



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Εποχιακή αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε
δεξαμενή με χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCM)**

ΚΑΜΠΕΡΗ ΑΣΗΜΙΝΑ-ΦΑΝΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΚΙΜΩΝ ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
OF ATHENS**

**SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF THERMAL ENGINEERING**

DIPLOMA THESIS

**Seasonal storage of thermal energy in tank with
phase change materials (PCM)**

KAMPERI ASIMINA-FANI

**SUPERVISOR: KIMON ANTONOPOULOS
NTUA PROFESSOR**

ATHENS 2019

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Κίμωνα Αντωνόπουλο για την εξαιρετική συνεργασία μας και την αμέριστη βοήθεια και επιστημονική καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την θεωρητική και υπολογιστική διερεύνηση της χρήσης υλικών αλλαγής φάσης (Phase Change Materials) στο μοντέλο της εποχιακής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε δεξαμενή για χρήση σε κατοικία. Τα PCM είναι υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας τα οποία κατά τη μεταφορά θερμικής ενέργειας μεταβάλλουν την κατάσταση τους από την στερεά στην υγρή φάση. Σε σύγκριση με τα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας όπως το νερό, αποθηκεύουν 5-14 φορές περισσότερη θερμότητα ανά μονάδα όγκου.

Η εργασία αποτελείται από δύο ενότητες, μια θεωρητική και μια υπολογιστική. Στην θεωρητική ενότητα αρχικά αναλύουμε και συγκρίνουμε τα διαθέσιμα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας, κάνοντας αναφορά και σε παλαιότερα έργα αποθήκευσης (ΚΕΦ. 1,2,3,4,5) . Στη συνέχεια, προσεγγίζουμε θεωρητικά τα PCM αναλύοντας τις κατηγορίες και τις ιδιότητες τους , συνοψίζουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους, ενώ αναφερόμαστε και στη χρήση των PCM σε διάφορες εφαρμογές, ανάμεσα τους και κτιριακές (ΚΕΦ. 6,7).

Στην δεύτερη ενότητα που αποτελεί το υπολογιστικό μέρος, μελετάμε μια διάταξη εποχιακής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε δεξαμενή η οποία έχει στόχο την κάλυψη των αναγκών μιας κατοικίας σε θερμότητα (ΚΕΦ. 8) . Η εφαρμογή μελετάται αρχικά με νερό και στη συνέχεια με PCM RT42 για κοινή διάταξη , συνθήκες περιβάλλοντος και κατανάλωση θερμότητας. Στόχος μας είναι να συγκρίνουμε τα δύο μέσα αποθήκευσης βάσει των αποτελεσμάτων ώστε διαπιστώσουμε αν η μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα του PCM αποδίδει στη διάταξη που επιλέξαμε. Ακόμη, πραγματοποιούμε παραμετρική μελέτη δοκιμάζοντας ηλιακούς συλλέκτες με διαφορετικές τιμές επιφάνειας για να καταλήξουμε στην τιμή εκείνη που μας αποφέρει τα καλύτερα αποτελέσματα με χρήση PCM.

Abstract

The subject of this thesis is the theoretical and experimental study of phase change materials (PCM) used as storage media for a system of seasonal thermal energy storage made for house heating. PCMs store latent heat and are capable of changing from solid to liquid state while conducting thermal energy. As compared with sensible heat storage materials, PCMs can store 5-14 times more heat per volume of unit.

The thesis consists of two sections, one theoretical and one computational application. In the theoretical section, we initially analyze and compare the available heat storage systems, mentioning also older projects of energy storage (Chapters 1, 2, 3, 4, 5) . After that, we approach theoretically PCMs , we analyze their categories and features, we summarize their advantages and disadvantages and we mention their use in several applications, such as in buildings among others (Chapters 6,7) .

In the second section of thesis, we study an application of seasonal thermal energy storage in tank which aims to supply a residence with heat (Chapter 8). The application is initially studied using water as storage media and then PCM RT42 for mutual system features, environmental conditions and heat consumption. We aim at comparing the two storage medias so as to confirm if the high storage capacity of PCMs is working well with the application we have chosen. In addition, we conduct a parametric study , testing different values of solar collector's square footage in order to choose the most efficient one for the use of PCM.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΠΟΧΙΑΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	10
2.1. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	10
2.2. ΠΑΛΑΙΟΤΕΡΑ ΕΡΓΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	12
2.2.1. Αποθήκευση με βάση το νερό	14
2.2.1.1. Συστήματα δεξαμενής νερού	14
2.2.1.2. Συστήματα Υδροφόρου Ορίζοντα.....	17
2.2.2 Βραχώδεις υπόβαθρο/υπόστρωμα.....	20
2.2.3. Αποθήκευση στο έδαφος.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΧΗΜΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	27
4.1. ΜΕΛΕΤΗ ΥΛΙΚΩΝ.....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ	33
6.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ	35
6.2 ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ	36
6.2.1 Παραφίνες.....	36
6.2.2 Μη παραφίνες	38
6.3 ΑΝΟΡΓΑΝΑ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ	41
6.3.1 Ένυδρα άλατα.....	41
6.3.2 Μέταλλα	45
6.3.3 Ευτηκτικά.....	45
6.4 ΣΥΝΟΨΗ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΩΝ PCM.....	47
6.5 ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΤΩΝ PCM	50
6.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ PCM.....	52
6.6.1 Φαινόμενο <i>Supercooling</i>	54
6.6.2 Φαινόμενο διάβρωσης	55

6.6.3 Φαινόμενο διαχωρισμού των φάσεων.....	55
6.7 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ Ρ.Σ.Μ. ΣΕ ΚΑΨΟΥΛΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....	56
6.7.1 <i>Macroencapsulation</i>	56
6.7.2 <i>Microencapsulation</i>	57
6.8 ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΡΣΜ ΜΕ ΑΛΛΑ ΥΛΙΚΑ.....	60
6.9 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΡΣΜ.....	60
6.10 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ.....	61
6.10.1 Μέθοδος ενθαλπίας.....	62
6.10.2 Μέθοδος ενεργού θερμοχωρητικότητας.....	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΡΣΜ ΓΙΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ.....	66
7.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΡΣΜ.....	66
7.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΡΣΜ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ.....	68
7.2.1 <i>Ηλιακοί τοίχοι</i>	69
7.2.2 <i>Γυψοσανίδες με ενσωματωμένα ΡΣΜ</i>	71
7.2.3 <i>Δάπεδα με ενσωματωμένα ΡΣΜ</i>	73
7.2.4 <i>Ενεργειακά αποδοτικά παράθυρα</i>	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	78
8.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ.....	78
8.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΣΗΣ ΣΤΙΓΜΙΑΙΑΣ ΑΜΕΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΥΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ G_B & G_D	79
8.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΛΟΓΟΥ R_B	90
8.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ G_T	93
8.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ.....	99
8.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΡΣΜ RT42 ΒΑΣΕΙ ΤΗΣ ΤΡΙΓΩΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ.....	100
8.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ.....	102
8.8 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ.....	118
8.9 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	121
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	126

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εποχιακή αποθήκευση ενέργειας

Η ταχεία παγκόσμια αύξηση του πληθυσμού έχει επιβαρύνει σε μεγάλο βαθμό τις συμβατικές πηγές ενέργειας, όπως τα καύσιμα, τον άνθρακα και το πετρέλαιο, οι οποίες εκτιμάται ότι θα εξαντληθούν σε μερικές δεκαετίες. Οι συμβατικές αυτές μορφές ενέργειας κατηγορούνται επίσης για εκπομπές CO₂ και άλλων επιβλαβών αερίων τα οποία προκαλούν προβλήματα κλιματικής αλλαγής, όπως για παράδειγμα το φαινόμενο του θερμοκηπίου και η καταστροφή της στιβάδας του όζοντος. Όλες αυτές οι σοβαρές συνέπειες έχουν αναγκάσει τους ανθρώπους να επανεξετάσουν τα αποδεκτά και βιώσιμα μοντέλα ανάπτυξης.

Τα τελευταία χρόνια, η σημαντική πρόοδος στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει κάνει τους νέους ενεργειακούς πόρους αρκετά ανταγωνιστικούς απέναντι στους ήδη υπάρχοντες συμβατικούς όσον αφορά την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία. Η ηλιακή ενέργεια, ως μια πηγή ενέργειας χωρίς ρύπους, ανεξάντλητη και οικονομικά προσιτή, έχει μελετηθεί εκτεταμένα και έχει χρησιμοποιηθεί σε πολυάριθμες εφαρμογές σε ολόκληρο τον κόσμο. Ωστόσο, ένα από τα μακροχρόνια εμπόδια της τεχνολογίας της ηλιακής ενέργειας βρίσκεται στην αναντιστοιχία μεταξύ της παροχής και της κατανάλωσης της ενέργειας. Κατά συνέπεια, η ιδέα της αποθήκευσης ενέργειας προτείνεται ως απαραίτητος τρόπος αντιμετώπισης αυτής της αναντιστοιχίας.

Η ιδέα της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (AΘΕ) αναφέρθηκε και ερευνήθηκε για πρώτη φορά στη δεκαετία του '70 για την αντιμετώπιση της κρίσης της έλλειψης ενέργειας. Με την αποθήκευση ενέργειας, η διαλείπουσα ηλιακή ενέργεια είναι σε θέση όχι μόνο να καλύψει τις απαιτήσεις του χώρου σε θέρμανση και οικιακή παροχή ύδατος, αλλά και να προσφέρει υψηλού επιπέδου πηγή θερμότητας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους ανεξάρτητα από τη χρονική στιγμή ή τους εποχιακούς περιορισμούς.

Η αποθήκευση ενέργειας μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε βραχυπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας και μακροπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας ανάλογα με τις διαφορετικές διάρκειες αποθήκευσης. Η χρήση της περίσσειας θερμότητας που συλλέγεται το καλοκαίρι για την αντιστάθμιση της ανεπάρκειας παροχής θερμότητας κατά την διάρκεια του χειμώνα αποτελεί την έννοια της εποχιακής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (EAΘΕ), η οποία ονομάζεται και μακροπρόθεσμη αποθήκευση θερμότητας.

Ο Fisch et al. (1998) συνόψισε 13 υπάρχοντα και 14 προγραμματισμένα ηλιακά συστήματα θερμότητας μεγάλης κλίμακας στην Ευρώπη με διαφορετικές εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας, βραχυπρόθεσμης (ημερήσιων) και μακροπρόθεσμης (εποχιακών), και συνέκρινε τις

αναλογίες κόστους-οφέλους αυτών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μοντέλο της εποχιακής αποθήκευσης ενέργειας μπορούσε να ικανοποιήσει το 50-70% των ετήσιων αναγκών σε θερμότητα, ενώ το ημερήσιο μοντέλο μπορούσε να ικανοποιήσει το 10-20%. Η έρευνα αυτή υποδεικνυε ότι η εποχιακή αποθήκευση ενέργειας ήταν πιο ικανή να διατηρήσει την ενέργεια και να μειώσει την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων για το περιβάλλον.

Παρόλο που η εποχιακή αποθήκευση ενέργειας έχει μεγαλύτερες προοπτικές σε πρακτικές εφαρμογές, τεχνολογικά είναι πιο απαιτητική σε σχέση με την βραχυπρόθεσμη αποθήκευση. Απαιτεί μεγάλους όγκους αποθήκευσης, έχει μεγαλύτερο ρίσκο απώλειας θερμότητας και το υλικό που θα επιλεγεί για την εφαρμογή πρέπει να είναι οικονομικό, αξιόπιστο και οικολογικό.

Υπάρχουν 3 διαφορετικοί μηχανισμοί αποθήκευσης ενέργειας: η αποθήκευση αισθητής θερμότητας, η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας και η αποθήκευση θερμο-χημικής θερμότητας/θερμότητας χημικών αντιδράσεων. Τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν πραγματοποιηθεί σχετικές μελέτες σε ολόκληρο τον κόσμο που πραγματεύονται ποικίλες εφαρμογές και μηχανισμούς αποθήκευσης. Το μοντέλο της εποχιακής αποθήκευσης ενέργειας δεν εφαρμόζεται μόνο στην τηλεθέρμανση αλλά και στα θερμοκήπια για τη θέρμανση του χώρου καθώς η θέρμανση για τα φυτά κατά τη διάρκεια της νύχτας τον χειμώνα καταναλώνει μεγάλη ποσότητα της εισροής θερμότητας στα αγροτικά θερμοκήπια. Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές διεθνείς συνεργασίες για αυτό το ενδιαφέρον θέμα και κάποιες από αυτές έχουν αποφέρει αξιοσημείωτα επιτεύγματα. Για παράδειγμα, το IEA-SHC Task 32 (The Solar Heating and Cooling Programme of the International Energy Agency) και το Solarthermie 2000 αποτελούν δύο τέτοια προγράμματα που εστιάζουν σε προηγμένα μοντέλα αποθήκευσης. Στα πλαίσια του προγράμματος Task 32, μελετήθηκαν και συζητήθηκαν chemical and sorption, τα υλικά αλλαγής φάσης και οι τεχνολογίες αποθήκευσης σε δεξαμενές νερού. Οι συνεργατικές ερευνητικές προσπάθειες του IEA-ECES (International Energy Agency: Energy Conservation through Energy Storage) ανέπτυξαν το μοντέλο της υπόγειας αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (ΥΑΘΕ) και εξέτασε την χρήση των υλικών αλλαγής φάσης στην αποθήκευση ενέργειας. Για την ΥΑΘΕ, αποτελέσματα προηγούμενων μελετών έχουν ήδη μετασχηματιστεί επιτυχημένα σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας μέσα από διεθνείς συνεργατικές προσπάθειες του IEA-ECES. Το Solarthermie 2000 είναι ένα γερμανικό ερευνητικό πρόγραμμα στα πλαίσια του οποίου έχουν πραγματοποιηθεί πιλοτικά σχέδια και σχέδια επίδειξης εποχιακής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας για τηλεθέρμανση. Όλες οι μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις στο Solarthermie 2000 υιοθέτησαν το μοντέλο της αποθήκευσης αισθητής θερμότητας.

Η αποθήκευση αισθητής θερμότητας συνίσταται από αποθήκευση σε δεξαμενές νερού και ΥΑΘΕ. Οι κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για ΥΑΘΕ περιλαμβάνουν αποθήκευση σε υδροφόρους ορίζοντες και αποθήκευση κάτω από το έδαφος, τα οποία θα αναλυθούν λεπτομερώς παρακάτω. Η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας αποθηκεύει θερμότητα σχεδόν ισοθεμικά σε υλικά αλλαγής φάσης και μπορεί να προσφέρει υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα σε σχέση με την αποθήκευση αισθητής θερμότητας. Η αποθήκευση χημικής ενέργειας είναι μια πρόσφατα μελετημένη τεχνολογία η οποία επιτρέπει πιο συμπαγή αποθήκευση μέσω υψηλότερων θερμοχωρητικοτήτων χωρίς απώλειες θερμότητας και ταξινομείται κυρίως ως αποθήκευση απορρόφησης και χημικής αντίδρασης. [1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Αποθήκευση αισθητής θερμότητας

Η μέθοδος της αποθήκευσης αισθητής θερμότητας μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια που έχει συλλεχθεί σε αισθητή θερμότητα μέσα σε επιλεγμένα υλικά και την ανακτά όταν απαιτείται θερμότητα. Η ποσότητα της αποθηκευμένης θερμότητας καθορίζεται από την ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού και την αύξηση της θερμοκρασίας του. Η αποθήκευση αισθητής θερμότητας θεωρείται μια απλή, χαμηλού κόστους και σχετικά ώριμη τεχνολογία για την εποχιακή αποθήκευση ενέργειας σε σχέση με άλλες εναλλακτικές. Εξαιτίας του χαρακτηριστικού της χαμηλού κόστους και της αξιοπιστίας της, έχει εφαρμοστεί σε σημαντικό αριθμό έργων/μελετών. [1]

2.1. Υλικά και θεμελιώδεις μελέτες στην αποθήκευση αισθητής θερμότητας

Οι Fernandez et al. (2010) χρησιμοποίησαν μια μεθοδολογία που συνδυάζει πολλαπλούς στόχους και περιορισμούς χρήσης για να βρουν δυνητικά υλικά για αποθήκευση αισθητής θερμότητας. Μελέτησαν υλικά των οποίων το εύρος θερμοκρασιών εφαρμογής ήταν 150-200 οC λαμβάνοντας υπόψη τις φυσικές ιδιότητες και τις θερμοχωρητικότητες τους και αξιολογώντας τα από περιβαλλοντική άποψη. Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζονται οι τιμές της ειδικής θερμοχωρητικότητας C_p των 100 πιο συχνά χρησιμοποιούμενων μηχανικών υλικών, ανάμεσα στα οποία τα φυσικά και πολυμερή υλικά, όπως το φυσικό καουτσούκ ή το θερμοπλαστικό συμπολυμερές ABS, έχουν τις υψηλότερες τιμές C_p που κυμαίνονται περίπου στα 2 kJ/kg * K. Η ειδική θερμοχωρητικότητα και η ειδική θερμική πυκνότητα θεωρούνται δύο κριτικής σημασίας δείκτες από τους οποίους προσδιορίζεται η ενεργειακή πυκνότητα ($C_p \rho$, heat capacity unit volume), ένα σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης της αποθήκευσης. Ο συγγραφέας σχεδίασε επίσης μια σύγκριση των θερμικών αγωγιμοτήτων αυτών των υλικών με σκοπό την παροχή μια καλής μεθόδου επιλογής για την εύρεση υλικών που καλύπτουν διαφορετικές απαιτήσεις εφαρμογών. Πέρα από την καλή θερμική απόδοση, το χαμηλό κόστος των υλικών είναι ένα ακόμα σημαντικό κριτήριο για τον εντοπισμό δυνητικών υλικών, ειδικά για την μακροπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας.

Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία της εποχιακής αποθήκευσης έχει εφαρμοστεί κυρίως για την θέρμανση χώρων και την παροχή οικιακού ζεστού νερού (OZN) για τα οποία οι απαιτούμενες θερμοκρασίες κυμαίνονται ανάλογα με το μοντέλο της εποχιακής αποθήκευσης θερμικής

ενέργειας (ΕΑΘΕ), γνωστή και ως μακροπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας, από 40-80 οC. Ως αποτέλεσμα, το νερό, τα πέτρινου τύπου υλικά (όπως το χαλίκι, τα βότσαλα και τα τούβλα) και το έδαφος/χώμα έχουν γίνει δημοφιλείς υποψήφιοι ως μέσα αποθήκευσης και έχουν επιλεγεί ευρέως σε μεγάλης κλίμακας έργα επίδειξης.

J. Xu et al. / Solar Energy 103 (2014) 610–638



Εικόνα 2.1 : Ραβδόγραμμα ειδικής θερμοχωρητικότητας των 100 πιο χρησιμοποιούμενων υλικών, που έχουν ληφθεί με τον επιλογέα CES (Fernandez et al., 2010).

