

# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ ΜΕΙΓΜΑΤΑ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM) ΣΤΗΝ Β ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΖΩΝΗ

Χ. Τζιβανίδης, Λέκτορας ΕΜΠ (ctzivan@central.ntua.gr)  
Κ.Α. Αντωνόπουλος, Καθηγητής ΕΜΠ  
Ε.Δ. Κραββαρίτης, Μηχανολόγος Μηχανικός, Υπ. Διδάκτωρ ΕΜΠ

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τμήμα Θερμότητας, Εργαστήριο Ψύξης και Κλιματισμού – Εργαστήριο Ηλιακής Ενέργειας  
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Ζωγράφου 157 73, Αθήνα

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην τεχνολογία αποθήκευσης θερμότητας κατά τις ηλιακές παθητικές κτιριακές εφαρμογές με χρήση υλικών αλλαγής φάσης (Phase Change Materials, PCM). Για την μελέτη της επίδρασης των πολυάριθμων παραμέτρων του προβλήματος (θερμοφυσικές ιδιότητες και περιεκτικότητα των PCM στα δομικά στοιχεία, τρόποι και θέση ενσωμάτωσης στο κτήριο, χαρακτηριστικά κτηρίου, κλιματολογικά δεδομένα, κλπ.) και τον προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης, αναπτύχθηκε και επιβεβαιώθηκε πειραματικά μοντέλο προσομοίωσης της διεργασίας αλλαγής φάσης σε συνδυασμό με την κτιριακή μεταφορά θερμότητας. Το αναπτυχθέν μοντέλο βασίζεται σε επίλυση πεπερασμένων διαφορών των διαφορικών εξισώσεων που εκφράζουν το πρόβλημα. Οι συγκεκριμένες συνθήκες που εξετάζονται αφορούν στο τυπικό κτίριο της Β κλιματικής ζώνης. Έμφαση δίδεται στην μελέτη της ενεργειακής απόδοσης δομικών μειγμάτων, στα οποία τα PCM ευρίσκονται υπό διάφορες περιεκτικότητες μέσα σε σκληρές μικροκάψουλες. Συμπεραίνεται ότι επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας μέχρι 33% της απαιτούμενης ετησίως για θέρμανση και ψύξη των τυπικών κτηρίων της Β κλιματικής ζώνης, υπό την προϋπόθεση ότι θα χρησιμοποιηθεί μείγμα με κατάλληλη περιεκτικότητα και θερμοφυσικές ιδιότητες PCM σε εσωτερικούς ή εξωτερικούς τοίχους στην εσωτερική πλευρά της μόνωσης απέναντι από υαλοπίνακες. Η επίδραση της περιεκτικότητας των PCM στην εξοικονόμηση ενέργειας είναι έντονη στις μικρές τιμές της περιεκτικότητας και ασθενής στις μεγάλες. Έτσι, για περιεκτικότητες PCM 0-30%, υπό κατάλληλες συνθήκες, μπορεί να εξοικονομηθεί μέχρι το 80% της ενέργειας που εξοικονομείται με το καθαρό PCM.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην εποχή μας οι συμβατικές πηγές ενέργειας λιγοστεύουν και συγχρόνως το κόστος της συνεχώς αυξάνεται. Συνεπώς, η δυνατότητα αποθήκευσης της περίσσειας ενέργειας που συχνά προκύπτει κατά την λειτουργία των ενεργειακών συστημάτων και η απελευθέρωσή της όταν χρειαστεί, αποκτά συνεχώς μεγαλύτερη σημασία. Τυπικά παραδείγματα συναντώνται (α) κατά την ηλιακή θέρμανση χώρων σε ωριαία, ημερήσια ή ακόμα και εποχιακή βάση, (β) κατά τις βιομηχανικές, εμπορικές ή κτιριακές εφαρμογές της ηλεκτρικής ενέργειας, όπου επιδιώκεται εξομάλυνση της κατανάλωσης με μετατόπιση των αιχμών σε ώρες μικρής ζήτησης, και (γ) κατά τις μη «εν φάσει» ή και

αντίθετες (θέρμανση-ψύξη) θερμικές ανάγκες των διαφόρων τμημάτων κτιρίων, που οφείλονται σε διαφορετικό προσανατολισμό, διαφορετική κατασκευή των τμημάτων του κτιριακού κελύφους ή διαφορετική χρήση των χώρων.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην τεχνολογία αποθήκευσης θερμότητας για παθητικές κτιριακές εφαρμογές με χρήση των υλικών αλλαγής φάσης (Phase Change Materials, PCM), τα οποία, κατά τα τελευταία χρόνια, παρουσιάζουν διεθνώς έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον λόγω του πολλαπλάσιου θερμοαποθηκευτικού δυναμικού αυτών έναντι των άλλων υγρών ή στερεών υλικών που χρησιμοποιούνται για τον ίδιο σκοπό. Η μεγάλη θερμοαποθηκευτική ικανότητα των PCM οφείλεται στα επί πλέον ποσά θερμότητας που απορροφούνται ή αποδίδονται κατά την μετατροπή τους από την στερεά στην υγρή φάση, ή αντιστρόφως [1]. Γενικές πληροφορίες, συγκρίσεις, πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα και κατατάξεις των ανόργανων (ένυδρα άλατα) και των οργανικών (παραφίνες, λιπαρά οξέα, εστέρες, λιπαρές αλκοόλες) PCM παρέχονται π.χ. στις εργασίες [2,3], μεταξύ πολλών άλλων. Στις κτιριακές εφαρμογές, με ορθό σχεδιασμό της χρήσης των PCM και υπό ευνοϊκές συνθήκες και κατάλληλα θερμοκρασιακά επίπεδα λειτουργίας, μπορεί να επιτευχθεί πενταπλασιασμός (στα οργανικά PCM) ή ακόμα και δεκαπλασιασμός (στα ανόργανα) του θερμοαποθηκευτικού δυναμικού ή αντίστοιχη μείωση του χώρου αποθήκευσης [4].

Η βέλτιστη διαχείριση της ενέργειας στα κτήρια, σύμφωνα με τις τελευταίες εξελίξεις της τεχνολογίας, απαιτεί αλλαγές στον σχεδιασμό των κτηρίων, οι οποίες συχνά οδηγούν σε αμφισβητούμενες, από αισθητική και αρχιτεκτονική άποψη, κατασκευές. Εδώ τα PCM προσφέρουν άριστες υπηρεσίες, καθώς μπορούν να είναι «αόρατα», κρυμμένα μέσα στα οικοδομικά στοιχεία, από όπου απορροφούν ή αποδίδουν σημαντικά ποσά θερμότητας. Σημαντικές είναι επίσης οι υπηρεσίες που μπορούν να προσφέρουν τα PCM αποθηκεύοντας την περίσσεια θερμότητας χώρων και προσφέροντάς την αργότερα σε άλλους ή και στους ίδιους χώρους, όταν απαιτείται. Επί πλέον η απορρόφηση των φορτίων αιχμής εξομαλύνει την διακύμανση της θερμοκρασίας εσωτερικού περιβάλλοντος, βελτιώνοντας έτσι το επίπεδο θερμικής άνεσης.

Πολυάριθμες μελέτες έχουν δημοσιευτεί κατά τα τελευταία χρόνια πάνω στις παθητικές κτιριακές εφαρμογές των PCM. Η μεγαλύτερη κατηγορία μελετών αφορά σε καινοτόμες επινοήσεις. Ως παραδείγματα των τελευταίων τριών ετών (2008-10) αναφέρονται οι εργασίες [5-8]. Μεγάλη επίσης είναι η κατηγορία των μελετών που εστιάζουν το ενδιαφέρον τους σε βελτιστοποιήσεις και παραμετρικές διερευνήσεις, όπου ερευνάται η επίδραση των παραμέτρων των PCM (θερμοφυσικές ιδιότητες, θέση και τρόπος εγκατάστασης, κλπ.) στην εξοικονόμηση ενέργειας και την μείωση των φορτίων αιχμής. Ως παραδείγματα των τελευταίων δύο ετών (2009-10) στην κατηγορία αυτή αναφέρονται οι εργασίες [9-12]. Μία τρίτη κατηγορία μελετών πάνω στις παθητικές κτιριακές εφαρμογές των PCM εξετάζει την συμπεριφορά των PCM υπό επιλεγμένες κλιματολογικές συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος ή υπό πραγματικές κλιματολογικές συνθήκες συγκεκριμένων γεωγραφικών περιοχών κατά τη διάρκεια καθορισμένων εποχών ή ημερών του έτους. Ως παραδείγματα δίδονται οι πρόσφατες εργασίες (έτος 2009) [9,10,13], οι οποίες αναφέρονται σε περιοχή του Iraq, στο Quebec και στην Lyon, αντιστοίχως.

