

ΠΟΛΥ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΔΟΜΙΚΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΜΑΡΜΑΡΟ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ιωάννης Μανδηλαράς

Μηχανολόγος Μηχανικός-Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π., Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Μαρία Φούντη

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π., Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Μιχάλης Πατρώνης

Μεταλλειολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π., Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών

Κωνσταντίνος Λασκαρίδης

Γεωλόγος, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών

Λέξεις κλειδιά: Υλικά Αλλαγής Φάσης (Phase Change Materials-PCMs), αποθήκευση θερμότητας

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η εργασία εξετάζει τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας σε πλακίδια μαρμάρου με χρήση Υλικών Αλλαγής Φάσης-ΥΑΦ (Phase Change Materials - PCMs), τα οποία έχουν τη δυνατότητα ετεροχρονισμού της διαθέσιμης και απαιτούμενης θερμότητας για θέρμανση και ψύξη ενός δομικού στοιχείου. Αποτέλεσμα της ενσωμάτωσης PCMs σε δομικά υλικά είναι η μείωση της μέγιστης/ελάχιστης θερμοκρασίας που αποκτά το στοιχείο σε σχέση με τις συνθήκες που επικρατούν στον περιβάλλοντα χώρο, η μείωση διακύμανσης της θερμοκρασίας καθώς και η χρονική μετατόπιση θερμικών φορτίων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

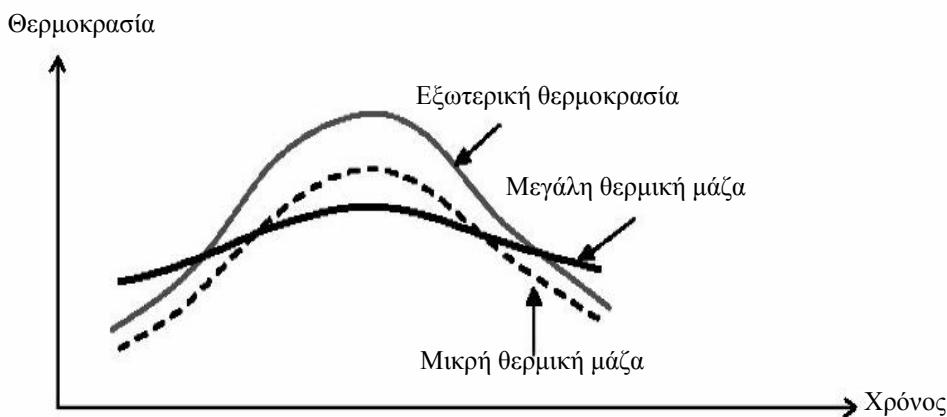
Η θερμοχωρητικότητα (θερμική μάζα) των δομικών στοιχείων και υλικών που απαρτίζουν ένα κτίριο επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη θερμική συμπεριφορά και την ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου. Με την ενσωμάτωση Υλικών Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ) στα δομικά υλικά επιτυγχάνεται αύξηση της θερμικής μάζας ενός κτιρίου. Την άνοιξη ή το φθινόπωρο η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί παθητικά με την αποθήκευση της ηλιακής ακτινοβολίας στα δομικά στοιχεία του κτιρίου. Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες η αυξημένη θερμική μάζα μπορεί να αποτρέψει την αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας πάνω από τα επίπεδα

άνεσης. Σε κάθε περίπτωση ως αποτέλεσμα της ενσωμάτωσης υλικών αλλαγής φάσης στα δομικά υλικά προκύπτει μείωση της διακύμανσης της θερμοκρασίας των εσωτερικών χώρων (Εικόνα 1.).

Τα υλικά αλλαγής φάσης (ΥΑΦ) αποτελούν αντικείμενο έρευνας για την εξοικονόμηση ενέργειας στον κτιριακό τομέα εδώ και τρεις δεκαετίες. Με την ενσωμάτωση ΥΑΦ σε γυψοσανίδες, επιχρίσματα τοιχοποιίας, τσιμέντο και άλλα δομικά στοιχεία έγινε προσπάθεια να ενισχυθεί ο ρόλος των δομικών υλικών ενός κτιρίου στην εξοικονόμηση ενέργειας.