Ο Πίνακας 2.1 παραθέτει μια σύγκριση διάφορων ευρέως χρησιμοποιούμενων μεθόδων αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Για την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου αποθήκευσης για ένα έργο, οι σχετικές οριακές συνθήκες, όπως οι τοπικές γεωλογικές συνθήκες, το μέγεθος του διαθέσιμου χώρου, τα επίπεδα θερμοκρασίας της αποθήκης, τα νομικά ζητήματα σχετικά με την γεώτρηση και το κόστος επένδυσης, πρέπει να ληφθούν υπόψη. Ανάμεσα στα μοντέλα αποθήκευσης που καταγράφονται στον Πίνακα 2.1, οι αγωγοί και οι υδροφόροι ορίζοντες αποθήκευσης θερμότητας απαιτούν τα περισσότερα γεωλογικά χαρακτηριστικά. Η υδραυλική αγωγιμότητα και η φυσική ροή των υπόγειων υδάτων μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την

απόδοση του συστήματος, επομένως πρέπει να διενεργηθούν γεωλογικές έρευνες πριν τον σχεδιασμό του και κάθε γεωλογική απαίτηση που θα προκύψει πρέπει να πληρείται αυστηρά. [1]

Πίνακας 2.1: Σύγκριση μοντέλων αποθήκευσης αισθητής ενέργειας (Schmidt et al., 2003)

Hot-water	Gravel-water	Duct	Aquifer
<i>Storage medium</i> Water	Gravel-water	Ground material (soil/rock)	Ground material (sand/gravel. .-water)
<i>Heat capacity (kW h/m³)</i> 60-80	30-50	15-30	30-40
<i>Storage volume for 1 m³ water equivalent</i> 1 m ³	1.3-2 m ³	3-5 m ³	2-3 m ³
<i>Geological requirements</i>			
<ul style="list-style-type: none"> • Stable ground conditions • Preferably no groundwater • 5-15 m deep 	<ul style="list-style-type: none"> • Stable ground conditions • Preferably no groundwater • 5-15 m deep 	<ul style="list-style-type: none"> • Drillable ground • Groundwater favourable • High heat capacity • High thermal conductivity • Low hydraulic conductivity ($k_f < 1.10$ m/s) • Natural ground-water flow < 1 m/a • 30-100 m deep 	<ul style="list-style-type: none"> • Natural aquifer layer with high hydraulic conductivity ($k_f > 1.10$ m/s) • Confining layers on top and below • No or low natural ground flow • Suitable water chemistry at high temperatures • Aquifer thickness 20-50 m

2.2. Παλαιότερα έργα αποθήκευσης αισθητής ενέργειας

Σε σύγκριση με άλλες επιλογές, η αποθήκευση αισθητής θερμότητας είναι η πιο ώριμη και αξιόπιστη τεχνολογία για σκοπούς εποχιακής αποθήκευσης. Η Σουηδία πρωτοπόρησε στην έρευνα της εποχιακής αποθήκευσης ηλιακής θερμικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας κατά την δεκαετία του '80 και μέσω μιας εκτεταμένης διεθνούς συνεργασίας μέσω του International Energy Agency (IEA), αυτό το μοντέλο διαδόθηκε σε ολόκληρο τον κόσμο. Επί του παρόντος, βρίσκονται σε λειτουργία πολλές εγκαταστάσεις στη Σουηδία, την Ολλανδία, την Γερμανία και άλλες Ευρωπαϊκές χώρες, καθώς και στον Καναδά και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Υπάρχοντα μεγάλης κλίμακας έργα εποχιακής αποθήκευσης ενέργειας που περιλαμβάνουν αποθήκευση με βάση το νερό, αποθήκευση σε βράχους (κυρίως χρήση χαλικιών) και αποθήκευση σε έδαφος/χώμα παρατίθενται στον Πίνακα 2.2 . Στη συνέχεια, θα δοθεί λεπτομερής περιγραφή κάθε τύπου. [1]

Πίνακας 2.2: Υπάρχοντα έργα εποχιακής αποθήκευσης αισθητής ενέργειας

Project	Heated living area (m ²)	Demand by district heating (GJ/a)	Solar collector area (m ²)	Storage volume (m ³)	Solar fraction (%)	References
<i>Hot water</i>						
Hamburg, DE	14,800	5796	3000	4500	49 ^a	(Schmidt et al., 2004b)
Friedrichshafen, DE	39,500	14,782	5600	12,000	47 ^a	(Schmidt et al., 2004b)
Hannover, DE	7365	2498	1350	2750	39 ^a	(Schmidt et al., 2004b)
Munich, DE	24,800	8280	2900	5700	47 ^a	(Dalenbäck, 2012)
Eggenstein, DE (Pit)	12,000		1600	4500	37	(Schmidt and Mangold, 2006)
Rise, DK	115 buildings		3575	5000		(Dalenbäck, 2012; SOLARGE)
Marstal, DK	1300 houses	104400	26,000	70,000	29	(Fisch et al., 1998)
Herlev, DK		4520	1025	3000	35	(Heller, 2000)
Otrupgard, DK		1630	560	1500	16	(Heller, 2000)
Hoerby, DK				500		(Dalenbäck, 2012)
Ingelstad, SE	50 houses		1320	5000		(Dalenbäck, 2012)
Lambohov, SE	50 houses		2700	10,000		(Dalenbäck, 2012)
Lyckebo, SE			4320	100000		(Dalenbäck, 2012)
Neuchatel, CH	Office		1120	1000		(Dalenbäck, 2012)
Calabria, IT	1750	111	91.2	500	28.2	(Oliveti et al., 1998)
Lisse, NL	Agriculture		1200	1000		(Bokhoven et al., 2001)
Charlestown, US	Historic park		5700			(Breger and Michaels, 1984)
<i>Aquifer</i>						
Rostock, DE	7000	1789	1000	20,000	62 ^a	(Schmidt et al., 2004b)
Berlin, DE		57,600 (heat) 18,000 (cold and heat)	^b		77 (heat) 93 (cold and heat)	(Schmidt et al., 2003; Seibt and Kabus, 2006)
Rastatt, DE		18,345	6780	23,000	41	(Fisch et al., 1998)
Neubrandenburg, DE					46	(Kabus and Wolfgramm, 2009)
2 MW, NL			2900			(Dalenbäck, 2012)
Westway Beacons, UK	130 apartments					(Dalenbäck, 2012)
Richard Stockton, US	College with 7000 students	(cold)				(Dalenbäck, 2012)
Balcali, TR	Hospital	50,400				(Paksoy et al., 2000)
Çukurova, TR	360m ² greenhouse		Use greenhouse as solar collector			(Turgut et al., 2006)
Antwep, BE	Hospital				81	(Vanhoudt et al., 2011)
<i>Gravel</i>						
Chemnitz, DE	4680	4450	2000	8000	42 ^a	(Schmidt et al., 2004b)
Steinfurt, DE	3800	1170	510	1500	34 ^a	(Schmidt et al., 2004b)
Stuttgart, DE		360	211	1050	62	(Hahne, 2000)
Augsburg, DE				6500		(Schmidt et al., 2003)
<i>Duct</i>						
Neckarsulm, DE	20,000	5987	2700	20,000	50 ^a	(Schmidt et al., 2004b)
Attenkirchen, DE	30 homes	1386	836	500 + 10,500 (hot-water + duct)		(Reuss et al., 2006)
Craillsheim, DE	School and gymnasium	14,760	7300	37,500	50 ^a	(Dalenbäck, 2012)
Anneberg, SE	50 residential units	1980	2400	60,000	70 ^a	(Lundh and Dalenbäck, 2008)
Lidköping, SE		3528	2500	15,000	70	(Fisch et al., 1998)
Groningen, NL			2400			(Dalenbäck, 2012)
DLCS, CA	52 homes		2313	33,657	80	(Drake Landing Solar Community, 2012)
Kerava, FI			1100			(Dalenbäck, 2012)

DE = Germany, DK = Denmark, SE = Sweden, CH = Switzerland, IT = Italy, NL = Netherlands, US = United States of America, UK = United Kingdom, TR = Turkey, BE = Belgium, CA = Canada, FI = Finland.

^a Calculated values for long-time operation.

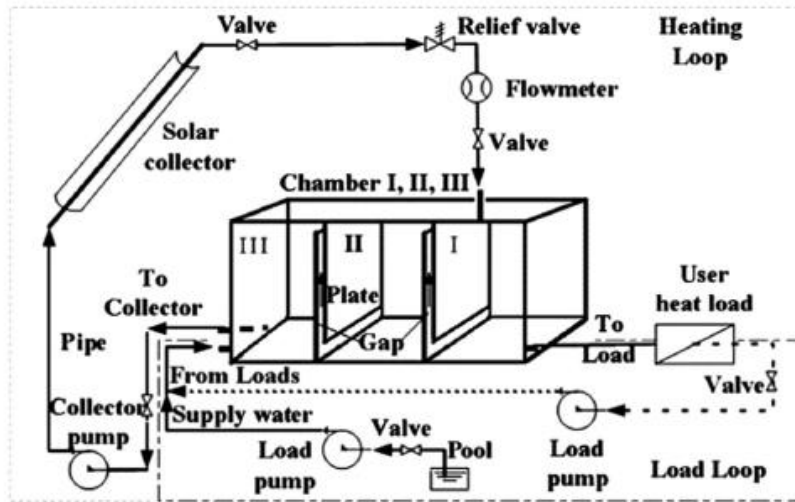
^b Combined heat and power plant (waste heat and ambient cold).

2.2.1. Αποθήκευση με βάση το νερό

Το νερό θεωρείται ένα ευνοϊκό υλικό για την αποθήκευση ενέργειας λόγω της υψηλής ειδικής θερμοχωρητικότητας (συγκριτικά με άλλα μέσα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας) και του υψηλού ποσοστού χωρητικότητας ενώ φορτίζεται και εκφορτίζεται. Τα συστήματα αποθήκευσης με βάση το νερό χρησιμοποιούν νερό ως μέσο αποθήκευσης ή υγρό φορέα θερμότητας για την αποθήκευση/μεταφορά θερμότητας. Μπορούν να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω σε συστήματα δεξαμενής νερού και συστήματα αποθήκευσης σε υδροφόρους ορίζοντες. Οι δεξαμενές νερού/λάκκοι αποθήκευσης αποθηκεύουν νερό σε μια τεχνητή κατασκευή, ενώ οι υδροφορείς αποθήκευσης χρησιμοποιούν φυσικό νερό απευθείας από υπόγεια στρώματα. [1]

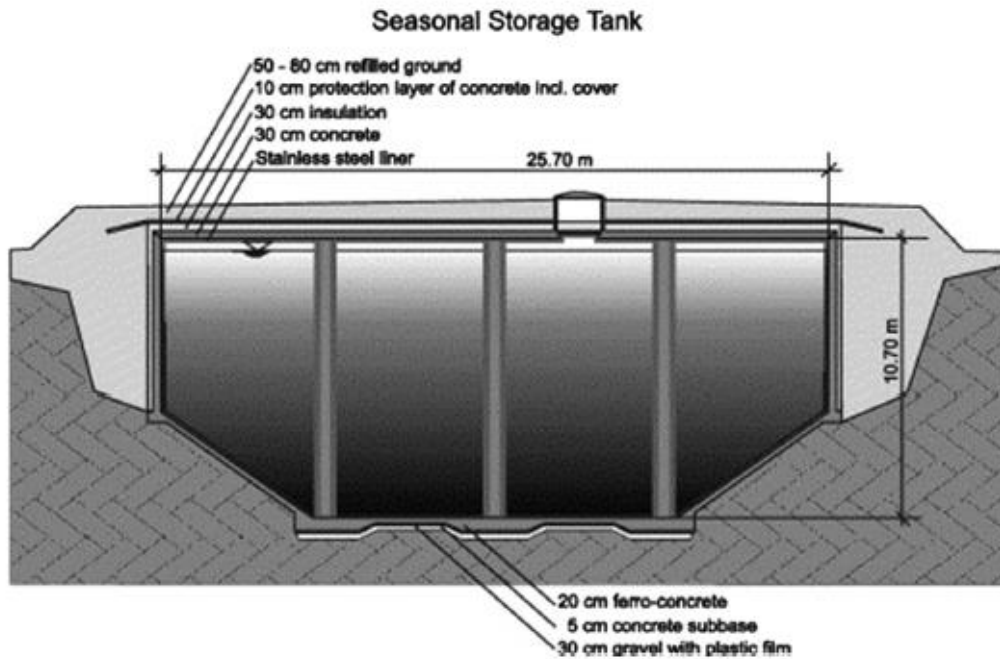
2.2.1.1. Συστήματα δεξαμενής νερού

Οι δεξαμενές νερού είναι τεχνητές δομές κατασκευασμένες από ανοξείδωτο χάλυβα ή οπλισμένο σκυρόδεμα που περιβάλλεται από παχιά μόνωση. Συνήθως βρίσκονται θαμμένες κάτω από το έδαφος (ονομάζονται επίσης και λάκκοι νερού) ή είναι τοποθετημένες στην οροφή ή στο εξωτερικό ενός κτιρίου. Οι δεξαμενές νερού αποθήκευσης λειτουργούν με έναν διαστρωματωμένο τρόπο με το νερό που βρίσκεται στην κορυφή της δεξαμενής να είναι πιο καυτό από αυτό που βρίσκεται στον πυθμένα λόγω της θερμικής πλευστότητας, και έτσι το επακόλουθο αποτέλεσμα της μίξης που προκαλείται από τη θερμοκρασιακή διαφορά μπορεί να υποβαθμίσει το επίπεδο της πηγής θερμότητας και να επηρεάσει αρνητικά την αποδοτικότητα του συστήματος. Για την ελαχιστοποίηση αυτού του φαινομένου, έχουν διενεργηθεί πολλές μελέτες που ερευνούν μεθόδους για την διατήρηση του εσωτερικού νερού σε μια σταθερή κατάσταση θερμικής διαστρωμάτωσης. Μια διαμερισμένη οριζόντια δεξαμενή νερού με θερμική διαστρωμάτωση αναπτύχθηκε σε ένα μεγάλης κλίμακας σύστημα ηλιακής ενέργειας στο SJTU όπως φαίνεται στο Εικόνα 2 (Han et al., 2009). Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το θερμοκρασιακό χάσμα ανάμεσα σε κάθε τμήμα παρέμεινε στους 15-20 K ,με διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εισόδου και εξόδου 70 K. Αποδείχθηκε ότι η οριζόντια διαμερισμένη δεξαμενή νερού μπορούσε να επιτύχει καλή θερμική απόδοση διαστρωμάτωσης και ήταν αποδοτική ως εφαρμογή αποθήκευσης θερμότητας.



Εικόνα 1.2: Οριζόντια διαμερισμένη δεξαμενή νερού για μεγάλης κλίμακας ηλιακό σύστημα στο SJTU (Han et al., 2009)

Επιπρόσθετα των μελετών για την βελτιστοποίηση της διαστρωμάτωσης, άλλο ένα δημοφιλές πεδίο έρευνας στην δεξαμενή νερού αποθήκευσης έγκειται στην μείωση των απωλειών θερμότητας κατά την διάρκεια της διαδικασίας αποθήκευσης θερμότητας. Έχουν γίνει προσπάθειες στον σχεδιασμό των δεξαμενών και στην επιλογή των υλικών μόνωσης. Το γυαλί, το μαλλί και η πολυουρεθάνη χρησιμοποιούνται ευρέως ως μονωτικά υλικά. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3, στρώματα ανοξείδωτου χάλυβα ή υψηλής πυκνότητας πολυουρεθάνης τοποθετημένα στην οροφή και στο κατακόρυφο εσωτερικό μέρος των δεξαμενών χρησιμοποιούνται ως επένδυση για την μείωση των απωλειών θερμότητας που προκύπτουν από την διάχυση ατμών μέσω των τσιμεντένιων τοιχωμάτων. Σε ένα έργο στο Hannover (Lottner et al. , 2000), ένα κοκκοποιημένο γυαλί αφρού τοποθετημένο μέσα σε υφασμάτινες σακούλες χρησιμοποιήθηκε ανάμεσα στο έδαφος και στο υψηλής πυκνότητας σκυροδέματος (ΥΠΣ) τοίχωμα της τεχνητής δεξαμενής. Στο Τεχνικό Πανεπιστήμιο του Ilmenau, ερευνητές ανέπτυξαν ένα υλικό τοίχου κατασκευασμένο από πλαστικό ενισχυμένο με ίνες υάλου και ένα ενσωματωμένο θερμομονωτικό στρώμα. Όλες οι προαναφερθείσες μέθοδοι μελετήθηκαν και εισάχθηκαν στην κατασκευή δεξαμενών νερού για την διασφάλιση της υδατοστεγανότητας και την αποφυγή προβλημάτων διαρροής.



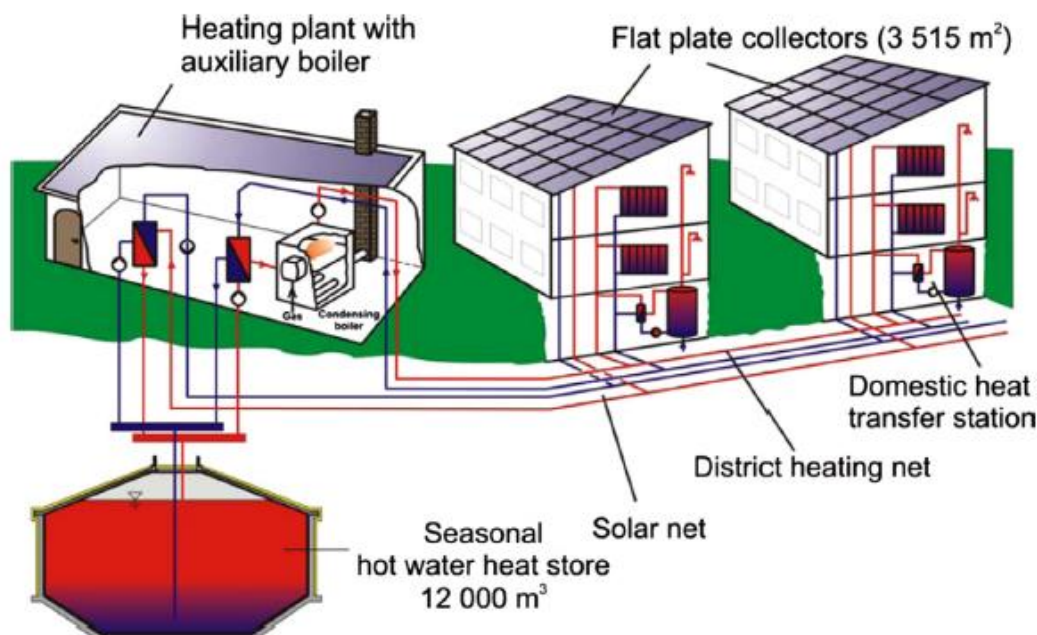
Εικόνα 2.2: 4500 m³ δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού στο Hamburg-Bramfeld

Ένας μεγάλος αριθμός έργων επίδειξης έχουν πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας τον τύπο αποθήκευσης με δεξαμενές νερού. Σε ένα σύστημα εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας ζεστού νερού στο Friedrichshafen της Γερμανίας (Raab et al., 2004), κατασκευάστηκε μια δεξαμενή 12000 m³ με επιπρόσθετη εσωτερική επένδυση ανοξείδωτου χάλυβα για την μείωση των απωλειών θερμότητας και στην οροφή ενός κτιρίου στέγασης οικογενειών κατασκευάστηκαν ενσωματωμένοι συλλέκτες 3513 m² για την παροχή ενέργειας στην δεξαμενή νερού. Αυτή η μονάδα αποθήκευσης συνδέθηκε με ένα σύστημα τηλεθέρμανσης (η Εικόνα 4 παρουσιάζει σχηματικά την διάταξη) και τέθηκε σε λειτουργία το 1996. Από το 1997 ως το 2003 το ηλιακό κλάσμα που επιτεύχθηκε κυμαινόταν μεταξύ 21% και 30%, ποσοστό το οποίο ήταν χαμηλότερο από την προβλεπόμενη τιμή και οι απώλειες θερμότητας από την εποχιακή αποθήκευση θερμότητας ήταν σε εύρος 322 ως 360 MWh/έτος, το οποίο ήταν 40% υψηλότερο από το υπολογιζόμενο. Αναφέρθηκε ότι η υψηλή καθαρή θερμοκρασία επιστροφής ήταν η κύρια αιτία των υψηλών απωλειών θερμότητας και η ανάμειξη της ροής επιστροφής στην ροή τροφοδοσίας θα μπορούσε να είναι μια πιθανή λύση. Ένα άλλο σύστημα στο Αμβούργο με όγκο αποθήκευσης 4500 m³ έχει παρόμοιο σχέδιο, όπως καταγράφεται από τους Schmidt et al. (2004)

Ο Πίνακας 2 παρέχει μια σύνοψη των προηγούμενων και τωρινών έργων που χρησιμοποιούν δεξαμενές νερού ως μονάδες εποχιακής αποθήκευσης. Τα ηλιακά κλάσματα αυτών των

συστημάτων κυμαίνονται από 16% ως 49%, διαφοροποιήσεις που οφείλονται στις διάφορες διαμορφώσεις.

Σε μερικές εγκαταστάσεις εποχιακής αποθήκευσης, οι δεξαμενές νερού παίζουν επίσης τον ρόλο της ενδιάμεσης αποθήκης σε σύνδεση μεταξύ των θερμικών συστημάτων ηλιακών συλλεκτών και άλλων μονάδων αποθήκευσης. [1]



Εικόνα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος τηλεθέρμανσης (Raab et al., 2004)

2.2.1.2. Συστήματα Υδροφόρου Ορίζοντα

Η αποθήκευση σε υδροφόρο ορίζοντα αναφέρεται ως μια «πολλά υποσχόμενη οικονομικά αποδοτική επιλογή» για την εποχιακή αποθήκευση. Η ιδέα της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε υδροφόρους ορίζοντες παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1976 και χρησιμοποιείται πολύ συχνά στην πράξη. Ένας μεγάλος αριθμός πρώιμων θεωρητικών μελετών και πρακτικών εφαρμογών έχουν διεξαχθεί και καταγραφεί σε βιομηχανική κλίμακα.

Στο μοντέλο της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε υδροφόρο ορίζοντα, απαιτείται ένας κατάλληλος υδροφόρος ορίζοντας μέσα στον οποίο πρέπει να διανοιχθούν τουλάχιστον 2 πηγάδια (το ένα ονομάζεται θερμό πηγάδι και το άλλο ψυχρό πηγάδι). Ο γεωλογικός

σηματισμός του υδροφόρου ορίζοντα χρησιμοποιείται ως μέσο αποθήκευσης, ενώ τα υπόγεια ύδατα χρησιμοποιούνται ως υγρός φορέας θερμότητας. Λόγω των χαρακτηριστικών των πορωδών μέσων και της υψηλής θερμοχωρητικότητας του νερού, ο υδροφόρος ορίζοντας είναι ένα ικανό μέσο όπου η θερμότητα μπορεί να αποθηκευτεί και να ανακτηθεί. Κατά την διαδικασία φόρτισης, παράγονται υπόγεια ύδατα από το ψυχρό πηγάδι, τα οποία θερμαίνονται από την ηλιακή ενέργεια και στη συνέχεια εγχέονται στο θερμό πηγάδι. Κατά την φάση αποφόρτισης, η ροή αντιστρέφεται. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.1, οι γεωλογικές συνθήκες του χώρου αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για τις αποθήκες θερμικής ενέργειας σε υδροφόρους ορίζοντες. Συνεπώς, είναι αναγκαίο να τηρούνται οι σχετικές διατάξεις και οδηγίες των τοπικών αρχών ύδρευσης.

