερμοκρασία στερεοποίησης του χωρίς να στερεοποιείται, ονομάζεται υπόψυξη και κατά τη διάρκεια του το ΥΑΦ είναι σχετικά ασταθές, δηλαδή δεν βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία. Το φαινόμενο της υπόψυξης σε περισσότερους από μερικούς βαθμούς θα διατάρασσε την εύρυθμη απαγωγή της αποθηκευμένης θερμότητας και σε 5-10°C θα μπορούσε να την αναστείλει εντελώς (Cabeza et al., 2011).



Εικόνα 2.4 Τυπική καμπύλη ψύξης PCM χωρίς και με υπόψυξη.

Γενικά, ένα υγρό κάτω από το σημείο στερεοποίησης του διαμορφώνει κρυσταλλική δομή γύρω από έναν παράγοντα διαμόρφωσης κρυσταλλικής δομής (πυρήνα κρυστάλλου). Στην περίπτωση που αυτοί οι παράγοντες λείπουν, το υγρό παραμένει στην ίδια φάση μέχρι τη θερμοκρασία όπου παρατηρείται η ομογενής κρυσταλλική δομή της στερεής φάσης, δηλαδή πολύ χαμηλότερα από τη θερμοκρασία στερεοποίησης του. Η υπόψυξη εμφανίζεται κυρίως στα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης. Στην Εικόνα 2.4 παρουσιάζονται ενδεικτικά διαγράμματα υλικών αλλαγής φάσης χωρίς και με απόψυξη. Ερμηνεύοντας την καμπύλη ψύξης του PCM με υπόψυξη, παρατηρείται σαφώς η πτώση της θερμοκρασίας του υλικού κάτω από την αντίστοιχη θερμοκρασία στερεοποίησης του, πριν ακόμη ξεκινήσει η διαδικασία αλλαγής φάσης. Ο επαρκής ρυθμός κρυσταλλοποίησης ενισχύει την ανταπόκριση του συστήματος στις απαιτήσεις ανάκτησης θερμότητας από το σύστημα αποθήκευσης. Ο ρυθμός κρυσταλλοποίησης ενός ΥΑΦ θα πρέπει να είναι υψηλός, ώστε το υλικό να μην υποστεί υπόψυξη. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ΥΑΦ με υψηλό ποσοστό

κρυστάλλωσης έχουν ταχύτερη μετάβαση από υγρή σε στερεή φάση και υποφέρουν λιγότερο από υπόψυξη. Η μερική ή πλήρης καταστολή του φαινομένου επιτυγχάνεται με την προσθήκη ενός μέσου πυρήνωσης στο ΥΑΦ, το οποίο εξασφαλίζει το σχηματισμό της στερεής φάσης με ελάχιστη υπόψυξη.

#### 2.2.4. Χημικές ιδιότητες (*chemical properties*)

---

Το ΥΑΦ θα πρέπει να εμφανίζει χημική σταθερότητα κατά την διάρκεια των κύκλων λειτουργίας και οι ιδιότητές του να μην υποβαθμίζονται, εξαιτίας της χημικής αποσύνθεσης ή της απώλειας νερού. Ο κύκλος λειτουργίας (τήξη - στερεοποίηση) να είναι πλήρως αναστρέψιμος. Το υλικό δεν πρέπει να εμφανίζει τοξικό, εύφλεκτο και διαβρωτικό χαρακτήρα.

Πολύ σημαντικός παράγοντας στη λειτουργία ενός ΥΑΦ είναι να μην είναι διαβρωτικό, κυρίως απέναντι σε μεταλλικά υλικά. Δυστυχώς, τα ανόργανα υλικά στην πλειοψηφία τους είναι διαβρωτικά, οι παραφίνες όμως όχι. Η διαβρωτικότητα ενός ΥΑΦ μπορεί σε συνδυασμό με τις συνεχείς εναλλαγές θερμοκρασίας και φάσης, σε βάθος χρόνου (όχι υποχρεωτικά μεγάλο) να καταστρέψει τη συσκευασία του ΥΑΦ και κατ' επέκταση το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας. Σε πολλές θερμικές εφαρμογές με ΥΑΦ ο γραφίτης χρησιμοποιείται για την βελτίωση του φαινομένου της μεταφοράς θερμότητας. Παρ' όλ' αυτά ενισχύει και το φαινόμενο της οξειδωσης, όπου και όταν αυτό εμφανίζεται (Mehling and Cabeza, 2008).

Για κτηριακές εφαρμογές, πρέπει να υπάρχει απόλυτη συμβατότητα μεταξύ του ΥΑΦ και του δομικού υλικού στο οποίο ενσωματώνεται. Η ενσωμάτωση των ΥΑΦ διακρίνεται σε (Cabeza et al., 2011):

- Ενσωμάτωση σε κάψουλες διαμέτρου μεγαλύτερης του 1cm (**macro encapsulation**). Είναι η πιο δημοφιλής μέθοδος ενσωμάτωσης των ΥΑΦ. Έκτος από τη συγκράτηση του υγρού υλικού και την προστασία του από την επαφή με το περιβάλλον, η ενσωμάτωση αυτή έχει και άλλα πλεονεκτήματα: βελτιώνει τη συμβατότητα υλικού-περιβάλλοντος, διευκολύνει τη μεταχείριση του ΥΑΦ σε μια παραγωγή και περιορίζει τις εξωτερικές μεταβολές όγκου, πράγματα πολύ σημαντικό στις τεχνικές εφαρμογές.
- Ενσωμάτωση σε κάψουλες διαμέτρου μικρότερης από 1mm (**micro encapsulation**). Η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε πρόσφατα και έκτος από τα πλεονεκτήματα της προηγούμενης εμφανίζει και τα ακόλουθα: βελτιώνει τη μετάδοση της αποθηκευμένης θερμότητας προς το περιβάλλον και τη σταθερότητα του υλικού ως προς την κυκλική καταπόνηση.

#### 2.2.5. Οικονομικές ιδιότητες (*economic properties*)

---

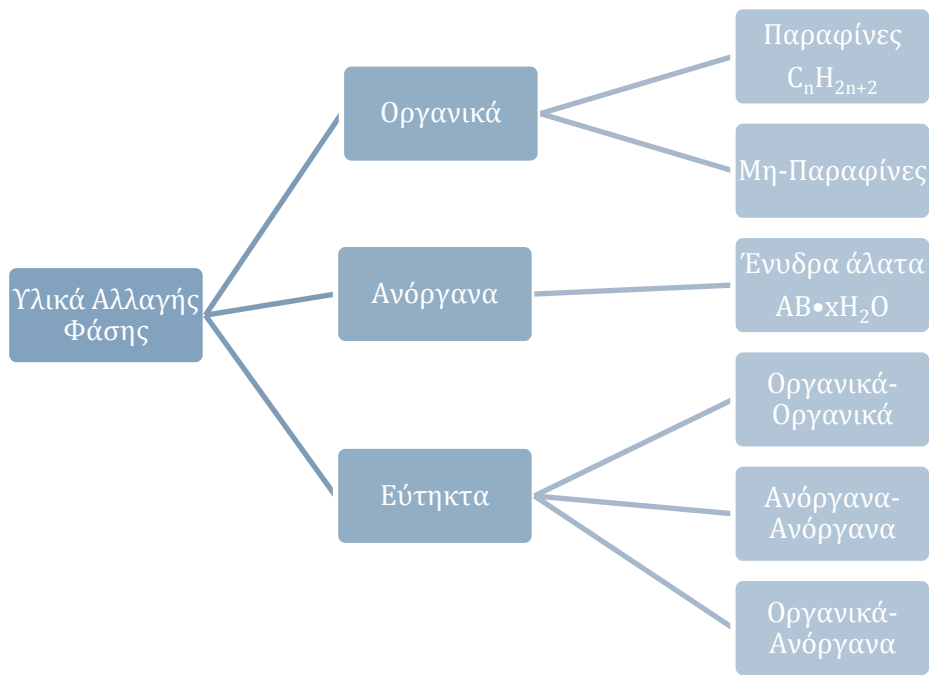
- Το ΥΑΦ πρέπει να χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος τόσο παραγωγής όσο και πώλησης.
- Η διαθεσιμότητά του πρέπει να είναι επαρκής.
- Ένα ΥΑΦ πρέπει να είναι ανακυκλώσιμο (Soares et al., 2013).

Το σημείο αλλαγής φάσης εντός του θερμοκρασιακού εύρους λειτουργίας είναι το κριτήριο το οποίο πληρείται από την πλειονότητα των ΥΑΦ. Πέραν τούτου, η πλειοψηφία των υλικών δεν ικανοποιεί όλα τα κριτήρια καταλληλότητας τα οποία θα τα καθιστούσαν ιδανικά ως μέσα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Κατά συνέπεια, πρέπει για συγκεκριμένη εφαρμογή να επιλέγεται το καταλληλότερο δυνατό ΥΑΦ και οι ιδιότητες στις οποίες υστερεί να αναπληρώνονται από ένα ορθώς σχεδιασμένο σύστημα αποθήκευσης. Για παράδειγμα, η παρεμβολή μεταλλικών πτερυγίων θα ενίσχυε την θερμική αγωγιμότητα του ΥΑΦ του ενδιαφέροντός μας ή το φαινόμενο της ανομοιόμορφης τήξης θα μπορούσε να αποφευχθεί με χρήση κατάλληλου πάχους αποθήκευσης.

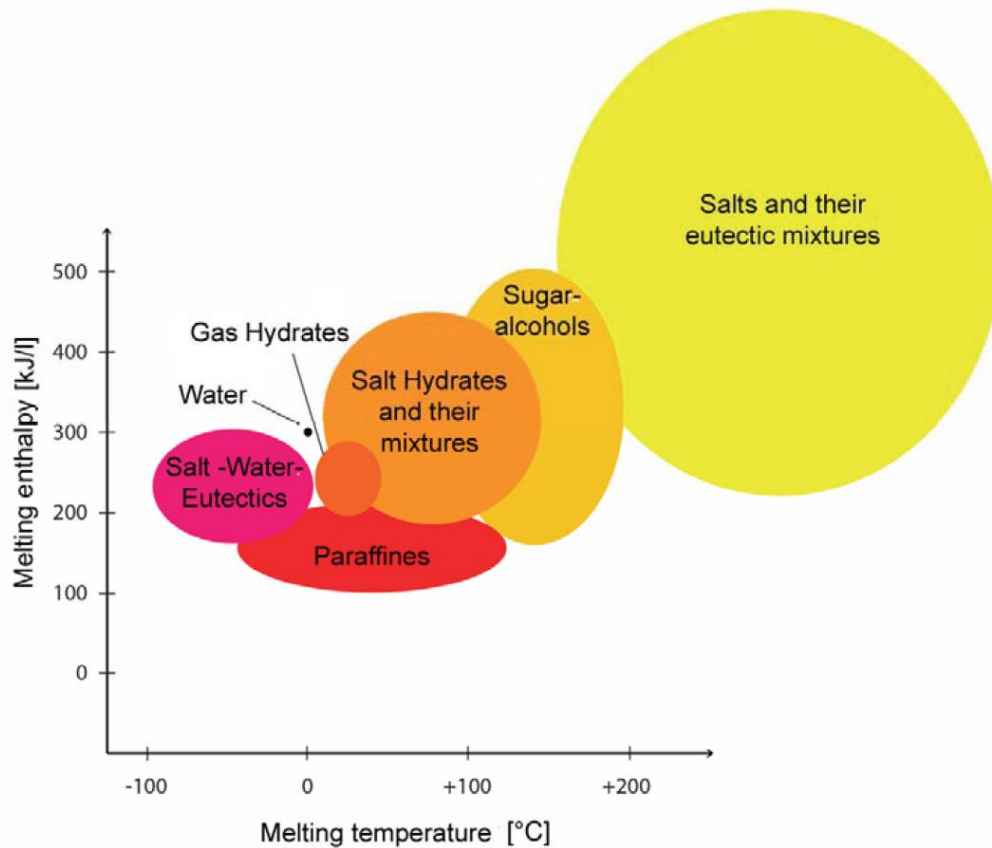
### 2.3. Ταξινόμηση των Υλικών Αλλαγής Φάσης

Η ταξινόμηση των υλικών αλλαγής φάσης μπορεί να γίνει με βάση πολλούς διαφορετικούς παράγοντες. Πρώτος και σημαντικότερος είναι η σύσταση, σύμφωνα με την οποία χωρίζονται σε οργανικά και ανόργανα υλικά. Άλλοι παράγοντες είναι οι εφαρμογές που καλύπτουν καθώς επίσης και το εύρος θερμοκρασιών που λαμβάνει χώρα η αλλαγή φάσης τους (W. R. Humphries, 1977). Από αυτές τις ομάδες, τα οργανικά και ανόργανα υλικά, καθώς και τα εύτηκτα μίγματα αποτελούν τις τρεις βασικές κατηγορίες υλικών, τα οποία έχουν αναγνωριστεί ως Υλικά Αλλαγής Φάσης με γνώμονα το σημείο τήξης τους και τη λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης (βλ. Εικόνα 2.5). Ευρέως πιο αποδεκτά είναι τα οργανικά και ανόργανα ΥΑΦ, κυρίως λόγω των ιδιοτήτων τους. Κάθε ομάδα έχει ένα τυπικό εύρος θερμοκρασίας τήξεως και ενθαλπία τήξης (βλ. Εικόνα 2.6). Τα οργανικά ΥΑΦ διαιρούνται περαιτέρω σε παραφίνες και μη-παραφίνες, όπου συμπεριλαμβάνονται υλικά όπως λιπαρά οξέα, εστέρες, αλκοόλες και γλυκόλες (Baetens et al., 2010), ενώ τα εύτηκτα μπορεί να διαιρεθούν σε οργανικούς και ανόργανους συνδυασμούς. Τα ανόργανα PCMs είναι τα ένυδρα άλατα.

Η Zalba et al (Zalba et al., 2003) ταξινομεί 118 ουσίες με δυνατότητες για χρήση ως ΥΑΦ (οργανικές ουσίες, ανόργανες ουσίες, οργανικά εύτηκτα μίγματα, ανόργανα εύτηκτα μίγματα, λιπαρά οξέα και μη-εύτηκτα μίγματα ανόργανης ουσίας). Ο Lane (Lane, 1983) προσδιορίζει 210 οργανικά, ανόργανα και εύτηκτα υλικά που υποβάλλονται σε αλλαγή φάσης χωρίς διαχωρισμός των συστατικών τους, κατάλληλα για τη χρήση τους ως δομικά υλικά και την ρύθμιση της θερμοκρασίας ενός κτηρίου. Ο Kuznik (Kuznik et al., 2011) περιγράφει 21 πειραματικές μελέτες, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε γυψοσανίδες με ΥΑΦ, με σκοπό να βελτιώσουν τις θερμικές τους ιδιότητες. Τα κριτήρια επιλογής των ΥΑΦ εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις θερμικές, φυσικές, χημικές ιδιότητες καθώς και τα οικονομικά τους στοιχεία, όπως είδαμε και παραπάνω.



Εικόνα 2.5 Ταξινόμηση των Υλικών Αλλαγής Φάσης σε οργανικά, ανόργανα και εύτηκτα υλικά (Sharma et al., 2009)



Εικόνα 2.6 Θερμοκρασία και ενθαλπία τήξης για τις διάφορες ομάδες των ΥΑΦ (Li et al., 2012)

### 2.3.1. Οργανικά Υλικά Αλλαγής Φάσης

---

Τα οργανικά ΥΑΦ είναι, σήμερα, τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά για κτηριακές εφαρμογές. Οι λόγοι είναι η πολύ καλή χημική σταθερότητα τους και το γεγονός ότι δεν διαβρώνονται και δεν είναι τοξικά, ενώ παράλληλα έχουν υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης. Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των οργανικών ΥΑΦ.

Τα οργανικά ΥΑΦ χωρίζονται σε δύο μεγάλες ομάδες : Παραφίνες και Μη - παραφίνες. Οι παραφίνες έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι διαθέσιμες σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών τήξεως, μεταξύ 10-70 °C. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι είναι χημικά αδρανείς και μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν σε δομικά υλικά. Κατά τη διάρκεια της τήξης υπό πίεση έχουν χαμηλή πίεση ατμού και δεν υφίστανται διαχωρισμό. Επίσης, με τη μέθοδο της Διαφορικής Θερμιδομετρίας Σάρωσης (DSC) έχει αποδειχθεί ότι η θερμική απόδοσή τους σχεδόν δεν επηρεάζεται από τον αριθμό των κύκλων τήξης-στερεοποίησης (Shukla et al., 2008). Η θερμική αποθήκευσης τους είναι συνήθως μεταξύ 120 – 210 kJ/kg, ενώ η μέση θερμότητα τήξης για παραφίνες κατάλληλες για κτηριακές εφαρμογές είναι 170 MJ/m<sup>3</sup> και είναι η μισή σχεδόν από την αντίστοιχη των ένυδρων αλάτων (Tatsidjodoung et al., 2013).

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα των παραφινών είναι η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα τους (περίπου 0,2 W/(mK)). Στην βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί διάφορες τεχνικές για να επιλυθεί αυτό το πρόβλημα, όπως εμπλουτισμός του υλικού με μεταλλικά αντικείμενα διαφόρων σχημάτων ή χρήση δοχείων και σωλήνων με πτερύγια με σκοπό την αύξηση του ρεύματος θερμότητας (Jong and Hoogendoorn, 1981, Zalba et al., 2003, Benmansour et al., 2006). Το δεύτερο σημαντικό μειονέκτημα των παραφινών είναι η μεγάλη μεταβολή του όγκου τους κατά την τήξη και στερεοποίηση. Τέλος, η ευφλεκτότητα των οργανικών PCMs είναι ένα άλλο πρόβλημα που έχει εμποδίσει την ευρύτερη εφαρμογή τους για τουλάχιστον τα τελευταία 20 χρόνια (Sharma et al., 2009).

Η κατηγορία των μη - οργανικών παραφινών περιλαμβάνει μια ποικιλία από χημικές ύλες, όπως λιπαρά οξέα, εστέρες, αλκοόλες και γλυκόλες (Hasnain, 1998). Τα υλικά που χρησιμοποιούνται κυρίως για εφαρμογές ΥΑΦ είναι τα λιπαρά οξέα (CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>2n</sub>COOH). Το εύρος της θερμοκρασίας τήξης τους κυμαίνεται μεταξύ 10-70 °C (Kenisarin and Mahkamov, 2007). Η ογκομετρική θερμότητα τήξης βρίσκεται ανάμεσα σε 128 – 183 MJ/m<sup>3</sup> και είναι συγκρίσιμη με αυτή των παραφινών (Tatsidjodoung et al., 2013).

Τα λιπαρά οξέα έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις παραφίνες, όπως μεγαλύτερη λανθάνουσα θερμότητα τήξης για κτηριακές εφαρμογές και μικρότερη μεταβολή του όγκου κατά την αλλαγή της φάση (Lane et al., 1975, Sharma et al., 2009). Παρόλα αυτά, μεγαλύτερο μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός της έντονης ευφλεκτότητας τους, όπως και στις παραφίνες.

Πίνακας 2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Οργανικών ΥΑΦ (Pasupathy et al., 2008, Sharma et al., 2009)

Οργανικά ΥΑΦ	Πλεονεκτήματα (+)
	<p>Υπάρχει δυνατότητα παραγωγής τους σε μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος. Διαθέτουν υψηλή τιμή λανθάνουσας θερμότητας.</p> <p>Χαρακτηρίζονται από χημική σταθερότητα και οι ιδιότητές τους συνήθως δεν υποβαθμίζονται.</p> <p>Η εμφάνιση των φαινομένων του super cooling και του διαχωρισμού των φάσεων συντελείται σε αμελητέα συχνότητα.</p> <p>Παρουσιάζουν άριστη συμπεριφορά στην κυκλική καταπόνηση.</p> <p>Συνήθως εμφανίζουν συμβατότητα με τα συμβατικά δομικά υλικά στα οποία ενσωματώνονται, ενώ δεν αποτελούν παράγοντες διάβρωσης και δεν αντιδρούν.</p> <p>Στην πλειοψηφία τους είναι ανακυκλώσιμα.</p>
	<p style="text-align: center;"><b>Μειονεκτήματα (-)</b></p>
	<p>Χαρακτηρίζονται από χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, γεγονός το οποίο αποτελεί ισχυρό μειονέκτημα για ένα ΥΑΦ. Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος, έχει μελετηθεί η χρήση μεταλλικών παραγόντων (μικρών μεταλλικών αντικειμένων, δοχείων, αγωγών και πτερυγίων), για την ενίσχυση του ρεύματος θερμότητας εντός του υλικού.</p> <p>Η ογκομετρική χωρητικότητα θερμικής αποθήκευσης είναι αρκετά χαμηλή.</p> <p>Διαθέτουν εύφλεκτο χαρακτήρα, πρόβλημα το οποίο μετριάζεται με την χρήση ενός κατάλληλα κατασκευασμένου μέσου συγκράτησης.</p> <p>Εξαιτίας του υψηλού κόστους των οργανικών ουσιών, μόνο οι παραφίνες τεχνικού βαθμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν, οι οποίες είναι ουσιαστικά μίγματα.</p>

### 2.3.2. Ανόργανα Υλικά Αλλαγής Φάσης

Τα ανόργανα υλικά που χρησιμοποιούνται ως ΥΑΦ είναι τα ένυδρα άλατα ( $AB \cdot xH_2O$ ). Σε σύγκριση με τα οργανικά ΥΑΦ έχουν καλύτερες θερμικές ιδιότητες, επειδή έχουν υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης (περίπου  $240 \text{ kJ/kg}$  ή  $350 \text{ MJ/m}^3$ ), σε συνδυασμό με την πολύ καλή θερμική αγωγιμότητα (περίπου  $0,5 \text{ W/(mK)}$ ) (Sharma et al., 2009). Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα είναι η χαμηλή τιμή τους, αλλά και το γεγονός ότι είναι μη εύφλεκτο, κάτι που τα καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικά για κτηριακές εφαρμογές (Tatsidjodoung et al., 2013). Το κύριο μειονέκτημα των ανόργανων ΥΑΦ είναι ο διαχωρισμός φάσης που παρουσιάζουν μετά από έναν αριθμό κύκλων τήξης-στερεοποίησης. Αυτό συμβαίνει επειδή κατά την τήξη, με τον καιρό, σχηματίζονται ιζήματα, καθιστώντας τη διαδικασία μη αναστρέψιμη μετά από έναν αριθμό κύκλων, με αποτέλεσμα τη μείωση της αποθηκευτικής τους ικανότητας (Sharma et al., 2009).



**Πίνακας 2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Ανόργανων ΥΑΦ (Pasupathy et al., 2008, Sharma et al., 2009)**

Ανόργανα ΥΑΦ	Πλεονεκτήματα (+)
	<p>Η υψηλή ογκομετρική χωρητικότητα αποθήκευσης.</p> <p>Η ευρεία διαθεσιμότητά τους.</p> <p>Η υψηλή θερμική τους αγωγιμότητα και λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης.</p> <p>Οι μικρές μεταβολές του όγκου τους κατά την μεταβολή της φάσης τους.</p> <p>Ο μη εύφλεκτος χαρακτήρας τους</p>
	Μειονεκτήματα (-)
	<p>Το πρόβλημα του subcooling και του διαχωρισμού των φάσεων κατά τον μετασχηματισμό του υλικού, καθώς και ο σχηματισμός ιζήματος, περιορίζουν το εύρος των εφαρμογών των συγκεκριμένων υλικών.</p> <p>Παρατηρείται χημική αστάθεια των υλικών αυτών, ενώ εμφανίζεται και κίνδυνος διάβρωσης του υλικού συσκευασίας.</p> <p>Κρίνεται απαραίτητη η χρήση προσθέτων πυρήνωσης.</p>

### 2.3.3. Εύτηκτα Μίγματα

Ως εύτηκτο μίγμα χαρακτηρίζεται η ένωση πολλών στερεών σε ορισμένο ποσοστό, ώστε να έχουν ένα σημείο τήξεως όσο το δυνατόν χαμηλό. Έχουν ένα ιδιαίτερα μικρό εύρος τήξεως, που τους επιτρέπει να χρησιμοποιούνται προκειμένου να διατηρηθεί μια συγκεκριμένη εσωτερική θερμοκρασία ενώ η ογκομετρική πυκνότητα αποθήκευσης τους είναι ελαφρώς υψηλότερη από εκείνη των οργανικών ενώσεων (Hasnain, 1998, Sharma et al., 2009). Τα εύτηκτα μίγματα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: (1) οργανικά - οργανικά, (2) Ανόργανα - ανόργανα, (3) οργανικά - ανόργανα. Σοβαρό μειονέκτημα είναι η ελλιπής-περιορισμένη βάση δεδομένων, ακόμα και για τις θερμικές και φυσικές τους ιδιότητες (Baetens et al., 2010).

**Πίνακας 2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Ανόργανων ΥΑΦ (Pasupathy et al., 2008, Sharma et al., 2009)**

Εύτηκτα ΥΑΦ	Πλεονεκτήματα (+)
	<p>Τα εύτηκτα υλικά σχεδόν πάντα τήκονται και στερεοποιούνται χωρίς διαχωρισμό, δεδομένου ότι ενώ στερεοποιούνται σχηματίζουν ένα μίγμα κρυστάλλων και ως εκ τούτου δεν δίνουν την ευκαιρία στα συστατικά να διαχωριστούν.</p> <p>Διέπονται από ικανοποιητική ογκομετρική πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας καθώς είναι ελάχιστα χαμηλότερη από την αντίστοιχη των οργανικών υλικών.</p>
	Μειονεκτήματα (-)
	<p>Η διαθεσιμότητά τους είναι περιορισμένη, καθώς η χρήση τους αποτελεί νέα τεχνική στον τομέα της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.</p>

## 2.4. Μέθοδοι μέτρησης θερμικών ιδιοτήτων ΥΑΦ

---

Η διαδικασία επιλογής του κατάλληλου ΥΑΦ είναι περίπλοκη, αλλά ζωτικής σημασίας για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας τόσο σε ενεργειακά συστήματα όσο και σε παθητικά κτήρια. Το επιλεγμένο ΥΑΦ θα πρέπει να έχει κατάλληλη θερμοκρασία τήξεως, επιθυμητή θερμότητα τήξης και θερμική αγωγιμότητα, στοιχεία που καθορίζονται από το είδος της εφαρμογής. Για αυτό το λόγο, οι μέθοδοι μέτρησης των θερμικών ιδιοτήτων των ΥΑΦ παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο. Υπάρχουν πολλές τεχνικές μέτρησης των θερμικών ιδιοτήτων, σε αυτήν την παράγραφο όμως, θα γίνει αναφορά στις τεχνικές που χρησιμοποιούνται πιο συχνά και απατώνται περισσότερες φορές στη βιβλιογραφία.

### 2.4.1. Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης - $\Delta\Theta\Sigma$ (*Differential Scanning Calorimetry -DSC*)

---

Η μέθοδος αυτή είναι από τις πιο διαδεδομένες μέθοδοι θερμικής ανάλυσης. Η βασική αρχή λειτουργίας στηρίζεται στη σύγκριση του, υπό εξέταση δείγματος, το οποίο θερμαίνεται ή ψύχεται, με ένα αδρανές σημείο αναφοράς. Κατά τη μέθοδο της  $\Delta\Theta\Sigma$ , το σήμα είναι ανάλογο της διαφοράς της θερμικής ισχύς μεταξύ του δείγματος και του σημείου αναφοράς, που απορροφάται κατά τη θέρμανσή τους. Στην περίπτωση των ΥΑΦ, γνωστή ποσότητα μάζας ΥΑΦ τοποθετείται σε κλειστό δοχείο με γνωστό όγκο. Αυτό το δοχείο, όπως και άλλο ένα ίδιο, άδειο, τοποθετούνται μέσα στο DSC.

Με τη  $\Delta\Theta\Sigma$  μπορούν να ληφθούν πολλές θερμικές ιδιότητες του δείγματος, όπως θερμότητα τήξης, θερμοχωρητικότητα και η θερμοκρασία τήξης/στερεοποίησης. Η μέθοδος DSC μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των θερμικών ιδιοτήτων των γυψοσανίδων με ΥΑΦ. Μέσω της δοκιμής, εκτός από τις προαναφερθείσες ιδιότητες μπορούν επίσης να ληφθούν η κατανομή των ΥΑΦ σε γυψοσανίδες, η θερμοχωρητικότητα των γυψοσανίδων με ΥΑΦ καθώς και η ενδεχόμενη επίδραση των πολλαπλών θερμικών κύκλων πάνω στις θερμικές ιδιότητες των ΥΑΦ. Εκτενέστερη αναφορά για τη  $\Delta\Theta\Sigma$  θα γίνει στο Κεφάλαιο 3, οπότε και θα μετρηθεί η καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας του υλικού/δείγματος, τόσο για την τήξη (θέρμανση) όσο και την πήξη (ψύξη) της διαδικασίας, για την περίπτωση που θα εξεταστεί.

### 2.4.2. Διαφορική Θερμική Ανάλυση- $\Delta\Theta\Lambda$ (*Differential thermal analysis-DTA*)

---

Στη δοκιμή  $\Delta\Theta\Lambda$ , η θερμότητα που εφαρμόζεται στο δείγμα και το σημείο αναφοράς παραμένουν ίδια (σε αντίθεση με τη χρήση της θερμοκρασίας στη δοκιμή  $\Delta\Theta\Sigma$ ). Η αλλαγή φάσης και οι άλλες θερμικές ιδιότητες ελέγχονται μέσα από την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εξεταζόμενου δείγματος και του δείγματος αναφοράς (Zhou et al., 2012).

### 2.4.3. Μέθοδος T-history (*T-history Method*)

---

Οι Zhang και Jiang (Zhang and Jiang, 1999), ανέλυσαν τους περιορισμούς των συμβατικών μεθόδων συμπεριλαμβανομένων της συμβατικής θερμιδομετρίας,  $\Delta\Theta\Sigma$  και  $\Delta\Theta\Lambda$ , και στη συνέχεια, πρότειναν μια νέα μέθοδο που ονομάζεται «T-history μέθοδος» για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας τήξεως, του βαθμού υπέρψυξης, τη θερμότητα της τήξης,

την ειδική θερμοχωρητικότητα και τη θερμική αγωγιμότητα των ΥΑΦ. Μέσω πειραματικών μετρήσεων ΥΑΦ με αυτή τη μέθοδο, φάνηκε ότι η μέθοδος προσεγγίζει πολύ καλά τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές που υπάρχουν στην βιβλιογραφία. Ο Hong (Hong et al., 2004) τροποποίησε τη μέθοδο βελτιώνοντας ορισμένες παραδοχές, οι οποίες είχαν υιοθετηθεί από τους Zhang και Jiang (Zhang and Jiang, 1999). Ο Κραββαρίτης (Kranvaritis et al., 2011) παρουσίασε πρόσφατα τη Μέθοδο Θερμικής Καθυστέρησης (***Thermal Delay Method***), η οποία είναι μια βελτιωμένη έκδοση της T-history μεθόδου. Η πιο σημαντική διαφορά μεταξύ της μεθόδου θερμικής καθυστέρησης και της T-history μεθόδου είναι ότι η πρώτη βασίζεται στη χρήση της θερμικής καθυστέρησης (δηλαδή τη διαφορά θερμοκρασίας που παρατηρείται) μεταξύ του ΥΑΦ και ενός υγρού αναφοράς σε οποιοδήποτε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ενώ η δεύτερη κάνει χρήση της χρονικής καθυστέρησης σε μια καθορισμένη θερμοκρασία.

## 2.5. Ενσωμάτωση ΥΑΦ σε παθητικά συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας

---

Υπάρχουν δύο κύριες μέθοδοι ενσωμάτωσης των ΥΑΦ σε ένα κτήριο με παθητικό τρόπο. Η πρώτη είναι η ενσωμάτωση του ΥΑΦ στην τοιχοποιία. Αυτή η εφαρμογή μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, όπως η άμεση αποθήκευση των ΥΑΦ σε κατασκευές τοίχων ή τον εμποτισμό των ΥΑΦ στα δομικά στοιχεία και υλικά κατασκευής. Η δεύτερη μέθοδος είναι η εφαρμογή των ΥΑΦ σε δομικά στοιχεία διαφορετικά από την τοιχοποιία, όπως το σύστημα εξαερισμού, το σύστημα σκίασης, ή ακόμη και τα έπιπλα. Σε αντίθεση με τα παθητικά συστήματα, υπάρχουν και τα ενεργητικά συστήματα, τα οποία μπορούν να εκμεταλλευτούν τις δυνατότητες των ΥΑΦ. Στην παρούσα ενότητα θα αναφερθούν οι τρόποι ενσωμάτωσης ΥΑΦ παθητικά συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, καθώς η εξέταση των ενεργητικών συστημάτων ξεφεύγει από τα πλαίσια της διατριβής.

### 2.5.1. Ενσωμάτωση ΥΑΦ σε νέα τοιχοποιία

---

Αυτή είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος ενσωμάτωσης ΥΑΦ σε κτήρια. Η ενσωμάτωση τους στο θερμικό περίβλημα μιας κατασκευής μπορεί να γίνει με αρκετούς τρόπους, όμως ο Hawes (Hawes et al., 1993) ανέφερε ότι οι τρεις πιο υποσχόμενες μέθοδοι για συμβατικές κατασκευές είναι η άμεση ενσωμάτωση, η εμφάνιση και η ενθυλάκωση (μικρο- και μακρο-). Η σωστή επιλογή μεθόδου πρόκειται για ένα σημαντικό ζήτημα, καθώς εξασφαλίζει τη συμβατότητα του ΥΑΦ με τα υπόλοιπα δομικά υλικά αλλά και την σταθερότητα της κατασκευής (Zhang et al., 2007).

#### ***Άμεση Ενσωμάτωση***

Πρόκειται για την πιο απλή μέθοδο ενσωμάτωσης ΥΑΦ σε δομικό υλικό. Το ΥΑΦ σε υγρή μορφή ή σε σκόνη ενσωματώνεται με τα δομικά υλικά (π.χ. γύψος ή τσιμέντο) κατά την διάρκεια της παραγωγής τους (Zhang et al., 2007, Zhou et al., 2012). Πρόκειται για φθηνή μέθοδο καθώς δεν χρειάζεται πρόσθετος εξοπλισμός κατά τη γραμμή παραγωγής. Κυριότερα προβλήματα θα μπορούσαν να αναφερθούν η διαρροή του ΥΑΦ και η ασυμβατότητα με την υπόλοιπη κατασκευή, οπότε και επηρεάζει τη σταθερότητα του

υλικού κατασκευής, ιδιαίτερα ενός υλικού σαν το σκυρόδεμα. Ο Feldman αναφέρει ότι σε εργαστηριακή κλίμακα είναι δυνατόν να παραχθεί γυψοσανίδα με τη μέθοδο της άμεσης ενσωμάτωσης, η οποία περιέχει ΥΑΦ 21-22% Butyl Stearate (Feldman et al., 1991). Χαρακτηριστικό του νέου αυτού παρασκευάσματος αποτελεί η μεγάλη θερμοχωρητικότητα η οποία εμφανίζεται δεκαπλάσια της θερμοχωρητικότητας της συμβατικής γυψοσανίδας, στοιχείο θετικό για την αποθήκευση και διακίνηση μεγαλύτερου ποσού θερμότητας στην εγκατάσταση

### **Εμβάπτιση**

Η μέθοδος της εμβάπτισης του δομικού στοιχείου σε ΥΑΦ αποτελεί ίσως την απλούστερη μέθοδο ενσωμάτωσης του υλικού. Κατά την διαδικασία της απορρόφησης, το ΥΑΦ θερμαίνεται σε ειδική φιάλη και υπό ελεγχόμενη θερμοκρασία και συναντά σε υγρή μορφή το πορώδες δομικό υλικό σε δεξαμενή ελεγχόμενης θέρμανσης όπου και πραγματοποιείται η προσρόφησή του. Εν συνεχεία το εμποτισμένο υλικό απομακρύνεται και αφήνεται να στεγνώσει και να αποβάλει το περιττό ΥΑΦ. Αποτέλεσμα της διαδικασίας αποτελεί ένα φαινομενικά ξηρό, αλλά πλήρως εμπλουτισμένο δομικό υλικό (Kaasinen, 1992, Baetens et al., 2010). Όπως και στην άμεση ενσωμάτωση, προβλήματα διαρροής και μακροπρόθεσμη αλληλεπίδραση με τα υπόλοιπα στοιχεία της κατασκευής έχουν παρατηρηθεί (Schossig et al., 2005). Η άμεση ενσωμάτωση και η εμβάπτιση έχουν διαφορετικές διαδικασίες λειτουργίας, αλλά και οι δύο αφορούν την ενσωμάτωση ΥΑΦ απευθείας στα συμβατικά υλικά κατασκευής.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη που διεξήγαγε ο Mehling (Mehling et al., 2002) με αντικείμενο την ενσωμάτωση ΥΑΦ σε μίγμα ξύλου κι ελαφρού σκυροδέματος, παρασκευάσμα το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή εσωτερικής κι εξωτερικής τοιχοποιίας κτηρίου. Τα αποτελέσματα της ενσωμάτωσης έδειξαν πως με την απορρόφηση των ΥΑΦ από δομικά υλικά, τα δεύτερα αποκτούν μεγαλύτερη αγωγιμότητα και θερμοχωρητικότητα, ενώ δεν επηρεάζονται οι μηχανικές τους ιδιότητες.

### **Ενθυλάκωση**

Η μακρο-ενθυλάκωση (**macro encapsulation**) και η μικρο-ενθυλάκωση (**micro encapsulation**) αποτελούν τις δύο κύριες συνιστώσες της μεθόδου της ενθυλάκωσης. Ο Regin (Regin et al., 2008) αναφέρει ότι τα μέσα συγκράτησης του ΥΑΦ πρέπει:

- να πληρούν τις απαιτήσεις αντοχής, ευελιξία, αντοχή στη διάβρωση και θερμική σταθερότητα,
- δρουν ως φραγμός για την προστασία του ΥΑΦ από την επιβλαβή αλληλεπίδραση με το περιβάλλον,
- να παρέχουν επαρκή επιφάνεια για μεταφορά θερμότητας και
- να παρέχουν δομική σταθερότητα και εύκολο χειρισμό.

Η πρώτη μέθοδος (**macro encapsulation**) περιλαμβάνει την ενσωμάτωση των ΥΑΦ σε αγωγούς, σφαίρες, σακουλάκια, πάνελς και δοχεία, μέσα συγκράτησης τα οποία είτε δρουν άμεσα ως εναλλάκτες θερμότητας είτε μπορούν να ενσωματωθούν σε δομικά στοιχεία. Οι μακρο-κάψουλες πρέπει να σχεδιαστούν ώστε να ταιριάζουν καλά με την προοριζόμενη

εφαρμογή. Οι θερμικές και γεωμετρικές ιδιότητες του μέσου συγκράτησης, το οποίο απαιτείται για μια δεδομένη ποσότητα ΥΑΦ, έχουν άμεση επίδραση στα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας του ΥΑΦ και επηρεάζουν το χρόνο τήξης και την απόδοση του συστήματος (Agyenim et al., 2010). Στατιστικά, πειράματα τα οποία διεξήχθησαν με σκοπό την μελέτη της μεθόδου της μακρο-ενθυλάκωση δεν είχαν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στους εξής δύο παράγοντες: 1) το ΥΑΦ διέπεται από χαμηλή αγωγιμότητα, 2) κατά το στάδιο της ανάκτησης της θερμότητας απ' την υγρή φάση, το ΥΑΦ στερεοποιείται περιμετρικά και ως εκ τούτου αναστέλλεται η αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας (Zhou et al., 2012).

Για να αποφευχθούν τα προβλήματα που δημιουργούνται με την μακρο-ενθυλάκωση, αναπτύχθηκε η μικρο-ενθυλάκωση (*micro encapsulation*), η οποία αποτελεί διαδομένη και πρακτικά εφαρμόσιμη μέθοδο συγκράτησης του ΥΑΦ, με τέτοιο τρόπο ώστε αυτό να μην επηρεάζει δυσμενώς την λειτουργία του δομικού υλικού στο οποίο περιέχεται. Κατά την μικρο-ενθυλάκωση, μικρά σφαιρικά ή ραβδοειδή PCM σωματίδια περιορίζονται σε λεπτή πολυμερή μεμβράνη (*film*) κι έπειτα ενσωματώνονται σε διαμορφώσεις, συμβατές με την συγκρατητική αυτή μεμβράνη (Tyagi et al., 2011). Οι μικρές διαστάσεις των σωματιδίων διευκολύνουν πολύ την ροή της θερμότητας και ο συγκεκριμένος τρόπος συγκράτησης επιτρέπει στο ΥΑΦ να ενσωματώνεται με απλό και οικονομικό τρόπο σε συμβατικά υλικά κατασκευής (Pasupathy et al., 2008). Ο Hawlader (Hawlader et al., 2002) διεξήγαγε θερμικές αναλύσεις και θερμικές δοκιμές του κύκλου λειτουργίας μικρο-ενθυλακωμένης παραφίνης και διαπίστωσε ότι η παραφίνη διατηρούσε ακόμα το γεωμετρικό προφίλ της αλλά και την ειδική θερμοχωρητικότητα της ίδια μετά από 1000 κύκλους. Οι Khudhair και Farid (Khudhair and Farid, 2004) παρατήρησαν ότι η μικρο-ενθυλάκωση μπορεί να επηρεάσει την μηχανική αντοχή των οικοδομικών υλικών, ενώ παρατηρήθηκαν και κάποια προβλήματα υπερψύξης (Zhang et al., 2005).

### 2.5.2. Προσάρτηση ΥΑΦ σε υπάρχουσα τοιχοποιία

---

Η προσάρτηση στοιχείου ΥΑΦ στα υπάρχοντα στρώματα της τοιχοποιίας της κατασκευής αποτελεί τον τελευταίο και πιο διαδομένο στον εμπορικό κόσμο τρόπο ένταξης του ΥΑΦ σε κτηριακές εγκαταστάσεις. Η προσαρμογή των ΥΑΦ στα κτηριακά κελύφη υλοποιείται μέσω γυψοσανίδων με ΥΑΦ και σύνθετων πάνελς με ΥΑΦ. Στην περίπτωση αυτή, το ΥΑΦ αποτελεί ένα ξεχωριστό στρώμα υλικού, το οποίο μπορεί να προστεθεί στην κατασκευή ενός τυπικού κτηρίου προκειμένου να αυξήσει την ικανότητά του για αποθήκευση ενέργειας (Cao et al., 2010).

### 2.6. Επισκόπηση των βασικών παθητικών συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (LHTES) με ΥΑΦ για κτηριακές εφαρμογές

---

Η ενσωμάτωση των ΥΑΦ σε συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε κτηριακές εγκαταστάσεις αποτέλεσε και αποτελεί ακόμα αντικείμενο ερευνών. Απαρχή των σχετικών ερευνών αποτέλεσε η μελέτη που διεξήγαγε το 1940 ο Dr Maria Telkes (Telkes, 1949a, Telkes, 1949b) με αντικείμενο τη χρήση του δεκαένδρου θεικού νατρίου ως μέσον αποθήκευσης θερμικής ενέργειας για την θέρμανση χώρου κατά τις νυχτερινές ώρες και

της ημέρες με νέφωση. Η πρώτη πειραματική εφαρμογή για την αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας στα κτήρια υλοποιήθηκε τη δεκαετία του '70 (Telkes, 1974).

Έκτοτε ακολούθησε εκτεταμένη έρευνα σε όλες τις πτυχές ενσωμάτωσης των PCM σε κτηριακές εγκαταστάσεις. Η όλη μελέτη οδήγησε στην παραγωγή και χρήση ΥΑΦ κατάλληλων για θέρμανση, ψύξη και αερισμό κτηρίων (HVAC) υπό διάφορες κλιματολογικές συνθήκες, στην ανάπτυξη των αποτελεσματικών μεθόδων της ενθυλάκωσης των ΥΑΦ, στην ανάλυση και ενίσχυση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των υλικών, στην απόδοση μεταφοράς θερμότητας και στην μεγάλης διάρκειας σταθερότητα, στη μαθηματική μοντελοποίηση των συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, στην κατάδειξη της θερμικής συνεισφοράς των ΥΑΦ στην ενεργειακή συμπεριφορά των κτηρίων, καθώς και στην εξοικονόμηση μεγάλων ποσών ενέργειας. Τα αποτελέσματα των ερευνών αυτών κατέδειξαν ότι η κατάλληλη χρήση των ΥΑΦ στα κτήρια ενισχύει τόσο την εξοικονόμηση ενέργειας, όσο και τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>, ενώ βελτιώνει το επίπεδο θερμικής άνεσης καθώς τα υλικά δύνανται να εξομαλύνουν τις έντονες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στο εσωτερικό του κτηρίου. Με την ενσωμάτωση των ΥΑΦ σε κτηριακές εγκαταστάσεις μειώνεται και το μέγεθος του μηχανικού HVAC εξοπλισμού, ενώ αυξάνεται και ο χρόνος ζωής του (Zhu et al., 2009).

Στις κτηριακές εφαρμογές, τα ΥΑΦ μπορούν να ενσωματωθούν σε δομικά υλικά όπως το σκυρόδεμα, τα στοιχεία ξηράς δόμησης, το ξύλο κ.α. προκειμένου να ενισχύσουν τη θερμική συμπεριφορά κτιρίων βαριάς ή ελαφριάς κατασκευής. Δύνανται επίσης να ενσωματωθούν σε κυκλώματα νερού και αέρα στα HVAC συστήματα. Χαρακτηριστικό των εμβαπτισμένων σε ΥΑΦ δομικών στοιχείων, όπως η γυψοσανίδα ΥΑΦ και το ενισχυμένο με ΥΑΦ μπλοκ σκυροδέματος, αποτελεί η εκτεταμένη πλέον χρήση τους στον τομέα της κτηριακής κατασκευής. Οι συγκεκριμένες PCM εφαρμογές εμφανίζουν βελτιωμένες θερμοφυσικές ιδιότητες συγκριτικά με τις αντίστοιχες συμβατικές μορφές τους και παρέχουν στο οικοδόμημα ενισχυμένη θερμική αδράνεια, πλεονέκτημα του κτηρίου συνυφασμένο με βαριές και μεγάλου πάχους κατασκευές. Η περιορισμένων διαστάσεων κατασκευή, η δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας υπό λανθάνουσα μορφή καθώς και τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά όπως η πυρίμαχη ιδιότητα και παροχή ηχομόνωσης στο κτήριο, καθιστούν το ΥΑΦ σκυρόδεμα ένα δομικό στοιχείο αυξημένης θερμικής απόδοσης, η συμπεριφορά του οποίου χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

Η χρήση των ΥΑΦ στα κτήρια μπορεί να εξυπηρετήσει πλήθος λειτουργιών, όπως: την ελεύθερη ψύξη χώρου (*free cooling*), τη μετατόπιση φορτίων από τις ώρες αυξημένης ενεργειακής ζήτησης στις ώρες μειωμένης ζήτησης, την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, την ανάκτηση της δαπανημένης θερμότητας κ.α. Ωστόσο, η επιτυχής ενσωμάτωση και αξιοποίηση των ΥΑΦ στις κτηριακές εγκαταστάσεις εξαρτάται από πλήθος παραγόντων, όπως: το είδος και την ποσότητα των υλικών, την χρησιμοποιούμενη μέθοδο συσκευασίας, την τοποθεσία, τον προσανατολισμό, τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής και τον σχεδιασμό του κτηρίου κ.λπ. Η σωστή επιλογή του κατάλληλου ΥΑΦ για την εκάστοτε εφαρμογή, όπως έχει προαναφερθεί, πραγματοποιείται με γνώμονα κάποιες ιδιότητες του υλικού, ενώ καθοριστικό ρόλο παίζει και η κρίση του αρχιτέκτονα στον σχεδιασμό και την επιδίωξη βελτίωσης της θερμικής συμπεριφοράς του κτηρίου.

### 2.6.1. Γυψοσανίδες ενισχυμένες με ΥΑΦ

---

Οι γυψοσανίδες είναι κατάλληλο δομικό στοιχείο για την ενσωμάτωση των ΥΑΦ. Είναι φθηνές και χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές σε κτήρια, ιδιαίτερα σε ελαφριά κατασκευή. Η κατασκευή της γυψοσανίδας με ΥΑΦ αποτελεί έναν επιτυχημένο συνδυασμό των μηχανικών ιδιοτήτων της συμβατικής γυψοσανίδας και των φυσικών ιδιοτήτων του ενσωματωμένου ΥΑΦ, του οποίου η συνεισφορά στην θερμική απόδοση του δομικού στοιχείου είναι πολύ μεγάλη. Η γυψοσανίδα ΥΑΦ προσαρτάται ως επιπλέον επίπεδο τοιχοποιίας είτε κατά την οικοδόμηση νέου κτηρίου είτε κατά την ανακαίνιση παλαιού, αυξάνοντας την θερμική μάζα του οικοδομήματος και βελτιώνοντας την θερμική συμπεριφορά του.

Στην βιβλιογραφία απαντώνται πολλές εργασίες, οι οποίες έχουν ως σκοπό την αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς των γυψοσανίδων με ΥΑΦ: πειραματικές αναφορές (Scalat et al., 1996, Shilei et al., 2006, Shilei et al., 2007, Liu and Awbi, 2009, Kuznik et al., 2011, Mandilaras et al., 2013), μελέτες προσομοίωσης (Stovall and Tomlinson, 1995, Neep, 2000, Heim and Clarke, 2004, Zhang et al., 2008, Kuznik et al., 2008, Diaconu and Cruceru, 2010, Heim, 2010, Soares et al., 2014), ή συνδυασμός πειραματικών μετρήσεων με υπολογιστικά δεδομένα (Athienitis et al., 1997, Schossig et al., 2005, Ahmad et al., 2006a, Ahmad et al., 2006b, Kuznik et al., 2008, Chen et al., 2008, Kuznik and Virgone, 2009, Borreguero et al., 2011, Koo et al., 2011).

Η αποδοτικότητα αυτών των δομικών στοιχείων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες (Soares et al., 2013), όπως:

- πως έχει ενσωματωθεί το ΥΑΦ στις γυψοσανίδες,
- ο προσανατολισμός του τοίχου με την γυψοσανίδα ΥΑΦ,
- οι κλιματικές συνθήκες,
- τα άμεσα ηλιακά κέρδη,
- τα εσωτερικά φορτία,
- το χρώμα και η ανακλαστικότητα της επιφάνειας,
- το ποσοστό εξαερισμού και άδηλων απωλειών,
- το επιλεγμένο ΥΑΦ και η σταδιακή μεταβολή της θερμοκρασίας του,
- το εύρος λειτουργίας του ΥΑΦ, για το οποίο συμβαίνει η αλλαγής φάσης και
- η λανθάνουσα θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας του τοίχου.

Ο Peirpo (Peirpo et al., 1991) μελέτησε την επίδραση γυψοσανίδας ενισχυμένης με ΥΑΦ στην θερμική απόδοση παθητικού ηλιακού οικήματος, επιφάνειας 120m<sup>2</sup> με καλή μόνωση και με μεγάλη επιφάνεια υαλοπινάκων στη νότια πλευρά του, στην περιοχή Madison του Wisconsin. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι με την ενσωμάτωση της γυψοσανίδας με ΥΑΦ, το συγκεκριμένο κτήριο μπορούσε να μειώσει την ετήσια ενεργειακή του δαπάνη στο 85% (εξοικονόμηση περίπου 3GJ ετησίως). Επιπροσθέτως, διαπιστώθηκε ότι η βέλτιστη ημερήσια αποθήκευση θερμικής ενέργειας επιτυγχάνεται με ενσωμάτωση ΥΑΦ με θερμοκρασία τήξης περίπου 1-3°C χαμηλότερη από τη μέση θερμοκρασία του δωματίου, ως ΥΑΦ στα στοιχεία ξηράς δόμησης του οικοδομήματος.

Μια άλλου είδους προσέγγιση έκαναν οι Stetiu και Feustel (Stetiu and Feustel, 1998), οι οποίοι εκτίμησαν αριθμητικά την θερμική απόδοση γυψοσανίδας ΥΑΦ κτηριακής εγκατάστασης με χρήση υπολογιστικού εργαλείου προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν πως η χρήση ΥΑΦ σε συνδυασμό με μηχανισμό νυχτερινού αερισμού παρέχει την δυνατότητα μείωσης των διαστάσεων του συστήματος, ειδικά σε περιοχές όπου η θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος πέφτει κάτω απ' τους 18°C κατά τις νυχτερινές ώρες. Στην περίπτωση, μάλιστα, ενός πρότυπου οικοδομήματος στην California, εκτίμησαν ότι η εφαρμογή της γυψοσανίδας μπορούσε να μειώσει το μέγιστο φορτίο ψύξης κατά 28%. Οι ερευνητές επέκτειναν τις μελέτες τους στην ενσωμάτωση γυψοσανίδας διπλού ΥΑΦ σε οίκημα (Feustel and Stetiu, 1997) προκειμένου να επιτύχουν περαιτέρω αύξηση της θερμικής μάζας του κτηρίου, ούτως ώστε η θερμοκρασία του δωματίου να διατηρείται πλησιέστερα στα ανώτερα όρια θερμικής άνεσης, χωρίς την χρήση μηχανικού συστήματος ψύξης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για ένα καθιστικό με υψηλά εσωτερικά φορτία και δεδομένα καιρού για την California, έδειξαν αισθητή μείωση της θερμοκρασίας του αέρα του δωματίου, όταν ποσά θερμότητας μπορούν να αποθηκευτούν σε γυψοσανίδες με ΥΑΦ. Παρόλο που οι προσομοιώσεις κατέδειξαν τον ευεργετικό, για την θερμική απόδοση του κτηρίου, ρόλο των PCM γυψοσανίδων, επισημάνθηκε από τους ερευνητές ότι η ψύξη του κτηριακού κελύφους μόνο με την μεταφορά αέρα στο εσωτερικό του δωματίου είναι αναποτελεσματική και χρήζει σύστημα ψύξης. Ωστόσο, η εξαναγκασμένη παροχή αέρα κατά μήκος των επιφανειών της τοιχοποιίας προκειμένου να διευκολυνθεί η συναλλαγή θερμότητας, θα ήταν ευεργετική κυρίως σε περιόδους αυξημένης θερμοκρασίας περιβάλλοντος, κατά τις νυχτερινές ώρες.

Είναι γεγονός ότι οι ενεργειακές προσομοιώσεις κτιρίων συνεισφέρουν σημαντικά στην εκτίμηση των δυνατών εφαρμογών των συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με ΥΑΦ. Την προσέγγιση αυτή ακολούθησε το Ινστιτούτο Fraunhofer της Γερμανίας (Schossig et al., 2005) και προσομοίωσε τη θερμική συμπεριφορά δομικών στοιχείων, προκειμένου να συγκρίνει τη δυναμική συμπεριφορά διαφορετικών τύπων τοιχοποιίας με διαφορετική κατά μάζα ποσότητα ΥΑΦ. Την βάση της προσομοίωσης αποτέλεσε ένα εμπειρικό μοντέλο για την μεταβολή φάσης κι εξετάστηκαν τέσσερα δείγματα τοιχοποιίας με διαφορετική αναλογία ΥΑΦ, τα οποία θερμάνθηκαν σε κλίβανο και παρακολούθηθηκαν κατά την ψύξη τους. Οι παράμετροι οι οποίοι εκτιμήθηκαν στην προσομοίωση ήταν η επίδραση των ΥΑΦ ως συνάρτηση του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης, η ποσότητα του ενσωματωμένου ΥΑΦ καθώς και η κατασκευή και χρήση του κτηρίου. Με την χρήση θερμογραφικής κάμερας απεικονίστηκε ποιοτικά η επίδραση του ΥΑΦ στην θερμική απόδοση των δομικών στοιχείων (γυψοσανίδες), η οποία υποδηλώνεται από την διαφοροποίηση της θερμοκρασίας συναρτήσεως του χρόνου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν πως όσο μεγαλύτερη ποσότητα ΥΑΦ χρησιμοποιείται στο δομικό στοιχείο, τόσο περισσότερο διαρκεί η διαδικασία της ψύξης. Συνεπώς, σε συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος, η θερμική μάζα του δομικού στοιχείου που εμπεριέχει ΥΑΦ μπορεί να αυξηθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να επιτευχθεί η αναγκαία θερμική άνεση.

Είναι γεγονός πως παρά την μικρή κι ελαφριά κατασκευή της, η γυψοσανίδα ΥΑΦ μπορεί να αντικαταστήσει συμβατικές δομικές κατασκευές μεγαλύτερου πάχους και να παράσχει στο κτήριο ανάλογες ή και βελτιωμένες θερμικές ιδιότητες. Παρά την ευεργετική



συνεισφορά τους στην αποθήκευση θερμικής ενέργειας στα κτήρια, οι γυψοσανίδες ΥΑΦ παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα, όπως:

- Το εύρος αλλαγής φάσης του ΥΑΦ που έχει επιλεγεί για τις θερμικές ανάγκες κάποιας περιοχής δεν σημαίνει ότι είναι κατάλληλο για κάθε περιοχή.
- Η επιλογή της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης του υλικού σε περιοχές όπου απαιτείται τόσο θέρμανση όσο και ψύξη παρουσιάζει διπλή δυσκολία.
- Συχνά προβλήματα που παρατηρούνται κατά την ενσωμάτωση και λειτουργία της γυψοσανίδας ΥΑΦ είναι το **blooming** (πηκτικές προσμίξεις στην επιφάνεια των υλικών), δυσκολία στην ανάπτυξη πυρίμαχης ικανότητας, διάβρωση των μετάλλων, οσμή και θέματα που αφορούν ιδιότητες όπως αδυναμία της βαφής να προσκολλάται σταθερά στην κατασκευή (Pasupathy et al., 2008).

### 2.6.2. Τοιχοποιία με ΥΑΦ

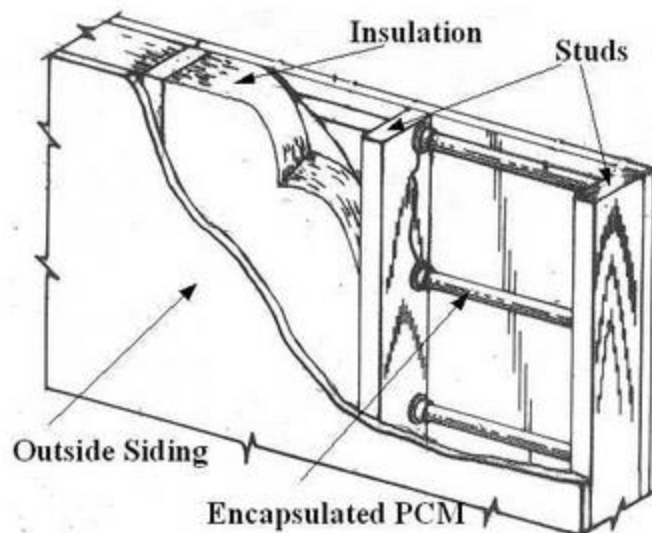
---

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές μελέτες για διάφορα είδη τοιχοποιίας, πέραν των κλασικών, οι οποίες εμπεριέχουν ΥΑΦ μέσα στη διαστρωμάτωση τους.

Ο Carbonari (Carbonari et al., 2006) καταπιάστηκε με τη μελέτη πάνελ τα οποία εμπεριέχουν ΥΑΦ για προκατασκευασμένους τοίχους. Τα αριθμητικά και πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν καλή ακρίβεια μεταξύ τους, και απέδειξε ότι η χρήση του ΥΑΦ μπορεί να είναι χρήσιμη σε αίθρια, ειδικά κατά την καλοκαιρινή περίοδο, χάρη στη δυνατότητα να απορροφά θερμότητα και να «δεσμεύει» την θερμοκρασία ενός ενδιάμεσου στρώματος σε τιμή, η οποία να συμπίπτει με το εύρος αλλαγής φάσης του ΥΑΦ. Τα αποτελέσματα έδειξαν επίσης ότι η προσθήκη ενός στρώματος αέρα μεταξύ του στρώματος ΥΑΦ και του εξωτερικού μεταλλικού φινιρίσματος είναι ικανή να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος.

Οι Halford και Boehm (Halford and Boehm, 2007) αξιολόγησαν τη δυνατότητα μετατόπισης του φορτίου αιχμής, ειδικά την καλοκαιρινή περίοδο, με την τοποθέτηση ενός στρώματος ΥΑΦ μεταξύ 2 στρωμάτων μόνωσης. Το ΥΑΦ που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα μείγμα περλίτη, το οποίο είναι ερμητικά σφραγισμένο μέσα σε ένα φύλλο συσκευασίας αλουμινίου. Τα αριθμητικά αποτελέσματα έδειξαν ότι ανάλογα με τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης του ΥΑΦ που επιλέγεται, παρατηρείται ένα ποσοστό μείωσης 11-25 % σε φορτίο αιχμής για την περίπτωση χωρίς ΥΑΦ και χωρίς μόνωση, και ένα ποσοστό μείωσης 19-57 % για την περίπτωση που υπάρχει μόνωση αλλά όχι ΥΑΦ.

Η ιδέα ενός θερμικά ενισχυμένου σκελετού διαχωριστικού τοίχου υλοποιήθηκε με πρωτοβουλία του Zhang (Zhang et al., 2005). Σκοπός της συγκεκριμένης κατασκευής (βλ.Εικόνα 2.7) ήταν η μείωση της αυξημένης απαίτησης σε κλιματισμό σε οικιακά και μικρής κλίμακας εμπορικά κτήρια.



Εικόνα 2.7 Απεικόνιση του Phase Change Frame Wall (PCFW) (Zhang et al., 2005).

Η κατασκευή του σκελετού περιελάμβανε μακρο-ενθυλακωμένη παραφίνη υψηλής κρυσταλλικότητας, η οποία ως ΥΑΦ ενισχύει την ικανότητα θερμικής αποθήκευσης του τοίχου και κατ' επέκταση αυξάνει την θερμική μάζα του κτηρίου. Τα αποτελέσματα της μελέτης κι αξιολόγησης της συγκεκριμένης εφαρμογής έδειξαν ότι το PCFW (**Phase Change Frame Wall**) δύναται να απορροφά σημαντικά ποσά θερμικής ενέργειας, μειώνοντας την μέγιστη ροή θερμότητας του τοίχου έως και 38%. Στις κτηριακές εφαρμογές, η μείωση αυτή θα μπορούσε να μεταφραστεί ως μείωση της αυξημένης απαίτησης σε κλιματισμό από την τοιχοποιία και την οροφή του κτηρίου, με παράλληλη μετατόπιση μέρους του θερμικού φορτίου σε άλλες ώρες της ημέρας, ενώ η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα να παραμένει σταθερή. Η συνεισφορά της λειτουργίας του PCFW γίνεται αισθητή κατά τους χειμερινούς μήνες, όποτε και η θερμότητα η οποία προέρχεται από κάποια εστία θέρμανσης εντός του κτηρίου, αποθηκεύεται και όταν οι επικρατούσες θερμοκρασίες το επιτρέψουν, απελευθερώνεται πίσω στον χώρο θερμαίνοντάς τον. Κατ' αυτόν τον τρόπο, μειώνεται ο κύκλος λειτουργίας του μηχανικού εξοπλισμού και ως εκ τούτου αυξάνεται η αποδοτικότητα και ο χρόνος ζωής του (Pasupathy et al., 2008).

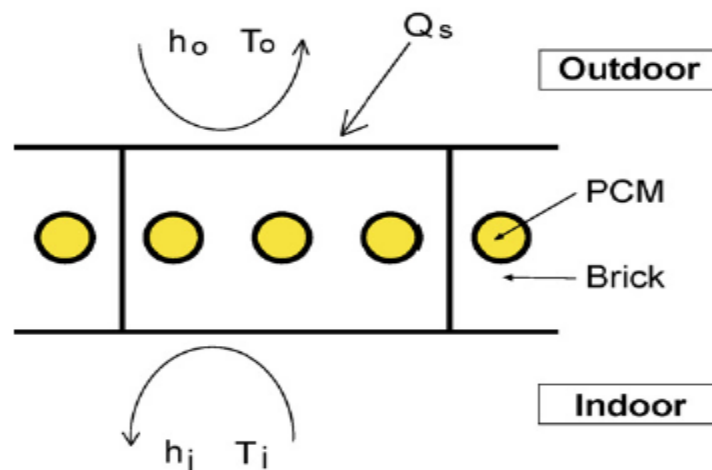
### 2.6.3. Πλινθοδομή με ΥΑΦ

Στα πλαίσια πειραματικών διεργασιών αναπτύχθηκε και η εφαρμογή ΥΑΦ σε πλινθοδομή, αλλά έως και σήμερα παραμένει κυρίως σε εργαστηριακό επίπεδο. Σε αντίθεση με την γυψοσανίδα ΥΑΦ και το σκυρόδεμα με ΥΑΦ, η θερμική απόδοση των πλίνθων, οι οποίοι εμπεριέχουν ΥΑΦ, έχει απασχολήσει τους ερευνητές σε μικρό βαθμό.

Η πρώτη προσέγγιση για την εν λόγω εφαρμογή πραγματοποιήθηκε από τον Esam M. Alawadhi (Alawadhi, 2008). Ο ερευνητής ανέλυσε την θερμική απόδοση πλίνθου ΥΑΦ για κτηριακές εφαρμογές σε θερμό κλίμα. Ο σκοπός της χρήσης του ΥΑΦ στην δεδομένη εφαρμογή ήταν η απορρόφηση της εισερχόμενης θερμικής ενέργειας, κατά την αλλαγή φάσης του υλικού, πριν την μετάδοσή της στο εσωτερικό του κτηρίου, μειώνοντας έτσι το

θερμικό κέρδος. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη ήταν μία κατασκευή η οποία αποτελείτο από πλίνθους (τούβλα) με κυλινδρικές οπές, όπου και φιλοξενήθηκε το ΥΑΦ (βλ. Εικόνα 2.8).

Η αριθμητική προσέγγιση της ροής θερμότητας στην συγκεκριμένη εφαρμογή πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι η προσθήκη του ΥΑΦ στον πλίνθο μείωσε σημαντικά το θερμικό κέρδος του χώρου και η ενδεχόμενη αύξηση της ποσότητας του θα είχε ευεργετική θερμική επίδραση, καθώς αυξάνεται σημαντικά η χωρητικότητα θερμικής αποθήκευσης της κατασκευής. Συγχρόνως, διαπιστώθηκε ότι οι κυλινδρικές οπές, οι οποίες εμπεριέχουν το ΥΑΦ και βρίσκονται κατά μήκος του οριζόντιου κεντρικού άξονα του πλίνθου, εμφανίζουν βελτιωμένη θερμική απόδοση (Alawadhi, 2008).



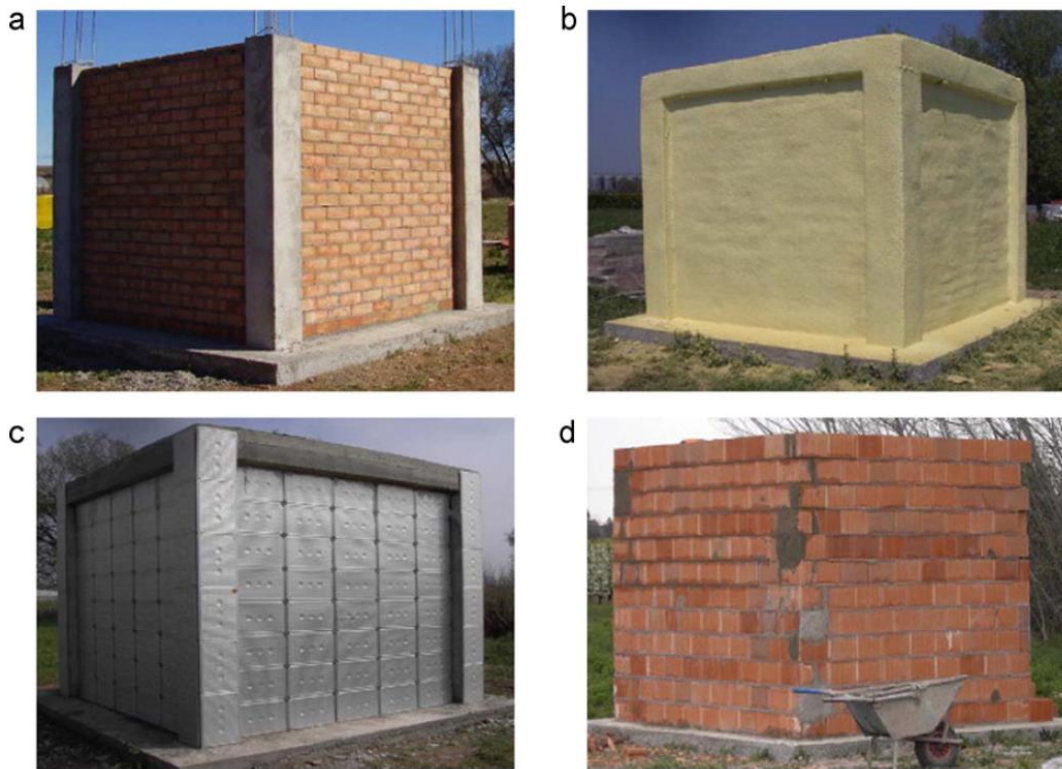
Εικόνα 2.8 Σχηματική αναπαράσταση του τούβλου με ΥΑΦ και τον οριακών συνθηκών (Alawadhi, 2008)

Η δεύτερη μελέτη για πλίνθους με ΥΑΦ ήταν αυτή του Castell (Castell et al., 2010), ο οποίος εξέτασε πειραματικά την θερμική συμπεριφορά κατασκευής με πλίνθους ΥΑΦ. Η πειραματική διάταξη περιελάμβανε διάφορους οικίσκους κατασκευασμένους από συμβατικούς και κυψελώδεις πλίνθους: έναν θάλαμο αναφοράς χωρίς μόνωση με συμβατικούς πλίνθους, έναν θάλαμο με συμβατικούς πλίνθους και μονωτικό υλικό (πολυουρεθάνη), έναν θάλαμο με συμβατικούς πλίνθους, μονωτικό υλικό και παραφίνη RT-27 ως ΥΑΦ, έναν θάλαμο αναφοράς με κυψελώδεις πλίνθους κι έναν θάλαμο με κυψελώδεις πλίνθους και το ένυδρο άλας SP-25 A8 ως ΥΑΦ.