Η παρούσα εργασία φιλοδοξεί να συμβάλει στην μελέτη των παθητικών εφαρμογών ηλιακής θέρμανσης κτηρίων με χρήση PCM, οι οποίες πολύ συνοπτικά κατηγοριοποιήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Η παρούσα συνεισφορά εστιάζει (α) στην βελτίωση του μοντέλου της ενεργού θερμοχωρητικότητας [14-18], το οποίο

χρησιμοποιείται ευρύτατα για την προσομοίωση της αλλαγής φάσης στις κτηριακές εφαρμογές των PCM, (β) στην επέκταση των υφισταμένων παραμετρικών μελετών και βελτιστοποιήσεων, εξετάζοντας την επίδραση περισσοτέρων παραμέτρων και συνδυασμών αυτών, ιδιαίτερα δε της περιεκτικότητας των PCM σε μείγματα δομικών στοιχείων, και (γ) στον υπολογισμό της εξοικονόμησης ενέργειας που επιτυγχάνεται με την χρήση παθητικών συστημάτων PCM στην Β κλιματική περιοχή της Ελλάδας με εκπρόσωπο την περιοχή της Αθήνας.

Για την μελέτη της επίδρασης των πολυάριθμων παραμέτρων του προβλήματος (θερμοφυσικές ιδιότητες και περιεκτικότητα των PCM στα δομικά στοιχεία, τρόποι και θέση ενσωμάτωσης στο κτίριο, χαρακτηριστικά κτιρίου, κλιματολογικά δεδομένα, κλπ.) και τον προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης, αναπτύχθηκε και επιβεβαιώθηκε πειραματικά μοντέλο προσομοίωσης (και αντίστοιχος υπολογιστικός κώδικας) της μεταβατικής ενεργειακής συμπεριφοράς κτηρίων με δομικά στοιχεία που περιέχουν PCM. Το αναπτυχθέν μοντέλο βασίζεται σε επίλυση πεπερασμένων διαφορών των διαφορικών εξισώσεων που εκφράζουν το πρόβλημα.

## 2. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΤΩΝ PCM

Ο υπολογισμός της μετάδοσης θερμότητας στα PCM είναι περισσότερο περίπλοκος από τον αντίστοιχο υπολογισμό στα συνήθη οικοδομικά υλικά. Οι δυσκολίες προσομοίωσης σχετίζονται με τον μηχανισμό της διαδικασίας αλλαγής φάσης. Το μη γραμμικό αυτό πρόβλημα λαμβάνει χώρα σε μεικτή ζώνη, συνήθως χωρίς καθορισμένα όρια. Στην ζώνη αυτή μέρος του στερεού υλικού μπορεί να αποκολληθεί και να μετακινηθεί μέσα στην υγρή φάση υπό την επίδραση της φυσικής συναγωγής. Αντίθετα, κατά την στερεοποίηση ενδέχεται να δημιουργηθούν κενά μέσα στην στερεά φάση λόγω μεταβολών του όγκου. Στη υγρή φάση καθώς και στην μεικτή περιοχή μπορεί να λάβει χώρα μεταφορά θερμότητας δια συναγωγής, με συντελεστές συναγωγής που είναι δύσκολο να προσδιοριστούν. Συσχετίσεις για τον υπολογισμό των συντελεστών συναγωγής έχουν προταθεί αλλά μόνο για πολύ απλές περιπτώσεις [14].

Στην εργασία αυτή η αλλαγή φάσης ενδιαφέρει μόνο σαν μακροσκοπικό φαινόμενο χωρίς να είναι απαραίτητες οι λεπτομέρειες στην διφασική ζώνη. Επίσης η μεταφορά θερμότητας δια συναγωγής μέσα στο PCM δεν λαμβάνεται υπ' όψη, όπως συνήθως συμβαίνει στις κτηριακές εφαρμογές των PCM [15-18].

Για την προσομοίωση αλλαγής φάσης κατά τις αριθμητικές επιλύσεις χρησιμοποιείται συνήθως η Μέθοδος της Ενθαλπίας [14] ή η Μέθοδος της Ενεργού Θερμοχωρητικότητας [15-18]. Η πρώτη βασίζεται στην αριθμητική επίλυση της διαφορικής εξίσωσης μεταφοράς της ενθαλπίας και είναι κατάλληλη για τον υπολογισμό των λεπτομερειών της διαδικασίας αλλαγής φάσης. Η δεύτερη ακολουθεί τη συνήθη διαδικασία αριθμητικής επίλυσης της διαφορικής εξίσωσης μεταφοράς ενέργειας, θεωρώντας ότι η θερμοχωρητικότητα του PCM κατά την αλλαγή φάσης δίδεται από μια συνάρτηση της θερμοκρασίας γνωστή ως "συνάρτηση ενεργού θερμοχωρητικότητας"  $C_{p,eff}(T)$ . Στην παρούσα εργασία επελέγη το μοντέλο της συνάρτησης  $C_{p,eff}(T)$  διότι, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η αλλαγή φάσης ενδιαφέρει μόνο σαν μακροσκοπικό φαινόμενο χωρίς την ανάγκη υπολογισμού των λεπτομερειών του μηχανισμού αλλαγής φάσης. Η μόνη δυσκολία είναι ότι η συνάρτηση  $C_{p,eff}(T)$  για το εκάστοτε χρησιμοποιούμενο PCM πρέπει να είναι γνωστή.

Στην βιβλιογραφία προτείνονται διάφορες περίπλοκες συναρτήσεις  $C_{p,eff}(T)$  της μορφής της κατανομής Gauss, όπως π.χ. η εκθετική συνάρτηση [17]

$$C_{p,eff}(T) = C_{ps} + H [\exp[-0.5((T-T_1) / b)^2]] \quad (1)$$

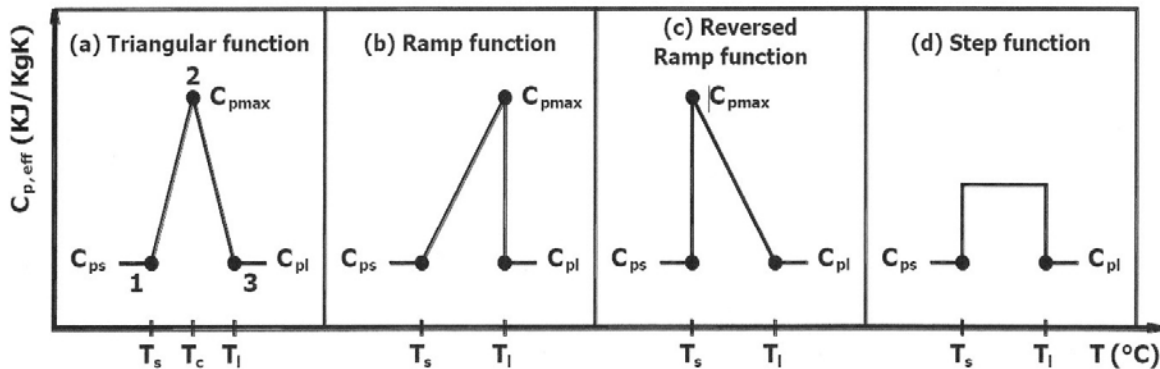
Στην παραπάνω εξίσωση  $C_{ps}$  είναι η θερμοχωρητικότητα του στερεού PCM,  $H$  η θερμότητα αλλαγής φάσης και  $b$  είναι το θερμοκρασιακό εύρος ( $T_1 - T_s$ ) όπου,  $T_1$  και  $T_s$  είναι οι θερμοκρασίες στην αρχή και το πέρας της στερεοποίησης, αντιστοίχως.

Σχετικές μετρήσεις στο Εργαστήριο Ψύξης και Κλιματισμού ΕΜΠ [19,20] για διάφορα υποψήφια PCM έδωσαν απλούστερες συναρτήσεις  $C_{p,eff}(T)$ , όπως αυτές που απεικονίζονται στο Σχήμα 1. Από τις παραπάνω συναρτήσεις προτείνεται και χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, με αμελητέες αποκλίσεις σε σχέση με τις προτεινόμενες πολύπλοκες συναρτήσεις της βιβλιογραφίας [17], η τριγωνική συνάρτηση με αναλυτική έκφραση

$$C_{p,eff}(T) = 4(H - bC_{ps})(T - T_s)/b^2 + C_{ps} \quad , \text{ για } T_s \leq T \leq T_c \quad (2)$$

$$C_{p,eff}(T) = 4(bC_{pl} - H)(T - T_s - b/2)/b^2 + 2H/b - C_{pl} \quad , \text{ για } T_c \leq T \leq T_1 \quad (3)$$

όπου  $C_{ps}$  και  $C_{pl}$  είναι οι θερμοχωρητικότητες του στερεού και του υγρού PCM, αντιστοίχως,  $T_s$  και  $T_1$  είναι οι αντίστοιχες θερμοκρασίες,  $T_c=(T_1 + T_s)/2$  είναι το μέσον του εύρους  $b=(T_1-T_s)$  της θερμοκρασιακής περιοχής αλλαγής φάσης, και  $H$  η θερμότητα αλλαγής φάσης.