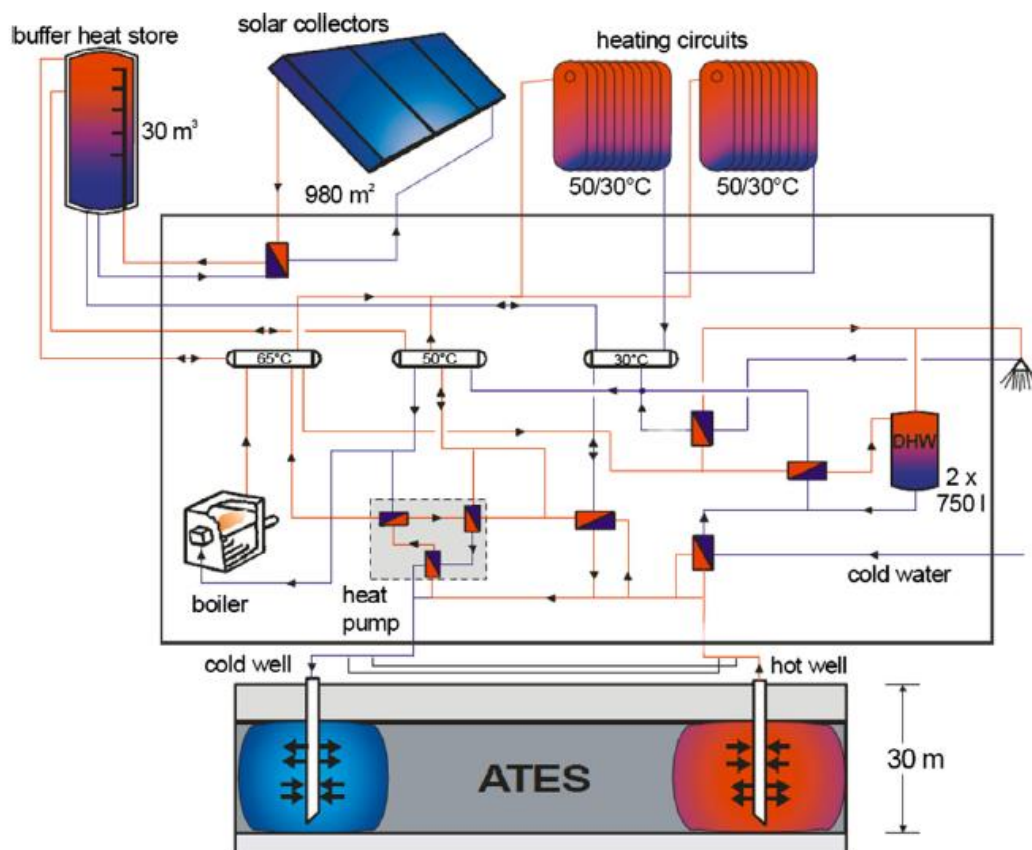
Στον Πίνακα 3 συνοψίζονται οι πιο κρίσιμες υδρο-γεωλογικές παράμετροι των εφαρμογών σε υδροφόρους ορίζοντες στη Γερμανία. Βιομηχανικής κλίμακας εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας σε υδροφόρους ορίζοντες ξεκίνησαν στη Γερμανία την δεκαετία του '90 και κατασκευάστηκε και ερευνήθηκε μια σειρά σχετικών τοποθεσιών. Τα επιτεύγματα ανέδειξαν την δυνατότητα των υδροφόρων οριζόντων τόσο από άποψη εξοικονόμησης ενέργειας όσο και οικονομικής.

Πίνακας 2.3: Υδρογεωλογικές παράμετροι των αποθηκών θερμικής ενέργειας σε υδροφορείς στη Γερμανία (Seibt and Kabus, 2006)

Site	Dresden (field test)	Rostock-brinckmanshohe	Buildings of the German parliament in berlin	Neubrandenburg	
Geological formation	Quaternary	Quaternary	Hettangian	Quaternary	Upper postera
Depth	7–10 m	13–27 m	285–315 m	30–60 m	1234–1274 m
Porosity	~25%	~20%	30%	~30%	25%
Permeability	>2 μm^2	8 μm^2	2.8–4.2 μm^2	>1 μm^2	>1 μm^2
Mineralisation	Freshwater	Freshwater	29 g/L	Freshwater	133 g/L
Store temperature (initial)	8 °C	10 °C	19 °C	10 °C	54 °C

Οι Schmidt and Muller-Steinhagen (2004), παρουσίασαν ένα σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε υδροφόρους ορίζοντες (στο Rockstock, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5) σε συνδυασμό με ηλιακούς συλλέκτες 1000 m² τοποθετημένους στην οροφή του κτιρίου, το οποίο τροφοδοτούσε με οικιακό ζεστό νερό και θέρμανση 108 διαμερίσματα με θερμαινόμενη επιφάνεια 7000 m². Ήταν η πρώτη κεντρική ηλιακή μονάδα θέρμανσης με σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε υδροφόρο ορίζοντα στη Γερμανία, και ο βάρους 30m ρηχός υδροφόρος ορίζοντας λειτουργούσε σε θερμοκρασία μεταξύ 10°C και 50°C. Για την διανομή

θερμότητας χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα θέρμανσης χαμηλής θερμοκρασίας (μέγιστη θερμοκρασία παροχής 45°C) με θερμαντικά σώματα για την επίλυση του προβλήματος της υψηλής θερμοκρασίας επιστροφής, η οποία ήταν δυσμενής για την θερμική ισχύ της αποθήκης θερμότητας. Η αποθήκευση ηλιακής ενέργειας κατά τους καλοκαιρινούς μήνες εξισορροπούσε την έλλειψη ενέργειας κατά την διάρκεια του χειμώνα, και το ηλιακό κλάσμα που υπολογίστηκε για αυτή την μακροπρόθεσμη λειτουργία έφτασε το 62%.



Εικόνα 2.4: Σχήμα συστήματος παροχής θέρμανσης (οικιακό ζεστό νερό) (Schmidt and Muller-Steinhagen, 2004)

Σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε υδροφόρο ορίζοντα βρίσκεται σε λειτουργία στο Neubrandenburg από το 2005. Το σύστημα εγκαταστάθηκε σε βάθος περίπου 1200 m και φορτίστηκε με 14300 MWh και 12800 MWh και εκφορτίστηκε με 6500 MWh και 5900 MWh το 2005/06 και 2007/08 αντίστοιχα. Ο συντελεστής ανάκτησης που επετεύχθη ήταν περίπου 46%.

Έχει καταγραφεί ακόμα νοσοκομείο κοντά στο Antwerp το οποίο χρησιμοποιούσε σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε υδροφόρο ορίζοντα σε συνδυασμό με αναστρέψιμες αντλίες θερμότητας για θέρμανση και ψύξη. Το σύστημα αυτό αποτελούνταν από δύο πηγάδια σε διάστημα 100m και βάθος 65m κάτω από το έδαφος και είχε 3 καταστάσεις λειτουργίας: μια λειτουργία θέρμανσης (χειμώνας), μια λειτουργία ψύξης (καλοκαίρι) και μια λειτουργία αναγέννησης. Μετά από τρία χρόνια λειτουργίας, το 88% της συνολικής ενέργειας ψύξης και το 22% της θέρμανσης αερισμού παρέχονταν από την απευθείας χρήση υπόγειων υδάτων, εξοικονομώντας έτσι συνολικά 1280 τόνους CO₂.

Οι αρνητικές επιπτώσεις στο σύστημα των υπόγειων υδάτων που μπορεί να προκληθούν από ανεπαρκή προκαταρκτική μελέτη κατά τον σχεδιασμό ενός τέτοιου συστήματος σε συνδυασμό με την εξάρτηση από τις υδρο-γεωλογικές συνθήκες, καθιστούν την αποθήκευση σε υδροφόρο ορίζοντα αρκετά περίπλοκη και υπό όρους. Ακόμα, επειδή είναι αδύνατον να εγκατασταθεί θερμομόνωση σε μια αποθήκη υδροφόρου ορίζοντα, το πρόβλημα της απώλειας θερμότητας πρέπει να αντιμετωπιστεί κατάλληλα. Η αναλογία επιφάνειας-όγκου της μονάδας αποθήκευσης πρέπει να είναι χαμηλή ώστε οι απώλειες θερμότητας να διατηρηθούν σε αποδεκτό εύρος τιμών.

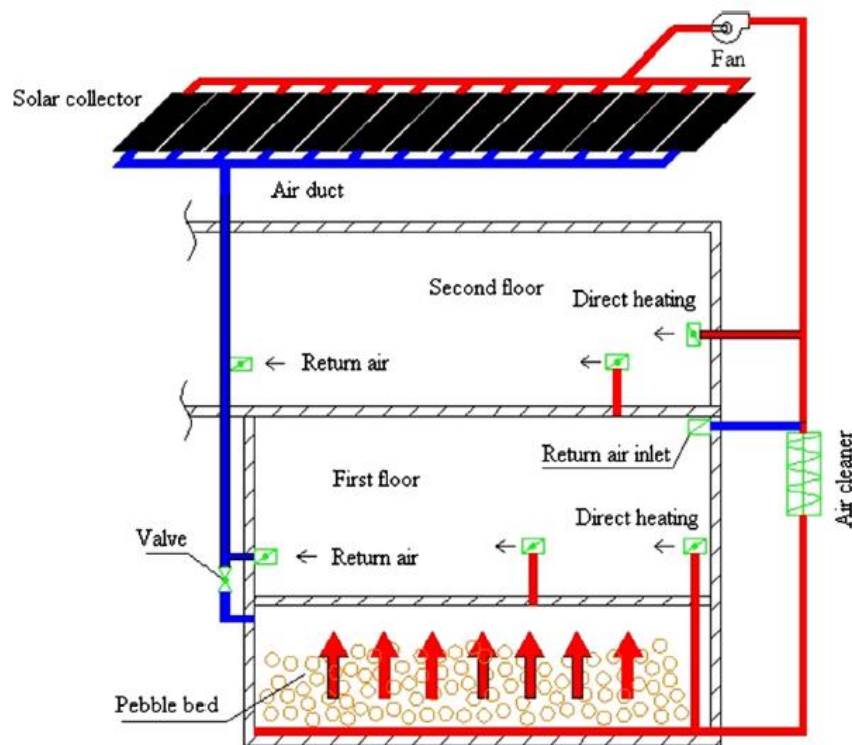
[1]

2.2.2 Βραχώδες υπόβαθρο/υπόστρωμα

Στην αποθήκευση θερμότητας σε βραχώδες υπόστρωμα, ανάμεσα στα βράχια (βότσαλα, χαλίκια ή τούβλα) συνήθως ρέει ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας (νερό ή αέρας) για την ανταλλαγή θερμότητας (η οποία αποκτάται το καλοκαίρι και απελευθερώνεται τον χειμώνα). Σε σύγκριση με τα συστήματα που έχουν ως βάση το νερό, τα συστήματα που έχουν ως βάση τους βράχους μπορούν να αντέξουν πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες. Ένας πλήρης έλεγχος ενός ηλιακού συστήματος θέρμανσης αέρα σχεδιασμένο για την θέρμανση χώρου και την παροχή ζεστού νερού σε ένα διώροφο κτίριο βρίσκεται σε λειτουργία από τον Δεκέμβριο του 2010 στο νησί Qinhuang, στην Κίνα. Ήταν το πρώτο έργο ηλιακής θέρμανσης αέρα μεγάλης κλίμακας το οποίο τέθηκε σε εφαρμογή στην Κίνα. Η περιοχή θέρμανσης περιελάμβανε έναν κοιτώνα 717m² και μια καφετέρια 2602 m², καθένα από τα οποία απαιτούσε διαφορετικής διάρκειας θέρμανση κατά την διάρκεια της εποχής θέρμανσης, 24h και 5h αντίστοιχα. Κατασκευάστηκε ένα βραχώδες υπόστρωμα 300m³ για να αποθηκεύεται η πλεονάζουσα θερμότητα που συλλεγόταν από τους ηλιακούς συλλέκτες επιφάνειας 473.2 m² κατά την διάρκεια της ημέρας και έπαιζε τον ρόλο της πηγής θερμότητας για να καλύπτει το θερμικό φορτίο κατά την διάρκεια της νύχτας. Ως υλικό μεταφοράς θερμότητας επιλέχθηκε ο αέρας, μια οικονομική επιλογή, που μπορούσε να

χρησιμοποιηθεί απευθείας για εσωτερική θέρμανση αφού είχε θερμανθεί. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 6, το αναφερθέν ηλιακό σύστημα θέρμανσης αέρα μπορούσε να παρέχει θερμότητα στην εσωτερική περιοχή και ταυτόχρονα να αποθηκεύει θερμότητα στο βραχώδες υπόστρωμα. Τα πειραματικά αποτελέσματα αποκάλυψαν ότι το ηλιακό κλάσμα πέτυχε ένα μέσο όρο της τάξεως 19.1% και η υψηλότερη τιμή του 33.6% παρατηρήθηκε κατά το δεύτερο μισό του Δεκεμβρίου 2010. Δημιουργήθηκε επίσης ένα TRNSYS μοντέλο για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων σχεδίασης μέσω της αξιολόγησης της επιφάνειας του ηλιακού συλλέκτη, της γωνίας εγκατάστασης, του όγκου του βραχώδους υποστρώματος, τον ρυθμό ροής της μάζας του αέρα και ούτω καθεξής. Αποδείχθηκε ότι το σχεδιασμένο σύστημα μπορούσε να φτάσει ένα μέσο όρο ηλιακού κλάσματος της τάξεως του 53.03% με χρήση βελτιστοποιημένων παραμέτρων.

J. Xu et al. / Solar Energy 103 (2014) 610–638

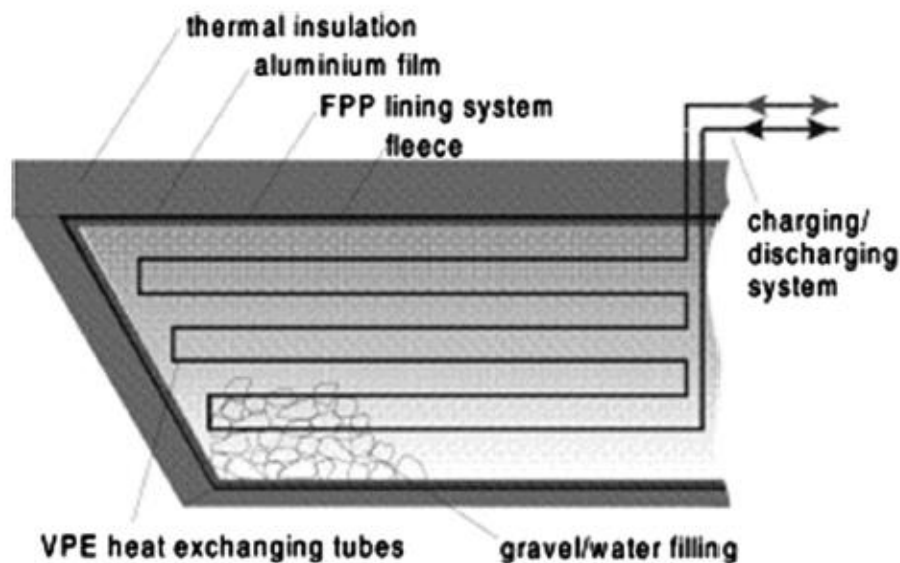


Εικόνα 2.5: Σχηματικό διάγραμμα του ηλιακού συστήματος θέρμανσης αέρα στο νησί Quinguang, στην Κίνα (Zhao et al., 2011)

Ωστόσο, λόγω της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας, τα συστήματα βραχώδους υποστρώματος απαιτούν πολύ μεγαλύτερους όγκους προκειμένου να επιτύχουν την ίδια ποσότητα αποθηκευμένης θερμότητας, περίπου τρεις φορές (Dincer and Rosen, 2002) περισσότερο χώρο συγκριτικά με τα συστήματα αποθήκευσης που έχουν ως βάση το νερό.

Κάποιοι ερευνητές ανέπτυξαν ένα σύστημα αποθήκευσης χαλικιών/νερού (βότσαλων/νερού, άμμου/νερού) συνδυάζοντας την ιδέα της αποθήκευσης σε δεξαμενή νερού και σε βράχια, το οποίο μπορεί να ερμηνευτεί ως ένα συμβιβασμός μεταξύ του υψηλού κόστους κατασκευής των δεξαμενών νερού και του προβλήματος της χαμηλής θερμικής χωρητικότητας των βραχωδών υλικών. Μια μίξη χαλικιών-νερού μπορεί να μειώσει ελαφρώς τον όγκο της αποθηκευτικής μονάδας, παρόλα αυτά μια τέτοια κατασκευή παραμένει περίπου 50% μεγαλύτερη από μια αποθήκη θερμότητας ζεστού νερού για την επίτευξη της ίδιας θερμοχωρητικότητας (Schmidt et al., 2004).

Το πρώτο μεγάλης κλίμακας έργο αποθήκευσης θερμότητας που βασίστηκε στην ιδέα χαλίκια/νερό αναπτύχθηκε με επιτυχία στη Στουτγάρδη το 1985. Ένας λάκκος που ανοίχτηκε στο έδαφος επικαλύφθηκε με υψηλής πυκνότητας φύλλα πολυαιθυλενίου πάχους 2.5mm και γεμίστηκε με βότσαλα όγκου 1050m³. Μια παρόμοια ιδέα εφαρμόστηκε και σε ένα έργο κτιρίου γραφείων στο Chemnitz (8000m³) και καταγράφηκε η μακροπρόθεσμη απόδοση του. Η Εικόνα 2.7 απεικονίζει μια διατομή της μονάδας αποθήκευσης χαλικιών/νερού στο Steinfurt. Η 1500m³ αποθηκευτική μονάδα ήταν σφραγισμένη με μια τροποποιημένη διπλή γραμμή πολυπροπυλενίου και μονωμένη με ένα κοκκοποιημένο γυαλί ανακύκλωσης, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά για εποχιακές αποθήκες. Μπορούσε να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες μέχρι 90°C και μακροπρόθεσμα είχε μεγάλη δυνατότητα μείωσης κόστους. Σύμφωνα με τις τιμές σχεδιασμού, το σύστημα ήταν σε θέση να καλύψει το 34% των ετήσιων αναγκών θέρμανσης χρησιμοποιώντας ηλιακή ενέργεια. [1]



Εικόνα 2.6: Διατομή της αποθηκευτικής μονάδας χαλικιών/νερού στο Steinfurt (Pfeil and Koch, 2000)

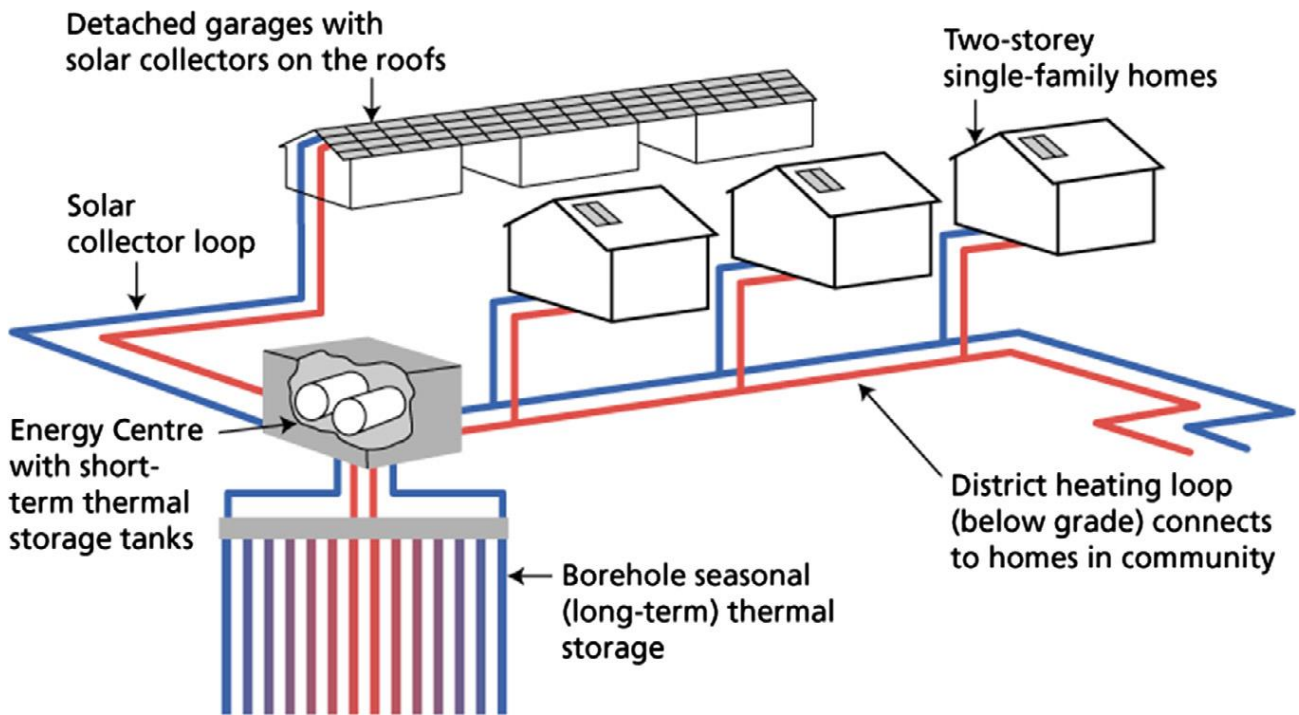
2.2.3. Αποθήκευση στο έδαφος

Η αποθήκευση στο έδαφος αποτελεί άλλη μια εφαρμογή ΥΑΘΕ εκτός από τα συστήματα υδροφόρου ορίζοντα. Σε αυτά τα συστήματα το έδαφος το ίδιο χρησιμοποιείται απευθείας ως αποθηκευτικό υλικό. Η υπόγεια δομή μπορεί να αποθηκεύσει μεγάλη ποσότητα ηλιακής θερμότητας η οποία συλλέγεται το καλοκαίρι για μετέπειτα χρήση τον χειμώνα. Σε αυτή την προσέγγιση αποθήκευσης θερμότητας, το έδαφος σκάβεται και πραγματοποιείται γεώτρηση για την εισαγωγή κάθετων ή οριζόντιων σωλήνων. Οι εισαγόμενοι σωλήνες χρησιμεύουν ως εναλλάκτες θερμότητας, το ελεύθερο έδαφος είναι το μέσο αποθήκευσης (στη Σουηδία, συνηθέστερο είναι ο κρυσταλλικός γρανίτης με μερικές ρωγμές), και το νερό χρησιμοποιείται ως υγρό μεταφοράς. Εμποτισμένος με νερό άργιλος και πέτρες αργίλου είναι κατάλληλα υλικά για τέτοια συστήματα αποθήκευσης ενέργειας επειδή έχουν υψηλές θερμοχωρητικότητες και είναι ικανά να αποτρέψουν τη ροή υπόγειων υδάτων. Ωστόσο, ένα σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας στο έδαφος απαιτεί 3-5 φορές μεγαλύτερο όγκο για να μεταφέρει την ίδια ποσότητα θερμότητας σε σχέση με ένα σύστημα αποθήκευσης ζεστού νερού εξαιτίας της χαμηλότερης πυκνότητας αποθήκευσης ενέργειας. Ο χαμηλός δείκτης ισχύος που προκαλείται από την μεταφορά θερμότητας μέσα στη γεώτρηση είναι ένα ακόμα μειονέκτημα του συστήματος αυτού. Ως εκ τούτου, σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές απαιτείται συνήθως μια επικουρική μονάδα ενδιάμεσης αποθήκευσης νερού.