Οι οικίσκοι (βλ. Εικόνα 2.9) κατασκευάστηκαν στην περιοχή Puigverd de Lleida της Ισπανίας και μετρήθηκε η θερμική τους απόδοση συναρτήσει του χρόνου. Τα αποτελέσματα του πρώτου πειράματος που διεξήχθη έδειξαν εξομάλυνση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων εντός των θαλαμίσκων με ΥΑΦ, καθώς και μείωση των θερμοκρασιακών μεγίστων μέχρι και  $1^{\circ}\text{C}$ . Αν και η συνεισφορά των ΥΑΦ στα δομικά στοιχεία ήταν εμφανής και στις δύο περιπτώσεις (συμβατικοί και κυψελώδεις πλίνθοι),

στις κατασκευές με κυψελώδεις πλίνθους η επίδραση του ΥΑΦ ήταν ακόμα μεγαλύτερη, λόγω της μειωμένης θερμικής αντίστασης της συγκεκριμένης πλινθοδομής.

Ο Silva (Silva et al., 2012) αξιολόγησε την ενσωμάτωση macro-encapsulated παραφίνης σε ένα τυπικό Πορτογαλικό πλίνθο. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η ενσωμάτωση του ΥΑΦ συνεισφέρει στην εξομάλυνση της διακύμανσης της εσωτερικής θερμοκρασία του χώρου, μειωμένη κατά 5 έως 10 °C, καθώς και την αύξηση της χρονικής καθυστέρησης περίπου 3 ώρες.



**Εικόνα 2.9** Πειραματικοί οικίσκοι **a)** πλινθοδομής, **b)** πλινθοδομής με RT-27 **c)** πλινθοδομής με RT-27 και πολυουρεθάνη, **d)** πλινθοδομή με κυψελωτούς πλίνθους [58].

Τέλος οι Lai και Chiang (Lai and Chiang, 2006) μελέτησαν την ενσωμάτωση των ΥΑΦ σε μονωτικούς πλίνθους με κοιλότητες. Οι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι οι πλίνθοι αυτοί παρέχουν καλύτερη μόνωση κατά τη διάρκεια της ημέρας, όταν εκτίθενται απευθείας στην ηλιακή ακτινοβολία, σε σύγκριση με τους επεξεργασμένους πλίνθους. Η μέγιστη θερμοκρασία του πλίνθου με ΥΑΦ ήταν 31,7 °C (στην εσωτερική πλευρά), μικρότερη κατά 4,9°C από εκείνη των μη επεξεργασμένων πλίνθων.

#### 2.6.4. Συστήματα κονιαμάτων ενισχυμένα με ΥΑΦ

Η Cabeza (Cabeza et al., 2007a, Cabeza et al., 2007b) μελέτησε ένα καινοτόμο σκυρόδεμα με ΥΑΦ προκειμένου να αναπτυχθεί ένα προϊόν, το οποίο δεν θα επηρεάζει τη μηχανική αντοχή του σκυροδέματος σε τοίχο. Στήθηκαν 2 θάλαμοι με πραγματικές και συγκεκριμένες διαστάσεις στην περιοχή Lleida της Ισπανίας, ώστε να αποδειχθεί η

δυνατότητα χρήσης *micro-encapsulated* ΥΑΦ σε σκυρόδεμα (με σημείο τήξεως 26 °C) για την ενίσχυση της θερμικής του απόδοσης. Το σκυρόδεμα άντεξε σε πίεση πάνω από 25 MPa και εφελκυσμό πάνω από 6 MPa, ενώ δεν προέκυψε διαφορά στα αποτελέσματα του ΥΑΦ μετά από 6 μήνες λειτουργίας. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν επίσης ότι η αποθήκευση ενέργειας στα τοιχώματα ενισχυμένου σκυροδέματος οδηγεί σε βελτιωμένη θερμική αδράνεια, καθώς και χαμηλότερες θερμοκρασίες εσωτερικού αέρα, σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Ο Chandra (Chandra et al., 1985) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ένα τοίχωμα ΥΑΦ με μικρότερο πάχος είναι περισσότερο επιθυμητό σε σύγκριση με ένα συνηθισμένο τοίχωμα σκυροδέματος για καλύτερη θερμική άνεση στα κτήρια .

Ο Entrop (Entrop et al., 2011) μελέτησε την περίπτωση ενισχυμένου σκυροδέματος με ΥΑΦ για την αποθήκευση ηλιακής ενέργειας σε ορόφους, για μέτρια κλίματα. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η εφαρμογή *micro-encapsulated* ΥΑΦ σε δάπεδα από μπετόν είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση των μέγιστων θερμοκρασιών δαπέδου έως και 16 °C ± 2 % , και την αύξηση των ελάχιστων θερμοκρασιών έως και 7 °C ± 3 %.

Ο Lee (Lee et al., 2000) διεξήγαγε δοκιμές προκειμένου να μελετηθούν και να συγκριθούν η δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μεταξύ συμβατικών μπλοκ και μπλοκ σκυροδέματος εμποτισμένων με ΥΑΦ. Για την έρευνα χρησιμοποιήθηκαν και αντιπαραβλήθηκαν πειραματικά δύο τύποι σκυροδέματος: το συμβατικό σκυρόδεμα (regular block) με βασικό συστατικό του το τσιμέντο Portland και το πορώδες σκυρόδεμα (autoclaved block), το οποίο συνίσταται από τσιμέντο Portland καθώς και διοξείδιο του πυριτίου. Τα συγκεκριμένα μπλοκ οπλίστηκαν με δύο διαφορετικά είδη ΥΑΦ: στεατικό βουτύλιο BS κι εμπορική παραφίνη, με την μέθοδο της απορρόφησης. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι το ΥΑΦ σκυρόδεμα αποτελεί ένα επιτυχημένο συνδυασμό των θερμικών ιδιοτήτων του ΥΑΦ και του συμβατικού σκυροδέματος, καθώς η εφαρμογή έχει την δυνατότητα να απορροφά την λανθάνουσα κι αισθητά θερμότητα του ενσωματωμένου ΥΑΦ και την αισθητή θερμότητα του σκυροδέματος (Pasupathy et al., 2008).

Προς ανάλογη ερευνητική κατεύθυνση κινήθηκε και ο Hawes (Hawes et al., 1989), ο οποίος εξέτασε την θερμική απόδοση διαφορετικών τύπων μπλοκ σκυροδέματος εμποτισμένων με PCM (BS, δωδεκανόλη, δεκατετρανόλη, παραφίνη). Η συγκεκριμένη μελέτη κατέδειξε την επίδραση παραγόντων ,όπως η αλκαλικότητα, η θερμοκρασία, ο χρόνος εμποτισμού κι η αραίωση του ΥΑΦ, στην απορρόφηση του ΥΑΦ κατά την διεργασία της εμβάπτισης του μπλοκ. Οι ερευνητές μελέτησαν εκτενώς τον μηχανισμό απορρόφησης και καθιέρωσαν ένα μέσον για την ανάπτυξη και χρήση σταθερών απορρόφησης του ΥΑΦ στο σκυρόδεμα, προκειμένου να επιτύχουν διάχυση της επιθυμητής ποσότητας ΥΑΦ και κατ' επέκταση την απαιτούμενη χωρητικότητα αποθήκευσης θερμότητας. Τα αποτελέσματα της τροποποίησης του συμβατικού σκυροδέματος σε δομικό υλικό με ΥΑΦ, μέσω βελτιωμένων τεχνικών απορρόφησης, έδειξαν σημαντική αύξηση της θερμικής αποθήκευσης του στοιχείου έως και 300% (Pasupathy et al., 2008).

Μια άλλη πτυχή που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι οι μέθοδοι συγκράτησης κι εγκλεισμού του ΥΑΦ στους πυρήνες του μπλοκ. Οι μέθοδοι αυτοί, οι οποίοι παρουσιάστηκαν απ' τον Salyer (Salyer et al., 1995), είναι:1. Προσρόφηση του ΥΑΦ σε πορώδες υλικό, 2. Απορρόφηση του ΥΑΦ από ρινίσματα πυριτίου, 3. Διείσδυση του ΥΑΦ σε

πολυμερείς μεταφορείς. Οι ερευνητές επεσήμαναν ότι όταν το ΥΑΦ εισάγεται στους πυρήνες του σκυροδέματος με την μορφή τηγμένου μίγματος, ξηράς σκόνης και σε σφαιρίδια πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας, μπορεί να φιλοξενηθεί σε μεγάλες ποσότητες, γεγονός που εξασφαλίζει αυξημένη χωρητικότητα θερμικής αποθήκευσης.

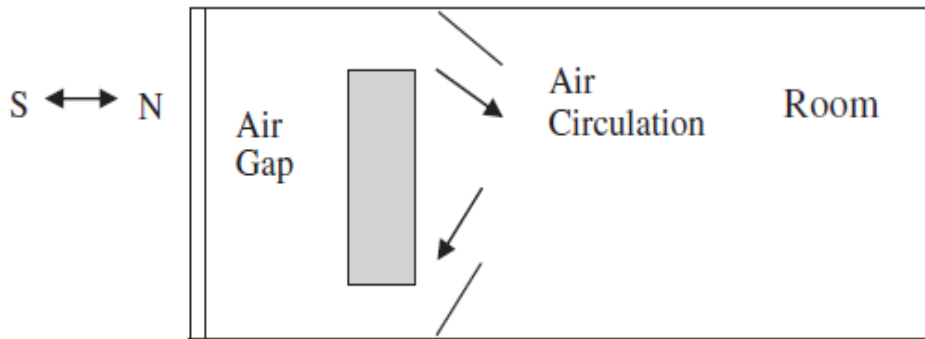
Ανάλογη τεχνική εμποτισμού του ΥΑΦ στους πυρήνες του σκυροδέματος εφάρμοσε και ο Hadjievna (Hadjievna et al., 2000) χρησιμοποιώντας πενταένυδρο θειικό άλας νατρίου ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) ως PCM. Το πορώδες σκυρόδεμα εμποτίστηκε και καλύφθηκε με ΥΑΦ το 60% των πόρων του. Το αποτέλεσμα της πειραματικής διεργασίας έδειξε ότι η προσρόφηση του ΥΑΦ στους πόρους του σκυροδέματος παρέχει, εκτός από αύξηση της θερμικής απόδοσης, ενισχυμένη σταθερότητα κατά τους θερμικούς κύκλους λειτουργίας της κατασκευής (Pasupathy et al., 2008).

### 2.6.5. Τοίχος Trombe με ΥΑΦ

---

Ο τοίχος Trombe αποτελεί αντιπροσωπευτικό παράδειγμα μονάδας αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (τοίχος-συλλέκτης) κι εντάσσεται στην κατηγορία των συστημάτων έμμεσου ηλιακού κέρδους. Οικοδομείται συνήθως στη νότια πλευρά του κτηρίου και η συμβατική κατασκευή του περιλαμβάνει συμπαγή τοίχο από σκυρόδεμα μεγάλου πάχους και γυάλινη (ή πλαστική) επιφάνεια μονού ή διπλού επιπέδου τοποθετημένη σε απόσταση περίπου 10cm από τον τοίχο. Η εξωτερική επιφάνεια του τοίχου είναι σκουρόχρωμη, προκειμένου να απορροφά την προερχόμενη απ' την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία θερμότητα, η οποία με την σειρά της αποθηκεύεται στην μάζα του τοίχου. Όταν η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου του κτηρίου αποκτήσει τιμή μικρότερη από αυτή της επιφάνειας του τοίχου, η αποθηκευμένη θερμότητα απελευθερώνεται, θερμαίνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο κάθε επιφάνεια του χώρου.

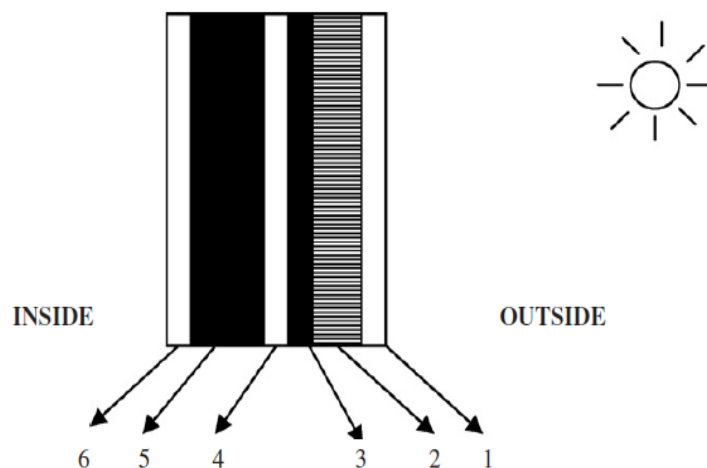
Αν και παραδοσιακά οι τοίχοι Trombe βασίζουν την αρχή λειτουργίας τους στην αποθήκευση θερμότητας υπό αισθητή μορφή, το σενάριο μιας ελαφρύτερης κατασκευής με δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλων ποσών λανθάνουσας θερμότητας προβάλλει αρκετά ελκυστικό. Ο τοίχος Trombe με ΥΑΦ αποτελεί κατασκευή πλήρως οπλισμένη με ΥΑΦ, η οποία θερμαίνεται την ημέρα λόγω της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (βλ. Εικόνα 2.10). Το γεγονός αυτό έχει ως επακόλουθο την αποθήκευση θερμότητας στην μάζα του τοίχου και την τήξη του ενσωματωμένου ΥΑΦ. Κατά την διάρκεια της νύχτας, αντιστρόφως, όποτε και οι θερμοκρασίες πέφτουν, η αποθηκευμένη θερμότητα απελευθερώνεται στον χώρο θερμαίνοντάς τον και το ΥΑΦ επανέρχεται στην στερεή του κατάσταση.



Εικόνα 2.10 Σχηματική απεικόνιση του Trombe Wall με ΥΑΦ (Tyagi and Buddhi, 2007)

Ως ΥΑΦ για την συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέγονται συνήθως ένυδρα άλατα και υδρογονάνθρακες, καθώς οι θερμοφυσικές τους ιδιότητες τα καθιστούν κατάλληλα για την βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς του τοίχου (Tyagi and Buddhi, 2007). Τα ΥΑΦ παίζουν τον ρόλο του ρυθμιστή θερμοκρασίας του τοίχου Trombe κι ενισχύουν το σενάριο της αντικατάστασης της συμπαγούς βαριάς κατασκευής του, με μια ελαφρύτερη και μικρότερου πάχους κατασκευή, η οποία θα έχει αντίστοιχη ή και καλύτερη θερμική απόδοση. Προς αυτή την κατεύθυνση έχουν γίνει σημαντικά βήματα, σε ερευνητικό επίπεδο, με σκοπό την διαπίστωση της συνεισφοράς των ΥΑΦ στην θερμική συμπεριφορά του τοίχου. Αποτελέσματα ερευνών με αντικείμενο την ενσωμάτωση ΥΑΦ όπως δεκαένυδρο θειικό νάτριο (σημείο τήξης 32°C) (Swet, 1980, Ghoneim et al., 1991, Chandra et al., 1985) και κερί παραφίνης (Knowler, 1983) κατέδειξαν την επίδραση των PCMs στην αύξηση της θερμοχωρητικότητας κι ενίσχυση της ολικής αγωγιμότητας του τοίχου Trombe.

Χαρακτηριστική εφαρμογή, η οποία επιβεβαιώνει το σενάριο για αποδοτικότερη αποθήκευση θερμικής ενέργειας από τον τοίχο Trombe με ΥΑΦ, παρά την μικρού πάχους κατασκευή του, αποτελεί ο ηλιακός τοίχος με ΥΑΦ των Stritih και Novak (Stritih and Novak, 1996). Οι ερευνητές σχεδίασαν και μελέτησαν την θερμική συμπεριφορά ενός πειραματικού ηλιακού τοίχου πλήρους εξοπλισμένου με μαύρο κερί παραφίνης (σημείο τήξης 25-30°C). Η κατασκευή του τοίχου διαρθρώνεται σε έξι επίπεδα, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2.11.



Εικόνα 2.11 Στοιχεία του ηλιακού τοίχου (Mehling and Cabeza, 2008).

Ο σκοπός της συγκεκριμένης εγκατάστασης (δηλ. η θέρμανση του εσωτερικού αέρα κατοικίας) επετεύχθη μέσω μιας σειράς διαδοχικών φυσικών διεργασιών: Η ηλιακή ακτινοβολία (μικρού μήκους κύματος) διαπερνά την γυάλινη εξωτερική επιφάνεια (1) του τοίχου, καθώς και το διαφανές μονωτικό υλικό της (2). Εν συνεχεία συναντά το ΥΑΦ (3), το οποίο συγκρατείται σε διαφανές πλαστικό περίβλημα κατασκευασμένο από πολυκαρβονικό υλικό (θερμοπλαστικό πολυμερές). Το ΥΑΦ απορροφά την θερμότητα της ακτινοβολίας και την αποθηκεύει υπό λανθάνουσα μορφή, μεταβάλλοντας ταυτόχρονα και την στερεή του φάση σε υγρή. Όταν οι επικρατούσες θερμοκρασίες το επιτρέψουν (κατά την διάρκεια της νύχτας), το ΥΑΦ απελευθερώνει την αποθηκευμένη θερμότητα στο κανάλι (4) της εγκατάστασης, όπου και θερμαίνεται ο αέρας, κι επιστρέφει στην στερεά του κατάσταση. Ο θερμός πλέον αέρας οδηγείται στο εσωτερικό της κατοικίας, θερμαίνοντας κάθε επιφάνειά της. (Η μόνωση (5) και το κονίαμα (6) αποτελούν τα σταθερά υλικά της κατασκευής). Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μελέτης απέδειξαν τα πλεονεκτήματα της εγκατάστασης του ηλιακού τοίχου και την συνεισφορά του στην θερμική συμπεριφορά των οικημάτων, κι έδωσαν το έναυσμα για την διεξαγωγή ερευνών με σχετικό αντικείμενο.

#### 2.6.6. Ενισχυμένα Παράθυρα και διαχωριστικά με ΥΑΦ

Η μετατροπή των συμβατικών υαλοπινάκων σε ενισχυμένα PCM παράθυρα προσφέρει στο κτήριο μία ακόμα αποδοτική πηγή θερμότητας. Η ενσωμάτωση ΥΑΦ στα στοιχεία σκίασης των παραθύρων (παραθυρόφυλλα) ενδείκνυται ως μέθοδος αύξησης της απόδοσης της συμβατικής κατασκευής του παραθύρου, και κατ' επέκταση της θερμικής ενίσχυσης όλου του κτηρίου. Την ημέρα, τα PCM παραθυρόφυλλα των παραθύρων παραμένουν ανοιχτά ούτως ώστε η εξωτερική πλευρά τους να εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία. Με αυτόν τον τρόπο απορροφάται θερμότητα και το PCM τήκεται. Κατά τις νυχτερινές ώρες τα παραθυρόφυλλα κλείνουν και διά μέσω του υαλοπίνακα η θερμότητας που απελευθερώνεται μεταδίδεται στον εσωτερικό χώρο.

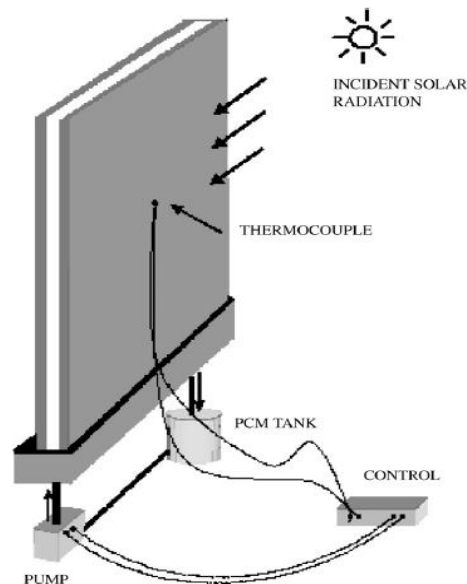


Κατ' αυτόν τον τρόπο λειτουργήσε και το σύστημα αποθήκευσης με τις εσωτερικές γρίλιες με ΥΑΦ του Mehling (Mehling, 2004), ο οποίος επεσήμανε πως η χρήση τέτοιου είδους σκίαση στα παράθυρα έχει την δυνατότητα να μειώσει την θερμοκρασία του δωματίου έως και 2°C (βλ. Εικόνα 2.12).



Εικόνα 2.12 Παράθυρα με PCM σκίαση (Mehling, 2004)

Οι Ismail και Henríquez (Ismail and Henríquez, 2001) έκαναν μια διαφορετική προσέγγιση στην δημιουργία ενεργειακά αποδοτικού παραθύρου, καθώς στην δεδομένη μελέτη το ΥΑΦ εμπεριέχεται στο ίδιο το παράθυρο και όχι σε κάποιο εξωτερικό ή εσωτερικό στοιχείο σκίασης.



Εικόνα 2.13 Απεικόνιση ενεργειακά αποδοτικού PCM παραθύρου (Ismail and Henríquez, 2001)

Το παράθυρο, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 2.13, απαρτίζεται από δύο γυάλινες επιφάνειες, με ενδιάμεση παρεμβολή διακένου και διαθέτει ένα στόμιο εξαερισμού (αεραγωγό) στην πάνω γωνία του. Οι πλευρές και η βάση της κατασκευής είναι σφραγισμένα, με εξαίρεση δύο οπές στο κάτω μέρος, οι οποίες συνδέονται μέσω πλαστικού αγωγού με μια αντλία θέρμανσης και την δεξαμενή του ΥΑΦ. Η αντλία συνδέεται με την σειρά της με την δεξαμενή που φέρει το ΥΑΦ, το οποίο βρίσκεται σε υγρή φάση. Η λειτουργία της αντλίας ελέγχεται από αισθητήρα θερμοκρασίας. Όταν η θερμοκρασιακή διαφορά φτάσει σε μια προκαθορισμένη τιμή, η αντλία ενεργοποιείται και το υγρό PCM αντλείται από την δεξαμενή για να συμπληρώσει το κενό μεταξύ των γυάλινων επιφανειών. Εξαιτίας της χαμηλότερης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας, το PCM αρχίζει να ψύχεται, σχηματίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο ένα στερεό στρώμα το πάχος του οποίου αυξάνει σε συνάρτηση με τον χρόνο και ως εκ τούτου εξασφαλίζει την σταθεροποίηση της εσωτερικής θερμοκρασίας. Η συγκεκριμένη διαδικασία συνεχίζει μέχρι το PCM να στερεοποιηθεί εξ' ολοκλήρου. Ένα παράθυρο κατάλληλου σχεδιασμού εξασφαλίζει ότι η εξωτερική θερμοκρασία θα αρχίσει να αυξάνει πριν την εξ' ολοκλήρου στερεοποίηση του εγκλεισμένου ΥΑΦ. Το προτεινόμενο σενάριο είναι βιώσιμο και θερμικά αποδοτικό. Επιβεβαιώνεται επίσης απ' τους ερευνητές ότι η συμπλήρωση του διακένου με ΥΑΦ προωθεί το φιλτράρισμα της θερμικής ακτινοβολίας και μειώνει τις θερμικές απώλειες, διότι η περισσότερη απ' την ενέργεια που μεταφέρεται, απορροφάται κατά την αλλαγή φάσης του υλικού. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι το παράθυρο με διπλό υαλοπίνακα οπλισμένο πλήρως με ΥΑΦ είναι περισσότερο αποδοτικό θερμικά απ' ότι το ίδιο παράθυρο όταν διαθέτει μόνο αέρα (Pasupathy et al., 2008).

Σε ανάλογα πλαίσια κινήθηκε και η μελέτη του Weinlader (Weinlader et al., 2005), ο οποίος ανέλυσε το σενάριο της χρήσης δύο υαλοπινάκων με τοποθετημένο ένα ΥΑΦ στο μεταξύ τους διάκενο. Η συγκεκριμένη κατασκευή, συγκρινόμενη με συμβατικό διπλό υαλοπίνακα, εξασφαλίζει 30% μείωση των θερμικών απωλειών εντός κτηριακών εγκαταστάσεων. Επιπροσθέτως, η ενσωμάτωση της PCM εφαρμογής σε κτήρια προκαλεί μείωση έως και 50% στα ηλιακά θερμικά κέρδη, γεγονός το οποίο διατηρεί την θερμική άνεση σε ικανοποιητικά επίπεδα.

## 2.7. Σύνοψη κεφαλαίου - Συμπεράσματα

---

Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει και εξετάζει προηγούμενες μελέτες που έχουν διεξαχθεί σχετικά με τα ΥΑΦ. Ξεκινώντας από τις βασικές έννοιες και ορισμούς για τα ΥΑΦ, γίνεται αναφορά σε όλα τα είδη αλλά και στις ιδιότητες τους. Με αυτόν τον τρόπο, γίνονται αντιληπτές οι επιθυμητές ιδιότητες όσον αφορά την αντοχή τους, το εύρος λειτουργίας, το κόστος, ανάλογα βέβαια και με την εφαρμογή.

Με βάση τα ευρήματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης για τα ΥΑΦ, αποφασίζεται ότι για την προσομοίωση, επικεντρωνόμαστε στα οργανικά ΥΑΦ, και συγκεκριμένα σε αυτά που εμπεριέχονται μέσα σε γυψοσανίδες. Ο λόγος είναι ότι τα υλικά αυτά έχουν ισχυρή απόδοση που δεν επηρεάζεται από τον αριθμό των κύκλων λειτουργίας τους και είναι επίσης η πιο ευρέως κατηγορία ΥΑΦ, η οποία εφαρμόζεται στο κτηριακό περιβάλλον. Τα ένυδρα άλατα έχουν καλές θερμικές ιδιότητες, αλλά πάσχουν από το διαχωρισμό φάσεως.

Το γεγονός αυτό συνεπάγεται τη μείωση της αποδοτικότητας τους με την πάροδο του χρόνου, καθιστώντας τα αναξιόπιστα. Τα εύτηκτα υλικά είναι ακόμη στο στάδιο της έρευνας και υπάρχει έλλειψη στο ευνοϊκό εύρος θερμοκρασίας 19-27 °C, κατάλληλο για κτηριακές εφαρμογές .

## Βιβλιογραφία 2<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

---

- Abhat, A., 1983. Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials. *Solar Energy* 313–332.
- Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., Smyth, M., 2010. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 615–628.
- Ahmad, M., Bontemps, A., Sallée, H., Quenard, D., 2006a. Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour of wallboards containing a phase change material. *Energy and Buildings* 38, 357–366.
- Ahmad, M., Bontemps, A., Sallée, H., Quenard, D., 2006b. Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material. *Energy and Buildings* 38, 673–681.
- Alawadhi, E.M., 2008. Thermal analysis of a building brick containing phase change material. *Energy and Buildings* 40, 351–357.
- Athienitis, A.K., Liu, C., Hawes, D., Banu, D., Feldman, D., 1997. Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage. *Building and environment* 32, 405–410.
- B. Farouk, S.I.G., 1980a. Trombe-Michel wall using phase change materials.
- B. Farouk, S.I.G., 1980b. Trombe-Michel wall using phase change materials.
- Baetens, R., Jelle, B.P., Gustavsen, A., 2010. Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings* 42, 1361–1368.
- Benmansour, A., Hamdan, M.A., Bengueuddach, A., 2006. Experimental and numerical investigation of solid particles thermal energy storage unit. *Applied Thermal Engineering* 26, 513–518.
- Borreguero, A.M., Luz Sánchez, M., Valverde, J.L., Carmona, M., Rodríguez, J.F., 2011. Thermal testing and numerical simulation of gypsum wallboards incorporated with different PCMs content. *Applied Energy* 88, 930–937.
- Cabeza, L.F., Castell, A., Barreneche, C., de Gracia, A., Fernández, A.I., 2011. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 1675–1695.
- Cabeza, L.F., Castellón, C., Nogués, M., Medrano, M., Leppers, R., Zubillaga, O., February 2007a. Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. *Energy and Buildings* 39, 113–119.
- Cabeza, L.F., Medrano, M., Castellón, C., Castell, A., Solé, C., Roca, J., Nogués, M., 2007b. Thermal energy storage with phase change materials in building envelopes. *Contributions to Science* 3, 501–510.
- Cao, S., Gustavsen, A., Uvsløkk, S., 2010. The Effect of Wall-Integrated Phase Change Material Panels on the Indoor Air and Wall Temperature..
- Carbonari, A., De Grassi, M., Di Perna, C., Principi, P., 2006. Numerical and experimental analyses of PCM containing sandwich panels for prefabricated walls. *Energy and Buildings* 38, 472–483.
- Castell, A., Martorell, I., Medrano, M., Pérez, G., Cabeza, L.F., 2010. Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. *Energy and Buildings* 42, 534–540.
- Chandra, S., Kumar, R., Kaushik, S., Kaul, S., 1985. Thermal performance of a non-air-conditioned building with PCCM thermal storage wall. *Energy Conversion and Management* 25, 15–20.
- Chen, C., Guo, H., Liu, Y., Yue, H., Wang, C., 2008. A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard. *Energy and Buildings* 40, 882–890.
- Diaconu, B.M., Cruceru, M., 2010. Novel concept of composite phase change material wall system for year-round thermal energy savings. *Energy and Buildings* 42, 1759–1772.
- Dincer, I., Rosen, M., 2002. *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*. John Wiley & Sons.
- Entrop, A.G., Brouwers, H.J.H., Reinders, A.H.M.E., 2011. Experimental research on the use of micro-encapsulated Phase Change Materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in Dutch houses. *Solar Energy* 85, 1007–1020.
- Feldman, D., Banu, D., Hawes, D., Ghanbari, E., 1991. Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard. *Solar energy materials* 22, 231–242.
- Feustel, H.E., Stetiu, C., 1997. Thermal performance of phase change wallboard for residential cooling application ( No. LBL-38320). University of California, Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory.
- Ghoneim, A.A., Klein, S.A., Duffie, J.A., 1991. Analysis of collector-storage building walls using phase-change materials. *Solar Energy* 47, 237–242.

- Hadjieva, M., Stoykov, R., Filipova, T., 2000. Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage. *Renewable Energy* 19, 111–115.
- Halford, C.K., Boehm, R.F., 2007. Modeling of phase change material peak load shifting. *Energy and Buildings* 39, 298–305.
- Hasnain, S.M., 1998. Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques. *Energy Conversion and Management* 39, 1127–1138.
- Hawes, D.W., Banu, D., Feldman, D., 1989. Latent heat storage in concrete. *Solar Energy Materials* 19, 335–348.
- Hawes, D.W., Feldman, D., Banu, D., 1993. Latent heat storage in building materials. *Energy and Buildings* 20, 77–86.
- Hawlder, M.N.A., Uddin, M.S., Khin, M.M., 2003. Microencapsulated PCM thermal-energy storage system. *Applied energy* 74, 195–202.
- Hawlder, M.N.A., Uddin, M.S., Zhu, H.J., 2002. Encapsulated phase change materials for thermal energy storage: Experiments and simulation. *International Journal of Energy Research* 26, 159–171.
- Heim, D., 2010. Isothermal storage of solar energy in building construction. *Renewable Energy* 35, 788–796.
- Heim, D., Clarke, J.A., 2004. Numerical modelling and thermal simulation of PCM–gypsum composites with ESP-r. *Energy and Buildings* 36, 795–805.
- Hong, H., Kim, S.K., Kim, Y.-S., 2004. Accuracy improvement of T-history method for measuring heat of fusion of various materials. *International Journal of Refrigeration* 27, 360–366.
- Ip, K., 1998. Solar thermal storage with phase change materials in domestic buildings, in: CIB World Congress. Gävle, Sweden 7-12 June. pp. 1265–1272.
- Ismail, K.A.R., Henríquez, J.R., 2001. Thermally effective windows with moving phase change material curtains. *Applied Thermal Engineering* 21, 1909–1923.
- Jong, A.G.D., Hoogendoorn, C.J., 1981. Improvement of Heat Transport in Paraffines for Latent Heat Storage Systems, in: Ouden, C. den (Ed.), *Thermal Storage of Solar Energy*. Springer Netherlands, pp. 123–133.
- Kaasinen, H., 1992. The absorption of phase change substances into commonly used building materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 27, 173–179.
- Kenisarin, M., Mahkamov, K., 2007. Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, 1913–1965.
- Khudhair, A.M., Farid, M.M., 2004. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy Conversion and Management* 45, 263–275.
- Knowler, T., 1983. Proportioning composites for efficient-TSWs. *Solar Energy* 31, 31–326.
- Koo, J., So, H., Hong, S.W., Hong, H., 2011. Effects of wallboard design parameters on the thermal storage in buildings. *Energy and Buildings* 43, 1947–1951.
- Kravvaritis, E.D., Antonopoulos, K.A., Tzivanidis, C., 2011. Experimental determination of the effective thermal capacity function and other thermal properties for various phase change materials using the thermal delay method. *Applied Energy* 88, 4459–4469.
- Kuznik, F., David, D., Johannes, K., Roux, J.-J., 2011a. A review on phase change materials integrated in building walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 379–391.
- Kuznik, F., Virgone, J., 2009. Experimental investigation of wallboard containing phase change material: Data for validation of numerical modeling. *Energy and Buildings* 41, 561–570.
- Kuznik, F., Virgone, J., Johannes, K., 2011b. In-situ study of thermal comfort enhancement in a renovated building equipped with phase change material wallboard. *Renewable Energy* 36, 1458–1462.
- Kuznik, F., Virgone, J., Noel, J., 2008a. Optimization of a phase change material wallboard for building use. *Applied Thermal Engineering* 28, 1291–1298.
- Kuznik, F., Virgone, J., Roux, J.-J., 2008b. Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation. *Energy and Buildings* 40, 148–156.
- Lai, C.-M., Chiang, C.-M., 2006. How phase change materials affect thermal performance: Hollow bricks. *Building Research and Information* 34, 118–130.
- Lane, G.A., 1983. *Solar Heat Storage: Background and scientific principles*. CRC Press.
- Lane, G.A., 1986. *Solar heat storage: latent heat materials*. CRC Press.

- Lane, G.A., Glew, D., Clarke, E.C., Rossow, H.E., Quingley, S.W., Drake, S.S., Best, J.S., 1975. Heat of fusion systems for solar energy storage. Presented at the Workshop on solar energy storage subsystems for heating and cooling of buildings, University of Virginia, Charlottesville, pp. 43–55.
- Lee, T., Hawes, D.W., Banu, D., Feldman, D., 2000. Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 62, 217–237.
- Li, G., Hwang, Y., Radermacher, R., 2012. Review of cold storage materials for air conditioning application. *International Journal of Refrigeration* 35, 2053–2077.
- Liu, H., Awbi, H.B., 2009. Performance of phase change material boards under natural convection. *Building and Environment* 44, 1788–1793.
- Mandilaras, I., Stamatiadou, M., Katsourinis, D., Zannis, G., Founti, M., 2013. Experimental thermal characterization of a Mediterranean residential building with PCM gypsum board walls. *Building and Environment* 61, 93–103.
- Mehling, H., 2004. Strategic project “Innovative PCM-Technology”—results and future perspectives, 8th expert meeting and work shop, Kizkalesi, Turkey.
- Mehling, H., Cabeza, L.F., 2007. PHASE CHANGE MATERIALS AND THEIR BASIC PROPERTIES, in: Paksoy, H.Ö. (Ed.), *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption*, NATO Science Series. Springer Netherlands, pp. 257–277.
- Mehling, H., Cabeza, L.F., 2008. *Heat and cold storage with PCM: an up to date introduction into basics and applications*. Springer, Berlin.
- Mehling, H., Krippner, R., Hauer, A., 2002. Research project on PCM in wood-lightweight-concrete. Presented at the IEA, ECES Annex 17, *Advanced Thermal Energy Storage and Techniques – Feasibility Studies and Demonstration Projects 2nd Workshop*, Ljubljana, Slovenia.
- Osterman, E., Tyagi, V.V., Butala, V., Rahim, N.A., Stritih, U., 2012. Review of PCM based cooling technologies for buildings. *Energy and Buildings* 49, 37–49.
- Paksoy, H.Ö., 2007. *Thermal energy storage for sustainable energy consumption: fundamentals, case studies and design*. Springer.
- Pasupathy, A., Velraj, R., Seeniraj, R.V., 2008. Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12, 39–64.
- Peippo, K., Kauranen, P., Lund, P.D., 1991. A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating. *Energy and Buildings* 17, 259–270.
- Regin, A.F., Solanki, S.C., Saini, J.S., 2008. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12, 2438–2458.
- Salzer, I.O., Sircar, A.K., Kumar, A., 1995. Advanced phase change materials technology: evaluation in lightweight solite hollow-core building blocks, in: *Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*. pp. 217–224.
- Scalat, S., Banu, D., Hawes, D., Parish, J., Haghghata, F., Feldman, D., 1996. Full scale thermal testing of latent heat storage in wallboard. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 44, 49–61.
- Schossig, P., Henning, H., Gschwander, S., Haussmann, T., 2005. Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 89, 297–306.
- Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., Buddhi, D., 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 318–345.
- Sharma, S.D., Sagara, K., 2005. Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review. *International Journal of Green Energy* 2, 1–56.
- Shilei, L., Guohui, F., Neng, Z., Li, D., 2007. Experimental study and evaluation of latent heat storage in phase change materials wallboards. *Energy and Buildings* 39, 1088–1091.
- Shilei, L., Neng, Z., Guohui, F., 2006. Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter. *Energy and Buildings* 38, 18–24.
- Shukla, A., Buddhi, D., Sawhney, R.L., 2008. Thermal cycling test of few selected inorganic and organic phase change materials. *Renewable Energy* 33, 2606–2614.
- Silva, T., Vicente, R., Soares, N., Ferreira, V., 2012. Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: A passive construction solution. *Energy and Buildings* 49, 235–245.
- Soares, N., Costa, J.J., Gaspar, A.R., Santos, P., 2013. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings’ energy efficiency. *Energy and Buildings* 59, 82–103.

- Soares, N., Gaspar, A.R., Santos, P., Costa, J.J., 2014. Multi-dimensional optimization of the incorporation of PCM-drywalls in lightweight steel-framed residential buildings in different climates. *Energy and Buildings* 70, 411–421. doi:10.1016/j.enbuild.2013.11.072
- Stetiu, C., Feustel, H.E., 1998. Phase-change wallboard and mechanical night ventilation in commercial buildings. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Stovall, T.K., Tomlinson, J.J., 1995. What are the potential benefits of including latent storage in common wallboard? *TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS JOURNAL OF SOLAR ENERGY ENGINEERING* 117, 318–325.
- Stritih, U., Novak, P., 1996. Solar heat storage wall for building ventilation. *Renewable Energy* 8, 268–271.
- Swet, C.J., 1980. PHASE CHANGE STORAGE IN PASSIVE SOLAR ARCHITECTURE. pp. 282–286.
- Tatsidjodoung, P., Le Pierrès, N., Luo, L., 2013. A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 18, 327–349.
- Telkes, M., 1949a. Review of solar house heating *Heat Vent*, 46 (9), pp. 68–74.
- Telkes, M., 1949b. Storing solar heat in chemicals *Heat Vent*, 46 (11), pp. 79–86.
- Telkes, M., 1974. SOLAR ENERGY STORAGE. *ASHRAE Journal* 16, 38–44.
- Tyagi, V.V., Buddhi, D., 2007. PCM thermal storage in buildings: A state of art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, 1146–1166.
- Tyagi, V.V., Kaushik, S.C., Tyagi, S.K., Akiyama, T., 2011. Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 1373–1391.
- W. R. Humphries, E.I.G., 1977. A design handbook for phase change thermal control and energy storage devices. NASA STI/Recon Technical Report N 78, 15434.
- Weinläder, H., Beck, A., Fricke, J., 2005. PCM-facade-panel for daylighting and room heating. *Solar Energy* 78, 177–186.
- Zalba, B., Marín, J.M., Cabeza, L.F., Mehling, H., 2003. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied thermal engineering* 23, 251–283.
- Zalba, B., Marín, J.M., Cabeza, L.F., Mehling, H., 2004. Free-cooling of buildings with phase change materials. *International Journal of Refrigeration* 27, 839–849.
- Zhang, M., Medina, M.A., King, J.B., 2005. Development of a thermally enhanced frame wall with phase-change materials for on-peak air conditioning demand reduction and energy savings in residential buildings. *International Journal of Energy Research* 29, 795–809.
- Zhang, X., Fan, Y., Tao, X., Yick, K., 2005. Crystallization and prevention of supercooling of microencapsulated n-alkanes. *Journal of Colloid and Interface Science* 281, 299–306.
- Zhang, Y., Jiang, Y., 1999. A simple method, the -history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials. *Measurement Science and Technology* 10, 201–205.
- Zhang, Y., Lin, K., Jiang, Y., Zhou, G., 2008. Thermal storage and nonlinear heat-transfer characteristics of PCM wallboard. *Energy and Buildings* 40, 1771–1779.
- Zhang, Y., Zhou, G., Lin, K., Zhang, Q., Di, H., 2007. Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook. *Building and Environment* 42, 2197–2209.
- Zhou, D., Zhao, C.Y., Tian, Y., 2012. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy* 92, 593–605.
- Zhu, N., Ma, Z., Wang, S., 2009. Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review. *Energy Conversion and Management* 50, 3169–3181.





# 3

## Μηχανισμοί Μετάδοσης Θερμότητας & Αριθμητική Επίλυση Αλλαγής Φάσης

### Περιεχόμενα 3<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

---

3.	Εισαγωγή	56
3.1.	Φαινόμενα Μεταφοράς Θερμότητας – Εφαρμογή σε κτήρια	56
3.2.	Υλικά Αλλαγής Φάσης και Ειδική θερμοχωρητικότητα	62
3.3.	Αριθμητικές Μέθοδοι για την μοντελοποίηση της Αλλαγής Φάσης Υλικών	64
3.4.	Σύνοψη κεφαλαίου - Συμπεράσματα	73
	Βιβλιογραφία 3 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου	74

---

### 3. Εισαγωγή

---

Το κεφάλαιο αυτό εξετάζει τους μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας διαμέσου υλικών, με έμφαση στα υλικά αλλαγής φάσης. Συνοπτική αναφορά γίνεται στους τρόπους μετάδοσης θερμότητας (αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία) καθώς και στις εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν τα φαινόμενα αυτά.

Έμφαση δίνεται στην περίπτωση όπου η μετάδοση θερμότητας γίνεται διαμέσου στοιχείων τοιχοποιίας, τα οποία ενσωματώνουν ΥΑΦ. Ειδικά για την περίπτωση των ΥΑΦ, κρίνεται απαραίτητη η περιγραφή των διεργασιών αλλαγής φάσης ενός υλικού, καθώς και των εξισώσεων που περιγράφουν τη τήξη ή στερεοποίηση του. Με αυτό τον τρόπο, αποσαφηνίζονται οι περιοχές (στερεή, υδαρή, υγρή περιοχή) κατά τις οποίες παρουσιάζονται διαφορετικές τιμές στις ιδιότητες του υλικού και συγκεκριμένα στην ειδική θερμοχωρητικότητα του.

Τέλος, περιγράφονται οι τρόποι αριθμητικής επίλυσης της διαδικασίας αλλαγής φάσης. Παρουσιάζεται το πρόβλημα της ροής θερμότητας συμπεριλαμβανομένης και της μεταβολής της κατάστασης ενός υλικού, το οποίο διατυπώθηκε από τον Stefan, καθώς και οι μέθοδοι επίλυσης (σταθερού και κινούμενου πλέγματος) του προβλήματος αυτού. Όσον αφορά την προσέγγιση που χρησιμοποιείται για να περιγράψει με απλοποιημένο τρόπο τις περιοχές της αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας ενός υλικού αλλαγής φάσης, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις μεθόδους σταθερού πλέγματος (μέθοδος ενθαλπίας, μέθοδος φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας και μέθοδος θερμικής πηγής). Από τις προαναφερθείσες μεθόδους, περιγράφεται ειδικότερα η μέθοδος της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας, εφόσον αυτή θα είναι η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί στο μοντέλο προσομοίωσης που θα αναπτυχθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

#### 3.1. Φαινόμενα Μεταφοράς Θερμότητας – Εφαρμογή σε κτήρια

---

Η μετάδοση θερμότητας διαμέσου ενός υλικού γίνεται με τον συνδυασμό των παρακάτω μεθόδων: αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Ο βαθμός που συνεισφέρει η κάθε μέθοδος στην συνολική μετάδοση εξαρτάται, κυρίως, από τη θερμοκρασία και το είδος του υλικού το οποίο εξετάζεται. Ειδικά για τις περιπτώσεις που το εξεταζόμενο υλικό αφορά δομικά στοιχεία κτηρίων, η αγωγή και η συναγωγή διαδραματίζουν σημαντικότερο ρόλο καθ' όλη τη διάρκεια του έτους σε σχέση με την ακτινοβολία. Η ακτινοβολία επηρεάζει σημαντικά την καλοκαιρινή περίοδο, καθώς η προσπίπτουσα ακτινοβολία από τον ήλιο επηρεάζει τις εξωτερικές συνθήκες των δομικών υλικών.

Για λόγους κατανόησης των θερμικών διεργασιών που διέπουν τα δομικά στοιχεία που εμπεριέχουν Υλικά Αλλαγής Φάσης, παρακάτω αναφέρονται όλες οι μέθοδοι μετάδοσης θερμότητας ξεχωριστά.

### 3.1.1. Μετάδοση θερμότητας μέσω αγωγής

---

Η **Θερμική Αγωγιμότητα** (*thermal conduction*) μπορεί να οριστεί ως η μετάδοσης της θερμότητας μέσω ενός στερεού ή υγρού σώματος σε κατάσταση ηρεμίας (Croft and Lilley, 1977, Çengel and Ghajar, 2011).

Η μεταφορά αυτή επιτυγχάνεται είτε με μοριακή αλληλεπίδραση, δηλαδή μεταφορά ενέργειας από τα περισσότερο ενεργητικά μόρια στα γειτονικά τους, με χαμηλότερο επίπεδο ενέργειας, είτε μέσω της συγκέντρωσης των ελεύθερων ηλεκτρονίων στα, καθαρώς μεταλλικά στερεά. Στα αέρια και ρευστά, η μεταφορά της θερμικής ενέργειας μέσω αγωγιμότητας, λαμβάνει χώρα μέσω ελαστικών κρούσεων ή μέσω διάχυσης των μορίων, κατά την τυχαία κίνησή τους. Στην περίπτωση των στερεών μέσων, η αντίστοιχη θερμική ενέργεια μεταφέρεται, μέσω των ταλαντώσεων των μορίων του πλέγματος και των κινουμένων ηλεκτρονίων, από περιοχές υψηλής, σε περιοχές χαμηλής θερμοκρασίας.

Ο Newton και στη συνέχεια ο Fourier ανέπτυξαν τους θεμελιώδεις νόμους της θερμικής αγωγιμότητας, μέσω πειραματικής παρατήρησης συστημάτων μόνιμης κατάστασης. Παρατήρησαν ότι η ροή θερμότητας διαμέσου ενός υλικού είναι ευθέως ανάλογη προς τη θερμοκρασιακή διαφορά καθώς και την κατεύθυνση της ροής θερμότητας. Μαθηματικά, η ροή θερμότητας μέσω αγωγής κατά τον  $x$ -άξονα, μπορεί να γραφεί :

$$Q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.1)$$

όπου  $Q$  είναι ο ρυθμός ροής θερμότητας, το  $A$  είναι η περιοχή κάθετα προς την κατεύθυνση της ροής θερμότητας ( $m^2$ ),  $\frac{\partial T}{\partial x}$  είναι η κλίση θερμοκρασίας σε αυτή την κατεύθυνση ( $K/m$ ) και  $k$  είναι η θερμική αγωγιμότητα του υλικού ( $W/mK$ ).

Στη περίπτωση δομικών στοιχείων, η μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής θα συμβεί μέσω των υφιστάμενων θερμικών μαζών, όπως οι τοίχοι, ο εξοπλισμός και τα έπιπλα. Παραδείγματος χάριν, για ένα πλακίδιο, το οποίο περιέχει ΥΑΦ, πάχους ( $\Delta x$ ) και θερμικής αγωγιμότητας  $k$ , στο οποίο παρατηρούνται οι θερμοκρασίες  $T_\alpha$  και  $T_{PCM}$  εκατέρωθεν και υποθέτοντας ότι η θερμότητα ρέει μόνο προς την κατεύθυνση  $x$  (μονοδιάστατο πρόβλημα), η εξίσωση (3.1) γίνεται:

$$Q = kA \frac{(T_\alpha - T_{PCM})}{\Delta x} \quad (3.2)$$

### 3.1.2. Μετάδοση θερμότητας μέσω συναγωγής

---

Η **Θερμική Συναγωγιμότητα** (*thermal convection*) ορίζεται, ως ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας μεταξύ μιας στερεής επιφάνειας και ενός παρακείμενου κινούμενου ρευστού (υγρού ή αερίου) και είναι ένας συνδυασμός αγωγιμότητας και κίνησης του ρευστού. Ο μηχανισμός λειτουργίας της μεταφοράς θερμότητας με συναγωγιμότητα δεν εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασιακή διαφορά, αλλά οφείλεται σε μεγάλο βαθμό από τη φύση της κίνησης του ρευστού δίπλα στην επιφάνεια όπου το οριακό στρώμα αναπτύσσεται (Baehr and Stephan, 2011, Çengel and Ghajar, 2011).

Η θερμική συναγωγιμότητα ταξινομείται, σύμφωνα με τη φύση της κίνησης του ρευστού. **Εξαναγκασμένη** (*Forced*) θερμική συναγωγιμότητα συντελείται στις περιπτώσεις, όπου το ρευστό κινείται επί μιας επιφάνειας, λόγω εξωτερικών παραγόντων, όπως υπό την επίδραση ενός ανεμιστήρα, μίας αντλίας ή εξ αιτίας του ανέμου. Αντιθέτως, **Ελεύθερη** (*Free*) ή **Φυσική** (*Natural*) θερμική συναγωγιμότητα συντελείται, όταν η κίνηση του ρευστού οφείλεται σε δυνάμεις άνωσης, που προκαλούνται από τις διαφορετικές τιμές πυκνότητας, λόγω της θερμοκρασιακής διανομής του ρευστού. Ο νόμος του Newton για τη συναγωγή, περιγράφει τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή και δίνεται από την εξίσωση:

$$Q = hAdT \quad (3.3)$$

όπου  $h$  είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μέσω συναγωγής ( $W/m^2K$ ).

Στη περίπτωση δομικών στοιχείων, η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή λαμβάνει χώρα μεταξύ του αέρα και των επιφανειών των τοίχων, τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά του κτηρίου. Στο παράδειγμα του πλακιδίου με ΥΑΦ, ο ρυθμός ροής θερμότητας λόγω συναγωγής μεταξύ του πλακιδίου που βρίσκεται σε θερμοκρασία  $T_{PCM}$  και τον περιβάλλοντα αέρα θερμοκρασίας  $T_a$  δίνει:

$$Q = hA(T_a - T_{PCM}) \quad (3.4)$$

### 3.1.3. Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία

Η **Ακτινοβολία** (*radiation*) είναι μια μορφή μεταφοράς θερμότητας μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ανάμεσα σε δύο επιφάνειες, οι οποίες βρίσκονται σε απόσταση. Σε αντίθεση με τους άλλους δυο μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας (αγωγή και συναγωγή), η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία δεν απαιτεί την ύπαρξη ύλης, αλλά μπορεί να πραγματοποιηθεί και εν κενώ (στην πραγματικότητα, η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία συμβαίνει πιο αποδοτικά εν κενώ). Η πραγματική ποσότητα της ενέργειας που εκπέμπεται με ακτινοβολία από ένα σώμα ποικίλει ανάλογα με την θερμοκρασία του σώματος εκπομπής, το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας καθώς και τη φύση και την έκταση της επιφάνειας του σώματος (Kreith et al., 2010, Çengel and Ghajar, 2011).

Η κύρια μορφή της ακτινοβολίας για τις περιπτώσεις κτηρίων, είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Οι επιπτώσεις αυτής αφορούν κυρίως την αλλαγή της θερμοκρασίας των τοιχωμάτων, τόσο των εξωτερικών, όσο και των εσωτερικών, καθώς η προσπίπτουσα ακτινοβολία η οποία διέρχεται μέσω παραθύρων είναι σημαντική ανά γεωγραφική θέση και χρονική περίοδο και πλέον εμπεριέχεται στα μοντέλα προσομοίωσης κτηρίων.

Αν θεωρήσουμε τη στερεή εξωτερική επιφάνεια ενός σώματος, τότε υπό ιδανικές συνθήκες, ο ρυθμός με τον οποίο η ενέργεια εξέρχεται από μοναδιαίο εμβαδόν της

επιφάνειας είναι ανάλογη προς την τέταρτη δύναμη της απόλυτης θερμοκρασίας του σώματος και καλείται **πυκνότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας E**. Ο νόμος Stefan – Boltzman περιγράφει το φαινόμενο:

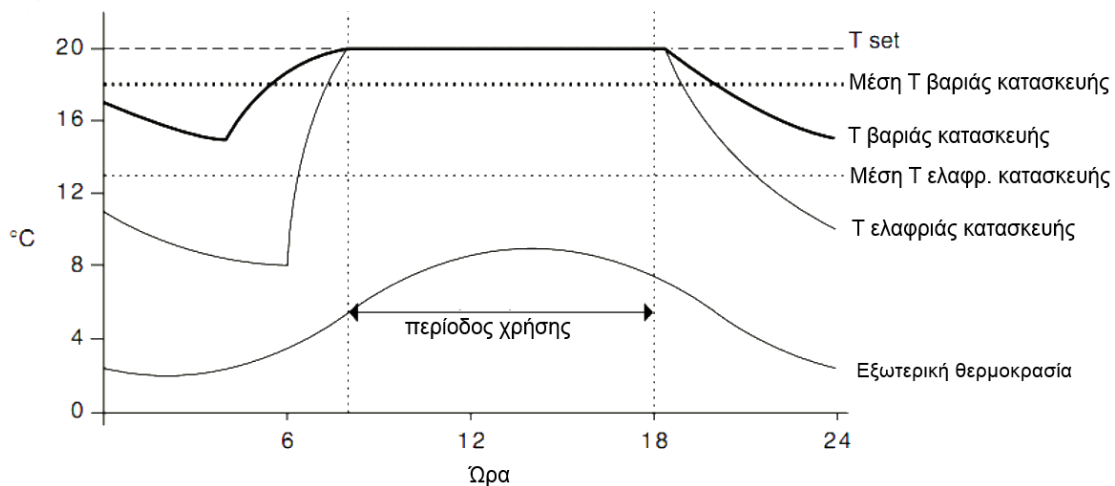
$$Q = \sigma T^4 \quad (3.5)$$

όπου  $\sigma$  είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann =  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ .

### 3.1.4. Μετάδοση θερμότητας σε κτήρια

Τα κτήρια εκτίθενται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος καθημερινώς, οι οποίες ποικίλλουν τυχαία ως προς το χρόνο και αποτελούνται από παραμέτρους, οι οποίες επηρεάζουν τις διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας. Μερικές από τις παραμέτρους αυτές είναι: το είδος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (άμεση, διάχυτη, ανακλώμενη), η θερμοκρασία του αέρα, η ταχύτητα του ανέμου, η θερμοκρασία του εδάφους και η σχετική υγρασία. Η απώλεια θερμότητας από ένα κτήριο είναι ανάλογη προς τη διαφορά μεταξύ εξωτερικών και εσωτερικών θερμοκρασιών, η οποία παρατηρείται μέσα σε μια ημέρα (Baker, 2009) και αυτή εξαρτάται πολύ από την θερμική μάζα του κτηρίου.

Στην Εικόνα 3.1, φαίνεται ότι η απώλεια θερμότητας, κατά τις ώρες χρήσης του κτηρίου (7π.μ-6μ.μ), είναι η περιοχή μεταξύ των δυο καμπυλών θερμοκρασίας: της εξωτερικής θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας του κτηρίου. Ειδικότερα, κτήρια βαριάς κατασκευής δείχνουν μεγαλύτερο ποσοστό απώλειας θερμότητας κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, σε σχέση με αντίστοιχα κτήρια ελαφριάς κατασκευής.



Εικόνα 3.1 Σύγκριση θερμοκρασιακής διακύμανσης σε κτήρια βαριάς και ελαφριάς κατασκευής αντίστοιχα (Baker, 2009)

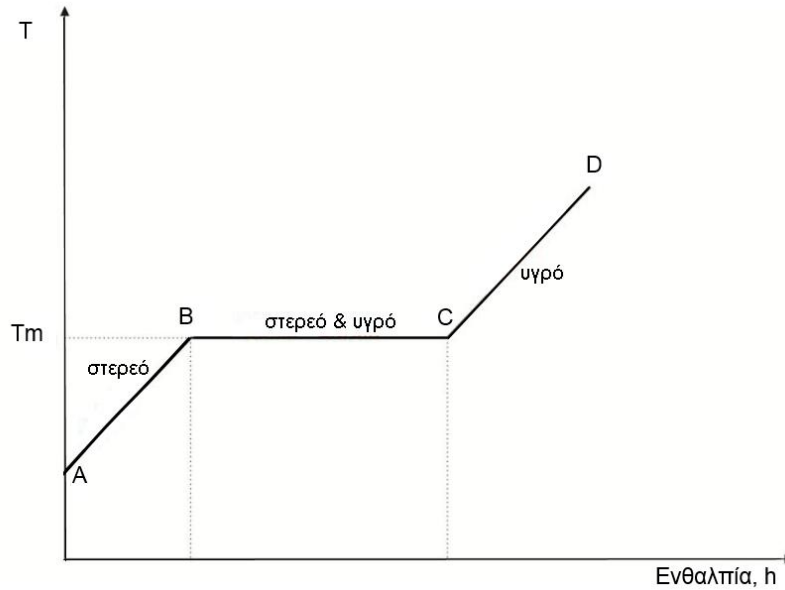
Οι συντελεστές μετάδοσης θερμότητας καθώς και οι θερμικές ιδιότητες δεν είναι σαφώς καθορισμένες και αλλάζουν, όχι μόνο ως προς το χρόνο και το χώρο, αλλά επίσης και ως προς την θερμοκρασία και την υγρασία (Rohsenow et al., 1985). Αυτό υποδηλώνει ότι η διαδικασία μεταφοράς θερμότητας είναι ένα μη γραμμικό φαινόμενο και είναι αρκετά δύσκολη η κατάλληλη αναπαράσταση της σε ένα υπολογιστικό μοντέλο. Η παρουσία ΥΑΦ στα δομικά στοιχεία κάνει το φαινόμενο ακόμη πιο πολύπλοκο και σύνθετο κατά τη διαδικασία αλλαγής φάσης τους, ιδίως όταν είναι σε μεταβατική κατάσταση (Heim, 2005). Η ακρίβεια στην προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς ενός κτηρίου με ενσωματωμένα ΥΑΦ στα δομικά του στοιχεία είναι ο πρωταρχικός στόχος της παρούσας διατριβής.

Όταν το υλικό αλλαγής φάσης είναι σε στερεά κατάσταση και ο περιβάλλοντας αέρας είναι θερμότερος από αυτό, τότε συμπεριφέρεται όπως τα συμβατικά υλικά, η θερμοκρασία των οποίων αυξάνεται καθώς απορροφούν θερμότητα.

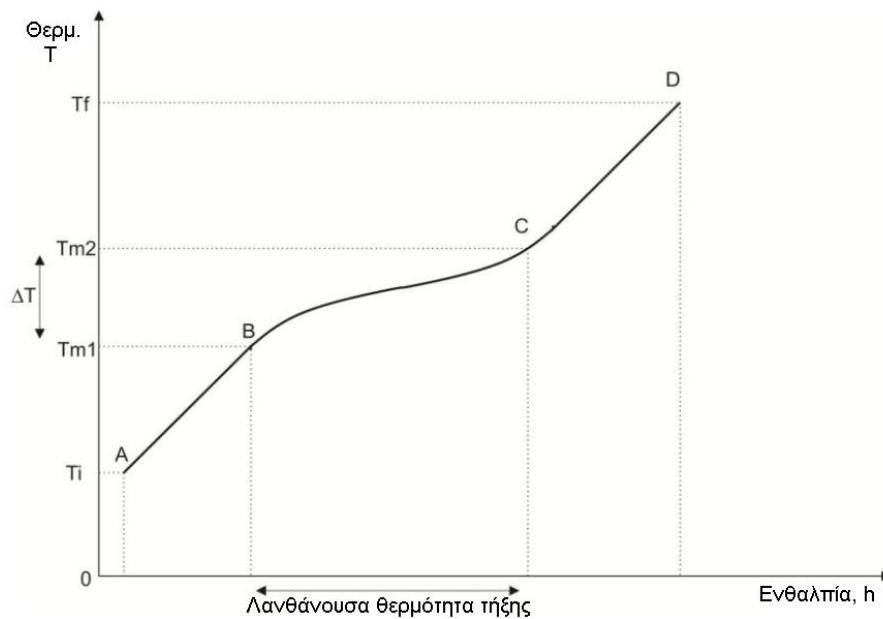
Όταν η θερμοκρασία του αγγίζει την τιμή της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης  $T_m$  (σημείο B), τότε η θερμοκρασία της επιφάνειας του παύει να αυξάνει, ενώ η απορρόφηση θερμότητας συνεχίζει (βλ. Εικόνα 3.2). Η απορρόφηση και αποθήκευση της λανθάνουσας πλέον θερμότητας, προκαλεί την αναδιάρθρωση των χημικών δεσμών και κατ' επέκταση την τήξη και τον μετασχηματισμό του στερεού υλικού σε υγρό. Το υλικό σε αυτή την περιοχή υφίσταται ως μίγμα στερεού και υγρού ή δύο φάσεων και είναι ικανό να απορροφά μεγάλες ποσότητες λανθάνουσας θερμικής ενέργειας από το περιβάλλον χωρίς σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας επιφανείας του, μέχρι να ολοκληρωθεί η διαδικασία της τήξης. Σε αυτή την κατάσταση (σημείο C), το υλικό είναι εντελώς υγρό. Οποιαδήποτε περαιτέρω πρόσδοση θερμότητας στο υλικό ανεβάζει τη θερμοκρασία του, αποθηκεύεται δηλαδή σε αυτό ως αισθητή θερμότητα.

Η αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας εμφανίζεται μόνο στην περιοχή τήξης, ενώ η αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή αισθητής θερμότητας εμφανίζεται κατά τη διάρκεια τόσο των στερεών όσο και των υγρών περιοχών.

Κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, οι διαδικασίες αυτές αντιστρέφονται (από το σημείο D στο σημείο A), στην περίπτωση ενός ιδανικού ΥΑΦ. Στην πραγματικότητα, δύο διεργασίες συμβαίνουν κατά τη διάρκεια του μετασχηματισμού φάσης. Πρώτον, η διαδικασία στερεοποίησης εμφανίζεται με διαφορετικές τιμές στις ιδιότητες της θερμικής μάζας που οφείλεται στο φαινόμενο υστέρησης. Δεύτερον, η αλλαγή φάσης λαμβάνει χώρα σε μία περιοχή θερμοκρασιών όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3. Προκειμένου να υπάρχει μεταφορά θερμότητας, δεν υπάρχει ισοθερμοκρασιακή διεργασία τήξης ή στερεοποίησης, αλλά παρατηρείται μια θερμοκρασιακή διαφορά, έστω και αν αυτή είναι μικρή.



Εικόνα 3.2 Ιδεατή καμπύλη ενθαλπίας συναρτήσει της θερμοκρασίας για ΥΑΦ



Εικόνα 3.3 Πρακτική καμπύλη ενθαλπίας συναρτήσει της θερμοκρασίας για ΥΑΦ

Η μεγαλύτερη πρόκληση κατά τη μοντελοποίηση ΥΑΦ είναι η εξάρτηση της θερμοχωρητικότητας του υλικού με τη θερμοκρασία (Rose et al., 2009). Οι περισσότερες μελέτες, χάριν απλότητας, βασίζονται στην εξιδανικευμένη αναστρέψιμη περίπτωση που φαίνεται στην Εικόνα 3.2. Η μέθοδος αυτή κατατάσσει την διαδικασία ως μια χρονικά γραμμικά μεταβαλλόμενη διαδικασία με σταθερή θερμοκρασία στην περιοχή αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας.

### 3.2. Υλικά Αλλαγής Φάσης και Ειδική Θερμοχωρητικότητα

Η ειδική θερμοχωρητικότητα  $c$  ορίζεται ως η ποσότητα της θερμότητας η οποία απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία 1 Kg του υλικού κατά ένα βαθμό Κέλβιν. Μονάδα μέτρησης είναι (Wh/KgK). ή J/(KgK)). Ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας  $C$  (J/(m<sup>2</sup>K)) προσδιορίζει την ποσότητα θερμότητας, που αποταμιεύεται σε 1 m<sup>2</sup> ενός δομικού στοιχείου, όταν η θερμοκρασιακή διαφορά του αέρα μέσα και έξω από το δομικό στοιχείο είναι 1K (Croft and Lilley, 1977). Είναι μια ιδιότητα που εξαρτάται από τη θερμοκρασία και μεταβάλλεται μη-γραμμικά μέσα στις περιοχές των θερμικών διεργασιών ενός υλικού αλλαγής φάσης. Η ποσότητα της θερμότητας που απαιτείται για να αυξήσει τη θερμοκρασία 1kg PCM από ένα βαθμό Κελσίου μεταβάλλεται μεταξύ των θερμικών διεργασιών μη-γραμμικά. Αν και η ειδική θερμοχωρητικότητα κατά την αλλαγή φάσης είναι εν γένει μη γραμμική, αρκετά γραμμικά, απλοποιημένα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί από πολλούς συγγραφείς για την θερμική ανάλυση της διαδικασίας αλλαγής φάσης.

Οι κυρίαρχες εξισώσεις για τον προσδιορισμό της ειδικής θερμοχωρητικότητας με βάση τη ογκομετρική θερμοχωρητικότητα δόθηκαν ως εξής (Alawadhi, 2008):

$$(\rho C)_{PCM} = \begin{cases} (\rho C)_S & \text{στερεό} \\ \frac{(\rho C)_S + (\rho C)_L}{2} + \frac{(\rho)_S + (\rho)_L}{2} \left( \frac{\lambda}{\Delta T} \right) & \text{μίγμα} \\ (\rho C)_L & \text{υγρό} \end{cases} \quad (3.6)$$

#### 3.2.1. Περιοχή Αισθητής Θερμότητας

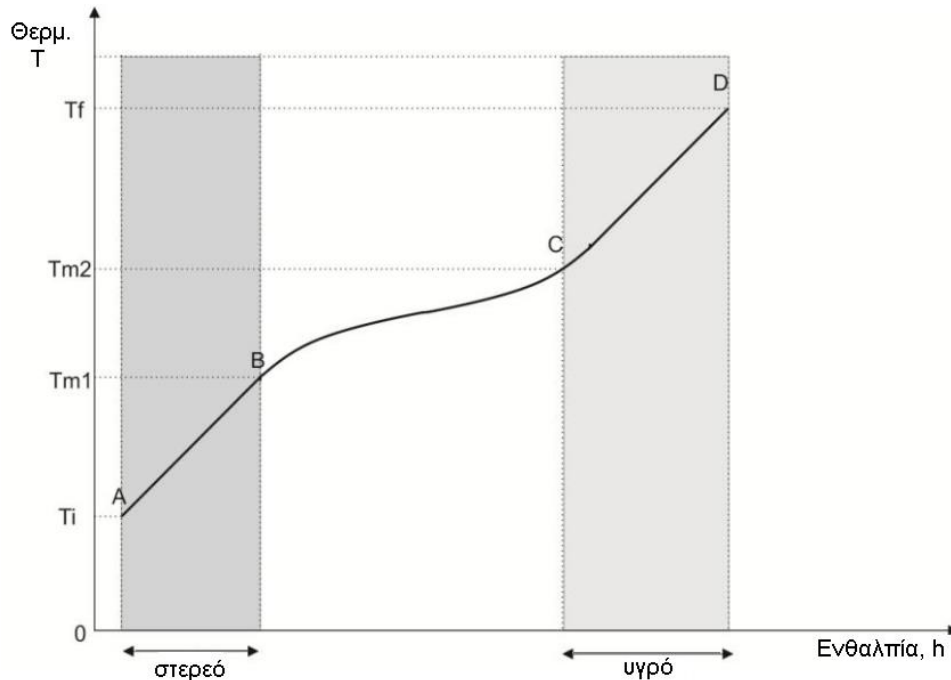
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η αποθήκευση αισθητής θερμικής ενέργειας συμβαίνει κατά τη διάρκεια της στερεάς και της υγρής περιοχής. Μολονότι η επίδρασή της στο υλικό αλλαγής φάσης είναι σχεδόν ελάχιστη σε σύγκριση με αυτή της λανθάνουσας ενέργειας, είναι εξίσου σημαντική. Οι τιμές για την ειδική θερμοχωρητικότητα του ΥΑΦ ποικίλλουν όταν βρίσκεται μέσα σε αυτές τις περιοχές (βλ. Εικόνα 3.4). Η εξίσωση, η οποία περιγράφει την αποθήκευση αισθητής θερμικής ενέργειας του ΥΑΦ δίνεται από τις σχέσεις:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m C_p dT \quad (3.7)$$

$$Q = m C_p (T_f - T_i) \quad (3.8)$$

όπου το  $Q$  είναι ο ρυθμός ροής θερμότητας (W),  $T_i$  είναι η αρχική θερμοκρασία (°C),  $T_f$  είναι η τελική θερμοκρασία (°C),  $C_p$  είναι ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση (kJ / kg),  $m$  είναι η μάζα του υλικού (kg).