Σχήμα 1 Συναρτήσεις ενεργού θερμοχωρητικότητας  $C_{p,eff}(T)$  απλού γεωμετρικού σχήματος για κτηριακές εφαρμογές των PCM.

### 3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ

Για την πρόγνωση της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων, τα οποία περιέχουν PCM στα δομικά τους στοιχεία, αναπτύχθηκε αριθμητική μέθοδος προσομοίωσης. Η μέθοδος βασίζεται στην επίλυση λεπτομερειακού συστήματος διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες περιγράφουν την μεταβατική μονοδιάστατη μεταφορά θερμότητας στα πολυστρωματικά δομικά στοιχεία του κελύφους και των εσωτερικών χωρισμάτων. Στο σύστημα περιλαμβάνονται και οι κάθε είδους εσωτερικές μάζες (π.χ. επίπλωση) οι οποίες προσομοιάζονται με πολυστρωματικές πλάκες ανάλογων υλικών. Η ολοκλήρωση του συστήματος επιτυγχάνεται με διαφορική εξίσωση, η οποία εκφράζει τον ενεργειακό ισολογισμό του κτηρίου. Η επίλυση γίνεται με πεπλεγμένη τεχνική

πεπερασμένων διαφορών. Οι λεπτομέρειες του βασικού κορμού και των διαφόρων παραλλαγών της παραπάνω αριθμητικής μεθόδου προσομοίωσης της ενεργειακής συμπεριφοράς κτηρίων με ή χωρίς PCM δίδονται στις εργασίες [21-28].

Ύστερα από μελέτη εξάρτησης της λύσης από το υπολογιστικό πλέγμα επιλέγεται χρονικό και χωρικό βήμα  $\Delta t = 60$  s και  $\Delta x = 0.002$  m, αντιστοίχως, πλην των στρωμάτων μόνωσης, για τα οποία λαμβάνεται  $\Delta x = 0.001$  m. Ως κριτήριο σύγκρισης ελήφθη η θερμοκρασία  $0.001^\circ\text{C}$ . Οι υπολογισμοί καλύπτουν ολόκληρο το έτος. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν την εσωτερική θερμοκρασία  $T_{in}(t)$  συναρτήσεως του χρόνου  $t$  και τη θερμοκρασιακή κατανομή  $T(t,x)$ , σε όλα τα στοιχεία του κελύφους, στους εσωτερικούς τοίχους και σε κάθε είδους εσωτερική μάζα. Η ακρίβεια της αναπτυχθείσας μεθόδου προσομοίωσης και του αντιστοίχου υπολογιστικού κώδικα ελέγχεται επιτυχώς δια συγκρίσεως των αποτελεσμάτων με τις μετρήσεις του δημοσιεύματος [29].

#### 4. ΧΡΗΣΗ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΘΑΡΟΥ PCM (ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΣ 100%)

Μελετάται η θερμική συμπεριφορά Τυπικού Ελληνικού Κτηρίου (ΤΕΚ), στους εξωτερικούς ή/και εσωτερικούς τοίχους του οποίου προστίθεται στρώμα καθαρού PCM. Στην παρούσα μελέτη το ΤΕΚ ορίζεται ως ακολούθως: Πανταχόθεν ελεύθερο ισόγειο κτίριο τετραγωνικού δαπέδου επιφανείας  $100$  m<sup>2</sup>, με εξωτερικούς τοίχους αποτελούμενους από τα παρακάτω διαδοχικά στρώματα: εξωτερικό επίχρισμα πάχους  $2$  cm,  $9$  cm δρομική οπτοπλινθοδομή,  $4$  cm μόνωση,  $9$  cm δρομική οπτοπλινθοδομή και  $2$  cm εσωτερικό επίχρισμα. Η οροφή αποτελείται από  $2$  cm εσωτερικό επίχρισμα, πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος πάχους  $14$  cm,  $5$  cm μόνωση και λοιπά στρώματα κονιαμάτων πάχους  $10$  cm (κονίαμα κλίσεως, αντιυγρασιακές και λοιπές επιστρώσεις). Μήκος εσωτερικών τοίχων  $30$  m κατασκευασμένων από οπτοπλινθοδομή με επίχρισμα  $2$  cm εκατέρωθεν. Οι τέσσερες πλευρές του κτηρίου είναι προσανατολισμένες προς τα τέσσερα κύρια σημεία του ορίζοντα και κάθε μια από αυτές αποτελείται κατά  $25\%$  από υαλοπίνακες με ολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $3.0$  W/m<sup>2</sup>K. Εξωτερικός και εσωτερικός συντελεστής συναγωγής  $16$ W/m<sup>2</sup> K και  $8$  W/m<sup>2</sup>K, αντιστοίχως. Μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας κελύφους εντός των ορίων που ορίζει ο Κ.Εν.Α.Κ. (ΦΕΚ 407/9-4-2010) για την Β κλιματική ζώνη. Εξωτερική επιφάνεια κελύφους ανοικτού χρώματος, με συντελεστή απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας  $44\%$ .

Για την προσομοίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς του ΤΕΚ χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω υποθέσεις και δεδομένα: Ως αντιπροσωπευτικά κλιματολογικά δεδομένα της Β κλιματικής ζώνης ελήφθησαν οι τιμές Αθηνών, οι οποίες προέκυψαν με στατιστική επεξεργασία ωριαίων μετρήσεων  $20$  ετών της εξωτερικής θερμοκρασίας [30] και της ηλιακής ακτινοβολίας [31,32]. Η διαπερατότητα των υαλοπινάκων στην ηλιακή ακτινοβολία ελήφθη ίση προς  $85\%$ . Ποσοστό  $5\%$  της εισερχομένης ακτινοβολίας απορροφάται άμεσα από τον εσωτερικό αέρα, ενώ το υπόλοιπο από το απέναντι δομικό στοιχείο. Αρχική θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος και κτιριακής μάζας  $20^\circ\text{C}$ . Ανανέωση αέρα ίση προς  $2$  αλλαγές ανά ώρα. Απουσία εσωτερικής θέρμανσης ή ψύξης (παθητικό σύστημα). Αδιαβατικό δάπεδο. Ως PCM χρησιμοποιήθηκαν παραφίνες διαφόρων ιδιοτήτων. Για την προσομοίωση της αλλαγής φάσης των PCM χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο της ενεργού θερμοχωρητικότητας με τριγωνικές συναρτήσεις  $C_{p,eff}(T)$ , σύμφωνα με τις εξισώσεις (2) και (3), για κάθε παραφίνη, οι οποίες υπολογίστηκαν πειραματικά στο Έργαστήριο Ψύξης και Κλιματισμού ΕΜΠ [19,20].