Οι περισσότερες ερευνητικές εργασίες επικεντρώνονται στην ενσωμάτωση ΥΑΦ σε γυψοσανίδες. Πολλοί τύποι ΥΑΦ χρησιμοποιήθηκαν και ενσωματώθηκαν με ποικίλους τρόπους. Ωστόσο, η χρήση ΥΑΦ σε μορφή μικροκάψουλας παρουσιάζει τα περισσότερα πλεονεκτήματα και είναι η πλέον ενδεδειγμένη (Schossig et al. 2005).

Η ενσωμάτωση ΥΑΦ σε τσιμέντο πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά από τους Hawes et al. (1989) με εμφάνιση δοκιμίων τσιμέντου σε υγρή δωδεκανόλη και βουτυλεστέρα. Όπως και στην περίπτωση των γυψοσανίδων, όμως η έρευνα οδήγησε στη χρήση μικροκάψουλων ΥΑΦ και στην περίπτωση του τσιμέντου. Οι Cabeza et al. (2007) ενσωμάτωσαν μικροκάψουλες ΥΑΦ σε τσιμέντο και κατασκεύασαν πρότυπα δωμάτια. Η μελέτη τους έδειξε αυξημένη θερμική αδράνεια των δωματίων αυτών σε σχέση με δωμάτια αναφοράς του ίδιου υλικού χωρίς ΥΑΦ. Η μέγιστη θερμοκρασία στο εσωτερικό των δωματίων κατά τους καλοκαιρινούς μήνες ήταν μέχρι 3 °C χαμηλότερη σε σχέση με τα δωμάτια αναφοράς.



Εικόνα 1. Επίδραση της θερμικής μάζας στην ημερήσια θερμοκρασιακή διακύμανση στο εσωτερικό κτιρίων. (International Energy Agency – Annex 17).

2. ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

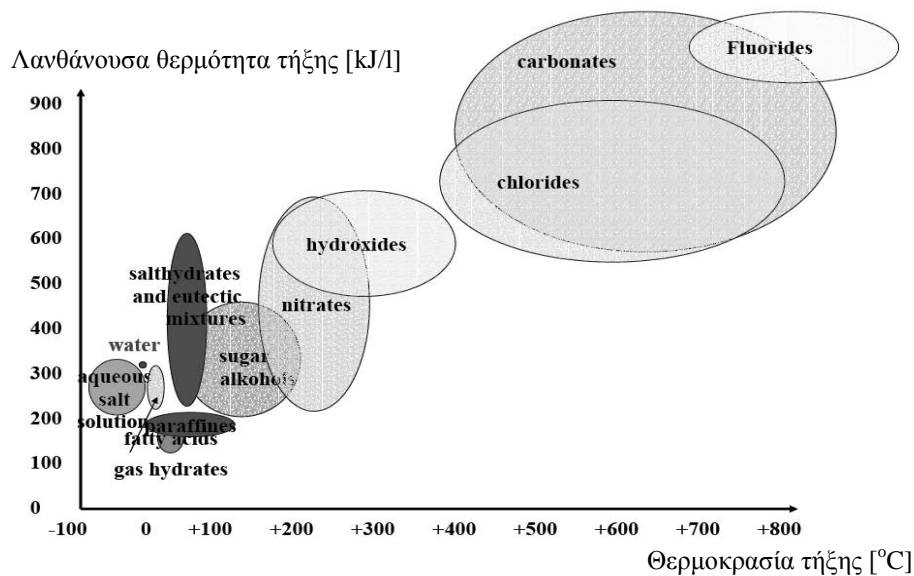
Η θερμική ενέργεια ανά μονάδα όγκου που αποθηκεύεται σε ένα υλικό όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του εξαρτάται από την ειδική θερμοχωρητικότητα, την πυκνότητα και την τιμή της αύξησης της θερμοκρασίας. Η εισαγωγή και χρήση ΥΑΦ επιτρέπει την αποθήκευση μεγάλων ποσών θερμότητας σε πολύ μικρά θερμοκρασιακά εύρη καθιστώντας εφικτή, αφενός την αποθήκευση θερμότητας σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος και αφετέρου, την εξισορρόπηση και τον έλεγχο της θερμοκρασίας σε επιθυμητές τιμές.

Για θερμοκρασιακή διαφορά $\Delta T = T_2 - T_1$ προκύπτει:

$$Q_{ls} = \int_{T_1}^{T_2} \rho \cdot V \cdot C_p \cdot dT + \Delta H_f \quad (1)$$

όπου Q_{ls} = συνολική θερμότητα, ρ = πυκνότητα, V = όγκος, C_p = ειδική θερμοχωρητικότητα και ΔH_f = λανθάνουσα θερμότητα.