Εικόνα 3.4 Περιοχές αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, κατά τη διαδικασία αλλαγής φάσης του υλικού

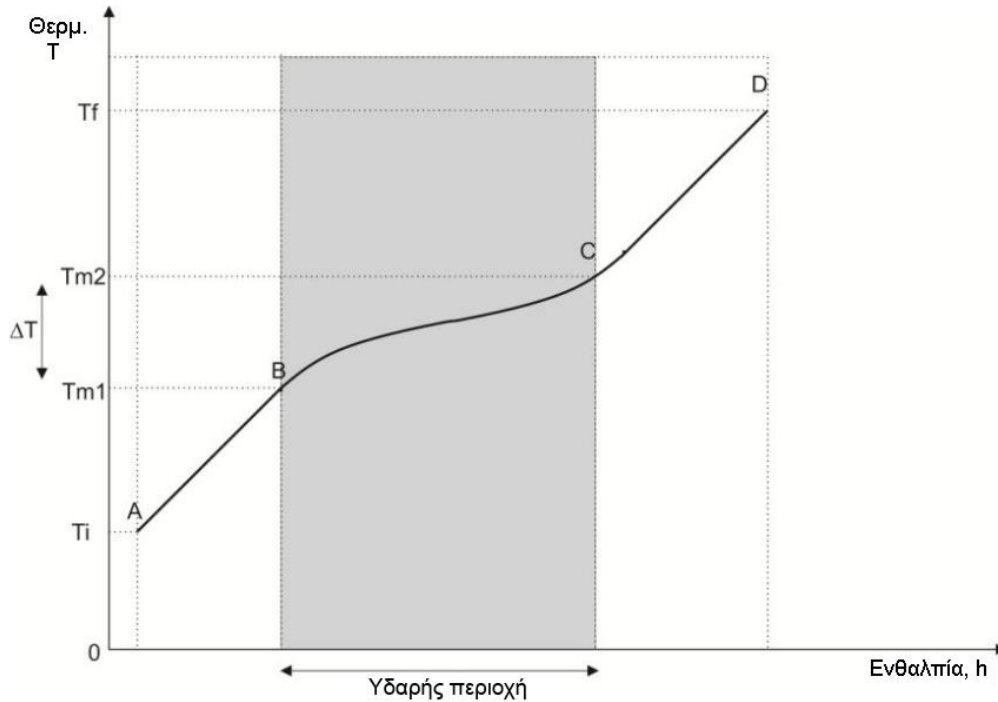
### 3.2.2. Περιοχή Λανθάνουσας Θερμότητας

Λανθάνουσα θερμότητα είναι η ποσότητα της θερμικής ενέργειας που απαιτείται για να μετατραπεί μια μονάδα μάζας από μια πρώτη κατάσταση στη δεύτερη κατάσταση, χωρίς μεταβολή της θερμοκρασίας (Baker, 2009). Η λανθάνουσα θερμότητα συσσωρεύεται σε ένα υλικό πριν από μια διαδικασία αλλαγής φάσης, συνεπώς, είναι η ενέργεια που απαιτείται για να συμβεί μια τέτοια αλλαγή. Πρακτικά όμως, παρατηρείται μία ελαφρά άνοδος της θερμοκρασίας κατά τη διαδικασία αλλαγής φάσης (βλ. Εικόνα 3.5). Η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας ορίζεται ως:

$$Q = \int_{T_{m1}}^{T_{m2}} m C_{pm} dT \quad (3.9)$$

$$T_{m2} = T_{m1} + \Delta T$$

όπου  $T_{m1}$  είναι η αρχική θερμοκρασία τήξης,  $T_{m2}$  είναι η τελική θερμοκρασία τήξεως,  $\Delta T$  είναι η περιοχή τήξης,  $C_p$  είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα στην υδαρή περιοχή.



Εικόνα 3.5 Περιοχές αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, κατά τη διαδικασία αλλαγής φάσης του υλικού

Επομένως, η συνολική ροή θερμότητας διαμέσου του ΥΑΦ ορίζεται ως:

$$Q = \int_{T_i}^{T_{m1}} m C_{ps} dT + \int_{T_{m1}}^{T_{m2}} m C_{pm} dT + \int_{T_{m2}}^{T_f} m C_{pl} dT \quad (3.10)$$

Ο 1<sup>ος</sup> όρος στη δεξιά πλευρά της εξίσωσης αντιπροσωπεύει την αισθητή θερμότητα που αποκτήθηκε από τη στερεά κατάσταση, ο 2<sup>ος</sup> όρος είναι η λανθάνουσα θερμότητα κατά την τήξη ενώ ο 3<sup>ος</sup> όρος είναι η αύξηση λόγω της αισθητής θερμότητας σε υγρή κατάσταση. Δεδομένου ότι η μάζα παραμένει σταθερή καθ 'όλη τη διάρκεια, η Εξίσωση  $Q = \int_{T_i}^{T_{m1}} m C_{ps} dT + \int_{T_{m1}}^{T_{m2}} m C_{pm} dT + \int_{T_{m2}}^{T_f} m C_{pl} dT$  (3.10) μπορεί να γραφεί ως:

$$Q = m \left[ \int_{T_i}^{T_{m1}} C_{ps} dT + \int_{T_{m1}}^{T_{m2}} C_{pm} dT + \int_{T_{m2}}^{T_f} C_{pl} dT \right] \quad (3.11)$$

### 3.3. Αριθμητικές Μέθοδοι για την μοντελοποίηση της Αλλαγής Φάσης Υλικών

Η μοντελοποίηση του φαινομένου μεταφοράς θερμότητας μέσα σε δομικό υλικό ή στοιχείο το οποίο αποτελεί μέρος μιας κατασκευής και εμπεριέχει ΥΑΦ, οφείλει να ακολουθεί τις εξισώσεις που περιγράφουν το φαινόμενο αυτό. Η μετάδοση θερμότητας όμως, αποτελεί σύνθετο φαινόμενο, εξαιτίας της μη γραμμικής φύσης του προβλήματος της μεταβολής φάσης του υλικού, όπως έχουμε προαναφέρει. Η αριθμητική επίλυση ενός τέτοιου συστήματος, το οποίο αποτελείται από περισσότερες από μία φάσεις, είναι πολύπλοκη

διαδικασία αλλά αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη κατάλληλων εργαλείων, τα οποία θα οδηγήσουν στην ακριβή περιγραφή της θερμικής συμπεριφοράς των συστημάτων αυτών.

Ολόκληρη η διαδικασία μετασχηματισμού μπορεί να αναλυθεί σε επιμέρους τμήματα της κάθε φάσης. Συνεπώς, μια απλοποιημένη ανάλυση του όλου συστήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί, εξετάζοντας τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του κάθε τμήματος. Η τήξη και η στερεοποίηση είναι διαδικασίες μετασχηματισμού οι οποίες συνοδεύουν την απορρόφηση της θερμότητας και την απελευθέρωση της θερμότητας, αντίστοιχα. Μεταξύ των δύο μετασχηματισμών της φάσης υπάρχει μια συνεχώς μετακινούμενη επιφάνεια διαφορετικών φάσεων, γνωστό και ως πρόβλημα μετακινούμενου ορίου (moving boundary problem) ή πρόβλημα Stefan (Alexiades and Solomon, 1993, Lane, 1986, Lamberg et al., 2004). Η απλή περίπτωση ενός μετακινούμενου ορίου μελετήθηκε από τον Stefan το 1890 (Lewis and Morgan, 1979) και αφορά τη μονοδιάστατη αλλαγή φάσης της τήξης του πάγου. Η στερεοποίηση του πάγου περιλαμβάνει την εξέταση της αρχής της διατήρησης της ενέργειας στην περιοχή  $\Omega$ , διαιρώντας την σε δύο ξεχωριστές επιμέρους περιοχές: στην υγρή κατάσταση ( $\Omega_l$ ) και στην στερεά κατάσταση ( $\Omega_s$ ). Η συνολική περιοχή  $\Omega$  είναι το άθροισμα αυτών των δύο επιμέρους περιοχών.

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας που ορίζεται για την υγρή κατάσταση ( $\Omega_l$ ) είναι (Voller, 1997):

$$\rho_l C_l \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{k}_l \nabla T \quad (3.12)$$

ενώ αντίστοιχα για τη στερεή φάση ( $\Omega_s$ )

$$\rho_s C_s \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{k}_s \nabla T \quad (3.13)$$

όπου  $T$  είναι η θερμοκρασία,  $k$  είναι η θερμική αγωγιμότητα,  $\rho$  είναι η πυκνότητα,  $C$  είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα και οι δείκτες  $l$  και  $s$  παριστούν την υγρή και στερεά κατάσταση αντιστοίχως.

Στο όριο της αλλαγής φάσης (διεπιφάνεια στερεού-υγρού) ισχύουν οι ακόλουθες συνθήκες:

$$T_l = T_s = T_m \quad (3.14)$$

$$\mathbf{k}_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \Big|_{x=X(t)} - \mathbf{k}_l \frac{\partial T_l}{\partial x} \Big|_{x=H(t)} = \rho_s L \frac{dX(t)}{dt} \quad (3.15)$$

όπου  $L$  η λανθάνουσα θερμότητα στερεοποίησης (kJ/kg).

Η Εξίσωση 3.15, γνωστή και ως συνθήκη Stefan, εκφράζει την θερμική ισορροπία κατά μήκος του ορίου αλλαγής φάσης  $x=X(t)$ .

Λόγω της μη γραμμικότητας του φαινομένου, πολύ λίγες αναλυτικές λύσεις είναι διαθέσιμες για τα προβλήματα αλλαγής φάσης στη βιβλιογραφία (Alexiades and Solomon, 1993, Crank, 1987, Ozisik, 1993), και αφορούν κυρίως απλές περιπτώσεις γεωμετρίας και οριακών συνθηκών (Riley, 1974, McNabb et al., 1990). Για αυτό το λόγο, αρκετές αριθμητικές μέθοδοι έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων στη βιβλιογραφία (Voller et al., 2006, Idelsohn et al., 1994, Basu and Date, 1988, Hu and Argyropoulos, 1996) και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε:

1. **Μέθοδοι σταθερού πλέγματος (fixed grid method)**: εφαρμόζονται στο εκάστοτε σύστημα αντιμετωπίζοντας το στερεό και το υγρό σαν ένα ενιαίο μέσον και οι συνθήκες της διεπιφάνειας εκφράζονται από μιας επιπλέον συνήθη διαφορική εξίσωση, ουσιαστικά αντιμετωπίζοντας έμμεσα την διαδικασία αλλαγής φάσης. Στη βιβλιογραφία απατώνται διαφορετικές προσεγγίσεις όσον αφορά την αντιμετώπιση της λανθάνουσας θερμότητας (Hu and Argyropoulos, 1996). Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι σε αυτήν την κατηγορία είναι οι **μέθοδοι της ενθαλπίας (enthalpy method)**, της **φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας (effective specific heat method)** και της **πηγής θερμότητας (heat source method)**. Η μέθοδος σταθερού πλέγματος έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως και ως εκ τούτου θα είναι το επίκεντρο αυτής της εργασίας, καθώς υπερέχουν λόγω της απλότητάς τους εφόσον αντιπροσωπεύουν την αλλαγή φάσης εμμέσως. Ωστόσο, πρόκειται για μεθόδους, οι οποίες δίνουν λιγότερη ακρίβεια στην περιοχή της αλλαγής φάσης (Voller and Swaminathan, 1991).

2. **Μέθοδοι κινούμενου πλέγματος (moving grid method)**: Σε αυτές τις μεθόδους, οι κόμβοι πλέγματος κινούνται μαζί με το κινούμενο οριακό στρώμα και έτσι το πλέγμα διαμορφώνεται καθώς επιλύεται το σύστημα. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει η **μέθοδος του μετώπου αντίδρασης (reaction front)**, η οποία αντιμετωπίζει χωριστά την στερεά και υγρή περιοχή και εξετάζει τη διεπιφάνεια στερεού-υγρού ως ένα κινούμενο όριο (H. C. Huang et al., 1994). Η μέθοδος κινούμενου πλέγματος προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια στην αναπαράσταση των θερμικών διεργασιών της αλλαγής φάσης, με μειονέκτημα την δυσκολία εφαρμογής σε υλικά που ψύχονται πάνω από ένα εύρος θερμοκρασιών.

3. **Υβριδική μέθοδος (hybrid method)**: Η μέθοδος αυτή συνδυάζει τις δυνατότητες των δυο προηγούμενων μεθόδων: χρησιμοποιεί ένα σταθερό πλέγμα γενικά ενώ η κίνηση της διεπιφάνειας στερεού-υγρού, αντιμετωπίζεται με τοπικά συστήματα που αναφέρονται ο κινούμενο όριο (Voller et al., 2006).

Παρακάτω αναφέρονται αναλυτικά οι μέθοδοι σταθερού πλέγματος, οι οποίες θα μας απασχολήσουν στην παρούσα διατριβή. Ως πρώτη σκέψη, η προσέγγιση στην επίλυση των προβλημάτων αλλαγής φάσης είναι να ακολουθείται με ακρίβεια το κινούμενο όριο. Ωστόσο, αυτό απαιτεί την εκ των προτέρων υπόθεση/βεβαίωση ότι το κινούμενο όριο είναι ομαλό καθ'όλη τη διάρκεια (Furzeland, 1980). Αυτή η υπόθεση προφανώς δεν ισχύει πάντα και ως εκ τούτου απαιτείται αναπροσαρμογή στη μοντελοποίηση της αλλαγής φάσης,

χρησιμοποιώντας, ως προφανή εναλλακτική λύση, τις μεθόδους του σταθερού πλέγματος (Crank, 1987, Voller et al., 1990, Clavier et al., 1994, Rolph and Bathe, 1982). Η συνθήκη του Stefan που δίνεται από την Εξίσωση 3.15 στις μεθόδους σταθερού πλέγματος αντιμετωπίζεται εμμέσως από μια αναδιατυπωμένη εξίσωση, η οποία θα γίνει και η κυρίαρχη εξίσωση, όπως θα φανεί και στις παρακάτω υποενότητες.

Η μέθοδος σταθερού πλέγματος είναι απλή σε σύγκριση με τις άλλες, πιο ευέλικτη, προσαρμόσιμη και μοντελοποιείται εύκολα (Alexiades and Solomon, 1993). Η λανθάνουσα θερμότητα κατά την αλλαγή φάσης μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας είτε τη μέθοδο ενθαλπίας (Shamsundar and Sparrow, 1975, Swaminathan and Voller, 1993, White, 1982), είτε τη μέθοδο της φαινόμενης θερμοχωρητικότητας (Bonacina et al., 1973, Morgan, 1981, Hsiao and Chung, 1986, Pham, 1985), είτε τη μέθοδο της θερμικής πηγής (Voller, 1985, Voller, 1990, Swaminathan and Voller, 1997, Costa et al., 1998), ή άλλες μεθόδους (Idelsohn et al., 1994, Hu and Argyropoulos, 1996, Salcudean and Abdullah, 1988). Οι ενότητες που ακολουθούν περιγράφουν τις μεθόδους αυτές, ενώ στον Πίνακα 3.1 συγκεντρώνονται όλες οι μέθοδοι σταθερού πλέγματος με τα χαρακτηριστικά τους.

Πίνακας 3.1 Κύρια χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αριθμητικών μεθόδων επίλυσης προβλημάτων αλλαγής φάσης

Μαθηματικό μοντέλο	Κύριο Χαρακτηριστικό	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Βιβλιογραφία
Μέθοδος Ενθαλπίας	Η ενθαλπία περιγράφει τόσο την αποθήκευση αισθητής όσο και λανθάνουσας θερμότητας.	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Γρήγορη (εάν επιλεγθεί το κατάλληλο σύστημα εξισώσεων)</li> <li>•Αντιμετωπίζει τόσο την απότομη όσο και σταδιακή αλλαγή φάσης.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Δύσκολο να περιγράψει το φαινόμενο supercooling</li> <li>•Η θερμοκρασία σε ένα σημείο του πλέγματος μπορεί να ταλαντώνεται με το χρόνο</li> </ul>	(Alexiades and Solomon, 1993) (Knoll and Keyes, 2004) (Voller, 1997) (Swaminathan and Voller, 1993) (Pham, 1985)
Μέθοδος φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας	Η θερμοχωρητικότητα περιγράφει την αποθήκευση αισθητής όσο και λανθάνουσας θερμότητας.	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Εύκολη στην κατανόηση, επειδή αφορά μία εξαρτημένη μεταβλητή "θερμοκρασία"</li> <li>•Εύκολη για προγραμματισμό</li> <li>•Κατάλληλη για τη σταδιακή αλλαγή φάσης</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Απαιτούνται μικρό χρονικό βήμα και πυκνό πλέγμα για μεγαλύτερη ακρίβεια</li> <li>•Δύσκολη εφαρμογή στις περιπτώσεις όπου το θερμοκρασιακό εύρος μεταβολής φάσης είναι μικρό</li> <li>•Δύσκολο να συγκλίνει και υπάρχει πάντα η πιθανότητα αν υποεκτιμηθεί η λανθάνουσα θερμότητα</li> <li>•Δεν ισχύει για τις περιπτώσεις όπου η αλλαγή φάσης πραγματοποιείται σε σταθερή θερμοκρασία</li> <li>•Έλλειψη υπολογιστικής αποδοτικότητας</li> </ul>	(Voller, 1997) (Idelsohn et al., 1994) (Hu and Argyropoulos, 1996) (Poirier and Salcudean, 1988) (Hashemi and Sliepcevich, 1967)
Μέθοδος θερμικής πηγής	Η λανθάνουσα θερμότητα αντιμετωπίζεται ως μια εσωτερική πηγή θερμότητας.	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Εύκολη στην κατανόηση, επειδή διαχωρίζει και ξεετάζει ξεχωριστά την λανθάνουσα από την αισθητή θερμότητα.</li> <li>• Αντιμετωπίζει τόσο την απότομη όσο και σταδιακή αλλαγή φάσης.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Επιλύεται με επαναληπτική μέθοδο με χαλάρωση (under relaxation) και επομένως απαιτούνται επιπλέον προσπάθειες για να καθορισθεί η βέλτιστη τιμή relaxation factor</li> <li>•Προβλήματα σύγκλισης και σφαλμάτων, όταν η τήξη συμβαίνει σε θερμοκρασία μεγαλύτερη του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης.</li> <li>•Έλλειψη υπολογιστικής αποδοτικότητας</li> </ul>	(Crank, 1987) (Eyres et al., 1946) (Voller, 1985) (Swaminathan and Voller, 1997)

### 3.3.1. Μέθοδος της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας

Πρόκειται για μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς δομικών υλικών και στοιχείων. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η ενέργεια που απορροφάται ή εκλύεται κατά τη διάρκεια διάφορων φυσικο-χημικών αντιδράσεων λαμβάνεται υπόψη μέσω της καμπύλης της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας ( $C_{eff}$ ), η οποία προκύπτει είτε θεωρητικά είτε από μετρήσεις  $\Delta\theta\Sigma$ . Στην εξέλιξη του μοντέλου της ενεργούς θερμοχωρητικότητας, το πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας του ΥΑΦ, το οποίο περιγράφεται γενικά από τρεις εξισώσεις (εξίσωση για την στερεά, για την υγρή και για την ενδιάμεση υδαρή κατάσταση), μετασχηματίζεται σε μη γραμμικό πρόβλημα αγωγής θερμότητας ενιαίας φάσης, καθ' όλο το εύρος των υπολογισμών. (Chen et al., 2008)

Έτσι, λοιπόν, επιλύεται η απλή εξίσωση αγωγής με τη διαφορά ότι η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού αντικαθίσταται με τη φαινόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα.

$$\frac{dH}{dT} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{k} \nabla T) \quad (3.16)$$

Στην παραπάνω εξίσωση ως φαινόμενη ειδική θερμοχωρητικότητα  $C_{eff}$  ορίζεται το πηλίκο

$$C_{eff} = \frac{dH}{dT} \quad (3.17)$$

ποσότητα η οποία δηλώνει την κλίση της καμπύλης στο διάγραμμα θερμοκρασίας ενθαλπίας (Yang and He, 2010).

Μελετώντας την εξέλιξη των φάσεων ενός ΥΑΦ (όταν ο μετασχηματισμός φάσης συμβαίνει σε ένα θερμοκρασιακό εύρος), η τιμή της ενεργούς θερμοχωρητικότητας κινείται, με βάση συγκεκριμένες οριακές συνθήκες, στα παρακάτω πλαίσια:

$$C_{eff} = \begin{cases} \rho C_s, & T < T_s \\ \rho C_f + \frac{L}{(T_1 - T_s)}, & T_s \leq T \leq T_1 \\ \rho C_\lambda, & T > T_1 \end{cases} \quad (3.18)$$

Η παραπάνω διαφοροποίηση των τιμών οφείλεται στο γεγονός ότι αφενός στο μοντέλο η ισοδύναμη θερμοχωρητικότητα θεωρείται συνάρτηση της θερμοκρασίας και αφετέρου η ειδική θερμοχωρητικότητα θεωρείται σταθερή κατά την υγρή και στερεά κατάσταση (Heim, 2010).

Το μέγεθος της  $C_{eff}$  εκλαμβάνεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, στο θερμοκρασιακό εύρος μεταβολής φάσης. Το υλικό βρίσκεται πλήρως αποφορτισμένο σε θερμοκρασία χαμηλότερη από αυτήν της τήξης. Εντός του θερμοκρασιακού εύρους όπου πραγματοποιείται η αλλαγή φάσης, οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις του υλικού

περιορίζονται από σχεδόν ισοθερμοκρασιακή διεργασία τήξης ή στερεοποίησης. Θερμοκρασία ίση ή μεγαλύτερη από αυτή της στερεοποίησης είναι δυνατό να υπάρξει μόνο για κατάσταση πλήρως φορτισμένου υλικού. Ουσιαστικά, συνοψίζοντας, το υλικό μπορεί να βρίσκεται εκτός του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης, μόνο στην περίπτωση που είναι πλήρως φορτισμένο ή αποφορτισμένο (Heim, 2010).

Πρόκειται για μια ευρέως χρησιμοποιούμενη αριθμητική μέθοδο για την ανάλυση του φαινομένου της μη ισοθερμοκρασιακής αλλαγής φάσης ενός υλικού, καθώς εισάγει την έννοια της ενεργούς ή ισοδύναμης θερμοχωρητικότητας κι αντιμετωπίζει την λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης ως ειδική θερμότητα σε αισθητή μορφή σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος μεταβολής της φάσης. Επιπλέον καθιστά εφικτό τον προσδιορισμό της διεπιφάνειας στερεού-υγρού με την επίτευξη θερμοκρασιακής κατανομής.

Ως προς τη μοντελοποίηση της μεθόδου, ο Heim (Heim, 2002) παρουσίασε εφαρμογές της μεθόδου αυτής ενώ αργότερα χρησιμοποιεί την μέθοδο αυτή στην μοντελοποίηση των διεργασιών αλλαγής φάσης ΥΑΦ ενσωματωμένο σε δομικό στοιχείο κτηρίου στο λογισμικό ESP-r (Heim, 2005).

### 3.3.2. Μέθοδος της ενθαλπίας

Με τη μέθοδο της ενθαλπίας, το πρόβλημα του ορίου της αλλαγής της φάσης απλοποιείται, με την απλή εξίσωση αγωγής θερμότητας να εκφράζεται ως προς την ενθαλπία και τη θερμοκρασία, τόσο για την υγρή όσο και τη στέρεα φάση του υλικού. Η μέθοδος της ενθαλπίας προτάθηκε από τον Eyres (Eyres et al., 1946) και η εξίσωση που την περιγράφει είναι:

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla[k(\nabla T)] \quad (3.19)$$

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

Η γενικευμένη μορφή της αναδιατυπωμένης μορφής της συνθήκης Stefan, η οποία πρωτοαναφέρθηκε από τον (Voller, 1997) εκλαμβάνει το μέγεθος της ενθαλπίας ως πρωτεύουσα μεταβλητή, ενώ η συνάρτηση της θερμοκρασίας  $T=T(H)$ :

$$T = \begin{cases} \frac{H}{c}, & H \leq CT_m \\ T_m, & CT_m \leq H \leq CT_m + L \\ \frac{H-L}{c}, & H > CT_m + L \end{cases} \quad (3.20)$$

επιλύεται συγχρόνως με την εξίσωση της ενθαλπίας (Voller and Cross, 1981, H. C. Huang et al., 1994).

Η μέθοδος αυτή, όπως φαίνεται από την εξίσωση, εκφράζει την διατήρηση ενέργειας κατά την αλλαγή φάσης με όρους της ολικής ογκομετρικής ενθαλπίας  $H$  και



θερμοκρασίας  $T$  για σταθερές θερμοφυσικές ιδιότητες. Το μέγεθος της ολικής ογκομετρικής ενθαλπίας  $H$  αποτελεί το άθροισμα της αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας (Dutil et al., 2011):

$$H(T) = h(T) + \rho f(T)L \quad (3.21)$$

και:

$$h = \int_{T_m}^T \rho C dT \quad (3.22)$$

Σε περιπτώσεις όπου η αλλαγή φάσης δεν συμβαίνει μόνο σε μια συγκεκριμένη τιμή θερμοκρασίας, η σχέση ενθαλπίας-θερμοκρασίας υποδηλώνεται τότε με την μορφή:

$$H(T) = \begin{cases} CT, & T < T_m \\ CT + L, & T > T_m \end{cases} \quad (3.23)$$

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

$$H(T) = \begin{cases} CT, & T \leq T_m - \varepsilon \\ H(T_m - \varepsilon) + \frac{L(T - T_m + \varepsilon)}{2\varepsilon}, & T_m - \varepsilon < T < T_m + \varepsilon \\ H(T_m + \varepsilon) + C(T - T_m - \varepsilon), & T_m + \varepsilon \leq T \end{cases} \quad (3.24)$$

Όταν η ενθαλπία ορίζεται από την παραπάνω ομαλή συνάρτηση (χωρίς ταλαντώσεις), τότε αποδεικνύεται ότι οι επικείμενες θερμοκρασίες θα μπορέσουν να προβλεφθούν μόνο όταν τουλάχιστον δύο κομβικές θερμοκρασίες βρίσκονται στην περιοχή αλλαγής φάσης σε όλα τα χρονικά βήματα. Επομένως, το μέγεθος  $\varepsilon$  αποτελεί μια σημαντική παράμετρο για την αποδοτικότητα του συστήματος (Voller and Cross, 1981).

Η μέθοδος της ενθαλπίας χαρακτηρίζεται τόσο από πλεονεκτήματα, όσο και από μειονεκτήματα. Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι το γεγονός ότι οι συνθήκες της διεπαφής  $x=X(t)$  επιτυγχάνονται αυτόματα ενώ η ακριβής ανίχνευση του κινούμενου ορίου δεν αποτελεί απαραίτητο στοιχείο. Επιπλέον, δεν είναι απαραίτητο να εξεταστούν οι περιοχές κάθε πλευράς του ορίου ξεχωριστά, ενώ δημιουργείται και μια υδαρής ζώνη μεταξύ των δύο φάσεων, όπου η μεταβολή φάσης πραγματοποιείται εντός ενός θερμοκρασιακού εύρους και όχι σε ένα σημείο. Η ζώνη αυτή αποτρέπει τις απότομες ασυνέχειες οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν κάποιες αριθμητικές αστάθειες. Κατά συνέπεια, η ποιότητα της υδαρούς αυτής ζώνης είναι κρίσιμης σημασίας για την επίδοση του εκάστοτε μοντέλου (Voller and Cross, 1981).

Τα κυριότερα μειονεκτήματα της μεθόδου αφορούν το γεγονός ότι η λανθάνουσα θερμότητα, η οποία απορροφάται και απορρίπτεται από το υλικό κατά την αλλαγή φάσης του, δεν αντιπροσωπεύεται πλήρως απ' την μέθοδο και ότι παρατηρούνται θερμοκρασιακές διακυμάνσεις κοντά στις οριακές συνθήκες. Όσον αφορά τη μοντελοποίηση, απαιτείται αρκετή ώρα απ' τον υπολογιστή να προσομοιώσει το φαινόμενο, εξαιτίας των μικρών χωρικών και χρονικών απαιτήσεων για ιδανική ανάλυση

Η μέθοδος της ενθαλπίας μπορεί να συμμορφωθεί τόσο με προβλήματα που αφορούν την υδαρή ζώνη που προαναφέρθηκε, όσο και με αυτά που αφορούν στην ισοθερμοκρασιακή αλλαγή φάσης, λαμβάνοντας πάντοτε υπόψη την παράμετρο του χρόνου. Ο Hunter (Hunter and Kuttler, 1989) και ο Amdjadi (Amdjadi et al., 1990) επιβεβαίωσαν πως η εν λόγω μέθοδος είναι η πιο κατάλληλη για τυπικές εφαρμογές υπό τον περιορισμό όμως ότι δεν θα υπάρξει κάποια μετατροπή στο αριθμητικό σύστημα της διεπαφής.

### 3.3.3. Μέθοδος της θερμικής πηγής

Η μέθοδος της θερμικής πηγής είναι παρόμοια μέθοδος με αυτήν της ενθαλπίας. Χρησιμοποιώντας την βασική εξίσωση της μεθόδου της ενθαλπίας, στη μέθοδο της θερμικής πηγής η συνολική ενθαλπία χωρίζεται στην ενθαλπία της αισθητής και της λανθάνουσας θερμότητας αντίστοιχα, όπου η λανθάνουσα θερμότητα που απορροφά ή εκλύει το υλικό, λαμβάνεται ως όρος εσωτερικής πηγής θερμότητας. Η Εξίσωση 2.20 τότε γίνεται:

$$\rho C_{avg} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) - \rho L \frac{\partial f_l}{\partial t} \quad (3.25)$$

Η μέθοδος αυτή προτάθηκε από τον Eyres (Eyres et al., 1946) στα μέσα της δεκαετίας του 1940. Με την προσέγγιση αυτή, το ποσοστό του μίγματος στην υδαρή περιοχή (ποσοστού υγρου-στερεου) γραμμικοποιείται και η εξίσωση μπορεί να λυθεί επαναληπτικά βάσει της θερμοκρασίας. Το κλάσμα του μίγματος μπορεί να προσεγγιστεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη βοηθητική εξίσωση (Swaminathan and Voller, 1997):

$$f_l = \begin{cases} 0, & T \leq T_m - \epsilon \\ \frac{(T-T_s)}{(T_L-T_s)}, & T_m - \epsilon < T < T_m + \epsilon \\ 1, & T \geq T_m + \epsilon \end{cases} \quad (3.26)$$

Η μέθοδος της θερμικής πηγής στερείται της απλότητας που χαρακτηρίζει τη μέθοδο της ενθαλπίας (H. C. Huang et al., 1994). Από την άλλη, η μέθοδος αυτή δεν παρουσιάζει τα μειονεκτήματα της μεθόδου της ενθαλπίας που αναφέρονται ανωτέρω. Πρόκειται για ένα αποτελεσματικό και ευέλικτο τρόπο για την αναπαράσταση των διαδικασιών αλλαγής φάσης. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η έλλειψη ομαλότητας του θερμοκρασιακού προφίλ σε περιπτώσεις που υπάρχουν χονδροειδή πλέγματα και μεγάλα χρονικά βήματα. Ο Heim (Heim, 2005) υιοθέτησε αυτή τη μέθοδο ως μια

δεύτερη προσέγγιση στη μοντελοποίηση των θερμικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή της αλλαγής φάσης, ειδικά για ΥΑΦ που έχουν ενσωματωθεί σε ένα κτήριο. Τέλος, ο Costa (Costa et al., 1998) έχει χρησιμοποιήσει αυτή τη μέθοδο για την αριθμητική προσομοίωση της αποθήκευσης της λανθάνουσας θερμότητας.

#### 3.4. Σύνοψη κεφαλαίου - Συμπεράσματα

---

Η υπολογιστική προσομοίωση ενός μηχανισμού απαιτεί την ενδελεχή εξέταση του, κυρίως, μέσω της θεωρίας. Οι μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας διαμέσου υλικών, με έμφαση στα υλικά αλλαγής φάσης που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφονται από τις βασικές εξισώσεις αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας, καθώς και τις εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν το φαινόμενο της αλλαγής της φάσης (τήξη και στερεοποίηση).

Οι τρόποι αριθμητικής επίλυσης της διαδικασίας αλλαγής φάσης είναι αρκετές, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο όμως, δόθηκε έμφαση στις μεθόδους σταθερού πλέγματος, όπου περιγράφονται με απλοποιημένο τρόπο οι περιοχές της αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας ενός υλικού αλλαγής φάσης. Από τις τρεις μεθόδους αυτές (μέθοδος ενθαλπίας, μέθοδος φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας και μέθοδος θερμικής πηγής), κρίνεται ως πιο σημαντική η μέθοδος της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας, εφόσον αυτή θα είναι η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί στο μοντέλο προσομοίωσης που θα αναπτυχθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

## Βιβλιογραφία 3<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

---

- Al-Saadi, S.N., Zhai, Z. (John), 2013. Modeling phase change materials embedded in building enclosure: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21, 659–673.
- Alawadhi, E.M., 2008. Thermal analysis of a building brick containing phase change material. *Energy and Buildings* 40, 351–357.
- Alexiades, V., Solomon, A.D., 1993. *Mathematical modeling of melting and freezing processes*. Hemisphere Publishing Corporation.
- Amdjadi, M., B, F., C, M., 1990. Résolution unidimensionnelle d'un problème de Stefan par une méthode à pas de temps variable: application à une bille de chliarolithe. *Revue générale de thermique* 29, 129–134.
- Baehr, H.H.D., Stephan, K., 2011. *Heat and Mass Transfer*. Springer.
- Baker, N., 2009. *The handbook of sustainable refurbishment non-domestic buildings*. Earthscan, London; Sterling, VA.
- Basu, B., Date, A.W., 1988. Numerical modelling of melting and solidification problems—A review. *Sadhana* 13, 169–213.
- Bonacina, C., Comini, G., Fasano, A., Primicerio, M., 1973. Numerical solution of phase-change problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 16, 1825–1832.
- Çengel, Y.A., Ghajar, A.J., 2011. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. McGraw Hill Higher Education.
- Chen, C., Guo, H., Liu, Y., Yue, H., Wang, C., 2008. A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard. *Energy and Buildings* 40, 882–890.
- Clavier, L., Arquis, E., Caltagirone, J.P., Gobin, D., 1994. A fixed grid method for the numerical solution of phase change problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 37, 4247–4261.
- Costa, M., Buddhi, D., Oliva, A., 1998. Numerical simulation of a latent heat thermal energy storage system with enhanced heat conduction. *Energy Conversion and Management* 39, 319–330.
- Crank, J., 1987. *Free and moving boundary problems*. Oxford University Press, Incorporated.
- Croft, D.R.A., Lilley, D.G., 1977. *Heat Transfer Calculations Using Finite Difference Equations*. Applied Science Pub.
- Dutil, Y., Rousse, D.R., Salah, N.B., Lassue, S., Zalewski, L., 2011. A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 112–130.
- Eyres, N., Hartree, D., Ingham, J., Jackson, R., Sarjant, R., Wagstaff, J., 1946. The calculation of variable heat flow in solids *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 240, pp. 1–57.
- Furzeland, R.M., 1980. A Comparative Study of Numerical Methods for Moving Boundary Problems. *IMA J Appl Math* 26, 411–429.
- Hashemi, H., Sliepcevich, C., 1967. A numerical method for solving two-dimensional problems of heat conduction with change of phase *Chemical Engineering ProgSymposium*, 63, pp. 34–41.
- Heim, D., 2002. Modeling building elements with the application of phase change materials, in: P. Schiebl, et al. (Eds.), *Proceedings of the Fourth Ph.D. Symposium in Civil Engineering*, vol. 1, Munich, pp. 248–255.
- Heim, D., 2005. Two solution methods of heat transfer with phase change within whole building dynamic simulation, in: *9th International IBPSA Conference, Montréal, Canada*.
- Heim, D., 2010. Isothermal storage of solar energy in building construction. *Renewable Energy* 35, 788–796.
- Heim, D., Clarke, J.A., 2004. Numerical modelling and thermal simulation of PCM-gypsum composites with ESP-r. *Energy and buildings* 36, 795–805.
- Hsiao, J.S., Chung, B.T.F., 1986. An Efficient Algorithm for Finite Element Solution to Two-Dimensional Heat Transfer With Melting and Freezing. *J. Heat Transfer* 108, 462–464.
- Hu, H., Argyropoulos, S.A., 1996. Mathematical modelling of solidification and melting: a review. *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 4, 371.
- Huang, H.C., Usmani, A.S., Huang, H.-C., 1994. *Finite Element Analysis for Heat Transfer: Theory and Software*. Springer.
- Hunter, L.W., Kuttler, J.R., 1989. The Enthalpy Method for Heat Conduction Problems with Moving Boundaries. *Journal of Heat Transfer (Transactions of the ASME (American Society of Mechanical Engineers), Series C); (United States)* 111:2.

- Idelsohn, S.R., Storti, M.A., Crivelli, L.A., 1994. Numerical methods in phase-change problems. *ARCO* 1, 49–74.
- Knoll, D.A., Keyes, D.E., 2004. Jacobian-free Newton–Krylov methods: a survey of approaches and applications. *Journal of Computational Physics* 193, 357–397.
- Kreith, F., Manglik, R.M., Bohn, M.S., 2010. *Principles of Heat Transfer*. Cengage Learning.
- Lamberg, P., Lehtiniemi, R., Henell, A.-M., 2004. Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage. *International Journal of Thermal Sciences* 43, 277–287.
- Lane, G.A., 1986. *Solar heat storage: latent heat materials*. CRC Press.
- Lewis, R.W., Morgan, K., 1979. *Numerical methods in thermal problems: proceedings of the first international conference held at University College, Swansea on 2nd–6th July, 1979*. Pineridge Press, Swansea Eng.
- McNabb, A., Wake, G.C., Hossain, M.M., McNabb, A., 1990. Transition times between steady-states for heat conduction. Dept. of Mathematics and Statistics, Massey Univ., Palmerston North.
- Minkowycz, W.J., Sparrow, Ephraim M., 1997. *Advances in numerical heat transfer*. Taylor & Francis.
- Morgan, K., 1981. A numerical analysis of freezing and melting with convection. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 28, 275–284.
- Ozisik, M.N., 1993. *Heat Conduction*. Wiley.
- Pham, Q.T., 1985. A fast, unconditionally stable finite-difference scheme for heat conduction with phase change. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 28, 2079–2084.
- Poirier, D., Salcudean, M., 1988. On Numerical Methods Used in Mathematical Modeling of Phase Change in Liquid Metals. *J. Heat Transfer* 110, 562–570.
- Riley, D.S., 1974. The inward solidification of spheres and circular cylinders. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 17, 1507–1516.
- Rohsenow, W.M., Hartnett, J.P., Ganić, E.N., 1985. *Handbook of heat transfer applications*. McGraw-Hill.
- Rolph, W.D., Bathe, K.-Jür., 1982. An efficient algorithm for analysis of nonlinear heat transfer with phase changes. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 18, 119–134.
- Rose, J., Lahme, A., Christensen, N.U., Heiselberg, P., Hansen, M., 2009. NUMERICAL METHOD FOR CALCULATING LATENT HEAT STORAGE IN CONSTRUCTIONS CONTAINING PHASE CHANGE MATERIAL 2, in: 11th IBPSA Conference.
- Salcudean, M., Abdullah, Z., 1988. On the numerical modelling of heat transfer during solidification processes. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 25, 445–473.
- Shamsundar, N., Sparrow, E. M., 1975. Analysis of Multidimensional Conduction Phase Change Via the Enthalpy Model. *J. Heat Transfer* 97, 333–340.
- Swaminathan, C.R., Voller, V.R., 1993. On the Enthalpy Method. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow* 3, 233–244.
- Swaminathan, C.R., Voller, V.R., 1997. Towards a general numerical scheme for solidification systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 40, 2859–2868.
- Voller, V.R., 1985. Implicit Finite—difference Solutions of the Enthalpy Formulation of Stefan Problems. *IMA J Numer Anal* 5, 201–214.
- Voller, V.R., 1987. An implicit enthalpy solution for phase change problems: with application to a binary alloy solidification. *Applied Mathematical Modelling* 11, 110–116.
- Voller, V.R., 1990. Fast Implicit Finite-Difference Method for the Analysis of Phase Change Problems. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals* 17, 155–169.
- Voller, V.R., 1997. An overview of numerical methods for solving phase change problems, in: Minkowycz WJ, Sparrow EM, Editors. *Advances in Numerical Heat Transfer*. Taylor & Francis, pp. 341–380.
- Voller, V.R., Cross, M., 1981. Accurate solutions of moving boundary problems using the enthalpy method. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 24, 545–556.
- Voller, V.R., Swaminathan, C.R., 1991. General Source-Based Method for Solidification Phase Change. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals* 19, 175–189.
- Voller, V.R., Swaminathan, C.R., Thomas, B.G., 1990. Fixed grid techniques for phase change problems: A review. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 30, 875–898.
- Voller, V.R., Swenson, J.B., Kim, W., Paola, C., 2006. An enthalpy method for moving boundary problems on the earth’s surface. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow* 16, 641–654.
- White, R.E., 1982. An Enthalpy Formulation of the Stefan Problem. *SIAM Journal on Numerical Analysis* 19, 1129–1157.

Yang, H., He, Y., 2010. Solving heat transfer problems with phase change via smoothed effective heat capacity and element-free Galerkin methods. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37, 385–392.

# 4

## Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Εισαγωγής ΥΑΦ σε υπολογιστικά εργαλεία

### Περιεχόμενα 4<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

---

4.	Εισαγωγή	78
4.1.	Μοντελοποίηση Υλικών Αλλαγής Φάσης σε δομικά στοιχεία – Αναγκαιότητα και Πολυπλοκότητα του φαινομένου	78
4.2.	Παρουσίαση τρέχουσα κατάστασης – Υπολογιστικά Μοντέλα	80
4.3.	Αναλυτική περιγραφή της Μεθοδολογίας	84
4.4.	Επικύρωση Ενοποιημένου Υπολογιστικού Μοντέλου και Συγκριτική του Αξιολόγηση με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας	91
4.5.	Σύνοψη κεφαλαίου - Συμπεράσματα	104
	Βιβλιογραφία 4 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου	108

---

## 4. Εισαγωγή

---

Κατά τον ενεργειακό σχεδιασμό και τη μελέτη ενός κτηρίου, είναι απαραίτητη πλέον η γνώση της θερμικής συμπεριφοράς του κατά τη διάρκεια όλου του έτους. Ειδικά, ο στόχος για κτήρια χαμηλής ή σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης επιβάλλει τον εκ των προτέρων υπολογισμό των ψυκτικών και θερμικών φορτίων, ώστε να εξασφαλιστεί η θερμική άνεση για τους ενοίκους.

Μέχρι πρότινος, οι υπολογισμοί της θερμικής απόκρισης ενός κτηρίου ή οικήματος γίνονταν με υπερβολικές απλουστεύσεις όσον αφορά τη γεωμετρία αλλά και τα όρια του συστήματος, τα οποία συνήθως λαμβάνονται ως σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και άλλων κλιματικών δεδομένων (υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία), έλλειψη προφίλ καταναλώσεων, έλλειψη αερισμού κ.ο.κ. Υπολογιστικά εργαλεία, τα οποία περιέγραφαν μονοδιάστατα τα φαινόμενα ή έκαναν χρήση απλούστερης γεωμετρίας, συνέβαλλαν στην αύξηση των ορίων σφάλματος, με βολικά μεν αλλά εσφαλμένα δε αποτελέσματα.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας αλλά και η διάδοση των εμπορικών υπολογιστικών πακέτων για προσομοίωση δυναμικής θερμικής συμπεριφοράς κτηρίων, ήρθε να καλύψει την ανάγκη προσομοίωσης περίπλοκης γεωμετρίας λαμβάνοντας υπόψιν και τις δυναμικές μεταβολές παραμέτρων, όπως π.χ. οι κλιματικές συνθήκες. Από την άλλη, εργαστηριακοί κώδικες αναπτύσσονται συμπληρωματικά, καλύπτοντας εξειδικευμένες υπολογιστικές ανάγκες.

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσεται η μεθοδολογία εισαγωγής Υλικών Αλλαγής Φάσης σε υπολογιστικό εργαλείο, η οποία αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας έγινε στο εμπορικό πακέτο TRNSYS, καθώς μέχρι και την τελευταία έκδοση του λογισμικού (TRNSYS 17.1) η ύπαρξη ΥΑΦ σε δομικά στοιχεία δεν δύναται να προσομοιωθεί. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται κώδικας γραμμένος στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, ο οποίος περιγράφει μονοδιάστατα το φαινόμενο της αλλαγής φάσης σε δομικό στοιχείο. Ο κώδικας αυτός εισάγεται στο περιβάλλον του TRNSYS, το οποίο είναι υπεύθυνο για τον υπολογισμό της επίδρασης όλων των υπολοίπων χαρακτηριστικών του κτηρίου και του περιβάλλοντα χώρου.

### 4.1. Μοντελοποίηση Υλικών Αλλαγής Φάσης σε δομικά στοιχεία – Αναγκαιότητα και Πολυπλοκότητα του φαινομένου

---

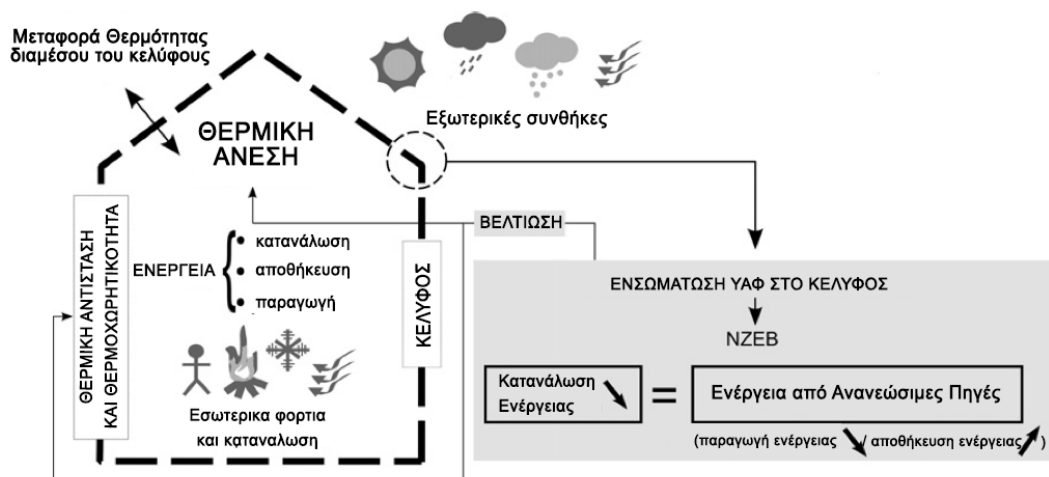
Προσεγγίζοντας το θέμα με γνώμονα τη βιωσιμότητα, τα κτήρια θα πρέπει να σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η θερμική άνεση των χρηστών κατά τη διάρκεια ολόκληρου του έτους, χρησιμοποιώντας την ελάχιστη δυνατή ενέργεια για θέρμανση και ψύξη. Ιδανικά, οι αποθηκευτικές και μονωτικές ιδιότητες του κελύφους του κτηρίου παίζουν σημαντικό ρόλο στην καθυστέρηση της επίδρασης της εξωτερικής διακύμανσης της θερμοκρασίας στο χώρο, επομένως η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα διακυμαίνεται σε ένα ικανοποιητικό εύρος θερμικής άνεσης, χωρίς την ανάγκη θέρμανσης ή / και ψύξης (Zhang et al., 2006).

Ωστόσο, το κτήριο είναι ένα αρκετά περίπλοκο θερμοδυναμικό σύστημα, το οποίο επηρεάζουν εσωτερικοί και εξωτερικοί παράγοντες, κατά συνέπεια ένα ιδανικό



παθητικό κτήριο ως προς τη διατήρησης της ενέργειας, είναι δύσκολο να επιτευχθεί. Εξωτερικοί παράγοντες ορίζονται οι κλιματικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία του αέρα, η ταχύτητα του ανέμου και η ηλιακή ακτινοβολία. Εσωτερικοί παράγοντες, οι οποίοι ενδεχομένως επιδρούν στην θερμική ισορροπία του χώρου, προέρχονται από εσωτερικά φορτία ή από τη χρήση του κτηρίου. Για καθορισμένες κλιματικές συνθήκες, ρυθμού ανανέωσης του αέρα, μεγέθους του δωματίου, πάχος του τοιχώματος καθώς και προφίλ χρήσης και δραστηριότητας, η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα συνδέεται στενά με τις ιδιότητες των υλικών του κελύφους του κτηρίου, κυρίως από την θερμική αντίσταση και την θερμοχωρητικότητα τους. Ως εκ τούτου, η βελτίωση της θερμικής απόδοσης του κελύφους του κτηρίου είναι ζωτικής σημασίας για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση ή ψύξη.

Η δυνατότητα ενσωμάτωσής των ΥΑΦ σε δομικά υλικά, όπως σκυρόδεμα (τσιμέντο), κονίαμα (γύψος), φυσική πέτρα κτλ., τα καθιστά κατάλληλα συστατικά για την κατασκευή κι επένδυση της τοιχοποιίας των κτηριακών εγκαταστάσεων. Επιπροσθέτως, η ικανότητά τους να αποθηκεύουν μεγάλα ποσά θερμότητας υπό λανθάνουσα μορφή διευκολύνει την βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς των κτηρίων (αύξηση της θερμικής απόδοσής τους). Επιπλέον, η χρήση τέτοιων υλικών βοηθά στην αποτελεσματική χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, κυρίως της ηλιακής ενέργειας.



Εικόνα 4.1 Εσωτερικοί και εξωτερικοί παράγοντες που επηρεάζουν ένα κτήριο (Soares et al., 2013)

Στην Εικόνα 4.1 Εσωτερικοί και εξωτερικοί παράγοντες που επηρεάζουν ένα κτήριο (Soares et al., 2013), το κτήριο απεικονίζεται ως ένα θερμοδυναμικό σύστημα. Το κέλυφος του κτηρίου είναι το όριο του συστήματος και παρουσιάζεται η ισορροπία που επιτυγχάνεται από την αλληλεπίδραση της παραγωγής ενέργειας μέσα στο κτήριο (ή κοντά), της κατανάλωσης ενέργειας και της αποθήκευσης της ενέργειας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Η ισορροπία αυτή επηρεάζεται από τα εσωτερικά και τα εξωτερικά φορτία, καθώς επίσης και από την θερμική αντίσταση και τη θερμοχωρητικότητα του κελύφους. Η ενσωμάτωση των ΥΑΦ στα δομικά στοιχεία ενισχύει την ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας στο κτήριο, συμβάλλοντας στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση και ψύξη, και σε χαμηλότερη

παραγόμενη ενέργεια που απαιτείται για την επίτευξη της ενεργειακής ισορροπίας. Ως εκ τούτου, τα ΥΑΦ θα μπορούσαν να βοηθήσουν στην κατασκευή ενός κτηρίου σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας (**NZEB-Net Zero Energy Building**). Η θερμική απόδοση του κτηρίου λόγω της εισαγωγής των ΥΑΦ μέσα στα δομικά στοιχεία του εξαρτάται όχι μόνο από τις κλιματικές συνθήκες, το σχεδιασμό και των προσανατολισμό των στοιχείων αυτών, αλλά επίσης και από την ποσότητα, τη θέση και τον τύπο του ΥΑΦ. Για αυτό το λόγο, είναι αναγκαία η εκ των προτέρων λεπτομερής δυναμική προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς των κτηρίων που εμπεριέχουν ΥΑΦ στο κέλυφος τους.

Όσον αφορά τη μοντελοποίηση των ΥΑΦ διακρίνουμε δυο περιοχές πολυπλοκότητας: την μοντελοποίηση των ΥΑΦ ως υλικό, αλλά και τη μοντελοποίηση του στοιχείου που περιέχει το ΥΑΦ ως σύστημα (είτε πρόκειται για δομικό στοιχείο, είτε για κτήριο ολόκληρο). Όσον αφορά την πρώτη περιοχή, ο προκαθορισμός της συμπεριφοράς των υλικών αλλαγής φάσης, αποτελεί ένα περίπλοκο πρόβλημα εξαιτίας της εγγενούς μη γραμμικής του φύσης στις κινούμενες διεπιφάνειες («σύνορο» μεταξύ στερεάς και υγρής φάσης), ποσοστό της μετατόπισης των οποίων ελέγχεται απ' το ποσόν της λανθάνουσα θερμότητας, η οποία χάνεται ή απορροφάται απ' το όριο των δύο καταστάσεων (πρόβλημα Stefan, βλ. §3.3). Επιπλέον, το γεγονός ότι οι δύο φάσεις εμφανίζουν διαφορετικές φυσικές ιδιότητες, θα μπορούσε να δημιουργήσει στο εκάστοτε αριθμητικό μοντέλο μη φυσικές ασυνέχειες, οι οποίες πρέπει να διερευνώνται με στόχο την επίτευξη της βέλτιστης λύσης. Επιπλέον, η επιλεγμένη αριθμητική μέθοδος που υιοθετείται στο μοντέλο επηρεάζει τη λύση (βλ. §3.3). Η δεύτερη περιοχή πολυπλοκότητας αφορά το ευρύτερο σύστημα, το οποίο εμπεριέχει ΥΑΦ και πρόκειται είτε για δομικό στοιχείο (component level) είτε για κέλυφος οικίσκου ή κτηρίου (building level). Στην περίπτωση δε, κατά την οποία το σύστημα αλληλεπιδρά με τις εξωτερικές φυσικές συνθήκες (περίπτωση κτηρίου), τότε οι παράμετροι, οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την μοντελοποίηση του, είναι αρκετές και συμβάλλουν στην επιπλέον πολυπλοκότητα του φαινομένου.

#### 4.2. Παρουσίαση τρέχουσα κατάσταση – Υπολογιστικά Μοντέλα

Τις τελευταίες δεκαετίες, πολλά προγράμματα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων, είναι διαθέσιμα, με το καθένα να παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Μέσω αυτών των προγραμμάτων είναι δυνατή η αξιολόγηση καινοτόμων ιδεών που προτείνονται για τη βελτίωση της ενεργειακής και θερμικής συμπεριφοράς των κτηρίων. Λεπτομερή εργαλεία προσομοίωσης εκτελούν υπολογισμούς σε ωριαία ή υπο-ωριαία βάση με στόχο την ακριβή εκτίμηση των δυναμικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ όλων των στοιχείων που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας και τη θερμική άνεση, συμπεριλαμβανομένων του κελύφους του κτηρίου, τα συστήματα HVAC, το φωτισμό και τις συσκευές ελέγχου (Hong et al., 2000). Τα είκοσι πιο διαδεδομένα προγράμματα ενεργειακής αλλά και δυναμικής προσομοίωσης κτηρίων αξιολογήθηκαν από τον Crawley (Crawley et al., 2008). Λίγα προγράμματα παρέχουν την δυνατότητα προσομοίωσης της θερμικής απόδοσης του κτηριακού κελύφους με υλικά αλλαγής φάσης, όπως το EnergyPlus, TRNSYS, ESP-r, και BSIM.

Η παρούσα ενότητα πραγματεύεται την μοντελοποίηση συστημάτων, τα οποία εμπεριέχουν ΥΑΦ, και επηρεάζονται από εξωτερικούς παράγοντες, πρόκειται δηλαδή για κτήρια ή οικίσκους εκτεθειμένους στις καιρικές συνθήκες. Ήδη έχει εκπονηθεί μια εκτεταμένη αναφορά περί υπολογιστικών εργαλείων προσομοίωσης ΥΑΦ (βλ. §2.5-2.6), στην υποενότητα αυτή όμως, γίνεται αναφορά στις περιπτώσεις που απαντώνται στην βιβλιογραφία και στην μεθοδολογία, με την οποία εισήχθη υπολογιστικός κώδικας προσομοίωσης ΥΑΦ στο εμπορικό πακέτο δυναμικής ενεργειακής προσομοίωσης συμπεριφοράς κτηρίου -TRNSYS.

#### 4.2.1. Λογισμικό δυναμικής θερμικής προσομοίωσης κτηρίων - TRNSYS

Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο κι επεκτάσιμο περιβάλλον προσομοίωσης, το οποίο πραγματεύεται την μοντελοποίηση θερμικών συστημάτων καθώς και κτηρίων πολλαπλών ζωνών. Χρησιμοποιείται ευρέως από μηχανικούς κι ερευνητές κι ανταποκρίνεται σε νέα ενεργειακά σενάρια, από απλά ηλιακά συστήματα ζεστού νερού χρήσης έως σχεδιασμό και προσομοίωση κτηρίων και κτηριακού εξοπλισμού, συμπεριλαμβάνοντας στρατηγικές ελέγχου, είδος χρήσης του εκάστοτε χώρου κι εναλλακτικά ενεργειακά συστήματα (αιολικά, ηλιακά, φωτοβολταϊκά και συστήματα υδρογόνου). Πρόκειται για ένα ευέλικτο ενεργειακό λογισμικό, το οποίο απλοποιεί την διαδικασία προσθήκης μαθηματικών μοντέλων, εκμεταλλεύεται κατάλληλα τα διαθέσιμα στοιχεία κι έχει την δυνατότητα να συνδέεται με άλλα προγράμματα προσομοίωσης και μη (Microsoft Excel, MATLAB/SIMULINK κ.λ.π.) (Duffy et al., 2009).

Το TRNSYS σαν υπολογιστικό εργαλείο έχει την δυνατότητα να προσομοιώνει κάθε είδους κτήριο με πολλές θερμικές ζώνες και περίπλοκη γεωμετρία. Η σπονδυλωτή αρχιτεκτονική του λογισμικού του TRNSYS προωθεί την διασύνδεση πολλών στοιχείων (components). Η χαρακτηριστικότερη ιδιότητα του TRNSYS και ταυτόχρονα το σημαντικότερο προσόν της εφαρμογής, είναι ότι το σύστημα χωρίζεται στις απλούστερες επιμέρους συνιστώσες, των οποίων η θερμική συμπεριφορά μελετάται χωριστά πριν αντιμετωπιστούν ως σύνολο. Το πρόγραμμα απαριθμεί τις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου των στοιχείων (inputs) και τις τιμές εξόδου (outputs), οι οποίες υπολογίζονται απ' τα εν λόγω στοιχεία κι εν συνεχεία μπορούν να λειτουργήσουν ως δεδομένα εισόδου και για άλλα στοιχεία. Η δυνατότητα εισαγωγής και σύνδεσης στοιχείων οδήγησε στο σενάριο της εισαγωγής των λεγόμενων Types (υπορουτίνες) στην πλατφόρμα του TRNSYS. Τέτοιου είδους Types είναι και αυτά που θα αναφερθούν παρακάτω, για την προσομοίωση των ΥΑΦ, δεδομένου ότι το ίδιο το πρόγραμμα δεν δύναται να προσομοιώσει το φαινόμενο μεταβολής φάσης με τα εργαλεία που διαθέτει.

Η δυναμική προσομοίωση ενός κτηρίου μέσω του TRNSYS περιλαμβάνει υπολογισμούς σκίασης, ηλιακής ακτινοβολίας διαμέσου ανοιγμάτων αλλά και της διάχυτης ακτινοβολίας που δύναται να αυξήσουν τις προβλεπόμενες εσωτερικές θερμοκρασίες. Με βάση τα ωριαία καιρικά δεδομένα που περιλαμβάνουν τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασία εξωτερικού αέρα, διεύθυνση και ταχύτητα ανέμου, η εφαρμογή επιλύει εξισώσεις ενεργειακής ισορροπίας και διατήρησης των ροών του αέρα για ωριαία χρονικά βήματα. Για τον φυσικό αερισμό συγκεκριμένα, συνυπολογίζεται και η ροή του αέρα που προκαλείται από τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των θερμικών ζωνών.

Η παρεμβολή των ΥΑΦ υπορουτινών διευκολύνει την ανάλυση της ροής θερμότητας μεταξύ του ΥΑΦ και των δομικών στοιχείων του μελετώμενου κτηρίου κι επιτρέπει την προσομοίωση του φαινομένου αλλαγής φάσης. Μέχρι σήμερα έχει μελετηθεί ένας αριθμός ΥΑΦ υπορουτινών τα οποία εξυπηρετούν τον σκοπό αυτό.

#### 4.2.2. Κώδικες για τη μοντελοποίηση ΥΑΦ με χρήση του λογισμικού TRNSYS

Αρκετά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί ως υπορουτίνες στο TRNSYS για τη μοντελοποίηση της μεταφοράς θερμότητας στοιχείων στο κέλυφος του κτηρίου, που εμπεριέχουν ΥΑΦ, αλλά η πλειοψηφία τους είναι ιδιόκτητοι εργαστηριακοί κώδικες.

Ξεκινώντας την ανασκόπηση στη βιβλιογραφία, ο Ghoneim για παράδειγμα (Ghoneim et al., 1991), χρησιμοποίησε μια τροποποιημένη εκδοχή του "TYPE36", μοντέλου για τη θερμική αποθήκευση σε τοίχο. Το μοντέλο βασίστηκε στην μέθοδο της ενθαλπίας και η επίλυση του χρησιμοποιεί την άμεση μέθοδο. Παρά τα αριθμητικά προβλήματα που ανέκυψαν κατά την μοντελοποίηση του ΥΑΦ, λόγω του ελάχιστου δυνατού χρονικού βήματος που απαιτείται για τη σταθερότητα της άμεσης μεθόδου, το μοντέλο ενσωματώθηκε με επιτυχία στο TRNSYS και η επικύρωσή του έγινε χρησιμοποιώντας δημοσιευμένα δεδομένα για ένα τοίχο από τσιμέντο, ο οποίος εμπεριέχει ΥΑΦ. Το μοντέλο αν και δεν λαμβάνει τη μεταβολή της θερμοχωρητικότητας κατά την αλλαγή φάσης, καταφέρνει να δίνει ακριβή αποτελέσματα για την περίπτωση στην οποία εξετάστηκε.

Ένα άλλο μοντέλο άμεσης μεθόδου, πάλι χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της ενθαλπίας, αναπτύχθηκε για την μοντελοποίηση της επίδρασης της ενσωμάτωσης ΥΑΦ σε ένα ηλιακό τοίχο (Stritih and Novak, 1996, Stritih, 2003). Το "TYPE58" ενσωματώθηκε στην πλατφόρμα του TRNSYS για να διερευνήσει την επίδραση της θέρμανσης του εξωτερικού αέρα ως αερισμού, σε πειραματικό σπίτι. Η συγκεκριμένη εφαρμογή περιορίζεται μονάχα για ηλιακούς τύπους, επομένως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν το ΥΑΦ βρίσκεται σε άλλο στοιχείο του κελύφους ή είναι ενσωματωμένο μέσα σε δομικό υλικό.

Ουσιαστικά, η μοντελοποίηση των ΥΑΦ μέσα σε δομικά στοιχεία στο TRNSYS ξεκίνησε μέσω του "TYPE204" από μια ομάδα ερευνητών από το Πανεπιστήμιο Τεχνολογίας του Ελσίνκι (Jokisalo et al., 1999). Το μοντέλο προσπαθεί να προσομοιώσει την πραγματική διαδικασία ροής θερμότητας μέσα στο υλικό ΥΑΦ. Οι εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας επιλύονται σε τρεις διαστάσεις (729 κόμβους) για τις διάφορες καταστάσεις του ΥΑΦ (έμμεση μέθοδος Crank-Nicolson), ενώ η αλλαγή φάσης προσομοιώνεται με την μέθοδο ενεργούς θερμοχωρητικότητας. Πρόκειται για μία υπορουτίνα γραμμένη σε γλώσσα FORTRAN η οποία ενσωματώθηκε στην πλατφόρμα του TRNSYS στα πλαίσια της αξιολόγησης της επίδρασης των PCM τοίχων, οροφών και δαπέδων στο ενεργειακό ισοζύγιο του κτηρίου και όχι της προσομοίωσης της πραγματικής διαδικασίας μεταφοράς θερμότητας εντός των υλικών τα οποία περιέχουν PCM, εφόσον στο μοντέλο θεωρείται σταθερή τιμή για την ειδική θερμοχωρητικότητα. Το μοντέλο μπορεί να επιλύεται με άμεση ή επαναληπτική μέθοδο, με την επιλογή μιας παραμέτρου, η οποία επιτρέπει την αλλαγή μεταξύ των διαφορετικών συστημάτων. Αν και αυτό το μοντέλο δεν έχει επικυρωθεί σε 3D μορφή, λόγω υψηλού υπολογιστικού κόστους, ο Ahmad μετέτρεψε

το 3D μοντέλο σε 1D, με την ονομασία "TYPE101" (Ahmad et al., 2006) και κατάφερε να επικυρώσει τον τροποποιημένο κώδικα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίθηκαν με τα πειραματικά αποτελέσματα από δύο όμοιες πειραματικές διατάξεις σε μορφή κελιών: ένα κελί χωρίς ΥΑΦ και ενός άλλου με ΥΑΦ. Ενώ το μοντέλο χωρίς ΥΑΦ λειτουργεί καλά σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα, το μοντέλο με το ΥΑΦ υπερεκτιμά τη μέγιστη ημερήσια εσωτερική θερμοκρασία στο κελί. Οι συγγραφείς παρουσιάζουν αρκετούς λόγους για αυτή την απόκλιση, όπως είναι οι εξής: (α) την επίδραση της θερμικής ενέργειας που μεταδίδεται μέσα από το παράθυρο, (β) ανακρίβεια στην περιοχή της θερμοκρασίας τήξης που λαμβάνεται, (γ) τιμές του συντελεστή συναγωγής μεταξύ του τοιχώματος της επιφάνειας και του ατμοσφαιρικού αέρα και (δ) την ύπαρξη θερμογεφυρών στην πειραματική διάταξη. Ο συγκεκριμένος κώδικας δεν είναι διαθέσιμος, επομένως δεν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από άλλους ερευνητές.

Η μελέτη του Ibáñez προτείνει μια απλουστευμένη προσέγγιση για την προσομοίωση ΥΑΦ σε τοίχους, οροφή και δάπεδο στο TRNSYS (Ibáñez et al., 2005). Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιεί το ήδη ενσωματωμένο μοντέλο για την προσομοίωση ενεργού τοίχου (active wall), το οποίο εμπεριέχεται στην πλατφόρμα του TRNSYS. Η προσέγγιση αυτή δίνει τη δυνατότητα για την εισαγωγή ισοδύναμων συντελεστών μεταφοράς θερμότητας σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης, οι οποίοι χαρακτηρίζουν τη θερμική συμπεριφορά τοίχου με ΥΑΦ. Αν και το μοντέλο αυτό δεν λαμβάνει υπόψη την πραγματική μεταφορά θερμότητας από φυσικής άποψης, σύμφωνα με τους συγγραφείς, τα αποτελέσματα που δίνει είναι αρκετά ακριβή.

Μία από τις πρώτες βασικές μελέτες για μοντελοποίηση ΥΑΦ, είναι αυτή του Schranzhofer (Schranzhofer et al., 2006), ο οποίος ανέπτυξε το μοντέλο "TYPE241", όπου το ΥΑΦ εισάγεται σαν εσωτερικό στρώμα στην τοιχοποιία, με βάση τη μέθοδο πηγής θερμότητας. Το TRNSYS υπολογίζει τη μεταφορά θερμότητας στις υπόλοιπες στρώσεις της τοιχοποιίας δημιουργώντας ψεύτικες ζώνες επαφής μεταξύ του στρώματος ΥΑΦ και των υπόλοιπων στρωμάτων. Ένα πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι το μικρό υπολογιστικό κόστος που απαιτείται για την αριθμητική επίλυση, αλλά υπάρχουν ανακρίβειες στις παραδοχές που γίνονται για τις ψεύτικες ζώνες επαφής. Ξεχωριστό αρχείο εισόδου δίνει τις τιμές της ειδικής θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας. Το μοντέλο, ωστόσο, δεν έχει επικυρωθεί, λόγω έλλειψης κατάλληλων πειραματικών δεδομένων.