Table 1. Σύγκριση περιπτώσεων πρακτικού ενδιαφέροντος

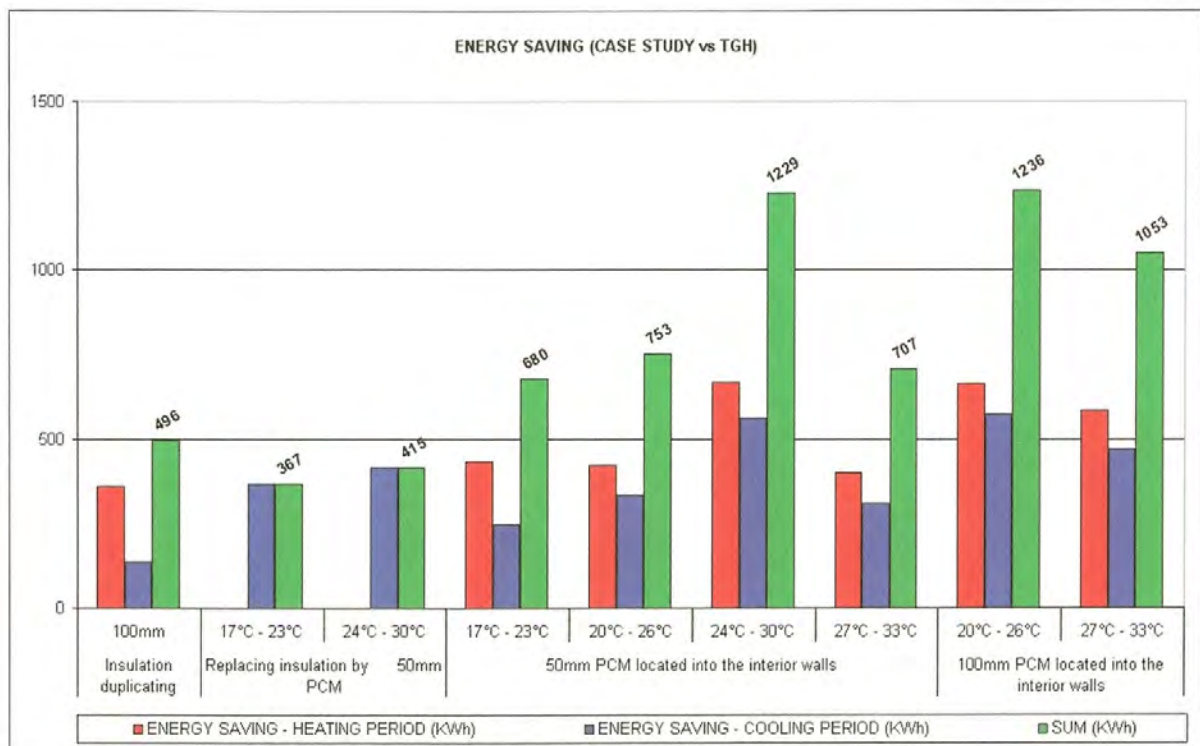
ΚΩΔΙΚΟΣ	ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ	ΣΥΓΚΡΙΝΟΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ	ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (kWh)		
			ΧΕΙΜΩΝ	ΘΕΡΟΣ	ΕΤΟΣ
A	Επίδραση πάχους μόνωσης, $W_i$	1. TEK ( $W_i=50\text{mm}$ ) 2. $W_i=100\text{mm}$	360	136	496
B.1	Επίδραση αντικατάστασης μόνωσης με PCM.	1. TEK 2. $W=50\text{mm}$ , $H=150\text{kJ/kg}$ , $T_s-T_I=17-23^\circ\text{C}$	-	367	367
B.2		1. TEK 2. $W=50\text{mm}$ , $H=150\text{kJ/kg}$ , $T_s-T_I=24-30^\circ\text{C}$	-	415	415
C.1	Επίδραση προσθήκης PCM στους εξωτερικούς τοίχους (στην πλευρά της μόνωσης προς το εσωτερικό περιβάλλον) ή στους εσωτερικούς τοίχους (έναντι υαλοπινάκων)	1. PCM στους εξωτ. τοίχους $W=50\text{mm}$ , $H=150\text{kJ/kg}$ , $T_s-T_I=17-23^\circ\text{C}$ 2. PCM στους εσωτ. τοίχους $W=50\text{mm}$ , $H=150\text{kJ/kg}$ , $T_s-T_I=17-23^\circ\text{C}$	358	218	576
C.2		1. PCM στους εξωτ. τοίχους $W=50\text{mm}$ , $H=150\text{kJ/kg}$ , $T_s-T_I=24-30^\circ\text{C}$ 2. PCM στους εσωτ. τοίχους $W=50\text{mm}$ , $H=150\text{kJ/kg}$ , $T_s-T_I=24-30^\circ\text{C}$	640	557	1197
D	Επίδραση αλλαγής ( $T_s-T_I$ ) του PCM τοποθετημένου στους εξωτερικούς τοίχους στην πλευρά της μόνωσης προς το εσωτερικό περιβάλλον	1. $W=50\text{mm}$ , $H=150\text{kJ/kg}$ , $T_s-T_I=17-23^\circ\text{C}$ 2. $W=50\text{mm}$ , $H=150\text{kJ/kg}$ , $T_s-T_I=24-30^\circ\text{C}$	22	23	45
E	Επίδραση τοποθέτησης PCM στην εσωτερική ή εξωτερική πλευρά της μόνωσης εξωτερικών τοίχων	1. PCM στην εσωτ. πλευρά της μόνωσης, $W=50\text{mm}$ , $H=150\text{kJ/kg}$ , $T_s-T_I=20-26^\circ\text{C}$ 2. PCM στην εξωτ. πλευρά της μόνωσης, $W=50\text{mm}$ , $H=150\text{kJ/kg}$ , $T_s-T_I=20-26^\circ\text{C}$	12	35	47
F	Επίδραση θερμ. αλλαγής φάσης H του PCM τοποθετημένου στην εσωτ. πλευρά της μόνωσης εξωτ. τοίχων	1. $W=50\text{mm}$ , $H=150\text{kJ/kg}$ , $T_s-T_I=24-30^\circ\text{C}$ 2. $W=50\text{mm}$ , $H=200\text{kJ/kg}$ , $T_s-T_I=24-30^\circ\text{C}$	5	5	10
G	Επίδραση θερμ. αλλαγής φάσης H του PCM τοποθετημένου σε εσωτ. τοίχους έναντι υαλοπινάκων	1. $W=100\text{mm}$ , $H=150\text{kJ/kg}$ , $T_s-T_I=20-26^\circ\text{C}$ 2. $W=100\text{mm}$ , $H=200\text{kJ/kg}$ , $T_s-T_I=20-26^\circ\text{C}$	133	143	276

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ	ΣΥΓΚΡΙΝΟΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ	ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (kWh)		
			ΧΕΙΜΩΝ	ΘΕΡΟΣ	ΕΤΟΣ
H	Επίδραση τοποθέτησης PCM μεταξύ οπτοπλινθοδομών ή γυψοσανίδων στους εσωτερικούς τοίχους έναντι υαλοπινάκων	<ol style="list-style-type: none"> <li>W=100mm, H=150kJ/kg, <math>T_s-T_I=20-30</math> °C, PCM μεταξύ οπτόπλινθοδ. 90mm</li> <li>W=100mm, H=150kJ/kg, <math>T_s-T_I=20-30</math> °C, PCM μεταξύ γυψοσανίδων 12mm</li> </ol>	147	185	332
I	Επίδραση πάχους στρώματος PCM, W, τοποθετημένου στην εσωτερική πλευρά μόνωσης εξωτερικών τοίχων.	<ol style="list-style-type: none"> <li>W=20mm, H=150kJ/kg, <math>T_s-T_I=20-26</math> °C</li> <li>W=50mm, H=150kJ/kg, <math>T_s-T_I=20-26</math> °C</li> </ol>	43	20	63
J.1	Επίδραση θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης ( $T_s-T_I$ ) του PCM τοποθετημένου σε εσωτερικούς τοίχους έναντι υαλοπινάκων.	<ol style="list-style-type: none"> <li>TEK</li> <li>W=50mm, H=150kJ/kg, <math>T_s-T_I=17-23</math> °C</li> </ol>	433	247	680
J.2		<ol style="list-style-type: none"> <li>TEK</li> <li>W=50mm, H=150kJ/kg, <math>T_s-T_I=20-26</math> °C</li> </ol>	420	33	753
J.3		<ol style="list-style-type: none"> <li>TEK</li> <li>W=50mm, H=150kJ/kg, <math>T_s-T_I=24-30</math> °C</li> </ol>	660	569	1229
J.4		<ol style="list-style-type: none"> <li>TEK</li> <li>W=50mm, H=150kJ/kg, <math>T_s-T_I=27-33</math> °C</li> </ol>	399	308	707
J.5		<ol style="list-style-type: none"> <li>TEK</li> <li>W=100mm, H=150kJ/kg, <math>T_s-T_I=20-26</math> °C</li> </ol>			1236
J.6		<ol style="list-style-type: none"> <li>TEK</li> <li>W=100mm, H=150kJ/kg, <math>T_s-T_I=27-33</math> °C</li> </ol>			1053
K.1	Επίδραση πάχους στρώματος PCM, W, τοποθετημένου σε εσωτερικούς τοίχους έναντι υαλοπινάκων.	<ol style="list-style-type: none"> <li>W=20mm, H=150kJ/kg, <math>T_s-T_I=17-23</math> °C</li> <li>W=50, H=150kJ/kg, <math>T_s-T_I=17-23</math> °C</li> </ol>	253	160	413
K.2		<ol style="list-style-type: none"> <li>W=50mm, H=150kJ/kg, <math>T_s-T_I=20-26</math> °C</li> <li>W=100mm, H=150kJ/kg, <math>T_s-T_I=20-26</math> °C</li> </ol>	175	200	375
K.3		<ol style="list-style-type: none"> <li>W=50mm, H=150kJ/kg, <math>T_s-T_I=27-33</math> °C</li> <li>W=100mm, H=150kJ/kg, <math>T_s-T_I=27-33</math> °C</li> </ol>	246	240	486

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η επίδραση των παρακάτω παραμέτρων: Θερμοκρασιακό εύρος ( $T_i - T_s$ ), ( $^{\circ}\text{C}$ ), και θερμότητα αλλαγής φάσης  $H$ , ( $\text{kJ/kg}$ ), των PCM. Πάχος στρώματος ( $\text{mm}$ ) περιεκτικότητας PCM 100%. Θέση στρώματος PCM (δηλ. σε εξωτερικό ή εσωτερικό τοίχο). Τρόπος ενσωμάτωσης PCM σε εσωτερικό τοίχο (δηλ. μεταξύ οπτοπλινθοδομών, γυψοσανίδων, κλπ.) Πάχος στρώματος μόνωσης. Επίδραση αντικατάστασης στρώματος μόνωσης από στρώμα PCM περιεκτικότητας 100%.