Για την επίτευξη καλής θερμικής επαφής με το περιβάλλον έδαφος, ο χώρος μεταξύ των σωλήνων και του τοίχους γεώτρησης γεμίζεται με υψηλής θερμικής αγωγιμότητας κονίαμα για την βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας. Σχετικά με το κονίαμα, σε κάποια έργα έχει χρησιμοποιηθεί μπετονίτης ή σύνθετα υλικά υψηλής περιεκτικότητας σε στερεό (9% τσιμέντο Portland, 32% λεπτή σίλικα άμμο και 50% νερό σε ένα Καναδικό έργο, ενώ σε άλλα χρησιμοποιείται σκέτο νερό όπως π.χ. στην Σκανδιναβία).

Βάσει της θεωρίας αποθήκευσης θερμικής ενέργειας στο έδαφος, σχεδιάστηκε στη Γερμανία μια εγκατάσταση που μπορούσε να πραγματοποιήσει εποχιακή αποθήκευση της απόβλητης βιομηχανικής θερμότητας. Η εγκατάσταση αποτελούνταν από 15,000 m³ χώματος με 140 ενσωματωμένους κάθετους εναλλάκτες θερμότητας ύψους 30m και σχεδιάστηκε για να καλύψει ανάγκες θέρμανσης ύψους 170 kWth . Μια οικονομική ανάλυση έδειξε ότι αυτό το σύστημα αποθήκευσης κόστιζε σχεδόν όσο και ένα συμβατικής ενέργειας αλλά μπορούσε να εξοικονομήσει 266MWh ωφέλιμης ενέργειας ετησίως.

Το «Drake Landing Solar Community» στο Okotoks, Alberta του Καναδά ήταν η πρώτη μεγάλη κοινότητα εποχιακής αποθήκευσης ενέργειας στον κόσμο (DLSC, 2012). Αποτελούνταν από σύστημα συλλογής ηλιακής ενέργειας, ενεργειακό κέντρο για βραχυπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας, σύστημα εποχιακής αποθήκευσης ενέργειας στο έδαφος με γεώτρηση, σύστημα θέρμανσης της συνοικίας και ενεργειακά αποδοτικά σπίτια, όπως φαίνεται στην εικόνα 8.



Εικόνα 2.8: Εποχιακή αποθήκευση ηλιακής ενέργειας και σχεδιάγραμμα συνοικίας DLSC 2012

Στο εικονιζόμενο σύστημα, πραγματοποιήθηκαν 144 γεωτρήσεις σε βάθος 35m οι οποίες κάλυπταν μια περιοχή διαμέτρου 35m κάτω από το έδαφος. Μετά από 4 χρόνια λειτουργίας, κατάφερε να καλύπτει το 80% των συνολικών ενεργειακών αναγκών της συνοικίας τον χειμώνα, γεγονός από το οποίο επωφελούνταν 52 κατοικίες. Αυτό το έργο αποτέλεσε παράδειγμα για την δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας στο έδαφος με γεώτρηση και απέδειξε τη δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας σε συνοικίες μεγάλου γεωγραφικού πλάτους.

Το έργο «Anneberg» στην Στοκχόλμη ήταν το πρώτο που χρησιμοποίησε την αποθήκευση με γεωτρήσεις με κρυσταλλικούς βράχους. Το σύστημα αποτελούνταν από ηλιακούς συλλέκτες 2400m² και 100 γεωτρήσεις βάθους 65m οι οποίες γέμιζαν με διπλούς σωλήνες τύπου U.

Σχεδιάστηκε για να καλύψει μερικώς τις ανάγκες θέρμανσης 50 κατοικημένων μονάδων και το μέσο ηλιακό κλάσμα έφτασε το 70% μετά από 3-5 χρόνια λειτουργίας.

Επίσης, το σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας στο έδαφος μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον αγροτικό τομέα για την θέρμανση χώρων. Στο Πανεπιστήμιο Shanghai Jiao Tong στην Κίνα, κατασκευάστηκε το 2011 ένα μοντέρνο θερμοκήπιο έκτασης 2304 m² ενσωματωμένο με ένα κάθετο σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με γεώτρηση. Είναι σχεδιασμένο για να αποθηκεύει την πλεονάζουσα θερμότητα από την ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος κάτω από το θερμοκήπιο χρησιμοποιώντας νερό ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Η υπόγεια αποθηκευμένη θερμότητα μπορεί να εξαχθεί όταν απαιτείται θέρμανση κατά τη διάρκεια της εποχής χαμηλών θερμοκρασιών για να καλύψει τις ανάγκες θέρμανσης των φυτών. Συνδυαστικά με άλλες τεχνολογίες, αυτό το έργο στοχεύει στο να προσφέρει ένα κατάλληλο περιβάλλον ανάπτυξης για τα φυτά και να μειώσει σε μεγάλο βαθμό το κόστος θέρμανσης και ψύξης των εφαρμογών του θερμοκηπίου. Τον Μάιο του 2012 ξεκίνησαν πειράματα και παρακολουθείται η μακροπρόθεσμη απόδοση της εγκατάστασης.

Παρόλο που η ιδέα της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας στο έδαφος με γεώτρηση έχει λάβει σημαντική προσοχή λόγω της προοπτικής να εφαρμοστεί σε μεγάλης κλίμακας έργα έχει αρκετά μειονεκτήματα:

- (1) Υψηλό αρχικό κόστος: η υψηλή δαπάνη εγκατάστασης των εναλλακτών θερμότητας της γεώτρησης και οι πολύπλοκες εργασίες εκσκαφής είναι τα βασικά εμπόδια ανάπτυξης έως ένα βαθμό.
- (2) Πολυπλοκότητα των υπόγειων συνθηκών λόγω της κίνησης του ύδατος και του ατμού: η θερμική αγωγιμότητα, η θερμική ισχύς και η διαχυσιμότητα επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση της μεταφοράς θερμότητας στο έδαφος και την γενικότερη απόδοση του συστήματος αποθήκευσης.
- (3) Μεγάλος χρόνος επίτευξης της τυπικής απόδοσης: η μεταφορά θερμότητας στο έδαφος είναι πολύ πιο αργή σε σχέση με αυτή στο νερό, συνεπώς απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα για την φόρτιση μεγάλων μονάδων αποθήκευσης σε πραγματικές εγκαταστάσεις. [1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας

Η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας μπορεί να προσφέρει υψηλότερες ενεργειακές πυκνότητες σε σχέση με την αποθήκευση αισθητής θερμότητας και θεωρείται μια αποδοτική επιλογή αποθήκευσης ενέργειας. Σε αυτόν τον τύπο αποθήκευσης χρησιμοποιούνται τα υλικά αλλαγής φάσης (PCM).

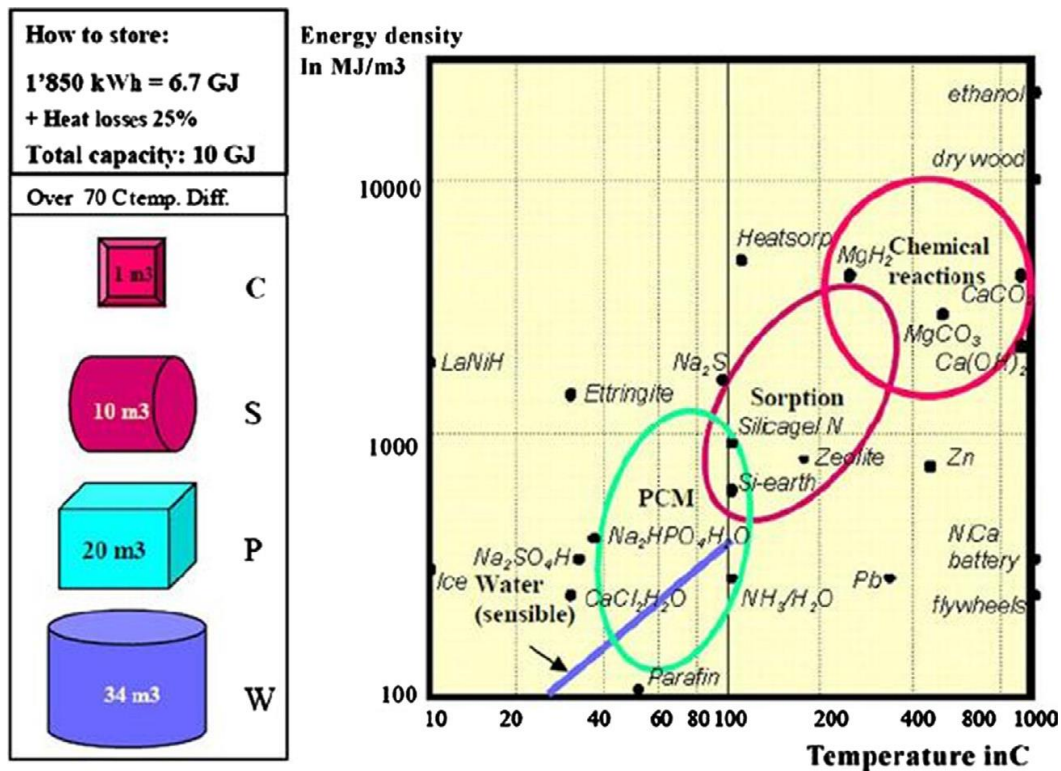
Τα PCM υφίστανται διεργασίες αλλαγής φάσης απορροφώντας και απελευθερώνοντας θερμότητα σε μορφή λανθάνουσας θερμότητας σύντηξης χωρίς αλλαγή της θερμοκρασίας σε κάθε περίοδο. Οι θερμοκρασίες αλλαγής φάσης των PCM έχουν μεγάλο εύρος τιμών, καθιστώντας τα έτσι κατάλληλα για εφαρμογή σε πολλές περιπτώσεις.

Τα PCM και οι εφαρμογές τους στην αποθήκευση ενέργειας θα αναλυθούν λεπτομερώς σε επόμενο κεφάλαιο. [1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Χημική αποθήκευση θερμότητας

Η χημική αποθήκευση έχει τα διακριτικά πλεονεκτήματα της υψηλής αποθήκευση ενέργειας και των χαμηλών απωλειών θερμότητας σε σχέση με άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης και θεωρείται η πιο πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση. Ο όγκος αποθήκευσης για 34m³ ισοδύναμου νερού (70°C αύξηση της θερμοκρασίας) είναι μόνο 1m³ μέσω χημικής αποθήκευσης. Στην εικόνα 4.1 απεικονίζεται μια σύγκριση της ενεργειακής πυκνότητας μεταξύ μεθόδων υψηλής ενεργειακής αποθήκευσης. Ένα άλλο ελκυστικό χαρακτηριστικό της χημικής αποθήκευσης έγκειται στην ικανότητά της να διατηρεί την ενέργεια σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για όσο είναι επιθυμητό χωρίς απώλειες θερμότητας. Με τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα, η χημική αποθήκευση έχει γίνει μια τεχνολογία που έχει ερευνηθεί σε βάθος για τη χρήση της στην εποχιακή αποθήκευση ενέργειας.

Η χημική αποθήκευση μπορεί να διαχωριστεί σε χημική αντίδραση και θερμοχημική αποθήκευση ρόφησης. Η αρχή της χημικής αντίδρασης βασίζεται στην αναστρέψιμη αντίδραση μεταξύ δύο ουσιών, A και B, με ενδόθερμη αποσύνθεση και εξώθερμη σύνθεση. Οι ουσίες A και B μπορούν να αποθηκευτούν χωριστά με σφράγιση της σύνδεσης μεταξύ τους κατά τη διάρκεια της περιόδου αποθήκευσης. Δεδομένου ότι η επίδραση της αισθητής θερμότητας είναι αμελητέα σε σύγκριση με τη θερμότητας αντίδρασης, δεν υπάρχουν ανησυχίες για απώλειες θερμότητας. Η διαδικασία αποθήκευσης ρόφησης περιλαμβάνει την απορρόφηση και προσρόφηση. Στη διαδικασία προσρόφησης, το αέριο δεσμεύεται στην επιφάνεια ενός στερεού χωρίς να δημιουργεί νέο υλικό, ενώ στη διαδικασία απορρόφησης σχηματίζεται μια νέα ένωση. [1]



Εικόνα 4.1: Σύγκριση ενεργειακών πυκνοτήτων μεταξύ μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας

4.1. Μελέτη Υλικών

Το υλικό αντίδρασης είναι ένα από τα βασικότερα στοιχεία ενός ολόκληρου συστήματος αποθήκευσης θερμότητας και πρέπει να πληροί προϋποθέσεις όπως υψηλή αποθηκευτική πυκνότητα, υψηλή θερμική αγωγιμότητα, κατάλληλη διαπερατότητα, χαμηλή θερμοκρασία αναγέννησης για την επίτευξη υψηλών ηλιακών κλασμάτων, κατάλληλη λειτουργική πίεση, μακροπρόθεσμη σταθερότητα, χαμηλό κόστος και περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Άφθονα υλικά, όπως χλωριούχα μέταλλα, υδρίδια μετάλλων και οξειδία μετάλλων, θεωρούνται πολλά υποσχόμενα υλικά.

Στον πίνακα 4.2 παρατίθενται υλικά με προοπτική αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο δείκτης «προοπτική υλοποίησης» είναι ένα συνολικό μέτρο που λαμβάνει υπόψη τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

1. Πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας (θερμοδυναμική).
2. Θερμοκρασία αντίδρασης για τη διαδικασία αποθήκευσης.
3. Διαβρωτικότητα κατά την αποθήκευση ή / και την αντίδραση.

4. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τοξικότητα του υλικού.
5. Κόστος του υλικού (αφθονία, ικανότητα εξόρυξης).
6. Αριθμός συστατικών υλικού κατά τη διάρκεια της αντίδρασης σύνθεσης.
7. Πίεση του αντιδραστήρα.

Βάσει των παραπάνω κριτηρίων, τα υλικά $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, SiO_2 , $FeCO_3$, $Fe(OH)_2$ και $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, θεωρούνται τα 5 καλύτερα υποψήφια υλικά. [1]

Πίνακας 4.1.1 : Υλικά με δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας

	Material and reaction			Energy storage density (kW h/m ³)	Reaction enthalpy (kJ/mol)	Reaction entropy (J/(mol K))	Turnover temperature (°C)	Realisation potential	Remark	Reference		
	C	A	B									
Pure Material	Solid/Gas	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	$MgSO_4$	H_2O	663 (Bertsch et al. 2009); 778	411	1041	122	9.5	Hydrate slowly; Low power density	(Visscher et al., 2004)	
		$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	$MgSO_4 \cdot 1H_2O$	H_2O	639	336	887	105	1.1		(Visscher et al., 2004)	
		$MgSO_4 \cdot H_2O$	$MgSO_4$	H_2O	361	75	154	216	2.7		(Visscher et al., 2004)	
		$MgCl_2 \cdot H_2O$	$MgCl_2 \cdot H_2O$	H_2O	689	323	–	178	0.22	Corrosive	(Visscher et al., 2004)	
		$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	$CaCl_2 \cdot 1H_2O$	H_2O	167	47	104	174	1.1		(Visscher et al., 2004)	
		$BaCl_2 \cdot 8NH_3$	$BaCl_2$	NH_3	–	382.5	232.4	70	–		(Stitou et al., 2012)	
		$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$CaSO_4$	H_2O	389	105	290	89	4.3		(Visscher et al., 2004)	
		$Na_2S \cdot 5H_2O$	$Na_2S \cdot 2H_2O$	H_2O	Heating: 780; Cooling: 510	189	–	–	–	–	Corrosive; Operate under high vacuum	(Boer et al., 2004; N'Tsoukpoe et al., 2009)
	Gas/Liquid	$Na_2S \cdot 2H_2O$	$Na_2S \cdot 0.5H_2O$	H_2O	–	111	–	–	–	–	(Boer et al., 2004)	
		$SrBr_2 \cdot 6H_2O$	$SrBr_2 \cdot H_2O$	H_2O	Heating: 250–400; Cooling: 150–240	67.4	–	–	70–80	–	(Lahmidi et al., 2006)	
		$LiCl/H_2O$	–	–	Cooling: 253 (Climate well); 4387 ^a (44.3 wt.%)	–	–	–	65.6 (44.3 wt.%)	–	Expensive	(Liu et al., 2011; N'Tsoukpoe et al., 2009)
		$LiBr/H_2O$	–	–	–	–	–	–	72 (57.8 wt.%)	–		(N'Tsoukpoe et al., 2009; Liu et al., 2011)
		$NaOH/H_2O$	–	–	–	–	–	–	50 (34.8 wt.%)	–	Corrosive; Crystallize at high concentration	(Weber and Dorer, 2008)
		$CaCl_2/H_2O$	–	–	–	914 ^a (39.8 wt.%)	–	–	44.8 (39.8 wt.%)	–	Operate at high pressure	(Liu et al., 2011)
		NH_3/H_2O	–	–	–	1317 ^a (10 wt.%)	–	–	186.6 (10 wt.%)	–		(Liu et al., 2011)
Chemical reaction	$Ca(OH)_2$	CaO	H_2O	872 (Visscher et al., 2004)	104.4	135 (Visscher et al., 2004)	505	–	–		(Schaube et al., 2011)	
	MnO_2	$0.5Mn_2O_3$	$0.25O_2$	–	42	–	530	–	–		(Schaube et al., 2011)	
	$Mg(OH)_2$	MgO	H_2O	889 (Visscher et al., 2004)	81	146 (Visscher et al., 2004)	350; 266 (Visscher et al., 2004)	–	–		(Ishitobi et al., 2013)	
	$ZnCO_3$	ZnO	CO_2	694	71	175	133	1.6		(Visscher et al., 2004)		
	SiO_2	Si	O_2	10,528	859	198	150 (+ hydrofluoric acid)	9			(Visscher et al., 2004)	
	$Fe(OH)_2$	FeO	H_2O	611	58	137	150	4.8			(Visscher et al., 2004)	
Mixture	$FeCO_3$	FeO	CO_2	722	81	178.3	180	6.3			(Visscher et al., 2004)	
	NH_3	$0.5N_2$	$1.5H_2$	67 kJ/mol	–	–	400–500	–			(Luo, 2010)	
	20 wt% $MgSO_4$ and 80 wt% $MgCl_2$	1590 ^{a, b}	–	–	130	–	–	–	(Posern and Kaps, 2010)			
6.8 wt% $LiCl$ and 93.2 wt% $Mg(OH)_2$	–	–	–	–	280	–	–	–	(Ryu et al., 2008)			

^a kJ/kg.

^b Measured by calorimetry at 30 °C/85% RH.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Σύγκριση διαθέσιμων συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας

Από τη σκοπιά του μηχανισμού αποθήκευσης, η αισθητή και η λανθάνουσα θερμότητα είναι άμεσοι τρόποι αποθήκευσης θερμότητας, ενώ η χημική αποθήκευση είναι έμμεσος, εκμεταλλευόμενος τις ενδόθερμες και εξώθερμες διαδικασίες αντίδρασης μεταξύ ενός ζεύγους ουσιών.

Στον πίνακα 5.1 παρατίθεται μια σύνοψη των 3 συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, στον οποίο συμπεριλαμβάνεται και σύγκριση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων του κάθε συστήματος.