Μία σημαντική προσπάθεια προς τη σωστή κατεύθυνση είναι αυτή του Kuznik, ο οποίος ανέπτυξε ένα νέο μοντέλο στο TRNSYS, το "TYPE260", το οποίο χρησιμοποιεί τη μέθοδο ενεργής χωρητικότητας (Kuznik et al., 2010). Παρόλ' αυτά, η εισαγωγή της ειδικής θερμοχωρητικότητας γίνεται μέσω μόνον 5 τιμών γύρω από το σημείο αλλαγής φάσης, οι οποίες επιλέγονται από τον χρήστη. Το μοντέλο έχει επικυρωθεί με δύο εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν από τους συγγραφείς: μία όταν η εξωτερική θερμοκρασία αυξανόταν βηματικά και η δεύτερη, όταν η εξωτερική θερμοκρασία προσομοιωνόταν με ημιτονοειδή συμπεριφορά. Η καμπύλη θερμοχωρητικότητας που χρησιμοποιείται για την αριθμητική προσομοίωση είναι αυτή που αντιστοιχεί στις τιμές τήξης του ΥΑΦ. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα των δοκιμών. Παρόλ' αυτά,

τροποποίηση του κώδικα χρειάζεται, έτσι ώστε να λαμβάνονται όλες οι τιμές των δυναμικών ιδιοτήτων κατά την αλλαγή φάσης.

Πρόσφατα, ένα νέο μονοδιάστατο μοντέλο μεταφοράς θερμότητας, το οποίο χρησιμοποιεί τη μέθοδο θερμοχωρητικότητας αναπτύχθηκε στο TRNSYS (Bontemps et al., 2011). Μελετήθηκε η περίπτωση ενδιάμεσου τοίχου από υαλότουβλα, τα οποία είναι γεμισμένα με ΥΑΦ. Το μοντέλο επικυρώθηκε με εργαστηριακές μετρήσεις και τα αποτελέσματα έδειξαν να συμφωνούν με τις πειραματικές μετρήσεις. Το μοντέλο όμως αφορά την προσομοίωση καθαρού υλικού ΥΑΦ.

Τέλος, ένα απλοποιημένο μοντέλο προσομοίωσης ΥΑΦ ενσωματώθηκε πρόσφατα στο TRNSYS, το "TYPE1270". Αναπτύχθηκε από την TESS (Thermal Energy System Specialists) και είναι πλέον διαθέσιμο εμπορικώς ως μεμονωμένο Type (Thermal energy system specialists LLC). Το μοντέλο προσομοιώνει μονάχα ΥΑΦ, τα οποία βρίσκονται στην εσωτερική πλευρά της τοιχοποιίας του κτηρίου. Το μοντέλο περιορίζεται προς το παρόν σε υλικά που τήκονται/παγώνουν ισοθερμοκρασιακά και με σταθερή ειδική θερμοχωρητικότητα για τη στερεά και υγρή φάση. Στην μεταβατική κατάσταση, η θερμοκρασία του ΥΑΦ θεωρείται σταθερή και το μοντέλο υπολογίζει απλώς την απορρόφηση και απελευθέρωση ενέργειας. Η μεθοδολογία είναι παρόμοια με τη μέθοδο πηγής θερμότητας και ως εκ τούτου μπορεί να χαρακτηριστεί ως «Οιονεί-μέθοδος Θερμικής Πηγής». Το μοντέλο δεν έχει ακόμα επικυρωθεί.

Η παρουσίαση της βιβλιογραφίας και των μοντέλων που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα για την προσομοίωση ΥΑΦ σε κτήρια, μας οδηγεί στα εξής συμπεράσματα:

- Η αντιμετώπιση της αλλαγής φάσης δεν γίνεται ως επί το πλείστον σωστά. Σε πολλά μοντέλα θεωρείται σταθερή τιμή της ειδικής θερμοχωρητικότητας ή στην καλύτερη περίπτωση λαμβάνεται υπόψη ένα μικρό εύρος τιμών.
- Πολλά από τα μοντέλα έχουν περιορισμούς ως προς τη θέση του ΥΑΦ μέσα στην τοιχοποιία, επομένως δεν μπορούν να γενικευθούν και σε άλλες περιπτώσεις.
- Η ανάπτυξη αρκετών μοντέλων έγινε για την εξέταση συγκεκριμένων περιπτώσεων, συνήθως πειραματικών διατάξεων όπου χρειαζόταν περαιτέρω υπολογιστική διερεύνηση. Με αυτή τη λογική, τα μοντέλα αυτά δεν μπορούν να γενικευθούν και να χρησιμοποιηθούν σε πολύπλοκες ή διαφορετικές περιπτώσεις.

### 4.3. Αναλυτική περιγραφή της Μεθοδολογίας

---

Στα πλαίσια της εκπόνησης της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε η μεθοδολογία που περιγράφεται στις παρακάτω παραγράφους. Ο κύριος στόχος της προτεινόμενης προσέγγισης αφορά τη διατύπωση μιας μεθοδολογίας, η οποία θα επιτρέπει την ρεαλιστική προσομοίωση νέων τεχνολογιών και την εύκολη εισαγωγή τους σε προϋπάρχοντα συστήματα αξιολόγησης ενεργειακής συμπεριφοράς, στα οποία ενδεχομένως δεν μπορούμε να επέμβουμε στον κώδικα. Η μεθοδολογία αυτή θα πρέπει να είναι γενικευμένη, ώστε να μην περιορίζεται σε μια μελέτη περίπτωσης και να δίνει ευελιξία ως προς την εφαρμογή της.

Πιο συγκεκριμένα, η προτεινόμενη μεθοδολογία, η οποία παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο, αποσκοπεί στην ακριβή προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς υλικών με δυναμική συμπεριφορά, όπως είναι τα υλικά αλλαγής φάσης, και στη σύνδεση τους με προγράμματα ενεργειακής προσομοίωσης, τα οποία μέχρι πρότινος δεν μπορούν να τα λάβουν υπόψη. Η ίδια μεθοδολογία που θα παρουσιαστεί παρακάτω, μπορεί να εφαρμοστεί και για την περίπτωση, κατά την οποία απαιτείται η εισαγωγή και η προσομοίωση μιας καινοτόμου τεχνολογίας σε ένα υπάρχον μοντέλο ενεργειακής αξιολόγησης ενός κτηρίου ή ενός συστήματος.

Η γενική αυτή στόχευση χωρίζεται και διαπραγματεύεται τα παρακάτω επιμέρους τμήματα:

- Την λεπτομερή εξέταση και αναλυτική περιγραφή της νέας τεχνολογίας και την κατάστρωση ενός μοντέλου προσομοίωσης της,
- Τη σύνδεση του επιμέρους μοντέλου με το συνολικό μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος, καθώς και η επικύρωσή του.

Το αποτέλεσμα που επιδιώκεται είναι ένα καθολικό μοντέλο προσομοίωσης, το οποίο θα περιλαμβάνει όλα τα ενεργειακά συστήματα και θα εκμεταλλεύεται στο έπακρο τα πλεονεκτήματα των επιμέρους στοιχείων.

Στην περίπτωση που εξετάζεται στο παρόν κεφάλαιο, αναπτύχθηκε υπολογιστικός κώδικας σε περιβάλλον MATLAB, τα κύρια χαρακτηριστικά του οποίου είναι ότι λαμβάνει υπόψη τη μεταβλητή θερμοχωρητικότητα  $C_p$  συναρτήσει της θερμοκρασίας, καθώς και τις μεταβλητές οριακές συνθήκες συναρτήσει του χώρου, ανάλογες κάθε φορά με την εξεταζόμενη περίπτωση. Ξεκινώντας από την απλή περίπτωση ενός δομικού στοιχείου (όπως είναι μια γυψοσανίδα η οποία εμπεριέχει ΥΑΦ, ή μια τοιχοποιία, της οποίας ένα στρώμα έχει ΥΑΦ), μέχρι την περίπλοκη, λόγω γεωμετρίας και εξωτερικών συνθηκών, περίπτωση μιας οικίας ή ενός κτηρίου, του οποίου τα δομικά στοιχεία εμπεριέχουν ΥΑΦ, η αντιμετώπιση της εισαγωγής των ΥΑΦ στο μοντέλο προσομοίωσης είναι η ίδια. Στη συνέχεια, ο υπολογιστικός κώδικας που αναπτύχθηκε συνδέεται με το πρόγραμμα TRNSYS, ώστε να μελετηθεί η συνεισφορά και η επίδραση των ΥΑΦ στις ενεργειακές ανάγκες ενός κτηρίου.

#### 4.3.1. Μοντελοποίηση Υλικών αλλαγής φάσης σε δομικά στοιχεία – 1D

---

##### ***Κυρίαρχη εξίσωση***

Ο κώδικας του υπολογιστικού εργαλείου MATLAB αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Σκοπός του κώδικα είναι η αριθμητική επίλυση προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας μέσω δομικών υλικών τα οποία περιέχουν ΥΑΦ στη σύστασή τους. Η αριθμητική επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς θερμότητας πραγματοποιείται με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών. Με τη μέθοδο της φαινόμενης ενεργούς θερμοχωρητικότητας λαμβάνονται υπόψη οι ρεαλιστικές τιμές της ειδικής θερμοχωρητικότητας του ΥΑΦ που εμπεριέχεται στο μελετούμενο δομικό στοιχείο συναρτήσει της θερμοκρασίας (Romero-Sánchez et al., 2012).

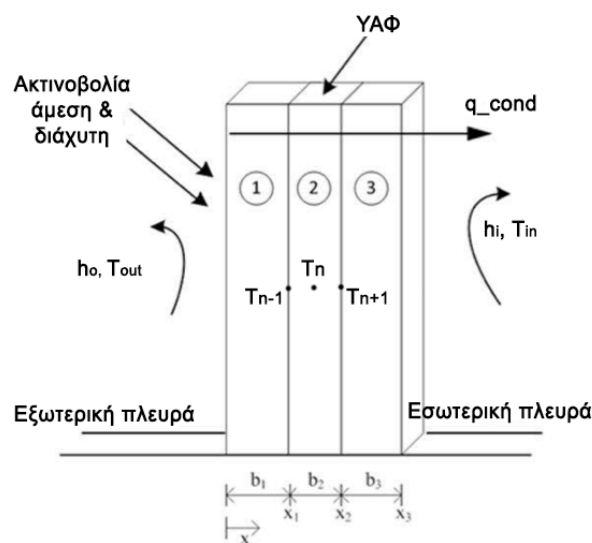
Αρχικά θεωρούμε ένα τμήμα του στοιχείου, το οποίο έχουμε διακριτοποιήσει σε όγκους αναφοράς (βλ. Εικόνα 4.2). Για τη μοντελοποίηση της μεταφοράς θερμότητας ενός πολυστρωματικού δομικού στοιχείου, του οποίου ένα στρώμα εμπεριέχει ή είναι ΥΑΦ, είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός του στοιχείου σε  $n$  στρώματα και η εφαρμογή των εξισώσεων μεταφοράς θερμότητας για κάθε στρώμα. Κάθε στρώμα αντιπροσωπεύεται από ένα κόμβο και σε κάθε κόμβο αποθηκεύεται ενέργεια η οποία συναλλάσσεται με τα γειτονικά στρώματα. Σχηματίζεται έτσι ένα σύστημα εξισώσεων που περιγράφει το ενεργειακό ισοζύγιο για κάθε στρώμα.

Η γενική εξίσωση, η οποία περιγράφει την μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής (βλ. Εξίσωση 3.1, §3), στην περίπτωση του πολυστρωματικού στοιχείου (βλ. Εικόνα 4.2), γράφεται για κάθε στρώμα ( $n$ ) :

$$\rho C_{p,eff} \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (4.1)$$

όπου  $C_{p,eff}$  η φαινόμενη ενεργή θερμοχωρητικότητα του υλικού. Για την επίλυση της μονοδιάστατης γενικευμένης εξίσωσης (Εξίσωση 4.1), χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών [Patankar, 1980] και ολοκληρώνεται πάνω σε μια περιοχή ελέγχου. Στο μοντέλο MATLAB, κάθε ένα από τα τμήματα αντιπροσωπεύεται από ένα διακριτό αριθμό κόμβων, ο οποίος ουσιαστικά αντιστοιχεί στα στρώματα των τοίχων. Σε κάθε κόμβο - στρώμα (εκτός από τα εσωτερικά και εξωτερικά σύνορα) εφαρμόζεται ενεργειακό ισοζύγιο. Βασίζεται στην Εξίσωση 4.2, η οποία ποσοτικοποιεί ουσιαστικά τη θερμότητα αγωγής, που ανταλλάσσεται μεταξύ ενός κόμβου- $k$  και των γειτονικών του (για κάθε σύνθετο τμήμα τοίχου  $i$ ) μέσα τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών, ώστε να επιτευχθεί η ένταξη των διαφορικών εξισώσεων στο χώρο.

$$\rho_{k,i} C_{p,k,i} V_{k,i} \frac{dT_{k,i}(t)}{dt} = K_{k+1,i} A_i \{T_{k+1,i}(t) - T_{k,i}(t)\} - K_{k,i} A_i \{T_{k,i}(t) - T_{k-1,i}(t)\} \quad (4.2)$$



Εικόνα 4.2 Μετάδοση θερμότητας σε πολυστρωματικό τοίχο, ο οποίος εμπεριέχει ΥΑΦ



$$K_{k,i} = \frac{1}{\left( \frac{L_{k-1,i}}{2 * \lambda_{k-1,i}} \right) + \left( \frac{L_{k,i}}{2 * \lambda_{k,i}} \right)} \quad (4.3)$$

Η θερμική αγωγιμότητα  $k_{k,i}$  υπολογίζεται με την Εξίσωση 4.3 λαμβάνοντας υπόψη τη θερμική αγωγιμότητα  $\lambda_{k,i}$  κάθε κόμβου, καθώς και την απόσταση μεταξύ των διαδοχικών κόμβων (που πρακτικά αντιστοιχεί σε πάχος ενός επιπέδου)  $L_{k,i}$ .

Η εφαρμογή της διατήρησης της ενέργειας στο εσωτερικό χώρο οδηγεί στην Εξίσωση 4.4, η οποία εφαρμόζεται για τον υπολογισμό της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο εσωτερικός χώρος θεωρείται ερμητικά κλειστός με την εσωτερική ενέργεια να έχει ομοιόμορφη κατανομή.

$$\rho_{air} C_{p,air} V_{int} \frac{dT_{air}(t)}{dt} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (4.4)$$

Η Εξίσωση 4.5 μοντελοποιεί τη συναγωγή μεταξύ του κάθε τμήματος ( $i=1:n$ ), του εσωτερικού στρώματος ( $k = n$ ) και τον εσωτερικό αέρα.

$$Q_i = h_{int} A_i \{T_{n,i}(t) - T_{air}(t)\} \quad (4.5)$$

### Υπολογιστικό πλέγμα

Οι αποστάσεις μεταξύ των γειτονικών κόμβων του υπολογιστικού πλέγματος δεν είναι υποχρεωτικά ίσες. Συνήθως, σε περιπτώσεις όπου η μεταβολή της εξαρτημένης μεταβλητής σε συγκεκριμένο σημείο της περιοχής επίλυσης είναι μεγάλη, ενδείκνυται πύκνωση του πλέγματος, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη παρακολούθηση του φαινομένου με μικρότερο αριθμό κόμβων και, επομένως, μικρότερες απαιτήσεις σε επεξεργαστική ισχύ. Αυξανόμενη της λεπτότητας του ομοιόμορφου ή ανομοιόμορφου υπολογιστικού πλέγματος η αριθμητική λύση τείνει προς την αναλυτική λύση της υπό επίλυση διαφορικής εξίσωσης. Από ένα βαθμό και πέρα, επιπλέον λεπτύωση προκαλεί αμελητέες διαφορές στην λύση, επομένως έχει επιτευχθεί ανεξαρτητοποίηση του πλέγματος.

Στην περίπτωση όμως που αναφερόμαστε σε δομικό στοιχείο, το οποίο έχει συγκεκριμένες και ομοιόμορφες συνθήκες καθ' όλη την έκτασή του, οι γειτονικοί κόμβοι του πλέγματος μπορούν να ισαπέχουν και να είναι ομοιόμορφο. Στον κώδικα που αναπτύχθηκε υιοθετήθηκε αυτή η συνθήκη, ενώ η απόσταση μπορεί να είναι μεταβλητή, ανάλογα με το πάχος του στοιχείου.

### Οριακές συνθήκες

Η εφαρμογή μεθόδου πεπερασμένων διαφορών για την προσέγγιση της λύσης της διαφορικής εξίσωσης, καταλήγει σε (γραμμικό ή μη) σύστημα εξισώσεων. Το σύστημα αυτό όμως είναι από μόνο του μη επίλυσιμο, καθώς, μετά την εφαρμογή της μεθόδου προκύπτει σύστημα  $N+1$  αγνώστων, αφού πρέπει να υπολογιστεί η τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής σε κάθε κόμβο και μόλις  $N-1$  εξισώσεων. Οι επιπλέον εξισώσεις δίνονται από τις οριακές συνθήκες του συστήματος.

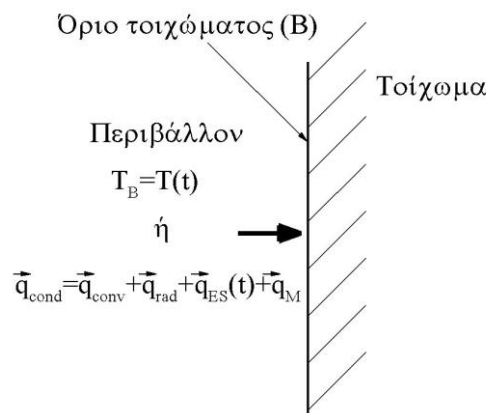
Οι Εξισώσεις 4.6, 4.7 και 4.8 παρέχουν τις οριακές συνθήκες για το τοίχο i, εξωτερικά ( $k = 1$ ), εσωτερικός κόμβος - στρώμα ( $k = n$ ) και τις αντίστοιχες θερμοκρασίες.

$$K_{1,i} \{T_{2,i}(t) - T_{1,i}(t)\} = h_{ext} \{T_{1,i}(t) - T_{eq}(t)\} \quad (4.6)$$

$$K_{n,i} A_i \{T_{n-1,i}(t) - T_{n,i}(t)\} = h_{int} A_i \{T_{n,i}(t) - T_{air}(t)\} \quad (4.7)$$

$$T_{eq} = T_{ext} + \frac{a * I}{h_{ext}} \quad (4.8)$$

Η μέθοδος backward Euler έχει χρησιμοποιηθεί για την ενσωμάτωση των διαφορικών εξισώσεων στο χρόνο. Το προκύπτον σύστημα συνήθων διαφορικών εξισώσεων έχει επιλυθεί με την επαναληπτική μέθοδος Gauss - Seidel.



Εικόνα 4.3 Οριακή συνθήκη στο τοίχωμα για τη μεταφορά θερμότητας

### Μέθοδος της Διαφορικής Θερμιδομετρίας Σάρωσης (ΔΘΣ)

Η φαινόμενη ενεργή θερμοχωρητικότητα προκύπτει ύστερα από μετρήσεις του ΥΑΦ ή του υλικού το οποίο εμπεριέχει ΥΑΦ, με τη μέθοδο της Διαφορικής Θερμιδομετρίας Σάρωσης (ΔΘΣ). Η μέθοδος αυτή είναι από τις πιο διαδεδομένες μέθοδοι θερμικής ανάλυσης. Η βασική αρχή λειτουργίας στηρίζεται στη σύγκριση του, υπό εξέταση δείγματος, το οποίο θερμαίνεται ή ψύχεται, με ένα αδρανές σημείο αναφοράς. Κατά τη μέθοδο της ΔΘΣ, το σήμα είναι ανάλογο της διαφοράς της θερμικής ισχύς μεταξύ του δείγματος και του σημείου αναφοράς, που απορροφάται κατά τη θέρμανσή τους. Στην περίπτωση των ΥΑΦ, γνωστή ποσότητα μάζας ΥΑΦ τοποθετείται σε κλειστό δοχείο με γνωστό όγκο. Αυτό το δοχείο, όπως και άλλο ένα ίδιο, άδειο, τοποθετούνται μέσα στο DSC.

Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται με γνωστό και σταθερό ρυθμό, μετράται πόσο περισσότερη θερμότητα απαιτεί το υπό μελέτη δοχείο ώστε να διατηρεί τη θερμοκρασία του σταθερή και ίδια με του άδειου δοχείου. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνει συνεχώς, σε κάποιο σημείο θα φτάσει τη θερμοκρασία τήξης του ΥΑΦ. Η μετάβαση στην υγρή φάση είναι μία ενδόθερμη διαδικασία, δηλαδή απαιτείται απορρόφηση θερμότητας από το ΥΑΦ. Η στερεοποίηση του ΥΑΦ συμβαίνει όταν το υλικό ψύχεται με σταθερό ρυθμό. Η στερεοποίηση είναι εξώθερμη διαδικασία. Η

διαφορά της θερμοκρασίας στο ακρότατο με την αντίστοιχη θεωρητική θερμοκρασία αλλαγής φάσης, δίνει το βαθμό της υπέρψυξης (**supercooling**).

Παράγοντες οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν τις μετρήσεις της μεθόδου, είναι :

- Λανθασμένη τοποθέτηση του δείγματος στην πλατφόρμα του DSC
- Μη καθαρότητα και μη ικανή ποσότητα μάζας υλικού.
- Ρυθμός θέρμανσης.

Επομένως, με τη μέθοδο ΔΘΣ προσδιορίζεται η καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας του εκάστοτε υλικού/δείγματος, τόσο για την τήξη (θέρμανση) όσο και την πήξη (ψύξη) της διαδικασίας. Ένας γρήγορος ρυθμός θέρμανσης μπορεί να ελαχιστοποιήσει τα λαμβανόμενα αποτελέσματα και να έχει σαν αποτέλεσμα να μην αποδοθούν σωστά οι ιδιότητες του μελετώμενου υλικού. Πάνω σε αυτό το θέμα, η συγκεκριμένη μέθοδος έχει κριθεί ότι δεν δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα [He et al., 2004, Arkar and Medved, 2005] και προτείνεται η χρήση της μεθόδου “T-history” [Kranvaritis et al., 2010], παρόλα αυτά μελέτες έχουν δείξει ότι αν τηρηθούν κάποια πρότυπα/διαδικασίες (π.χ. χαμηλός ρυθμός θέρμανσης, σωστή προετοιμασία δοκιμίου) τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς να εγείρουν αμφιβολίες (Mehling et al., 2006). Για τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, τα αποτελέσματα συμφωνούν με τα προαναφερθέντα πρότυπα και η καμπύλη μετατρέπεται σε πίνακα τιμών και εισάγεται στον κώδικα, ως αρχείο εισόδου. Σε κάθε χρονικό βήμα καλείται ο πίνακας, ώστε να αντιστοιχεί την τιμή της  $C_{p,eff}$  με βάση την τιμή της θερμοκρασίας του υλικού τη δεδομένη χρονική στιγμή.

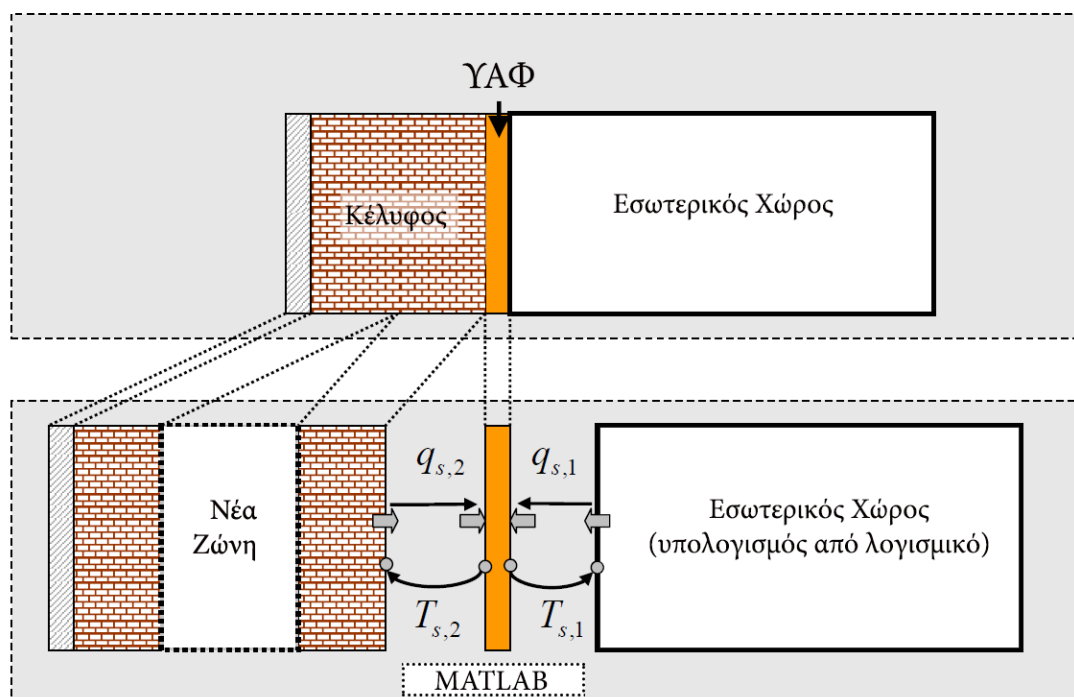
#### 4.3.2. Προσαρμογή της Μεθοδολογίας για μοντελοποίηση κτηρίων

Ο υπολογισμός της θερμικής απόκρισης ενός κτηρίου απαιτεί τη χρήση υπολογιστικού προγράμματος, το οποίο θα λαμβάνει υπόψη, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, όλες εκείνες τις παραμέτρους που επηρεάζουν ένα οίκημα (τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά). Πιο συγκεκριμένα, για να υπολογιστούν παραδείγματος χάριν οι θερμικές ανάγκες ενός χώρου, θα πρέπει να είναι γνωστές τόσο οι εσωτερικές συνθήκες (χρήση του χώρου, ώρες λειτουργίας, ένοικοι, συνθήκες άνεσης κ.α.), όσο και οι εξωτερικές (προσανατολισμός κτηρίου, γειτνίαση του χώρου με υπόλοιπες θερμικές ζώνες, κλιματικές συνθήκες, περιβάλλον χώρος, κ.α.). Συνήθως, αυτές οι παράμετροι δεν είναι δυνατόν να εξεταστούν με τους εργαστηριακούς κώδικες, οι οποίοι εξετάζουν, κατά πλειοψηφία, μονοδιάστατη μετάδοση θερμότητας με σταθερές συνθήκες. Αυτή την ανάγκη, έρχονται να καλύψουν τα υπολογιστικά πακέτα δυναμικής θερμικής προσομοίωσης κτηρίων, τα οποία συνυπολογίζουν όλες τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Για αυτό ακριβώς το λόγο, ο κώδικας όπως περιγράφηκε παραπάνω, συνδέθηκε με ένα τέτοιο πρόγραμμα, απαιτώντας, όμως, αλλαγές στον κώδικα, ώστε να επιτευχθεί η συνεργασία των δυο μοντέλων.

Πιο αναλυτικά, η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την εισαγωγή των ΥΑΦ σε υπολογιστικό πακέτο θερμικής προσομοίωσης κτηρίων, και συγκεκριμένα στο TRNSYS, προβλέπει τη εξέταση των στοιχείων με ΥΑΦ, τα οποία βρίσκονται σε τοίχους, οροφή ή/και πάτωμα. Ο ορισμός νέου στρώματος τοιχοποιίας στο Type 56

του TRNSYS, το οποίο είναι υπεύθυνο για τον υπολογισμό των ενεργειακών ισοζυγίων στο κτήριο, απαιτεί τον ορισμό τριών θερμικών ιδιοτήτων για κάθε υλικό: την αγωγιμότητα, την θερμοχωρητικότητα και την πυκνότητα του υλικού. Η αλγεβρική επίλυση του προβλήματος μεταφοράς θερμότητας για ένα στρώμα τοίχου που περιέχει ΥΑΦ δεν είναι δυνατή λόγω της μη γραμμικότητας που συνδέεται με την αλλαγή φάσης και την αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας των ΥΑΦ. Ο κώδικας, ο οποίος αναπτύχθηκε στο MATLAB, συνδέεται με το TRNSYS προκειμένου να ξεπεραστεί και να αντιμετωπιστεί ακριβώς αυτό το πρόβλημα. Σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης, ο συγκεκριμένος κώδικας καλείται από την πλατφόρμα του TRNSYS, για τον υπολογισμό της θερμικής επίδρασης που ενδεχομένως σχετίζεται με την ενσωμάτωση των ΥΑΦ στην τοιχοποιία.

Η θερμική συμπεριφορά των υλικών αυτών μπορεί εύκολα να οριστεί στον κώδικα που αναπτύχθηκε: οι τιμές των θερμικών ιδιοτήτων, οι οποίες είναι σταθερές, εισάγονται κατευθείαν στον κώδικα (βλ. Παράρτημα Α) ενώ η τιμή της ειδικής θερμοχωρητικότητας εν προκειμένω, η οποία είναι συναρτήσει της θερμοκρασίας, εισάγεται ως ξεχωριστό αρχείο εισόδου (Temp\_PCM.dat & Cp\_PCM.dat) στον κώδικα. Ο κώδικας παρέχει την δυνατότητα να εισαχθούν διάφορα είδη ΥΑΦ, σε διαφορετικά ποσοστά και σε πολλές διαφορετικές τοποθεσίες στην τοιχοποιία ή το κτήριο.



Εικόνα 4.4 Απεικόνιση της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε

Στην παρούσα προσέγγιση, ορίζεται ένα επιπλέον στρώμα τοίχου (βλ. Εικόνα 4.4), το οποίο αντιστοιχεί στο στοιχείο που είναι/ή εμπεριέχει ΥΑΦ, με γνωστά τη μάζα και τις θερμικές ιδιότητες του. Το επιπλέον στρώμα συνδέεται με τα υπόλοιπα στρώματα της τοιχοποιίας, τα οποία αποτελούνται από τα συμβατικά υλικά, τα οποία είναι ορισμένα στην πλατφόρμα του TRNSYS και συγκεκριμένα μέσω του Type 56. Το επιπλέον στρώμα που ορίστηκε, εισάγεται μέσω του Type 155, το οποίο είναι

υπεύθυνο για τη σύνδεση του κώδικα που έχει γραφτεί σε περιβάλλον MATLAB με το TRNSYS και είναι διαθέσιμο στις πρόσφατες εκδόσεις του λογισμικού TRNSYS.

Η σύνδεση γίνεται με τον ορισμό των δεδομένων εισόδου και εξόδου από το Type, τα οποία είναι ορισμένα μέσα στον κώδικα. Το αντίστοιχο αρχείο του κώδικα (αρχείο με κατάληξη “.m”) ορίζεται στο Type 155, ξεχωριστό κάθε φορά για κάθε στοιχείο ΥΑΦ. Τα δεδομένα εισόδου για το μοντέλο MATLAB είναι οι ροές θερμότητας Q1 και Q2, οι οποίες αντιστοιχούν στα στρώματα παράπλευρα του ΥΑΦ στοιχείου (βλ. Εικόνα 4.4). Οι τιμές τους λαμβάνονται από τις επιφάνειες 1 και 2 και υπολογίζονται μέσα στην πλατφόρμα του TRNSYS. Λύνοντας την βασική εξίσωση αγωγής θερμότητας του στρώματος ΥΑΦ από την κώδικα MATLAB, τα δεδομένα εξόδου από το μοντέλο είναι οι θερμοκρασίες T1 και T2, στις επιφάνειες 1 και 2 αντίστοιχα, τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται ως νέα δεδομένα εισόδου στο Type 56.

#### 4.4. Επικύρωση Ενοποιημένου Υπολογιστικού Μοντέλου και Συγκριτική του Αξιολόγηση με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας

Η μεθοδολογία που προτάθηκε και ο κώδικας που προέκυψε, καθιστά απαραίτητη την επαλήθευση και την επικύρωση του μοντέλου σε συγκεκριμένη, απλή περίπτωση, κατά την οποία είναι διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις. Συγκεκριμένα, η επιλογή μελέτης απλής περίπτωσης έναντι κάποιας πολύπλοκης (π.χ. με πολύπλοκη γεωμετρία) αναδεικνύει τις αδυναμίες και τα προτερήματα του μοντέλου καλύτερα, εφόσον θα έχουν απλοποιηθεί άλλες παράμετροι, οι οποίες θα επηρέαζαν τα αποτελέσματα και θα δημιουργούσαν ασάφειες.

##### 4.4.1. Περιγραφή Εξεταζόμενης Περίπτωσης και πειραματικά δεδομένα

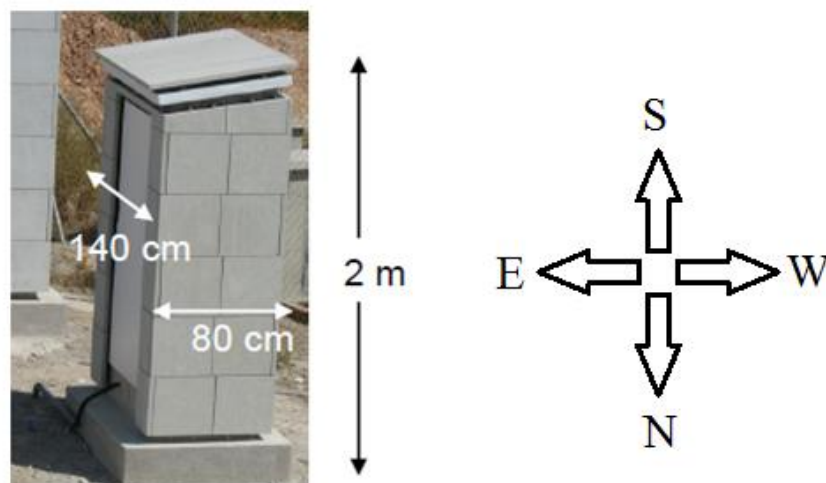


**Εικόνα 4.5 Πρότυπος οικισμός στην περιοχή Alicante στην Ισπανία**

Η επαλήθευση και η επικύρωση του μοντέλου εφαρμόστηκε για την προσομοίωση πιλοτικών οικίσκων, τα οποία φαίνονται στην Εικόνα 4.5. Ένας «πρότυπος οικισμός» αποτελούμενος από σπιτάκια, παρατεταγμένα σε δύο συστοιχίες στήθηκε ώστε να μελετηθεί η επίδραση της ενσωμάτωσης του ΥΑΦ στη θερμική συμπεριφορά της

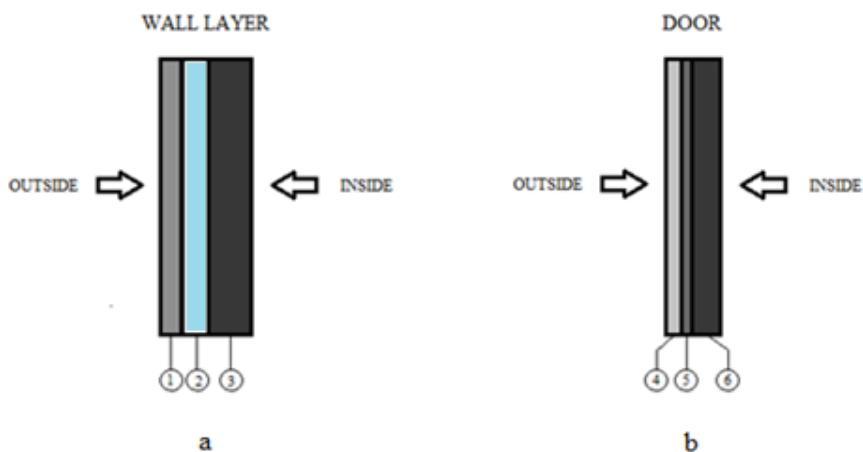
πέτρας. Η μία συστοιχία περιλαμβάνει οικίσκους που διαθέτουν επικάλυψη συμβατικής φυσικής πέτρας (Bateig Azul – ισπανικό μάρμαρο) στην εξωτερική τους επιφάνεια, ενώ η άλλη περιλαμβάνει οικίσκους που διαθέτουν κέλυφος επενδεδυμένο με στρώμα φυσικής πέτρας εμποτισμένης με ΥΑΦ. Τα σπιτάκια έχουν τοποθετηθεί σε εξωτερικό περιβάλλον, στο Αλικάντε στην Ισπανία, προκειμένου να εκτίθενται στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις του εικοσιτετραώρου [Romero-Sánchez et al., 2012].

Οι οικίσκοι έχουν περίπου 2 m ύψος και περίπου 80 cm πλάτος (βλ. Εικόνα 4.6). Το μάρμαρο εμποτίζεται με ΥΑΦ και έχει υπολογιστεί ότι η ποσότητα στην μαρμάρινη πρόσοψη αντιστοιχεί σε 0,011 g ΥΑΦ / cm<sup>3</sup> φυσικής πέτρας (0,5% του συνολικού βάρους της φυσικής πέτρας). Ένα κενό αέρα, 3,5 cm πάχος, βρίσκεται ανάμεσα στην πρόσοψη της πέτρας με το σκυρόδεμα. Οι αισθητήρες καταγράφουν τις θερμοκρασίες κάθε 10 λεπτά, για δυο ημέρες. Τα πειραματικά στοιχεία έχουν ληφθεί για τις ημέρες μεταξύ 2 και 3 Σεπτεμβρίου 2008. Κάθε μοντέλο θα υπολογίσει τη θερμοκρασία του αέρα στον εσωτερικό χώρο και τα αποτελέσματα θα συγκριθούν με τα πειραματικά δεδομένα.



**Εικόνα 4.6 Πιλοτικά σπίτια με φυσική πέτρα στην πρόσοψη**

Η κατασκευή των πιλοτικών σπιτιών περιλαμβάνει τέσσερα πλευρικά τοιχώματα (στο δυτικό τοίχωμα είναι και η πόρτα) δάπεδο και οροφή, δηλαδή επτά σύνθετα τμήματα τοίχων. Χαρακτηριστικό της τοιχοποιίας όλων των οικίσκων αποτελεί το κενό αέρα που παρεμβάλλεται μεταξύ του εσωτερικού κι εξωτερικού επιπέδου (επίπεδο σκυροδέματος και επίπεδο φυσικής πέτρας αντίστοιχα), το οποίο λειτουργεί ως μέσον μεταφοράς θερμότητας. Ανάλογα δομημένη είναι και η επικλινή στέγη των οικίσκων με τη διαφορά ότι μεταξύ του σκυροδέματος και του Bateig Azul εκτός από αέρα παρεμβάλλεται και μονωτικό υλικό. Οι εν λόγω κατασκευές διαθέτουν πόρτα στον ανατολικό τους τοίχο ενώ το δάπεδό τους αποτελείται από απλό στρώμα σκυροδέματος.



Εικόνα 4.7 Σχηματική απεικόνιση των επιπέδων τα οποία απαρτίζουν α) την τοιχοποιία και β) τη διαμόρφωση της πόρτας των πιλοτικών οικίσκων.

Οι ιδιότητες της πόρτας και τα υλικά που απαρτίζουν τον τοίχο, καθώς και το πάχος αυτών φαίνονται στον Πίνακα 4.1. Επιπλέον, οι μετρήσεις της θερμικής αγωγιμότητας και της ογκομετρικής θερμοχωρητικότητας, με και χωρίς ΥΑΦ της φυσικής πέτρας, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.1 Θερμικές Ιδιότητες των στρωμάτων στον τοίχο και της πόρτας

	Θερμική Αγωγιμότητα (kJ/hmK)	Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	Ειδική Θερμοχωρητικότητα (kJ/kgK)	Πάχος (cm)
Τσιμέντο (τοίχος)	7.56	2400	0.8	7
Polyspan Μόνωση (πόρτα)	0.14	10	1.40	1
Μεταλλικό φύλλο (πόρτα)	720	2700	0.86	0.2
PVC Επικάλυψη (πόρτα)	0.83	1500	1	1

Παρατηρώντας τις τιμές του πίνακα 4.2 διακρίνεται μία αύξηση της τάξης του 6.7% της θερμικής αγωγιμότητας και του 5.3% της ογκομετρικής θερμοχωρητικότητας του Bateig Azul με την ενσωμάτωση του ΥΑΦ. Τα ποσοστά αυτά της αύξησης μπορούν να ερμηνευτούν ως εξής:

Πίνακας 4.2 Θερμικές ιδιότητες του Bateig azul και του Bateig azul με ΥΑΦ.

	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)	Ογκομετρική Θερμοχωρητικότητα (kJ/m <sup>3</sup> K)
Bateig azul	1.87	2191.7
Bateig azul -ΥΑΦ	1.99	2308.7

- **Αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του υλικού:** Όπως έχει προαναφερθεί, το Bateig Azul είναι ένα πορώδες υλικό. Ο μεγάλος αριθμός πόρων συνεπάγεται μειωμένη θερμική αγωγιμότητα, γεγονός το οποίο οφείλεται στην ύπαρξη αρκετής ποσότητας αέρα. (ο αέρας χαρακτηρίζεται από μικρή θερμική αγωγιμότητα). Με την εμβάπτιση της πέτρας στο υγρό PCM μίγμα, οι πόροι της πληρούνται με ΥΑΦ, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητάς της. (Katsourinis et al., 2010)
- **Αύξηση της ογκομετρικής θερμοχωρητικότητας του υλικού:** Η αύξηση της ογκομετρικής θερμοχωρητικότητας ερμηνεύεται ως η ανάγκη του Bateig Azul για απορρόφηση μεγαλύτερου ποσού θερμικής ενέργειας προκειμένου να τροποποιήσει την θερμοκρασία του. Το γεγονός αυτό συμβαίνει διότι το ΥΑΦ της πέτρας απορροφά ένα αξιόλογο ποσό της εισερχόμενης θερμότητας προκειμένου να μετασχηματιστεί και κατ' επέκταση το ποσό αυτό το στερείται το ίδιο το Bateig Azul. (Katsourinis et al., 2010)

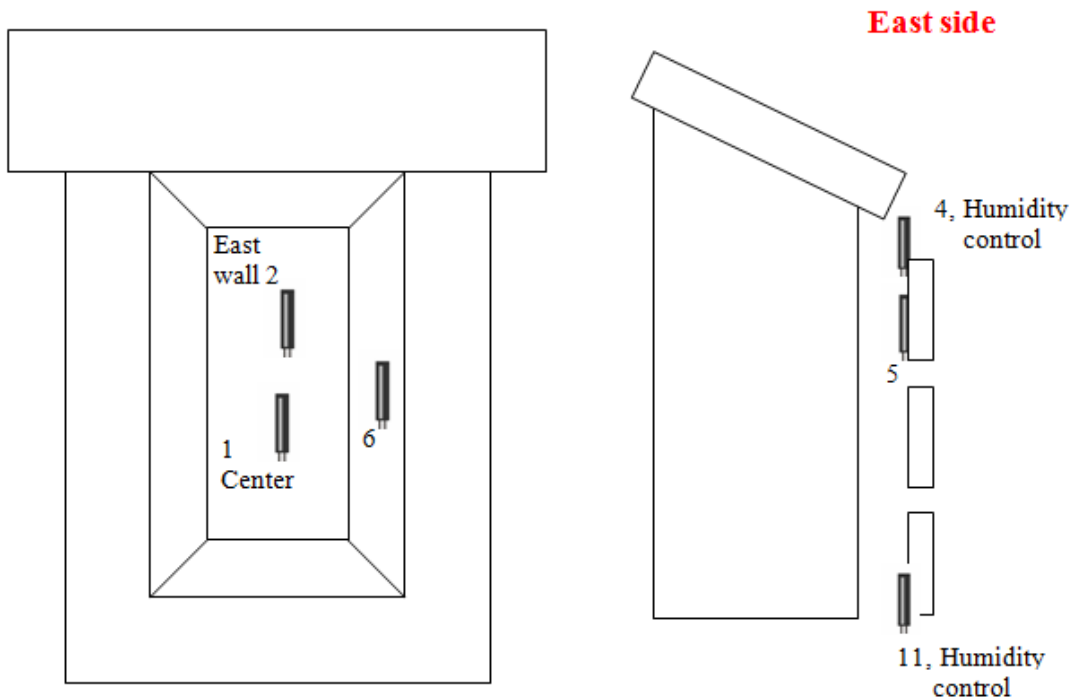
Η ενσωμάτωση ποσότητας PCM στη φυσική πέτρα αποβλέπει στην τροποποίηση των θερμικών της ιδιοτήτων. Το μέγεθος της τροποποίησης αυτής εξαρτάται από το είδος και την ποσότητα του ΥΑΦ που επιλέγεται κάθε φορά. (Katsourinis et al., 2010a, (Katsourinis et al., 2010b)

Στην κατασκευή των οικίσκων το στρώμα του Bateig Azul εκτός από την τοιχοποιία συναντάται και ως ανώτατο επίπεδο της επικλινούς οροφής. Στην προκειμένη περίπτωση όμως η πέτρα ενσωματώνεται στη φυσική της κατάσταση και όχι εμποτισμένη με ΥΑΦ.



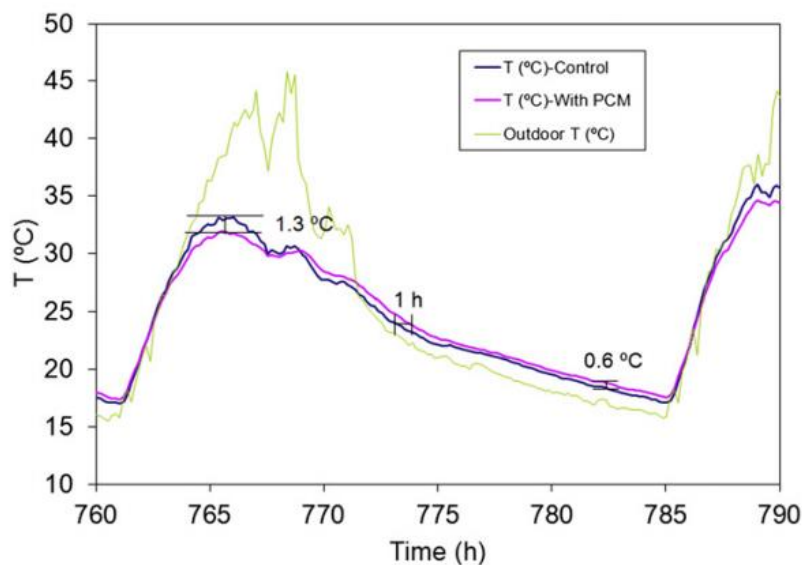
## SENSORS POSITION

### **VENTILATED FAÇADE**



Εικόνα 4.8 Σχηματική απεικόνιση των αισθητήρων θερμότητας και των θέσεων που αυτοί κατέχουν σε έναν από τους πιλοτικούς οικίσκους

Τοποθετήθηκαν αισθητήρες προκειμένου να παρακολουθηθεί η διακύμανση της θερμοκρασίας τόσο στο εσωτερικό των οικίσκων όσο και στο περιβάλλον. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν στο στρώμα αέρος της τοιχοποιίας, στη μέσα πλευρά του νότιου και δυτικού τοίχου και στην οροφή των οικίσκων, τόσο στις κατασκευές Ελέγχου όσο και στις PCM κατασκευές, στις ίδιες θέσεις. Είναι προφανές ότι η αντιστοιχία των θέσεων τοποθέτησης των αισθητήρων στις κατασκευές ελέγχου και στις PCM κατασκευές επιδιώχθηκε σκόπιμα προκειμένου τα αποτελέσματα των μετρήσεων να είναι πλήρως συγκρίσιμα (βλ. Εικόνα 4.8) Οι αισθητήρες μετρούσαν τη θερμοκρασία στο εσωτερικό κι εξωτερικό των οικίσκων επί εικοσιτετραώρου βάσεως. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι η θερμοκρασιακή διακύμανση είναι ομαλότερη στο εσωτερικό των οικίσκων, που περιλαμβάνουν στην τοιχοποιία τους φυσική πέτρα εμποτισμένη με ΥΑΦ, από αυτή των οικίσκων με τη συμβατική πέτρα (βλ. Εικόνα 4.9).



Εικόνα 4.9 Θερμοκρασιακή διακύμανση στο εσωτερικό των οικίσκων για τις δυο περιπτώσεις (με και χωρίς ΥΑΦ). Μέτρηση στο εσωτερικό της Ανατολικής πλευράς.

Η πειραματική διαδικασία που διεξήχθη στα πιλοτικά σπιτάκια κατέδειξε τη συνεισφορά των ΥΑΦ στη θερμική συμπεριφορά της πέτρας και κατ' επέκταση ολόκληρης της κατασκευής. Το γεγονός αυτό αποτελεί κίνητρο για τη χρήση στον τομέα των κατασκευών ενός νέου δομικού υλικού με βελτιωμένες θερμικές ιδιότητες. Η αξιοποίηση του νέου αυτού υλικού στον κτιριακό τομέα θα εξασφαλίσει μείωση των ενεργειακών δαπανών καθώς και ικανοποιητικά όρια θερμικής άνεσης.

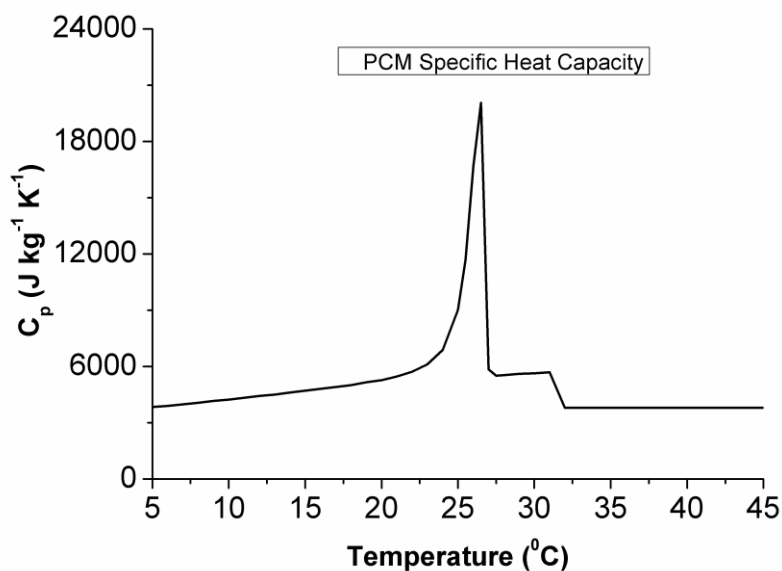
#### 4.4.2. Υπολογιστικά αποτελέσματα – Επικύρωση ενοποιημένου μοντέλου

Για την προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς των οικίσκων με ΥΑΦ με χρήση του ενοποιημένου υπολογιστικού μοντέλου TRNSYS-MATLAB είναι απαραίτητος ο καθορισμός των παραμέτρων που αφορούν τις θερμοφυσικές ιδιότητες των δομικών υλικών του οικίσκου, στη διείσδυση του αέρα, στα υλικά και τα πάχη των στρωμάτων της τοιχοποιίας κ.λπ. Όσες παράμετροι ορίστηκαν στο περιβάλλον του TRNBuild παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4. Η ειδική αναφορά στις συγκεκριμένες παραμέτρους παρατέθηκε σκόπιμα, καθώς τα συγκεκριμένα μεγέθη επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τη διακύμανση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του Οικίσκου Ελέγχου.

Δύο αρχεία που περιέχουν τις τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και την ηλιακή ακτινοβολία, αντίστοιχα, έχουν συνδεθεί στην πλατφόρμα του TRNSYS. Οι τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος μετρήθηκαν πειραματικά [Romero-Sánchez et al., 2012], ενώ οι ηλιακές τιμές ακτινοβολίας (άμεση και διάχυτη ακτινοβολία) προήλθαν από στοιχεία διαθέσιμα στις βιβλιοθήκες του TRNSYS, λαμβάνοντας υπόψη το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα (2-3 Σεπτεμβρίου). Τα στοιχεία αυτά προκύπτουν από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στη Βαλένθια της Ισπανίας, περιοχή που βρίσκεται κοντά στο Αλικάντε.

Στη περίπτωση που έχουμε ΥΑΦ στην πρόσοψη, χρησιμοποιούνται πειραματικά αποτελέσματα υπολογισμού της ειδικής θερμοχωρητικότητας (αποτέλεσμα

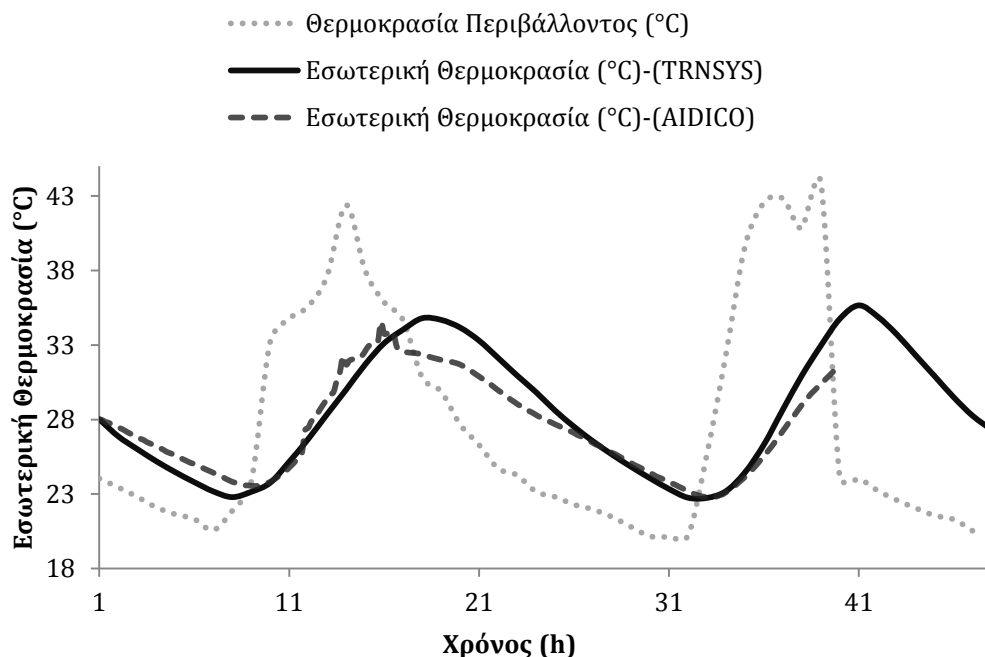
μετρήσεων με DSC). Η Εικόνα 3.10 δείχνει τη καμπύλη της ειδικής θερμοχωρητικότητας του ΥΑΦ, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί στις προσομοιώσεις. Τα πειράματα έχουν διεξαχθεί στο εργαστήριο EM&ΣΚ στο ΕΜΠ με βαθμό θέρμανσης της τάξης του 0,1 °C/min. Ο συγκεκριμένος ρυθμός θέρμανσης είναι αντιπροσωπευτικός για δομικά στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν σε κτηριακές εφαρμογές, λόγω του γεγονότος ότι μπορεί να προσεγγίσει ρεαλιστικά την πραγματική κατάσταση. Στη συνέχεια, η πειραματική καμπύλη, μέσω πίνακα, εισάγεται στον κώδικα του MATLAB.



Εικόνα 4.10 Εξάρτηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας της φυσικής πέτρας με ΥΑΦ σε σχέση με θερμοκρασία

Πίνακας 4.3 Συγκεντρωτικά ορισμένα από τα στοιχεία που εισήχθησαν στο TRNBuild για τη διεξαγωγή της προσομοίωσης.

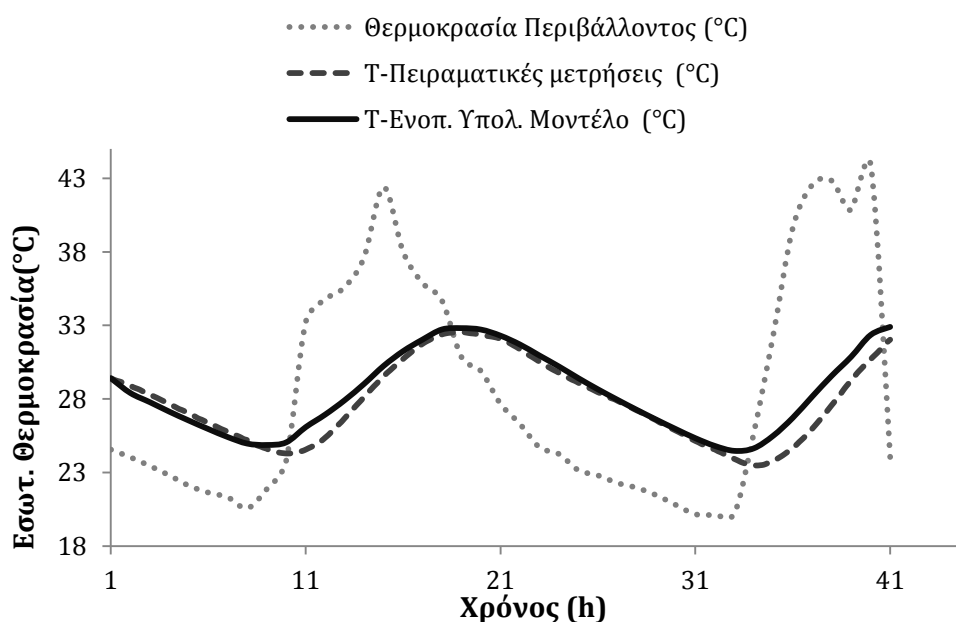
Στοιχεία του TRNBuild	Σχόλια
<b>Infiltration</b> 0.1 [1/h]	Οι πρότυποι οικίσκοι της Alicante είναι απλές κατασκευές. Η μοναδική δίοδος μέσω της οποίας ο αέρας περιβάλλοντος μπορεί να εισχωρήσει στο εσωτερικό τους είναι η πόρτα στην ανατολική τους πλευρά η οποία ανοίγει σπανίως. Επομένως στην επιλογή “Infiltration” του TRNBuild ορίστηκε ενδεικτικά μία πολύ μικρή τιμή, καθώς η διείσδυση του αέρα είναι περιορισμένη.
<b>Convective heat transfer coefficient</b> kJ/hm <sup>2</sup> K	Ο συντελεστής συναγωγιμότητας έχει οριστεί 11 kJ/hm <sup>2</sup> K στη “front” επιφάνεια του concrete (→ μεταφορά θερμότητας διά συναγωγής μεταξύ του αέρα στο εσωτερικό των οικίσκων και της εσωτερικής επιφάνειας του στρώματος σκυροδέματος) και 78 kJ/hm <sup>2</sup> K στη “back” επιφάνεια του Bateig Azul (→ μεταφορά θερμότητας διά συναγωγής μεταξύ του αέρα περιβάλλοντος και της εξωτερικής επιφάνειας του στρώματος φυσικής πέτρας).
<b>Boundary temperature of the ground</b>	00:00h-8:00h→ 15 °C 8:00h-12:00h→ 19 °C 12:00h-15:00h→ 21 °C 15:00h-21:00h→ 20 °C 21:00h-24:00h→ 18 °C  Προκειμένου να οριστεί η “Boundary temperature” του δαπέδου των οικίσκων διαμορφώθηκε στο TRNBuild ένα “Schedule” θερμοκρασιών. Στο “Schedule” αποτυπώθηκε η διακύμανση της θερμοκρασίας του εδάφους εντός εικοσιτετραώρου λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, όπως αυτή μετρήθηκε από το Ινστιτούτο της AIDICO για τη 2η και 3η ημέρα του Σεπτεμβρίου.
<b>Solar absorptance</b>	Οι εξωτερικές επιφάνειες του οικίσκου είναι στην πλειοψηφία τους σκουρόχρωμες (το γκρίζο στρώμα του Bateig Azul στην τοιχοποιία και την οροφή και η μαύρη επένδυση πολυβινυλοχλωριδίου στην πόρτα). Επιπλέον η κατασκευή του οικίσκου δεν επιτρέπει την είσοδο του ηλιακού φωτός στο εσωτερικό του (δεν υπάρχουν υαλοπίνακες και η πόρτα παραμένει συνήθως κλειστή), ενώ απουσιάζει και οποιοδήποτε σύστημα τεχνητού φωτισμού. Επομένως η τιμή του συντελεστή της solar absorptance (as) θεωρήθηκε 0.6-0.8 στις εξωτερικές επιφάνειες της κατασκευής, ενώ στις επιφάνειες στο εσωτερικό του οικίσκου η τιμή του as ορίστηκε 0.8.



**Εικόνα 4.11** Μετρήσεις θερμοκρασίας και υπολογιστικά αποτελέσματα ενοποιημένου μοντέλου - Πιλοτικά Σπίτια / περίπτωση χωρίς ΥΑΦ

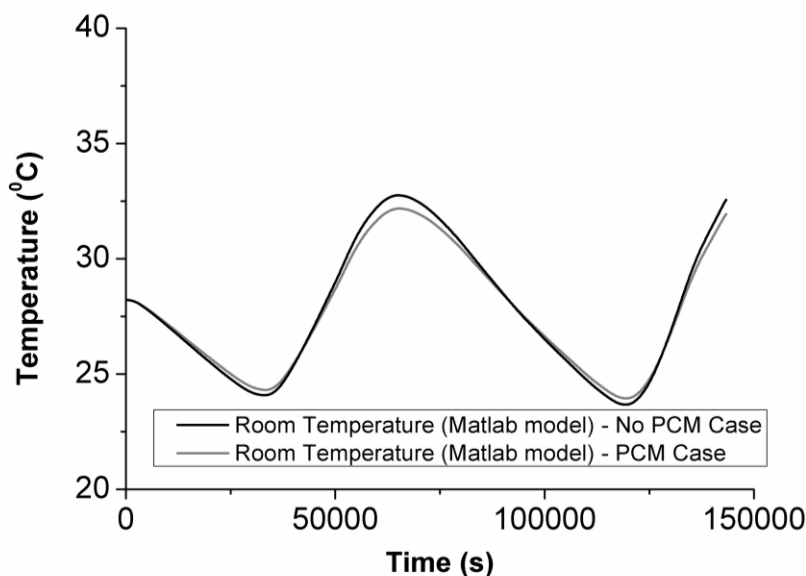
Η πρώτη περίπτωση προσομοίωσης αφορά τα πιλοτικά σπίτια χωρίς τη χρήση ΥΑΦ στην πέτρα. Ως χρονικό βήμα ορίστηκαν τα 10min, ενώ ως αρχικές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας οι τιμές 28.02°C και 50% αντίστοιχα. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα δείχνουν ότι οι θερμοκρασίες του αέρα στο εσωτερικό ακολουθούν τις αντίστοιχες πειραματικές (Εικόνα 4.11). Ανάλογες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν και από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.12, και όταν προσομοιώνεται σπίτι με ΥΑΦ στην πρόσοψη. Σε αυτήν την περίπτωση, οι αρχικές τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας είναι 29.41°C και 50% αντίστοιχα. Η Εικόνα 4.13 συγκρίνει τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση των δύο παραπάνω περιπτώσεων, με στόχο την ανάδειξη της επίδρασης των ΥΑΦ στη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα. Τα αποτελέσματα αυτά προκύπτουν με κοινή αρχική θερμοκρασία χώρου 28,21 °C. Αποδεικνύεται ότι το υπολογιστικό μοντέλο καταφέρνει να ακολουθήσει την επίδραση των ΥΑΦ, δηλαδή παρατηρείται μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα ενώ την ίδια στιγμή παρατηρείται αύξηση των ελαχίστων τιμών, με αποτέλεσμα την ομαλότερη διακύμανση της θερμοκρασίας, κάτι που επιτυγχάνεται μόνο όταν ενσωματώνονται τα ΥΑΦ στην πρόσοψη. Επίσης, συγκρίνοντας τις δυο περιπτώσεις (με ή χωρίς ΥΑΦ), παρατηρείται μια μικρή αλλά αισθητή διαφορά στις θερμοκρασίες που υπολογίζονται. Η μέγιστη θερμοκρασία στο πιλοτικό σπίτι με ενσωματωμένο ΥΑΦ στην πρόσοψη υπολογίζεται περίπου 0,6 °C χαμηλότερη από την αντίστοιχη μέγιστη τιμή του σπιτιού χωρίς ΥΑΦ. Επιπλέον, η διαδικασία ψύξης έχει επιβραδυνθεί, καθώς απελευθερώνεται η αποθηκευμένη ενέργεια, με αποτέλεσμα η ελάχιστη θερμοκρασία στα σπίτια με ΥΑΦ να είναι 0,3 °C υψηλότερη σε σύγκριση με το αντίστοιχο σπίτι χωρίς ΥΑΦ. Τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζουν μια μείωση 1,3 °C στην τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας και 0,5 °C αύξηση της χαμηλότερης θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του διημέρου. Οι τιμές αυτές μας αφήνουν το

περιθώριο να πούμε ότι οι προβλέψεις με το μοντέλο είναι απόλυτα συγκρίσιμες με τα πειραματικά δεδομένα, με την επίδραση των ΥΑΦ να προβλέπεται μειωμένη κατά 30%.



Εικόνα 4.12 Μετρήσεις θερμοκρασίας και υπολογιστικά αποτελέσματα ενοποιημένου μοντέλου - Πιλοτικά Σπίτια / περίπτωση με ΥΑΦ

Συνολικά, οι προβλεπόμενες τιμές της θερμοκρασίας ακολουθούν τις διαθέσιμες μετρήσεις μέσα σε ένα αποδεκτό επίπεδο ακρίβειας και η επίδραση του ΥΑΦ είναι εμφανής. Ωστόσο, παρατηρούνται ορισμένες αποκλίσεις. Αυτές οι διαφορές μπορούν να αποδοθούν στους ακόλουθους παράγοντες: (α) η θερμοκρασία του εδάφους θεωρείται σταθερή και ίση με 20 °C σε όλη την προσομοίωση, (β) υποθέσεις που έγιναν στους τοίχους των σπιτιών και στις ιδιότητες των υλικών για την πόρτα, καθώς δεν υπήρχαν συγκεκριμένες τιμές αλλά χρησιμοποιήθηκαν τιμές από τις βιβλιοθήκες του TRNSYS, (γ) παραδοχές που συνδέονται με τη μοντελοποίηση του ΥΑΦ (ιδιότητες, χρήση επιπλέον στρώματος στην πρόσοψη) και (δ) ανακρίβειες που σχετίζονται με τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και τους συντελεστές που έχουν υιοθετηθεί.



Εικόνα 4.13 Επίδραση εφαρμογής ΥΑΦ στην πρόσοψη με τη φυσική πέτρα

#### 4.4.3. Συγκριτική αξιολόγηση

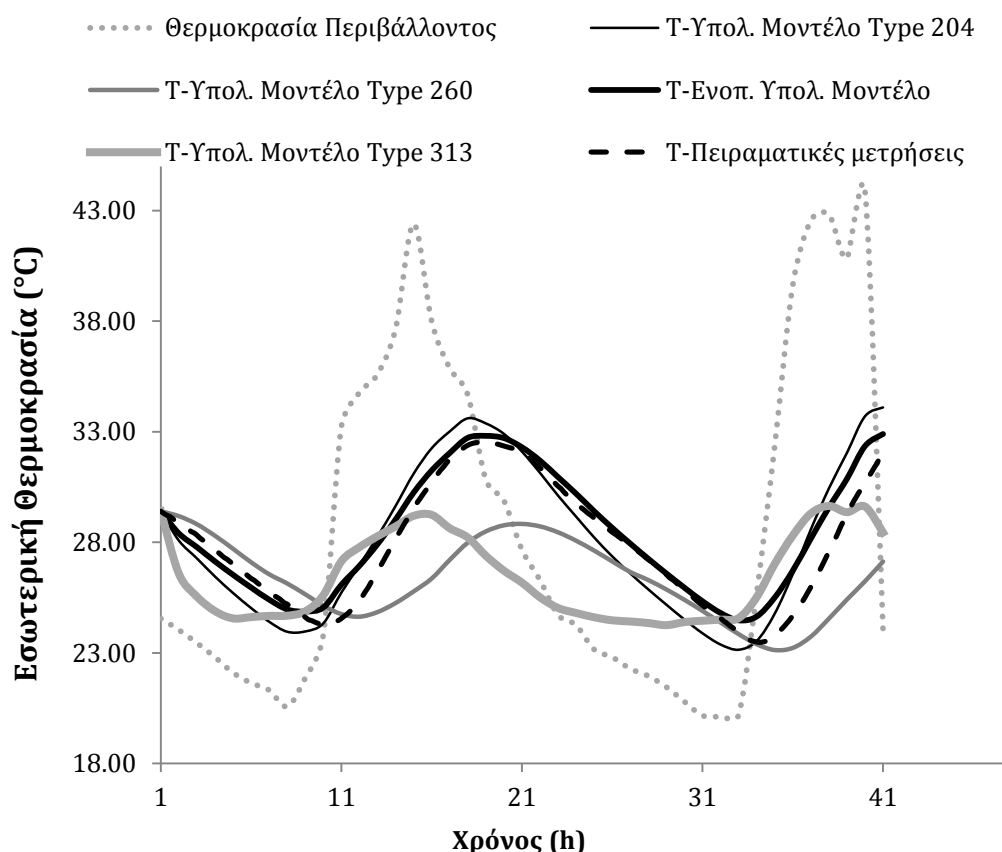
Σε αυτή την παράγραφο, γίνεται η ενσωμάτωση των "PCM Types" (όπως έχουν αναφερθεί στην §4.2.2) στο TRNSYS, στοχεύοντας στη συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων που δίνει κάθε μοντέλο, όσον αφορά τη θερμική συμπεριφορά των ΥΑΦ οικίσκων, οι οποίοι μοντελοποιούνται ως "κτήριο-μιας-θερμικής-ζώνης". Κατ'αντιστοιχία, οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται για έναν κύκλο δύο ημερών μεταξύ 2 και 3 Σεπτεμβρίου 2008. Σε κάθε μοντέλο προσομοίωσης εισάγονται, ως εξωτερικά αρχεία, η μετρούμενη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και η ηλιακή ακτινοβολία, ενώ αρχική τιμή της θερμοκρασίας, αυτή τη φορά, θεωρείται η 29,41 °C.