Παραφίνες, κεριά και λιπαρά οξέα είναι τα συνηθέστερα ΥΑΦ που χρησιμοποιούνται στην πράξη για εφαρμογές εξοικονόμησης ενέργειας και ελέγχου θερμοκρασίας (Εικόνα 2).



Εικόνα 2. Υλικά υποψήφια για χρήση ως ΥΑΦ (International Energy Agency – Annex 17).

2.1 Κριτήρια επιλογής ΥΑΦ

Όλα τα υλικά όταν αλλάζουν φάση αποθηκεύουν ή αποδίδουν ενέργεια προς το περιβάλλον. Δεν είναι όμως όλα κατάλληλα για εφαρμογή σε συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας και πολύ περισσότερο για ενσωμάτωση σε δομικά υλικά. Η αλλαγή φάσης πρέπει να είναι πλήρως αναστρέψιμη με μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας και μικρή αλλαγή όγκου. Πρέπει να παρουσιάζουν χημική σταθερότητα, αδράνεια και πλήθος άλλων κριτηρίων συμπεριλαμβανομένων και οικονομικών παραγόντων (Μανδηλαράς, 2006).

Η πιο σημαντική ιδιότητα που θα καθορίσει την επιλογή ενός υλικού είναι η θερμοκρασία αλλαγής φάσης. Για εφαρμογές στον κτιριακό τομέα ενδείκνυται η επιλογή θερμοκρασίας αλλαγής φάσης 1-3 °C πάνω από την επιθυμητή θερμοκρασία άνεσης του εσωτερικού χώρου (Peippo et al. 1991). Οι υπόλοιπες θερμικές ιδιότητες που εξετάζονται είναι η λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης και η θερμική αγωγιμότητα.

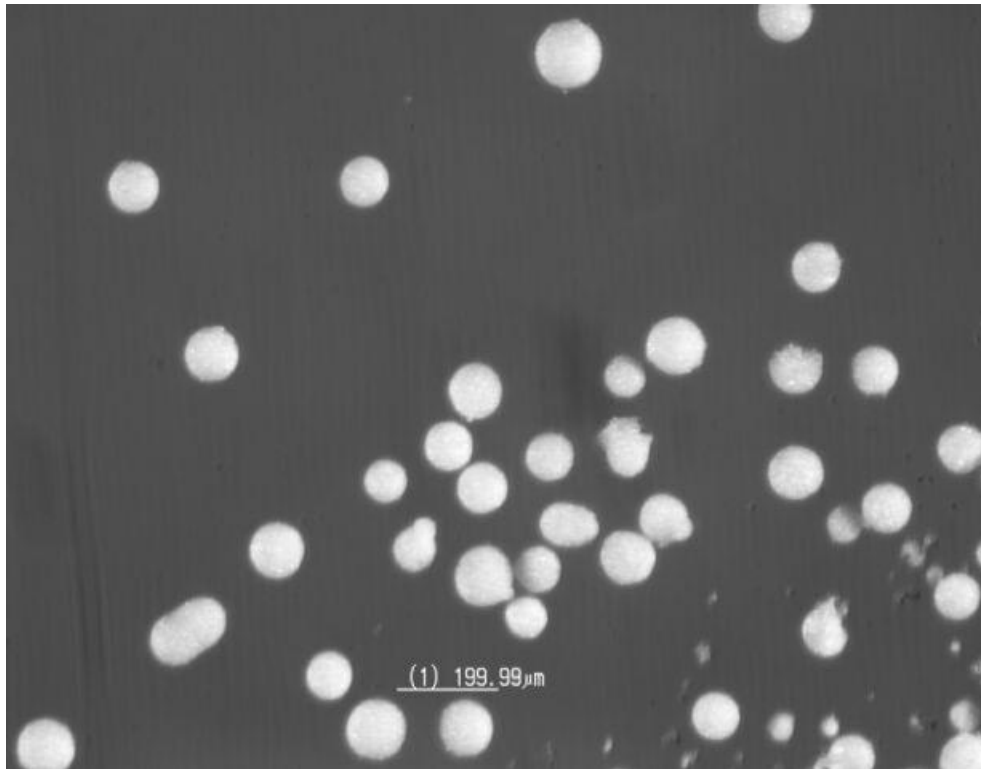
Σημαντικά κριτήρια για την δυνατότητα ενός υλικού να χρησιμοποιηθεί ως ΥΑΦ είναι η πυκνότητα, η τοξικότητα, η εμφάνιση υπόψυξης (supercooling effect), και η οσμή. Επιπλέον το ΥΑΦ πρέπει να είναι συμβατό με το δομικό υλικό με το οποίο συνδυάζεται στην στερεή αλλά και στην υγρή φάση. Ειδικά για την υγρή φάση πρέπει να εξασφαλίζεται ότι δεν θα υπάρξει διαρροή του ΥΑΦ από το εσωτερικό του δομικού υλικού.