Η αισθητή αποθήκευση θερμότητας είναι μια καλά αναπτυγμένη εναλλακτική για μακροπρόθεσμη/ εποχιακή αποθήκευση. Η χρήση νερού, πετρωμάτων και εδάφους ως μέσω αισθητής αποθήκευσης θερμότητας έχει ερευνηθεί σε βάθος και έχει αποδειχτεί ότι είναι κατάλληλη για εφαρμογή σε μεγάλης κλίμακας έργα θέρμανσης συνοικιών. Η αποθήκευση με βάση το νερό είναι κατάλληλη για εφαρμογές σε κατοικίες, παρόλο που έχει οριακή θερμοκρασία λειτουργίας. Η δεξαμενή νερού ένας εύκολος και αποδεκτός τρόπος αποθήκευσης θερμότητας. Η διαστρωμάτωση σε μια αποθήκη ζεστού νερού είναι απαραίτητη ώστε τα στρώματα με διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας να μην διαταράσσουν το ένα το άλλο. Τα τελευταία χρόνια, η υπόγεια αποθήκευση θερμότητας (συμπεριλαμβανομένων του υδροφόρου ορίζοντα και του εδάφους/χώματος) έχει γίνει μια πολύ δημοφιλής επιλογή ανάμεσα στις εναλλακτικές αισθητής αποθήκευσης. Είναι σχετικά φθηνά συστήματα σε σύγκριση με την αποθήκευση σε δεξαμενή νερού, αλλά πρέπει να διεξαχθούν λεπτομερείς γεωλογικές έρευνες κατά τη διάρκεια της φάσης του προκαταρκτικού σχεδιασμού για να εξεταστεί αν το έδαφος είναι κατάλληλο. Η ακριβής προσομοίωση των υπόγειων συνθηκών που επηρεάζουν την μεταφορά θερμότητας και μαζών πρέπει να βρεθεί στο επίκεντρο της έρευνας σε μελλοντικές δουλειές ώστε να βελτιωθεί η αποδοτικότητα της αποθήκευσης. Επιπλέον, τα συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας τώρα είναι συχνά ενσωματωμένα σε τεχνολογίες αντλιών θερμότητας σε πραγματικά έργα προκειμένου να αναβαθμιστεί το επίπεδο θερμοκρασίας λόγω της μακρόχρονης αυτοεκφόρτισης τους, επομένως πρέπει να γίνουν προσπάθειες για να την εξάλειψη του προβλήματος απώλειας θερμότητας για την περαιτέρω μείωση του κόστους επένδυσης. Επειδή η ποσότητα της αποθηκευμένης θερμότητας εξαρτάται από την αύξηση της θερμοκρασίας και την ειδική θερμότητα του αποθηκευτικού υλικού, φαίνεται ότι για την αποθήκευση περισσότερης

θερμότητας με την ίδια ποσότητα υλικού, η αποθηκευτική μονάδα πρέπει να αποκτήσει υψηλότερη θερμοκρασία. Ωστόσο, ως συνέπεια, σε υψηλότερα επίπεδα θερμοκρασιών υπάρχει υψηλότερο ρίσκο απωλειών θερμότητας. Είναι απαραίτητο να διασφαλίσουμε την βέλτιστη θερμοκρασία αποθήκευσης ενός συστήματος, συγκρίνοντας και ισορροπώντας τις απαιτήσεις φορτίου και αποθηκευμένης θερμότητας.

Η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας με χρήση υλικών PCM έχει υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με την αποθήκευση αισθητής θερμότητας και προσφέρει τη δυνατότητα παροχής θερμικής ενέργειας σε σταθερή θερμοκρασία κατά τη διάρκεια των διαδικασιών αλλαγής φάσης. Επί του παρόντος, έργα που χρησιμοποιούν αποθήκες PCM χρησιμοποιούνται κυρίως σε αγροτικές περιοχές ή για σκοπούς βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης. Εξαιτίας των περίπλοκων στρατηγικών ελέγχου και της αβεβαιότητας της μακροπρόθεσμης απόδοσης των PCM, έχουν καταγραφεί σπανίως τέτοιου είδους κατασκευαστικά έργα. Η βελτίωση της εποχιακής αποθήκευσης μέσω λανθάνουσας θερμότητας ήταν πολύ περιορισμένη σε αποθήκες νερού στην πλειονότητα των τρεχουσών εφαρμογών. Η αναζήτηση νέων PCM και η απόκτηση βαθύτερης γνώσης όσον αφορά στους φυσικοχημικούς μηχανισμούς τους, είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη επιπλέον τεχνικών. Κρίσιμα σημεία, όπως η λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης, η μακροπρόθεσμη θερμική συμπεριφορά, η ευφλεκτότητα, η θερμοκρασία τήξης και η συμβατότητα με κατασκευαστικά υλικά, πρέπει να ληφθούν υπόψη. Προβλήματα διάβρωσης που προκαλούνται από την κρυστάλλωση και τα PCM νερού, και επηρεάζουν την τεχνική διάρκεια ζωής των συστημάτων, πρέπει να λυθούν. Πειράματα με ρεαλιστικές οριακές συνθήκες είναι αναπόφευκτα πριν από την πρακτική εφαρμογή μεγάλης κλίμακας έργων. Επιπρόσθετα, ενεργά συστήματα ενισχυμένα με παθητικές μεθόδους αποθήκευσης αποτελούν την «τάση» στην ανάπτυξη συστημάτων εποχιακής αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας.

Η χημική αποθήκευση χαρακτηρίζεται από υψηλή αποθηκευτική ικανότητα με αμελητέες απώλειες θερμότητας κατά τη διάρκεια της περιόδου αποθήκευσης. Οι τρέχουσες μελέτες αφορούν κυρίως την επιλογή και την τροποποίηση των ζευγαριών εργασίας σύμφωνα με τις θερμοδυναμικές απαιτήσεις και τις συνθήκες λειτουργίας. Η εφαρμοσιμότητα της αποθήκευσης θερμότητας έχει αποδειχθεί μέσω μερικών χημικών αντλιών θερμότητας και συστημάτων βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης, ωστόσο δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμη μεγάλη κλίμακας έργο εποχιακής αποθήκευσης. Η εποχιακή αποθήκευση απαιτεί μεγάλη ποσότητα αποθηκευτικών υλικών και σταθερή και συνεχή παραγωγή θερμότητας κατά την εκφόρτιση. Το όλο σύστημα χημικής αποθήκευσης μπορεί να είναι πιο συμπαγές από άλλες εναλλακτικές λύσεις, αλλά πρέπει να επιλυθούν τα προβλήματα της επακόλουθης μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Η εύρεση του σωστού μεγέθους σωματιδίων της ροφητικής ουσίας και η βελτιστοποίηση της δομής της

αντίδρασης ώστε να εξασφαλίζεται συνεχής ρυθμός ροής, το οποίο οδηγεί σε σταθερή παραγωγή θερμότητας, χωρίς ταυτόχρονα να θυσιάζουμε τη συμπίεση του συστήματος, αποτελούν κρίσιμα σημεία έρευνας. Επιπλέον, ευγενείς κύκλοι αντίδρασης ,λαμβάνοντας υπόψη την ανάκτηση θερμότητας, μπορούν να εισαχθούν στον σχεδιασμό για την μείωση της θερμοκρασίας φόρτισης και για την επίτευξη υψηλότερων ηλιακών κλασμάτων. Ένα άλλο πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι η απώλεια αισθητής θερμότητας κατά την διάρκεια της φάσης εκφόρτισης , η οποία είναι αποτέλεσμα της αύξησης θερμοκρασίας της ροφητικής ουσίας σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στο σημείο αντίδρασης εκφόρτισης. Τα υλικά , ο εξοπλισμός αποθήκευσης και οι στρατηγικές ελέγχου όλου του συστήματος είναι επίσης σημαντικά θέματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Τόσο για την λανθάνουσα όσο και για τη χημική αποθήκευση θερμότητας, οι διαδικασίες πρέπει να είναι αναστρέψιμες και να διατηρούν συνεχή απόδοση χωρίς σοβαρή υποβάθμιση μετά από μεγάλο αριθμό κύκλων. Επειδή το κόστος των υλικών για την εποχιακή αποθήκευση είναι πολύ πιο σημαντικός παράγοντας σε αντίθεση με τη βραχυπρόθεσμη αποθήκευση, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί περαιτέρω έρευνα για την εύρεση οικονομικών υλικών.

Η εποχιακή αποθήκευση θερμότητας αποτελεί μια εξαιρετικά πολλά υποσχόμενη τεχνολογία εξοικονόμησης ενέργειας, ωστόσο προς το παρόν το κόστος είναι πολύ υψηλό ακόμα και για χρήση της τεχνολογίας αισθητής θερμότητας . Ανάμεσα σε όλες τις διαθέσιμες τεχνολογίες, η χημική αποθήκευση θερμότητας θεωρείται η ιδέα με τις μεγαλύτερες προοπτικές μακροπρόθεσμα, λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας. Μόλις ξεπεραστούν τα τεχνικά εμπόδια και μειωθούν τα κόστη επένδυσης, θα ανοίξει ο δρόμος για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές. Πριν φτάσουμε όμως σε αυτό το επίπεδο, μια μικρή μονοκατοικία θα αποτελούσε καλή επιλογή για τη διερεύνηση της απόδοσης των συστημάτων χημικής αποθήκευσης. Από την άλλη πλευρά, βραχυπρόθεσμα, τα συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, όπως οι δεξαμενές νερού και η αποθήκευση στο έδαφος, θα κυριαρχήσουν στον τομέα της τηλεθέρμανσης εξαιτίας της αξιοπιστίας τους και της αποδοτικότητας κόστους. [1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Υλικά Αλλαγής Φάσης

Τα υλικά αλλαγής φάσης (Phase Change Materials-PCM) είναι υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Η μεταφορά θερμικής ενέργειας συμβαίνει όταν ένα υλικό μεταβάλλεται από στερεό σε υγρό ή από υγρό σε στερεό. Αυτό ονομάζεται αλλαγή κατάστασης ή " Φάση ". Αρχικά, αυτά τα στερεά-υγρά PCM συμπεριφέρονται σαν συμβατικά υλικά αποθήκευσης και η θερμοκρασία τους αυξάνεται καθώς απορροφούν θερμότητα. Σε αντίθεση με τα συμβατικά υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας , τα PCM απορροφούν και απελευθερώνουν θερμότητα σε σχεδόν σταθερή τιμή θερμοκρασίας. Αποθηκεύουν 5-14 φορές περισσότερη θερμότητα ανά μονάδα όγκου σε σύγκριση με υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας όπως το νερό, η τοιχοποιία ή τα βράχια. Ένας μεγάλος αριθμός PCM είναι γνωστό ότι τήκονται με θερμότητα σύντηξης σε οποιοδήποτε απαιτούμενο εύρος. Ωστόσο, για την χρήση τους ως υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, αυτά τα υλικά πρέπει να παρουσιάζουν συγκεκριμένες επιθυμητές θερμοδυναμικές, κινητικές και χημικές ιδιότητες. Επιπλέον, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι οικονομικές εκτιμήσεις και η εύκολη διαθεσιμότητα των υλικών αυτών.

Για να χρησιμοποιηθούν τα PCM στο σχεδιασμό συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας πρέπει να πληρούν τις επιθυμητές θερμοφυσικές , κινητικές και χημικές ιδιότητες οι οποίες είναι οι εξής:

- Θερμικές Ιδιότητες
 - i. Κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης
 - ii. Υψηλή λανθάνουσα θερμότητα μετάβασης
 - iii. Καλή μεταφορά θερμότητας

Η επιλογή ενός PCM για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, απαιτεί η θερμοκρασία λειτουργίας θέρμανσης ή ψύξης να ταιριάζει με τη μεταβατική θερμοκρασία του PCM. Η λανθάνουσα θερμότητα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη , ιδίως σε ογκομετρική βάση, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το φυσικό μέγεθος της αποθήκης θερμότητας. Η υψηλή θερμική αγωγιμότητα θα βοηθούσε τη φόρτιση και την εκφόρτωση της αποθήκευσης ενέργειας.

- Φυσικές Ιδιότητες
 - i. Ευνοϊκή φάση ισορροπίας
 - ii. Υψηλή πυκνότητα
 - iii. Μικρή μεταβολή όγκου

iv. Χαμηλή πίεση ατμών

Η σταθερότητα της φάσης κατά την κατάψυξη βοηθάει στη ρύθμιση της θερμότητας αποθήκευσης και η υψηλή πυκνότητα είναι επιθυμητή για να επιτρέπει τη χρήση μικρότερου μεγέθους δοχείου αποθήκευσης. Για τη μείωση του προβλήματος συγκράτησης απαιτούνται μικρές μεταβολές όγκου κατά την αλλαγή φάσης και χαμηλή πίεσης ατμών στις θερμοκρασίες λειτουργίας.

- Κινητικές Ιδιότητες

- i. Απουσία υπερψύξης
- ii. Επαρκής ρυθμός κρυστάλλωσης

Η υπερψύξη έχει αποτελέσει μια πρόβλημα στην ανάπτυξη των PCM, ιδιαίτερα όσον αφορά τα ένυδρα άλατα. Η υπερψύξη τους πάνω από κάποιους βαθμούς θα επηρεάσει τη σωστή εξαγωγή θερμότητας από την αποθήκη ενώ η υπερψύξη τους στους 5-10 °C μπορεί να το αποτρέψει εξολοκλήρου.

- Χημικές Ιδιότητες

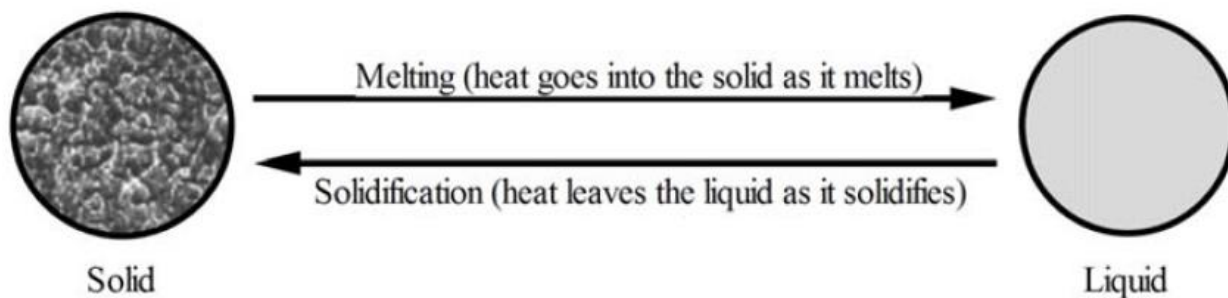
- i. Μακροπρόθεσμη χημική σταθερότητα
- ii. Συμβατότητα με τα υλικά κατασκευής
- iii. Απουσία τοξικότητας
- iv. Αποφυγή κινδύνου πυρκαγιάς

Τα PCM μπορεί να υποστούν υποβάθμιση λόγω απώλειας νερού ενυδάτωσης, χημικής αποσύνθεσης ή ασυμβατότητας με τα υλικά κατασκευής. Τα PCM πρέπει να είναι μη τοξικά, μη εύφλεκτα και μη εκρηκτικά για λόγους ασφάλειας.

- Οικονομικές παράμετροι

- i. Αφθονία
- ii. Διαθεσιμότητα
- iii. Οικονομικά αποδοτικό

Σημαντικό ρόλο παίζουν επίσης το χαμηλό κόστος και η μεγάλης κλίμακας διαθεσιμότητα των PCM. [2]

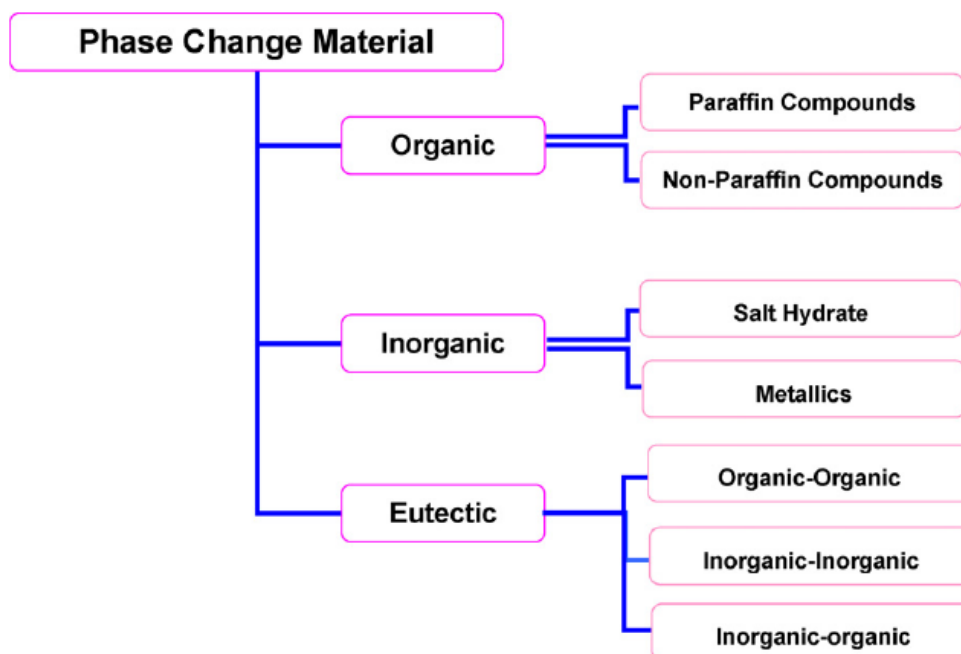


Εικόνα 6: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας αλλαγής φάσης [3]

6.1 Κατηγοριοποίηση Υλικών Αλλαγής Φάσης

Ένας μεγάλος αριθμός υλικών αλλαγής φάσης (οργανικά, ανόργανα και ευτηκτικά) είναι διαθέσιμα σε όλο το απαιτούμενο εύρος θερμοκρασιών. Η ταξινόμηση των PCM απεικονίζεται σχηματικά στην εικόνα 6.1:

A. Sharma et al./Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 318–345



Εικόνα 6.1: Κατηγοριοποίηση Υλικών Αλλαγής Φάσης [2]

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός οργανικών και ανόργανων χημικών ουσιών οι οποίες μπορούν να χαρακτηριστούν ως PCM από την σκοπιά της θερμοκρασίας τήξης και της λανθάνουσας θερμότητας σύντηξης. Ωστόσο, εκτός από το σημείο τήξης στην περιοχή λειτουργίας, η πλειοψηφία των υλικών αλλαγής φάσης δεν πληρούν τα απαιτούμενα κριτήρια για ένα ικανοποιητικό σύστημα αποθήκευσης όπως περιεγράφηκε νωρίτερα. Δεδομένου ότι ένα και μόνο υλικό δε μπορεί να συγκεντρώνει όλες τις απαιτούμενες ιδιότητες για ένα ιδανικό μέσο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, πρέπει να γίνει χρήση των διαθέσιμων υλικών και προσπάθεια να αντισταθμιστούν οι κακές φυσικές ιδιότητες μέσω του σχεδιασμού ενός επαρκούς συστήματος. Για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεταλλικά πτερύγια για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των PCM, η υπερψύξη μπορεί να κατασταλεί με την εισαγωγή ενός παράγοντα πυρήνωσης ή ενός ψυχρού δακτύλου "στο υλικό αποθήκευσης και η ασυνεπής τήξη μπορεί να ανασταλεί με χρήση με τη χρήση κατάλληλου πάχους.

Γενικά οι ανόργανες ενώσεις έχουν σχεδόν διπλάσια ογκομετρική χωρητικότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (250-400 kg / dm³) συγκριτικά με τις οργανικές ενώσεις (128-200 kg / dm³). Παρακάτω θα συζητήσουμε για την πολύ διαφορετική θερμική και χημική τους συμπεριφορά και τις ιδιότητες της κάθε υποομάδας που επηρεάζουν τον σχεδιασμό συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμικής ενέργειας με χρήση PCM. [2]

6.2 Οργανικά Υλικά Αλλαγής Φάσης

Τα οργανικά υλικά περιγράφονται περαιτέρω ως παραφίνες και μη-παραφίνες. Περιλαμβάνουν συμβατά μέσα τήξης, τήκονται και καταψύχονται επαναλαμβανόμενα χωρίς διαχωρισμό φάσης και επακόλουθη αποδόμηση της λανθάνουσας θερμότητας σύντηξης, Η ικανότητα τους για αυτοπυρήνωση σημαίνει ότι κρυσταλλώνουν με ελάχιστη ή καθόλου υπέρψυξη και συνήθως μη διαβρωτική. [2]

6.2.1 Παραφίνες

Το κερί παραφίνης αποτελείται από ένα μείγμα κυρίως νικελίων ευθείας αλυσίδας CH₃- (CH₂) - CH₃. Η κρυστάλλωση της αλυσίδας (CH₃) - απελευθερώνει μεγάλη ποσότητα λανθάνουσας θερμότητας. Τόσο το σημείο τήξης όσο και η λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης αυξάνονται με το μήκος της αλυσίδας. Οι παραφίνες πληρούν τις προϋποθέσεις ως υλικά αποθήκευσης θερμότητας σύντηξης λόγω της διαθεσιμότητάς τους σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Ωστόσο,

λόγω κόστους μόνο οι παραφίνες τεχνικής ποιότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως PCM σε συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Οι παραφίνες είναι ασφαλείς, αξιόπιστες, προβλέψιμες, λιγότερο δαπανηρές και μη διαβρωτικές. Είναι χημικώς αδρανείς και σταθερές κάτω από 500 ° C, εμφανίζουν ελάχιστες μεταβολές όγκου κατά την τήξη και χαμηλή πίεση ατμών όταν βρίσκονται στην υγρή φάση. Λόγω αυτών των ιδιοτήτων των παραφινών, αυτές που χρησιμοποιούνται στα συστήματα αποθήκευσης έχουν πολύ μεγάλο κύκλο ψύξης-τήξης. Στον Πίνακα Πίνακας 6.1.1 αναφέρονται οι θερμικές ιδιότητες ορισμένων παραφινών τεχνικής ποιότητας, οι οποίες είναι κυρίως μείγματα παραφίνης και όχι εντελώς εξευγενισμένο πετρέλαιο.