Οι απαιτούμενες παράμετροι που ορίζονται σε κάθε προσομοίωση, αφορούν είτε το μοντέλο PCM ή την πλατφόρμα του TRNSYS. Στην πρώτη περίπτωση, οι κύριες παράμετροι είναι οι ιδιότητες του ΥΑΦ που μελετάται, η θέση του και η ποσότητα του. Στην εξεταζόμενη περίπτωση τα προηγούμενα στοιχεία είναι κοινά. Το μόνο στοιχείο, το οποίο διαφοροποιεί τις παραμέτρους των "PCM Types" είναι η αντιμετώπιση της αλλαγής φάσης (μέθοδος ενεργούς θερμοχωρητικότητας ή μέθοδος ενθαλπίας). Λόγω της απλής δομής των οικίσκων, οι σημαντικές παράμετροι στην πλατφόρμα του TRNSYS είναι οι θερμο-φυσικές ιδιότητες των υλικών κατασκευής, η διείσδυση αέρα ή διαφυγές λόγω αεροστεγανότητας (*infiltration*) μέσα στους οικίσκους, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής (*convective heat transfer coefficient*) τόσο των εξωτερικών όσο και των εσωτερικών επιφανειών και, τέλος, η θερμοκρασία του εδάφους.

Τα "PCM Types", τα οποία θα μελετηθούν στην παρούσα φάση είναι τα: Type 204, Type 313, Type 260. Κάθε Type θα επικυρωθεί στην συγκεκριμένη εξεταζόμενη περίπτωση και ύστερα θα συγκριθεί με τα υπόλοιπα, καθώς και με το ενοποιημένο μοντέλο MATLAB-TRNSYS. Για να είναι δυνατή η συγκριτική αξιολόγηση όλων των μοντέλων και να αναδειχθούν τα προτερήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας, είναι απαραίτητη η επαλήθευση των μοντέλων στην απλή περίπτωση που έχει

επιλεχθεί. Συγκεκριμένα, η επιλογή μελέτης απλής περίπτωσης έναντι κάποιας πολύπλοκης (π.χ. ολόκληρο κτήριο ή κτήριο με πολύπλοκη γεωμετρία) θα αναδείξει τις αδυναμίες και τα προτερήματα των μοντέλων καλύτερα, εφόσον θα έχουν απλοποιηθεί άλλες παράμετροι, οι οποίες θα επηρέαζαν τα αποτελέσματα και θα δημιουργούσαν ασάφειες.

#### 4.4.4. Επαλήθευση απόδοσης και λειτουργίας των "PCM Types" στην εξεταζόμενη περίπτωση



Εικόνα 4.14 Διακύμανση εσωτερικής θερμοκρασίας των ΥΑΦ οικίσκων με χρήση των μοντέλων: Type 204, Type 313, Type 260 και Ενοπ. Μοντέλο MATLAB-TRNSYS

Στην Εικόνα 4.14 φαίνονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα από το κάθε μοντέλο, τα οποία αφορούν την διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας ενός ΥΑΦ οικίσκου. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα δείχνουν ότι όλα τα μοντέλα καταφέρνουν να προσομοιώσουν τις θερμοκρασίες του αέρα στο εσωτερικό, ακλουθώντας τις αντίστοιχες πειραματικές. Ωστόσο, φαίνεται ότι το Type 204 και το Ενοποιημένο Μοντέλο MATLAB-TRNSYS προσεγγίζουν καλύτερα τις πειραματικές τιμές, ενώ τα υπόλοιπα δύο μοντέλα παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις.

Πιο συγκεκριμένα, για το Type 204, φαίνεται να υπάρχει μια υπερ-εκτίμηση των μεγίστων τιμών της θερμοκρασίας σε σχέση με τις αντίστοιχες πειραματικές. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου (ημέρα-νύχτα στις 2 Σεπτεμβρίου) η μέγιστη θερμοκρασία υπολογίζεται 1.06°C υψηλότερη από την



αντίστοιχη τιμή που μετράται, ενώ κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου ημέρας-νύχτας (στις 3 Σεπτεμβρίου) η μέγιστη θερμοκρασία προβλέπεται 2.07 °C υψηλότερη. Σε αντίθεση με τις μέγιστες θερμοκρασίες, οι ελάχιστες τιμές φαίνεται να προσεγγίζουν καλύτερα τις πειραματικές τιμές με μία μικρή απόκλιση της τάξης των 0.4 °C. Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι το μοντέλο διακριτοποιεί τον κάθε τοίχο σε 729 χωρικούς κόμβους (3D) και υπολογίζει την μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγιμότητας, συναγωγής και ακτινοβολίας μεταξύ των κόμβων. Υποθέσεις που έγιναν στους τοίχους των οικίσκων και στις ιδιότητες των υλικών για την πόρτα, (καθώς δεν υπήρχαν συγκεκριμένες τιμές αλλά χρησιμοποιήθηκαν τιμές από τις βιβλιοθήκες του TRNSYS), επηρεάζουν τους υπολογισμούς της μεταφοράς θερμότητας σε κάθε κόμβο, οδηγώντας σε μικρές αποκλίσεις. Τέλος, το Type 204 αντιμετωπίζει την αλλαγή φάσης μέσω σταθερής τιμής της ειδικής θερμοχωρητικότητας, γεγονός που συμβάλλει στις διαφορετικές υπολογιστικές τιμές της θερμοκρασιακής διακύμανσης.

Όσον αφορά το Type 313, σε γενικές γραμμές, το μοντέλο ακολουθεί την τάση της μεταβολής της θερμοκρασίας και καταφέρνει να υπολογίσει τις ελάχιστες τιμές της θερμοκρασίας, δεδομένου ότι στις 2 Σεπτεμβρίου, η τιμή προβλέπεται να είναι 0,3 °C υψηλότερη από την αντίστοιχη πειραματική τιμή, ενώ κατά τη δεύτερο κύκλο ημέρας-νύχτας, η ελάχιστη θερμοκρασία υπολογίζεται 0.8 °C υψηλότερη από την αντίστοιχη πειραματική. Ωστόσο, παρατηρούνται πολλές αποκλίσεις κατά τη διάρκεια των δύο κύκλων. Η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας και στους δύο κύκλους υποεκτιμάται και είναι χρονικά μετατοπισμένη προς τα εμπρός. Απόκλιση παρουσιάζεται και κατά τη διάρκεια πήξης του ΥΑΦ, τόσο την πρώτη όσο και τη δεύτερη ημέρα. Οι τιμές των υπολογιστικών αποτελεσμάτων, όπως αυτά προκύπτουν από το TRNSYS χρησιμοποιώντας το Type 313 είναι σαφές ότι επηρεάζονται κυρίως από παραμέτρους, οι οποίες αφορούν το ίδιο το μοντέλο. Πιο συγκεκριμένα, το Type 313 αναπτύχθηκε και επικυρώθηκε για την μοντελοποίηση ενεργητικών συστημάτων με ΥΑΦ (**active PCM systems**), χωρίς όμως να αποκλείεται η εφαρμογή του και για παθητικά συστήματα. Επιπλέον, η αλλαγή φάσης αντιμετωπίζεται μέσω της μεθόδου της ενθαλπίας, οπότε και τα ζεύγη "Ενθαλπία - Θερμοκρασία" εισάγονται στο υπολογιστικό μοντέλο ως εξωτερικό αρχείο εισόδου. Τέλος, η διαδοχή των στρωμάτων του τοιχώματος έτσι όπως ορίζεται στο μοντέλο, δημιουργεί αρκετές ασάφειες, καθώς αντιμετωπίζει την επιφάνεια που καλύπτεται από ΥΑΦ στο σύνολό της [Bontemps et al., 2011].

Σχετικά με το Type 260, οι θερμοκρασίες του εσωτερικού αέρα, που υπολογίζονται, αναπαράγουν καλά τη διακύμανση των πειραματικών δεδομένων. Στις 2 Σεπτεμβρίου, η ελάχιστη θερμοκρασία που υπολογίζεται στο εσωτερικό του οικίσκου είναι 0,3 °C υψηλότερη από την αντίστοιχη πειραματική, ενώ στις 3 Σεπτεμβρίου, η ελάχιστη υπολογιζόμενη τιμή της θερμοκρασίας φαίνεται να είναι 0,5 °C χαμηλότερη από τη μετρούμενη τιμή. Παρ'όλα αυτά, παρατηρείται απόκλιση των μέγιστων τιμών της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα, δεδομένου ότι η διαφορά μεταξύ των πειραματικών τιμών και των αντίστοιχων υπολογιστικών κυμαίνεται μεταξύ 3,6 °C και 4,7 °C. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του μοντέλου, όπως η αδυναμία του μοντέλου να προσομοιώσει την αλλαγή φάσης όταν το ΥΑΦ είναι ενσωματωμένο σε μικροκάψουλες [Kuznik et al., 2010] και το γεγονός ότι το μοντέλο αντιμετωπίζει την

αλλαγή φάσης, με την καμπύλη της ειδικής θερμοχωρητικότητας, η οποία όμως περιγράφεται μόνο με πέντε ζεύγη αντιπροσωπευτικών τιμών "Ειδικής Θερμοχωρητικότητας (Cp) - Θερμοκρασίας (T)" [Kuznik et al., 2010]. Για την εξεταζόμενη περίπτωση, τα πέντε ζεύγη τιμών επιλέγονται από την καμπύλη της ειδικής θερμοχωρητικότητας του ΥΑΦ (βλ. Εικόνα 4.10) και αφορούν τιμές οι οποίες διανέμονται γύρω από την μέγιστη τιμή Cp, η οποία εμφανίζεται στην θερμοκρασία τήξεως του ΥΑΦ, περίπου στους 26 °C. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι περισσότερα ζεύγη τιμών "Cp-T" θα περιέγραφαν λεπτομερέστερα το φαινόμενο της αλλαγής φάσης και θα έδιναν καλύτερα αποτελέσματα.

Τέλος, το ενοποιημένο μοντέλο MATLAB-TRNSYS δίνει την καλύτερη προσέγγιση των πειραματικών τιμών της θερμοκρασιακής διακύμανσης. Στις 2 Σεπτεμβρίου η ελάχιστη τιμή υπολογίζεται 0.5 °C υψηλότερα από την αντίστοιχη πειραματική τιμή και ομοίως, στις 3 Σεπτεμβρίου, η ελάχιστη τιμή της προσομοίωσης είναι 1 °C υψηλότερη από την αντίστοιχη πειραματική τιμή. Αποκλίσεις κυρίως κατά την τήξη του ΥΑΦ, οφείλονται ενδεχομένως στις υποθέσεις που έχουν γίνει για τις θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών, καθώς και ανακρίβειες που σχετίζονται με τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και τους συντελεστές που έχουν υιοθετηθεί. Έχει βρεθεί ότι τα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούν τη μέθοδο της ειδικής θερμοχωρητικότητας (Type 204, Type 260 και το ενοποιημένο μοντέλο) δίνουν πιο ακριβή αποτελέσματα, τα οποία προσεγγίζουν τα πειραματικά δεδομένα, ειδικά όταν η θερμοκρασία τήξεως έχει επαρκώς περιγραφεί.

#### 4.5. Σύνοψη κεφαλαίου - Συμπεράσματα

---

Η μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω αποσκοπεί στο να εξαλείψει όλα τα προβλήματα και τις αδυναμίες των ήδη υπαρχουσών μεθοδολογιών και να βοηθήσει στη γενίκευση της αντιμετώπισης και επίλυσης πολλών και διαφορετικών εφαρμογών που περιέχουν ΥΑΦ. Στον Πίνακα 4.4 συνοψίζονται όλα τα χαρακτηριστικά της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε σύγκριση με τα μοντέλα που αναφέρθηκαν στην §4.2.2. Οι αδυναμίες των μοντέλων εμφανίστηκαν και στην εφαρμογή τους σε απλή μελέτη περίπτωσης, οικίσκων με πρόσοψη φυσικής πέτρας εμβαπτισμένης σε ΥΑΦ.

Παρατηρώντας τον Πίνακα 4.4, βγαίνει το συμπέρασμα ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία εξαλείφει την αδυναμία των περισσότερων μοντέλων να λάβουν υπόψη τους με ρεαλιστικό τρόπο την αλλαγή φάσης, χρησιμοποιώντας πειραματικές μετρήσεις της καμπύλης της θερμοχωρητικότητας. Επιπλέον, δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός όσον αφορά το είδος του ΥΑΦ που θα χρησιμοποιηθεί, την θέση του στην τοιχοποιία ή το κέλυφος γενικότερα, καθώς και την ποσότητα του.

Συνοψίζοντας, το μεγάλο πλεονέκτημα του μοντέλου και της προσέγγισης που παρουσιάστηκαν είναι το γεγονός ότι κατά την προσομοίωση των ΥΑΦ, λαμβάνονται επίσης υπόψη όλες εκείνες οι παράμετροι, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν την θερμική συμπεριφορά ενός κτηρίου, ακόμα και τη συμπεριφορά του ίδιου του ΥΑΦ. Όλες αυτές οι παράμετροι είναι ζωτικής σημασίας, ειδικά όταν υπό εξέταση βρίσκεται ένα κτήριο σε πλήρη κλίμακα.

Ακόμη ένα πλεονέκτημα της σύνδεσης των δυο μοντέλων είναι ότι, λόγω της αρχιτεκτονικής του λογισμικού του TRNSYS, είναι πλέον δυνατή η πλήρης ενεργειακή προσομοίωση ενός κτηρίου που ενσωματώνει ΥΑΦ στο κέλυφός του και είναι συνδεδεμένο με εγκαταστάσεις θέρμανσης ή ψύξης, άλλα συστήματα ενέργειας, ΑΠΕ, κλπ. Συνεπώς, μπορεί να εξετασθεί εύκολα κάποιο κτήριο, το οποίο έχει δομικά στοιχεία με ΥΑΦ, ως προς τις θερμικές ή ψυκτικές ανάγκες του και τις καταναλώσεις ενέργειας. Με αυτό τον τρόπο, θα είναι εφικτή η αξιολόγηση της επίδρασης των ΥΑΦ στην θερμική συμπεριφορά ενός κτηρίου. Στο κεφάλαιο 5 θα παρουσιαστεί η χρήση του μοντέλου που αναπτύχθηκε, για τη διεξαγωγή προσομοιώσεων σε πιλοτική κατοικία, η οποία ενσωματώνει ΥΑΦ στους εσωτερικούς τοίχους και τα χωρίσματα των δωματίων. Θα μελετηθούν οι ενεργειακές ανάγκες της όσον αφορά τη ψύξη, ενώ θα διεξαχθεί παραμετρική μελέτη αρκετών συνθηκών που επηρεάζουν τα ψυκτικά φορτία.

Τέλος, καλό θα ήταν να αναφερθεί ότι η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή του κώδικα που αναπτύχθηκε στο MATLAB και συνδέθηκε με το TRNSYS μπορεί να προσαρμοστεί και να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω για την προσομοίωση άλλων εφαρμογών αποθήκευσης ενέργειας με δυναμική συμπεριφορά, και μάλιστα, μπορεί να συνδεθεί με οποιοδήποτε εμπορικό λογισμικό πέραν του TRNSYS, χρησιμοποιώντας ακριβώς την ίδια μεθοδολογία.

Πίνακας 4.4 Συγκριτική αξιολόγηση μοντέλων προσομοίωσης ΥΑΦ στην πλατφόρμα TRNSYS

Μοντέλο	Μέθοδος Αριθμ. Επίλυσης	Αντιμετώπιση αλλαγής φάσης	Επικύρωση	Περιορισμοί	Διαθεσιμότητα	Βιβλιογραφία
TYPE 36	Μέθοδος Ενθαλπίας	X (Σταθερή τιμή)	✓	Συγκεκριμένη Εφαρμογή	✓	Ghoneim et al., 1991
TYPE 58	Μέθοδος Ενθαλπίας	X (Σταθερή τιμή)	✓	Συγκεκριμένη Εφαρμογή	X	Stritih and Novak, 1996, Stritih, 2003
TYPE 204	Μέθοδος Ειδ. Θερμοχωρητικότητας	X (Σταθερή τιμή)	X	Μεγάλο υπολογιστικό κόστος	✓	Jokisalo et al., 1999
TYPE 101	Μέθοδος Ειδ. Θερμοχωρητικότητας	X (Σταθερή τιμή)	✓	X	X	Ahmad et al., 2006
Ibáñez et al.	Ισοδύναμοι Συντελεστές	X	✓	Θέση ΥΑΦ (πλευρικός τοίχος)	✓	Ibáñez et al., 2005
TYPE 241	Μέθοδος Θερμικής Πηγής	✓ (Πίνακας τιμών T-Cp)	X	X	✓	Schranzhofer et al., 2006
TYPE 260	Μέθοδος Ειδ. Θερμοχωρητικότητας	✓	✓	Θέση ΥΑΦ μέσα στην τοιχοποιία	✓	Kuznik et al., 2010

		(Μόνο 5 τιμές T-Cp)				
<b>TYPE 313</b>	Μέθοδος Ειδ. Θερμοχωρητικότητας	✓✓  (Πίνακας τιμών T-Cp)	✗	✗	✓	Bontemps et al., 2011
<b>TYPE 1270</b>	Μέθοδος “Θερμικής Πηγής”	X  (Σταθερή τιμή)	✗	Είδος ΥΑΦ	✓	TESS LLC, 2012
<b>Προτεινόμενο μοντέλο MATLAB - TRNSYS</b>	Μέθοδος Ειδ. Θερμοχωρητικότητας	✓✓✓  (Πίνακας τιμών T-Cp από DSC)	✓	✗	✓	Stamatiadou et al., 2013

## Βιβλιογραφία 4<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

---

- Ahmad, M., Bontemps, A., Sallée, H., Quenard, D., 2006a. Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour of wallboards containing a phase change material. *Energy and Buildings* 38, 357–366. doi:10.1016/j.enbuild.2005.07.008
- Ahmad, M., Bontemps, A., Sallée, H., Quenard, D., 2006b. Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material. *Energy and Buildings* 38, 673–681. doi:10.1016/j.enbuild.2005.11.002
- AL-Saadi, S.N., Zhai, Z. (John), 2013. Modeling phase change materials embedded in building enclosure: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21, 659–673. doi:10.1016/j.rser.2013.01.024
- Arkar, C., Medved, S., 2005. Influence of accuracy of thermal property data of a phase change material on the result of a numerical model of a packed bed latent heat storage with spheres. *Thermochimica Acta* 438, 192–201. doi:10.1016/j.tca.2005.08.032
- Bontemps, A., Ahmad, M., Johannès, K., Sallée, H., 2011a. Experimental and modelling study of twin cells with latent heat storage walls. *Energy and Buildings* 43, 2456–2461. doi:10.1016/j.enbuild.2011.05.030
- Bontemps, A., Ahmad, M., Johannès, K., Sallée, H., 2011b. Experimental and modelling study of twin cells with latent heat storage walls. *Energy and Buildings* 43, 2456–2461. doi:10.1016/j.enbuild.2011.05.030
- Crawley, D.B., Hand, J.W., Kummert, M., Griffith, B.T., 2008. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment* 43, 661–673. doi:10.1016/j.buildenv.2006.10.027
- Duffy, M.J., Hiller, M., Bradley, D.E., Keilholz, W., Thornton, J.W., 2009. TRNSYS–Features and functionality for building simulation 2009 Conference, in: Eleventh International IBPSA Conference. pp. 1950–1954.
- Ghoneim, A.A., Klein, S.A., Duffie, J.A., 1991. Analysis of collector-storage building walls using phase-change materials. *Solar Energy* 47, 237–242. doi:10.1016/0038-092X(91)90084-A
- He, B., Martin, V., Setterwall, F., 2004. Phase transition temperature ranges and storage density of paraffin wax phase change materials. *Energy* 29, 1785–1804. doi:10.1016/j.energy.2004.03.002
- Hong, T., Chou, S., Bong, T., 2000. Building simulation: an overview of developments and information sources. *Building and Environment* 35, 347–361. doi:10.1016/S0360-1323(99)00023-2
- Ibáñez, M., Lázaro, A., Zalba, B., Cabeza, L.F., 2005a. An approach to the simulation of PCMs in building applications using TRNSYS. *Applied Thermal Engineering* 25, 1796–1807. doi:10.1016/j.applthermaleng.2004.11.001
- Ibáñez, M., Lázaro, A., Zalba, B., Cabeza, L.F., 2005b. An approach to the simulation of PCMs in building applications using TRNSYS. *Applied Thermal Engineering* 25, 1796–1807. doi:10.1016/j.applthermaleng.2004.11.001
- Jokisalo, J., Lamberg, P., Siren, K., 1999. Suitability of building construction materials in short-term energy storage-office room simulations, in: Proceedings of IEA Annex 10-PCMs and Chemical Reactions for Thermal Energy Storage, 3rd Workshop. Finland, pp. 11–18.
- Katsourinis, D., Founti, M., Romero-Sánchez, M.D., López-Buendía, A.M., 2010. On The Computational Modelling of Thermal Energy Storage in Natural Stone Treated With PCMs, in: Paper 12. Presented at the 9th International Conference on Phase Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air – Conditioning, Sofia, Bulgaria.
- Kravvaritis, E.D., Antonopoulos, K.A., Tzivanidis, C., 2010. Improvements to the measurement of the thermal properties of phase change materials. *Meas. Sci. Technol.* 21, 045103. doi:10.1088/0957-0233/21/4/045103
- Kravvaritis, E.D., Antonopoulos, K.A., Tzivanidis, C., 2011. Experimental determination of the effective thermal capacity function and other thermal properties for various phase change materials using the thermal delay method. *Applied Energy* 88, 4459–4469. doi:10.1016/j.apenergy.2011.05.032
- Kuznik, F., Virgone, J., Johannes, K., 2010a. Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of external building walls containing PCM. *Energy and Buildings* 42, 1004–1009. doi:10.1016/j.enbuild.2010.01.012

- Kuznik, F., Virgone, J., Johannes, K., 2010b. Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of external building walls containing PCM. *Energy and Buildings* 42, 1004–1009. doi:10.1016/j.enbuild.2010.01.012
- Mehling, H., Ebert, H.-P., Schossig, P., 2006. Development of standards for materials testing and quality control of PCM. Presented at the 7th IIR Conf. on Phase Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning, Dinan, France.
- Romero-Sánchez, M.D., Guillem-López, C., López-Buendía, A.M., Stamatiadou, M., Mandilaras, I., Katsourinis, D., Founti, M., 2012. Treatment of natural stones with Phase Change Materials: Experiments and computational approaches. *Applied Thermal Engineering* 48, 136–143. doi:10.1016/j.applthermaleng.2012.05.017
- Schranzhofer, H., Puschnig, P., Heinz, A., Streicher, W., 2006. Validation of a TRNSYS simulation model for PCM energy storages and PCM wall construction elements, in: *Ecostock—10th Int. Conf. on Thermal Energy Storage* (Richard Stockton College, NJ).
- Soares, N., Costa, J.J., Gaspar, A.R., Santos, P., 2013. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. *Energy and Buildings* 59, 82–103. doi:10.1016/j.enbuild.2012.12.042
- Stritih, U., 2003. Heat transfer enhancement in latent heat thermal storage system for buildings. *Energy and Buildings* 35, 1097–1104. doi:10.1016/j.enbuild.2003.07.001
- Stritih, U., Novak, P., 1996. Solar heat storage wall for building ventilation. *Renewable Energy* 8, 268–271. doi:10.1016/0960-1481(96)88860-4
- Tabares-Velasco, P.C., Christensen, C., Bianchi, M., 2012. Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies. *Building and Environment* 54, 186–196. doi:10.1016/j.buildenv.2012.02.019
- Thermal energy system specialists LLC -TESS Libraries—individual component libraries., n.d. TYPE 1270, URL: <http://www.trnsys.com/tess-libraries/individual-components.php> .
- Zhang, Y., Lin, K., Zhang, Q., Di, H., 2006. Ideal thermophysical properties for free-cooling (or heating) buildings with constant thermal physical property material. *Energy and Buildings* 38, 1164–1170. doi:10.1016/j.enbuild.2006.01.008
- Zhu, N., Ma, Z., Wang, S., 2009. Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review. *Energy Conversion and Management* 50, 3169–3181. doi:10.1016/j.enconman.2009.08.019





# 5

## Μελέτη Περίπτωσης: Κτήριο ελαφριάς κατασκευής με ΥΑΦ στα δομικά στοιχεία

### Περιεχόμενα 5<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

---

5.	Εισαγωγή	112
5.1.	Μελέτη Περίπτωσης: Οικία ελαφριάς κατασκευής	112
5.2.	Γεωμετρία	113
5.3.	Κατασκευαστικά στοιχεία	113
5.4.	Κλιματικές συνθήκες	119
5.5.	Εσωτερικά φορτία και σχετικές παράμετροι	123
5.6.	Συνθήκες Λειτουργίας	124
5.7.	Βέλτιστο Σενάριο Λειτουργίας	129
5.8.	Επαλήθευση υπολογιστικού εργαλείου στην μελέτη περίπτωσης	129
	Βιβλιογραφία 5 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου	132

---

## 5. Εισαγωγή

---

Η επικύρωση του μοντέλου έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις για την συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης. Σε αυτό το κεφάλαιο, κρίνεται σκόπιμη η επαλήθευση του μοντέλου, στην πιλοτική κατοικία, η οποία θα εξετασθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Ο λόγος είναι ότι η κλίμακα του κτηρίου μεγαλώνει και από μια απλή περίπτωση γεωμετρίας, πλέον εξετάζεται οικία-μεζονέτα, με πολλές θερμικές ζώνες και νέες παραμέτρους, οι οποίες ενδεχομένως επηρεάζουν το μοντέλο προσομοίωσης.

Το κεφάλαιο ξεκινάει με την περιγραφή της εξεταζόμενης περίπτωσης, την ανάλυση της τοιχοποιίας καθώς και των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένη. Ορίζεται το ΥΑΦ, το οποίο χρησιμοποιείται, καθώς και επιπλέον παράγοντες, όπως οι κλιματικές συνθήκες, εσωτερικά θερμικά κέρδη και συνθήκες λειτουργίας, οι οποίοι μεταβάλλουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Όλες οι παράμετροι που αναφέρονται θα χρησιμοποιηθούν για την παραμετρική μελέτη, τα αποτελέσματα της οποίας θα παρουσιασθούν στο §6. Οι παράμετροι έχουν επιλεγεί λόγω σημαντικότητάς τους, ύστερα από σχετική μελέτη της βιβλιογραφίας (Lam et al., 2008, Wan et al., 2011, Yildiz and Arsan, 2011). Τέλος, το μοντέλο επαληθεύεται για την εξεταζόμενη περίπτωση, σε σχέση με πειραματικές μετρήσεις που λαμβάνονται από το κτήριο. Η επαλήθευση γίνεται για την απλή περίπτωση, κατά την οποία το κτήριο δεν κατοικείται.

### 5.1. Μελέτη Περίπτωσης: Οικία ελαφριάς κατασκευής

---

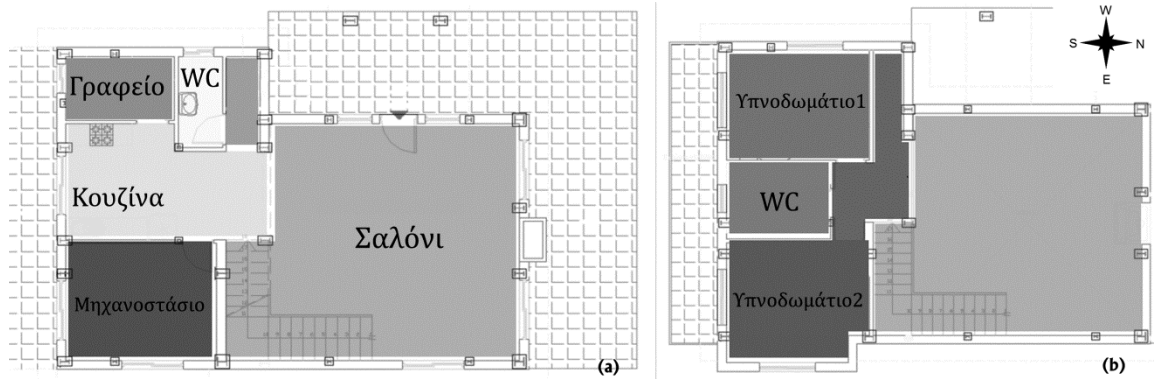
Για την επικύρωση και εφαρμογή του ενοποιημένου μοντέλου, διαλέχθηκε μελέτη περίπτωσης μιας πιλοτικής κατοικίας. Το οίκημα βρίσκεται στην περιοχή Στάνος, στην Αμφιλοχία (βλ. Εικόνα 5.1) και συνδυάζει καινοτόμα στοιχεία (ξηρά δόμηση με ΥΑΦ) με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τεχνολογίες αποθήκευσης. Η θερμική συμπεριφορά του κτηρίου βρίσκεται σήμερα στο στάδιο της συνεχούς παρακολούθησης και αξιολόγησης.



Εικόνα 5.1 Φωτογραφία της πιλοτικής κατοικίας στην Αμφιλοχία

## 5.2. Γεωμετρία

Η πιλοτική κατοικία είναι ένα δώροφο κτήριο, με τυπική ελληνική αρχιτεκτονική (βλ. Εικόνα 5.1). Η συνολική επιφάνειά του κτηρίου είναι 152 m<sup>2</sup>, ενώ οι διαστάσεις του είναι 12,33 m σε πλάτος, 9,90 m σε μήκος και 8,47 m καθ' ύψος. Η θερμαινόμενη επιφάνεια του είναι 128,42 m<sup>2</sup>. Στο ισόγειο βρίσκεται η κουζίνα, το γραφείο, το μηχανοστάσιο, μια μικρή τουαλέτα, ένα βοηθητικό δωμάτιο και τέλος, το κυρίως καθιστικό, ενώ στον πρώτο όροφο, βρίσκονται τα δυο υπνοδωμάτια, τα οποία χωρίζονται από το δωμάτιο του μπάνιου (βλ. Εικόνα 5.2).



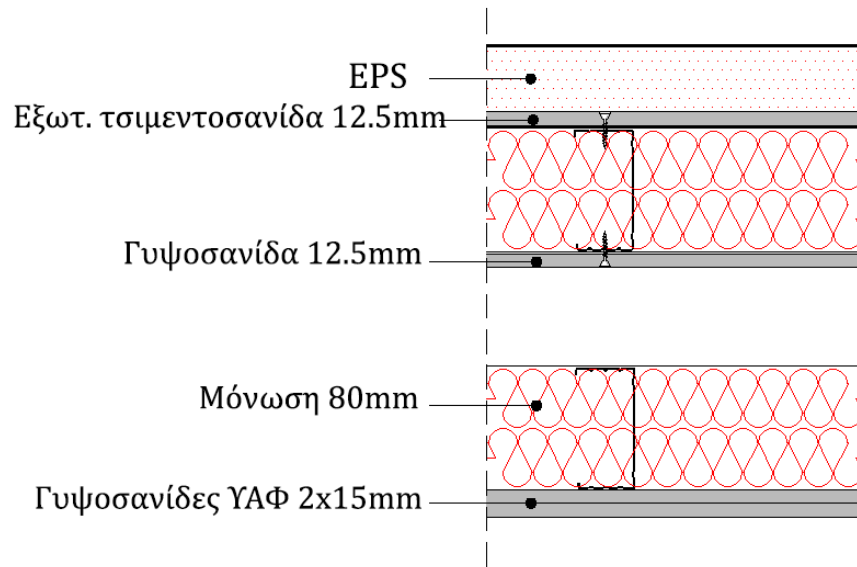
Εικόνα 5.2 Κατόψεις πιλοτικής κατοικίας a) ισόγειο και b) πρώτος όροφος

## 5.3. Κατασκευαστικά στοιχεία

Η κατασκευή φέρει μεταλλικό σκελετό σε συνδυασμό με συστήματα ξηράς δόμησης για την τοιχοποιία, ειδικά σχεδιασμένο να αντέχει σε σεισμικές δονήσεις. Οι γυψοσανίδες τοποθετούνται σε διπλά στρώματα, σύμφωνα με τις απαιτήσεις για θερμομόνωση, ηχομόνωση και αντίσταση στη φωτιά. Οι γυψοσανίδες οι οποίες εμπεριέχουν ΥΑΦ είναι εγκατεστημένες στους εσωτερικούς τοίχους και τα χωρίσματα. Η θερμική συμπεριφορά του κτηρίου συνεχώς παρακολουθείται και αξιολογείται (Mandilaras et al., 2013). Αισθητήρες θερμοκρασίας και ροής θερμότητας έχουν εγκατασταθεί σε διαφορετικές τοποθεσίες εντός και επί των στοιχείων της τοιχοποιίας, το πάτωμα και την οροφή του κάθε δωματίου. Τα δεδομένα των μετρήσεων αποθηκεύονται κάθε 10 λεπτά και μπορούν να συλλεχθούν από απόσταση προς επεξεργασία.

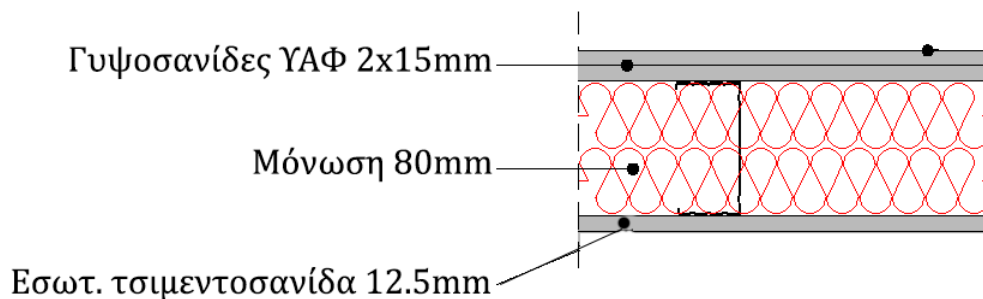
### 5.3.1. Εσωτερικοί και εξωτερικοί τοίχοι

Οι εξωτερικοί τοίχοι του σπιτιού αποτελούνται από πολλά στρώματα και η διαστρωμάτωση τους φαίνεται στην Εικόνα 5.3. Πιο συγκεκριμένα, από το εσωτερικό προς το εξωτερικό, υπάρχουν δύο ενωμένες γυψοσανίδες ΥΑΦ 15 mm, κενό 182,5 mm (αφήνοντας χώρο για το μεταλλικό σκελετό και υδραυλικά), μια γυψοσανίδα 12,5 mm, ένα στρώμα 80 mm πετροβάμβακα, μια τσιμεντοσανίδα εξωτερικής χρήσεως 12,5 mm και μια τελική στρώση 50 mm πολυστερίνης EPS.



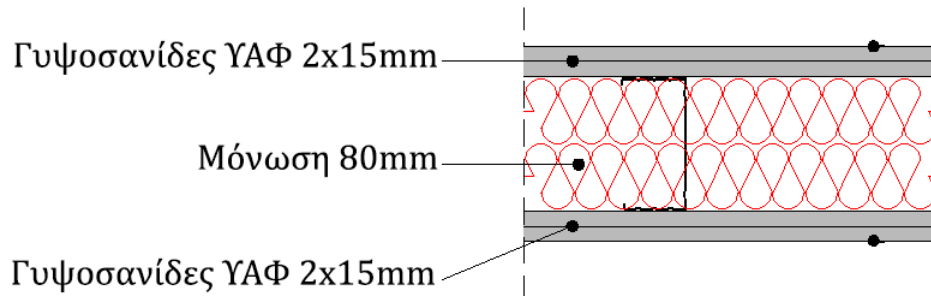
**Εικόνα 5.3 Διαστρωμάτωση εξωτερικής τοιχοποιίας**

Οι εσωτερικοί τοίχοι (χωρίσματα δωματίων) έχουν διαφορετική διαστρωμάτωση, ανάλογα με τις ανάγκες κάθε δωματίου. Ενδεικτικά αναφέρονται τρεις διαφορετικές περιπτώσεις, οι οποίες απαντώνται συχνά. Σε περιπτώσεις όπου το δωμάτιο έχει αυξημένη υγρασία (για παράδειγμα η κουζίνα ή η τουαλέτα), η διαστρωμάτωση του εσωτερικού τοίχου φαίνεται στην Εικόνα 5.4, η οποία αποτελείται από τσιμεντοσανίδα εσωτερικής χρήσεως πάχους 12,5 mm, ένα στρώμα 80 mm πετροβάμβακα και δύο γυψοσανίδες ΥΑΦ 15 mm.

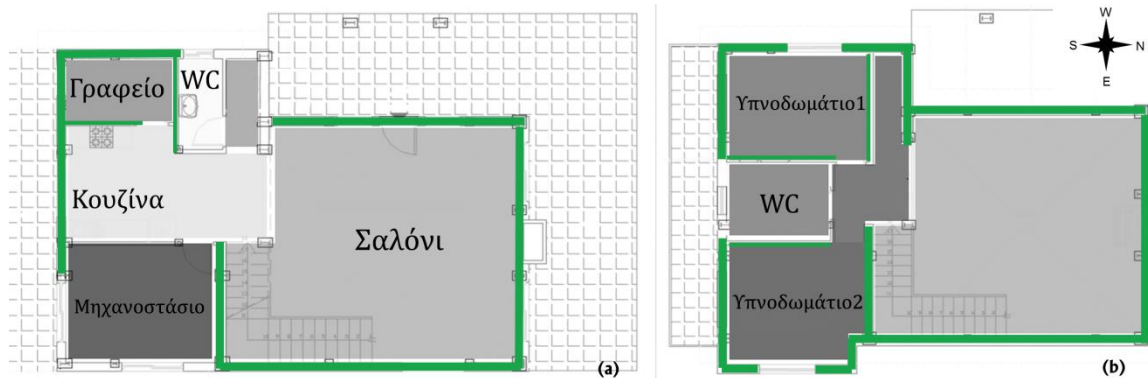


**Εικόνα 5.4 Διαστρωμάτωση εσωτερικής τοιχοποιίας για δωμάτιο με υψηλή υγρασία**

Σε μερικά δωμάτια, κυρίως αυτά που εφάπτονται με το καθιστικό, ο εσωτερικός τοίχος αποτελείται από δύο γυψοσανίδες ΥΑΦ 15 mm, ένα στρώμα 80 mm πετροβάμβακα και δύο γυψοσανίδες ΥΑΦ 15 mm (βλ. Εικόνα 5.5). Οι γυψοσανίδες με το ΥΑΦ τοποθετούνται στους εσωτερικούς τοίχους του σαλονιού, της κουζίνας, του γραφείου και στα δύο υπνοδωμάτια (βλ. Εικόνα 5.6).



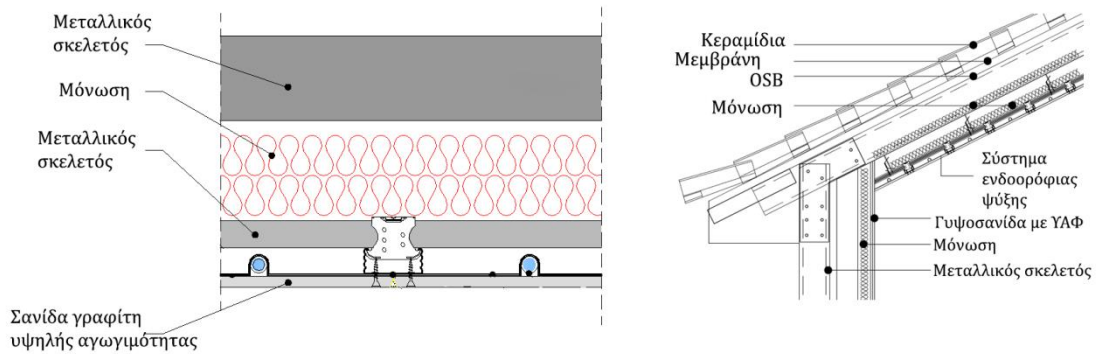
Εικόνα 5.5 Διαστρωμάτωση εσωτερικής τοιχοποιίας με γυψοσανίδες ΥΑΦ



Εικόνα 5.6 Οι εσωτερικοί τοίχοι και τα χωρίσματα με γυψοσανίδες ΥΑΦ

### 5.3.2. Οροφή και πάτωμα

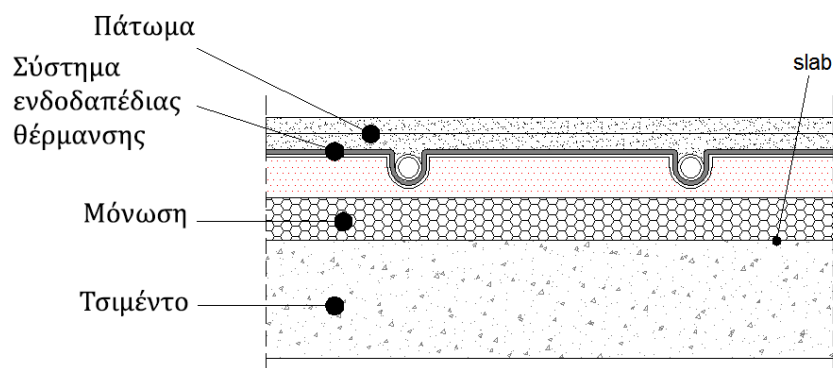
Για την οροφή, χρησιμοποιήθηκαν κόντρα πλακέ, τα οποία έχουν υποστεί ειδική επεξεργασία για την υγρασία, τα οποία καλύπτονται με μεμβράνη και στη συνέχεια με πήλινα κεραμίδια. Μεταξύ των υπάρχει ένα παχύ στρώμα πετροβάμβακα 100 mm. Στο τμήμα πάνω από το καθιστικό, ένα δεύτερο στρώμα από πετροβάμβακα, ίδιου πάχους, τοποθετείται, το οποίο καλύπτει όλη την οροφή, ενώ στο τμήμα της σοφίτας, το δεύτερο στρώμα του πετροβάμβακα τοποθετείται οριζόντια. Η γωνία της οροφής είναι 26°. Το τελευταίο στρώμα, πάνω από τον πετροβάμβακα, τοποθετείται σανίδα γραφίτη, υψηλής αγωγιμότητας (βλ. Εικόνα 5.7).



**Εικόνα 5.7 Διαστρωμάτωση της οροφής στο καθιστικό**

Το δάπεδο του κτηρίου, το οποίο βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος, είναι κατασκευασμένο από 350 χιλιοστά οπλισμένο σκυρόδεμα και δύο στρώματα από διογκωμένη πολυστερίνη 2 mm και 25 mm πάχος, αντίστοιχα, όπως απαιτείται από τις προδιαγραφές της ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Η εσωτερική πλευρά του δαπέδου αποτελείται από δύο στρώματα γυψοσανίδων υψηλής αντοχής με συνολικό πάχος 20 mm (βλ. Εικόνα 5.8), τα οποία αργότερα μπορούν να καλυφθούν με πλακάκια.

Στον πρώτο όροφο, το πάτωμα συνορεύει με την οροφή των χώρων που βρίσκονται στο ισόγειο. Η διαστρωμάτωση από την πλευρά του πατώματος ξεκινά με δύο στρώματα γυψοσανίδων υψηλής αντοχής, συνολικού πάχους 20 mm, που ακολουθείται από το στρώμα μόνωσης 25 mm πολυστυρενίου, που απαιτούνται για την ενδοδαπέδια θέρμανση, κενό 250 mm, ένα στρώμα 100 πετροβάμβακα mm και ένα στρώμα 10 mm σανίδας γραφίτη, υψηλής αγωγιμότητας.



**Εικόνα 5.8 Διαστρωμάτωση πατώματος που εφάπτεται με το έδαφος**

### 5.3.3. Θερμο-φυσικές ιδιότητες υλικών τοιχοποιίας

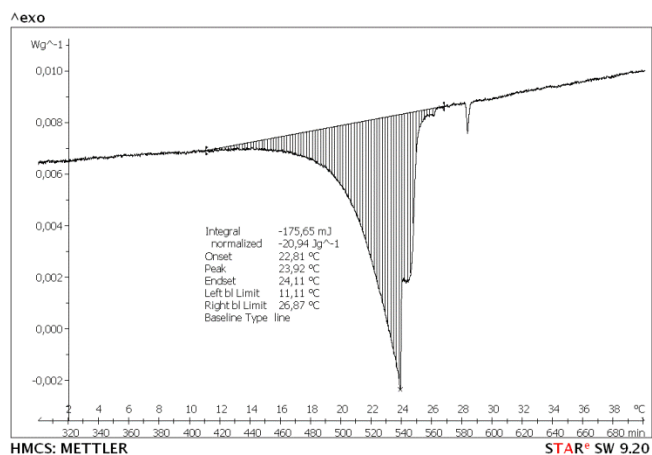
Τα δομικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στην πιλοτική κατοικία είτε πρόκειται για εμπορικά προϊόντα, των οποίων οι θερμο-φυσικές ιδιότητες είναι γνωστές, είτε για στοιχεία των οποίων οι ιδιότητες έχουν μετρηθεί στο εργαστήριο των Ετερογενών

Μιγμάτων και συστημάτων Καύσης, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Υλικά για τα οποία δεν υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες, για την θερμική τους προσομοίωση στο μοντέλο, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε 20701-2/2010. Στον Πίνακα 5.1, παρατίθενται όλα τα δομικά στοιχεία και οι ιδιότητες τους.

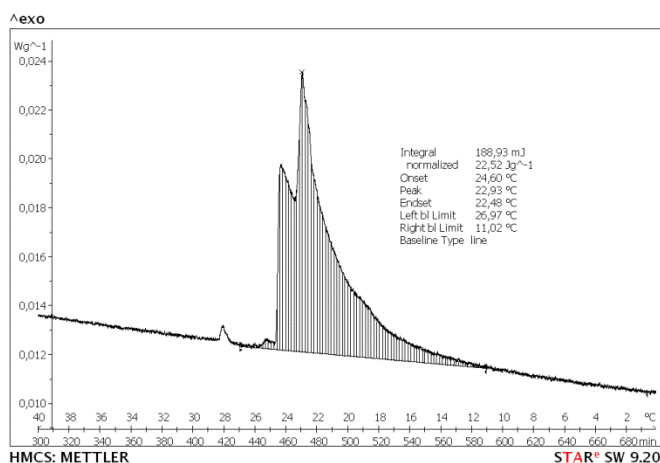
**Πίνακας 5.1 Θερμοφυσικές ιδιότητες στρωμάτων τοιχοποιίας**

Στρώματα τοιχοποιίας		Πάχος (d)	Πυκνότητα (ρ)	Θερμική Αγωγιμότητα (λ)	Θερμοχωρητικότητα (Cp)
		mm	kg/m <sup>3</sup>	W/(mK)	kJ/(kgK)
1	Πολυστερίνη EPS	50	15	0.039	1.21
2	Τσιμεντοσανίδα	12.5	1280	0.35	0.879
3	Πετροβάμβακας	80	50	0.035	0.9
4	Γυψοσανίδα	12.5	712	0.21	0.96
5	Γυψοσανίδα ΥΑΦ	15	787	0.27	Βλ. Εικόνα 5.9
6	Γυψοσανίδα με γραφίτη	15	1027	0.30	0.88

Η φαινόμενη καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας της γυψοσανίδας που εμπεριέχει ΥΑΦ έχει παραχθεί από μετρήσεις θερμιδομετρίας διαφορικής σάρωσης (DSC) για την τήξη (θέρμανση) και πήξη (ψύξη) της διαδικασίας. Η Εικόνα 5.9 δείχνει την προσδιορισθείσα πειραματική καμπύλη για τις δυο προαναφερθείσες διαδικασίες. Τα πειράματα έχουν διεξαχθεί με ρυθμό θέρμανσης 0,1 °C / min. Ο συγκεκριμένος ρυθμός θέρμανσης είναι αντιπροσωπευτικός για δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε κτηριακές εφαρμογές, παρέχοντας αξιόπιστα αποτελέσματα. Μια πιο λεπτομερή περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας προσδιορισμού της καμπύλης δίνεται στην βιβλιογραφία [Mandilaras et al., 2013]. Για την περίπτωση που μελετάται, ο συνδυασμός των δυο καμπύλων, δίνει μια σταθμισμένη λύση για τις τιμές της ειδικής θερμοχωρητικότητας που θα χρησιμοποιηθούν στις προσομοιώσεις.



(α)



(β)

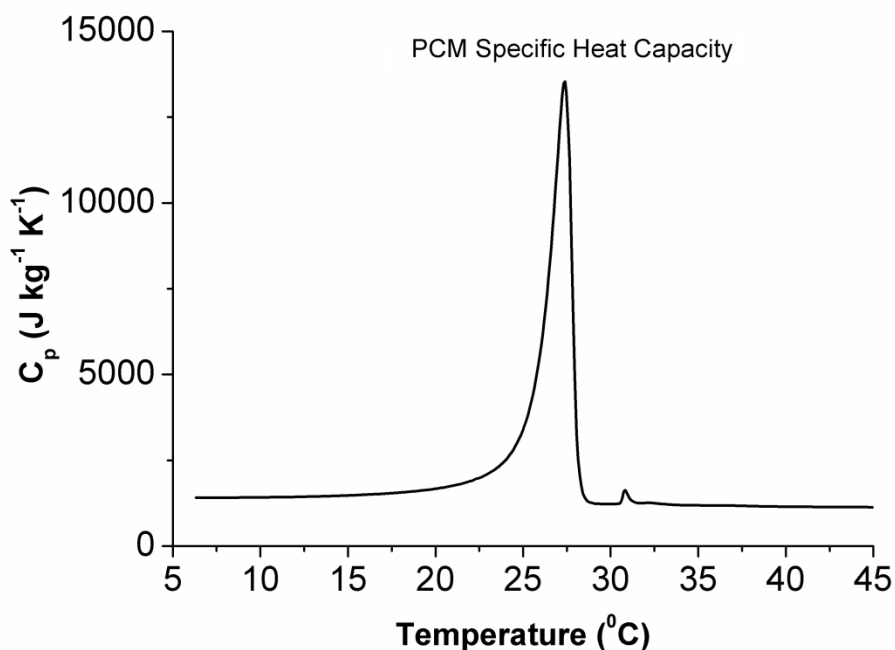
Εικόνα 5.9 Προσδιορισθείσα πειραματική καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας της γυψοσανίδας κατά (α) την θέρμανση και (β) την ψύξη (Mandilaras et al., 2013)

#### 5.3.4. Παραμετρική μελέτη

Η θερμοκρασία αλλαγής φάσης των γυψοσανίδων με ΥΑΦ, οι οποίες έχουν εγκατασταθεί στην πιλοτική κατοικία, όπως προαναφέρθηκε, είναι στους 24 °C. Μια παραμετρική μελέτη με διαφορετικό εύρος θερμοκρασιών αλλαγής φάσης του ΥΑΦ, θα αναδείξει την πιθανότητα μεγαλύτερης εξοικονόμησης ενέργειας. Η περίπτωση, η οποία θα μελετηθεί, αφορά γυψοσανίδες με θερμοκρασία αλλαγής φάσης στους 26 °C.

Η προσομοίωση της γυψοσανίδας με ΥΑΦ στους 26 °C γίνεται με τον ίδιο τρόπο, όπως στο βασικό σενάριο. Η καμπύλη της ειδικής θερμοχωρητικότητας των γυψοσανίδων, έχουν προσδιορισθεί πειραματικά με μετρήσεις θερμοδομετρίας διαφορικής σάρωσης (DSC) και η Εικόνα 5.10, παρουσιάζει την πειραματική καμπύλη.



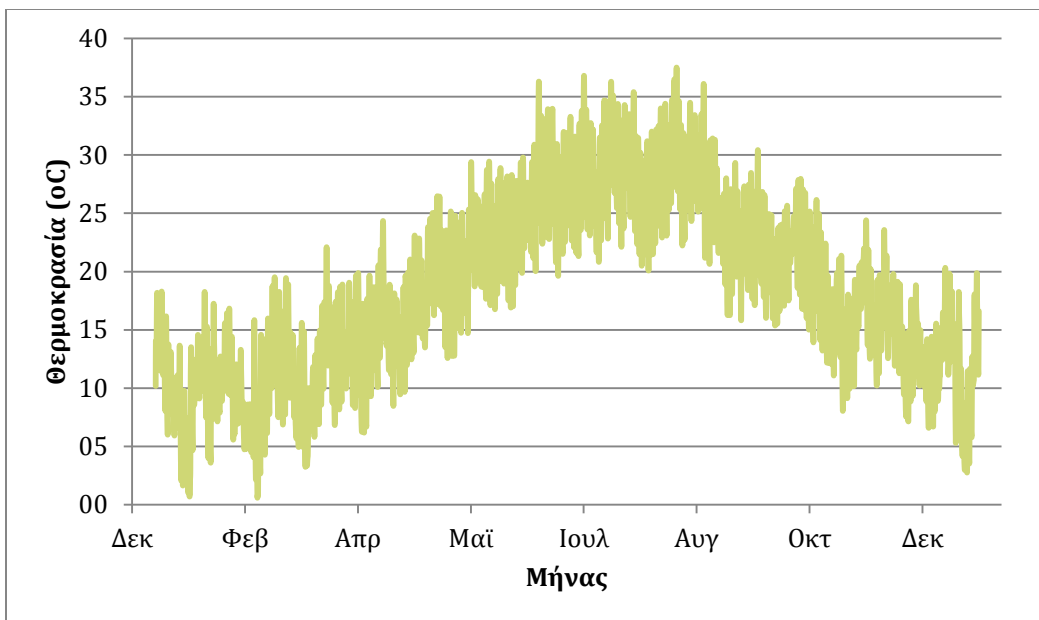


Εικόνα 5.10 Προσδιορισθείσα πειραματική καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας της γυψοσανίδας με αλλαγή φάση στους 26 οC

#### 5.4. Κλιματικές συνθήκες

Για την εξάλειψη ενδεχόμενων ανακολουθιών σε πραγματικά δεδομένα καιρού, το αρχείο αναφοράς για τις καιρικές συνθήκες, το οποίο χρησιμοποιείται τόσο στο βασικό σενάριο όσο και στις υπόλοιπες προσομοιώσεις, δημιουργήθηκε με τη χρήση του λογισμικού Meteororm 6.1, το οποίο χρησιμοποιεί στοιχεία από κοντινούς μετεωρολογικούς σταθμούς, μαζί με άλλους συντελεστές διόρθωσης (έδαφος, τοποθεσία, κλπ) και τα παρεμβάλλει ώστε να δημιουργηθεί ένα αρχείο καιρού για τη συγκεκριμένη θέση. Για το συγκεκριμένο αρχείο, έχουν χρησιμοποιηθεί δεδομένα από ετήσιες μετρήσεις κατά τη διάρκεια της περιόδου 1996-2005, για την περιοχή που βρίσκεται η πιλοτική οικία.

Η ετήσια καμπύλη θερμοκρασιών του περιβάλλοντος παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.11. Ο μήνας με την υψηλότερη μέση θερμοκρασία είναι ο Αύγουστος ( $25,69^{\circ}\text{C}$ ), ενώ η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας είναι  $34,41^{\circ}\text{C}$  για τον Ιούλιο. Ψυχρότερος μήνας του έτους είναι ο Μάρτιος, όταν η μέση θερμοκρασία είναι  $9,69^{\circ}\text{C}$ . Η ελάχιστη θερμοκρασία του έτους είναι  $1,83^{\circ}\text{C}$ , που παρατηρείται τον Φεβρουάριο.



Εικόνα 5.11 Ετήσια διακύμανση της θερμοκρασίας για την περιοχή Στάνος στην Αμφιλοχία

#### 5.4.1. Παραμετρική μελέτη

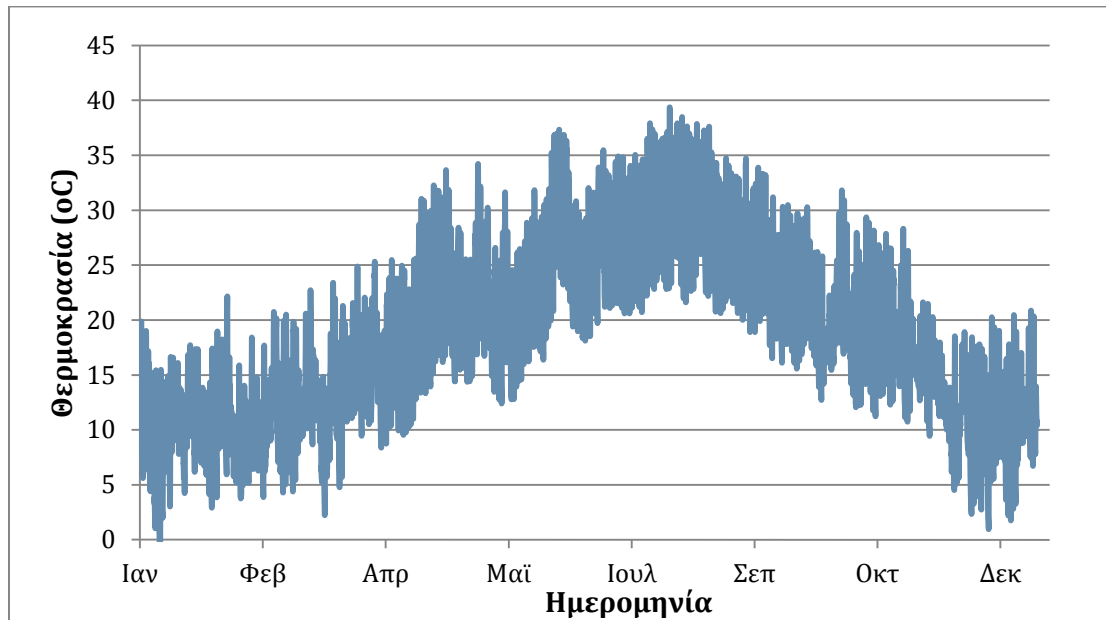
Χρησιμοποιώντας διαφορετικά αρχεία καιρού, ή χρησιμοποιώντας δεδομένα από μετρήσεις on-site, τα αποτελέσματα αλλάζουν και αναδεικνύεται η ανάγκη σωστής επιλογής των ιδιοτήτων του ΥΑΦ για τη συγκεκριμένη κλιματική ζώνη [Lam et al., 2008, Wan et al., 2011, Yildiz and Arsan, 2011]. Επίσης, κατά τη φάση του σχεδιασμού είθισται να χρησιμοποιούνται αρχεία καιρού από τις βιβλιοθήκες των εμπορικών πακέτων. Αποδεικνύεται, όμως, ότι τα δεδομένα αυτά διαφέρουν σημαντικά από τις πραγματικές συνθήκες, οδηγώντας σε διαφορετικές ενεργειακές απαιτήσεις.

Τέλος, γίνεται και ενεργειακή μελέτη στην περίπτωση κατά την οποία η πιλοτική κατοικία βρισκόταν στην Αθήνα και όχι στην Αμφιλοχία. Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιείται αρχείο καιρού από το λογισμικό, δίνοντας μια αίσθηση πως θα μεταβάλλονταν οι ενεργειακές απαιτήσεις της οικίας για ψύξη, σε διαφορετική κλιματική ζώνη.

#### **Αρχείο καιρού από μετρήσεις για την Αμφιλοχία**

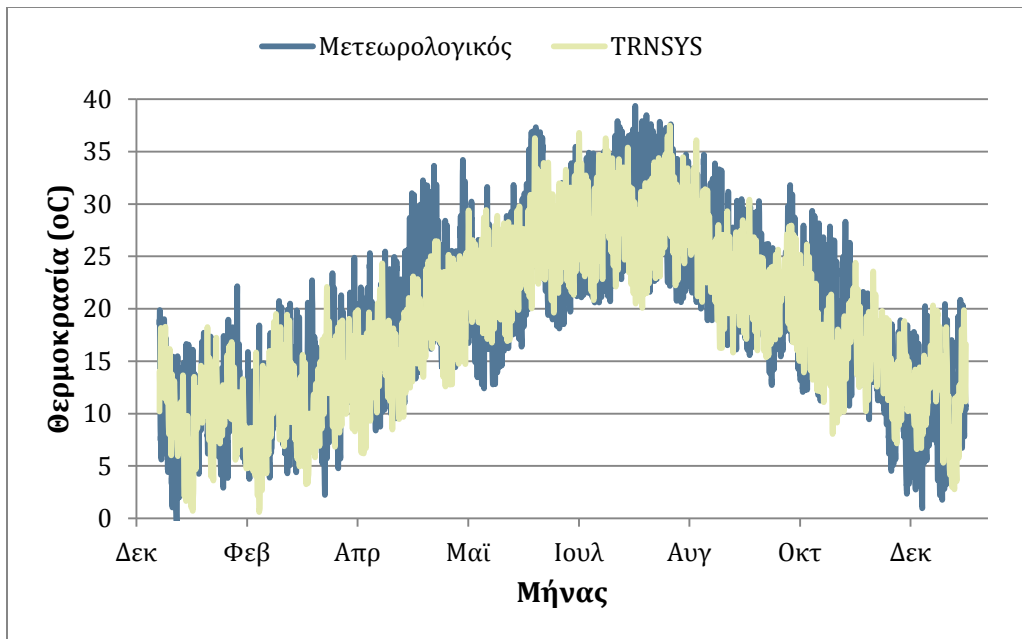
Στην πιλοτική κατοικία στην Αμφιλοχία, έχει εγκατασταθεί compact μετεωρολογικός σταθμός, ο οποίος καταγράφει κλιματικά δεδομένα (θερμοκρασία, υγρασία, ακτινοβολία κ.α) ανά 10 λεπτά. Τα δεδομένα αυτά, με τη μορφή πίνακα, εισάγονται ως αρχεία καιρού στο μοντέλο, με σκοπό την ενεργειακή ανάλυση της οικίας κάτω από πραγματικές συνθήκες. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η εξέταση των εν λόγω μετρήσεων γίνεται περισσότερο για λόγους πληρότητας και περιέργειας, καθώς είναι επιθυμητό τα αρχεία καιρού να προέρχονται από στατιστική επεξεργασία πολλών ετών. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις των κλιματικών συνθηκών στον μετεωρολογικό σταθμό,

είναι ενδεικτικά και περιορίζονται μόνο σε αυτήν την παράγραφο. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται τα αρχεία καιρού της Meteogram.



Εικόνα 5.12 Ετήσια διακύμανση εξωτερικής θερμοκρασίας για την Αμφιλοχία, τιμές μετρήσεων από μετεωρολογικό σταθμό

Εξετάζοντας τα δυο αρχεία καιρού (από το μετεωρολογικό σταθμό και από το λογισμικό Meteogram), παρατηρούνται σημαντικές διαφορές (βλ. Εικόνα 5.13). Για το αρχείο του λογισμικού Meteogram, ο μήνας με την υψηλότερη μέση θερμοκρασία είναι ο Ιούλιος (28,6 °C), ενώ η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας είναι 37,5 °C για τον Αύγουστο. Ψυχρότερος μήνας του έτους είναι ο Γενάρης, όταν η μέση θερμοκρασία είναι 9,89 °C. Η ελάχιστη θερμοκρασία του έτους είναι 0,6 °C, που παρατηρείται τον Φεβρουάριο. Αντίστοιχα, οι τιμές αυτές για το έτος 2013 είναι: ο μήνας με την υψηλότερη μέση θερμοκρασία είναι ο Αύγουστος (28,9 °C), ενώ η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας είναι 39,4 °C πάλι για τον Αύγουστο. Ψυχρότερος μήνας του έτους είναι ο Ιανουάριος, όταν η μέση θερμοκρασία είναι 9,5 °C. Η ελάχιστη θερμοκρασία του έτους είναι -1,4 °C που παρατηρείται τον Γενάρη.

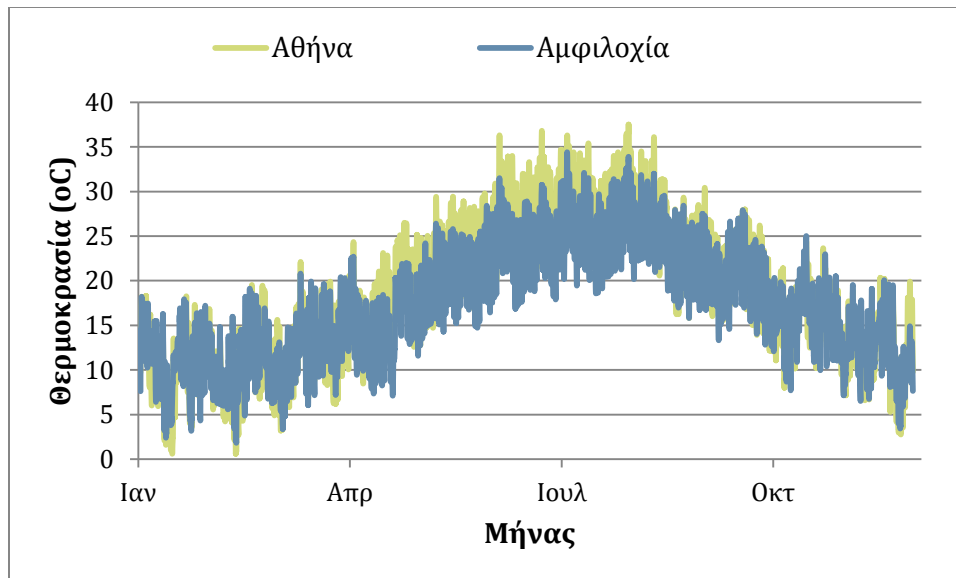


Εικόνα 5.13 Σύγκριση διακύμανσης εξωτερικής θερμοκρασίας για την Αμφιλοχία, από τα δυο διαθέσιμα αρχεία

### *Αρχείο καιρού για την Αθήνα*

Τέλος, για την καλύτερη εμβάθυνση στη σχέση μεταξύ θερμοκρασίας αλλαγής φάσης του επιλεγμένου ΥΑΦ και την τοποθεσία της κατοικίας, διεξάγεται παραμετρική μελέτη στην περίπτωση κατά την οποία η πιλοτική κατοικία βρίσκεται στην περιοχή της Αττικής. Σύμφωνα με την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010, η περιοχή της Αμφιλοχίας ανήκει στην κλιματική ζώνη 3 της Ελλάδας. Επιλέγεται η μελέτη πόλης, η οποία ανήκει στην κλιματική ζώνη 1 της Ελλάδας και δη η Αθήνα.

Για το αρχείο καιρού της Αθήνας χρησιμοποιείται το αρχείο της Meteonorm, το οποίο περιέχεται μέσα στο λογισμικό του TRNSYS. Στην Εικόνα 5.14 παρουσιάζεται το αρχείο καιρού της πόλης των Αθηνών σε σχέση με το αρχείο καιρού της Αμφιλοχίας.



Εικόνα 5.14 Ετήσια διακύμανση εξωτερικής θερμοκρασίας για την Αθήνα, τιμές από αρχείο TRNSYS

## 5.5. Εσωτερικά φορτία και σχετικές παράμετροι

Όσο πιο ενεργειακά αποδοτικό είναι ένα κτήριο, τόσο μεγαλύτερη είναι η επιρροή των εσωτερικών θερμικών κερδών, αλλά και των παραμέτρων που τα επηρεάζουν, στην κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση/ψύξη του κτηρίου (de Meester et al., 2013). Η προσομοίωση του κτηρίου είναι πολύ-ζωνική, επομένως σε κάθε θερμική ζώνη μπορούν να ορισθούν διαφορετικά θερμικά κέρδη, ανάλογα με τη στιγμή της ημέρας και τα σενάρια λειτουργίας.

### 5.5.1. Υγρασία

Η σχετική υγρασία των εσωτερικών χώρων καθώς και ο αερισμός του χώρου (η ανανέωση του αέρα, δηλαδή η αντικατάσταση μέρους του εσωτερικού αέρα από νωπό αέρα περιβάλλοντος), συμβάλλουν στην εξασφάλιση των συνθηκών υγιεινής στο εσωτερικό κάθε κτηρίου αλλά και κάθε ανεξάρτητου τμήματος του κτηρίου.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 2.2 από την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010, η σχετική υγρασία των εσωτερικών χώρων ορίζεται για μονοκατοικία σε 40% κατά τη χειμερινή περίοδο και 50% για την θερινή περίοδο. Αυτές οι τιμές χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις για κάθε θερμική ζώνη. Για να αναδειχθεί πόσο μεταβάλλει τα φορτία η σχετική υγρασία, και δη τους καλοκαιρινούς μήνες οπότε η λανθάνουσα θερμότητα είναι σημαντική σε ένα χώρο, κρίνεται αναγκαία η μελέτη κατά την οποία η σχετική υγρασία μεταβάλλεται για κάθε θερμική ζώνη.