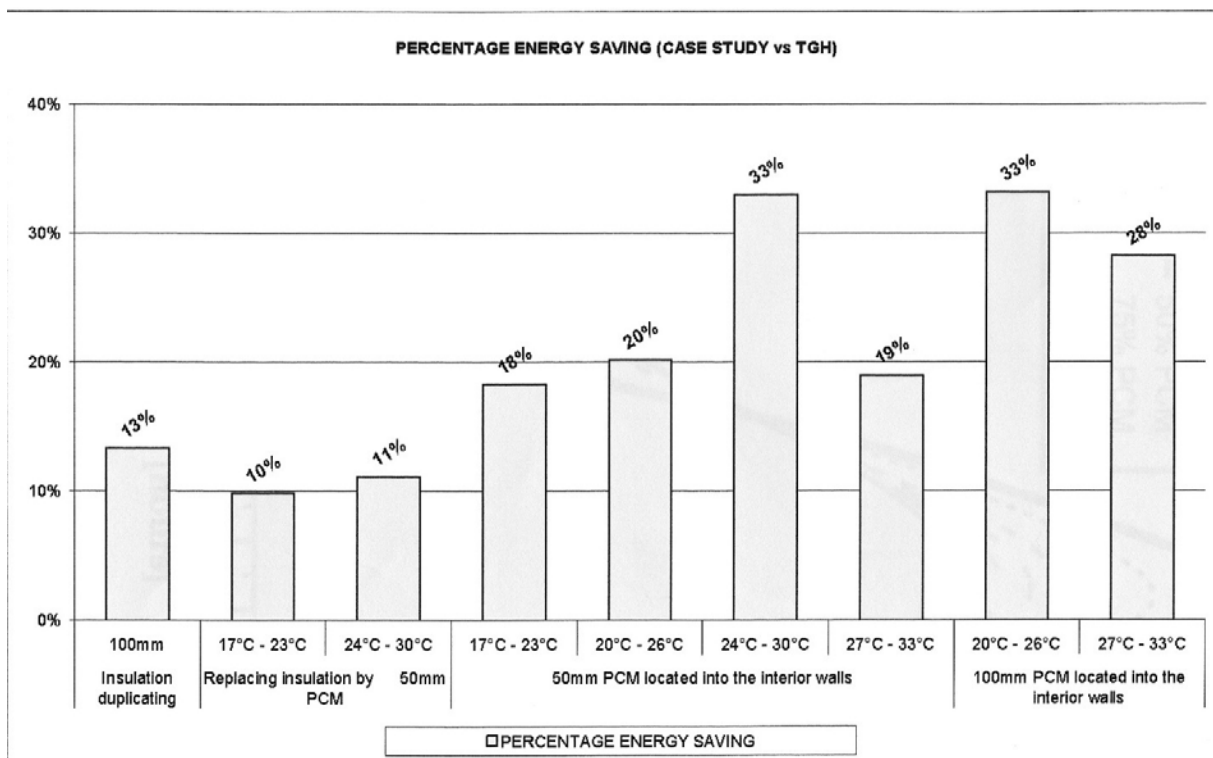
Με τους συνδυασμούς των παραπάνω παραμέτρων προκύπτουν πολυάριθμες περιπτώσεις, οι περισσότερες από τις οποίες μελετήθηκαν σε προηγούμενες [25,33,34] και στην παρούσα εργασία. Τα αποτελέσματα των σημαντικότερων περιπτώσεων δίδονται στον Πίνακα 1. Από αυτές, οι πλέον ενδιαφέρουσες, από απόψεως εξοικονόμησης ενέργειας, συνοψίζονται υπό τη μορφή ιστογράμματος στο Σχήμα 2. Οι τρεις ιστοί σε κάθε περίπτωση αντιστοιχούν στην εξοικονόμηση ενέργειας (σε kWh) που επιτυγχάνεται σε σύγκριση με το ΤΕΚ (όπως ορίζεται στην αρχή της ενότητας, δηλ. χωρίς την προσθήκη PCM) κατά την περίοδο θέρμανσης, ψύξης, καθώς και κατά την διάρκεια ολόκληρου του έτους. Είναι εμφανές ότι με την τοποθέτηση στρώματος καθαρού PCM (περιεκτικότητα 100%), με τις κατάλληλες ιδιότητες στους ηλιαζομένους εσωτερικούς τοίχους (δηλ. απέναντι από υαλοπίνακες), επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας μέχρι 1236 kWh ανά έτος.

Στο Σχήμα 3 δίδεται, για κάθε μία περίπτωση του Σχήματος 2, το ποσοστό της ενέργειας που εξοικονομείται αναφορικά με την ετησίως απαιτούμενη ενέργεια για θέρμανση και ψύξη του ΤΕΚ. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, το ενεργειακό όφελος μπορεί να ανέλθει στο 33%, υπό τις κατάλληλες συνθήκες, όπως περιγράφονται παραπάνω.



Σχήμα 2 Εξοικονομούμενη ενέργεια (σε kWh) στις περιπτώσεις A, B.1, B.2, J.1, J.2, J.3, J.4, J.5 και J.6 του Πίνακα 1, κατά την περίοδο θέρμανσης, ψύξης, καθώς και για ολόκληρο το έτος, για το Τυπικό Ελληνικό Κτήριο (ΤΕΚ).





Σχήμα 3 Ετησίως εξοικονομούμενη ενέργεια ως ποσοστό της απαιτούμενης για τις περιπτώσεις του Σχήματος 2.

## 5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ PCM ΣΤΗΝ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες δομικού μείγματος που περιέχει PCM υπολογίζονται ως ζυγισμένοι μέσοι όροι των ιδιοτήτων του καθαρού δομικού μείγματος (δηλ. χωρίς PCM) και του PCM, δηλαδή:

$$A = fA_{PCM} + (1-f)A_M \quad (4)$$

όπου  $A_M$ ,  $A_{PCM}$  και  $A$  είναι η ιδιότητα (π.χ. ειδική θερμική αγωγιμότητα, θερμοχωρητικότητα, κλπ.) του καθαρού δομικού μείγματος, του PCM και του τελικού δομικού μείγματος με PCM, αντιστοίχως, και  $f$  η περιεκτικότητα (κλάσμα μάζας) του PCM στο τελικό μείγμα, δηλαδή:

$$f = M_{PCM} / (M_{PCM} + M_M) \quad (5)$$

όπου  $M_{PCM}$  και  $M_M$  είναι οι μάζες του PCM και του καθαρού δομικού μείγματος.

Για να τονιστεί η επίδραση της περιεκτικότητας του PCM αλλά και για να φανεί ο ρόλος των υαλοπινάκων, αυξήθηκε το ποσοστό τους στην νότια κατεύθυνση από 25% σε 50%, ενώ μηδενίστηκε το ποσοστό της βόρειας πλευράς από την οποία το ηλιακό

όφελος είναι αμελητέο. Για έντονη θερμική απόκριση του PCM προτιμήθηκε η ενσωμάτωσή του στο μείγμα του επιχρίσματος των τοίχων, αντί της τοποθέτησής του σε ενδότερα στρώματα αυτών. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα της προηγούμενης ενότητας, η τοποθέτηση PCM στο εσωτερικό επίχρισμα εσωτερικού ή εξωτερικού τοίχου φέρει το ίδιο θερμικό αποτέλεσμα εφ' όσον το επίχρισμα δέχεται ηλιακή ακτινοβολία από τους απέναντι υαλοπίνακες. Στην παρούσα μελέτη επιλέγεται ο εμπλουτισμός των επιχρισμάτων με PCM μόνο στους εσωτερικούς τοίχους.