Πίνακας 6.2.1 : Φυσικές ιδιότητες ορισμένων παραφινών

Physical properties of some paraffin's

Paraffin ^a	Freezing point/ range (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Group ^b
6106	42–44	189	I
P116 ^c	45–48	210	I
5838	48–50	189	I
6035	58–60	189	I
6403	62–64	189	I
6499	66–68	189	I

^a Manufacturer of technical Grade Paraffin's 6106, 5838, 6035, 6403 and 6499: Ter Hell Paraffin Hamburg, FRG.

^b Group I, most promising; group II, promising; group III, less promising; — insufficient data.

^c Manufacturer of Paraffin's P116: Sun Company, USA.

Το σημείο τήξης του αλκανίου αυξάνει με τον αυξανόμενο αριθμό ατόμων άνθρακα. Εκτός από αρκετά ευνοϊκά χαρακτηριστικά των παραφινών, όπως η ομοιογενής τήξη και καλές ιδιότητες πυρήνωσης παρουσιάζουν και κάποιες ανεπιθύμητες ιδιότητες όπως: (i) χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, (ii) ασυμβατότητα με το πλαστικό δοχείο και (iii) μέτρια ευφλεκτότητα. Όλες αυτές οι ανεπιθύμητες συνέπειες μπορούν να εξαλειφθούν μερικώς τροποποιώντας το κερί και την αποθήκευση μονάδα. Επιλεγμένες παραφίνες εμφανίζονται στον Πίνακα 6.1.1.2 μαζί με το σημείο τήξης τους, την λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης και τις ομάδες. Τα PCMs χαρακτηρίζονται ως: (i) ομάδα I, πολλά υποσχόμενη (ii) ομάδα II, υποσχόμενη; και (iii) ομάδα III, λιγότερο υποσχόμενη. [2]

Πίνακας 6.2.1.2 : Παραφίνες : Σημείο τήξης και λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης [2]

No. of carbon atoms	Melting point (°C)	Latent heat of fusion (kJ/kg)	Group ^a
14	5.5	228	I
15	10	205	II
16	16.7	237.1	I
17	21.7	213	II
18	28.0	244	I
19	32.0	222	II
20	36.7	246	I
21	40.2	200	II
22	44.0	249	II
23	47.5	232	II
24	50.6	255	II
25	49.4	238	II
26	56.3	256	II
27	58.8	236	II
28	61.6	253	II
29	63.4	240	II
30	65.4	251	II
31	68.0	242	II
32	69.5	170	II
33	73.9	268	II
34	75.9	269	II

^a Group I, most promising; group II, promising; group III, less promising; — insufficient data.

6.2.2 Μη παραφίνες

Οι οργανικές μη παραφίνες είναι οι πιο πολυάριθμες των υλικών αλλαγής φάσης με την μεγαλύτερη ποικιλία ιδιοτήτων. Καθένα από αυτά τα υλικά έχει τις δικές τους ιδιότητες σε αντίθεση με τις παραφίνες που έχουν πολύ παρόμοιες ιδιότητες μεταξύ τους. Αποτελούν την μεγαλύτερη κατηγορία υποψήφιων υλικών για αποθήκευση αλλαγής φάσης. Μέσα από εκτεταμένη έρευνα των οργανικών υλικών κρίθηκαν ως κατάλληλα για αποθήκευση ενέργειας ένας αριθμός εστέρων, λιπαρών οξέων, αλκοόλης και γλυκόλης. Αυτά τα οργανικά υλικά χωρίζονται σε περαιτέρω υποομάδες ως λιπαρά οξέα και μη οργανικές παραφίνες. Τα υλικά αυτά είναι εύφλεκτα και δεν πρέπει να εκτίθενται σε υπερβολικά υψηλή θερμοκρασία, φλόγες ή οξειδωτικούς παράγοντες. Ορισμένες μη παραφίνες παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2.2.1.

Μερικές από τις ιδιότητες αυτών των οργανικών υλικών είναι οι ακόλουθες : (i) υψηλή θερμότητα σύντηξης, (ii) ευφλεκτότητα, (iii) χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, (iv) χαμηλά σημεία ανάφλεξης, (v) μεταβαλλόμενο επίπεδο τοξικότητας και (vi) αστάθεια σε υψηλές θερμοκρασίες.

Τα λιπαρά οξέα έχουν υψηλές τιμές θερμοκρασίας σύντηξης συγκριτικά με εκείνες των παραφινών. Τα λιπαρά οξέα παρουσιάζουν επίσης αναπαράξιμη συμπεριφορά τήξης και κατάψυξης και καταψύχονται χωρίς υπερψύξη.

Ο γενικός τύπος που περιγράφει όλα τα λιπαρά οξέα είναι ο $\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_n \text{COOH}$ και συνεπώς, χαρακτηρίζονται ως καλά PCM. Το μεγάλο τους μειονέκτημα ωστόσο είναι το κόστος τους, το οποίο είναι 2-2,5 φορές μεγαλύτερο από εκείνο των παραφινών τεχνικής ποιότητας. Επίσης, είναι ελαφρώς διαβρωτικά. Στον πίνακα 6.1.2.2 παρατίθενται ορισμένα λιπαρά οξέα που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για εφαρμογές αποθήκευσης λανθάνουσας θερμικής ενέργειας σε χαμηλές θερμοκρασίες [2].

Πίνακας 6.2.2.1 : Μη Παραφίνες : Σημείο τήξης και λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης [2]

Material	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)	Group ^a
Formic acid	7.8	247	III
Caprylic acid	16.3	149	—
Glycerin	17.9	198.7	III
D-Lactic acid	26	184	I
Methyl palmitate	29	205	II
Camphenilone	39	205	II
Docasyl bromide	40	201	II
Caprylone	40	259	II
Phenol	41	120	III
Heptadecanone	41	201	II
1-Cyclohexyloctadecane	41	218	II
4-Heptadecanone	41	197	II
p-Joluidine	43.3	167	—
Cyanamide	44	209	II
Methyl eicosanate	45	230	II
3-Heptadecanone	48	218	II
2-Heptadecanone	48	218	II
Hydrocinnamic acid	48.0	118	—
Cetyl alcohol	49.3	141	—
α-Nepthylamine	50.0	93	—
Camphene	50	238	III
O-Nitroaniline	50.0	93	—
9-Heptadecanone	51	213	II
Thymol	51.5	115	—
Methyl behenate	52	234	II
Diphenyl amine	52.9	107	—
p-Dichlorobenzene	53.1	121	—
Oxolate	54.3	178	—
Hypophosphoric acid	55	213	II
O-Xylene dichloride	55.0	121	—
β-Chloroacetic acid	56.0	147	III
Chloroacetic acid	56	130	III
Nitro naphthalene	56.7	103	—
Trimyristin	33–57	201–213	I
Heptaudecanoic acid	60.6	189	II
α-Chloroacetic acid	61.2	130	—
Bee wax	61.8	177	II
Bees wax	61.8	177	II
Glyolic acid	63.0	109	—
Glycolic acid	63	109	—
p-Bromophenol	63.5	86	—
Azobenzene	67.1	121	—
Acrylic acid	68.0	115	—
Dinto toluent (2,4)	70.0	111	—
Thiosinamine	77.0	140	—
Bromcamphor	77	174	—
Durene	79.3	156	—
Benzylamine	78.0	174	—
Methyl brombrenzoate	81	126	—
Alpha naphthol	96	163	—
Glutaric acid	97.5	156	—
p-Xylene dichloride	100	138.7	—
Catechol	104.3	207	III
Quinone	115	171	II
Acetanilide	118.9	222	II
Succinic anhydride	119	204	II
Benzoic acid	121.7	142.8	III
Stibene	124	167	—
Benzamide	127.2	169.4	III

^a Group I, most promising; group II, promising; group III, Less promising; — insufficient data.

Πίνακας 6.2.2.2 : Λιπαρά Οξέα : Σημείο τήξης και λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης [2]

Table 4
Melting point and latent heat of fusion: fatty acids

Material	Formula	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)	Group ^a
Acetic acid	CH ₃ COOH	16.7	184	I
Polyethylene glycol 600	H(OC ₂ H ₂) _n ·OH	20–25	146	I
Capric acid	CH ₃ (CH ₂) ₈ ·COOH	36	152	–
Eladic acid	C ₈ H ₇ C ₉ H ₁₆ ·COOH	47	218	I
Lauric acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ ·COOH	49	178	II
Pentadecanoic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₃ ·COOH	52.5	178	–
Tristearin	(C ₁₇ H ₃₅ COO)C ₃ H ₅	56	191	I
Myristic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₂ ·COOH	58	199	I
Palmatic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₄ ·COOH	55	163	I
Stearic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₆ ·COOH	69.4	199	I
Acetamide	CH ₃ CONH ₂	81	241	I
Methyl fumarate	(CHCO ₂ NH ₃) ₂	102	242	I

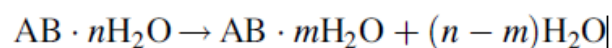
^a Group I, most promising; group II, promising; group III, less promising; —insufficient data.

6.3 Ανόργανα Υλικά Αλλαγής Φάσης

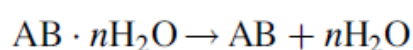
Τα ανόργανα PCM ταξινομούνται σε ένυδρα άλατα και μεταλλικά. Αυτού του είδους τα PCM δεν υπερψύχονται σημαντικά και η θερμότητα σύντηξης τους δεν υποβαθμίζεται με την πάροδο των κύκλων. [2]

6.3.1 Ένυδρα άλατα

Τα ένυδρα άλατα μπορούν να θεωρηθούν κράματα ανόργανων αλάτων και ύδατος, σχηματίζοντας ένα τυπικό κρυσταλλικό στερεό γενικού τύπου AB_nH₂O. Ο μετασχηματισμός των ένυδρων αλάτων από στερεά σε υγρά είναι στην πραγματικότητα μια αφυδάτωση της ενυδάτωσης του άλατος, αν και αυτή η διαδικασία μοιάζει θερμοδυναμικά με την τήξη ή την κατάψυξη. Ένα ένυδρο άλας συνήθως τήκεται είτε σε ένα ένυδρο άλας με λιγότερα γραμμομόρια νερού, δηλαδή:



ή στην άνυδρη μορφή του:



Στο σημείο τήξης οι ένυδροι κρύσταλλοι διαλύονται σε άνυδρο άλας και νερό, ή σε ένα χαμηλότερο ένυδρο άλας και νερό. Ένα πρόβλημα με τα περισσότερα ένυδρα άλατα είναι η άτακτη τήξη που προκαλείται από το γεγονός ότι το νερό που απελευθερώνεται από την κρυστάλλωση δεν επαρκεί για να διαλύσει όλη την παρούσα στερεά φάση. Εξαιτίας της διαφοράς πυκνότητας, τα κατώτερα ένυδρα στρώματα (ή άνυδρο άλας) κατακάθεται στο κάτω μέρος του δοχείου.

Τα περισσότερα ένυδρα άλατα έχουν επίσης ανεπαρκείς ιδιότητες πυρήνωσης με αποτέλεσμα την υπερψύξη του υγρού πριν την έναρξη της κρυστάλλωσης. Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι να προσθέσετε ένα πυρηνικό παράγοντα, ο οποίος παρέχει τον πυρήνα από τον οποίο ξεκινά ο σχηματισμός των κρυστάλλων. Μια άλλη εναλλακτική είναι η διατήρηση μερικών κρυστάλλων, σε μια μικρή κρύα περιοχή, για να εκτελέσουν χρέη πυρήνα.

Τα ένυδρα άλατα είναι η πιο σημαντική ομάδα PCM και έχουν μελετηθεί εκτενώς για τη χρήση τους σε συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Οι πιο ελκυστικές ιδιότητες των ένυδρων αλάτων είναι: (i) υψηλή λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης ανά μονάδα όγκου, (ii) σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα (σχεδόν διπλάσια από την παραφίνη) και (iii) μικρές μεταβολές όγκου κατά την τήξη. Δεν είναι πολύ διαβρωτικά, είναι συμβατά με τα πλαστικά και μόνο ελαφρώς τοξικά. Πολλά ένυδρα άλατα είναι αρκετά οικονομικά για χρήση σε συστήματα αποθήκευσης.

Τρεις τύποι συμπεριφοράς των λιωμένων αλάτων μπορούν να ταυτοποιηθούν : ομοιόμορφη, ανομοιόμορφη και ημι-ομοιόμορφη τήξη.

(i) Ομοιόμορφη τήξη συμβαίνει όταν το άνυδρο άλας είναι πλήρως διαλυτό στο νερό της ενυδάτωσης κατά την θερμοκρασία τήξης.

(ii) Η ανομοιόμορφη τήξη συμβαίνει όταν το άλας δεν είναι εξολοκλήρου διαλυτό στο νερό της ενυδάτωσης στο σημείο τήξης.

(iii) Κατά την ημι-ομοιόμορφη τήξη οι υγρές και στερεές φάσεις βρίσκονται σε ισορροπία κατά τη διάρκεια μιας φάσης μετάβασης με διαφορετική σύσταση τήξης λόγω της μετατροπής του ένυδρου σε ένα λιγότερο ένυδρο υλικό λόγω απώλειας νερού.

Το κύριο πρόβλημα στη χρήση ένυδρων αλάτων, τα οποία αποτελούν την πλειονότητα των PCM, είναι ότι αυτά τα οποία κρίνονται κατάλληλα για χρήση στην αποθήκευση θερμικής ενέργειας λιώνουν ασυνεχώς. Καθώς η mole νερού ενυδάτωσης δεν επαρκούν για να διαλύσουν ένα

γραμμομόριο άλατος, το διάλυμα που προκύπτει είναι υπερκορεσμένο στη θερμοκρασία τήξης. Το στερεό αλάτι, λόγω της υψηλότερης πυκνότητάς του, καταλήγει στο κάτω μέρος του δοχείου και δεν είναι διαθέσιμο για επανασύνδεση με νερό κατά τη διάρκεια της αντίστροφης διαδικασίας της ψύξης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μη αναστρέψιμη τήξη-ψύξη του ένυδρου άλατος το οποίο συνεχίζει να μειώνεται με κάθε κύκλο φόρτισης-απόρριψης

Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα που είναι σύνηθες στα ένυδρα άλατα είναι αυτό της υπερψύξης. Στη θερμοκρασία σύντηξης, ο ρυθμός πυρήνωσης είναι γενικά πολύ χαμηλός. Για να επιτευχθεί ένας λογικός ρυθμός πυρήνωσης, το διάλυμα πρέπει να υπερψυχθεί και να αυξήσει την ενέργεια του αντί να αποφορτιστεί στη θερμοκρασία σύντηξης.

Άλλο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα ένυδρα άλατα είναι η “παρορμητικότητα” των ένυδρων αλάτων με μικρότερο αριθμό ατόμων νερού κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αποφόρτισης. Η προσθήκη χημικών μπορεί να αποτρέψει την πυρήνωση των ένυδρων αλάτων χαμηλής περιεκτικότητας, η οποία κατά προτίμηση αυξάνει την διαλυτότητα των ένυδρων αλάτων χαμηλότερης περιεκτικότητας έναντι του αρχικού άλατος με υψηλότερο αριθμό ατόμων νερού.

Το πρόβλημα της ασυνεχούς τήξης μπορεί να αντιμετωπιστεί με χρήση ενός εκ των ακόλουθων μέσων: i) με μηχανική ανάδευση, ii) περικλείοντας τα PCM μέσα σε κάψουλες για τη μείωση του διαχωρισμού, (iii) με την προσθήκη παραγόντων πύκνωσης που εμποδίζουν τη διάλυση των στερεών αλάτων κρατώντας τα σε αναστολή, (iv) με τη χρήση περίσσειας νερού έτσι ώστε οι λιωμένοι κρύσταλλοι να μην παράγουν υπερκορεσμένα διαλύματα, v) με την τροποποίηση της χημικής σύνθεσης του συστήματος έτσι ώστε το ασυνεχές υλικό να καταστεί συνεχές.

Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα του διαχωρισμού του άλατος και της υπερψύξης των ένυδρων αλάτων, επιστήμονες της General Electric Co., NY πρότειναν τον σχεδιασμό συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε περιστρεφόμενους κυλίνδρους. Το σύστημα αποτελείται από ένα κυλινδρικό δοχείο τοποθετημένο οριζόντια με δύο σετ κυλίνδρων. Μια ταχύτητα περιστροφής της τάξης των 3 rpm παρήγαγε επαρκή κίνηση του στερεού περιεχομένου (i) για δημιουργία αποτελεσματικής χημικής ισορροπίας, (ii) για την πρόληψη της πυρήνωσης των στερεών κρυστάλλων στα τοιχώματα, και (iii) για να υποθέσουμε ταχεία επίτευξη αξονικής ισορροπίας σε μεγάλους κυλίνδρους. Μερικά από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου των περιστρεφόμενων κυλίνδρων είναι: (i) η πλήρης αλλαγή φάσης, (ii) η απελευθερωθείσα λανθάνουσα θερμότητα κυμαίνεται στην περιοχή 90-100% της θεωρητικής λανθάνουσας θερμότητας, (iii) η επαναλαμβανόμενη απόδοση πάνω από 200 κύκλους, (iv) οι υψηλές εσωτερικές ταχύτητες μεταφοράς θερμότητας, (v) η ομοιόμορφη κατάψυξη. Στη συνέχεια παρατίθεται ένας πίνακας με ένυδρα άλατα [2] :

Πίνακας 6.3.1 : Ένυδρα άλατα : Σημείο τήξης και λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης [2]

Material	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)	Group ^a
K ₂ HPO ₄ ·6H ₂ O	14.0	109	II
FeBr ₃ ·6H ₂ O	21.0	105	II
Mn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	25.5	148	II
FeBr ₃ ·6H ₂ O	27.0	105	II
CaCl ₂ ·12H ₂ O	29.8	174	I
LiNO ₃ ·2H ₂ O	30.0	296	I
LiNO ₃ ·3H ₂ O	30	189	I
Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O	32.0	267	II
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	32.4	241	II
KFe(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O	33	173	I
CaBr ₂ ·6H ₂ O	34	138	II
LiBr ₂ ·2H ₂ O	34	124	I
Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	36.1	134	III
FeCl ₃ ·6H ₂ O	37.0	223	I
Mn(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	37.1	115	II
Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O	40.0	279	II
CoSO ₄ ·7H ₂ O	40.7	170	I
KF·2H ₂ O	42	162	III
MgI ₂ ·8H ₂ O	42	133	III
CaI ₂ ·6H ₂ O	42	162	III
K ₂ HPO ₄ ·7H ₂ O	45.0	145	II
Zn(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	45	110	III
Mg(NO ₃)·4H ₂ O	47.0	142	II
Ca(NO ₃)·4H ₂ O	47.0	153	I
Fe(NO ₃) ₃ ·9H ₂ O	47	155	I
Na ₂ SiO ₃ ·4H ₂ O	48	168	II
K ₂ HPO ₄ ·3H ₂ O	48	99	II
Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O	48.5	210	II
MgSO ₄ ·7H ₂ O	48.5	202	II
Ca(NO ₃) ₂ ·3H ₂ O	51	104	I
Zn(NO ₃) ₂ ·2H ₂ O	55	68	III
FeCl ₃ ·2H ₂ O	56	90	I
Ni(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	57.0	169	II
MnCl ₂ ·4H ₂ O	58.0	151	II
MgCl ₂ ·4H ₂ O	58.0	178	II
CH ₃ COONa·3H ₂ O	58.0	265	II
Fe(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	60.5	126	–
NaAl(SO ₄) ₂ ·10H ₂ O	61.0	181	I
NaOH·H ₂ O	64.3	273	I
Na ₃ PO ₄ ·12H ₂ O	65.0	190	–
LiCH ₃ COO·2H ₂ O	70	150	II
Al(NO ₃) ₂ ·9H ₂ O	72	155	I
Ba(OH) ₂ ·8H ₂ O	78	265	II
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	89.9	167	II
KAl(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O	91	184	II
MgCl ₂ ·6H ₂ O	117	167	I

6.3.2 Μέταλλα

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει τα μέταλλα χαμηλής τήξης και τα ευτηκτικά μέταλλα. Αυτά τα μέταλλα δεν έχουν ληφθεί ακόμη σοβαρά υπόψη για χρήση ως PCM εξαιτίας του βάρους. Ωστόσο, όταν ο όγκος δεν είναι ένα θέμα, είναι πιθανοί υποψήφιοι λόγω της υψηλής θερμοκρασίας σύντηξης ανά μονάδα όγκου και της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας. Η χρήση των μετάλλων παρουσιάζει έναν αριθμό ασυνήθιστων μηχανικών προβλημάτων. Μια μεγάλη διαφορά μεταξύ των μεταλλικών και άλλων PCM είναι η υψηλή τους θερμική αγωγιμότητα. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθεται μια λίστα με ορισμένα επιλεγμένα μεταλλικά στοιχεία:

Πίνακας 6.3.2.1 : Μέταλλα : Σημείο τήξης και λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης

Material	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)	Group ^a
Gallium–gallium antimony eutectic	29.8	–	–
Gallium	30.0	80.3	I
Cerrolow eutectic	58	90.9	–
Bi–Cd–In eutectic	61	25	–
Cerrobend eutectic	70	32.6	I
Bi–Pb–In eutectic	70	29	–
Bi–In eutectic	72	25	–
Bi–Pb–tin eutectic	96	–	–
Bi–Pb eutectic	125	–	–

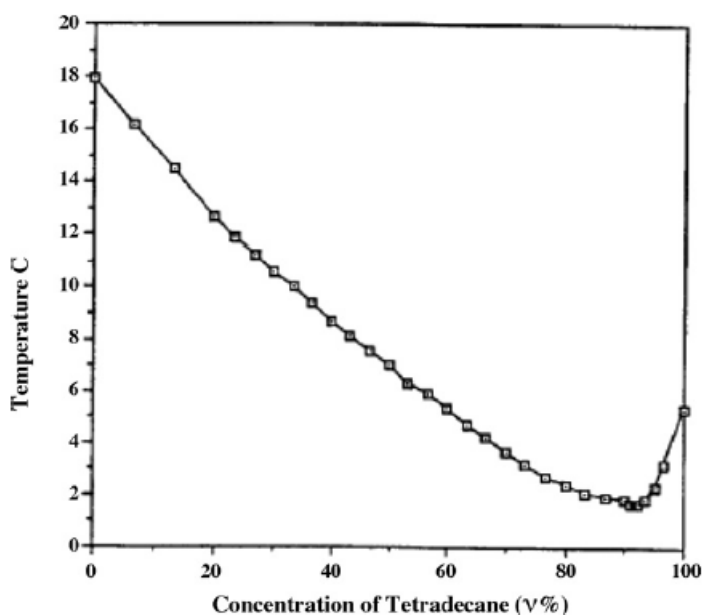
Μερικά από τα χαρακτηριστικά αυτών των υλικών είναι τα εξής: (i) χαμηλή θερμότητα σύντηξης ανά μονάδα βάρους (ii) υψηλή θερμότητα σύντηξης ανά μονάδα όγκου, (iii) υψηλή θερμική αγωγιμότητα, (iv) χαμηλή ειδική θερμότητα και (v) σχετικά χαμηλή πίεση ατμών. [2]

6.3.3 Ευτηκτικά

Ευτηκτικό ονομάζεται η σύνθεση με ελάχιστη τήξη δύο ή περισσότερων στοιχείων, καθένα από τα οποία τήκεται και καταψύχεται από κοινού σχηματίζοντας ένα μείγμα από τους κρυστάλλους των στοιχείων κατά τη διάρκεια της κρυστάλλωσης. Το ευτηκτικό σχεδόν πάντα λιώνει και ψύχεται χωρίς διαχωρισμό, καθώς αυτά τα υλικά καταψύχονται σε ένα κοινό μίγμα κρυστάλλων,

αφήνοντας ελάχιστες ευκαιρίες για να διαχωριστούν τα στοιχεία. Κατά την τήξη, και τα δύο συστατικά υγροποιούνται ταυτόχρονα, και πάλι με ελάχιστες πιθανότητες διαχωρισμού.