Όσον αφορά στους οικονομικούς παράγοντες το ΥΑΦ πρέπει να είναι διαθέσιμο στην αγορά σε επαρκείς ποσότητες και κατά προτίμηση από ανανεώσιμες πηγές. Τα οφέλη (οικονομικά και περιβαλλοντικά) από την χρήση του ΥΑΦ πρέπει να είναι ανταγωνιστικά σε σύγκριση με το κόστος αγοράς και ενσωμάτωσης του στο δομικό υλικό.

2.2 Micronal® DS 5001

Με βάση τα προηγούμενα κριτήρια έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετά υλικά τόσο σε ερευνητικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο εφαρμογών. Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε το προϊόν micronal DS 5001 της εταιρίας BASF, μετά από συγκριτική μελέτη της συμπεριφοράς 4 διαφορετικών ΥΑΦ.

Το συγκεκριμένο υλικό (Εικόνα 3) είναι σε μορφή υπέρλεπτης σκόνης με μέγεθος κόκκου μικρότερο των 150 μm. Το κέλυφος κάθε κόκκου αποτελείται από πολυμερές υλικό (polymethyl-methacrylate) το οποίο εμποδίζει τη διαρροή του μείγματος παραφινών που βρίσκονται στο εσωτερικό του και αποτελούν το ΥΑΦ. Το κερί στο εσωτερικό των μικροκόκκων απορροφά και αποδίδει θερμότητα κατά την αλλαγή φάσης από στερεό σε υγρό και αντίστροφα σε μία περιοχή θερμοκρασιών κοντά στους 26 °C. Η απορροφώμενη ενέργεια, οφειλόμενη στην αλλαγή φάσης, είναι της τάξης των 110 kJ/kg και η πυκνότητα του υλικού είναι περίπου 300 kg/m³.



Εικόνα 3. Φωτογραφία από στερεοσκόπιο του Micronal DS 5001.

3. ΠΟΛΥ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΠΛΑΚΙΔΙΑ

Με βάση εργαστηριακά αποτελέσματα των Founti et al. (2006) που αφορούν επικάλυψη πλακιδίων με μείγμα ΥΑΦ και ρητινών, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε βιομηχανία επεξεργασίας μαρμάρου στη Β. Ελλάδα (Θάσος).

3.1 Μάρμαρο

Για τις βιομηχανικές δοκιμές επιλέχθηκε λευκό δολομιτικό μάρμαρο από τη περιοχή «Λιμένας Θάσου» το οποίο διατίθεται στην αγορά με την εμπορική ονομασία “ΠΡΙΝΟΣ”. Η επιλογή έγινε τόσο με βάση την ορυκτολογική σύσταση και τα φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά (Πίνακας 1), όσο και με τις εφαρμογές. Το συγκεκριμένο μάρμαρο χρησιμοποιείται σήμερα στην Ελλάδα κυρίως για ορθομαρμαρώσεις (μεγάλη χρονική διάρκεια έκθεσης σε ηλιακή ακτινοβολία), αλλά και για άλλες χρήσεις σε μεγάλα κτήρια.

Πίνακας 1. Ορυκτολογική σύσταση και φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά λευκού δολομιτικού μαρμάρου Λιμένα Θάσου (Εργ. Λίθος, ΙΓΜΕ)

Ιδιότητες	Πρίνος
Ορυκτολογική σύσταση (βάρος %)	Δολομίτης 94% Ασβεστίτης 5% Αλβίτης 1%
Φαινόμενη πυκνότητα (EN 1936)	2840 kg/m ³
Ανοικτό πορώδες (EN 1936)	0.4 % κ.ο.
Υδαταπορρόφηση σε ατμοσφαιρική πίεση (EN 13755)	0.1 % κ.β.
Αντοχή σε θλίψη (EN 1926)	151.6 MPa
Αντοχή σε κάμψη (EN 12372)	15.9 MPa
Αντίσταση σε παγετό, 24 κύκλοι (EN 12371 & EN 1926)	145.1 MPa
Αντίσταση σε τριβή (EN 14157 – Μέθοδος Β)	21,287 mm ³
Ενέργεια θραύσης (EN 14158)	3 J