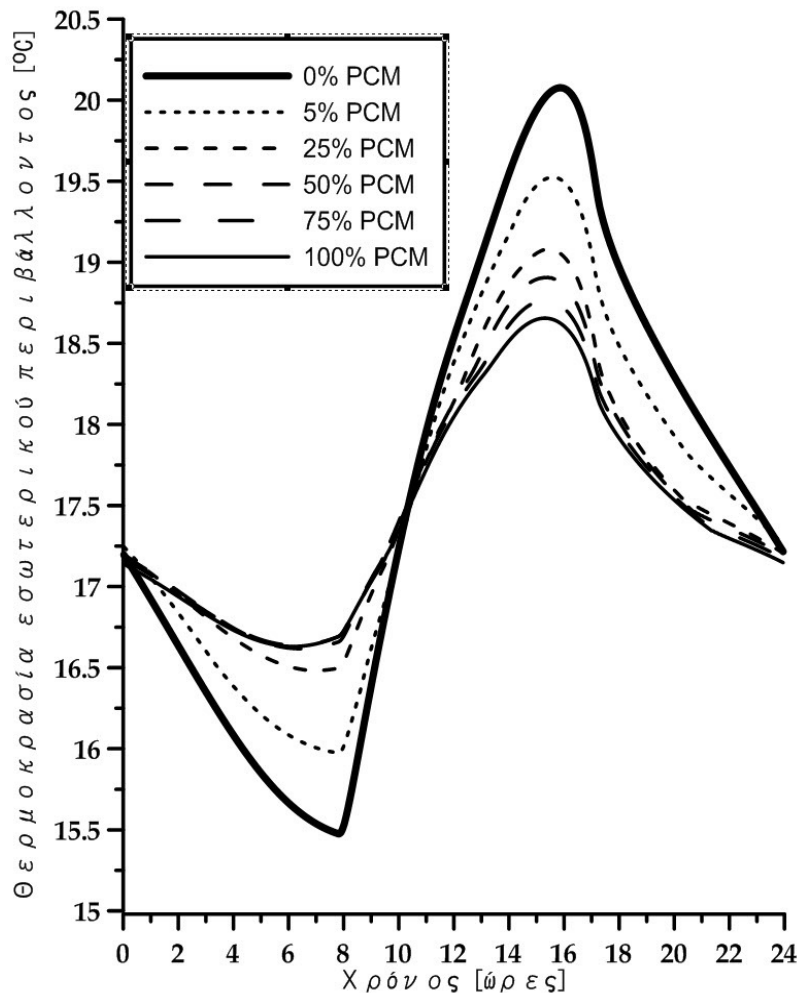
Τα αποτελέσματα των Σχημάτων 4 – 6 αντιστοιχούν στο TEK που περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα 4, με την διαφορά ότι τα στρώματα επιχρίσματος πάχους 2 cm στις δύο πλευρές των εσωτερικών τοίχων αντικαθίστανται από επιχρίσματα πάχους 5 cm αποτελούμενα από μείγμα κοινού επιχρίσματος και PCM υπό διάφορες περιεκτικότητες. Οι υπολογισμοί αντιστοιχούν στην 17<sup>η</sup> Ιανουαρίου (μέση ημέρα μηνός από άποψη ηλιακής ακτινοβολίας) υπό συνθήκες περιοδικά μόνιμης κατάστασης, η οποία προκύπτει με επανάληψη των υπολογισμών για διαδοχικά 24ωρα με την ίδια διακύμανση εξωτερικής θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας. Η σύγκλιση επιτυγχάνεται σε 10 επαναλήψεις με ομοιόμορφη αρχική θερμοκρασία κτιριακής μάζας και εσωτερικού αέρα, ίση προς την μέση εξωτερική θερμοκρασία 24ώρου της 17<sup>ης</sup> Ιανουαρίου (10°C).

Στο Σχήμα 4 δίδεται η υπολογισθείσα μεταβολή της θερμοκρασίας εσωτερικού περιβάλλοντος  $T_{in}(t)$  συναρτήσει των ωρών του 24ώρου για περιεκτικότητες PCM στα επιχρίσματα των εσωτερικών τοίχων ίσες προς 0, 5, 25, 50, 75 και 100%. Οι υπολογισμοί αντιστοιχούν σε PCM με ιδιότητες: πυκνότητα  $\rho=1500 \text{ kg/m}^3$ , ειδική θερμική αγωγιμότητα  $k=0.8 \text{ W/mK}$ , θερμότητα αλλαγής φάσης  $H=165 \text{ kJ/kg}$ , και θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης  $20\pm 3^\circ\text{C}$  ( $T_s-T_l = (17-23)^\circ\text{C}$ ). Στο Σχήμα είναι εμφανές ότι το εύρος διακύμανσης της εσωτερικής θερμοκρασίας  $T_{in}(t)$  κατά την διάρκεια του 24ώρου μειώνεται όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα του PCM λόγω αύξησης του θερμοαποθηκευτικού δυναμικού των εσωτερικών τοίχων (αύξηση θερμικής μάζας). Η μικρή διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι επιθυμητή, σύμφωνα με τις αρχές της θερμικής άνεσης. Μεγάλο μέρος της ηλιακής θερμότητας δαπανάται για την αλλαγή φάσης και όχι για την αύξηση της θερμοκρασίας του PCM. Έτσι δικαιολογούνται και οι υψηλότερες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στα μείγματα χαμηλής περιεκτικότητας PCM κατά τις μεσημβρινές ώρες, όπου λαμβάνει χώρα η αλλαγή φάσης. Αντιθέτως, κατά τις νυχτερινές και πρωινές ώρες (00:00 – 10:00 hrs) τα μείγματα υψηλής περιεκτικότητας PCM διατηρούν υψηλότερες θερμοκρασίες στον εσωτερικό χώρο.

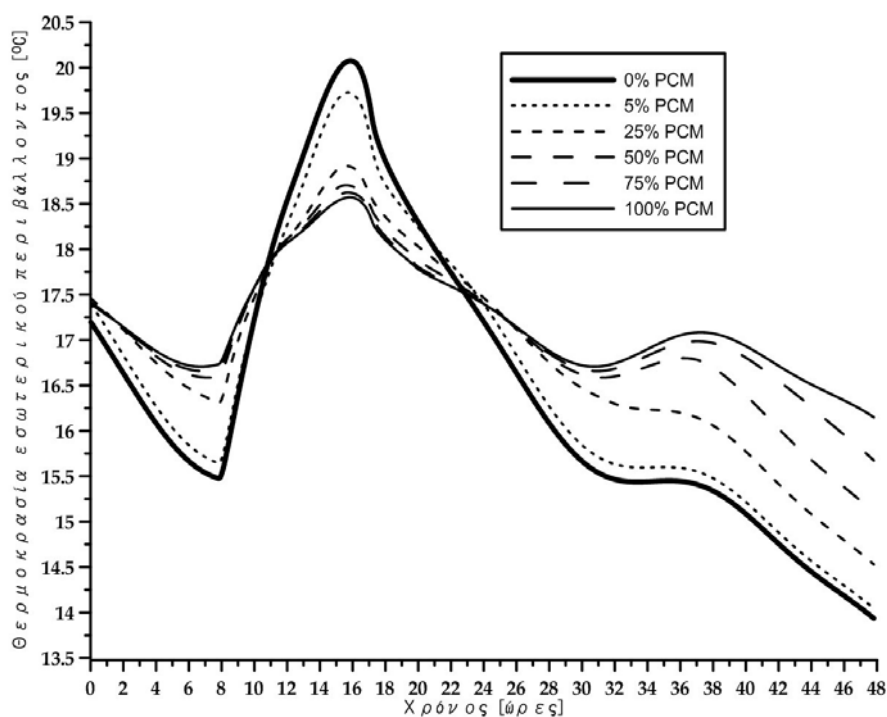
Οι ευεργετικές ιδιότητες του PCM και η συνεπαγόμενη εξοικονόμηση ενέργειας φαίνονται ευκρινέστερα στο Σχήμα 5, όπου δίδεται η μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας  $T_{in}(t)$  κατά την διάρκεια δύο διαδοχικών 24ώρων. Στο δεύτερο από αυτά, η ηλιακή ακτινοβολία έχει μειωθεί κατά 70%, προσομοιάζοντας έτσι μια νεφελώδη ημέρα. Είναι εμφανές ότι, καθ' όλη την διάρκεια του δεύτερου 24ώρου, η εσωτερική θερμοκρασία αυξάνεται με την περιεκτικότητα του PCM στα επιχρίσματα των εσωτερικών τοίχων. Το μέγιστο της εσωτερικής θερμοκρασίας που επιτυγχάνεται κατά τις μεσημβρινές ώρες της δεύτερης ημέρας οφείλεται στην σύμπτωση της στερεοποίησης (αποφόρτιση) του PCM με τις «υψηλές» μεσημβρινές θερμοκρασίες εξωτερικού περιβάλλοντος. Ο ρυθμός αύξησης της εσωτερικής θερμοκρασίας μειώνεται αυξανόμενης της περιεκτικότητας του PCM. Έτσι, οι μεγαλύτερες εσωτερικές θερμοκρασίες επιτυγχάνονται με τις περιεκτικότητες 0-50%. Οι μικρές διαφορές μεταξύ των Σχημάτων 4 και 5 κατά το πρώτο 24ωρο οφείλονται στο διαφορετικό θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης που ελήφθη στο Σχήμα 5, δηλαδή  $T_s-T_l = (22-28)^\circ\text{C}$  έναντι του

εύρους  $T_s-T_l = (17-23)^{\circ}\text{C}$  του Σχήματος 4. Για την συγκεκριμένη ημέρα των υπολογισμών (17<sup>η</sup> Ιανουαρίου, περιοχή Αθηνών) μεγαλύτερες εσωτερικές θερμοκρασίες και συνεπώς μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται στην περίπτωση του εύρους  $T_s-T_l = (17-23)^{\circ}\text{C}$ .