Κάποιες συνθέσεις PCM διαχωρισμού μερικές φορές αποκαλούνται λανθασμένα ευτηκτικές ουσίες, λόγω του ότι είναι ελάχιστη η τήξη. Ωστόσο, επειδή τα συστατικά υφίστανται μια περιτηκτική αντίδραση κατά τη διάρκεια της μετάβασης φάσης, θα πρέπει πιο σωστά να χαρακτηρίζονται ως περιτηκτικά. Το σημείο πήξης του μείγματος τετραδεκανίου (σ.τ. 5,3 ° C) - εξαδεκανίου (σ.τ. 17,9 ° C) φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 6.3.3.1 : Σημείο ψύξης του μίγματος τετραδεκανίου-εξαδεκανίου

Το ευτηκτικό σημείο του μίγματος δεκαεξανίου-τετραδεκανίου εργαστηριακής ποιότητας εμφανίζεται περίπου στο 91,67% του τετραδεκανίου και η θερμοκρασία αλλαγής φάσης του είναι περίπου 1.7 °C. Ένας κατάλογος ευτηκτικών υλικών παρατίθεται στον πίνακα 6.3.3.1 [2]:

Πίνακας 6.3.3.1 : Λίστα οργανικών και ανόργανων ευτηκτικών υλικών

Material	Composition (wt.%)	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)	Group ^a
CaCl ₂ ·6H ₂ O + CaBr ₂ ·6H ₂ O	45 + 55	14.7	140	–
Triethylolthane + water + urea	38.5 + 31.5 + 30	13.4	160	I
C ₁₄ H ₂₈ O ₂ + C ₁₀ H ₂₀ O ₂	34 + 66	24	147.7	–
CaCl ₂ + MgCl ₂ ·6H ₂ O	50 + 50	25	95	II
CH ₃ CONH ₂ + NH ₂ CONH ₂	50 + 50	27	163	II
Triethylolthane + urea	62.5 + 37.5	29.8	218	I
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O + Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	47 + 53	30	136	–
CH ₃ COONa·3H ₂ O + NH ₂ CONH ₂	40 + 60	30	200.5	I
NH ₂ CONH ₂ + NH ₄ NO ₃	53 + 47	46	95	II
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + NH ₄ NO ₃	61.5 + 38.5	52	125.5	I
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + MgCl ₂ ·6H ₂ O	58.7 + 41.3	59	132.2	I
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + MgCl ₂ ·6H ₂ O	50 + 50	59.1	144	–
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + Al(NO ₃) ₃ ·9H ₂ O	53 + 47	61	148	–
CH ₃ CONH ₂ + C ₁₇ H ₃₅ COOH	50 + 50	65	218	–
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + MgBr ₂ ·6H ₂ O	59 + 41	66	168	I
Napthalene + benzoic acid	67.1 + 32.9	67	123.4	–
NH ₂ CONH ₂ + NH ₄ Br	66.6 + 33.4	76	151	II
LiNO ₃ + NH ₄ NO ₃ + NaNO ₃	25 + 65 + 10	80.5	113	–
LiNO ₃ + NH ₄ NO ₃ + KNO ₃	26.4 + 58.7 + 14.9	81.5	116	–
LiNO ₃ + NH ₄ NO ₃ + NH ₄ Cl	27 + 68 + 5	81.6	108	–

6.4 Σύνοψη πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των κατηγοριών PCM

Συγκεντρωτικά για τις δύο βασικές κατηγορίες PCM παρατίθενται τα σημαντικότερα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα της κάθε κατηγορίας. Κάθε εφαρμογή στην οποία επιχειρείται η εισαγωγή PCM, έχει ξεχωριστές παραμέτρους και ιδιαιτερότητες, οπότε τα ακόλουθα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα έχουν διαφορετική βαρύτητα από εφαρμογή σε εφαρμογή:

A) Οργανικά PCM

1. Πλεονεκτήματα:

- Μη διαβρωτικά με τα περισσότερα υλικά
- Μικρός κίνδυνος ρύπανσης του νερού
- Μικρής τάξης ή καθόλου εμφάνιση του φαινομένου supercooling
- Χημική και θερμική σταθερότητα
- Χαμηλό κόστος αγοράς σχετικά με τις υπόλοιπες κατηγορίες PCM

- Παραγωγή υλικών σε διάφορες εμπορικές εφαρμογές (σκόνη, κόκκοι, πλάκες)

2.Μειονεκτήματα:

- Λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης χαμηλότερη από τα ανόργανα
- Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας χαμηλότερος από τα ανόργανα
- Αναφλέξιμα σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (200ο C)
- Πυκνότητα χαμηλότερη από τα ανόργανα

B) Ανόργανα PCM

1.Πλεονεκτήματα:

- Μεγαλύτερη τιμή λανθάνουσας θερμότητας υγροποίησης (σε σύγκριση με τα οργανικά)
- Μη αναφλέξιμα
- Πυκνότητα υψηλότερη από τα οργανικά

2.Μειονεκτήματα:

- Διαβρωτικά (απαραίτητη αποθήκευση υλικών σε ενισχυμένη συσκευασία)
- Εμφάνιση supercooling
- Διαχωρισμός των φάσεων (μεταβλητή τιμή διαλυτότητας με τη θερμοκρασία)
- Δυνατή δημιουργία ιζήματος
- Αβέβαιη θερμική σταθερότητα σε κυκλική φόρτιση
- Αρκετά μεγαλύτερο κόστος αγοράς από τα οργανικά
- Υδροσκοπικά υλικά με αποτέλεσμα εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους σε βάθος χρόνου αν μείνουν εκτεθειμένα σε περιβάλλον με υγρασία [4]

Παρακάτω παρατίθεται ο συγκεντρωτικός πίνακας με τις ιδιότητες των διαφόρων κατηγοριών PCM :

Πίνακας 6.4.1 : Κατηγορίες PCM : χαρακτηριστικά και ιδιότητες [5]

Property or Characteristic	Paraffin Wax	Non-Paraffin Organics	Hydrated Salts	Metallics
Heat of Fusion	High	High	High	Med.
Thermal Conductivity	Very Low	Low	High	Very High
Melt Temperature (°C)	-20 to 100+	5 to 120+	0 to 100+	150 to 800+
Latent Heat (kJ/kg)	200 to 280	90 to 250	60 to 300	25 to 100
Corrosive	Non-Corrosive	Mildly Corrosive	Corrosive	Varies
Economics	\$\$	\$\$\$ to \$\$\$\$	\$	\$\$ to \$\$\$
Thermal Cycling	Stable	Elevated Temperature Can Cause Decomposition	Unstable over Repeated Cycles	Stable
Weight	Medium	Medium	Light	Heavy

Πίνακας 6.4.2 : PCM διαθέσιμα στη διεθνή αγορά [2]

PCM name	Type of product	Melting point (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Source
RT 20	Paraffin	22	172	Rubithem GmbH
Climsel C23	Salt hydrate	23	148	Climator
ClimselC24	Salt hydrate	24	216	Climator
RT 26	Paraffin	25	131	Rubithem GmbH
RT 25	Paraffin	26	232	Rubithem GmbH
STL 27	Salt hydrate	27	213	Mitsubishi chemical
S27	Salt hydrate	27	207	Cristopia
RT 30	Paraffin	28	206	Rubithem GmbH
RT 27	Paraffin	28	179	Rubithem GmbH
TH 29	Salt hydrate	29	188	TEAP
Climsel C32	Salt hydrate	32	212	Climator
RT32	Paraffin	31	130	Rubithem GmbH

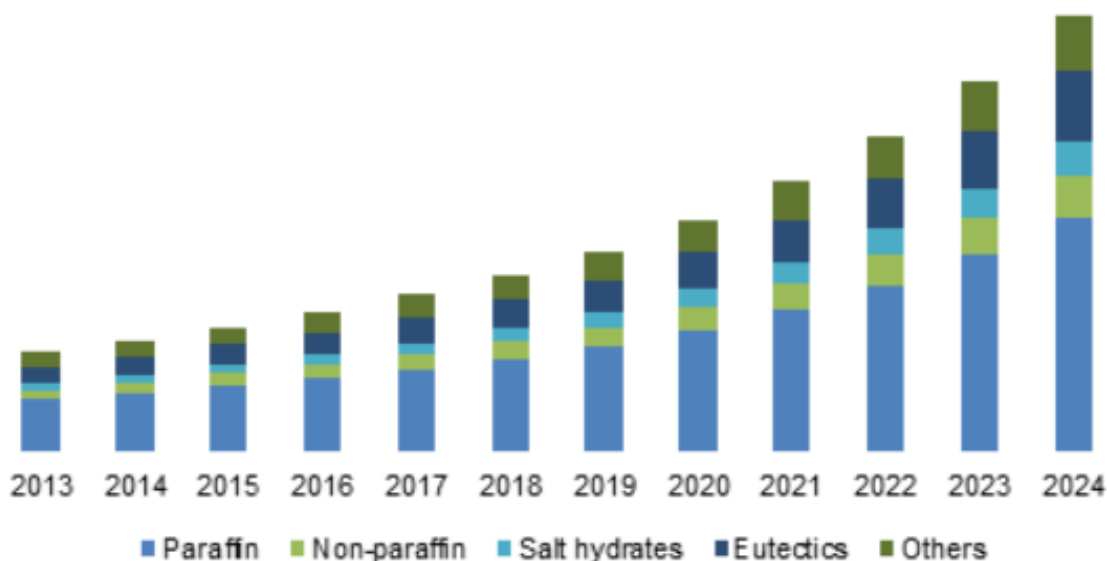
6.5 Εξέλιξη και πρόβλεψη της αγοράς των PCM

Το παγκόσμιο μέγεθος των προηγμένων PCM εκτιμήθηκε σε 480 εκατομμύρια δολάρια το 2013 και αναμένεται να αυξηθεί κατά 20,2% κατά την περίοδο πρόβλεψης 2013-2020. Η αυξανόμενη χρήση υλικών αλλαγής φάσης στην ελαφριά κατασκευή λόγω της ικανότητάς τους να αναπαράγουν την επίδραση θερμικής μάζας αναμένεται να οδηγήσει την ανάπτυξη της βιομηχανίας κατά την περίοδο πρόβλεψης.

Η βιομηχανία αναμένεται να αναπτυχθεί λόγω της αύξησης του πεδίου εφαρμογής στην κλωστοϋφαντουργία εξαιτίας των ιδιοτήτων εξισορρόπησης της θερμοκρασίας. Επιπλέον, οι συνεχείς επενδύσεις των εταιρειών στην τεχνολογική πρόοδο της μικρο- και μακρο-ενκαψούλωσης των προηγμένων PCM αναμένεται επίσης να οδηγήσουν στην ανάπτυξη της βιομηχανίας.

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η πρόβλεψη για την εξέλιξη της αγοράς των PCM για την περίοδο 2013-2024 ανά κατηγορία:

U.S. phase change materials market size, by product, 2013 - 2024 (USD Million)



Εικόνα 6.5.1 : Πρόβλεψη για την εξέλιξη της αγοράς των PCM 2013-2024 [6]

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, η χρήση των PCM αναμένεται να διευρυνθεί όλο και περισσότερο με την πάροδο των ετών, με τις παραφίνες να κυριαρχούν έναντι των υπόλοιπων κατηγοριών.

Η οικοδομική και κατασκευαστική βιομηχανία είναι ο μεγαλύτερος τελικός χρήστης της αγοράς υλικών αλλαγής φάσης και θα αποτελέσει μείζονα παράγοντα ανάπτυξης κατά την περίοδο πρόβλεψης. Η αυξανόμενη ζήτηση για εξοικονόμηση ενέργειας και τεχνολογία φιλική προς το περιβάλλον οδηγεί στην ανάπτυξη της παγκόσμιας αγοράς υλικών αλλαγής φάσης (PCM). Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, το 40% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται στα κτίρια της Ευρωπαϊκή Ένωσης είναι για θέρμανση, εξαερισμό και ψύξη και αναμένεται να αυξηθεί τα επόμενα χρόνια. Τα PCM αποτελούν μια δημοφιλή εναλλακτική λύση στις δαπανηρές και συμβατικές τεχνικές κατασκευής. Γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ της χρονικής στιγμής κατά την οποία είναι διαθέσιμη η ενέργεια και της χρονικής στιγμής κατά την οποία χρειάζεται και έτσι μειώνει την ενέργεια που απαιτείται για την ψύξη και τη θέρμανση του χώρου, βελτιώνοντας ταυτόχρονα την ποιότητα του χώρου σε εμπορικές και οικιακές εφαρμογές όπου η χρήση μεγάλης μάζας υλικών είναι ακατάλληλη. Η “microencapsulation” της αγοράς PCM θα παρουσιάσει μεγαλύτερη ζήτηση κατά τη διάρκεια του 2017 έως του 2024.

Η εφαρμογή των PCM στην κλωστοϋφαντουργία, τη ναυτιλία και τη μεταφορά αναμένεται να σημειώσει σημαντική ανάπτυξη στο εγγύς μέλλον. Το προϊόν έχει κερδίσει σημαντική δημοτικότητα μεταξύ των δημιουργών υφασμάτων και των κατασκευαστών των τελευταίων χρόνων λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων που προσφέρονται από την ευρεία ποικιλία παραφινών και ένυδρων αλάτων. Η αγορά PCM που βασίζεται σε βιολογικά προϊόντα θα παρουσιάσει έναν εξέχοντα ρυθμό ανάπτυξης κατά τη διάρκεια του χρονικού πλαισίου πρόβλεψης, λόγω των φιλικών προς το περιβάλλον χαρακτηριστικών. Τα ευτηκτικά είναι πιθανό να λάβουν σημαντική προσοχή τα επόμενα χρόνια, δεδομένου ότι προσφέρουν συνδυασμό τόσο οργανικών όσο και ανόργανων PCM που μπορούν να τροποποιηθούν και να προσαρμοστούν σύμφωνα με τη ζήτηση της εφαρμογής και τις απαιτήσεις των πελατών. Η πρόκληση για μεγαλύτερη χρήση των PCM είναι η συσκευασία, το κόστος και η γνώση τους μεταξύ των δυνητικών κοινοτήτων πελατών και χρηστών. [7]

6.6 Χαρακτηριστικά των PCM

Παρακάτω θα αναφερθούμε στις βασικές θερμικές ιδιότητες των PCM οι οποίες παίζουν καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά του θερμικού συστήματος κάθε υλικού.

Η θερμοχωρητικότητα για όλα τα PCM, οργανικά και ανόργανα, είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Δεν έχει βρεθεί μέχρι σήμερα κάποιος νόμος που να περιγράφει τη μεταβολή της θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας και να καλύπτει ένα μεγάλο εύρος υλικών. Επί του παρόντος χρησιμοποιείται μια παραδοχή σύμφωνα με την οποία οι δύο φάσεις (στερεή και υγρή) του υλικού αντιμετωπίζονται με δύο αντίστοιχες τιμές για τη θερμοχωρητικότητα, τιμές που θεωρούνται πρακτικά σταθερές για το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής στην οποία χρησιμοποιείται το υλικό. Ωστόσο, ακόμα δεν υπάρχει σαφής απάντηση για την τιμή της θερμοχωρητικότητας στη διαφασική περιοχή. Πρακτικά, δίνονται πολυωνυμικές και εκθετικές συναρτήσεις για το κάθε PCM, χωρίς να έχει εξαχθεί μέχρι σήμερα μια οικουμενική συνάρτηση που θα αντιπροσωπεύει μια μεγάλη ομάδα υλικών. Η μόνη κοινή βάση για τη θερμοχωρητικότητα, είναι ότι κατά κανόνα αποτελεί μια αύξουσα συνάρτηση της θερμοκρασίας του υλικού.

Η τιμή της μέγιστης λανθάνουσας θερμότητας που μπορούν να αποθηκεύσουν τα PCM ανά μονάδα μάζας, είναι δείκτης αποδοτικότητας για κάθε εφαρμογή, καθώς επιδιώκεται η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αποθήκευση ανά μονάδα μάζας υλικού. Τον ίδιο ρόλο ποιοτικά παίζει και η πυκνότητα του PCM.

Για να επιτευχθεί αποδοτική μεταφορά θερμότητας πρέπει το υπεύθυνο υλικό να έχει μεγάλη θερμική αγωγιμότητα (k). Τα PCM έχουν εν γένει μικρή τιμή θερμικής αγωγιμότητας, γεγονός που αποτελεί μειονέκτημα των PCM στις διάφορες εφαρμογές τους. Η τιμή θεωρείται πρακτικά σταθερή σε ολόκληρο το θερμοκρασιακό φάσμα εφαρμογής. Λόγω της μικρής τιμής του k , ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας στα PCM θεωρείται μη αποδοτικός, καθώς για τη γρήγορη και αποτελεσματική χρήση των εφαρμογών των PCM απαιτούνται υψηλές θερμοκρασιακές διαφορές. Το μειονέκτημα αυτό, ανάλογα πάντα με την εφαρμογή, μπορεί να αντιμετωπιστεί σε ένα βαθμό με χρήση μεγάλων επιφανειών μετάδοσης θερμότητας. Ωστόσο, σε κάποιες εφαρμογές, όπως είναι η μεταφορά τροφίμων, οι παραπάνω παράμετροι δεν είναι βαρύνουσας σημασίας. Όπως είναι γνωστό η πυκνότητα είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, οπότε κάθε υλικό που αλλάζει φάση, υπόκειται σε ογκομετρικές αλλαγές. Σε περίπτωση λοιπόν που υπάρχει PCM σε κλειστή συσκευασία, πρέπει να ληφθεί ειδική μέριμνα για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο της ογκομετρικής αλλαγής και κατά συνέπεια της μεταβολής της πίεσης στο εσωτερικό της συσκευασίας.

Από οικολογική σκοπιά, τα PCM δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον. Τα κεριά της παραφίνης είναι οικολογικά ακίνδυνα και κατά την απόρριψή τους δεν αποτελούν κίνδυνο για φυτά, ζώα ή μικροοργανισμούς. Έχουν χαρακτηριστεί ως ουσίες που δεν αποτελούν απειλή για το νερό και είναι 100% ανακυκλώσιμα. Επομένως, δεν είναι ούτε τοξικά, ούτε επικίνδυνα προς την ανθρώπινη υγεία. Τέτοιου είδους παραφίνες που έχουν υποστεί επεξεργασία ικανοποιούν και τις αυστηρότερες προϋποθέσεις ασφαλείας για επαφή με τρόφιμα και ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη βιομηχανία παραγωγής τροφίμων, αυτούσια ή ως συστατικά υλικών συσκευασίας, ως επί το πλείστον. Στη φαρμακευτική και κοσμητική βιομηχανία, χρησιμοποιούνται ως βάση για πολλά είδη κρεμών

Το σημαντικότερο κριτήριο για την αξιοποίηση των PCM σε βιομηχανικές εφαρμογές είναι ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των υλικών, δηλαδή ο χρόνος κατά τον οποίο δεν έχουμε εκφυλισμό των ιδιοτήτων, ο οποίος μετράται καλύτερα σε κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης του υλικού παρά σε πραγματικές μονάδες χρόνου.