Στο λογισμικό του TRNSYS, για κάθε θερμική ζώνη ξεχωριστά, μπορεί να εισαχθεί η τιμή της υγρασίας ως ποσοστό είτε μέσω τιμών μέτρησης, είτε μέσω υπολογισμού. Η προεπιλεγμένη τιμή ορίζεται ως μονάδα, επειδή αυτή η τιμή αντιπροσωπεύει μόνο την

υγρασία του αέρα, ενώ η διακύμανσή της επιτρέπει τιμές από 1-10. Οι τιμές αυτές εξαρτώνται από στοιχεία όπως η ποιότητα της επιφανείας των τοιχωμάτων, είτε έχει να κάνει με το δομικό υλικό είτε με επικάλυψη του, π.χ. χρώμα.

Για τον υπολογισμό του ποσοστού υγρασίας σε κάθε θερμική ζώνη, χρησιμοποιείται η εξίσωση:

$$W = \frac{MassOfWaterVapor}{MassOfDryAir} \quad (5.127)$$

η οποία στην περίπτωση όπου λαμβάνεται υπόψη και η τοιχοποιία, γίνεται:

$$W = \frac{m_{water_{air}} + m_{water_{wall}}}{m_{water_{air}}} \quad (5.2)$$

Στο παράρτημα Β, δίνεται αναλυτικώς ο υπολογισμός του ποσοστού υγρασίας για κάθε θερμική ζώνη. Οι τιμές που προκύπτουν, λαμβάνονται στην παραμετρική μελέτη της υγρασίας, όταν αυτή δεν θεωρείται σταθερή (και ίση με τη μονάδα).

Οι τιμές οι οποίες μελετήθηκαν για τις προσομοιώσεις, ξεκινάνε από την τιμή 1 και αυξάνουν βηματικά κατά 0,5. Μετά λαμβάνονται και οι τιμές όπως έχουν υπολογισθεί βάσει της Εξίσωσης 5.2. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αξιολογούνται και τα πιο σημαντικά παρουσιάζονται στο §6, ενώ τα υπόλοιπα παρατίθενται στο Παράρτημα Γ.

### 5.5.2. Θερμικά κέρδη από ανθρώπους και συσκευές

Τα ακόλουθα θερμικά κέρδη έχουν υιοθετηθεί στις προσομοιώσεις.

- Άνθρωποι: 80 W ανά άτομο (ο αριθμός των ατόμων κυμαίνεται από 0 έως 4 ανάλογα με το σενάριο λειτουργίας)
- Υπολογιστής: 70 W / ημέρα
- Φωτισμός: 3,6 W/m<sup>2</sup>

Τα συνολικά θερμικά κέρδη που χρησιμοποιούνται σε κάθε θερμική προσομοίωση εξαρτώνται με το επιλεγμένο σενάριο λειτουργίας και ως εκ τούτου γίνονται συνδυασμοί των παραπάνω παραμέτρων. Οι τιμές που αναφέρονται παραπάνω, έχουν ληφθεί από την T.O.T.E.E. 20701-1/2010.

### 5.6. Συνθήκες Λειτουργίας

Οι πραγματικές συνθήκες λειτουργίας ενός κτηρίου μπορεί να διαφέρουν κατά περίπτωση, ανάλογα τη χρήση και τους χρήστες του κτηρίου. Η εξοικονόμηση ενέργειας, ειδικότερα σε μια οικία είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη συμπεριφορά των κατοίκων της. Ο αριθμός και το είδος της οικογένειας (π.χ. νέο ζευγάρι, τετραμελής οικογένεια, ηλικιωμένοι άνθρωποι) επηρεάζει τις ενεργειακές απαιτήσεις καθώς αυξάνονται ή μειώνονται τα φορτία. Ως γνωστόν, τα εσωτερικά κέρδη έχουν μεγαλύτερη επίδραση στην ενεργειακή κατανάλωση όσο πιο ενεργειακά αποδοτικό είναι το κτήριο (de Meester et al.,

2013). Επιπλέον, ο χρόνος παραμονής μέσα στην οικία (π.χ. εργαζόμενοι ή συνταξιούχοι) καθώς και η ηλικία των ενοίκων αυξομειώνουν τις ανάγκες για θέρμανση ή ψύξη.

Στην παραμετρική μελέτη, ανάμεσα στις περιπτώσεις που θα μελετηθούν, λαμβάνονται επίσης υπόψη και τα διαφορετικά είδη οικογενειών και πως αυτά μεταβάλουν τις απαιτήσεις για ψύξη: για παράδειγμα, διαφορετικές ώρες (κυρίως βραδυνές) χρειάζεται κλιματισμό ένα εργαζόμενο ζευγάρι, το οποίο κατά τη διάρκεια της ημέρας λείπει από την οικία και διαφορετικές ώρες ένα ζευγάρι συνταξιούχων, το οποίο ενδεχομένως βρίσκεται όλη μέρα στην οικία και χρειάζεται κλιματισμό τα μεσημέρια του καλοκαιριού, οπότε η ζέστη είναι μεγαλύτερη. Η ρύθμιση του θερμοστάτη ορίζεται με βάση τον ΚΕΝΑΚ, αν και στην πραγματικότητα μπορεί να υπάρχουν αποκλίσεις: ο Thomsen μελέτησε οχτώ χαμηλής κατανάλωσης Ευρωπαϊκά σπίτια μέσω μετρήσεων και προσομοιώσεων, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου κατά τη χειμερινή περίοδο, όταν αυτή επιλέγεται από τους ενοίκους είναι 2-3 °C υψηλότερη από την ιδανική θερμοκρασία όπως ορίζεται σύμφωνα με τις Εθνικές Ενεργειακές Οδηγίες (20 °C) (Thomsen et al., 2005).

Για τον υπολογισμό των ψυκτικών απαιτήσεων της πιλοτικής οικίας, ορίζονται ως θερινή περίοδος οι μήνες Μάιος-Οκτώβριος. Η ψύξη του χώρου μπορεί να γίνει είτε με φυσικό αερισμό (άνοιγμα παραθύρων) είτε με μηχανικό αερισμό (κλιματισμό). Κατά ΚΕΝΑΚ, η θερμοκρασία των ψυκτικών συστημάτων για τη θερινή περίοδο ορίζεται στους 26 °C. Αυτή η τιμή θα χρησιμοποιηθεί και στις περαιτέρω προσομοιώσεις, όταν αναφερόμαστε σε κλιματισμό. Οι ειδικές συνθήκες λειτουργίας των επί μέρους χώρων ενός κτηρίου (WC, διαδρόμων, αποθηκών, κ.ά.) λαμβάνονται υπόψη μόνο κατά το σχεδιασμό του κτηρίου ή κατά το σχεδιασμό της θερμικής ζώνης, όμως, κατά την παρούσα μελέτη λαμβάνεται υπόψη μια ενιαία τιμή για κάθε παράμετρο (θερμοκρασία, σχετική υγρασία κ.ά.), όπως αυτή λαμβάνεται από την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010.

Για τον υπολογισμό του αερισμού του κτηρίου λαμβάνεται υπόψη ξεχωριστά ο αερισμός από τις διαφυγές αέρα λόγω αεροστεγανότητας του κτηρίου (διείσδυση αέρα από χαραμάδες κουφωμάτων κ.ά.), από τη χρήση φυσικού αερισμού για την επίτευξη άνετων και υγιεινών συνθηκών διαβίωσης και από τη χρήση μηχανικού αερισμού στην περίπτωση που υπάρχει ανάλογη διάταξη.

#### 5.6.1. Διαφυγές λόγω αεροστεγανότητας

---

Οι διαφυγές αέρα λόγω αεροστεγανότητας υπολογίζονται με τη χρήση τιμών αεροστεγανότητας, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη μόνον τον αερισμό λόγω της ύπαρξης των χαραμάδων στα κουφώματα (άδηλες απώλειες). Ο φυσικός και ο μηχανικός αερισμός πραγματοποιούνται με την ανανέωση του εσωτερικού αέρα από νωπό αέρα περιβάλλοντος, για την επίτευξη αποδεκτών συνθηκών υγιεινής και άνεσης [Stamatiadou et al., 2013]. Τα απαιτούμενα επίπεδα νωπού αέρα ορίζονται ανάλογα με την κατηγορία και τη χρήση του κτηρίου. Οι τιμές για τα δύο είδη αερισμού λαμβάνονται ξεχωριστά, δεδομένου ότι η διείσδυση του αέρα έχει συνεχή λειτουργία, ενώ ο αερισμός για την

επίτευξη αποδεκτών συνθηκών ποιότητας αέρα πραγματοποιείται μόνο κατά τις ώρες λειτουργίας του κτηρίου.

Οι διαφυγές αέρα εφαρμόζονται μόνο στις κατοικίες, και μέσω της χρήσης των υφιστάμενων κουφωμάτων και καταγράφεται σε  $m^3/s$ . Με βάση τον ΚΕΝΑΚ, θεωρήθηκε ότι ο συνολικός αερισμός των χώρων (φυσικός αερισμός και διείσδυση) υπολογίζεται βάσει του όγκου του χώρου και όχι των ανοιγμάτων που διαθέτει. Επομένως, η τιμή της παροχής αέρα ανά όγκο χώρου λαμβάνεται ίση με  $0,5 m^3/h/m^3$  από τον πίνακα 3.27. της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO 13789 Ε2:2009, θεωρώντας ότι υπάρχουν κουφώματα σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα, με επαρκή αεροστεγανότητα.

Οι τιμές οι οποίες μελετήθηκαν για τις προσομοιώσεις, ξεκινάνε από την τιμή  $0,5 m^3/h/m^3$  και αυξάνουν βηματικά κατά 0,25. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αξιολογούνται και τα πιο σημαντικά παρουσιάζονται στο §6, ενώ τα υπόλοιπα παρατίθενται στο Παράρτημα Γ.

### 5.6.2. Φυσικός αερισμός

---

Ο φυσικός αερισμός είναι χρήσιμος ιδιαίτερα τις βραδυνές ώρες, καθώς κάποια χρονική περίοδο του έτους βοηθά στην τήξη του ΥΑΦ και τη σωστή λειτουργία του την επόμενη ημέρα. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνονται τα φορτία ψύξης για τη συγκεκριμένη περίοδο. Τα προφίλ λειτουργίας της οικίας ελήφθησαν από τη βιβλιογραφία, με μικρές αλλαγές λόγω περιοχής.

Για την παραμετρική μελέτη του φυσικού αερισμού, εξετάστηκαν οι εξής περιπτώσεις:

- ΦΑ1: Καθημερινός βραδυνός αερισμός (20.00-8.00) την περίοδο Μάιος-Οκτώβριος, στα υπνοδωμάτια (MBDR-BDR) και στο καθιστικό (LVR)
- ΦΑ2: Καθημερινός βραδυνός αερισμός (20.00-8.00) την περίοδο Μάιος-Οκτώβριος, στα υπνοδωμάτια (MBDR-BDR)
- ΦΑ3: Καθημερινός διαλλειματικός αερισμός (8.00-10.00 & 20.00-00.00), την περίοδο Μάιος-Οκτώβριος, στα υπνοδωμάτια (MBDR-BDR) και στο καθιστικό (LVR)

### 5.6.3. Κλιματισμός

---

Ο φυσικός αερισμός, ειδικά στις Μεσογειακές χώρες, δεν επαρκεί κατά τη θερινή περίοδο για την επίτευξη συνθηκών άνεσης μέσα στα κτήρια. Επομένως, είναι απαραίτητη η χρήση συστήματος ψύξης, για κάποιες ώρες της ημέρας. Η χρήση κλιματισμού στις κατοικίες εξαρτάται από τους ενοίκους σε μεγάλο βαθμό. Άνθρωποι που εργάζονται ενδεχομένως θα τη χρησιμοποιούν τις βραδυνές ώρες, ενώ συνταξιούχοι θα ψύχουν την οικία όλη την ημέρα. Συνεπώς, τα σενάρια κλιματισμού της οικίας εξαρτώνται από την συμπεριφορά των χρηστών και πρέπει να ληφθούν υπόψη όλες οι περιπτώσεις. Στην παρούσα διατριβή, οι περιπτώσεις που εξετάζονται είναι οι εξής:



- ΚΛ1: Συνεχόμενη αδιάλειπτη χρήση, με ρύθμιση στους 26 °C, την περίοδο Μάιος-Οκτώβριος, στα υπνοδωμάτια (MBDR-BDR) και στο καθιστικό (LVR)
- ΚΛ2: Ημερήσια ψύξη (12.00-16.00), με ρύθμιση στους 26 °C, την περίοδο Μάιος-Οκτώβριος, στα υπνοδωμάτια (MBDR-BDR) και στο καθιστικό (LVR)
- ΚΛ3: Απογευματινή ψύξη (20.00-21.00), με ρύθμιση στους 26 °C, την περίοδο Μάιος-Οκτώβριος, στα υπνοδωμάτια (MBDR-BDR) και στο καθιστικό (LVR)

#### 5.6.4. Συνδυασμός φυσικού και μηχανικού αερισμού

---

Στην πραγματικότητα, ο συνδυασμός των παραπάνω περιπτώσεων περιγράφει ρεαλιστικότερα τη χρήση σε μία κατοικία. Ο φυσικός αερισμός των σπιτιών, ειδικά τις πρωινές και βραδυνές ώρες, συνδυάζονται με τη χρήση κλιματισμού, κυρίως τις μεσημεριανές. Από την άλλη, η ψύξη όλων ή μερικών δωματίων της οικίας είναι υποκειμενική και επαφίεται στις ανάγκες των ενοίκων και τη χρήση των δωματίων από αυτούς τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Συνεπώς, τα σενάρια που περιγράφονται παρακάτω, είναι αυτά που προσεγγίζουν τη πραγματική συμπεριφορά των ενοίκων μιας οικίας.

- Σ1: Ημερήσια ψύξη (12.00-20.00) με ρύθμιση στους 26 °C, και βραδυνό φυσικό αερισμό (20.00-8.00) την περίοδο Μάιος-Οκτώβριος, στα υπνοδωμάτια (MBDR-BDR) και στο καθιστικό (LVR)
- Σ2: Ημερήσια ψύξη (12.00-20.00) με ρύθμιση στους 26 °C, και βραδυνό φυσικό αερισμό (20.00-8.00) την περίοδο Μάιος-Οκτώβριος, στο καθιστικό (LVR)
- Σ3: Απογευματινή ψύξη (19.00-21.00) με ρύθμιση στους 26 °C, στο καθιστικό (LVR) και βραδυνό φυσικό αερισμό (21.00-8.00) στα υπνοδωμάτια (MBDR-BDR) και στο καθιστικό (LVR), την περίοδο Μάιος-Οκτώβριος.
- Σ4: Καθημερινός διαλλειματικός αερισμός (8.00-10.00 & 20.00-00.00), στα υπνοδωμάτια (MBDR-BDR) και στο καθιστικό (LVR), για τους μήνες Μάιος-Ιούνιος-Σεπτέμβριος-Οκτώβριος. Για τους θερινούς μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, θεωρείται ημερήσια ψύξη (12.00-20.00), με ρύθμιση στους 26 °C, στο καθιστικό (LVR), και φυσικός βραδυνός αερισμός (20.00-8.00) στα υπνοδωμάτια (MBDR-BDR) και στο καθιστικό (LVR)
- Σ5: Καθημερινός διαλλειματικός αερισμός (8.00-10.00 & 20.00-00.00), στα υπνοδωμάτια (MBDR-BDR) και στο καθιστικό (LVR), για τους μήνες Μάιος-Ιούνιος-Σεπτέμβριος-Οκτώβριος. Για τους θερινούς μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, θεωρείται απογευματινή ψύξη (18.00-20.00), με ρύθμιση στους 26 °C, στο καθιστικό (LVR), και φυσικός βραδυνός αερισμός (20.00-8.00) στα υπνοδωμάτια (MBDR-BDR) και στο καθιστικό (LVR)

Πίνακας 5.2 Σενάρια παραμετρικής μελέτης για τις προσομοιώσεις της πιλοτικής κατοικίας

	Φυσικός Αερισμός	Κλιματισμός	Δωμάτια		Περίοδος
			MBDR-BDR	LVR	
ΦΑ1	20.00-8.00	-	✓	✓	Μάιος-Οκτώβριος
ΦΑ2	20.00-8.00	-	✓	X	Μάιος-Οκτώβριος
ΦΑ3	8.00-10.00 & 20.00-00.00	-	✓	✓	Μάιος-Οκτώβριος
ΚΛ1	-	Συνεχόμενη	✓	✓	Μάιος-Οκτώβριος
ΚΛ2	-	12.00-16.00	✓	✓	Μάιος-Οκτώβριος
ΚΛ3	-	20.00-21.00	✓	✓	Μάιος-Οκτώβριος
Σ1	20.00-8.00	12.00-20.00	✓	✓	Μάιος-Οκτώβριος
Σ2	20.00-8.00	12.00-20.00	X	✓	Μάιος-Οκτώβριος
Σ3	21.00-8.00	19.00-21.00	✓	✓	Μάιος-Οκτώβριος
Σ4	8.00-10.00 & 20.00-00.00	-	✓	✓	Μάιος-Ιούνιος-Σεπτέμβριος-Οκτώβριος
	20.00-8.00	12.00-20.00	✓ (αερισμός)	✓ (ψύξη&αερισμός)	Ιούλιος και Αύγουστος
Σ5	8.00-10.00 & 20.00-00.00	-	✓	✓	Μάιος-Ιούνιος-Σεπτέμβριος-Οκτώβριος
	20.00-8.00	18.00-20.00	✓ (αερισμός)	✓ (ψύξη&αερισμός)	Ιούλιος και Αύγουστος

## 5.7. Βέλτιστο Σενάριο Λειτουργίας

---

Η μελέτη μεμονωμένων παραμέτρων οδηγεί σε μονομερή συμπεράσματα όσον αφορά τη θερμική συμπεριφορά ενός κτηρίου. Παρόλ'αυτά, είναι απαραίτητη για να επιλεγεί η καλύτερη – πιο αντιπροσωπευτική τιμή, κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων.

Ο κατάλληλος συνδυασμός των παραμέτρων δύναται να βοηθήσει στον καθορισμό του βέλτιστου σεναρίου, όσον αφορά την ενεργειακή εξοικονόμηση. Στην περίπτωση που μελετάται, αυτό συνεπάγεται την κατάλληλη επιλογή ΥΑΦ για το κτήριο, το οποίο βρίσκεται σε συγκεκριμένη τοποθεσία, με συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Επειδή η μελέτη είναι πολύ-παραμετρική, βάρος θα δοθεί στις θερμο-φυσικές ιδιότητες του ΥΑΦ και όχι τόσο στις παραμέτρους του κτηρίου. Η μελέτη που θα προηγηθεί και αφορά την εις βάθος ανάλυση της κάθε παραμέτρου ξεχωριστά, βοηθά στην σωστή επιλογή των τιμών, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων για την εύρεση της βέλτιστης περίπτωσης. Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα, τόσο της παραμετρικής μελέτης, όσο και των βέλτιστων σεναρίων για την περιοχή της Αμφιλοχίας και της Αθήνας ξεχωριστά.

## 5.8. Επαλήθευση υπολογιστικού εργαλείου στην μελέτη περίπτωσης

---

Το εργαλείο, το οποίο παρουσιάστηκε στην §4.2 και επικυρώθηκε για την περίπτωση της απλής γεωμετρίας (βλ. §4.4), θα εφαρμοστεί και στην περίπτωση της πιλοτικής κατοικίας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, οι συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων μέσα στην πιλοτική κατοικία, θα χρησιμοποιηθούν για την μοντελοποίηση της.

Η περίοδος προσομοίωσης είναι από τις 20 Οκτώβριου ως 26 Οκτώβριου 2012 και το βήμα προσομοίωσης που χρησιμοποιείται είναι 10 λεπτά. Κατά την περίοδο αυτή, σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα, η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα μέσα στην κατοικία κυμαίνεται μεταξύ 19°C - 26°C, επομένως η ενεργοποίηση των ΥΑΦ είναι αναμενόμενη, όπως επιβεβαιώνεται και από την καμπύλη που μετρήθηκε στο DSC (βλ. Εικόνα 5.9). Έμφαση δίνεται στην θερμική συμπεριφορά του υπνοδωματίου και του καθιστικού. Το κύριο υπνοδωμάτιο βρίσκεται στον πρώτο όροφο και ο προσανατολισμός των εξωτερικών του τοίχων είναι νοτιοανατολικός. Αυτό το δωμάτιο έχει επιλεγεί επειδή οι εξωτερικοί τοίχοι του έχουν νότιο προσανατολισμό, κάτι το οποίο συνεπάγεται μεγαλύτερη έκθεση στον ήλιο και υψηλότερες θερμοκρασίες για ένα μεγάλο μέρος της ημέρας, και ο όγκος του χώρου αποτελεί ένα τυπικό δωμάτιο (42m<sup>3</sup>). Το καθιστικό, το οποίο βρίσκεται στο ισόγειο, είναι το μεγαλύτερο δωμάτιο της πιλοτικής κατοικίας, με όγκο περίπου 215m<sup>3</sup> ενώ ο προσανατολισμός των τοίχων του είναι ανατολικά, βόρεια και δυτικά, ενώ η οροφή έχει κλίση προς τα βόρεια.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα για την περιοχή δίνονται από τον εγγύς εγκατεστημένο compact μετεωρολογικό σταθμό. Η θερμοκρασία, η ακτινοβολία και η υγρασία παρακολουθούνται κάθε 10 λεπτά για όλο το χρόνο. Το σχετικό αρχείο δεδομένων που περιέχει τις μετρήσεις των καιρικών συνθηκών, λειτουργεί ως αρχείο εισόδου στο

λογισμικό του TRNSYS, το οποίο παρέχει πληροφορίες για τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και των παραμέτρων της ακτινοβολίας.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι κατά την περίοδο αυτή, η πιλοτική κατοικία δεν ήταν κατοικήσιμη, ενώ όλα τα παράθυρα ήταν κλειστά για μεγάλο χρονικό διάστημα, με κατεβασμένα τα εξωτερικά κινητά σκίαστρα. Δεν υπήρχαν θερμικά κέρδη μέσα στους χώρους από συσκευές, πέρα από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο οποίος ήταν τοποθετημένος μέσα σε ειδική αποθήκη, κλειστή, η οποία βρίσκεται στο ισόγειο. Η προσομοίωση για την επικύρωση του εργαλείου έγινε με βάση αυτά τα στοιχεία και τις παραμέτρους.

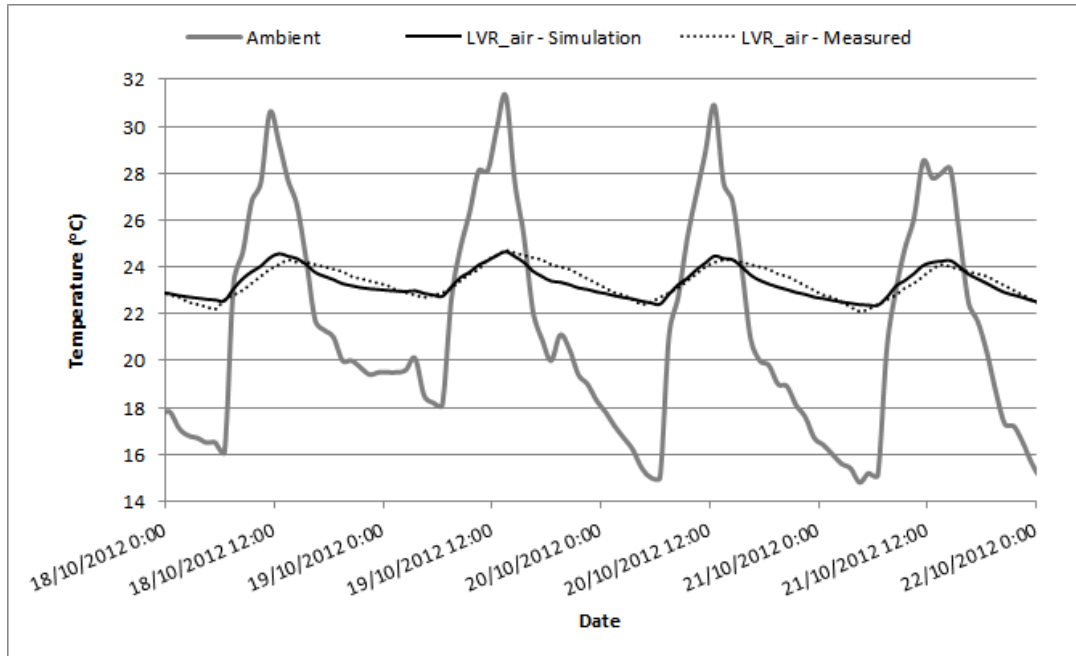
Πιο αναλυτικά, επιλέχθηκε εξωτερική σκίαση για όλα τα παράθυρα. Όλα τα ανοίγματα ήταν κλειστά, ενώ οι ενδιάμεσοι χώροι επικοινωνούσαν, καθώς οι εσωτερικές πόρτες θεωρήθηκαν ανοικτές. Με βάση τον KENAK, θεωρήθηκε ότι ο συνολικός αερισμός των χώρων (φυσικός αερισμός και διείσδυση) υπολογίζεται βάσει του όγκου του χώρου και όχι των ανοιγμάτων που διαθέτει. Επομένως, η τιμή της παροχής αέρα ανά όγκο χώρου λαμβάνεται ίση με  $0,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$  από τον πίνακα 3.27. της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO 13789 E2:2009. Λαμβάνοντας υπόψιν την συνεχόμενη λειτουργία του ηλεκτρονικού υπολογιστή, ο οποίος συλλέγει τις μετρήσεις από τα θερμοστοιχεία, θεωρήθηκε θερμική πηγή συνεχούς λειτουργίας 80Watt μέσα στο λογισμικό TRNSYS. Η πηγή αυτή, τοποθετήθηκε σε θερμική ζώνη, η οποία εφάπτεται στο καθιστικό και το γραφείο.

Οι Εικόνες Εικόνα 5.15 και Εικόνα 5.16 δείχνουν την σύγκριση μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις θερμοκρασίες του εσωτερικού αέρα και για τα δύο δωμάτια (καθιστικό -LVR και master υπνοδωμάτιο MBDR).

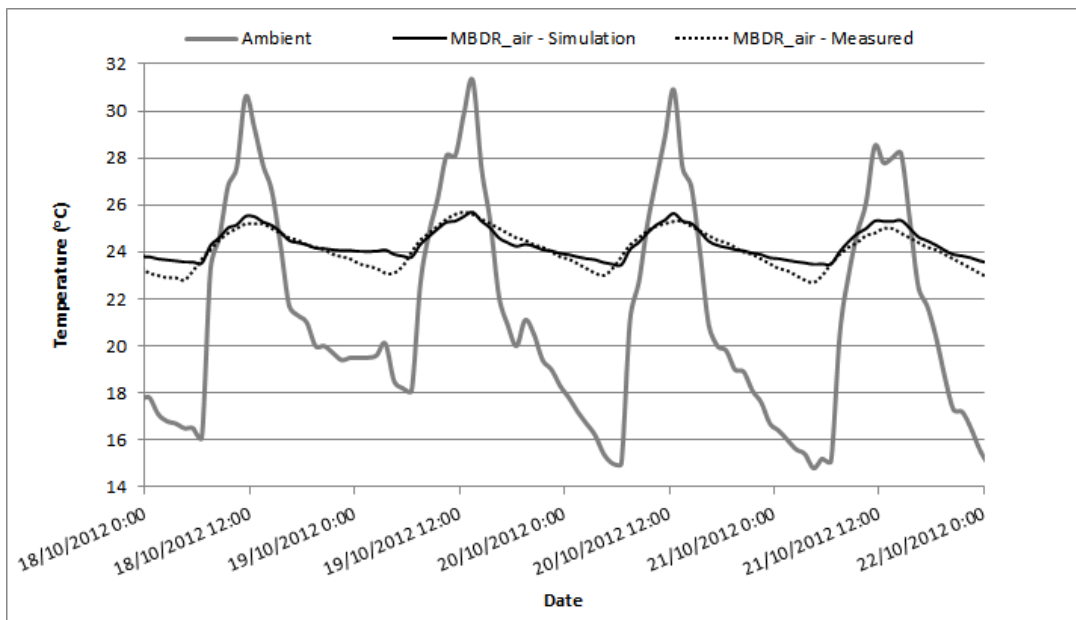
Τα διαγράμματα δείχνουν ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προσεγγίζουν ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα. Η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα, έτσι όπως υπολογίζεται για τα δυο δωμάτια, ακολουθεί την τάση που δίνουν οι μετρήσεις, ενώ το μοντέλο κατορθώνει να συλλάβει το εύρος της θερμοκρασίας και για τα δύο δωμάτια. Οι μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες για το καθιστικό και η μέγιστη θερμοκρασία για το υπνοδωμάτιο σχεδόν ταυτίζονται τις περισσότερες μέρες. Συνολικά, οι προβλεπόμενες τιμές της θερμοκρασίας συμφωνούν με τις διαθέσιμες μετρήσεις για την περίοδο που εξετάστηκε, κατά την οποία το ΥΑΦ ενεργοποιείται.

Ωστόσο, κάποιες μικρές διαφορές στις προβλεπόμενες τιμές και τις μετρήσεις μπορούν να παρατηρηθούν. Αυτές οι διαφορές ενδέχεται να είναι απόρροια κάποιων παραμέτρων που έχουν υιοθετηθεί, όπως α) οι θερμο-φυσικές ιδιότητες των δομικών υλικών που δεν προέρχονται από μετρήσεις, αλλά από βιβλιοθήκες του λογισμικού ή τον KENAK, β) η τιμή του αερισμού των χώρων (φυσικός αερισμός και άδηλες απώλειες), η οποία ενδεχομένως να αλλάζει από χώρο σε χώρο, γ) η υγρασία, η οποία κατά περιόδους να είναι πιο έντονη, λόγω μη τακτικού αερισμού της κατοικίας, δ) η αλλαγή των συντελεστών συναγωγιμότητας λόγω ΥΑΦ, ε) η αλληλεπίδραση των θερμικών ζωνών. Λαμβάνοντας υπόψιν, ότι οι παράμετροι που επηρεάζουν την θερμική συμπεριφορά της κατοικίας είναι πολλές, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα που λαμβάνονται

με το προτεινόμενο μοντέλο δίνουν καλή αναπαράσταση των πειραματικών τιμών και επαληθεύουν την απόδοση του μοντέλου TRNSYS-MATLAB για κτήρια μεγάλης κλίμακας.



Εικόνα 5.15 Διακύμανση θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα για το καθιστικό (μετρήσεις και προβλεπόμενες τιμές)



Εικόνα 5.16 Διακύμανση θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα για το υπνοδωμάτιο (μετρήσεις και προβλεπόμενες τιμές)

## Βιβλιογραφία 5<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

---

- De Meester, T., Marique, A.-F., De Herde, A., Reiter, S., 2013. Impacts of occupant behaviours on residential heating consumption for detached houses in a temperate climate in the northern part of Europe. *Energy and Buildings* 57, 313–323. doi:10.1016/j.enbuild.2012.11.005
- Lam, J.C., Wan, K.K.W., Tsang, C.L., Yang, L., 2008. Building energy efficiency in different climates. *Energy Conversion and Management* 49, 2354–2366. doi:10.1016/j.enconman.2008.01.013
- Mandilaras, I., Stamatiadou, M., Katsourinis, D., Zannis, G., Founti, M., 2013. Experimental thermal characterization of a Mediterranean residential building with PCM gypsum board walls. *Building and Environment* 61, 93–103. doi:10.1016/j.buildenv.2012.12.007
- Stamatiadou, M., Katsourinis, D., Founti, M., Antonopoulos, K.A., 2013. Investigation of natural ventilation impact on the effectiveness of PCM boards installed in a Mediterranean Residential Building, in: *Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable Energy Storage in Buildings*. Presented at the SESB 2013, Trinity College, Dublin, Ireland, pp. 252–255.
- Wan, K.K.W., Li, D.H.W., Lam, J.C., 2011. Assessment of climate change impact on building energy use and mitigation measures in subtropical climates. *Energy* 36, 1404–1414. doi:10.1016/j.energy.2011.01.033
- Yıldız, Y., Arsan, Z.D., 2011. Identification of the building parameters that influence heating and cooling energy loads for apartment buildings in hot-humid climates. *Energy* 36, 4287–4296. doi:10.1016/j.energy.2011.04.013
- T.O.T.E.E. 20701-1/2010 [WWW Document], n.d. URL <http://portal.tee.gr/portal/page/portal/tptee/totee/TOTEE-20701-1-Final-%D4%C5%C5-2nd.pdf> (accessed 3.26.14).
- T.O.T.E.E. 20701-2/2010 [WWW Document], n.d. URL <http://portal.tee.gr/portal/page/portal/tptee/totee/TOTEE-20701-2-Final-%D4%C5%C5....pdf> (accessed 3.26.14).







# 6

## Θερμική Συμπεριφορά κτηρίου ελαφριάς κατασκευής με ΥΑΦ στα δομικά στοιχεία – Παραμετρική Ανάλυση

### Περιεχόμενα 6<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

---

Θερμική Συμπεριφορά κτηρίου ελαφριάς κατασκευής με ΥΑΦ στα δομικά στοιχεία – Παραμετρική Ανάλυση	135
6. Εισαγωγή	136
6.1. Δείκτες αποτελεσμάτων	136
6.2. Σενάριο αναφοράς (χωρίς ΥΑΦ)	136
6.3. Τρέχουσα κατάσταση πιλοτικής κατοικίας (Βασικό Σενάριο)	139
6.4. Αποτελέσματα Παραμετρικών Μελετών	142
6.5. Βέλτιστο Σενάριο Λειτουργίας	164
Βιβλιογραφία 6 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου	168

---

## 6. Εισαγωγή

---

Η χρήση γυψοσανίδων με ΥΑΦ αναμένεται να έχουν επίδραση στα ψυκτικά φορτία μιας οικίας ελαφριάς κατασκευής. Στην παρούσα διατριβή, εξετάζεται η περίπτωση σύγχρονης κατοικίας, έτσι όπως παρουσιάστηκε στο Κεφ.4.

Τα αποτελέσματα εστιάζονται στην εξοικονόμηση ενέργειας, όσον αφορά τα ψυκτικά φορτία. Αρχικά, θεωρείται η κατοικία ως μη κατοικήσιμη, έτσι ώστε να μην επιδρά ο ανθρώπινος παράγοντας και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της ετήσιας εξοικονόμησης σε σχέση με την ίδια κατοικία, στην περίπτωση κατά την οποία οι γυψοσανίδες με ΥΑΦ, έχουν αντικατασταθεί με απλές γυψοσανίδες.

Στην συνέχεια, με γνώμονα πάλι τα ετήσια ψυκτικά φορτία, αξιολογείται η επίδραση τριών παραμέτρων στην εξοικονόμηση. Οι παράμετροι, οι οποίες εξετάζονται, είναι η θερμοκρασία αλλαγής φάσης του ΥΑΦ της γυψοσανίδας, οι κλιματικές συνθήκες και τέλος ο φυσικός αερισμός/κλιματισμός και οι συνθήκες λειτουργίας όταν η οικία κατοικείται. Για την τελευταία παράμετρο ειδικά, εξετάζονται ξεχωριστά σενάρια λειτουργίας, βασισμένα στις συνθήκες λειτουργίας, οι οποίες προ-αναφέρθηκαν στην §4.2.5.

### 6.1. Δείκτες αποτελεσμάτων

---

Η απόδοση των ΥΑΦ γυψοσανίδων ερευνήθηκε εστιάζοντας σε τρεις δείκτες:

- η συνολική ετήσια εξοικονόμηση του φορτίου ψύξης
- το εύρος της περιόδου της ενεργειακής ζήτησης
- καθώς και οι μέρες που το σύστημα ψύξης ήταν ανοιχτό

Αναλύοντας τους τρεις δείκτες, ορίζουμε ως μείωση του ετήσιου φορτίου ψύξης, το συνολικό ποσό ροής θερμότητας μέσα στο κτήριο κατά τη διάρκεια της περιόδου ψύξης, ενώ οι άλλοι δυο δείκτες αφορούν το εύρος της περιόδου της ενεργειακής ζήτησης, δηλαδή τον αριθμό των ημερών όπου ενεργοποιείται το σύστημα ψύξης και πως το φορτίο κατανέμεται στους μήνες.

### 6.2. Σενάριο αναφοράς (χωρίς ΥΑΦ)

---

Για να γίνει αντιληπτή η επίδραση των γυψοσανίδων ΥΑΦ στις θερμικές ανάγκες και απαιτήσεις της κατοικίας, είναι απαραίτητη η γνώση των θερμικών αναγκών της ίδιας κατοικίας, όταν οι γυψοσανίδες των εσωτερικών τοίχων και των χωρισμάτων είναι απλές, χωρίς δηλαδή να εμπεριέχουν ΥΑΦ. Κατά αυτόν τον τρόπο, διαμορφώνεται το βασικό σενάριο της ενεργειακής συμπεριφοράς της οικίας, το οποίο θα αποτελεί σενάριο αναφοράς (Σ.Α.) σε περαιτέρω συγκρίσεις. Τα ποσοστά εξοικονόμησης θα υπολογίζονται πάντα βάσει του σεναρίου αναφοράς, έτσι ώστε να είναι εμφανής η ενδεχόμενη επίδραση της εισαγωγής ΥΑΦ στα δομικά στοιχεία.

Συνεπώς, το μοντέλο προσομοίωσης για την περίπτωση του βασικού σεναρίου αναφοράς παραμένει το ίδιο (όπως έχει περιγραφεί στην §5.2), με τη μόνη διαφορά ότι οι

γυψοσανίδες δεν περιέχουν ΥΑΦ, ενώ οι θερμο-φυσικές ιδιότητες τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1. Θερμοφυσικές ιδιότητες απλής γυψοσανίδας σε σύγκριση με την γυψοσανίδα με ΥΑΦ, για το σενάριο αναφοράς.

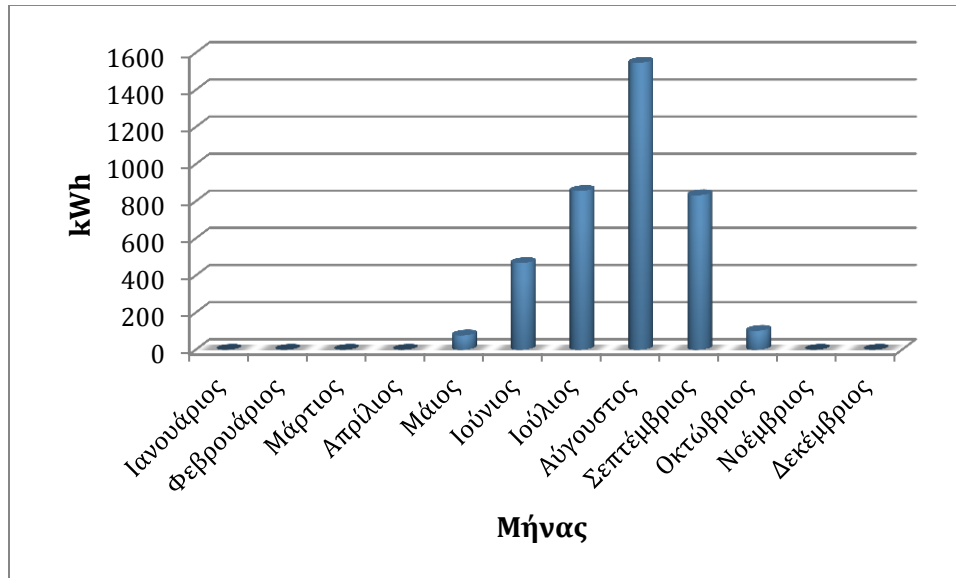
**Πίνακας 6.1** Θερμοφυσικές ιδιότητες απλής γυψοσανίδας σε σύγκριση με την γυψοσανίδα με ΥΑΦ, για το σενάριο αναφοράς

Γυψοσανίδα		Πάχος (d)	Πυκνότητα (ρ)	Θερμική Αγωγιμότητα (λ)	Θερμοχωρητικότητα (Cp)
		mm	kg/m <sup>3</sup>	W/(mK)	kJ/(kgK)
1	Απλή	25	810	0.1830	0.95
2	Με ΥΑΦ	15	787	0.27	Βλ. Σχ 4.9

Το σενάριο αναφοράς θα χρησιμοποιείται κάθε φορά ως βάση σύγκρισης για όλες τις προσομοιώσεις. Κατά την παραμετρική μελέτη, τόσο το βασικό σενάριο (απλές γυψοσανίδες) όσο και το μελετώμενο σενάριο (γυψοσανίδες με ΥΑΦ), θα έχουν ίδιες τιμές στις παραμέτρους οι οποίες δεν εξετάζονται, ώστε η σύγκριση να είναι δυνατή. Η τιμή των παραμέτρων αυτών θα αλλάζει ανά περίπτωση. Ενδεικτικά, χρησιμοποιώντας τις τιμές με τις οποίες έχει γίνει η επαλήθευση του κώδικα για την πιλοτική κατοικία (βλ. §5.3), οι ενεργειακές απαιτήσεις της οικίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2.

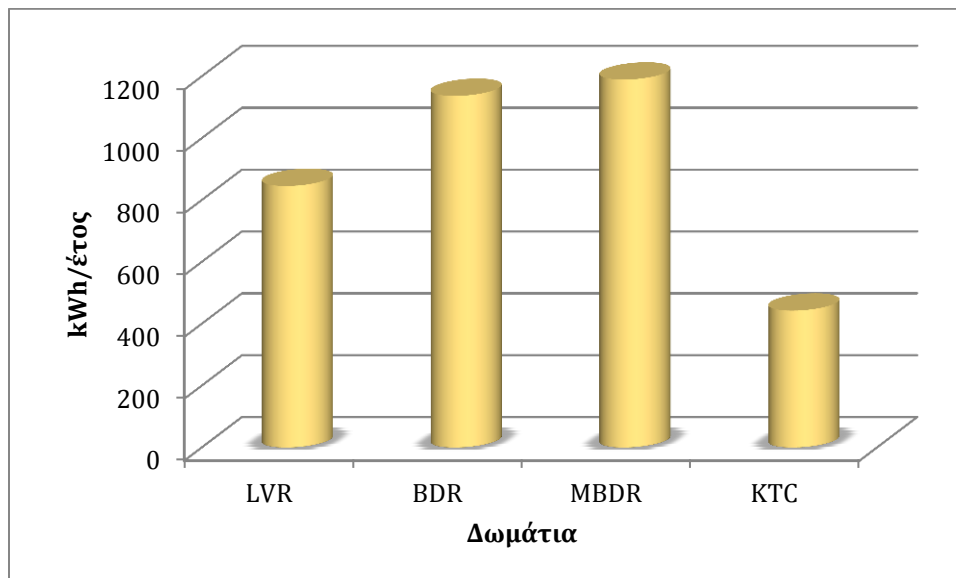
**Πίνακας 6.2** Σενάριο Αναφοράς (χωρίς ΥΑΦ): Απαιτούμενο Ψυκτικό φορτίο, ανά μήνα και ετήσιο

Μήνας	Ψυκτικό Φορτίο (kWh)
Ιανουάριος-Απρίλιος	0.00
Μάιος	77.18
Ιούνιος	467.35
Ιούλιος	855.71
Αύγουστος	1546.73
Σεπτέμβριος	832.59
Οκτώβριος - Δεκέμβρης	102.04
<b>Ετήσιο Ψυκτικό φορτίο</b>	<b>25,37 kWh/m<sup>2</sup> έτος</b>



Εικόνα 6.1 Σενάριο Αναφοράς (χωρίς ΥΑΦ): ετήσια διακύμανση απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου (kWh)

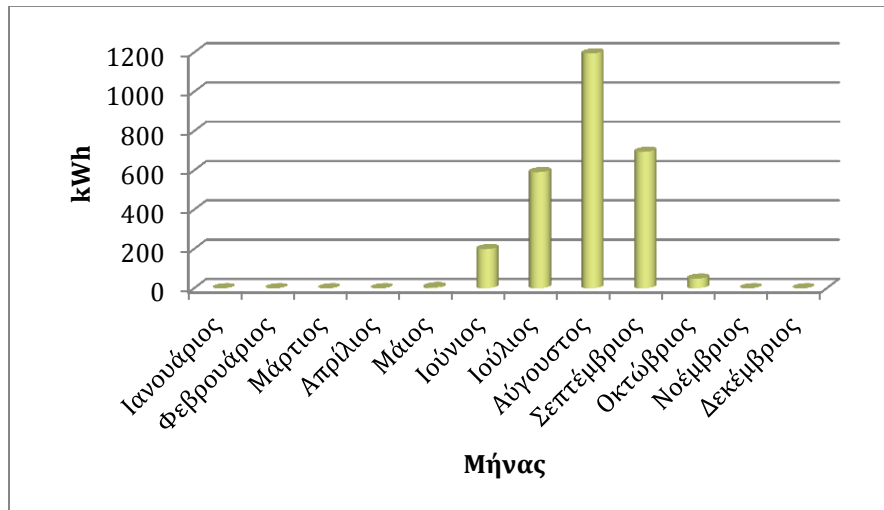
Η κατανομή του συνολικού ετήσιου ψυκτικού φορτίου για κάθε δωμάτιο παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.2. Παρατηρείται ότι οι δυο κρεβατοκάμαρες έχουν την ίδια τάξη μεγέθους ψυκτικές απαιτήσεις (MBDR – BDR) και πάντα υψηλότερες από το καθιστικό (LVR) ή την κουζίνα (KTC). Η κουζίνα έχει τις χαμηλότερες ανάγκες για ψύξη, αλλά εξετάζεται καθώς είναι σε άμεση επικοινωνία με το καθιστικό.



Εικόνα 6.2 Σενάριο Αναφοράς (χωρίς ΥΑΦ): Κατανομή ετήσιου απαιτούμενου φορτίου (kWh) ανά δωμάτιο

### 6.3. Τρέχουσα κατάσταση πιλοτικής κατοικίας (Βασικό Σενάριο)

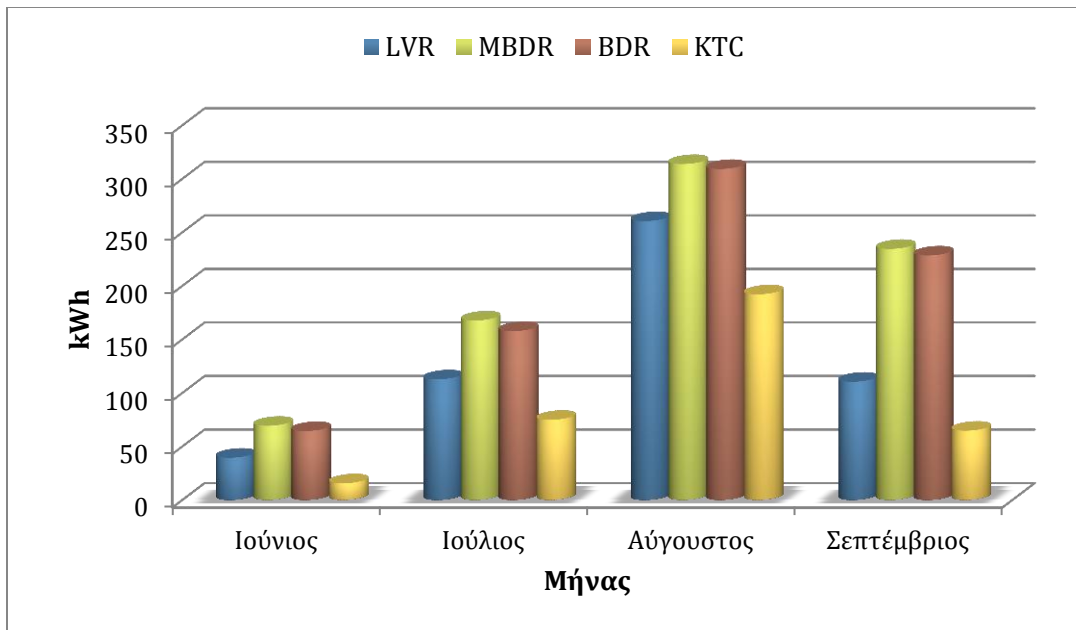
Το βασικό σενάριο με ΥΑΦ (Β.Σ) , το οποίο θα μελετηθεί, αφορά την πιλοτική κατοικία στην τρέχουσα κατάστασή της. Έμφαση δίνεται στην ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας (ψυκτικό φορτίο), το οποίο οφείλεται στην παρουσία των γυψοσανίδων με ΥΑΦ. Η διάρκεια της προσομοίωσης είναι ένα έτος και το χρονικό βήμα που χρησιμοποιείται είναι 10 λεπτά. Προκειμένου να εκτιμηθεί η ετήσια ζήτηση ψύξης της πιλοτικής οικίας, ορίζεται η θερμοκρασία ενεργοποίησης της ψύξης κατά την θερινή περίοδο στους 26 °C ενώ θεωρείται απεριόριστη ψυκτική ισχύς για όλο το χρόνο για τα δωμάτια: κρεβατοκάμαρα-MBDR, υπνοδωμάτιο -BDR, καθιστικό -LVR, και κουζίνα -KTC. Η τρέχουσα κατάσταση της οικίας είναι χωρίς εσωτερικά θερμικά κέρδη και με σκίαστρα σε όλα τα παράθυρα. Η υπολογιζόμενη συνολική ετήσια ζήτηση ψύξης για όλο το σπίτι, όταν έχουν εγκατασταθεί γυψοσανίδες με ΥΑΦ είναι 15,13 kWh / m<sup>2</sup> έτος. Η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας ανέρχεται σε 27% (για ψύξη) και είναι το αποτέλεσμα της λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας των ΥΑΦ, η οποία αυξάνει την θερμική μάζα του τοίχου αποτελεσματικά.



Εικόνα 6.3 Βασικό σενάριο (με ΥΑΦ): Ψυκτικό φορτίο κατά τη διάρκεια του έτους

Πίνακας 6.3 Βασικό σενάριο (με ΥΑΦ): Απαιτούμενο Ψυκτικό φορτίο, ανά μήνα και ετήσιο

Μήνας	Φορτίο (kWh)
Ιανουάριος - Απρίλιος	0.00
Μάιος	5.54
Ιούνιος	199.32
Ιούλιος	591.20
Αύγουστος	1195.32
Σεπτέμβριος	694.56
Οκτώβριος - Δεκέμβρης	49.09
<b>Ετήσιο Ψυκτικό φορτίο</b>	<b>17,88kWh/m<sup>2</sup> έτος</b>

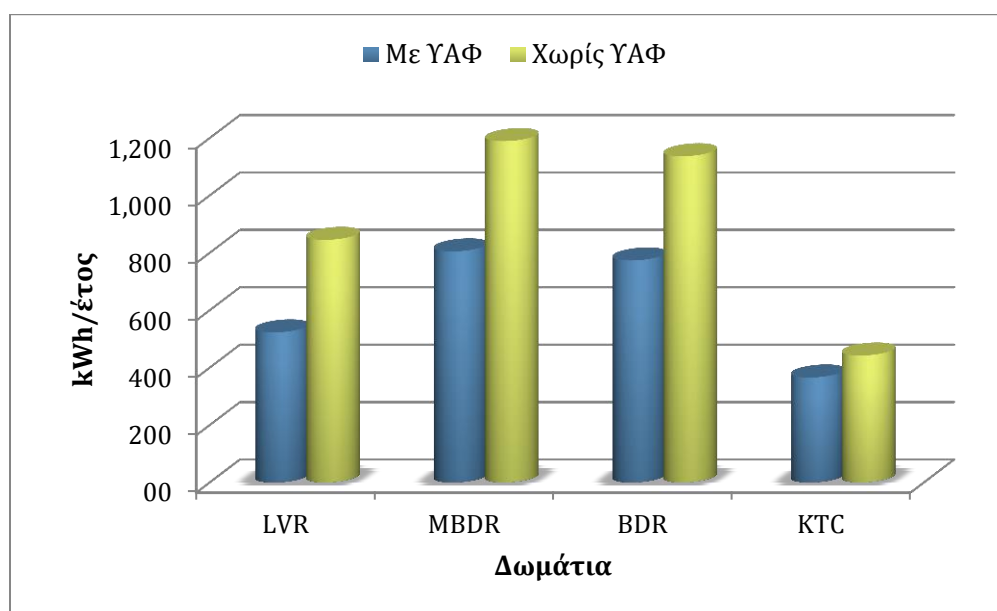


**Εικόνα 6.4 Βασικό σενάριο (με ΥΑΦ): κατανομή απαιτούμενου φορτίου (kWh) ανά δωμάτιο και μήνα**

Στην Εικόνα 6.4, παρουσιάζεται η μηνιαία κατανομή της ζήτησης ψυκτικού φορτίου για την περίπτωση με γυψοσανίδες με ΥΑΦ για τα τέσσερα δωμάτια: καθιστικό (LVR), master bedroom (MBDR), υπνοδωμάτιο (BDR) και κουζίνα (KTC). Οι μήνες κατά τους οποίους δεν υπάρχει ανάγκη ψύξης, παραλείπονται. Η περίοδος αρχίζει τον Ιούνιο και εκτείνεται μέχρι το Σεπτέμβριο. Η υψηλότερη ζήτηση αναμένεται τον Αύγουστο για όλα τα δωμάτια, και ακολουθείται από τους μήνες Ιούλιο και Σεπτέμβριο. Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση των γυψοσανίδων με ΥΑΦ στο κτήριο, διεξάγεται συγκριτική μελέτη της ανάγκης ψύξης για κάθε δωμάτιο, για δύο περιπτώσεις (τοιχοί με και χωρίς ΥΑΦ).

### 6.3.1. Σύγκριση με σενάριο αναφοράς

Στο Πίνακα 6.4, παρουσιάζεται η υπολογιζόμενη ετήσια ζήτηση ψύξης για τα τέσσερα δωμάτια, για τις δύο περιπτώσεις δοκιμής (με και χωρίς γυψοσανίδες ΥΑΦ), καθώς και συνολικά. Αναμένεται μια μέση μείωση της τάξης 25,3 % των φορτίων ψύξης (με βάση τα φορτία που υπολογίζονται), η οποία μπορεί να σχετίζεται με την παρουσία του ΥΑΦ. Τα δύο υπνοδωμάτια παρουσιάζουν υψηλότερες απαιτήσεις για ψύξη από τα άλλα δωμάτια, ενώ μεταξύ τους παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Ωστόσο, συνδέονται επίσης με τα υψηλότερα ετήσια ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας. Οι αυξημένες ψυκτικές ανάγκες για αυτά τα δωμάτια σχετίζονται με το γεγονός ότι βρίσκονται στον πρώτο όροφο του σπιτιού και έχουν νότιο - ανατολικό και νότιο- δυτικό προσανατολισμό αντίστοιχα, επομένως, είναι περισσότερο εκτεθειμένα στην ηλιακή ακτινοβολία. Η ανάγκη ψύξης για το καθιστικό στο ισόγειο, το οποίο είναι σε άμεση επαφή με το έδαφος, είναι πάντα χαμηλότερη από ότι στα υπνοδωμάτια, και δύναται να αποδοθεί στο μεγάλο όγκο του καθιστικού. Κατά συνέπεια, χρειάζεται περισσότερος χρόνος για να αυξηθεί η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα και διατηρεί χαμηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της περιόδου ψύξης.



Εικόνα 6.5 Κατανομή φορτίου ανά δωμάτιο: σύγκριση βασικού σεναρίου με σεναρίου αναφοράς

Πίνακας 6.4 Ψυκτικό απαιτούμενο φορτίο για το βασικό σενάριο

	LVR			MBDR			BDR			KTC		
	PCM (kWh)	No PCM	%	PCM (kWh)	No PCM	%	PCM (kWh)	No PCM	%	PCM (kWh)	No PCM	%
<b>Ιούν.</b>	15.22	33.77	54.9	19.32	45.01	57.1	19.87	46.50	57.3	24.25	42.58	43.1
<b>Ιουλ.</b>	109.41	149.05	26.6	150.36	220.84	31.9	135.23	191.97	29.6	99.84	126.10	20.8
<b>Αυγ.</b>	238.60	293.11	18.6	211.08	275.78	23.5	208.53	267.92	22.2	112.04	139.86	19.9
<b>Σεπτ.</b>	69.67	89.30	21.8	94.41	121.45	22.2	93.35	119.43	21.9	98.50	116.67	15.6
<b>Οκτ.</b>	0.00	5.50	100.0	0.00	0.38	100.0	0.00	0.24	100.0	0.00	3.31	100
<b>Συνολ.</b>	432.90	570.72	<b>24.1</b>	475.18	663.46	<b>28.3</b>	456.98	626.07	<b>27.0</b>	334.63	428.52	<b>21.9</b>

Για να τονιστεί περαιτέρω η επιρροή του όγκου του χώρου για την εξοικονόμηση ενέργειας, υπολογίζεται το κλάσμα " επιφάνειας -όγκου ", το οποίο ορίζεται ως «συνολική επιφάνεια δωματίου που καλύπτεται από γυψοσανίδες με YAΦ προς τον όγκο του χώρου». Ο λόγος "επιφάνεια προς όγκο" είναι 1,25 και 1,20 για το MBDR και BDR, αντίστοιχα, ενώ λαμβάνει την τιμή 0,36 για την KTC και 0,72 για το LVR. Παρά το γεγονός ότι η κρεβατοκάμαρα (BDR) και η κουζίνα έχουν το ίδιο μέγεθος, το υπνοδωμάτιο έχει τέσσερις τοίχους με γυψοσανίδες με YAΦ, ενώ η κουζίνα έχει μόνο έναν. Από την άλλη πλευρά, το καθιστικό έχει μεγαλύτερη επιφάνεια που καλύπτεται με γυψοσανίδες YAΦ, αλλά ο μεγάλος όγκος του δωματίου οδηγεί σε χαμηλότερη τιμή για το λόγο "επιφάνεια προς όγκο".

". Υψηλότερη τιμή του λόγου «επιφάνειας προς όγκο» σημαίνει ότι περισσότερο ΥΑΦ βρίσκεται σε ένα σχετικά μικρό δωμάτιο. Η παρουσία περισσότερου ΥΑΦ σε ένα δωμάτιο (υψηλή τιμή του λόγου) μπορεί να συνδέεται με μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.5. Για παράδειγμα, τον Ιούλιο, τα δωμάτια με υψηλότερη τιμή του λόγου ( MBDR και BDR ) έχουν κατά μέσο όρο μείωση του φορτίου κατά 30,75 %, ενώ το καθιστικό και η κουζίνα έχουν μείωση του φορτίου 26,6 % και 20,8 % αντίστοιχα, ποσοστό σημαντικά χαμηλότερο.

Το υψηλότερο ποσοστό μείωσης του φορτίου για τον Ιούνιο και τον Οκτώβριο είναι δικαιολογημένο δεδομένου ότι οι απόλυτες τιμές του φορτίου για το σενάριο αναφοράς είναι μικρές και η εγκατάσταση γυψοσανίδων με ΥΑΦ μπορεί να καλύψει το μεγαλύτερο μέρος ή το σύνολο των απαιτήσεων ψύξης για τους μήνες αυτούς( π.χ. τον Οκτώβριο). Παρά το γεγονός ότι οι υψηλότερες απαιτήσεις για ψύξη συμβαίνουν τον Αύγουστο και για τις δύο περιπτώσεις, η επίδραση των ΥΑΦ είναι σχετικά μικρότερη από ό, τι σε άλλους μήνες, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που παρατηρούνται. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τον Ιούλιο, τα δωμάτια, τα οποία βρίσκονται στον πρώτο όροφο (master υπνοδωμάτιο και κρεβατοκάμαρα) παρουσιάζουν μεγαλύτερη μείωση του φορτίου σε σχέση με τους δύο επόμενους μήνες. Αντίθετα, η μείωση των απαιτήσεων ψύξης είναι χαμηλότερη για το καθιστικό και την κουζίνα κατά τη διάρκεια του Αυγούστου, ενώ η μεγαλύτερη μείωση του φορτίου εμφανίζεται τον Ιούλιο και τον Σεπτέμβριο. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί αν παρατηρήσουμε την θερμοκρασία του αέρα στους εσωτερικούς χώρους για τα τέσσερα δωμάτια, υπολογίζοντας τη στο μοντέλο προσομοίωσης. Ο Πίνακας 6.5 παρουσιάζει τη μηνιαία μέση υπολογισμένη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα και τη μηνιαία μέγιστη θερμοκρασία αέρα στους εσωτερικούς χώρους για τα τέσσερα δωμάτια. Γίνεται σαφές ότι η μεγαλύτερη μείωση του φορτίου συνδέεται με τους μήνες, οπότε η μέση θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα είναι γύρω από τη θερμοκρασία της αλλαγής φάσης του ΥΑΦ των γυψοσανίδων.

**Πίνακας 6.5 Θερμοκρασία εξωτερικού και εσωτερικού αέρα για κάθε δωμάτιο (μέση και μέγιστη)**

	Περιβάλλον		LVR		MBDR		BDR		KTC	
	Μέση	max	Μέση	max	Μέση	max	Μέση	max	Μέση	max
<b>Ιούν.</b>	22.6	31.5	22.8	25.4	21.9	24.1	22.0	23.9	21.6	26.1
<b>Ιουλ.</b>	25.2	34.4	24.5	26.9	24.0	26.0	24.0	25.7	25.2	31.0
<b>Αυγ.</b>	25.7	33.9	25.8	28.1	25.9	28.5	25.8	28.1	26.2	31.1
<b>Σεπτ.</b>	22.2	29.5	24.4	27.2	26.1	28.0	26.4	27.8	23.2	27.0
<b>Οκτ.</b>	19.2	27.9	22.3	24.8	23.9	25.7	24.3	25.8	22.4	26.3

#### 6.4. Αποτελέσματα Παραμετρικών Μελετών

Η εξέταση της πιλοτικής κατοικίας ως προς τις ενεργειακές ανάγκες για ψύξη είναι συνυφασμένη με ένα πλήθος παραμέτρων, οι οποίες μεταβάλλουν τα αποτελέσματα σε περίπτωση που ορισθούν άλλες τιμές ή συνθήκες λειτουργίας. Στα πλαίσια της παρούσας



διατριβής, εξετάζονται οι παράμετροι, οι οποίες έχουν προαναφερθεί και αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Οι παράμετροι, οι οποίες θα εξετασθούν και παρουσιάζονται στον Πίνακας 6.6. Εκτενής αναφορά καθώς και οι τιμές που υιοθετούνται για κάθε παραμετρική μελέτη παρουσιάζονται στο προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφ.5), για λόγους συνοχής όμως, στο παρόν κεφάλαιο θα αναφέρονται επιγραμματικά ορισμένα στοιχεία.

**Πίνακας 6.6 Παράμετροι και τιμές για κάθε παραμετρική ανάλυση**

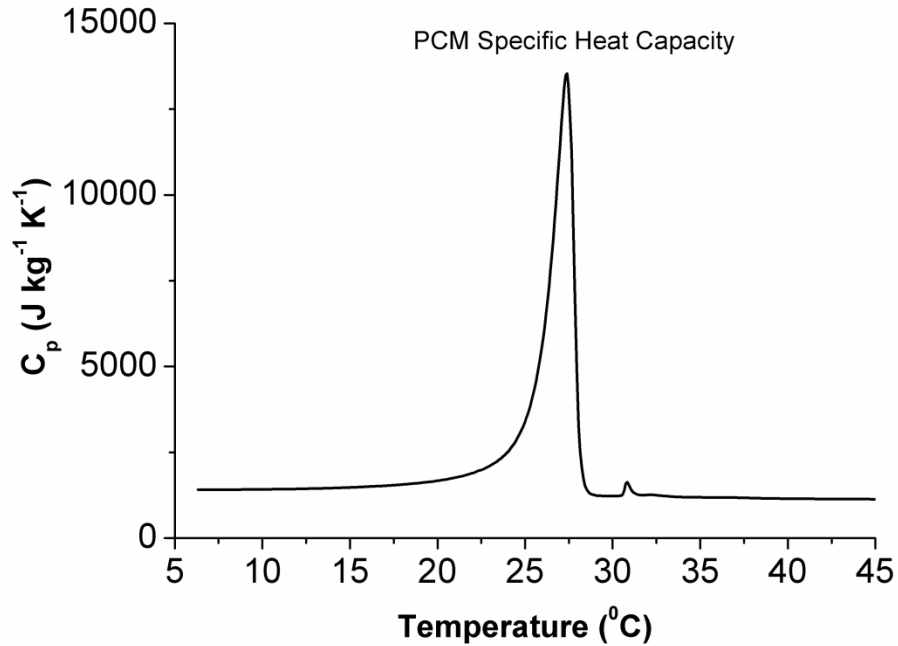
Μεταβλητή	Περιπτώσεις
Θερμοκρασία αλλαγής φάσης του ΥΑΦ	- 24 °C - 26 °C
Υγρασία Χώρου	- Σταθερή σε όλους τους χώρους - Υπολογισμός υγρασίας για κάθε θερμική ζώνη ξεχωριστά
Συνολικός αερισμός των χώρων	- 0,5/h - 1/h - 2/h
Συνθήκες λειτουργίας	Βλ. Πίν.6.3
Κλιματικές Συνθήκες	- Αρχείο καιρού Στάνος, Αμφιλοχίας (TRNSYS) - Αρχείο καιρού Στάνος, Αμφιλοχίας (μετρήσεις) - Αρχείο καιρού Αθήνα (TRNSYS)

#### 6.4.1. Παραμετρική μελέτη - Αποτελέσματα: Θερμοκρασία αλλαγής φάσης του ΥΑΦ

Η θερμοκρασία αλλαγής φάσης των γυψοσανίδων με ΥΑΦ, οι οποίες έχουν εγκατασταθεί στην πιλοτική κατοικία, είναι στους 24 °C. Μια παραμετρική μελέτη με διαφορετικό εύρος θερμοκρασιών αλλαγής φάσης του ΥΑΦ, θα αναδείξει την πιθανότητα μεγαλύτερης εξοικονόμησης ενέργειας. Η περίπτωση, η οποία θα μελετηθεί, αφορά γυψοσανίδες με θερμοκρασία αλλαγής φάσης στους 26 °C. Στην Εικόνα 6.6, υπενθυμίζεται η πειραματική καμπύλη για την αλλαγή φάσης στους 26 °C.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακας 6.7, δίνουν μια πρώτη αξιολόγηση της επιλογής του ΥΑΦ, το οποίο εγκαταστάθηκε στην πιλοτική κατοικία. Το φορτίο ψύξης για την περίπτωση κατά την οποία το ΥΑΦ είχε θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης γύρω στους 26 °C είναι σημαντικά αυξημένο. Η αύξηση των αναγκών είναι συνυφασμένη με τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν. Όπως προαναφέρθηκε, η επίδραση του ΥΑΦ με αλλαγή φάσης στους 24 °C είναι εντονότερη κατά τους μήνες Μάιο - Ιούνιο και Σεπτέμβριο - Οκτώβριο, καθώς οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος τότε είναι κοντά σε αυτή τη θερμοκρασία. Η επίδραση του ΥΑΦ για τους μήνες Ιούλιο - Αύγουστο είναι μικρότερη, καθώς το ΥΑΦ ενδεχομένως δεν λειτουργεί σωστά (υψηλότερες ημερήσιες θερμοκρασίες δεν βοηθούν στην τήξη του ΥΑΦ και στη σωστή λειτουργία του την επόμενη μέρα). Με γνώμονα αυτές τις συνθήκες, η αλλαγή του θερμοκρασιακού εύρους για την αλλαγή φάσης

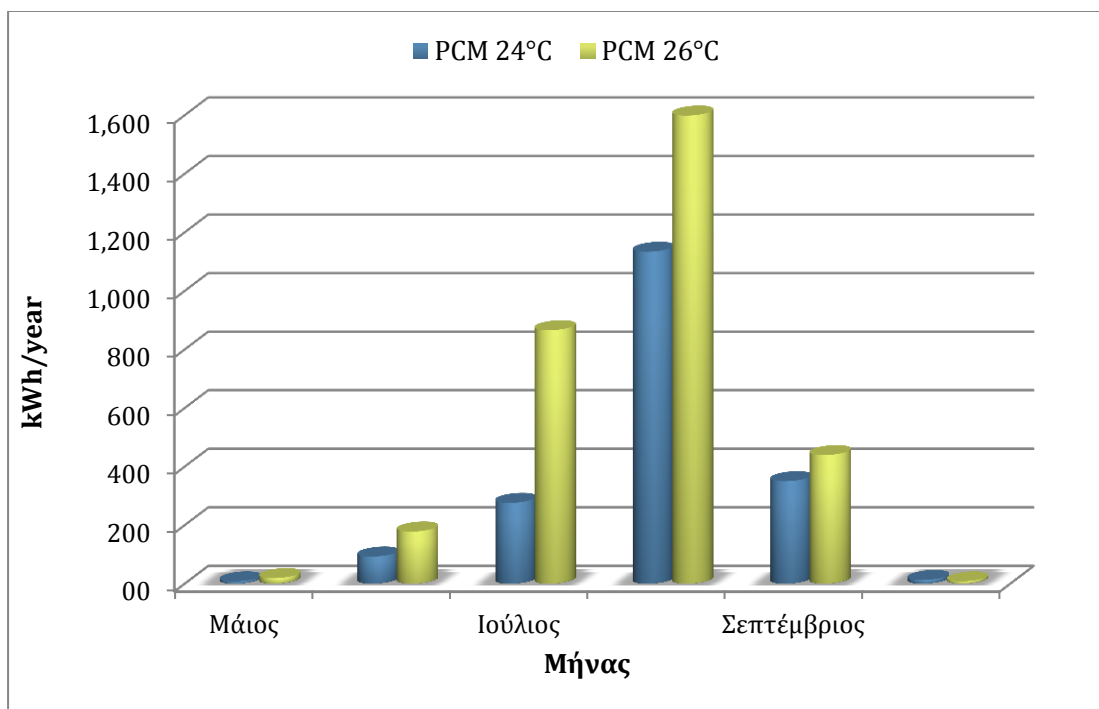
του ΥΑΦ μέσα στις γυψοσανίδες, από 24 °C στους 26 °C ευνοεί τους θερινούς μήνες Ιούλιο - Αύγουστο, οπότε οι ημερήσιες θερμοκρασίες είναι πιο κοντά.