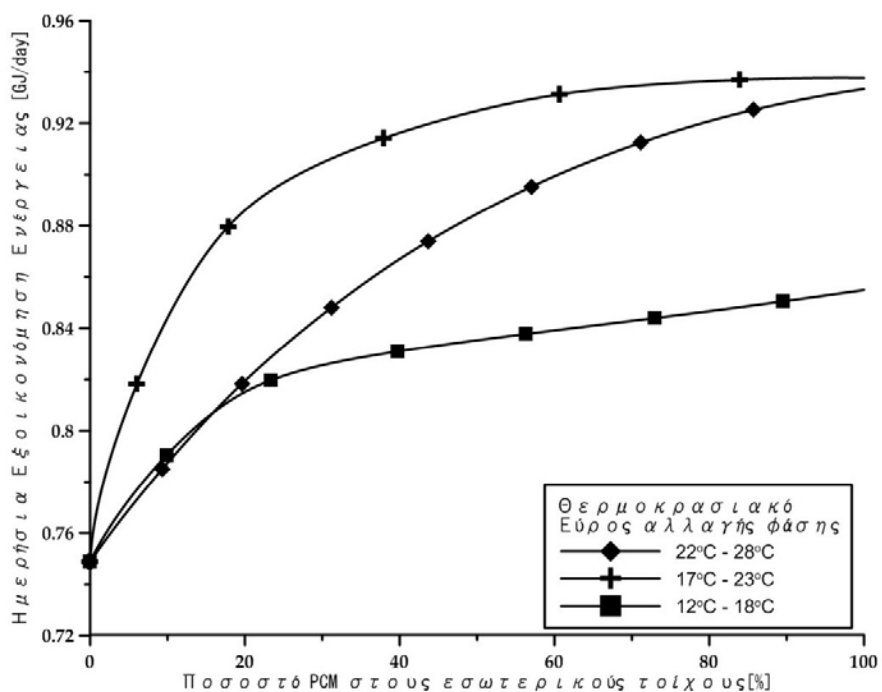
Η επίδραση της περιεκτικότητας PCM και του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης στην εξοικονόμηση ενέργειας φαίνεται ευκρινέστατα στο Σχήμα 6. Εδώ δίδεται η υπολογισθείσα ημερησίως εξοικονομούμενη ενέργεια κατά την 17<sup>η</sup> Ιανουαρίου, συναρτήσει της περιεκτικότητας για τρία PCM με διαφορετικές θερμοκρασιακές περιοχές αλλαγής φάσης, δηλαδή  $T_s-T_l = (12-18)^{\circ}\text{C}$ ,  $(17-23)^{\circ}\text{C}$  και  $(22-28)^{\circ}\text{C}$ . Είναι σαφές ότι για τις συγκεκριμένες κλιματολογικές συνθήκες και ημέρα του έτους η μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται με το εύρος αλλαγής φάσης  $(17-23)^{\circ}\text{C}$ . Η αυξητική επίδραση της περιεκτικότητας του PCM στην εξοικονόμηση ενέργειας είναι έντονη στις μικρές τιμές της περιεκτικότητας, ενώ στις μεγαλύτερες μειώνεται ασυμπτωτικά.



Σχήμα 4 Υπολογισθείσα μεταβολή της θερμοκρασίας εσωτερικού περιβάλλοντος συναρτήσει των ωρών της τυπικής 17<sup>ης</sup> Ιανουαρίου στην Αθήνα, για διάφορες τιμές της περιεκτικότητας PCM στα επιχρίσματα των εσωτερικών τοίχων. Θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης του PCM  $(17-23)^{\circ}\text{C}$ .



Σχήμα 5 Όπως στο Σχήμα 4 αλλά για 2 διαδοχικά 24ωρα. Στο δεύτερο από αυτά η ηλιακή ακτινοβολία μειώθηκε κατά 70%, προσομοιάζοντας έτσι μία νεφελώδη ημέρα. Θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης του PCM (22-28)°C.



Σχήμα 6 Υπολογισθείσα ημερησίως εξοικονομούμενη ενέργεια για την τυπική 17<sup>η</sup> Ιανουαρίου στην Αθήνα, συναρτήσεως της περιεκτικότητας του PCM στα επιχρίσματα των εσωτερικών τοίχων, για τρεις τιμές του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Λόγω του πλήθους των παραμέτρων στις παθητικές κτηριακές εφαρμογές των PCM απαιτείται προσεκτική μελέτη για τον καθορισμό του βέλτιστου συνδυασμού των τιμών τους για μεγιστοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας σε συνδυασμό με υψηλό επίπεδο θερμικής άνεσης.

Τα κυριότερα συμπεράσματα της μελέτης μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

Η προτεινομένη απλή τριγωνική συνάρτηση ενεργού θερμοχωρητικότητας  $C_{p,eff}(T)$  δίδει αμελητέες διαφορές στα τελικά αποτελέσματα σε σχέση με άλλες πολύπλοκες συναρτήσεις με μορφή κατανομής Gauss, οι οποίες προτείνονται στην βιβλιογραφία [17]. Αντιθέτως, άλλες συναρτήσεις απλού γεωμετρικού σχήματος (Σχ. 1), οι οποίες δοκιμάστηκαν, εισήγαγαν σημαντικές αποκλίσεις.

Η τοποθέτηση στρώματος PCM στην εξωτερική πλευρά της μόνωσης εξωτερικού τοίχου προσφέρει αμελητέο ενεργειακό όφελος διότι η μόνωση εμποδίζει την συναλλαγή θερμότητας του PCM με το εσωτερικό περιβάλλον. Συνεπώς, η αποθηκευμένη ηλιακή θερμότητα στο PCM δεν μπορεί να μεταδοθεί μέσα στο κτήριο. Αντιθέτως, σημαντικό ενεργειακό όφελος επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση στρώματος PCM στην εσωτερική πλευρά της μόνωσης εξωτερικού τοίχου, υπό την προϋπόθεση ότι απέναντι υπάρχουν υαλοπίνακες, οι οποίοι επιτρέπουν την είσοδο ηλιακής ακτινοβολίας για την φόρτιση του PCM. Στην περίπτωση απουσίας απέναντι υαλοπινάκων, προφανώς δεν προκύπτει ηλιακό ενεργειακό όφελος, δεδομένου μάλιστα ότι το στρώμα της μόνωσης εμποδίζει την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην εξωτερική επιφάνεια του τοίχου να φορτίσει το PCM. Μόνον όφελος είναι η εξομάλυνση της μεταβολής της εσωτερικής θερμοκρασίας που οφείλεται στην συναλλαγή θερμότητας μεταξύ PCM και εσωτερικών πηγών, π.χ. φώτων, συσκευών, ατόμων, κλπ. Συνεπώς, αν είναι επιθυμητή η προσθήκη στρώματος PCM στο κέλυφος του κτηρίου, τούτο πρέπει να τοποθετηθεί στην εσωτερική πλευρά της μόνωσης.

Σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση στρώματος PCM στους εσωτερικούς τοίχους του κτηρίου που βρίσκονται απέναντι από υαλοπίνακες. Η εισερχομένη ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στον απέναντι εσωτερικό τοίχο όπου απορροφάται και αποδίδεται αργότερα στο εσωτερικό περιβάλλον. Εκτός από την αποθήκευση της ηλιακής θερμότητας, το στρώμα PCM στους εσωτερικούς τοίχους λειτουργεί και ως σύστημα απόσβεσης πιθανών έντονων μεταβολών της εσωτερικής θερμοκρασίας.

Στρώματα PCM τοποθετημένα μέσα σε εσωτερικούς τοίχους ή στην εσωτερική πλευρά της μόνωσης εξωτερικών τοίχων που βρίσκονται απέναντι από υαλοπίνακες, επιτυγχάνουν μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας αν αυξηθεί το πάχος τους ή η τιμή της λανθάνουσας θερμότητας. Όμως, το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης ασκεί ισχυρότερη επίδραση από την λανθάνουσα θερμότητα. Το βέλτιστο θερμοκρασιακό εύρος, το οποίο μεγιστοποιεί την εξοικονόμηση ενέργειας διαφέρει για την θερινή και την χειμερινή περίοδο. Συνεπώς, ο μελετητής θα πρέπει να επιλέξει PCM με κατάλληλο θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης, ανάλογα με την χρήση και τις ανάγκες κάθε συγκεκριμένου κτιρίου. Επίσης, ο μηχανικός οφείλει να επιλέξει τα κατά το δυνατόν ελαφρότερα δομικά στοιχεία (π.χ. γυψοσανίδες) αντί των συνηθισμένων βαρέων υλικών (π.χ. σκυρόδεμα, οπτόπλινθοι, κλπ.) για την ενσωμάτωση του στρώματος PCM, ώστε αυτό να «αισθάνεται» γρηγορότερα τις θερμοκρασιακές αλλαγές και να συναλλάσει ευκολότερα θερμότητα με το εσωτερικό περιβάλλον.