3.2 Ρητίνες – Διαδικασία δοκιμών

Πραγματοποιήθηκε κατ' αρχάς δειγματοληψία και προετοιμασία αντιπροσωπευτικών δοκιμών. Για τις δοκιμές επιλέχθηκαν ένδεκα δοκίμια διαστάσεων 20 x 20 x 3 cm (1 δείγμα αναφοράς και 10 δείγματα με επικάλυψη).

Κατά τη διαδικασία των δοκιμών πρώτα ετοιμάστηκε και αναμείχθηκε σε μείκτη το μείγμα των ΥΑΦ (BASF Micronal DS 5001, σε αναλογία 19 – 38 % κ.μ.) με ευαίσθητη σε UV-ακτινοβολία ρητίνη/πληρωτικό (AKEMI, Art Nr. 1 11 80, “Transparent Thassos”, Resin solutions σε αναλογία 30 – 70 % κ.μ.) καθώς και πληρωτικό υλικό του ίδιου του μαρμάρου κοκκομετρίας < 70μm (αναλογία 50 – 6 % κ.μ.). Επιπλέον σε τρία δοκίμια το πληρωτικό μαρμάρου αντικαταστάθηκε από πολτό (“μουργκάνα”) προερχόμενο από τη παραγωγική διαδικασία, κοκκομετρίας < 41μm, περιεκτικότητας σε νερό ca. 21 % κ.μ., σε αναλογία 15 – 55 % κ.μ.

Παρασκευάστηκαν συνολικά ένδεκα μείγματα («μαστίχες»). Στη συνέχεια έγινε η επικάλυψη κάθε δοκιμίου με μαστίχα γνωστής σύστασης και βάρους. Η επικάλυψη έγινε με σπάτουλα ώστε να δημιουργηθεί ομογενές λεπτό φιλμ της μαστίχας και τέλος ακολούθησε η ξήρανση των δοκιμίων σε ξηραντήριο υπεριώδους ακτινοβολίας (Εικόνα 4). Η ευκολία

εφαρμογής και η ομογένεια της επικάλυψης ήταν καλύτερη για τα δείγματα που περιείχαν πολτό. Για τα δείγματα αυτά, ο χρόνος ξήρανσης ήταν μικρότερος σε σχέση με τα δείγματα χωρίς πολτό.



Εικόνα 4. Έξοδος δειγμάτων από το ξηραντήριο υπεριώδους ακτινοβολίας.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

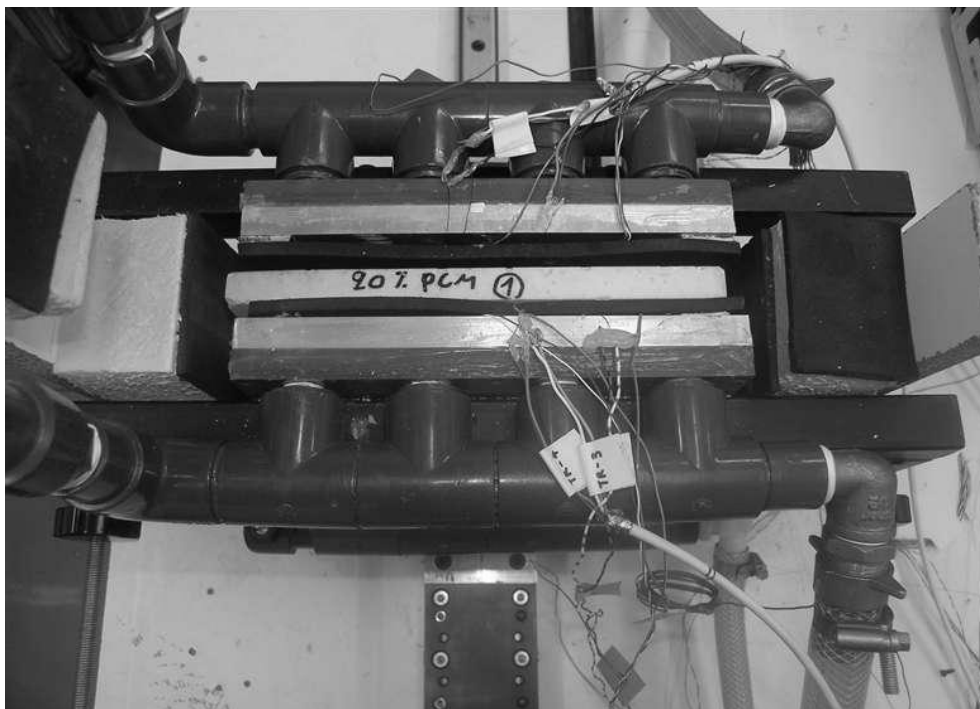
Προκειμένου να γίνει αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς των νέων υλικών σε μεταβατικές συνθήκες, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε πειραματική διάταξη. Πρέπει να σημειωθεί ότι συμβατικές μετρητικές μέθοδοι (π.χ. μέτρηση του συντελεστή ειδικής θερμοχωρητικότητας, C_p) δεν μπορούν να εφαρμοσθούν στη περίπτωση των δομικών υλικών με ιδιότητες αποθήκευσης ενέργειας διότι το ποσό της ενέργειας που αποθηκεύεται ή εκλύεται από το υλικό είναι συνάρτηση του εύρους θερμοκρασιών τήξης – πήξης του PCM και το C_p δεν μπορεί να μετρηθεί στη περιοχή αλλαγής φάσης. Μέσω της πρωτότυπης πειραματικής διάταξης μπορεί να μετρηθούν οι θερμοκρασίες και η ροή θερμότητας σε δομικά υλικά τα οποία υπόκεινται σε θέρμανση/ψύξη με σταθερή θερμοκρασιακή διαφορά, σε σταθερή ροή θερμότητας, και σε θερμικούς κύκλους με διαφορετικές θερμοκρασίες.