Εικόνα 6.6 Προσδιορισθείσα πειραματική καμπύλη ειδικής θερμοχωρητικότητας της γυψοσανίδας με αλλαγή φάσης στους 26 οC

Πίνακας 6.7 Παραμετρική μελέτη θερμοκρασία αλλαγής φάσης: Απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο για 24 °C και 26 °C ανά μήνα και ετήσια

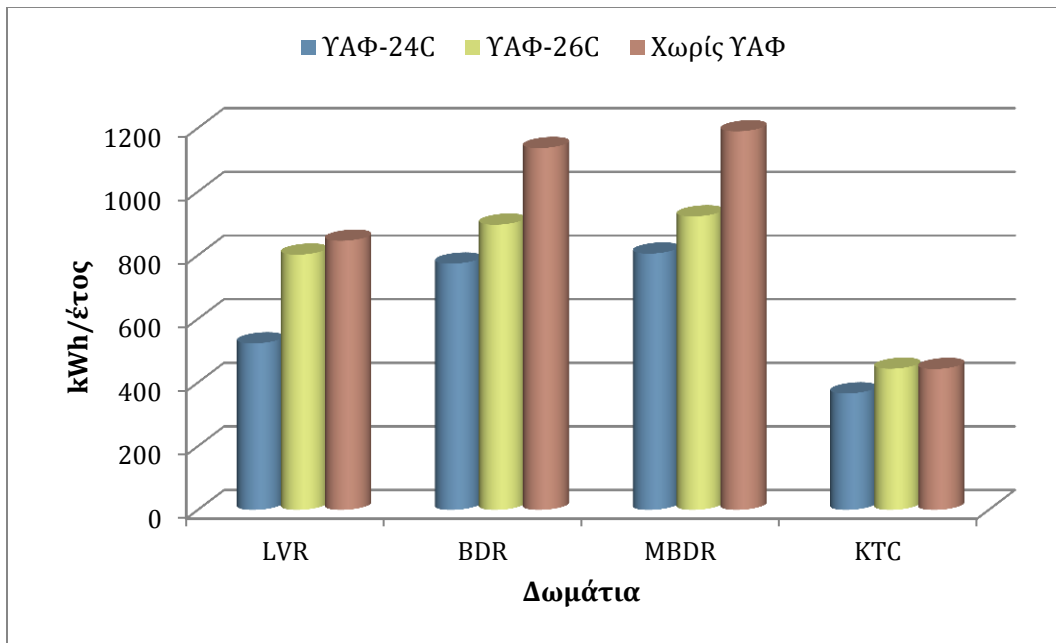
	ΥΑΦ 24°C	ΥΑΦ 26°C
	(kWh)	
Μάιος	5,5	5,7
Ιούνιος	199,3	307,7
Ιούλιος	591,2	707,5
Αύγουστος	1195,3	1339,4
Σεπτέμβριος	694,6	814,7
Οκτώβριος	49,1	55,6
<b>Ετήσιο Ψυκτικό φορτίο</b>	<b>17,88 kWh/m<sup>2</sup> έτος</b>	<b>21,11 kWh/m<sup>2</sup> έτος</b>



**Εικόνα 6.7 Παραμετρική μελέτη θερμοκρασία αλλαγής φάσης: Ετήσιο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο, σύγκριση για γυψοσανίδες με ΥΑΦ στους 24 οC και στους 26 οC αντίστοιχα.**

Παρόλ' αυτά, επειδή οι θερμοκρασίες ξεπερνούν κατά πολύ τους 26 °C, πάλι παρατηρείται μη σωστή λειτουργία του ΥΑΦ, οδηγώντας σε υψηλή απαίτηση ψύξης για αυτούς τους μήνες. Από τα δυο σενάρια που μελετήθηκαν, η επιλογή γυψοσανίδων, οι οποίες εμπεριέχουν ΥΑΦ με αλλαγή φάσης στους 24 °C θεωρείται η ιδανική για την περίπτωση της Αμφιλοχίας. Στην Εικόνα 6.7 παρουσιάζεται η σύγκριση του απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου για τις δυο περιπτώσεις του ΥΑΦ που μελετώνται. Η μελέτη αυτή είναι σημαντικό να γίνεται εκ των προτέρων, κατά τη φάση της ενεργειακής μελέτης, ώστε η επιλογή να οδηγεί στη μεγαλύτερη εξοικονόμηση για τις δεδομένες συνθήκες.

Το διάγραμμα στην Εικόνα 6.8 παρουσιάζει τα διαφορετικά φορτία ψύξης ανά δωμάτιο, για την περίπτωση των δυο ΥΑΦ. Έχοντας παρατηρήσει ότι η θερμοκρασία αέρα στο καθιστικό είναι σχετικά χαμηλή κατά τη διάρκεια της ημέρας (λόγω του μεγάλου όγκου του χώρου), παρατηρούμε ότι οι γυψοσανίδες με ΥΑΦ στους 24 °C καταφέρνουν να μειώσουν τις ψυκτικές ανάγκες σε μεγαλύτερο βαθμό. Η συμπεριφορά των δυο κρεβατοκάμαρων είναι παρόμοια, αλλά συγκρινόμενη με τη συμπεριφορά των γυψοσανίδων με ΥΑΦ στους 26 °C, παρατηρείται ότι η εξοικονόμηση είναι μεγαλύτερη για την περίπτωση του ΥΑΦ στους 24 °C. Στην κουζίνα, η οποία έχει μόνο σε ένα τοίχο γυψοσανίδα με ΥΑΦ, η γυψοσανίδα με ΥΑΦ στους 24 °C καταφέρνει να εξοικονομήσει κάποια ενέργεια, αλλά όχι τόσο σημαντική όσο στα άλλα δωμάτια.

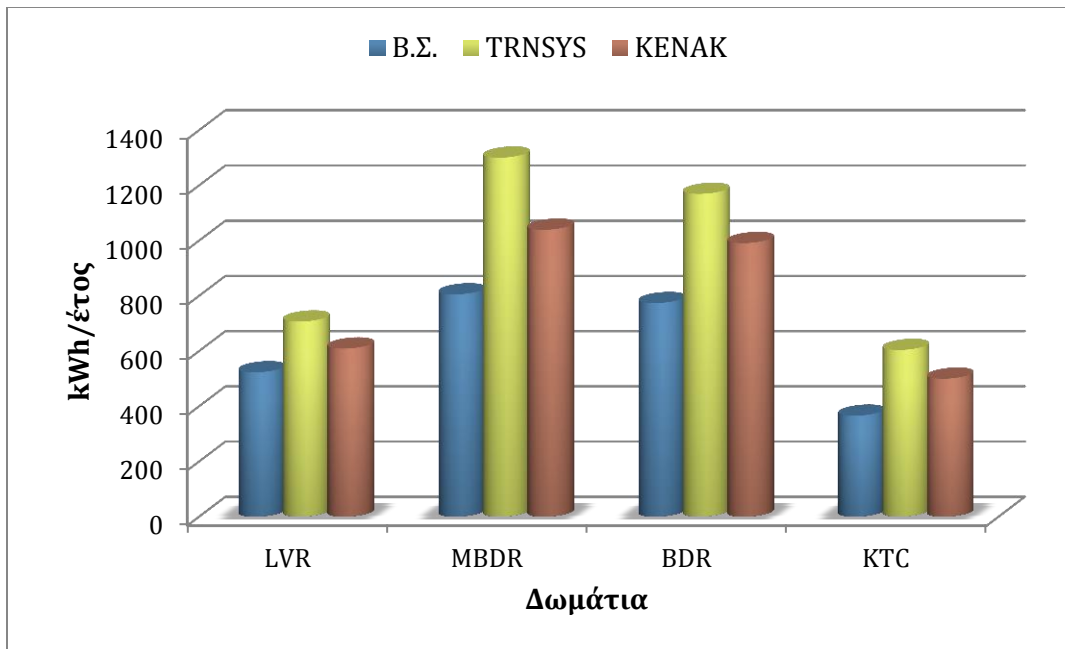


Εικόνα 6.8 Παραμετρική μελέτη θερμοκρασία αλλαγής φάσης: Κατανομή απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου για τα δωμάτια, σύγκριση για γυψοσανίδες με ΥΑΦ στους 24 οC και στους 26 οC αντίστοιχα.

#### 6.4.2. Παραμετρική μελέτη - Αποτελέσματα: Υγρασία

Η σχετική υγρασία των εσωτερικών χώρων καθώς και ο αερισμός του χώρου (η ανανέωση του αέρα, δηλαδή η αντικατάσταση μέρους του εσωτερικού αέρα από νωπό αέρα περιβάλλοντος), συμβάλλουν στην εξασφάλιση των συνθηκών υγιεινής στο εσωτερικό κάθε κτηρίου αλλά και κάθε ανεξάρτητου τμήματος του κτηρίου.

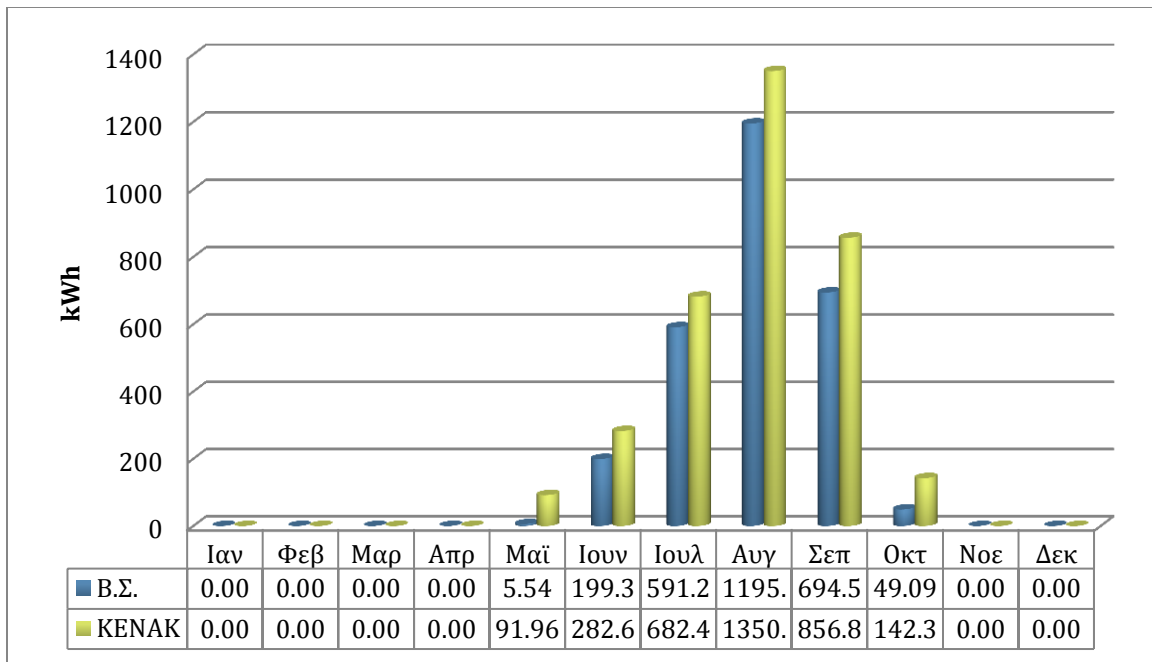
Για να μελετηθεί η επίδραση της υγρασίας σε κάθε θερμική ζώνη και κατά πόσο επηρεάζεται η λειτουργία των ΥΑΦ σε χώρους υψηλής υγρασίας, διεξάγεται παραμετρική μελέτη κατά την οποία: α) η υγρασία διατηρείται σταθερή σε όλες τις θερμικές ζώνες, σύμφωνα με τις τιμές που παρέχονται από την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010 και β) η υγρασία λαμβάνει τις τιμές, όπως υπολογίζονται από την Εξίσωση 5.2.



Εικόνα 6.9 Παραμετρική μελέτη υγρασίας: Ετήσιο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο ανά δωμάτιο

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα από την Εικόνα 6.9, βγαίνουν τα εξής συμπεράσματα:

- Οι τιμές της υγρασίας, οι οποίες βγαίνουν από την Εξίσωση 5.2 και εισάγονται στο TRNSYS, διαφορετικές για κάθε θερμική ζώνη, οδηγούν σε αυξημένα ψυκτικά φορτία. Τα χαμηλότερα φορτία βγαίνουν με την υιοθέτηση των βασικών τιμών του TRNSYS, ενιαία για όλες τις θερμικές ζώνες.
- Οι τιμές που ορίζονται από τον KENAK, διαφέρουν από το B.Σ. κατά μέσο όρο 15%.
- Αναμενόμενη είναι η επίδραση των τιμών της υγρασίας, ιδιαίτερα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, ειδικά στο ποσοστό των ψυκτικών φορτίων, τα οποία προέρχονται από την λανθάνουσα θερμότητα (φορτίο που αναμένεται από την θερμοκρασία υγρού βολβού). Ειδικά τη θερινή περίοδο, πρέπει να υπολογίζονται και τα δυο είδη φορτίων (*sensible & latent cooling load*), επομένως, η γνώση των τιμών υγρασίας, για αυτήν την περίοδο είναι απαραίτητη. Επομένως, η μέτρηση της υγρασίας σε κάθε θερμική ζώνη και η εισαγωγή των τιμών στο μοντέλο προσομοίωσης, θα καταδείξει την επίδρασή της υγρασίας στις θερμικές ζώνες που υπάρχει ΥΑΦ και κατά πόσο επηρεάζει τα ψυκτικά φορτία.



Εικόνα 6.10 Παραμετρική μελέτη υγρασίας: Σύγκριση δυο περιπτώσεων

#### 6.4.3. Παραμετρική μελέτη - Αποτελέσματα: Συνθήκες λειτουργίας

Οι πραγματικές συνθήκες λειτουργίας ενός κτηρίου μπορεί να διαφέρουν κατά περίπτωση, ανάλογα τη χρήση και τους ενοίκους του κτηρίου. Η εξοικονόμηση ενέργειας, ειδικότερα σε μια οικία είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη συμπεριφορά των κατοίκων της. Ο αριθμός και το είδος της οικογένειας (π.χ. νέο ζευγάρι, τετραμελής οικογένεια, ηλικιωμένοι άνθρωποι) επηρεάζει τις ενεργειακές απαιτήσεις καθώς αυξάνονται ή μειώνονται τα φορτία. Ως γνωστόν, τα εσωτερικά κέρδη έχουν μεγαλύτερη επίδραση στην ενεργειακή κατανάλωση όσο πιο ενεργειακά αποδοτικό είναι το κτήριο (de Meester et al., 2013). Επιπλέον, ο χρόνος παραμονής μέσα στην οικία (π.χ. εργαζόμενοι ή συνταξιούχοι) καθώς και η ηλικία των ενοίκων αυξομειώνουν τις ανάγκες για θέρμανση ή ψύξη.

Στην παραμετρική μελέτη, ανάμεσα στις περιπτώσεις που θα μελετηθούν, λαμβάνονται επίσης υπόψη δυο είδη οικογενειών: εργαζόμενο ζευγάρι και ζευγάρι συνταξιούχων. Η ρύθμιση του θερμοστάτη ορίζεται με βάση τον KENAK, αν και στην πραγματικότητα μπορεί να υπάρχουν αποκλίσεις: ο Thomsen μελέτησε οχτώ χαμηλής κατανάλωσης Ευρωπαϊκά σπίτια μέσω μετρήσεων και προσομοιώσεων, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου κατά τη χειμερινή περίοδο, όταν αυτή επιλέγεται από τους ενοίκους είναι 2-3 °C υψηλότερη από την ιδανική θερμοκρασία όπως ορίζεται σύμφωνα με τις Εθνικές Ενεργειακές Οδηγίες (20 °C) (Thomsen et al., 2005).

Για τον υπολογισμό των ψυκτικών απαιτήσεων της πιλοτικής οικίας, ορίζονται ως θερινή περίοδος οι μήνες Μάιος-Οκτώβριος. Η ψύξη του χώρου μπορεί να γίνει είτε με φυσικό αερισμό (άνοιγμα παραθύρων) είτε με μηχανικό αερισμό (κλιματισμό). Κατά KENAK, η θερμοκρασία των ψυκτικών συστημάτων για τη θερινή περίοδο ορίζεται στους 26 °C. Αυτή

η τιμή θα χρησιμοποιηθεί και στις περαιτέρω προσομοιώσεις, όταν αναφερόμαστε σε κλιματισμό. Οι ειδικές συνθήκες λειτουργίας των επί μέρους χώρων ενός κτηρίου (WC, διαδρόμων, αποθηκών, κ.ά.) λαμβάνονται υπόψη μόνο κατά το σχεδιασμό του κτηρίου ή κατά το σχεδιασμό της θερμικής ζώνης, όμως, κατά την παρούσα μελέτη λαμβάνεται υπόψη μια ενιαία τιμή για κάθε παράμετρο (θερμοκρασία, σχετική υγρασία κ.ά.), όπως αυτή λαμβάνεται από την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010.

Για τον υπολογισμό του αερισμού του κτηρίου λαμβάνεται υπόψη ξεχωριστά ο αερισμός από τις διαφυγές αέρα λόγω αεροστεγανότητας του κτηρίου (διείσδυση αέρα από χαραμάδες κουφωμάτων κ.ά.), από τη χρήση φυσικού αερισμού για την επίτευξη άνετων και υγιεινών συνθηκών διαβίωσης και από τη χρήση μηχανικού αερισμού στην περίπτωση που υπάρχει ανάλογη διάταξη (βλ. παράγραφο 5.6.1).

### Διαφυγές αέρα λόγω αεροστεγανότητας

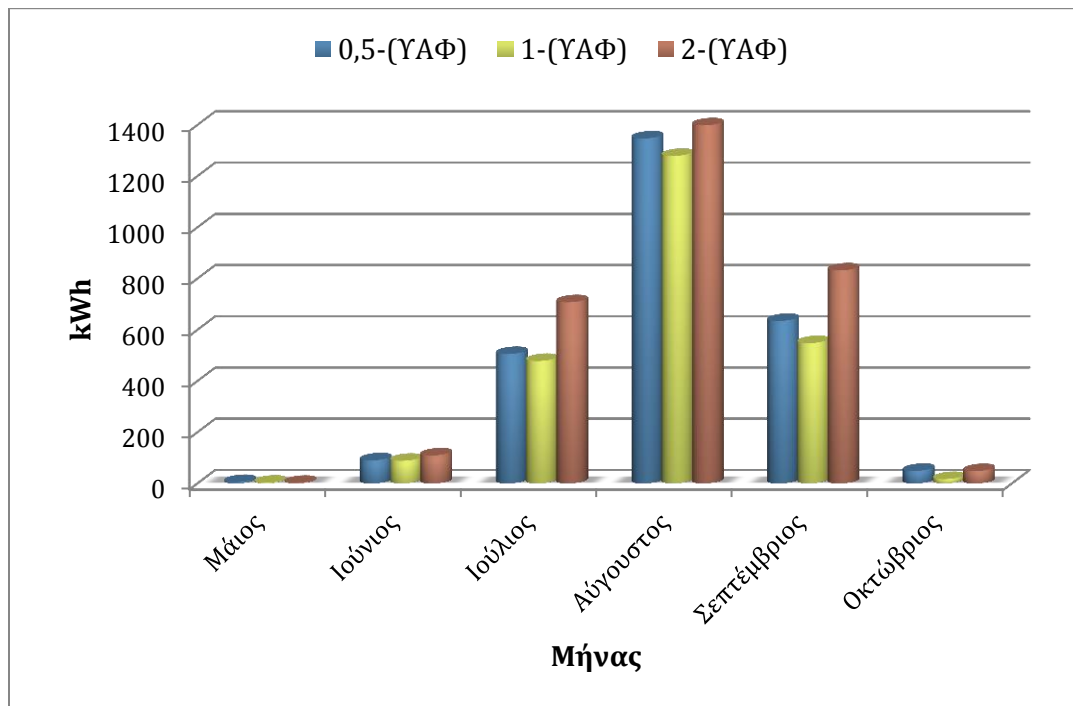
Οι διαφυγές αέρα εφαρμόζονται μόνο στις κατοικίες, και μέσω της χρήσης των υφιστάμενων κουφωμάτων και καταγράφεται σε  $m^3/s$ . Με βάση τον KENAK, θεωρήθηκε ότι ο συνολικός αερισμός των χώρων (φυσικός αερισμός και διείσδυση) υπολογίζεται βάσει του όγκου του χώρου και όχι των ανοιγμάτων που διαθέτει. Επομένως, η τιμή της παροχής αέρα ανά όγκο χώρου λαμβάνεται ίση με  $0,5 m^3/h/m^3$  από τον πίνακα 3.27 της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO 13789 E2:2009 [X], θεωρώντας ότι υπάρχουν κουφώματα σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα, με επαρκή αεροστεγανότητα. Η τιμή αυτή υιοθετήθηκε και κατά την επαλήθευση του μοντέλου (βλ. Κεφ. 5.3) και τα αποτελέσματα κρίθηκαν ικανοποιητικά.

Για λόγους πληρότητας, εξετάζουμε την επίδραση που έχει η τιμή της αεροστεγανότητας στην πιλοτική κατοικία. Οι τιμές που μελετώνται λαμβάνονται από τον Πίνακα 3.27 της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010. Θεωρείται απεριόριστη ψυκτική ισχύς με θερμοκρασία ενεργοποίησης στους  $26\text{ }^\circ\text{C}$ . Η ενέργεια, η οποία απαιτείται για την ψύξη της κατοικίας όλο το χρόνο για όλες τις περιπτώσεις αεροστεγανότητας παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.8.

**Πίνακας 6.8 Παραμετρική μελέτη Διαφυγών λόγω αεροστεγανότητας: Ετήσιο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο για τρεις περιπτώσεις**

	Παραμετρική μελέτη: Διαφυγές ( $m^3/h/m^3$ )		
	0,5	1	2
Απαιτούμενη ενέργεια – περίπτωση με ΥΑΦ	17,88 kWh/m <sup>2</sup>	15,78 kWh/m <sup>2</sup>	20,25 kWh/m <sup>2</sup>
Απαιτούμενη ενέργεια – περίπτωση χωρίς ΥΑΦ	23,09 kWh/m <sup>2</sup>	22,04 kWh/m <sup>2</sup>	29,39 kWh/m <sup>2</sup>

Από τον Πίνακα 6.8, παρατηρείται ότι η περίπτωση κατά την οποία έχουμε κουφώματα και ανοίγματα τέτοια, ώστε η τιμή της αεροστεγανότητας να είναι ίση με 1 τότε η εξοικονόμηση είναι η μέγιστη. Σαφώς η ίδια τάση παρατηρείται και στην περίπτωση κατά την οποία δεν είναι εγκατεστημένες γυψοσανίδες με ΥΑΦ στην οικία. Η μείωση αυτή, σε σύγκριση με την περίπτωση όπου η τιμή της αεροστεγανότητας είναι  $0.5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$ , οφείλεται στο γεγονός ότι ενδεχομένως, μέσα στην οικία δημιουργούνται συνθήκες «θερμοκηπίου», δηλαδή παρατηρούνται υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της ημέρας, οι οποίες όμως, λόγω έλλειψης αερισμού διατηρούνται, οδηγώντας σε υψηλότερες ανάγκης ψύξης. Από την άλλη, όταν αυξηθεί η τιμή της αεροστεγανότητας, τότε παρατηρείται η χειρίστη περίπτωση, καθώς η εισαγωγή, έστω και ελάχιστου, θερμού αέρα κατά την θερινή κυρίως περίοδο, θερμαίνει το χώρο γρηγορότερα, οδηγώντας, για ακόμη μια φορά, σε αυξημένες ψυκτικές ανάγκες. Η Εικόνα 6.10 βοηθά καλύτερα στην εξήγηση του φαινομένου, καθώς παρουσιάζεται η ετήσια διακύμανση των ψυκτικών αναγκών για όλες τις περιπτώσεις διαφυγών λόγω αεροστεγανότητας.

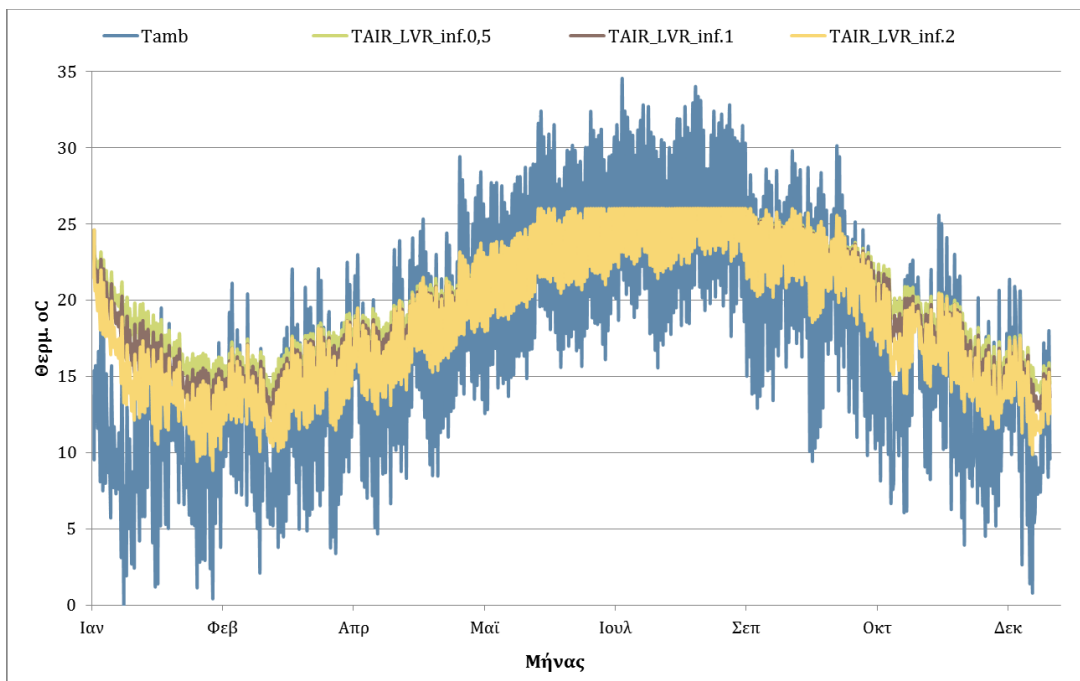


**Εικόνα 6.11** Παραμετρική μελέτη Διαφυγών λόγω αεροστεγανότητας: Κατανομή απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου για τρεις περιπτώσεις

Στην Εικόνα 6.11 παρουσιάζεται το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας για όλες τις περιπτώσεις αεροστεγανότητας, οι οποίες μελετήθηκαν. Δεδομένου ότι όλες οι άλλες παράμετροι παραμένουν σταθερές και για τις τρεις περιπτώσεις, η εξοικονόμηση προέρχεται από την μεταβολή της τιμής των άδηλων απωλειών μέσα στο χώρο.



Πραγματικά, αυτό σημαίνει ότι η ύπαρξη αέρα ( ή/και ρεύματος αέρα ανάμεσα τις ζώνες), δημιουργεί κυκλοφορία αέρα, η οποία επηρεάζει τις συνθήκες μέσα στην κάθε θερμική ζώνη. Μεγάλη τιμή της αεροστεγανότητας υποδηλώνει και μεγαλύτερη κυκλοφορία αέρα. Αυτό μπορεί να διαφανεί από τις θερμοκρασίες που επικρατούν μέσα σε μια θερμική ζώνη κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, για τις τρεις περιπτώσεις που μελετώνται. Στην Εικόνα 6.12 παρουσιάζεται η διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα μέσα στο υπνοδωμάτιο. Παρατηρείται η τάση, όσο μεγαλώνουν οι άδηλες απώλειες μέσα στο χώρο, η θερμοκρασία να είναι ελαφρά χαμηλότερη τη χειμερινή περίοδο και υψηλότερες κατά τη θερινή. Συνεπώς, κατά τη θερινή περίοδο, αυξάνονται και οι ανάγκες για ψύξη. Καθότι η αλλαγή φάσης του ΥΑΦ που χρησιμοποιείται δεν ευνοείται από τις υψηλές θερμοκρασίες των μηνών Ιούλιος – Αύγουστος, η διαφορά στις θερμοκρασίες που επιφέρει η αύξηση των τιμών της αεροστεγανότητας, δεν μπορεί να καλυφθεί από το ΥΑΦ.



**Εικόνα 6.12 Παραμετρική μελέτη Διαφυγών λόγω αεροστεγανότητας: Διακύμανση θερμοκρασιών εσωτερικού αέρα στο καθιστικό (LVR) για τρεις περιπτώσεις, με ενεργοποιημένη την ψύξη στους 26 οC**

Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο μήνας Αύγουστος, ο οποίος παρουσιάζει αυξημένες ανάγκες ψύξης. Από τους υπολογισμούς, φαίνεται ότι υπάρχει μια βέλτιστη τιμή αεροστεγανότητας, η οποία μεταφράζεται σε σωστή επιλογή κουφωμάτων, κατά την οποία υπάρχει μείωση ψυκτικής ανάγκης. Η επιλογή αυτή ισχυροποιείται αν κοιτάξουμε τους εκατέρωθεν μήνες, καθώς και εκεί παρουσιάζεται η μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας. Στην περίπτωση μας, η επαλήθευση του μοντέλου έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα με την χρήση της πρώτης τιμής. Οι υπόλοιποι υπολογισμοί από εδώ και πέρα θα γίνουν με αυτήν την τιμή, ενώ στην παράγραφο 6.5, όπου θα παρουσιαστούν οι βέλτιστες περιπτώσεις κατά τις οποίες

παρουσιάζεται η μέγιστη εξοικονόμηση ψυκτικής ενέργειας, θα υιοθετηθεί η δεύτερη τιμή, βασιζόμενοι στα αποτελέσματα από την παραπάνω εικόνα.

### Φυσικός αερισμός

Η μελέτη της τιμής της αεροστεγανότητας για την πιλοτική οικία, κατέδειξε την ανάγκη φυσικού αερισμού κατά τη διάρκεια της ημέρας, με στόχο την ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου. Ο φυσικός αερισμός είναι χρήσιμος ιδιαίτερα τις βραδυνές ώρες, καθώς κάποια χρονική περίοδο του έτους βοηθά στην τήξη του ΥΑΦ και τη σωστή λειτουργία του την επόμενη ημέρα. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνονται τα φορτία ψύξης για τη συγκεκριμένη περίοδο.

Για την παραμετρική μελέτη του φυσικού αερισμού, εξετάστηκαν οι εξής περιπτώσεις (βλ. Πίνακας 6.9):

Πίνακας 6.9 Παραμετρική μελέτη Φυσικού Αερισμού: Εξεταζόμενες περιπτώσεις

	Φυσικός Αερισμός	Κλιματισμός	Δωμάτια		Περίοδος
			MBDR-BDR	LVR	
ΦΑ1	20.00-8.00	-	✓	✓	Μάιος-Οκτώβριος
ΦΑ2	20.00-8.00	-	✓	X	Μάιος-Οκτώβριος
ΦΑ3	8.00-10.00 & 20.00-00.00	-	✓	✓	Μάιος-Οκτώβριος

Στην περίπτωση αυτή, ο δείκτης εξοικονόμησης δεν είναι το απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο, καθώς κανένα σύστημα ψύξης δεν είναι ενεργοποιημένο. Συμπεράσματα μπορούν να βγουν αν μελετηθούν οι θερμοκρασίες του εσωτερικού αέρα, για τα διάφορα σενάρια, τα οποία θα μελετηθούν. Η εσωτερική θερμοκρασία και η διακύμανση της, ειδικά την θερινή περίοδο, είναι δείγμα των συνθηκών άνεσης που επικρατούν μέσα στην οικία, και καταδεικνύουν το εύρος της περιόδου κατά την οποία χρειάζεται ψύξη.

Στην προηγούμενη παράγραφο, το σύστημα ψύξης είχε θερμοκρασία ενεργοποίησης τους 26 °C. Η περίοδος ψύξης ξεκινούσε τις τελευταίες μέρες του Μαΐου για την περίπτωση κατά την οποία δεν είχαν εγκατασταθεί γυψοσανίδες με ΥΑΦ, και έφτανε μέχρι το πρώτο δεκαήμερο του Οκτώβρη (βλ. Εικόνα 6.7). Για την περίπτωση όπου γυψοσανίδες ΥΑΦ είναι εγκατεστημένες στην οικία, τότε το εύρος διαμορφώνεται για την περίοδο Ιούνιος-Σεπτέμβρης. Με την μελέτη των τριών περιπτώσεων (ΦΑ1-ΦΑ3), θα ερευνηθεί, κατά πόσο η περίοδος αυτή θα μειωθεί.

Στον Πίνακα 6.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις της μελέτης. Εξετάζοντας τα αποτελέσματα πιο προσεκτικά, βγαίνουν τα εξής συμπεράσματα:

- Τα δωμάτια που καθορίζουν πόσες μέρες θα χρειασθεί ψύξη η οικία είναι οι κρεβατοκάμαρες στον πρώτο όροφο και όχι το καθιστικό. Σε αυτό μεγάλο ρόλο παίζει

ο όγκος του κάθε δωματίου, ο προσανατολισμός του και τα ανοίγματά του (σκίαση). Σε αντίθεση με το καθιστικό και οι δυο κρεβατοκάμαρες έχουν νότιο προσανατολισμό. Επιπλέον, ο όγκος των δυο αυτών δωματίων είναι σχεδόν το 1/3 του καθιστικού, συνεπώς ο εσωτερικός αέρας επηρεάζεται πιο πολύ και πιο γρήγορα από τις μεταβολές της εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος και την ακτινοβολία. Σε επίπεδο ανοιγμάτων, η αναλογία ανοίγματα και όγκου χώρου είναι περίπου το ίδιο για τα τρία δωμάτια.

**Πίνακας 6.10 Παραμετρική μελέτη Φυσικού Αερισμού: Αριθμός ημερών ψύξης συνολικά και ανά δωμάτιο, για τρεις περιπτώσεις, σύγκριση με Β.Σ. και Σ.Α.**

Εξεταζόμενη περίπτωση	Εύρος Περιόδου ψύξης	Αριθμός ημερών ψύξης	Αριθμός ημερών με εσ. θερμοκ. αέρα πάνω από 26°C (LVR)	Αριθμός ημερών με εσ. θερμοκ. αέρα πάνω από 26°C(MBDR- BDR)
Σενάριο Αναφοράς (Σ.Α.)	Μάιος-Οκτώβρης	129	94	129
Βασικό Σενάριο (Β.Σ.)	Ιούνιος-Σεπτέμβριος	112	83	112
ΦΑ1	Ιούνιος-Σεπτέμβριος	93	66	93
ΦΑ2	Ιούνιος-Σεπτέμβριος	93	74	93
ΦΑ3	Ιούνιος-Σεπτέμβριος	98	81	98

- Συγκρίνοντας το σενάριο αναφοράς (χωρίς ΥΑΦ) και το βασικό σενάριο (ύπαρξη ΥΑΦ), παρατηρείται μείωση του αριθμού ημερών που απαιτείται ψύξη κατά 17 ημέρες. Αυτές οι ημέρες εντοπίζονται το Μάιο και τον Οκτώβρη, όπου η εγκατάσταση γυψοσανίδων με ΥΑΦ βοηθά στην μείωση του ψυκτικού φορτίου, μηδενίζοντας ουσιαστικά την ανάγκη ψύξης τις εν λόγω ημέρες.
- Συγκρίνοντας τα σενάρια ΦΑ1 και ΦΑ2, παρατηρούμε ότι πρόκειται για τα σενάρια κατά τα οποία ελαχιστοποιείται ο αριθμός ημερών, κατά τις οποίες η θερμοκρασία ξεπερνά τους 26°C. Υπενθυμίζεται ότι η διαφορά των σεναρίων είναι ο αερισμός ή όχι του καθιστικού. Για αυτό τον λόγο υπάρχει και η αύξηση των ημερών από 66 σε 74, όταν το καθιστικό δεν αερίζεται.
- Το σενάριο ΦΑ1 είναι ίσως το πιο ρεαλιστικό εκ των τριών για τη θερινή περίοδο και δη για τους μήνες με τη μεγαλύτερη θερμοκρασία. Ακολουθώντας την συνήθη συμπεριφορά των χρηστών, είτε πρόκειται για εργαζόμενο ζευγάρι ή για ζευγάρι ηλικιωμένων, κατά τη διάρκεια της νύχτας υπάρχουν ανοιχτά παράθυρα, λόγω δροσισμού και αερισμού. Για την περίοδο όμως Μάιος-Ιούνιος και τέλη Σεπτεμβρίου-Οκτώβριος, το ρεαλιστικότερο σενάριο είναι το ΦΑ3, καθώς η θερμοκρασία κατά τη

διάρκεια της νύχτας παραμένει χαμηλή, με αποτέλεσμα να μην προτιμάται να μένουν ανοικτά τα παράθυρα στην οικία.

### Κλιματισμός

Ο φυσικός αερισμός, ειδικά στις Μεσογειακές χώρες, δεν επαρκεί κατά τη θερινή περίοδο για την επίτευξη συνθηκών άνεσης μέσα στα κτήρια. Επομένως, είναι απαραίτητη η χρήση συστήματος ψύξης, για κάποιες ώρες της ημέρας. Η χρήση κλιματισμού στις κατοικίες εξαρτάται από τους ενοίκους σε μεγάλο βαθμό. Άνθρωποι που εργάζονται ενδεχομένως θα τη χρησιμοποιούν τις βραδυνές ώρες, ενώ συνταξιούχοι θα ψύχουν την οικία όλη την ημέρα. Συνεπώς, τα σενάρια κλιματισμού της οικίας εξαρτώνται από την συμπεριφορά των χρηστών και πρέπει να ληφθούν υπόψη όλες οι περιπτώσεις. Στην παρούσα διατριβή, οι περιπτώσεις που εξετάζονται παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.11.

Πίνακας 6.11 Παραμετρική μελέτη Κλιματισμού: Εξεταζόμενες περιπτώσεις

	Φυσικός Αερισμός	Κλιματισμός	Δωμάτια		Περίοδος
			MBDR-BDR	LVR	
ΚΛ1	-	Συνεχόμενος	✓	✓	Μάιος-Οκτώβριος
ΚΛ2	-	12.00-16.00	✓	✓	Μάιος-Οκτώβριος
ΚΛ3	-	20.00-21.00	✓	✓	Μάιος-Οκτώβριος

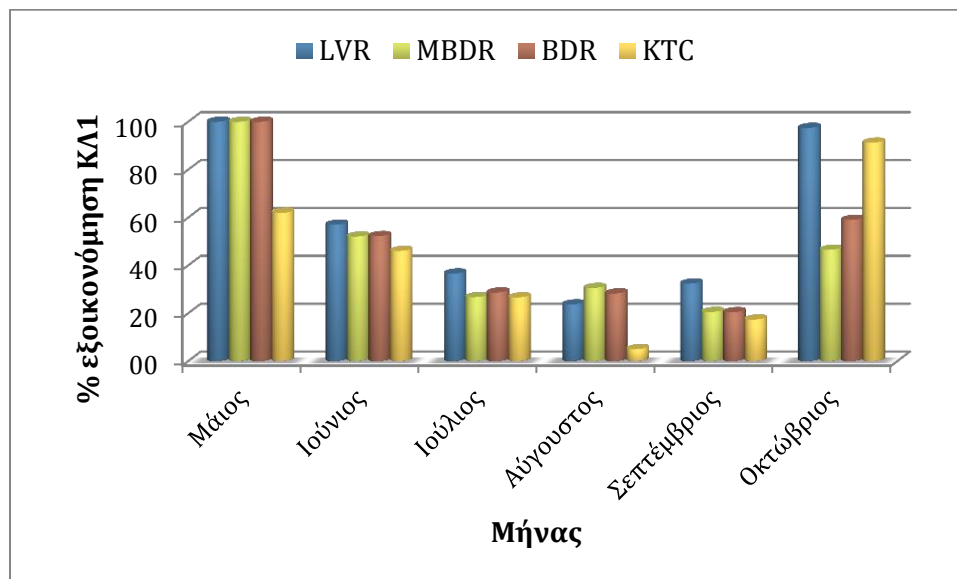
Πίνακας 6.12 Παραμετρική μελέτη Κλιματισμού: Ετήσιο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο για δυο περιπτώσεις

	Παραμετρική μελέτη: Κλιματισμός (kWh/m <sup>2</sup> έτος)		
	ΚΛ1	ΚΛ2	ΚΛ3
Απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο- περίπτωση με ΥΑΦ	17,88	16,82	12,01
Απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο- περίπτωση χωρίς ΥΑΦ	25,37	22,06	17,65

Στον Πίνακα 6.12 παρουσιάζεται η συγκριτική μελέτη για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν, για την περίπτωση που έχουμε γυψοσανίδες με ΥΑΦ αλλά και για την περίπτωση που έχουμε απλές γυψοσανίδες [Stamatiadou et al., 2013]. Η σύγκριση μεταξύ των τριών σεναρίων κλιματισμού δεν είναι εφικτή. Αν θεωρηθεί ότι το δεύτερο σενάριο μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση ενός ηλικιωμένου ζευγαριού, το οποίο βρίσκεται στην κατοικία όλη μέρα και χρειάζεται ψύξη τις μεσημεριανές ώρες, τότε το τρίτο σενάριο μπορεί να συσχετιστεί με τη συμπεριφορά ενός εργαζόμενου ζευγαριού, το οποίο λείπει

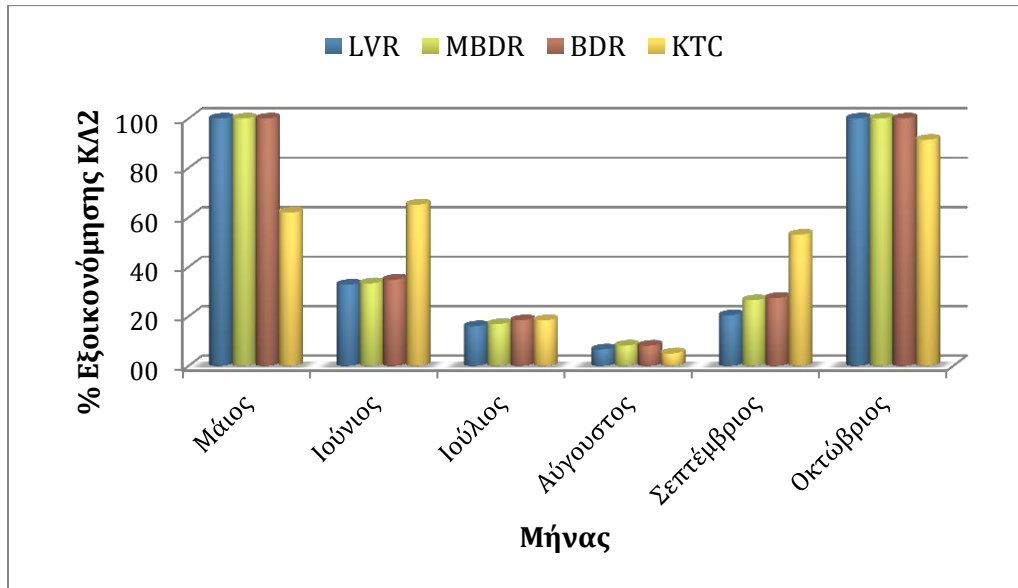
αρκετές ώρες από την κατοικία και έχει ανάγκη ψύξη κάποιες ώρες το βράδυ. Εξάλλου, οι ανάγκες για θέρμανση ή ψύξη μεταβάλλονται και λόγω ηλικίας, για αυτό το λόγο, μια ώρα κλιματισμό το βράδυ και ενδεχομένως φυσικός αερισμός μετά, κατά τη θερινή περίοδο, είναι πιο ρεαλιστικό για νεότερα ζευγάρια. Η συμπεριφορά του χρήστη καθορίζει κατά πολύ την ενεργειακή συμπεριφορά οποιασδήποτε οικίας, με αποτέλεσμα καταναλώσεις ενέργειας είτε για ψύξη είτε για θέρμανση, να μεταβάλλονται ακόμη και για ίδιες οικίες.

Εμβαθύνοντας λίγο στα αποτελέσματα του Πίνακα 6.12, εξετάζεται κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Για την περίπτωση όπου η ψύξη είναι συνεχής και αδιάλειπτη, το ποσοστό μείωσης για κάθε δωμάτιο, για την περίοδο Ιούνιος-Σεπτέμβριος, παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.13 Παραμετρική μελέτη Κλιματισμού: % Εξοικονόμησης ενέργειας για την περίπτωση ΚΛ1, ανά μήνα. Ο μήνας με τα μεγαλύτερα ποσοστά μείωσης, τα οποία φτάνουν και το 50% είναι ο Ιούνιος. Ακολουθούν ο Ιούλιος με τον Σεπτέμβρη και τέλος ο Αύγουστος, μήνας κατά τον οποίο το ποσοστό μείωσης δεν ξεπερνά το 10%. Η μεγαλύτερη μείωση πετυχαίνεται τους μήνες κατά τους οποίους το ονομαστικό ψυκτικό φορτίο είναι το μικρότερο. Αυτό σημαίνει, ότι υπάρχουν μέρες κατά τις οποίες, το ψυκτικό φορτίο να είναι μικρό και με την εισαγωγή των γυψοσανίδων με ΥΑΦ, το φορτίο να μηδενίζεται. Υπενθυμίζεται ότι οι θερμοκρασίες εξωτερικού περιβάλλοντος για τον μήνα Ιούνιο και Σεπτέμβριο είναι κοντά στην θερμοκρασία αλλαγής φάσης του ΥΑΦ, με αποτέλεσμα την καλύτερη λειτουργία του. Εν αντιθέσει, ο Αύγουστος έχει υψηλότερες θερμοκρασίες και το απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο είναι μεγάλο. Το εύρος θερμοκρασιών για κάποιες (αν όχι όλες) τις ημέρες έχει ξεπεράσει κατά 5-7 °C, το σημείο λειτουργίας του ΥΑΦ, και για αυτό το λόγο το ποσοστό μείωσης είναι μικρό. Οι διαφορές που παρατηρούνται κατά το μήνα Αύγουστο για τις δυο περιπτώσεις, αφορούν κάποιες ημέρες, κατά τις οποίες οι νυχτερινές θερμοκρασίες του εξωτερικού περιβάλλοντος είναι σχετικά χαμηλές (κυρίως προς το τέλος του μήνα).

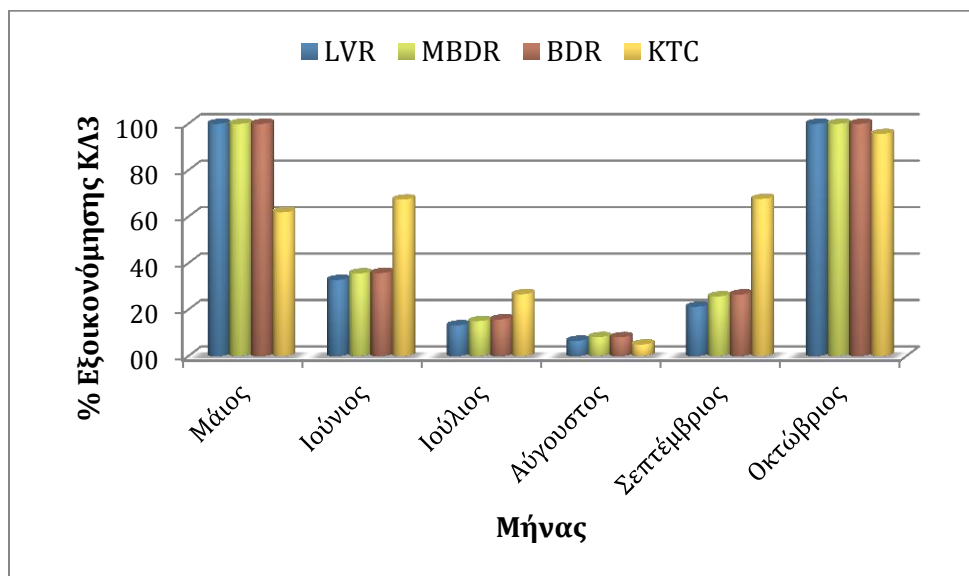


Εικόνα 6.13 Παραμετρική μελέτη Κλιματισμού: % Εξοικονόμησης ενέργειας για την περίπτωση ΚΛ1, ανά μήνα

Στην περίπτωση κατά την οποία ενεργοποιείται ο κλιματισμός τις μεσημεριανές ώρες (ΚΛ2), είναι εμφανές ότι τα μεγαλύτερα ποσοστά μείωσης του φορτίου συμβαίνουν τους μήνες Ιούνιο και Σεπτέμβριο. Ενισχύοντας την λειτουργία του ΥΑΦ, το απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο είναι μειωμένο αφενός λόγω των μειωμένων ημερήσιων ωρών λειτουργίας του συστήματος ψύξης, αφετέρου λόγω της επίδρασης του ΥΑΦ, ειδικά τις ημέρες κατά τις οποίες η εξωτερική θερμοκρασία έχει εύρος 19-22 °C, θερμοκρασία η οποία ισοδυναμεί με 21-24°C στον εσωτερικό χώρο.



Εικόνα 6.14 Παραμετρική μελέτη Κλιματισμού: % Εξοικονόμησης ενέργειας για την περίπτωση ΚΛ2, ανά μήνα



Εικόνα 6.15 Παραμετρική μελέτη Κλιματισμού: % Εξοικονόμησης ενέργειας για την περίπτωση ΚΛ3, ανά μήνα

Ίδια περίπου εικόνα διαμορφώνεται και για την τρίτη περίπτωση (ΚΛ3), μόνο που σε αυτήν την περίπτωση, το ονομαστικό απαιτούμενο φορτίο είναι πολύ μικρότερο, καθώς οι ώρες λειτουργίας είναι μειωμένες αρκετά. Τα ποσοστά μείωσης όμως, ακολουθούν την τάση που έχει διαγραφεί από τις προηγούμενες περιπτώσεις (Εικόνα 6.15).

### Συνδυασμός φυσικού και μηχανικού αερισμού

Στην πραγματικότητα, ο συνδυασμός των παραπάνω περιπτώσεων περιγράφει ρεαλιστικότερα τη χρήση σε μία κατοικία. Ο φυσικός αερισμός των σπιτιών, ειδικά τις πρωινές και βραδυνές ώρες, συνδυάζονται με τη χρήση κλιματισμού, κυρίως τις μεσημεριανές. Από την άλλη, η ψύξη όλων ή μερικών δωματίων της οικίας είναι υποκειμενική και επαφίεται στις ανάγκες των ενοίκων και τη χρήση των δωματίων από αυτούς τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Συνεπώς, τα σενάρια που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.13, είναι αυτά που προσεγγίζουν τη πραγματική συμπεριφορά των ενοίκων μιας οικίας.

Πίνακας 6.13 Παραμετρική μελέτη Συνδυασμού ΦΑ και ΚΛ: Εξεταζόμενες περιπτώσεις

	Φυσικός Αερισμός	Κλιματισμός	Δωμάτια		Περίοδος
			MBDR-BDR	LVR	
Σ1	20.00-8.00	12.00-20.00	✓	✓	Μάιος-Οκτώβριος
Σ2	20.00-8.00	12.00-20.00	X	✓	Μάιος-Οκτώβριος
Σ3	21.00-8.00	19.00-21.00	✓	✓	Μάιος-Οκτώβριος
Σ4	8.00-10.00 & 20.00-00.00	-	✓	✓	Μάιος-Ιούνιος-Σεπτέμβριος-Οκτώβριος
	20.00-8.00	12.00-20.00	✓ (αερισμός)	✓ (ψύξη&αερισμός)	Ιούλιος και Αύγουστος
Σ5	8.00-10.00 & 20.00-00.00	-	✓	✓	Μάιος-Ιούνιος-Σεπτέμβριος-Οκτώβριος
	20.00-8.00	18.00-20.00	✓ (αερισμός)	✓ (ψύξη&αερισμός)	Ιούλιος και Αύγουστος

Εξετάζοντας πιο προσεκτικά τις προηγούμενες περιπτώσεις, βγαίνουν τα εξής συμπεράσματα:

- Οι περιπτώσεις Σ4 & Σ5 θεωρούνται πιο ρεαλιστικές, καθώς το σύστημα ψύξης δεν ξεκινάει να λειτουργεί από τον Μάιο σε μια τυπική κατοικία και σίγουρα δεν φτάνει μέχρι τέλη Σεπτέμβρη. Συνήθως, όταν πρόκειται για ιδιωτικές κατοικίες, οι ένοικοι χρησιμοποιούν την ψύξη τους πιο ζεστούς μήνες του καλοκαιριού, δηλαδή Ιούλιο και Αύγουστο.
- Η περίπτωση Σ4 προυποθέτει κάποιος να μένει όλη την ημέρα μέσα στην οικία, επομένως απευθύνεται σε ηλικιωμένους ή άλλες ευπαθείς ομάδες. Το Σ5 κάλλιστα θα μπορούσε να συνδεθεί με τη συμπεριφορά χρηστών, οι οποίοι εργάζονται και ενεργοποιούν την ψύξη τη στιγμή που επιστρέφουν στην οικία.

- Οι περιπτώσεις Σ1-Σ2-Σ3 βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του ΥΑΦ και μάλιστα της διαδικασίας τήξης του, καθώς είναι σχεδόν παρόμοια με τις περιπτώσεις ΚΛ1-ΚΛ2-ΚΛ3, μόνο που τώρα υπάρχει και επικουρικός βραδυνός φυσικός αερισμός. Συγκεντρωτικά όλες οι περιπτώσεις, οι οποίες μελετήθηκαν για την μελέτη των συνθηκών λειτουργίας, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.13.

Ο Πίνακας 6.14 συγκεντρώνει τα ετήσια ποσοστά εξοικονόμησης και απαιτούμενα ψυκτικά φορτία για κάθε μια από τις περιπτώσεις Σ1-Σ5.

**Πίνακας 6.14 Παραμετρική μελέτη Συνδυασμού ΦΑ και ΚΛ: Ετήσιο ψυκτικό φορτίο και % εξοικονόμησης**

Εξεταζόμενη Περίπτωση		Σύνολο (όλες οι θερμικές ζώνες)	
		Απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο (kWh/year m <sup>2</sup> )	% Μείωσης ψυκτικής ενέργειας (συνολικά)
Σ1	Με ΥΑΦ	17,99	25
	Χωρίς ΥΑΦ	23,99	
Σ2	Με ΥΑΦ	10,57	24,4
	Χωρίς ΥΑΦ	13,98	
Σ3	Με ΥΑΦ	14,1	25,4
	Χωρίς ΥΑΦ	18,91	
Σ4	Με ΥΑΦ	9,27	26,3
	Χωρίς ΥΑΦ	12,58	
Σ5	Με ΥΑΦ	7,29	27,6
	Χωρίς ΥΑΦ	10,07	

Παρατηρώντας τον Πίνακα 6.14, βγαίνουν αβίαστα τα πρώτα συμπεράσματα:

- Ο βραδυνός αερισμός βοήθησε στην καλύτερη λειτουργία του ΥΑΦ και το ποσοστό μείωσης του ψυκτικού φορτίου αυξήθηκε, σε σύγκριση με τις περιπτώσεις ΚΛ1-ΚΛ2-ΚΛ3, οπότε το ποσοστό κυμαινόταν κατά μέσο όρο στο 23%.
- Τις ώρες κατά τις οποίες ο βραδινός αερισμός συνδυάζεται με απογευματινή ψύξη, δίνουν τα μεγαλύτερα ποσοστά μείωσης (περίπτωση Σ5 έναντι Σ4, και περίπτωση Σ3 έναντι περιπτώσεων Σ1 & Σ2).



- Τις περιπτώσεις κατά τις οποίες το σύστημα ψύξης ενεργοποιείται τους δυο θερμότερους μήνες, ενώ τους υπόλοιπους μήνες υπάρχει μόνο αερισμός των χώρων, τότε παρουσιάζονται τα μεγαλύτερα ποσοστά μείωσης (περιπτώσεις Σ4 & Σ5).

Εμβαθύνοντας στα αποτελέσματα, ο Πίνακας 6.15 παρουσιάζει το μέρισμα των τριών κυρίων δωματίων (LVR-MBDR-BDR) στα συνολικά ποσοστά. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα ετήσια ποσοστά μείωσης του ψυκτικού φορτίου, για κάθε περίπτωση, συνολικά αλλά και ανά δωμάτιο. Στις περιπτώσεις Σ2, Σ4 & Σ5, δεν υπάρχει ψυκτικό φορτίο για τις κρεβατοκάμαρες.

**Πίνακας 6.15 Παραμετρική μελέτη Συνδυασμού ΦΑ και ΚΛ: Ετήσιο ψυκτικό φορτίο και % εξοικονόμησης ανά δωμάτιο**

Εξεταζόμενη Περίπτωση		LVR		MBDR-BDR	
		Απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο (kWh/year m <sup>2</sup> )	% Μείωσης ψυκτικής ενέργειας (συνολικά)	Απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο (kWh/year m <sup>2</sup> )	% Μείωσης ψυκτικής ενέργειας (συνολικά)
Σ1	Με ΥΑΦ	447,83	11,3	937,1	18,8
	Χωρίς ΥΑΦ	504,81		1153,71	
Σ2	Με ΥΑΦ	461,83	9,4	-	-
	Χωρίς ΥΑΦ	509,81		-	-
Σ3	Με ΥΑΦ	305,15	33,9	581,37	30,5
	Χωρίς ΥΑΦ	461,73		836,82	
Σ4	Με ΥΑΦ	351,71	27,8	-	-
	Χωρίς ΥΑΦ	487,11		-	-
Σ5	Με ΥΑΦ	215,61	36,2	-	-
	Χωρίς ΥΑΦ	337,85		-	-

Ο βραδινός αερισμός γίνεται και στα τρία δωμάτια, όμως η ψύξη ενεργοποιείται σε όλες τις περιπτώσεις στο καθιστικό, αλλά όχι πάντα στις κρεβατοκάμαρες. Τα συμπεράσματα που βγαίνουν από τον πίνακα είναι:

- Εξετάζοντας το καθιστικό, επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα ότι η απογευματινή ψύξη βοηθάει περισσότερο στην εξοικονόμηση, από ότι η μεσημεριανή. Το ίδιο διαφαίνεται και για τις κρεβατοκάμαρες (περιπτώσεις Σ3 & Σ5).

- Στις περιπτώσεις όπου η ψύξη δεν ενεργοποιείται στις κρεβατοκάμαρες, το φορτίο του καθιστικού εμφανίζεται ελαφρώς αυξημένο, δείχνοντας ότι η κυκλοφορία του αέρα ανάμεσα στις θερμικές ζώνες επηρεάζει τις ψυκτικές ανάγκες αυτών.

Για να εξαχθούν πιο σωστά αποτελέσματα για τις περιπτώσεις αυτές, θα ακολουθηθεί η μεθοδολογία του αριθμού των ημερών ψύξης και ενεργοποίησης της ψύξης, όπως και στην παράγραφο του Φυσικού Αερισμού. Στον Πίνακα 6.16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτά, για όλες τις περιπτώσεις.

**Πίνακας 6.16 Παραμετρική μελέτη Συνδυασμού ΦΑ και ΚΛ: Αριθμός ημερών για ψύξη, ανά δωμάτιο και συνολικά**

Εξεταζόμενη Περίπτωση	Εύρος Περιόδου ψύξης	Συνολικά		LVR		MBDR-BDR	
		# Ημερών εσωτ.θερμ. αέρα πάνω από 26 °C	# Ημερών Ψύξης	# Ημερών εσωτ.θερμ. αέρα πάνω από 26 °C	# Ημερών Ψύξης	# Ημερών εσωτ.θερμ. αέρα πάνω από 26 °C	# Ημερών Ψύξης
Σ1	Μάιος-Οκτώβρης	91	91	68	68	91	91
Σ2	Μάιος-Οκτώβρης	64	64	64	64	86	X
Σ3	Μάιος-Οκτώβρης	90	90	75	75	90	90
Σ4	Ιούλιος - Αύγουστος	83	58	78	58	83	X
Σ5	Ιούλιος - Αύγουστος	83	58	77	58	83	X

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι περιπτώσεις Σ4 και Σ5. Η ψύξη καθορίζεται από το καθιστικό. Ενεργοποιείται όμως μόνο τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο. Τόσο το καθιστικό όσο και οι κρεβατοκάμαρες παρουσιάζουν ανάγκες για ψύξη, περισσότερες μέρες από όσο δίνεται. Αυτές οι μέρες εντοπίζονται κυρίως τον Σεπτέμβρη. Δεν μπορεί να βγει συμπέρασμα αν χρειάζεται τελικά παραπάνω ψύξη ή όχι εκείνες τις μέρες, καθώς οι συνθήκες άνεσης μέσα στους χώρους επηρεάζονται και από άλλες παραμέτρους (π.χ. υγρασία χώρου), επομένως χρειάζεται περαιτέρω μελέτη. Από τον παραπάνω πίνακα, γίνεται αντιληπτό για ακόμη μια φορά ότι το μέγεθος της θερμικής ζώνης καθορίζει και τις ψυκτικές ανάγκες. Το καθιστικό παρουσιάζει λιγότερο απαιτούμενο φορτίο σε αντίθεση με τις δυο κρεβατοκάμαρες.

#### 6.4.4. Παραμετρική μελέτη - Αποτελέσματα: Κλιματικές Συνθήκες

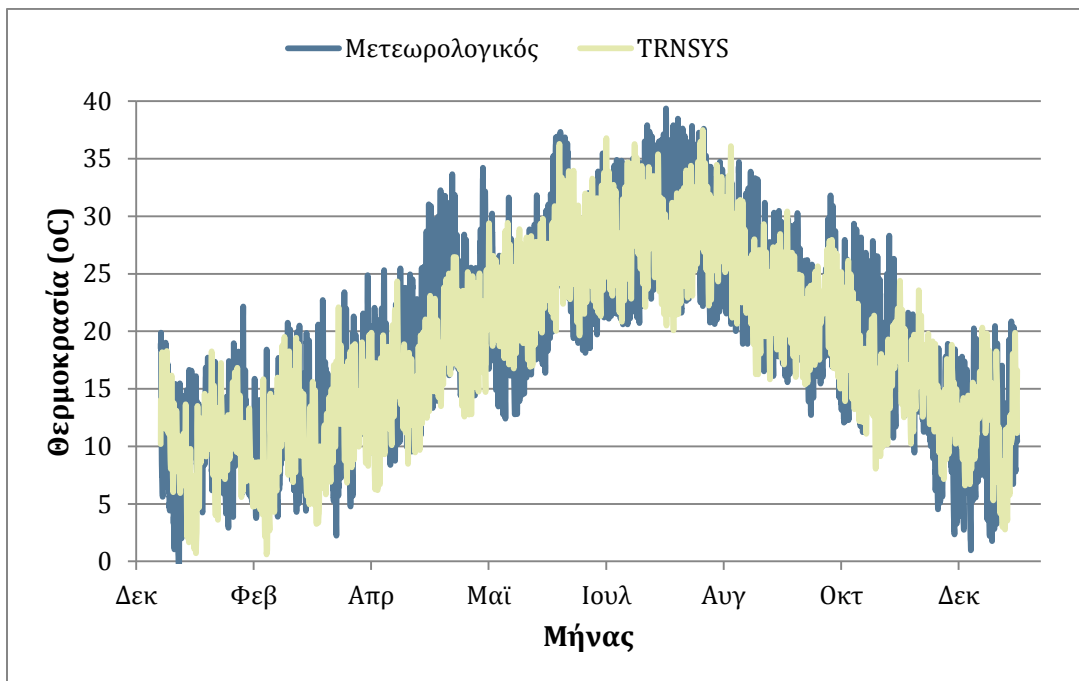
Το αρχείο αναφοράς για τις καιρικές συνθήκες, το οποίο χρησιμοποιείται τόσο στο βασικό σενάριο όσο και στις υπόλοιπες προσομοιώσεις είναι το αρχείο καιρού που δημιουργήθηκε με τη χρήση του λογισμικού Meteororm 6.1, για την περιοχή Στάνος της Αμφιλοχίας (βλ.

§5.2.3). Χρησιμοποιώντας διαφορετικά αρχεία καιρού, ή χρησιμοποιώντας δεδομένα από μετρήσεις on-site, τα αποτελέσματα αλλάζουν και αναδεικνύεται η ανάγκη σωστής επιλογής των ιδιοτήτων του ΥΑΦ για τη συγκεκριμένη κλιματική ζώνη. Επίσης, κατά τη φάση του σχεδιασμού είθισται να χρησιμοποιούνται αρχεία καιρού από τις βιβλιοθήκες των εμπορικών πακέτων. Αποδεικνύεται, όμως, ότι τα δεδομένα αυτά διαφέρουν σημαντικά από τις πραγματικές συνθήκες, οδηγώντας σε διαφορετικές ενεργειακές απαιτήσεις.

Τέλος, γίνεται και ενεργειακή μελέτη στην περίπτωση κατά την οποία η πιλοτική κατοικία βρισκόταν στην Αθήνα και όχι στην Αμφιλοχία. Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιείται αρχείο καιρού από το λογισμικό, δίνοντας μια αίσθηση πως θα μεταβάλλονταν οι ενεργειακές απαιτήσεις της οικίας για ψύξη, σε διαφορετική κλιματική ζώνη.

### *Αρχείο καιρού για την Αμφιλοχία και την Αθήνα*

Υπενθυμίζεται για λόγους πληρότητας, η διακύμανση της εξωτερικής θερμοκρασίας για την Αμφιλοχία, συγκρίνοντας τα δυο διαθέσιμα αρχεία: το αρχείο καιρού που βγαίνει από το λογισμικό Meteopnorm και το αρχείο που βγαίνει από τις μετρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού.



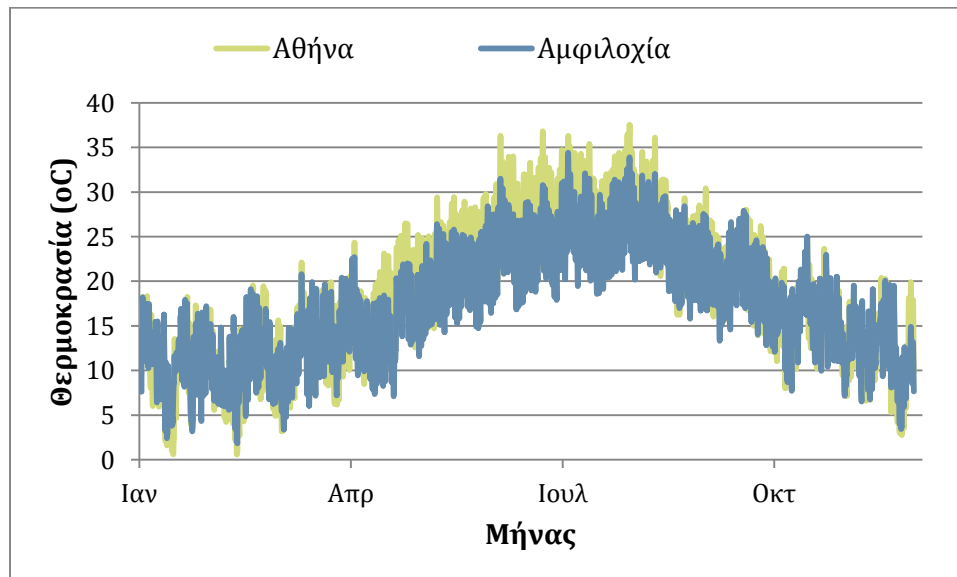
Εικόνα 6.16 Σύγκριση διακύμανσης εξωτερικής θερμοκρασίας για την Αμφιλοχία, από τα δυο διαθέσιμα αρχεία

Στον Πίνακα 6.17 δίνονται οι ελάχιστες, οι μέγιστες και οι μέσες θερμοκρασίες για τα δυο αρχεία.