Τα δομικά μείγματα που περιέχουν PCM απλοποιούν σημαντικά την δόμηση, σε σχέση με την χρήση στρωμάτων καθαρού PCM και παρέχουν την δυνατότητα προσθήκης της ακριβώς απαιτούμενης ποσότητας PCM. Επιπλέον, σημαντικό πλεονέκτημα της ενσωμάτωσης των PCM στα δομικά μείγματα αποτελεί η δυνατότητα ρύθμισης της τιμής της ειδικής θερμικής αγωγιμότητας του τελικού μείγματος, σύμφωνα με την εξ. (4). Έτσι, μειώνεται το γνωστό μειονέκτημα της μικρής ειδικής θερμικής αγωγιμότητας των PCM, λόγω της οποίας δυσχεραίνεται η αγωγή θερμότητας με αποτέλεσμα την μειωμένη φόρτιση-αποφόρτιση και συναλλαγή θερμότητας του PCM με τον αέρα του χώρου.

Η αύξηση της περιεκτικότητας PCM στο μείγμα προκαλεί (α) την επιθυμητή μείωση της διακύμανσης της εσωτερικής θερμοκρασίας, (β) χαμηλότερες θερμοκρασίες κατά την φόρτιση (ημέρα) και υψηλότερες κατά την αποφόρτιση (νύχτα) και (γ) βελτιώνει την θερμική κάλυψη του χώρου κατά τις νεφοσκεπείς χειμερινές ημέρες. Γενικώς, η επίδραση της περιεκτικότητας του PCM στην εξοικονόμηση ενέργειας είναι έντονη στις μικρές τιμές της περιεκτικότητας και ασθενής στις μεγάλες. Έτσι, για περιεκτικότητες 0-30%, υπό κατάλληλες συνθήκες μπορεί να εξοικονομηθεί μέχρι το 80% της ενέργειας που εξοικονομείται με το καθαρό PCM. Στο εντυπωσιακό αυτό αποτέλεσμα συντελεί και η υψηλή τιμή της ειδικής θερμικής αγωγιμότητας του τελικού μείγματος σε σχέση με την χαμηλή τιμή του καθαρού PCM.

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς της παρούσης μελέτης, με ορθό σχεδιασμό και κατάλληλες τιμές των θερμοφυσικών ιδιοτήτων και λοιπών παραμέτρων των PCM επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας μέχρι 33% της απαιτούμενης ετησίως για θέρμανση και ψύξη των τυπικών κτηρίων της Β κλιματικής ζώνης.

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Khudhair AM, Farid MM. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials, *Energy Conversion and Management* 45 (2004) 263–275.
- [2] Abhat A. Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials. *Solar energy* 1983;30:313-332.
- [3] Lane GA. *Solar Heat Storage: Latent Heat Materials*, 1983, Vol. I, Background and Scientific Principles, CRC Press.
- [4] Zalba B, Marín JM, Cabeza LF, Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering* 2003;23:251–283.
- [5] Medina MA, King JB, Zhang M. On the heat transfer rate reduction of structural insulated panels (SIPs) outfitted with phase change materials (PCMs). *Energy* 2008; 33:667-678.
- [6] Borreguero AM, Carmona M, Sanchez ML, Valverde JL, Rodriguez FJ. Improvement of the thermal behaviour of gypsum blocks by the incorporation of microcapsules containing PCMS obtained by suspension polymerization with an optimal core/coating mass ratio. *Applied Thermal Engineering* 2010; 30:1164-1169.
- [7] Chen C, Guo H, Liu Y, Yue H, Wang C. A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard. *Energy and Buildings* 2008; 40:882-890.

- [8] Evers AC, Medina MA, Fang Y. Evaluation of the thermal performance of frame walls enhanced with paraffin and hydrated salt phase change materials using a dynamic wall simulator. *Building and Environment* 2010;45:1762-1768.
- [9] Khalifa AJN, Abbas EF. A comparative performance study of some thermal storage materials used for solar space heating. *Energy and Buildings* 2009;41:407-415.
- [10] Potvin FM, Gosselin L. Thermal shielding of multilayer walls with phase change materials under different transient boundary conditions. *Int. Journal of Thermal Sciences* 2009;48:1707-1717.
- [11] Liu H, Awbi HB. Performance of phase change material boards under natural convection. *Building and Environment* 2009;44:1788-1793.
- [12] Zhou G, Yang Y, Wang X, Cheng J. Thermal characteristics of shape-stabilized phase change material wallboard with periodical outside temperature waves. *Applied Energy* 2010;87:2666-2672.
- [13] Kuznik F, Virgone J. Experimental assessment of a phase change material for wall building use. *Applied Energy* 2009;86:2038-2046.
- [14] M.Costa, D. Buddhi, A. Oliva, Numerical simulation of a latent heat thermal energy storage system with enhanced heat conduction, *Energy Convers. & Mgmt*, 39 (1998) 319 – 330
- [15] K. Peippo, P. Kauranen and P.D. Lund, A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating, *Energy and Building*, 259-270, 17, 1991
- [16] Frederic Kuznik , Joseph Virgone, Jean-Jacques Roux, Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation, *Energy and Buildings* 40 (2008) 148–156
- [17] K. Darkwa, P.W. O’Callaghan, Simulation of phase change drywalls in a passive solar building, *Applied Thermal Engineering* 26 (2006) 853–858
- [18] D. A. Neepser, Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage, *Solar Energy* Vol. 68, 393–403, 2000
- [19] E. D. Kravvaritis, K.A. Antonopoulos, C. Tzivanidis, Improvements on the measurement of the thermal properties of phase change materials (PCM), *Measurement Science and Technology* 21 (2010), 045103 (April, paper Nr. 5103) 1-9
- [20] E.D. Kravvaritis, K.A. Antonopoulos, C. Tzivanidis, Experimental determination of the effective thermal capacity function and other thermal properties for various phase change materials using the thermal delay method. Submitted to *Energy – The International Journal*, 2010.
- [21] K.A. Antonopoulos, E. Koronaki, Envelope and indoor thermal capacitance of buildings, *Applied Thermal Engineering* 19 (1999), 743-756
- [22] K.A. Antonopoulos, C. Tzivanidis, Finite difference prediction of transient indoor temperature and related correlation based on the building time constant, *Int. J. of Energy Research*, 20 (1996) 507-520.
- [23] K.A. Antonopoulos, E. Koronaki, Effect of indoor mass on the time constant and thermal delay of buildings, *Int. J. of Energy Research*, 24 (2000) 391-402.
- [24] K.A. Antonopoulos, C. Tzivanidis, Numerical solution of unsteady three-dimensional heat transfer during space cooling using ceiling embedded piping, *Energy -The Int. Journal* 22 (1997) 59-67.
- [25] E.D. Kravvaritis, K.A. Antonopoulos, C. Tzivanidis, Solar energy management using PCM passive systems in the Athens area buildings. Submitted to *Energy Conversion & Management*, 2010.

- [26] C. Tzivanidis, K.A. Antonopoulos, E.D. Kravvaritis, Parametric analysis of space cooling systems based on night ceiling cooling with PCM-embedded piping. Under publication in Int. Journal of Energy Research.
- [27] C. Tzivanidis, K.A. Antonopoulos, E.D. Kravvaritis, Transient three-dimensional numerical solution of night ceiling cooling using PCM-embedded piping. Submitted to J. of Energy Engineering, 2010.
- [28] Χ. Τζιβανίδης, Κ.Α. Αντωνόπουλος, Ε.Δ. Κραββαρίτης, Χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCM) σε ηλιακό ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης χώρου στην περιοχή της Αθήνας. 4<sup>ο</sup> Εθνικό Συνέδριο RENES, Εφαρμογή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, 10-12 Μαΐου 2010, Αθήνα.
- [29] Kuznik F, Virgone J, Roux JJ. Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation. Energy and Buildings 2008;40:148-156.
- [30] Kouremenos DA, Antonopoulos KA, Rogdakis E. Performance of solar NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O absorption cycles in the Athens area. Solar Energy 1987;39:187-195.
- [31] Kouremenos DA, Antonopoulos KA, Domazakis ES. Solar radiation correlations for the Athens, Greece area. Solar Energy. 1985;35:259-269.
- [32] Kouremenos DA, Antonopoulos KA, Doulgerakis S. Direct and diffuse solar radiation correlations for tilted surfaces in the Athens, Greece. Solar Energy, 1987;38:203-217.
- [33] K.A. Antonopoulos, C. Tzivanidis, E.D. Kravvaritis, Solar energy and phase change materials (PCM) in buildings, PV Technology Development and Market Trends Congress, RES, 4-5 October 2010, NTUA, Athens.
- [34] Κ.Α. Αντωνόπουλος, Χ. Τζιβανίδης, Ε.Δ. Κραββαρίτης, Χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCM) στα κτήρια, υπό έκδοση στο περιοδικό ΚΤΙΠΙΟ.