Η πειραματική διάταξη (Εικόνα 5) επιτρέπει τη μέτρηση επίπεδων δοκιμών επιφάνειας 20 x 20 cm. Τα δοκίμια τοποθετούνται και συσφίγγονται μεταξύ δύο αλουμινένιων πλακών της ίδιας διάστασης που μπορούν να θερμαίνονται ή να ψύχονται ανεξάρτητα. Με αυτόν τον τρόπο η

διάταξη επιτρέπει την εισαγωγή οποιουδήποτε θερμοκρασιακού προφίλ στις επιφάνειες του δοκιμίου. Η μελέτη της θερμικής απόκρισης των δοκιμίων γίνεται με τη μέτρηση της ροής θερμότητας από τις πλάκες προς το δοκίμιο και τη μέτρηση των θερμοκρασιών στις επιφάνειες του.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δύο διαφορετικές μετρήσεις: α) Στην πρώτη περίπτωση δοκίμια ομοιόμορφης θερμοκρασίας $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ εισάγονται στη μετρητική διάταξη, οι πλάκες της οποίας είναι ρυθμισμένες στους $45\text{ }^{\circ}\text{C}$. β) Στην δεύτερη περίπτωση δοκίμια αρχικής θερμοκρασίας $25.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ υποβάλλονται σε κυκλική θερμοκρασιακή μεταβολή. Η μία πλάκα διατηρεί σταθερή τη θερμοκρασία της στους $25.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ενώ η θερμοκρασία της άλλης μεταβάλλεται ημιτονοειδώς από τους $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ στους $32\text{ }^{\circ}\text{C}$. Και στις δύο περιπτώσεις καταγράφονται οι θερμοκρασίες στις επιφάνειες των δοκιμίων. Για την εξαγωγή συμπερασμάτων οι μετρήσεις συγκρίνονται κάθε φορά με αντίστοιχες μετρήσεις σε δοκίμια αναφοράς του ίδιου υλικού χωρίς ΥΑΦ.