Πίνακας 6.17 Παραμετρική μελέτη Κλιματικές Συνθήκες: Μέση, χαμηλή και μέγιστη τιμή εξωτερικής θερμοκρασίας ανά μήνα για τα δυο αρχεία καιρού στην Αμφιλοχία

Αρχείο Καιρού από μετρήσεις (2013)												
	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάι	Ιούν	Ιούλ	Αύγ	Σεπ	Οκτ	Νοέμ	Δεκ
Μέση	9.5	10.3	12.6	17.2	21.6	24.3	27.2	28.9	23.7	19.1	14.8	10.3
Χαμηλή	-1.4	3.8	2.2	8.4	12.4	12.8	18.1	20.6	15.6	11.2	4.5	1.0
Υψηλή	19.9	22.2	24.9	32.3	34.2	37.3	37.9	39.4	34.7	31.8	28.3	20.9
Αρχείο καιρού από Meteororm (1996-2005)												
	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάι	Ιούν	Ιούλ	Αύγ	Σεπ	Οκτ	Νοέμ	Δεκ
Μέση	9.9	9.9	11.8	15.0	20.9	25.4	28.6	28.3	23.4	19.5	15.2	11.6
Χαμηλή	0.7	0.6	3.3	6.2	12.6	16.9	20.8	20.1	15.8	11.1	7.1	2.8
Υψηλή	18.3	19.5	22.1	24.3	29.4	36.3	36.8	37.5	33.4	28.0	24.4	20.3

Με στόχο την ανάδειξη της σημασίας της γεωγραφικής θέσης και της σωστής επιλογής του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης για τα ΥΑΦ, είναι απαραίτητη η μελέτη της πιλοτικής κατοικίας και η ενδεχόμενη εξοικονόμηση ψυκτικού φορτίου για περιοχή διαφορετική από αυτή που εξετάστηκε. Επιλέγεται η περιοχή της Αθήνας, η οποία θεωρείται πιο θερμή από την περιοχή της Αμφιλοχίας. Στην Εικόνα 6.17 φαίνεται η διακύμανση της θερμοκρασίας για την περιοχή της Αθήνας, έτσι όπως υπολογίζεται από το αντίστοιχο αρχείο καιρού, το οποίο βρίσκεται μέσα στη βιβλιοθήκη του TRNSYS, συγκρινόμενη με την αντίστοιχη της Αμφιλοχίας.



Εικόνα 6.17 Ετήσια διακύμανση εξωτερικής θερμοκρασίας για την Αθήνα, τιμές από αρχείο TRNSYS

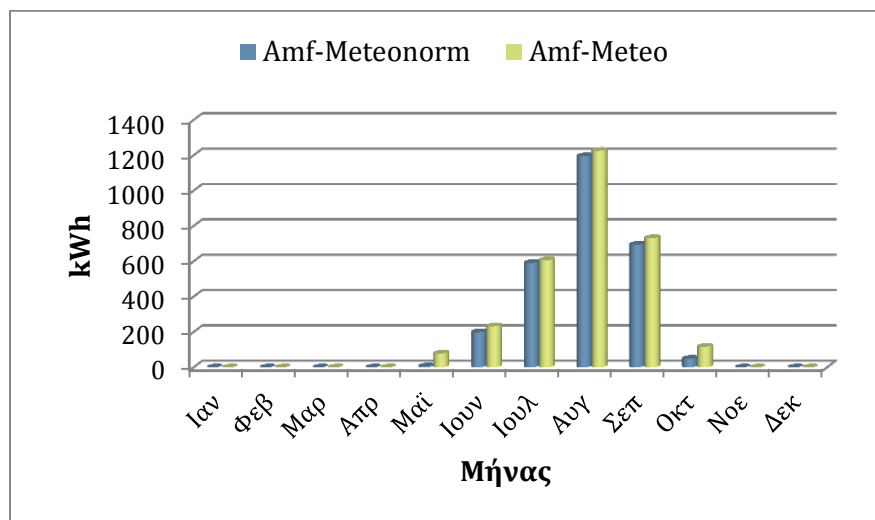
## Αποτελέσματα: Κλιματικές Συνθήκες

Τα αποτελέσματα με τη χρήση των παραπάνω κλιματικών δεδομένων στο μοντέλο προσομοίωσης, παρουσιάζονται στον Πίνακας 6.18.

Πίνακας 6.18 Παραμετρική μελέτη Κλιματικές Συνθήκες: Ετήσιο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο για τρεις περιπτώσεις

	Παραμετρική μελέτη: Κλιματικές Συνθήκες (kWh/m <sup>2</sup> έτος)		
	Αμφιλοχία (αρχείο καιρού TRNSYS)	Αμφιλοχία (Μετεωρολογικός Σταθμός)	Αθήνα (αρχείο καιρού TRNSYS)
Απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο- περίπτωση με ΥΑΦ	17,88	19,56	28,20
Απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο- περίπτωση χωρίς ΥΑΦ	25,37	26,87	35,71

Ενδιαφέρουν παρουσιάζουν οι τιμές που προκύπτουν στην δεύτερη περίπτωση, κατά την οποία οι κλιματικές συνθήκες είναι από τις μετρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού για το έτος 2013. Σίγουρα, η τάση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος καθόλη τη διάρκεια του έτους είναι η ίδια με αυτή του αρχείου καιρού του Meteonorm, και σίγουρα το αρχείο καιρού από το Meteonorm να δίνει καλύτερα αποτελέσματα, καθώς πρόκειται για στατιστική επεξεργασία πολλών ετών (στην προκειμένη περίπτωση των ετών 1996-2005). Είναι όμως αδιαμφισβήτητο το γεγονός ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος αυξάνεται παγκόσμια, επομένως οι μέγιστες και οι μέσες τιμές που προκύπτουν από το αρχείο Meteonorm, το οποίο αφορά έτη προ δεκαετίας, να είναι χαμηλότερες από αυτές που συμβαίνουν τα τελευταία έτη. Οι αυξημένες τιμές της εξωτερικής θερμοκρασίας οδηγούν και σε υψηλότερα ψυκτικά φορτία καθώς και σε ενδεχόμενη μετατόπιση των κατά τη διάρκεια του έτους.



Εικόνα 6.18 Παραμετρική μελέτη Κλιματικές Συνθήκες: Κατανομή ψυκτικού φορτίου ανά μήνα, με αρχείο εισόδου καιρού από Meteonorm & από μετρήσεις.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, έχει ενδιαφέρον να παρουσιασθεί η διεύρυνση της περιόδου κατά της οποίας χρειάζεται ψύξη μια οικία. Έχοντας παραβλέψει τη συμπεριφορά των ενοίκων, τότε από την Εικόνα 6.18 φαίνεται ότι τους μήνες Μάιο και Οκτώβριο ενεργοποιείται, έστω και για λίγες ώρες, το σύστημα ψύξης. Σαφώς, με τον κατάλληλο αερισμό, οι ώρες αυτές δύναται να εξαλειφθούν, έτσι όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 6.4.6, δεν μπορεί όμως να παραβλεφθεί το γεγονός ότι έχει μεγαλώσει το εύρος ψυκτικής περιόδου, έστω και λίγο.

## 6.5. Βέλτιστο Σενάριο Λειτουργίας

---

Η παραμετρική μελέτη των προηγούμενων παραγράφων κατέδειξε την επίδραση τους στην εξοικονόμηση ενέργειας (για ψύξη) στην περίπτωση της πιλοτικής κατοικίας. Μερικές παράμετροι είναι δυνατόν να επιλεχθούν σωστά κατά τη φάση της ενεργειακής μελέτης ακόμα (πχ. αεροστεγανότητα και επιλογή κουφωμάτων), ενώ κάποιες άλλες επαφίενται στην σωστή αντίληψη και χρήση των συστημάτων ψύξης/θέρμανσης από τους ενοίκους (πχ. θερμοκρασία ενεργοποίησης κλιματισμού κατά την θερινή περίοδο).

Θεωρώντας ότι η συμπεριφορά των ενοίκων είναι η καλύτερη δυνατή, σε αυτήν την παράγραφο γίνεται προσπάθεια ανάδειξης του βέλτιστου σεναρίου λειτουργίας (Β.Σ.Λ.), ώστε να συνδυάζεται η μέγιστη εξοικονόμηση της ενέργειας που απαιτείται για την ψύξη της πιλοτικής κατοικίας με τη σωστή επιλογή των παραμέτρων.

Τα βέλτιστα σενάρια αφορούν τόσο την περιοχή της Αμφιλοχίας όσο και της Αθήνας (διαφορετικές κλιματικές συνθήκες), καθώς εξετάζονται και οι βέλτιστες ρυθμίσεις για μέγιστη εξοικονόμηση στην περίπτωση κατά την οποία στην κατοικία ζει ένα εργαζόμενο ζευγάρι ή ένα ηλικιωμένο ζευγάρι (διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας). Εξετάζεται η θερινή περίοδος ενώ στον Πίνακα 6.19 παρουσιάζονται οι συνθήκες λειτουργίας σύμφωνα με τις παραπάνω παραδοχές.

Από την παραμετρική μελέτη που διεξήχθη παραπάνω, επιλέχθηκαν οι τιμές οι οποίες οδηγούσαν στην βέλτιστη ενεργειακή συμπεριφορά της οικίας. Για την περίπτωση της Αμφιλοχίας, επιλέχθηκε τιμή διαφυγών λόγω αεροστεγανότητας 1/h, υγρασία σταθερή σε όλους τους χώρους και ΥΑΦ με θερμοκρασία αλλαγής φάσης στους 24 °C. Για την Αθήνα οι αντίστοιχες τιμές είναι: διαφυγές λόγω αεροστεγανότητας 0.75/h, υγρασία σταθερή σε όλους τους χώρους και ΥΑΦ με θερμοκρασία αλλαγής φάσης στους 26 °C. Για λόγους πληρότητας, οι προσομοιώσεις ελέχθησαν για όλες τις τιμές των παραμέτρων, ώστε να εξετασθούν όλες οι περιπτώσεις, παρ'όλα αυτά στην συγκεκριμένο παράγραφο αναφέρονται οι βέλτιστες. Στο Παράρτημα Γ αναφέρονται όλες οι περιπτώσεις που ελέχθησαν, οι τιμές των παραμέτρων καθώς και τα αποτελέσματά τους.

Στον Πίνακα 6.20 παρουσιάζεται η εξοικονόμηση ενέργειας συνολικά για όλα τα βέλτιστα σενάρια: η σύγκριση γίνεται τόσο με το Σενάριο Αναφοράς, οπότε εξετάζεται η πιλοτική κατοικία στην περίπτωση που δεν υπάρχει ΥΑΦ στις γυψοσανίδες (για τους μήνες Ιούλιο-Αύγουστο, ακολουθώντας τις συνθήκες λειτουργίας του Πίνακα 5.18), όσο και στο

Βασικό Σενάριο (περίπτωση με γυψοσανίδες ΥΑΦ στις συνθήκες λειτουργίας του Πίνακα 5.18, αλλά με επιλογή τιμών των παραμέτρων όπως στο βασικό σενάριο).

Πίνακας 6.19 Βέλτιστα Σενάρια: Εξεταζόμενες περιπτώσεις

<b>Εργαζόμενο Ζευγάρι</b>					
	Φυσικός Αερισμός	Κλιματισμός	Δωμάτια		Περίοδος
			MBDR-BDR	LVR	
BΣΛ1	Δευτέρα - Παρασκευή				
	8.00-10.00 & 20.00-00.00	-	✓	✓	Μάιος-Ιούνιος-Οκτώβριος
	20.00-8.00	18.00-20.00	✓ (αερισμός)	✓ (ψύξη&αερισμός)	Ιούλιο έως Σεπτέμβριο
	Σάββατο - Κυριακή				
	10.00-20.00	-	✓	✓	Μάιος-Ιούνιος-Οκτώβριος
	20.00-8.00	12.00-20.00	✓ (ψύξη&αερισμός)	✓ (ψύξη&αερισμός)	Ιούλιο έως Σεπτέμβριο
<b>Ηλικιωμένο Ζευγάρι</b>					
BΣΛ2	Δευτέρα - Κυριακή				
	9.00-20.00	-	✓	✓	Μάιος-Ιούνιος-Οκτώβριος
	20.00-10.00	12.00-20.00	✓ (αερισμός)	✓ (ψύξη&αερισμός)	Ιούλιο έως Σεπτέμβριο

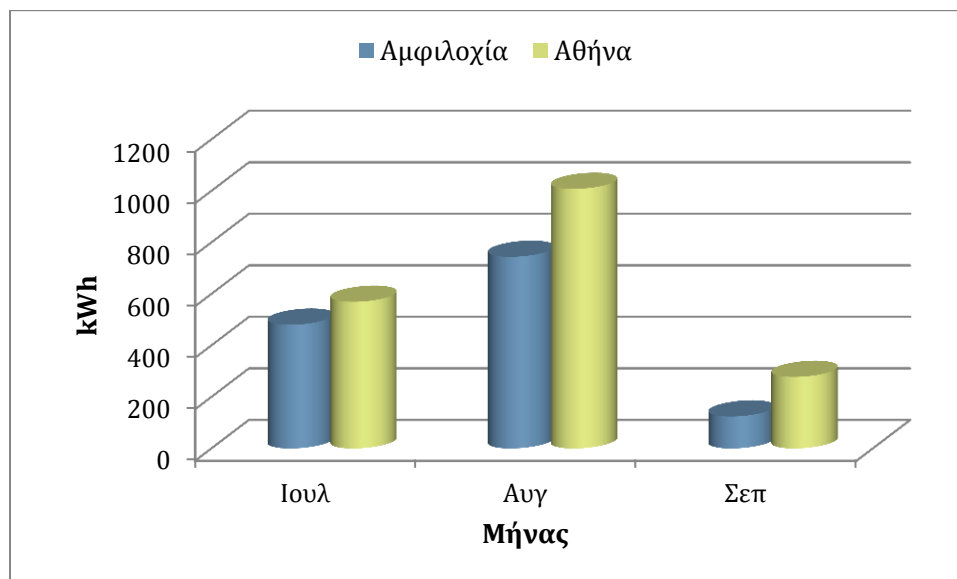
Δεν είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ των σεναρίων. Οι διαφορές έγκεινται στις κλιματολογικές συνθήκες, όπου στην περίπτωση που η οικία βρίσκεται στην Αθήνα εμφανίζονται υψηλότερα φορτία, καθώς και στην συμπεριφορά των ενοίκων, όπου οι ώρες ψύξης για το ηλικιωμένο ζευγάρι εξ ορισμού είναι περισσότερες.

Τα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας για την περίπτωση σύγκρισης του σεναρίου αναφοράς με το βέλτιστο σενάριο, κυμαίνονται γύρω στο 30%. Το πιο σημαντικό συμπέρασμα αφορά τη σύγκριση των δυο σεναρίων που αφορούν τα ΥΑΦ (το βασικό σενάριο και το βέλτιστο). Παραμένει αρκετά υψηλό σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του Εργαζόμενου ζευγαριού στην Αθήνα, υπάρχει εξοικονόμηση γύρω στο 28%, όταν συνδυαστεί κατάλληλα ο φυσικός και ο μηχανικός αερισμός και όταν επιλεγθούν οι κατάλληλες παράμετροι για την οικία.

Πίνακας 6.20 Βέλτιστα Σενάρια: Ετήσιο ψυκτικό φορτίο και % εξοικονόμησης για τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν, σύγκριση με το Β.Σ. και το Σ.Α.

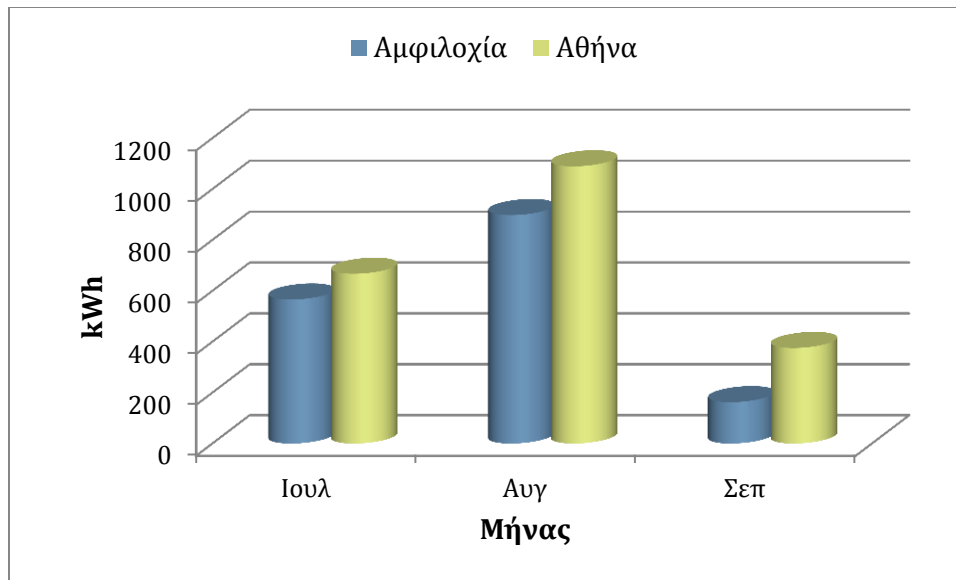
Εξεταζόμενη Περίπτωση	Αμφιλοχία				Αθήνα			
	(kWh/m <sup>2</sup> έτος)		% Μείωσης		(kWh/m <sup>2</sup> έτος)		% Μείωσης	
	Εργ.	Ηλικ.	Εργ.	Ηλικ.	Εργ.	Ηλικ.	Εργ.	Ηλικ.
<b>Β.Σ.Λ.</b>	8.8	10.6	-	-	12.1	13.9	-	-
<b>Σ.Α. (χωρίς ΥΑΦ)</b>	12.3	17.3	28.6%	38.6%	18.3	20.0	33.8%	30.7%
<b>Β.Σ.</b>	10.4	15.4	15.5%	31.1%	16.9	19.1	28.6%	27.4%

Στις Εικόνες Εικόνα 6.19 & Εικόνα 6.20 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου για όλα τα βέλτιστα σενάρια. Εξετάζοντας πιο προσεκτικά τα διαγράμματα, κατά τον μήνα Ιούλιο αναμένεται παρόμοια αύξηση των ψυκτικών φορτίων. Οι μεγαλύτερες διαφορές όμως παρατηρούνται για τον μήνα Σεπτέμβρη, οπότε φαίνεται η επίδραση από τις διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Αυτό εξηγείται λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών που παρατηρούνται για τον μήνα αυτό στην Αθήνα, θερμοκρασίες που βρίσκονται πάνω από τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης του ΥΑΦ, με συνέπεια τη μη σωστή λειτουργία του. Για την περιοχή της Αμφιλοχίας, οι μήνες Ιούνιος και Σεπτέμβριος θεωρούνται οι καλύτεροι από πλευράς εξοικονόμησης αλλά και σωστής λειτουργίας του ΥΑΦ.



Εικόνα 6.19 Βέλτιστα Σενάρια: Ψυκτικό φορτίο για την περίπτωση του εργαζόμενου ζευγαριού, για Αθήνα και Αμφιλοχία





**Εικόνα 6.20 Βέλτιστα Σενάρια: Ψυκτικό φορτίο για την περίπτωση του ηλικιωμένου ζευγαριού, για Αθήνα και Αμφιλοχία**

Η ενεργειακή μελέτη μιας οικίας παραμένει μια πολύπλοκη διαδικασία, η οποία περιλαμβάνει την επιμέρους εξέταση πολλών παραμέτρων. Οι παραδοχές που αναπόφευκτα γίνονται κατά τη διάρκεια της μοντελοποίησης επηρεάζουν, άλλοτε λίγο άλλοτε περισσότερο, τα αποτελέσματα. Η σωστή επιλογή των παραμέτρων που θα εξετασθούν ενδελεχώς, καθώς και η κατάλληλη επιλογή των τιμών για αυτές τις παραμέτρους, είναι σημαντική για την ρεαλιστικότερη εξαγωγή αποτελεσμάτων.

## Βιβλιογραφία 6<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

---

- De Meester, T., Marique, A.-F., De Herde, A., Reiter, S., 2013. Impacts of occupant behaviours on residential heating consumption for detached houses in a temperate climate in the northern part of Europe. *Energy and Buildings* 57, 313–323. doi:10.1016/j.enbuild.2012.11.005
- Raftery, P., Keane, M., O'Donnell, J., 2011. Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology. *Energy and Buildings* 43, 2356–2364. doi:10.1016/j.enbuild.2011.05.020
- Thomsen, K.E., Schultz, J.M., Poel, B., 2005. Measured performance of 12 demonstration projects—IEA Task 13 “advanced solar low energy buildings”. *Energy and Buildings* 37, 111–119. doi:10.1016/j.enbuild.2004.01.036
- T.O.T.E.E. 20701-1/2010 [WWW Document], n.d. URL <http://portal.tee.gr/portal/page/portal/tptee/totee/TOTEE-20701-1-Final-%D4%C5%C5-2nd.pdf> (accessed 3.26.14).
- T.O.T.E.E. 20701-2/2010 [WWW Document], n.d. URL <http://portal.tee.gr/portal/page/portal/tptee/totee/TOTEE-20701-2-Final-%D4%C5%C5....pdf> (accessed 3.26.14).



# Συμπεράσματα

## Περιεχόμενα 7<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

---

7.	Εισαγωγή	170
7.1.	Σχετικά με τη μεθοδολογία	170
7.1.1.	Συμπεράσματα.....	170
7.1.2.	Στοιχεία πρωτοτυπίας.....	171
7.2.	Σχετικά με τη μελέτη περίπτωσης	172
7.2.1.	Συμπεράσματα.....	172
7.2.2.	Στοιχεία πρωτοτυπίας.....	174
7.3.	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	174

---

## 7. Εισαγωγή

---

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κυριότερα συμπεράσματα της παρούσας διατριβής. Τα συμπεράσματα αναφέρονται τόσο στην μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4, όσο και στα αποτελέσματα των υπολογιστικών προσομοιώσεων για τη μελέτη περίπτωσης.

Πιο συγκεκριμένα, το κεφάλαιο αρχικά εστιάζει στη μεθοδολογία εισαγωγής Υλικών Αλλαγής Φάσης σε υπολογιστικό εργαλείο, η οποία αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας έγινε σε εμπορικό πακέτο υπολογισμού θερμικών φορτίων κτηρίων, ενώ χρησιμοποιείται κώδικας γραμμένος στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, ο οποίος περιγράφει μονοδιάστατα το φαινόμενο της αλλαγής φάσης σε δομικό στοιχείο. Ο κώδικας αυτός συνδέεται με το εμπορικό πακέτο, το οποίο είναι υπεύθυνο για τον υπολογισμό της επίδρασης όλων των υπολοίπων χαρακτηριστικών του κτηρίου και του περιβάλλοντα χώρου.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθοδολογίας σε μελέτη περίπτωση οικίας, ελαφριάς κατασκευής, της οποίας οι εσωτερικοί τοίχοι και χωρίσματα επενδύονται με γυψοσανίδες οι οποίες εμπεριέχουν ΥΑΦ. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην επίδραση των παραμέτρων καθώς και στο σχολιασμό των βέλτιστων σεναρίων που υιοθετήθηκαν. Στο τέλος του κεφαλαίου δίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

### 7.1. Σχετικά με τη μεθοδολογία

---

#### 7.1.1. Συμπεράσματα

---

Η Μεθοδολογία η οποία αναπτύχθηκε και προτείνεται, αφορά την ακριβή προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς υλικών με δυναμική συμπεριφορά, όπως είναι τα υλικά αλλαγής φάσης, και στη σύνδεση τους με προγράμματα ενεργειακής προσομοίωσης, τα οποία μέχρι πρότινος δεν μπορούν να τα λάβουν υπόψη. Πιο συγκεκριμένα, πραγματεύεται ΥΑΦ, τα οποία εμπεριέχονται μέσα σε δομικό υλικό και τα οποία επηρεάζονται από εξωτερικούς παράγοντες.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία έρχεται να καλύψει περιορισμούς και μειονεκτήματα μεθοδολογιών που έχουν εφαρμοσθεί μέχρι πρότινος, καθώς:

- Δεν υπάρχει περιορισμός ως προς το είδος και το υλικό του ΥΑΦ, ή τον τρόπο ενσωμάτωσης του μέσα στο δομικό υλικό.
- Το ίδιο ισχύει και για την ποσότητα αλλά και τη θέση (είτε του ΥΑΦ, είτε του δομικού στοιχείου) μέσα στον χώρο. Η μεθοδολογία μπορεί να υπολογίσει επιτυχώς δομικά στοιχεία με ΥΑΦ, τα οποία βρίσκονται είτε στους κάθετους τοίχους, είτε σε πάτωμα ή οροφή.

- Εξαλείφεται η αδυναμία των περισσότερων μοντέλων να λάβουν υπόψη τους με ρεαλιστικό τρόπο την αλλαγή φάσης, χρησιμοποιώντας πειραματικές μετρήσεις της καμπύλης της θερμοχωρητικότητας
- Η μεθοδολογία δεν αναπτύχθηκε με αφορμή συγκεκριμένη εφαρμογή, όπως είθισται, επομένως μπορεί να καλύψει όλες τις περιπτώσεις που αφορούν εισαγωγή ΥΑΦ σε δομικά στοιχεία κτηρίων.
- Καθιστά δυνατή την πλήρη ενεργειακή προσομοίωση ενός κτηρίου που ενσωματώνει ΥΑΦ στο κέλυφός του και είναι συνδεδεμένο με συστήματα θέρμανσης/ψύξης ή ΑΠΕ.
- Το υπολογιστικό μοντέλο της μεθοδολογίας μπορεί να εισαχθεί σε οποιοδήποτε εμπορικό ή μη πακέτο, το οποίο δέχεται τη σύνδεση ή εισαγωγή κάποιων υπορουτινών κώδικα.
- Η σύνδεση του υπολογιστικού εργαλείου με κάποιο γενικότερο πακέτο προσομοίωσης είναι απλή, ενώ η εισαγωγή των στοιχείων του ΥΑΦ, το οποίο εξετάζεται, δεν επηρεάζει το γενικό στήσιμο του μοντέλου, ελαχιστοποιώντας ενδεχόμενα λάθη.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία και η εφαρμογή της συνιστούν ένα ολοκληρωμένο πακέτο προσομοίωσης κτηρίου, το οποίο έχει δυναμικά δομικά στοιχεία. Μπορεί να αποτελέσει ισχυρό εργαλείο για την ενεργειακή μελέτη, καθώς η ίδια μεθοδολογία, μπορεί να εφαρμοστεί και για την περίπτωση, κατά την οποία απαιτείται η εισαγωγή και η προσομοίωση μιας καινοτόμου τεχνολογίας σε ένα υπάρχον μοντέλο ενεργειακής αξιολόγησης ενός κτηρίου ή ενός συστήματος.

### 7.1.2. Στοιχεία πρωτοτυπίας

Μία πρωτοτυπία της διατριβής έγκειται στην ανάπτυξη της μεθοδολογίας εισαγωγής υλικών αλλαγής φάσης, τα οποία εμπεριέχονται σε δομικά στοιχεία, σε κώδικες ενεργειακής προσομοίωσης. Είναι σημαντικό το γεγονός ότι η μεθοδολογία δεν αφορά συγκεκριμένη τεχνολογία και δεν αναπτύχθηκε έχοντας υπόψιν συγκεκριμένη εφαρμογή, ως είθισται, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση οποιασδήποτε καινοτόμου τεχνολογίας, η οποία δεν συμπεριλαμβάνεται σε υπάρχον λογισμικό. Με αυτόν τον τρόπο, δίνεται η δυνατότητα αξιολόγησης μέσω προσομοιώσεων νέων τεχνολογιών, οι οποίες προωθούνται από τις Εθνικές Οδηγίες και τα αντίστοιχα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του σύνθετου εργαλείου είναι ότι εξαλείφεται η αδυναμία των περισσότερων μοντέλων να λάβουν υπόψη τους με ρεαλιστικό τρόπο την αλλαγή φάσης, χρησιμοποιώντας πειραματικές μετρήσεις της καμπύλης της θερμοχωρητικότητας και συνάμα, δεν υπάρχει περιορισμός ως προς το είδος και το υλικό του ΥΑΦ, ή τον τρόπο ενσωμάτωσης του μέσα στο δομικό υλικό, καθώς και για την ποσότητα και τη θέση (είτε του ΥΑΦ, είτε του δομικού στοιχείου) μέσα στον χώρο. Προνόμιο της μεθοδολογίας είναι ότι μπορεί να υπολογίσει επιτυχώς δομικά στοιχεία με ΥΑΦ, τα οποία βρίσκονται είτε στους κάθετους τοίχους, είτε σε πάτωμα ή οροφή.

Ο συνδυασμός του αναπτυχθέντος εργαλείου με οποιοδήποτε λογισμικό ενεργειακής προσομοίωσης κτηρίων (είτε εμπορικό π.χ. TRNSYS, είτε ειδικό π.χ. λογισμικό KENAK) προσφέρει μια εύκολη, γρήγορη και αξιόπιστη λύση, η οποία μπορεί να βοηθήσει στη λήψη αποφάσεων. Η εισαγωγή συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε κτήρια οφείλει να συνοδεύεται από αξιόπιστα εργαλεία προσομοίωσης, ώστε να γίνει άμεσα, αποδοτικά και να παρέχει ακριβή στοιχεία θερμικής συμπεριφοράς της περίπτωσης που εξετάζεται.

## 7.2. Σχετικά με τη μελέτη περίπτωσης

---

### 7.2.1. Συμπεράσματα

---

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας αφορά τη μελέτη περίπτωσης μιας πιλοτικής οικίας ελαφριάς κατασκευής, η οποία ενσωματώνει ΥΑΦ στα δομικά στοιχεία της. Η πιλοτική οικία βρίσκεται στην Αμφιλοχία, επομένως η προσομοίωση της κατοικίας γίνεται με δεδομένα του τοπικού κλίματος. Στόχος της ενεργειακής μελέτης είναι η επίδραση των ΥΑΦ, τα οποία βρίσκονται στους εσωτερικούς τοίχους και τα χωρίσματα, στα απαιτούμενα ψυκτικά φορτία της οικίας, καθώς και στη μεταβολή της ψυκτικής περιόδου.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ερευνητικής μελέτης, συμπεράναμε ότι τα ΥΑΦ καταφέρνουν επιτυχώς να μειώσουν τα ψυκτικά φορτία της οικίας κατά ένα μέσο όρο 22%. Το ποσοστό αυτό αφορά την κατοικία κενή (χωρίς ενοίκους και πρόσθετα θερμικά κέρδη). Παρολ' αυτά, η ενεργειακή προσομοίωση μιας οικίας ή ενός κτηρίου επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Αυτοί οι παράγοντες μπορεί να αφορούν τις ιδιότητες του ΥΑΦ, τις συνθήκες λειτουργίας και χρήση του κτηρίου και τέλος το τοπικό κλίμα. Δεν δύναται να γίνει οποιαδήποτε ενεργειακή μελέτη χωρίς να ληφθούν υπόψη οι παραπάνω παράγοντες.

Τα βασικότερα συμπεράσματα όσον αφορά την επίδραση των προαναφερθεισών παραμέτρων είναι:

- Η χρήση και οι συνθήκες λειτουργίας ενός κτηρίου επηρεάζουν άμεσα την ενεργειακή του απόδοση. Στην περίπτωση που τα δομικά στοιχεία εμπεριέχουν ΥΑΦ, και οι κλιματικές συνθήκες δεν αρκούν από μόνες τους στην σωστή λειτουργία του ΥΑΦ, τότε ο συνδυασμός ΥΑΦ και ενεργειακού συστήματος είναι απαραίτητος. Η περίπτωση αυτή είναι έντονη, όταν το ΥΑΦ χρησιμοποιείται με σκοπό τη μείωση των ψυκτικών φορτίων, ενώ οι θερμοκρασίες θέρους είναι υψηλές, επομένως το ΥΑΦ δεν ακολουθεί τον κύκλο τήξης-στερεοποίησης. Ο αερισμός ή κλιματισμός του χώρου, κρίνεται απαραίτητος, ώστε να μην μειώνεται η απόδοση του ΥΑΦ. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την συμπεριφορά των ενοίκων, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ενεργειακή απόδοση του κτηρίου δεν μπορεί να προβλεφθεί επακριβώς, παρά μόνο ως ιδανική περίπτωση.
- Η επιλογή του ΥΑΦ αφορά τη μελέτη μιας περιόδου του έτους (χειμώνας ή καλοκαίρι) και τα αντίστοιχα φορτία του, καθώς μέχρι σήμερα, δεν υπάρχει η επιλογή να συνδυασθούν. Η σωστή επιλογή, λοιπόν, του ΥΑΦ, πρέπει να γίνει με βάση τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν την δεδομένη περίοδο.

- Η χρήση πρόσφατων στατιστικά επεξεργασμένων κλιματικών συνθηκών σε σύγκριση με τα αρχεία καιρού από τις μετεωρολογικές υπηρεσίες που μετρούν 100 χρόνια πριν, κρίνεται επιθυμητή, καθώς η παγκόσμια κλιματική αλλαγή περιγράφεται από αύξηση των θερμοκρασιών. Η μελέτη του μικροκλίματος για την τοποθεσία του κτηρίου μπορεί να εξάγει ενδιαφέροντα αποτελέσματα, καθώς η διαφορά των αποτελεσμάτων για την περίπτωση κατά την οποία χρησιμοποιήθηκαν, όχι το αρχείο καιρού από τις βιβλιοθήκες των λογισμικών, αλλά μετρήσεις εξωτερικής θερμοκρασίας και ακτινοβολίας, προσδιορίστηκε της τάξεως του 10%. Παρόλ'αυτά, η χρήση αρχείων καιρού ύστερα από στατιστική επεξεργασία ετών κρίνεται πιο αξιόπιστη.
- Η μελέτη της παραμέτρου της υγρασίας κρίνεται απαραίτητη ειδικά για τη θερινή περίοδο, καθώς, στην περίπτωση ύπαρξης αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, μπορεί να μεταβάλει τα ψυκτικά φορτία έως και 15%.
- Ο φυσικός αερισμός του χώρου, πέρα από συνθήκες υγιεινής, εξασφαλίζει την καλύτερη λειτουργία του ΥΑΦ, στην θερμοκρασιακή περιοχή αλλαγής φάσης. Με βάση τις προσομοιώσεις, συνδυασμός φυσικού αερισμού και ΥΑΦ μέσα στο κτήριο, οδήγησε στην μείωση της ψυκτικής περιόδου κατά μέσο όρο 20 ημέρες.
- Η βέλτιστη περίπτωση λειτουργίας παρατηρήθηκε όταν συνδυάστηκε φυσικός αερισμός με σύστημα ψύξης. Τα απαιτούμενα φορτία στην αρχή της ψυκτικής περιόδου καλύφθηκαν –σε μερικές περιπτώσεις εξολοκλήρου- από τα ΥΑΦ (τα οποία λειτούργησαν σε συνδυασμό με τον βραδινό φυσικό αερισμό), ενώ τα συνολικά ψυκτικά φορτία της περιόδου ήταν μειωμένα, καθώς κρίθηκε αναγκαία η χρήση κλιματισμού μόνο τους μήνες όπου η εσωτερική θερμοκρασία ξεπερνούσε αρκετά την θερμοκρασία αλλαγής φάσης του ΥΑΦ.
- Η ποσότητα ΥΑΦ, η οποία υπάρχει από μόνη της σε ένα χώρο, δεν αρκεί για να εξαχθούν συμπεράσματα ως προς την επίδραση του ΥΑΦ στα απαιτούμενα φορτία. Είναι αναγκαίος ο υπολογισμός του λόγου "επιφάνεια προς όγκο". Υψηλότερη τιμή του λόγου «επιφάνειας προς όγκο» σημαίνει ότι περισσότερο ΥΑΦ βρίσκεται σε ένα σχετικά μικρό δωμάτιο. Η παρουσία περισσότερου ΥΑΦ σε ένα δωμάτιο (υψηλή τιμή του λόγου) αποδείχθηκε ότι συνδέεται με μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας.
- Από την προσομοίωση της πιλοτικής κατοικίας, παρατηρήθηκε ότι οι πιο σημαντικές ιδιότητες που περιγράφουν τη λειτουργία του ΥΑΦ, όταν ενσωματώνεται σε ένα κτήριο με στόχο τη μείωση των ψυκτικών φορτίων είναι η θερμοκρασία τήξεως και οι θερμοκρασίες της μεταβατικής περιοχής.

Η ενεργειακή μελέτη ενός κτηρίου αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία, η οποία περιλαμβάνει την επιμέρους εξέταση πολλών παραμέτρων. Η γνώση της επίδρασης αυτών των παραμέτρων και η σωστή επιλογή τους, οδηγούν στην βέλτιστη περίπτωση και στην εγκατάσταση των σωστών και αποδοτικότερων συστημάτων κλιματισμού.

### 7.2.2. Στοιχεία πρωτοτυπίας

---

Για πρώτη φορά, μελετάται η θερμική συμπεριφορά κτηρίου ελαφριάς κατασκευής, το οποίο φέρει γυψοσανίδες με Υλικά Αλλαγής Φάσης, τόσο με πειραματικές μετρήσεις, όσο και με υπολογιστική προσομοίωση, στην περιοχή της Μεσογείου. Η πιλοτική κατοικία, η οποία είναι κατασκευασμένη στην περιοχή της Αμφιλοχίας, αποτελεί άριστο παράδειγμα κτηρίου χαμηλής κατανάλωσης, συνδυάζοντας παθητικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (όπως είναι τα ΥΑΦ) με αποδοτικά συστήματα θέρμανσης/ψύξης ή ΑΠΕ.

Είναι σημαντική η εξέταση της συγκεκριμένης πιλοτικής κατοικίας, καθώς θα μπορούσε να αποτελεί πρότυπο για την αναβάθμιση του κτηριακού τομέα που προωθείται από την Εθνική Οδηγία. Η μοντελοποίηση του κτηρίου και η εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων με το αναπτυχθέν εργαλείο, μπορούν να αποτελέσουν στοιχεία αναφοράς για ανάλογες περιπτώσεις και να χρησιμοποιηθούν από αρχιτέκτονες ή ενεργειακούς μελετητές σε προκαταρκτικές αναφορές.

Η πρωτοτυπία της διατριβής έγκειται στην πολύ-παραμετρική ανάλυση μιας πραγματικής κατοικίας, με τυπική γεωμετρία και Νότιο-Ευρωπαϊκές κλιματικές συνθήκες. Οι παράμετροι, οι οποίες επιλέχθηκαν βάσει της βιβλιογραφίας, επηρεάζουν την απόδοση και τη συμπεριφορά των ΥΑΦ, καθιστώντας την ενδελεχή εξέταση και ανάλυση τους σημαντική. Τα προαναφερθέντα συμπεράσματα αποτελούν σημαντικές διαπιστώσεις για τη μελέτη παρόμοιων περιπτώσεων (κτηριο ελαφριάς κατασκευής με ξηρά δόμηση και ΥΑΦ). Από την προσομοίωση της πιλοτικής κατοικίας, παρατηρήθηκε ότι οι πιο σημαντικές ιδιότητες που περιγράφουν τη λειτουργία του ΥΑΦ, όταν ενσωματώνεται σε ένα κτήριο με στόχο τη μείωση των ψυκτικών φορτίων είναι η θερμοκρασία τήξεως και οι θερμοκρασίες της μεταβατικής περιοχής. Επιπλέον, η χρήση και οι συνθήκες λειτουργίας του κτηρίου επηρεάζουν άμεσα την ενεργειακή του απόδοση. Στην περίπτωση που τα δομικά στοιχεία εμπεριέχουν ΥΑΦ, και οι κλιματικές συνθήκες δεν αρκούν από μόνες τους στην σωστή λειτουργία του ΥΑΦ, τότε ο συνδυασμός ΥΑΦ και ενεργειακού συστήματος είναι απαραίτητος. Η περίπτωση αυτή είναι έντονη, όταν το ΥΑΦ χρησιμοποιείται με σκοπό τη μείωση των ψυκτικών φορτίων, ενώ οι θερμοκρασίες θέρους είναι υψηλές, επομένως το ΥΑΦ δεν ακολουθεί τον κύκλο τήξης-στερεοποίησης. Ο αερισμός ή κλιματισμός του χώρου, κρίνεται απαραίτητος, ώστε να μην μειώνεται η απόδοση του ΥΑΦ. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την συμπεριφορά των ενόικων, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ενεργειακή απόδοση του κτηρίου δεν μπορεί να προβλεφθεί επακριβώς, παρά μόνο ως ιδανική περίπτωση.

### 7.3. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

---

Περαιτέρω έρευνα πάνω στο θέμα που πραγματεύεται η παρούσα διατριβή, αφορά όχι τόσο την μεθοδολογία, η οποία αναπτύχθηκε, όσο του υπολογιστικού εργαλείου που δημιουργήθηκε για την προσομοίωση ΥΑΦ μέσα σε δομικά στοιχεία.

Πιο συγκεκριμένα, το υπολογιστικό εργαλείο που αναπτύχθηκε θα μπορούσε να μεταβληθεί κατάλληλα (κώδικας) ώστε να περιλαμβάνει και την περίπτωση κατά την



οποία το ΥΑΦ δεν είναι ενσωματωμένο μέσα στο δομικό υλικό, αλλά μεταφέρεται μέσω σωληνώσεων στους χώρους όπου χρειάζεται (*PCM slurries*). Οι σωληνώσεις αυτές τοποθετούνται συνήθως στην οροφή ή στο πάτωμα, ανάλογα και με τη λειτουργία η οποία χρειάζεται να ενισχυθεί (θέρμανση ή ψύξη). Σε αυτήν την περίπτωση, ορίζεται ένα νέο δυναμικό σύστημα, το οποίο συνοδεύεται από αντλίες και δοχεία αποθήκευσης, τα οποία καθιστούν την προσομοίωσή τους λίγο πιο περίπλοκη. Η επέκταση του κώδικα για να καλύπτει και αυτές τις περιπτώσεις, έρχεται ως συμπλήρωμα της παρούσας κατάστασης με στόχο ένα ολοκληρωμένο υπολογιστικό εργαλείο, το οποίο θα καλύπτει όλες τις περιπτώσεις κατά τις οποίες χρησιμοποιείται ΥΑΦ σε ένα κτήριο για να μειωθούν τα φορτία κλιματισμού. Στην παρούσα μελέτη, δεν ήταν δυνατή η ενασχόληση με αυτό το κομμάτι, καθώς πρόκειται για μια τεχνολογία σχετικά καινούρια και δεν υπάρχουν τα απαραίτητα και αναγκαία πειραματικά δεδομένα για την επικύρωση και επαλήθευση του κώδικα.

Επεκτείνοντας ακόμη περισσότερο τις προτάσεις περί μελλοντικής διερεύνησης των ΥΑΦ και συνδέοντας την έρευνα με την πραγματικότητα και τις ανάγκες της κοινωνίας, είναι σημαντική η μελλοντική συμβολή των ΥΑΦ στην επίτευξη των «κτηρίων σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης». Η σύνδεση του μοντέλου προσομοίωσης, οποιοδήποτε κτηρίου, το οποίο εμπεριέχει ΥΑΦ στα δομικά στοιχεία του, με εναλλακτικές τεχνολογίες ή τεχνολογίες ΑΠΕ είναι πλέον κάτι παραπάνω από απαραίτητο. Η μελέτη τέτοιων περιπτώσεων, πηγαίνοντας ένα βήμα παραπάνω, θα πρέπει να μελετώνται όχι μόνο από ενεργειακής άποψης: η περιβαλλοντική και η οικονομο-τεχνική μελέτη τους θα μπορεί να παρουσιάζει μια ολοκληρωμένη αποτίμηση των τεχνολογιών, οι οποίες μελετώνται, καταλήγοντας σε σφαιρικά αποτελέσματα, με γνώμονα τις εθνικές και παγκόσμιες επιταγές.

Ειδικά μιλώντας για την Ελληνική πραγματικότητα, η παρούσα προσέγγιση μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμο εργαλείο στις ενεργειακές μελέτες αρχιτεκτόνων ή πολιτικών μηχανικών, οι οποίοι θα είναι σε θέση να αξιολογήσουν μέτρα εξοικονόμησης για νέο ή υφιστάμενο κτηριακό τομέα. Η εισαγωγή του εργαλείου στο λογισμικό ενεργειακής προσομοίωσης του KENAK, ειδικά στην περίπτωση των ενεργειακών μελετών, μπορεί να βοηθήσει στην προώθηση τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας και στην αξιόπιστη συλλογή αποτελεσμάτων. Με αυτόν τον τρόπο, νέες, ελπιδοφόρες τεχνολογίες θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν στην Εθνική Οδηγία, βοηθώντας στην επίτευξη των εθνικών και Ευρωπαϊκών στόχων.



# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

## Παράρτημα Α

---

Παράδειγμα υπορουτίνας εισαγωγής ΥΑΦ σε λογισμικό ενεργειακής προσομοίωσης κτηρίων (TRNSYS)

---

```
% test_PCM.m

% -----

%

% Test of a Simple PCM model (M-file called by TRNSYS type 155)

%

% Data passed from / to TRNSYS

% -----

%

% trnTime (1x1)    : simulation time

% trnInfo (15x1)  : TRNSYS info array

% trnInputs (n1x1) : TRNSYS inputs

% trnStartTime (1x1) : TRNSYS Simulation Start time

% trnStopTime (1x1) : TRNSYS Simulation Stop time

% trnTimeStep (1x1) : TRNSYS Simulation time step

% mFileErrorCode (1x1) : Error code for this m-file. It is set to 1 by TRNSYS and the m-file should set it to 0 at
the

%           end to indicate that the call was successful. Any non-zero value will stop the simulation

% trnOutputs (nOx1) : TRNSYS outputs

% Notes:

% -----

%

% You can use the values of trnInfo(7), trnInfo(8) and trnInfo(13) to identify the call (e.g. first iteration, etc.)

% Real-time controllers (callingMode = 10) will only be called once per time step with trnInfo(13) = 1 (after
convergence)
```

```

%
% The number of inputs is given by trnInfo(3)
% The number of expected outputs is given by trnInfo(6)
% WARNING: if multiple units of Type 155 are used, the variables passed from/to TRNSYS will be sized
according to
%   the maximum required by all units. You should cope with that by only using the part of the arrays that is
%   really used by the current m-File. Example: use "nI = trnInfo(3); myInputs = trnInputs(1:nI);"
%           rather than "MyInputs = trnInputs;"
%   Please also note that all m-files share the same workspace in Matlab (they are "scripts", not "functions")
so
%   variables like trnInfo, trnTime, etc. will be overwritten at each call.
%
% -----
% This example implements a simple PCM - (phase change material model). The component is iterative (should
be called at each
% TRNSYS call)
%
% trnInputs
% -----
%
% trnInputs(1) : Qi1, inlet wall layer heat conducted [kJ/h]
% trnInputs(2) : Qi2, outlet wall layer heat conducted [kJ/h]
%
% trnOutputs
% -----
%
% trnOutputs(1) : To1, PCM layer outlet temperature 1 [K]
% trnOutputs(2) : To2, PCM layer outlet temperature 2 [K]
% MKu, January 2011
% -----

```

```

% TRNSYS sets mFileErrorCode = 1 at the beginning of the M-File for error detection

% This file increments mFileErrorCode at different places. If an error occurs in the m-file the last succesful step
will

% be indicated by mFileErrorCode, which is displayed in the TRNSYS error message

% At the very end, the m-file sets mFileErrorCode to 0 to indicate that everything was OK

mFileErrorCode = 100; % Beginning of the m-file

% 1 - Type of Pilot Station Wall Layers - PCM
% -----

% PCM Conductivity [W m^-1 K^-1]
kPCM = 0.27;

% PCM Layer Density [kg m^-3]
DenPCM = 787;

% PCM Layer Thickness [m]
PCMthick = 0.0030;

% PCM Layer Area [m^2]
PCMArea = 22.40;

% PCM Layer Volume
PCMVolume = PCMthick * PCMArea;

% ---PCM Specific Heat Capacity (J kg^-1 K^-1) depending on temperature-----
% -----

% import ambient temperature experimental data
Temp_PCM = importdata('Temp_PCM.txt');

% import time for ambient temperature experimental data

```

```

Cp_PCM = importdata('Cp_PCM.txt');

mFileErrorCode = 110; % After setting parameters

% PROCESS INPUTS-----
% -----

Qi1 = trnInputs(1);
Qi2 = trnInputs(2);

mFileErrorCode = 115; % After processing inputs

% --- First call of the simulation: initial time step (no iterations) -----
% -----
% (note that Matlab is initialized before this at the info(7) = -1 call, but the m-file is not called)

if ( (trnInfo(7) == 0) && ((trnTime-trnStartTime) < 1e-6) )

    % This is the first call (Counter will be incremented later for this very first call)
    nCall = 0;
    nStep = 1;

% Initialize history of the variables for plotting at the end of the simulation
% -----

nTimeSteps = (trnStopTime-trnStartTime)/(trnTimeStep) + 1;

history.Qin1 = zeros(nTimeSteps,1);
history.Qin2 = zeros(nTimeSteps,1);
history.Tout1 = 20.0 * ones(nTimeSteps,1);

```

```

history.Tout2 = 20.0 * ones(nTimeSteps,1);

history.CpPCM = zeros(nTimeSteps,1);

% ---Calculation of Initial Values (Temperatures, Specific Heat)-----
% -----
CpPCM(1,1) = interp1(Temp_PCM,Cp_PCM,25);
end

mFileErrorCode = 120;

% --- Very last call of the simulation (after the user clicks "OK") -----
% -----

if ( trnInfo(8) == -1 )

    mFileErrorCode = 150;

    % Do stuff at the end of the simulation, e.g. calculate stats, draw plots, etc..
    % PLOT Cp, T
    xlswrite('PCMLayerTemperature1',history.Tout)
    xlswrite('PCMLayerSpecificHeat',history.CpPCM)
    xlswrite('Qin1',history.Qin1)
    xlswrite('Qin2',history.Qin2)

    mFileErrorCode = 0; % Tell TRNSYS that we reached the end of the m-file without errors

return

```

```

end

% --- Post convergence calls: store values -----
% -----

if (trnInfo(13) == 1)

    mFileErrorCode = 160; % Beginning of a post-convergence call

    history.Qin1(nStep) = Qi1;
    history.Qin2(nStep) = Qi2;
    history.Tout1(nStep) = To1;
    history.Tout2(nStep) = To2;
    history.CpPCM(nStep) = CpPCM;

    mFileErrorCode = 0; % Tell TRNSYS that we reached the end of the m-file without errors
    return % Do not update outputs at this call

end

% --- All iterative calls -----
% -----

% --- If this is a first call in the time step, increment counter -----

mFileErrorCode = 125;
if (trnInfo(7) == 0)
    nStep = nStep+1;
end

```



```

mFileErrorCode = 130; % Beginning of a post-convergence call

% --- Get TRNSYS Inputs ---

nI = trnInfo(3); % For bookkeeping
nO = trnInfo(6); % For bookkeeping

% --- Get TRNSYS Inputs ---

Qi1 = trnInputs(1);
Qi2 = trnInputs(2);

% ---TRANSFORMATION OF Q UNITS (kJ/h) to Watts-----
% -----
Qi1N = -Qi1 * (10/36);
Qi2N = -Qi2 * (10/36);

CpPCM = interp1(Temp_PCM,Cp_PCM,history.Tout1(nStep-1,1));

mFileErrorCode = 135; % Beginning of a post-convergence call

ti = trnTimeStep;

dq = (Qi1N+Qi2N);

Cap = DenPCM * PCMVOLUME * CpPCM;

dT1 = dq / Cap;

```

```
To1 = history.Tout1(nStep-1,1) + dT1 * ti;
```

```
To2 = To1;
```

```
mFileErrorCode = 140; % Beginning of a post-convergence call
```

```
% --- Set outputs ---
```

```
trnOutputs(1) = To1;
```

```
trnOutputs(2) = To2;
```

```
mFileErrorCode = 0; % Tell TRNSYS that we reached the end of the m-file without errors
```

```
return
```

Παράδειγμα αρχείου εισαγωγής ιδιοτήτων ΥΑΦ (αρχείο Temp\_PCM.m & Cp\_PCM.m)

T	Cp
6.324	1409.59
6.407	1409.76
6.491	1409.82
6.574	1409.75
6.657	1409.75
6.740	1409.71
6.824	1409.84
6.907	1410.12
6.990	1410.31
7.074	1410.74
7.157	1411.02
7.240	1411.26
7.324	1411.47
7.407	1412.04
7.490	1412.41
7.574	1412.7
7.657	1413.02
7.740	1413.5
7.824	1413.73
7.907	1413.73
7.990	1413.72
8.074	1413.47
8.157	1413.31
8.240	1413.3
8.324	1413.22
8.407	1413
8.490	1413.12
8.574	1413.4
8.657	1413.61
8.740	1413.95
8.824	1414.39
8.907	1414.73
8.990	1414.96
9.074	1415.46
9.157	1415.85
9.240	1416.1
9.324	1416.4
9.407	1416.74
9.490	1417.11
9.574	1417.25
9.657	1417.42
9.740	1417.66
9.824	1417.89
9.907	1418.29
9.990	1418.74
10.074	1419.07
10.157	1419.62
10.240	1420.31
10.324	1421.26
10.407	1422.13
10.490	1422.8
10.574	1423.03
10.657	1423.33
10.740	1423.75
10.824	1423.62
10.907	1423.89
10.990	1424.3

11.073	1424.86
11.157	1425.82
11.240	1426.5
11.323	1427.07
11.407	1427.68
11.490	1428.41
11.573	1428.94
11.657	1429.48
11.740	1430
11.823	1430.67
11.907	1431.68
11.990	1432.89
12.073	1434.07
12.157	1435.13
12.240	1437
12.323	1438.13
12.407	1439.05
12.490	1439.95
12.573	1440.33
12.657	1440.95
12.740	1441.46
12.823	1441.99
12.907	1442.5
12.990	1443.3
13.073	1444.4
13.157	1445.47
13.240	1446.83
13.323	1447.91
13.406	1448.96
13.490	1449.93
13.573	1450.83
13.656	1451.97
13.740	1453.34
13.823	1454.73
13.906	1456.48
13.990	1457.94
14.073	1459.51
14.156	1461.22
14.240	1462.79
14.323	1464.07
14.406	1465.16
14.490	1466.17
14.573	1467.29
14.656	1468.78
14.740	1470.34
14.823	1471.81
14.906	1473.71
14.990	1475.38
15.073	1477.07
15.156	1478.75
15.239	1480.17
15.323	1481.85
15.406	1483.74
15.489	1485.82
15.573	1487.94
15.656	1489.97
15.739	1491.91
15.823	1493.83
15.906	1496.11
15.989	1498.42
16.073	1500.74

16.156	1503.13
16.239	1505.33
16.323	1507.23
16.406	1509.16
16.489	1511.18
16.572	1512.72
16.656	1514.8
16.739	1517.08
16.822	1519.45
16.906	1522.35
16.989	1524.93
17.072	1527.54
17.156	1530.31
17.239	1533.02
17.322	1535.8
17.406	1538.57
17.489	1541.45
17.572	1544.54
17.655	1548.04
17.739	1551.37
17.822	1554.75
17.905	1558.22
17.989	1561.89
18.072	1565.3
18.155	1568.66
18.239	1572.17
18.322	1575.55
18.405	1579.16
18.489	1582.86
18.572	1586.7
18.655	1590.81
18.738	1594.78
18.822	1598.78
18.905	1602.78
18.988	1607.4
19.072	1612.04
19.155	1616.67
19.238	1621.39
19.321	1626.72
19.405	1631.74
19.488	1636.46
19.571	1641.09
19.655	1646.08
19.738	1651.45
19.821	1657.15
19.904	1663.03
19.988	1669.89
20.071	1676.24
20.154	1682.67
20.238	1689.22
20.321	1695.89
20.404	1702.75
20.487	1709.94
20.571	1717.35
20.654	1724.93
20.737	1733.12
20.821	1741.08
20.904	1749.32
20.987	1757.87
21.070	1766.96
21.154	1776.18

21.237	1785.77
21.320	1795.64
21.403	1806.57
21.487	1817.59
21.570	1828.75
21.653	1840.2
21.736	1852.91
21.820	1865.01
21.903	1877.39
21.986	1890.32
22.069	1902.44
22.152	1918.26
22.236	1941.56
22.319	1959.23
22.402	1969.6
22.485	1977.76
22.568	1994.9
22.652	2013.93
22.735	2035.56
22.818	2056.98
22.901	2079.12
22.984	2102.04
23.067	2127.51
23.151	2152.86
23.234	2179.18
23.317	2206.47
23.400	2235.35
23.483	2265.51
23.566	2297.98
23.649	2332.46
23.732	2371.33
23.815	2410.95
23.898	2452.43
23.981	2494.72
24.064	2544.27
24.147	2596.85
24.230	2651.17
24.313	2706.41
24.396	2771.23
24.479	2839.28
24.561	2911.54
24.644	2986.64
24.727	3070.95
24.810	3160.49
24.892	3257.79
24.975	3360.69
25.057	3473.62
25.140	3591.97
25.222	3724.72
25.304	3868.98
25.386	4025.55
25.469	4196.13
25.551	4377.75
25.632	4577.34
25.714	4787.87
25.796	5031.81
25.877	5292.72
25.959	5572.36
26.040	5867.24
26.121	6196.25
26.201	6550.63

26.282	6930.68
26.363	7327.06
26.443	7769.87
26.523	8232.22
26.603	8719.98
26.682	9227.09
26.762	9769.06
26.841	10329.6
26.920	10907.4
26.999	11495.7
27.078	12081.1
27.157	12635.1
27.236	13113.6
27.315	13484.3
27.396	13535.7
27.478	13211.9
27.564	12390.8
27.653	11248.7
27.752	9243.57
27.854	6997.3
27.956	4948.38
28.055	3283.56
28.145	2540.06
28.233	2050.28
28.319	1749.59
28.405	1531.99
28.489	1436.65
28.573	1367.07
28.656	1321.94
28.740	1290.07
28.823	1271.58
28.907	1257.04
28.990	1247.12
29.074	1237.44
29.157	1235.63
29.240	1233.3
29.324	1230.93
29.407	1228.41
29.490	1227.05
29.574	1225.35
29.657	1223.98
29.740	1222.82
29.824	1222.35
29.907	1221.99
29.990	1221.88
30.074	1222.17
30.157	1223.46
30.240	1224.46
30.324	1226.54
30.407	1230.32
30.490	1237.56
30.573	1270.21
30.656	1385.83
30.738	1587.57
30.821	1632.65
30.904	1573.45
30.988	1481.42
31.072	1402.14
31.156	1338.87
31.240	1309.2
31.323	1285.75

31.407	1269.16
31.490	1256.85
31.573	1251.75
31.657	1249.3
31.740	1248.36
31.823	1249.01
31.907	1253.97
31.990	1257.52
32.073	1261.14
32.157	1262.23
32.240	1259.83
32.323	1256.27
32.407	1252.49
32.490	1249.32
32.573	1244.85
32.657	1240.88
32.740	1236.93
32.824	1232.89
32.907	1229.05
32.990	1225.07
33.074	1221.22
33.157	1217.66
33.240	1214.29
33.324	1210.9
33.407	1207.68
33.490	1204.55
33.574	1202.44
33.657	1200.14
33.740	1198
33.824	1196.18
33.907	1195.03
33.990	1193.67
34.074	1192.43
34.157	1191.33
34.240	1190.39
34.324	1189.46
34.407	1188.57
34.491	1187.76
34.574	1187.3
34.657	1186.76
34.740	1186.42
34.824	1186.18
34.907	1186
34.990	1185.83
35.074	1185.57
35.157	1185.25
35.240	1184.77
35.324	1184.34
35.407	1183.86
35.490	1183.3
35.574	1182.93
35.657	1182.75
35.740	1182.49
35.824	1182.24
35.907	1182.31
35.990	1182.18
36.074	1181.89
36.157	1181.62
36.240	1181.01
36.324	1180.42
36.407	1179.88



36.490	1179.46
36.574	1179
36.657	1178.63
36.740	1178.35
36.824	1178.07
36.907	1177.66
36.990	1177.51
37.074	1177.09
37.157	1176.48
37.240	1175.78
37.324	1174.75
37.407	1173.78
37.490	1172.71
37.574	1171.61
37.657	1170.14
37.740	1168.79
37.824	1167.49
37.907	1166.22
37.990	1165.19
38.074	1164.06
38.157	1162.7
38.241	1161.44
38.324	1160.55
38.407	1159.46
38.491	1158.26
38.574	1156.96
38.657	1156.29
38.741	1155.73
38.824	1155.13
38.907	1154.53
38.991	1154.34
39.074	1153.8
39.157	1153.24
39.241	1152.72
39.324	1152.09
39.407	1151.31
39.491	1150.65
39.574	1150.2
39.657	1149.83
39.741	1149.5
39.824	1149.31
39.907	1149.12
39.991	1148.81
40.074	1148.7
40.157	1148.59
40.241	1148.45
40.324	1148.34
40.407	1148.11
40.491	1147.81
40.574	1147.51
40.657	1147.2
40.740	1146.64
40.824	1146.16
40.907	1145.61
40.990	1145.1
41.074	1144.49
41.157	1143.93
41.240	1143.45
41.324	1142.91
41.407	1142.13
41.491	1141.57

41.574	1141.05
41.657	1140.65
41.740	1140.64
41.824	1140.64
41.907	1140.47
41.990	1140.26
42.074	1140.7
42.157	1140.82
42.240	1140.65
42.324	1140.3
42.407	1139.69
42.490	1139.24
42.574	1138.8
42.657	1138.19
42.740	1137.66
42.824	1137.24
42.907	1136.68
42.990	1136
43.074	1136.08
43.157	1135.92
43.240	1135.75
43.324	1135.69
43.407	1135.64
43.490	1135.32
43.574	1134.98
43.657	1134.73
43.740	1134.4
43.824	1134.38
43.907	1134.48
43.990	1134.61
44.074	1134.84
44.157	1134.71
44.240	1134.51
44.324	1134.31
44.407	1133.66
44.490	1133.46
44.574	1133.36
44.657	1133.08
44.740	1132.68
44.824	1132.53
44.907	1132.25
44.990	1131.85
45.074	1131.49
45.157	1130.74
45.240	1130.14
45.324	1129.65
45.407	1129.15
45.490	1128.4
45.574	1127.72
45.657	1127.17
45.740	1126.66
45.824	1126.43
45.907	1126.29
45.990	1126.05
46.074	1125.78
46.157	1126.1
46.240	1126.25
46.324	1126.36
46.407	1126.36
46.490	1125.83
46.574	1125.39

46.657	1124.98
46.740	1124.53
46.824	1123.79
46.907	1123.54
46.990	1123.33
47.074	1122.98
47.157	1122.99
47.240	1122.68
47.324	1122.37
47.407	1122.17
47.490	1122.12
47.574	1121.95
47.657	1121.93
47.740	1121.89
47.824	1121.88
47.907	1122.12
47.990	1122.18
48.074	1122.18
48.157	1122.06
48.240	1121.84
48.324	1121.48
48.407	1121.11
48.490	1120.83
48.574	1120.53
48.657	1120.23
48.740	1119.9
48.824	1119.6
48.907	1119.45
48.990	1119.27
49.074	1118.94
49.157	1118.41
49.240	1117.81
49.324	1117.37
49.407	1117.01
49.490	1116.79
49.574	1116.48
49.657	1116.2
49.740	1116.05
49.824	1116.08
49.907	1116.34
49.990	1116.74

## Παράρτημα Β

### Υπολογισμοί τιμών υγρασίας (βλ §5.5.1)

Για τον υπολογισμό του ποσοστού υγρασίας σε κάθε θερμική ζώνη, χρησιμοποιείται η εξίσωση:

$$w = \frac{mwater_{air} + mwater_{wall}}{mwater_{air}}$$

Παρουσιάζεται αναλυτικά ο υπολογισμός για ένα δωμάτιο, ενώ ο πίνακας που ακολουθεί, δίνει τις τιμές για τα υπόλοιπα δωμάτια.

Δωμάτιο [BDR] διαστάσεων (w)4\*(l)5\*(h)3m, με τοίχο γυψοσανίδα, πάχους 0,005m.

$$mwater_{air}[kg_{H2O}] = 60m^3 * 1.2 \frac{kg_{air}}{m^3} * 0.016 \frac{kg_{H2O}}{kg_{air}} = 1.15$$

$$mwater_{wall}[kg_{H2O}] = 0.37m^3 * 900 \frac{kg_{air}}{m^3} * 0.015 \frac{kg_{H2O}}{kg_{air}} = 5$$

Επομένως,  $w = 5.3$

Οι τιμές λαμβάνονται από το εγχειρίδιο του TRNSYS, και παρατίθεται για λόγους πληρότητας. Ο τρόπος υπολογισμού του ποσοστού υγρασίας στο λογισμικό του TRNSYS ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας διατριβής, καθώς εξαρτάται από το εκάστοτε λογισμικό που χρησιμοποιείται.

Material	Density $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\kappa$ $\left[ \frac{kg_{water}/kg_{building\_material}}{rel\_humidity} \right]$	Diffusion Resistance $\mu$
Heavy Concrete	2200	0.04	70-150
Porous o. Gas Concrete	600	0.05-0.08	5-10
Sand-Lime Brick	1900	0.03	15-25
Clay Brick	1600	0.005	5-10
Plaster	1800	0.02	5-20
Gypsum	900	0.015	8
Wood	600	0.20	40
Cork	100	0.03	5-10
Mineral Wool	100	0.01	1
HR-Foam	20	0.7	20-70

Εικόνα Β-1: Ιδιότητες υλικών για το humidity model του TRNSYS (εγχειρίδιο TRNSYS, Πίνακας 6.4.3-1)

**Πίνακας Β-1**

<b>Δωμάτιο</b>	<b>Λόγος w</b>
<b>LVR</b>	<b>6.2</b>
<b>MBDR</b>	<b>5.4</b>
<b>BDR</b>	<b>5.3</b>
<b>KTC</b>	<b>3.2</b>
<b>OFF</b>	<b>4.7</b>
<b>STR</b>	<b>2.1</b>

## Παράρτημα Γ

Αποτελέσματα παραμετρικών προσομοιώσεων (βλ. §6.4)

### Διαφυγές

	Παραμετρική μελέτη: Διαφυγές ( m <sup>3</sup> /h/m <sup>3</sup> )		
	0,25	0,5	0,75
Απαιτούμενη ενέργεια – περίπτωση με ΥΑΦ	18,12 kWh/m <sup>2</sup>	17,88 kWh/m <sup>2</sup>	16,75 kWh/m <sup>2</sup>
Απαιτούμενη ενέργεια – περίπτωση χωρίς ΥΑΦ	23,43 kWh/m <sup>2</sup>	23,09 kWh/m <sup>2</sup>	22,73 kWh/m <sup>2</sup>

	Παραμετρική μελέτη: Διαφυγές ( m <sup>3</sup> /h/m <sup>3</sup> )		
	1	1,25	1,5
Απαιτούμενη ενέργεια – περίπτωση με ΥΑΦ	15,78 kWh/m <sup>2</sup>	15,14 kWh/m <sup>2</sup>	15,96 kWh/m <sup>2</sup>
Απαιτούμενη ενέργεια – περίπτωση χωρίς ΥΑΦ	22,04 kWh/m <sup>2</sup>	21,89 kWh/m <sup>2</sup>	23,58 kWh/m <sup>2</sup>

	Παραμετρική μελέτη: Διαφυγές ( m <sup>3</sup> /h/m <sup>3</sup> )		
	1,75	2	2,25
Απαιτούμενη ενέργεια – περίπτωση με ΥΑΦ	17,05 kWh/m <sup>2</sup>	20,25 kWh/m <sup>2</sup>	20,47 kWh/m <sup>2</sup>
Απαιτούμενη ενέργεια – περίπτωση χωρίς ΥΑΦ	25,51 kWh/m <sup>2</sup>	29,39 kWh/m <sup>2</sup>	30,24 kWh/m <sup>2</sup>

### Υγρασία κλίμακας 1-5 (TRNSYS)

	1	1,5	2
Απαιτούμενη ενέργεια – περίπτωση με ΥΑΦ	17.31 kWh/m <sup>2</sup>	17,48 kWh/m <sup>2</sup>	17,95 kWh/m <sup>2</sup>
Απαιτούμενη ενέργεια – περίπτωση χωρίς ΥΑΦ	22.14 kWh/m <sup>2</sup>	22,59 kWh/m <sup>2</sup>	23,13 kWh/m <sup>2</sup>

	2,5	3	3,5
Απαιτούμενη ενέργεια – περίπτωση με ΥΑΦ	18,58 kWh/m <sup>2</sup>	19,05 kWh/m <sup>2</sup>	19,94 kWh/m <sup>2</sup>
Απαιτούμενη ενέργεια – περίπτωση χωρίς ΥΑΦ	24,04 kWh/m <sup>2</sup>	24,82 kWh/m <sup>2</sup>	25,64 kWh/m <sup>2</sup>

	4	4,5	5
Απαιτούμενη ενέργεια – περίπτωση με ΥΑΦ	21,05 kWh/m <sup>2</sup>	22,95 kWh/m <sup>2</sup>	24,06 kWh/m <sup>2</sup>
Απαιτούμενη ενέργεια – περίπτωση χωρίς ΥΑΦ	27,01 kWh/m <sup>2</sup>	28,09 kWh/m <sup>2</sup>	30,08 kWh/m <sup>2</sup>

### Υγρασία με τιμές TRNSYS

	Όλα τα δωμάτια	Συνδυασμός με ΚΕΝΑΚ
Απαιτούμενη ενέργεια – περίπτωση με ΥΑΦ	25,57 kWh/m <sup>2</sup>	22,25 kWh/m <sup>2</sup>
Απαιτούμενη ενέργεια – περίπτωση χωρίς ΥΑΦ	28,84 kWh/m <sup>2</sup>	24,45 kWh/m <sup>2</sup>