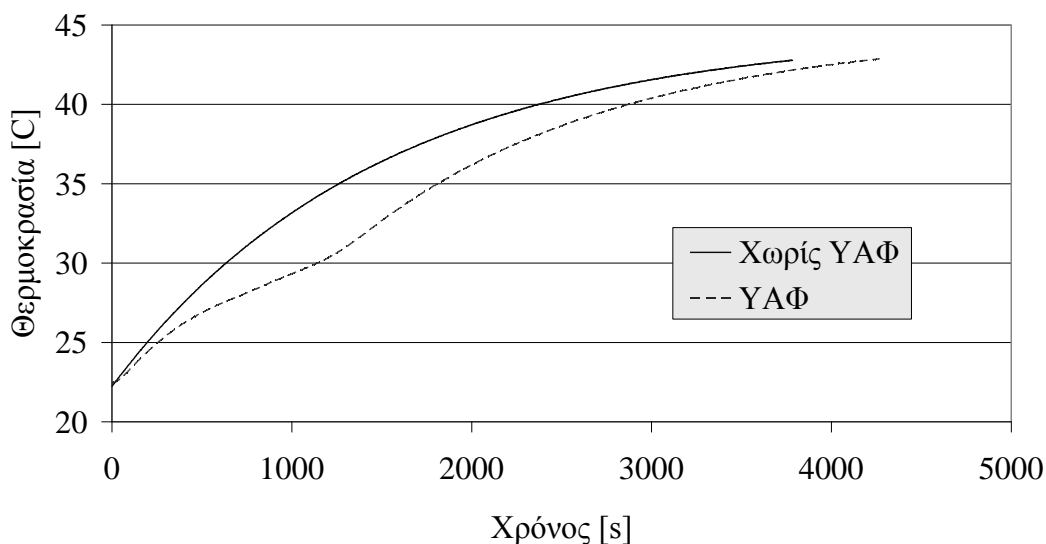


Εικόνα 5. Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση θερμικής συμπεριφοράς δοκιμίων με ΥΑΦ.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τα δοκίμια μαρμάρου-ΥΑΦ-ρητίνη-πληρωτικό. Για οικονομία χώρου παρουσιάζονται μόνο τ' αποτελέσματα των μετρήσεων με τα δοκίμια που επέδειξαν τη καλύτερη συμπεριφορά όσον αφορά την αποθήκευση θερμότητας.

Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται ένα συγκριτικό διάγραμμα θέρμανσης δοκιμίου με και χωρίς ΥΑΦ. Ο άξονας των θερμοκρασιών αναφέρεται στη θερμοκρασία στην επιφάνεια του δοκιμίου. Η μέτρηση γίνεται με αισθητήρες τύπου θερμίστορ ακρίβειας 0,1 °C. Είναι εμφανές ότι στην περιοχή από 25 °C έως 30 °C η αύξηση της θερμοκρασίας του δοκιμίου με ΥΑΦ ακολουθεί πιο αργό ρυθμό. Αυτό οφείλεται στο ποσό της θερμότητας που αποθηκεύεται ως λανθάνουσα θερμότητα κατά την αλλαγή φάσης του ΥΑΦ που ξεκινά στους 25 °C και ολοκληρώνεται περίπου στους 30 °C. Η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δοκιμίου με και χωρίς ΥΑΦ ανέρχεται μέχρι τους 5 °C.

Συγκριτικό διάγραμμα θέρμανσης

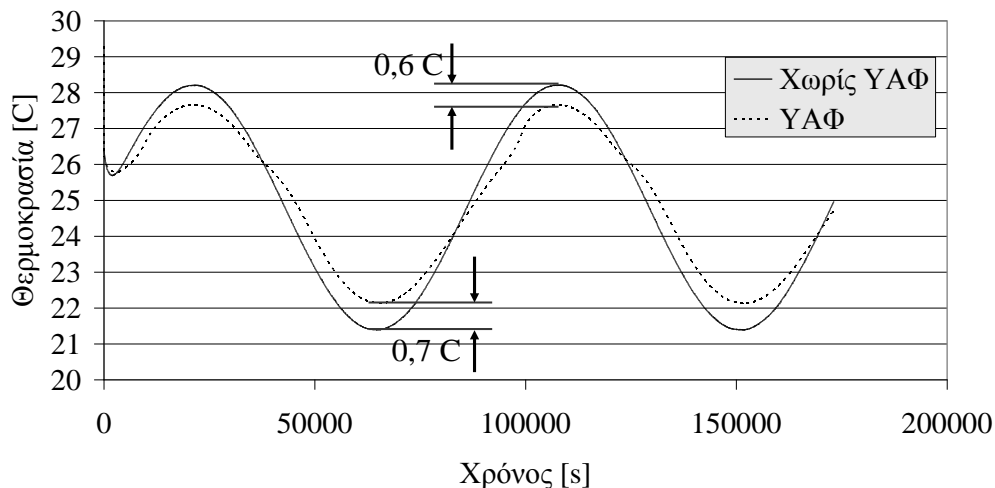


Εικόνα 6. Συγκριτικό διάγραμμα θέρμανσης.

Στην Εικόνα 7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από μέτρηση κατά την οποία το δοκίμιο υποβάλλεται σε κυκλική (ημιτονοειδή) μεταβολή θερμοκρασίας. Στην περίπτωση αυτή φαίνεται η τάση του δοκιμίου που περιέχουν ΥΑΦ να σταθεροποιεί τη θερμοκρασία γύρω από την περιοχή του σημείου αλλαγής φάσης. Αποτέλεσμα της σταθεροποίησης αυτής είναι

η μείωση της συνολικής διακύμανσης της θερμοκρασίας του δοκιμίου με μείωση της μέγιστης και αύξηση της ελάχιστης θερμοκρασίας. Για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των 10 ωρών η θερμοκρασία του πλακιδίου με ΥΑΦ είναι ως και 1 °C χαμηλότερη του αντίστοιχου πλακιδίου χωρίς ΥΑΦ.

Κυκλική Μεταβολή Θερμοκρασίας



Εικόνα 7. Συγκριτικό διάγραμμα κυκλικής μεταβολής της θερμοκρασίας.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η δυνατότητα ενσωμάτωσης υλικών αλλαγής φάσης σε δομικά υλικά και συγκεκριμένα σε πλακίδια μαρμάρου. Από τα ΥΑΦ που υπάρχουν διαθέσιμα στην αγορά, οι μικροκάψουλες παραφίνης καθιστούν δυνατή την ενσωμάτωση ΥΑΦ σε πλακίδια μαρμάρου προσφέροντας πολλαπλά πλεονεκτήματα. Η ευκολία ενσωμάτωσης, η καλή θερμική αγωγιμότητα και η αποφυγή διαρροής του ΥΑΦ είναι τα βασικότερα πλεονεκτήματα.

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε πρωτότυπα πλακίδια που παρασκευάστηκαν με δολομιτικό μάρμαρο Λιμένα Θάσου κατέδειξαν τη δυνατότητα χρήσης των νέων υλικών για εξοικονόμηση ενέργειας στον κτιριακό τομέα. Συγκεκριμένα η εξομάλυνση της ημερήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας καθιστά εφικτή τη μείωση του θερμικού φορτίου που απαιτείται για την ψύξη ή τη θέρμανση τους καλοκαιρινούς ή τους χειμερινούς μήνες αντίστοιχα.

7. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το έργο χρηματοδοτείται από την ΕΕ, 6ο Πρόγραμμα Πλαίσιο, IP I-STONE, Contract No. NMP2-Ct-2005-515762. Η εργασία ανακλά τις απόψεις των συγγραφέων και η ΕΕ δεν φέρει ευθύνη για οποιαδήποτε χρήση της πληροφορίας που περιέχεται.

8. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Cabeza, L.F., Castello, C., Nogue, M., Medrano, M., Leppers, R., & Zubillaga, O., “Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings”, *J. Energy and Buildings*, Vol. 39, No 2 (2007) 113-119

Founti, M., Mandilaras, I., Laskaridis, K., Patronis, M., Romero-Sánchez, M.D. & López-Buendía, A. M., “Multi-Functional Building Products Based On Natural Stone And PCMs With Stabilised Thermal And Dynamic Load”, in *Proceedings of the 7th IIR Conference on Phase Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning (Dinan Brittany France September 13-15 2006)*, Association Francaise du Froid, Paris, France (2007) 201-212

Hawes, D.W., Banu, D. & Feldman, D., “Latent heat storage in concrete”, *J. Solar Energy Materials*, Vol. 19, No 3-5 (1989) 335-348

International Energy Agency, Annex 17, *Advanced Thermal Energy Storage Techniques – Feasibility Studies and Demonstration Projects, Implementing Agreement (ECES IA) on Energy Conservation through Energy Storage*, 2001

Peippo, K., Kauranen, P. & Lund, P. D., “A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating”, *J. Energy and Buildings*, Vol. 17, No 4 (1991) 259-270

Schossig, P., Henning, H.-M., Gschwander, S. & Haussmann, T., “Micro-encapsulated phase-change materials into construction materials”, *J. Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 89, No 2-3 (2005) 297-306

Μανδηλαράς, Ι., “Phase Change Energy Storage: Phase Change Materials, Measurements and Applications”, *Μεταπτυχιακή Εργασία (υπό την επίβλεψη της Καθ. Μ. Φούντη) ΔΠΜΣ Συστήματα Αυτοματισμού, Ε.Μ.Π., Αθήνα (2006)*