Η ανεπάρκεια σταθερότητας των υλικών οφείλεται σε δύο λόγους:

- Σε μικρής σταθερότητας χημική σύνθεση του υλικού ή των υλικών που αποτελούν το PCM.
- Στο φαινόμενο της διάβρωσης που πιθανόν να λάβει χώρα μεταξύ του PCM και του υλικού συσκευασίας.

Το μεγαλύτερο μέρος των ερευνών με αντικείμενο τη διατήρηση των ιδιοτήτων των PCM κατά την περιοδική φόρτιση και αποφόρτισή τους ή τη διαβρωτική τους ικανότητα, αφορούν στα ένυδρα άλατα. Οι παραφίνες και τα παράγωγα υλικά τους έχει διαπιστωθεί ότι έχουν άριστη σταθερότητα στις θερμικές τους ιδιότητες καθώς επίσης και ότι δεν αντιδρούν όταν έρχονται σε επαφή με τα περισσότερα υλικά (μεταλλικά και λοιπά δομικά υλικά). Αντιθέτως, τα ένυδρα άλατα παρουσιάζουν διαβρωτικές τάσεις όταν έρχονται σε άμεση επαφή με τα πιο διαδεδομένα μέταλλα (χαλκός, σίδηρος, κλπ). [8], [9]

6.6.1 Φαινόμενο Supercooling

Ένα άλλο σοβαρό πρόβλημα που αφορά στο σύνολο των ανόργανων PCM αλλά και σε μέρος των οργανικών είναι το φαινόμενο της υπέρψυξης ή υπόψυξης (supercooling or subcooling).

Ένα ιδανικό υλικό αλλαγής φάσης θα έπρεπε να στερεοποιείται και να τήκεται στην ίδια θερμοκρασία. Ωστόσο, κάποια υλικά δεν στερεοποιούνται αμέσως, εάν η θερμοκρασία του υλικού είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία τήξης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υπόψυξη ή υπέρψυξη. Κατά τη διάρκεια της υπόψυξης το υλικό βρίσκεται σε μια μετασταθή κατάσταση.

Η ύπαρξη supercooling οδηγεί στη μείωση της θερμοκρασίας κρυστάλλωσης, συνεπώς η λανθάνουσα θερμότητα αποδίδεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από την επιθυμητή ή σε μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών. Σημειώνεται ότι όσο μεγαλύτερος ο ρυθμός ψύξης του δείγματος, τόσο μεγαλύτερος ο βαθμός supercooling. Ο βαθμός του supercooling δεν είναι φυσική ιδιότητα του υλικού με σταθερή τιμή αλλά μεταβάλλεται από διάφορες παραμέτρους, όπως είναι ο όγκος του δείγματος, η «καθαρότητα» του υλικού, ο ρυθμός ψύξης, η επιφάνεια του δοχείου αποθήκευσης.

Το φαινόμενο της υπέρψυξης και τα προβλήματα που προκύπτουν ως συνέπεια αυτού μπορούν να αντιμετωπιστούν με την προσθήκη τεχνητών παραγόντων πυρηνοποίησης στο υλικό, οι οποίοι είναι ουσίες με κρυσταλλική δομή παρόμοια, αν όχι ίδια, με αυτή του υλικού στο οποίο προστίθενται. Η προσθήκη τους στα P.C.M. διασφαλίζει ότι η στερεή φάση θα σχηματισθεί με μηδαμινή ή ακόμα και καθόλου υπόψυξη.

Τα είδη των πυρήνων που μπορούν να προστεθούν είναι τα ακόλουθα :

- «Εγγενείς» Πυρήνες (Intrinsic nucleators) : πρόκειται για ίδια συστατικά του P.C.M. , πρέπει να φυλάσσονται ξεχωριστά από το P.C.M., διότι αλλιώς υπάρχει κίνδυνος να λιώσουν μαζί με αυτό και κατόπιν να είναι ανενεργά.
- «Συμβατοί» Πυρήνες (Extrinsic nucleators) : πρόκειται για χημικά τα οποία παρουσιάζουν όμοια δομή με αυτή των P.C.M. και έχουν παρόμοιες θερμοκρασίες τήξης με το P.C.M. που χρησιμοποιούμε. Πρέπει να φυλάσσονται ξεχωριστά από το P.C.M., αλλιώς υπάρχει κίνδυνος να λιώσουν μαζί με αυτό και κατόπιν να είναι ανενεργά. [8] , [10] , [11] , [12]

6.6.2 Φαινόμενο διάβρωσης

Πολύ σημαντική παράμετρος στη χρήση ενός PCM είναι να μην είναι διαβρωτικό. Οι παραφίνες καλύπτουν την ανάγκη αυτή καθώς δεν είναι διαβρωτικές, ωστόσο τα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης στην πλειοψηφία τους είναι διαβρωτικά.

Η διαβρωτικότητα ενός PCM δύναται, σε συνδυασμό με τις συνεχείς εναλλαγές θερμοκρασίας και φάσης, σε βάθος χρόνου , όχι απαραίτητα μεγάλο, να καταστρέψει τη συσκευασία του PCM και κατ' επέκταση το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας.

Σε πολλές θερμικές εφαρμογές με χρήση PCM ,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. [8] , [9]

6.6.3 Φαινόμενο διαχωρισμού των φάσεων

Η συμπεριφορά των ένυδρων αλάτων κατά την αλλαγή φάσης είναι πολύ πιο περίπλοκη απ' ότι στα οργανικά PCM, διότι το υλικό υφίσταται στάδια ενυδάτωσης και αφυδάτωσης, και όχι απλά τις φάσεις της τήξης και της στερεοποίησης.

Τα ένυδρα άλατα εμφανίζουν τρεις κύριους τύπους συμπεριφοράς κατά τη μετάβασή τους από μία φάση σε κάποια άλλη, όπως έχει προαναφερθεί : τον ομοιόμορφο, τον ανομοιόμορφο και τον ημι-ομοιόμορφο. Η επιθυμητή συμπεριφορά είναι αυτή του ομοιόμορφου τρόπου τήξης, ο οποίος λαμβάνει χώρα όταν η σύσταση της στερεάς φάσης είναι ίδια με τη σύσταση της υγρής. Η ημι-ομοιόμορφη τήξη συμβαίνει όταν το PCM έχει δύο ή περισσότερες ένυδρες μορφές με διαφορετικές συστάσεις στερεού μέρους και διαφορετικά σημεία τήξης. Η ανομοιόμορφη τήξη

λαμβάνει χώρα στην περίπτωση που κατά την τήξη του PCM εμφανίζονται δύο ξεχωριστές φάσεις: ένα κορεσμένο διάλυμα και ένα ίζημα αδιάλυτης άνυδρης ουσίας.

Η μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα θερμικής ενέργειας των ένυδρων αλάτων είναι δύσκολο να διατηρηθεί και συνήθως μειώνεται με την πάροδο των κύκλων φόρτισης του υλικού. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν μπορεί να υπολογιστεί με βεβαιότητα ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των υλικών. Κύρια αιτία εκφυλισμού των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών είναι ο διαχωρισμός των φάσεων του υλικού και ο πιθανός σχηματισμός ανύδρων αλάτων με δημιουργία ιζήματος. Το φαινόμενο λαμβάνει χώρα εξαιτίας της τήξης των ένυδρων αλάτων σύμφωνα με το κατώτερο συστατικό του μίγματος (ανομοιόμορφη τήξη), δημιουργώντας έτσι μη αναστρέψιμη διαδικασία που οδηγεί σε συχνή εξασθένιση των ιδιοτήτων τους.

Κατά συνέπεια, λόγω της διαφοράς πυκνότητας των δύο αυτών φάσεων, η στερεή φάση κατακάθεται στον πυθμένα του δοχείου αποθήκευσης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται αποσύνθεση του υλικού (ή διαχωρισμός των φάσεων). [8] , [9]

6.7 Τοποθέτηση P.C.M. σε Κάψουλες και Σύνθετα Υλικά

Η τοποθέτηση των P.C.M. σε κάψουλες και η χρήση σύνθετων υλικών είναι δύο τεχνολογίες πολλά υποσχόμενες για το μέλλον των P.C.M.. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, η τοποθέτηση των P.C.M. σε κάψουλες είναι αναγκαία για τεχνικούς λόγους, διότι υπάρχει κίνδυνος για διαρροή της υγρής φάσης από το χώρο στον οποίο αυτή χρησιμοποιείται. Διακρίνουμε δύο είδη ενσωμάτωσης των P.C.M. σε κάψουλες :

6.7.1 Macroencapsulation

Σε αυτή την περίπτωση γίνεται τοποθέτηση των P.C.M. σε κάψουλες με διάμετρο μεγαλύτερη του 1 cm. Εκτός από το ότι αυτή η μέθοδος διατηρεί το υλικό του P.C.M. σε πεπερασμένο χώρο και εμποδίζει την επαφή του με άλλα συστατικά, παρουσιάζει και τα ακόλουθα πλεονεκτήματα :

- Βελτιώνει τη συμβατότητα του υλικού με το περιβάλλον, καθώς λειτουργεί σαν φράγμα μεταξύ του P.C.M. και του χώρου βρίσκεται.
- Βελτιώνει τη διακίνηση του P.C.M. κατά την παραγωγή του.

- Μειώνει τις μεταβολές του όγκου, αν και συνήθως αποτελούν πλεονέκτημα για τις περισσότερες εφαρμογές, ιδίως σε αυτές που οι χωροταξικές προδιαγραφές είναι περιορισμένες.

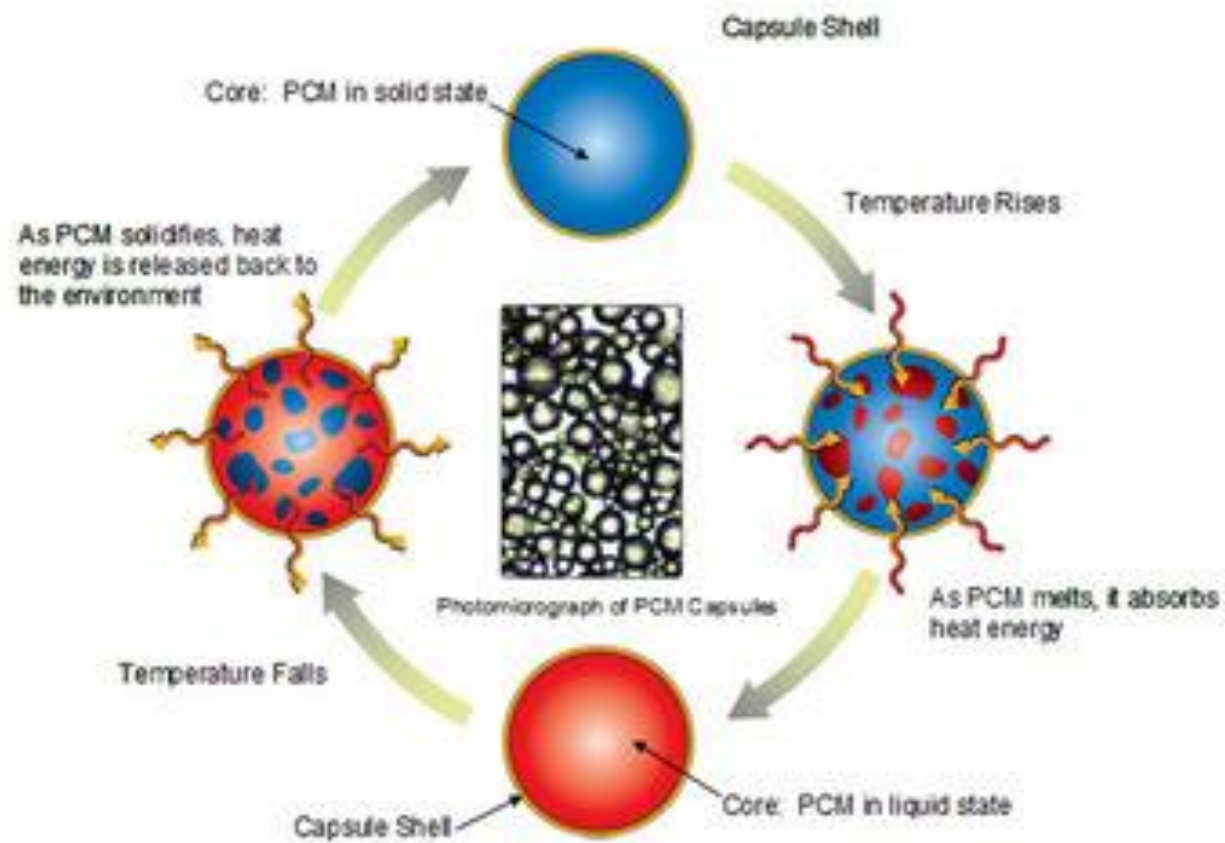
6.7.2 Microencapsulation

Σε αυτή την μέθοδο γίνεται τοποθέτηση του P.C.M. σε κάψουλες με διάμετρο μικρότερη του 1 mm. Η μέθοδος έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτή της macroencapsulation , αλλά παρουσιάζει επιπλέον τα παρακάτω πλεονεκτήματα :

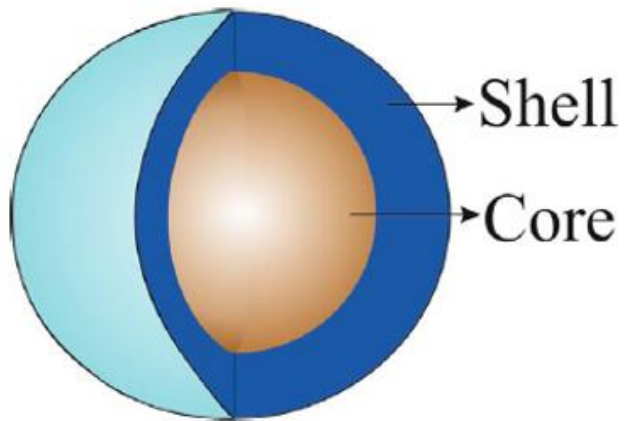
- Βελτιώνει τη μετάδοση θερμότητας στον περιβάλλοντα χώρο λόγω του μεγάλου ποσοστού της επιφάνειας συναλλαγής.
- Βελτιώνει την σταθερότητα της κυκλικής φόρτισης καθώς ο διαχωρισμός των φάσεων είναι ιδιαίτερα περιορισμένος λόγω των μικροσκοπικών διαστάσεων της κάψουλας που εμπεριέχει το P.C.M.

Τα σύνθετα υλικά είναι υλικά που αποτελούνται από ένα P.C.M. και τουλάχιστον ένα άλλο υλικό. Το άλλο υλικό χρησιμοποιείται για να βελτιώσει τουλάχιστον μια από τις ιδιότητες του P.C.M.. Η χρήση σύνθετων ενώσεων έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα :

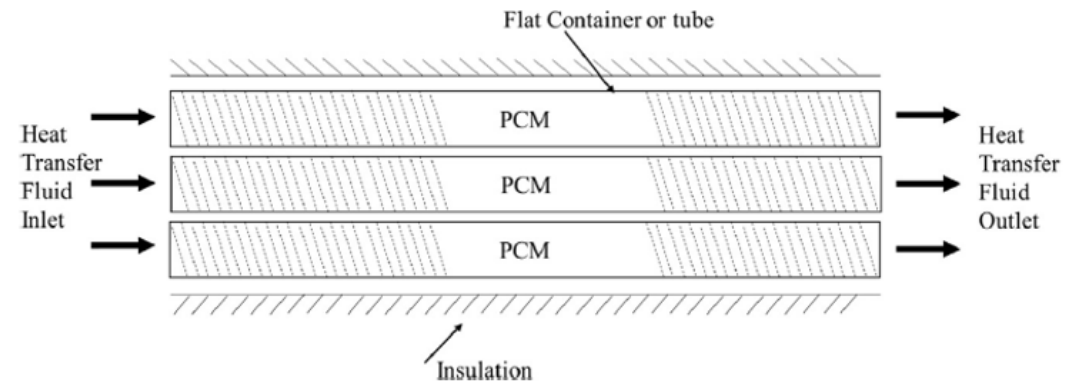
- Βελτιώνει τη σταθερότητα της κυκλικής φόρτισης, αφού οι μικροσκοπικές δομές μειώνουν ουσιαστικά το διαχωρισμό των φάσεων στο τήγμα.
- Βελτιώνει τη μεταφορά θερμότητας, μέσω της προσθήκης υλικών με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα όπως για παράδειγμα ο γραφίτης. [13] , [14] , [15]



Εικόνα 6.7.2.1 : PCM Encapsulation



Εικόνα 6.7.2.2 : Core-Shell encapsuled PCM δοχείων



Εικόνα 6.7.2.3 : PCM encapsulation με χρήση επίπεδων

6.8 Συμβατότητα των PCM με άλλα υλικά

Η συμβατότητα των P.C.M. με άλλα υλικά είναι σημαντική τόσο για τη διάρκεια ζωής του δοχείου ή της κάψουλας που φέρει το P.C.M., όσο και για μία πιθανή διαρροή του τήγματος προς τον περιβάλλοντα χώρο που μπορεί να προξενήσει προβλήματα. Τα πιο συνήθη προβλήματα αναφορικά με τη συμβατότητα των υλικών και τα P.C.M. είναι τα ακόλουθα :

- Διάβρωση των μετάλλων όταν έρθουν σε επαφή με ανόργανα P.C.M.
- Απώλεια σταθερότητας δομής των πλαστικών όταν έρχονται σε επαφή με οργανικά P.C.M.
- Μετακίνηση υγρών ή αερίων διαμέσου πλαστικών δοχείων, τα οποία επηρεάζουν τη δομή του περιεχόμενου ανόργανου ή οργανικού P.C.M. [13]

6.9 Εφαρμογές PCM

Τα PCM χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και διαφορετικών πεδίων. Μερικές από τις εφαρμογές τους είναι οι ακόλουθες:

- Συστήματα ηλιακής ενέργειας
- Κλιματισμός κτιρίων
- Σε κτίρια χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης
- Αποθήκευση ενέργειας,
- Ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας,
- Σε βοηθητικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας,
- Σε αντλίες θερμότητας,
- Διαστημικές εφαρμογές,
- Συστήματα ψύξης φορητών Η/Υ,
- Συστήματα τηλεπικοινωνίας και σε πολλές άλλες εφαρμογές.

Όσον αφορά στον κλιματισμό κτιρίων υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι εφαρμογής των PCM:

1. PCM μέσα στην τοιχοποιία.
2. PCM σε άλλα δομικά στοιχεία εκτός των τοίχων.
3. PCM σε δοχεία αποθήκευσης θερμότητας.

Τα πρώτα δύο συστήματα είναι παθητικά, δηλ. η αποθηκευμένη θερμότητα ή το ψύχος εκλύονται αυτόματα όταν η εσωτερική ή εξωτερική θερμοκρασία ανέβει ή κατέβει πέραν της θερμοκρασίας αλλαγής φάσεως. Το τρίτο είναι ένα ενεργητικό σύστημα όπου η αποθηκευμένη θερμότητα βρίσκεται σε ένα θερμικά μονωμένο δοχείο. Έτσι χρησιμοποιείται μόνο κατά βούληση και όχι αυτόματα.

Οι εφαρμογές αυτές είναι πολύ ενδιαφέρουσες στην περίπτωση ελαφρών κατασκευών κτιρίων, οι οποίες έχουν μικρή μάζα αποθήκευσης θερμότητας με αποτέλεσμα η ημερήσια διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας να είναι μεγάλη. [16]

6.10 Μέθοδοι προσομοίωσης αλλαγής φάσης

Το κύριο χαρακτηριστικό των PCM είναι η σχέση ενθαλπίας - θερμοκρασίας, η οποία και καθορίζει την ικανότητά τους να αποθηκεύουν θερμότητα. Αυτή η σχέση καθορίζεται πειραματικά μέσω θερμιδομετρικών μεθόδων. Τα PCM είναι ιδιαίτερα δύσκολα δείγματα λόγω της μεγάλης θερμικής μάζας τους, αλλά και γιατί συχνά είναι ετερογενή υλικά ή παρουσιάζουν χαρακτηριστικά που εξαρτώνται από τον όγκο. Η μεταφορά θερμότητας κατά την αποθήκευση στο PCM είναι ένα παροδικό, μη γραμμικό φαινόμενο, με μια μεταβαλλόμενη διεπιφάνεια στερεού - υγρού, (φαινόμενο γνωστό και ως κινούμενο συνοριακό πρόβλημα). Η μη γραμμικότητα εισάγει μεγάλες δυσκολίες στη μελέτη και οι αναλυτικές λύσεις για τα προβλήματα αλλαγής φάσης είναι γνωστές μόνο για ορισμένες φυσικές καταστάσεις που έχουν απλή γεωμετρία και απλές οριακές συνθήκες.

Τα προβλήματα αλλαγής φάσης συνήθως επιλύονται αριθμητικά μέσω πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων. Το φαινόμενο αλλαγής φάσης πρέπει να μοντελοποιηθεί ξεχωριστά εξαιτίας της μη γραμμικής φύσης του προβλήματος. Ενώ έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι επίλυσης, οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες είναι οι παρακάτω:

- η μέθοδος της ενθαλπίας
- η μέθοδος της ενεργού θερμοχωρητικότητας.

Αυτές οι μέθοδοι είναι ικανές να προσεγγίσουν PCM με ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών αλλαγής φάσης. Και οι δύο προαναφερθείσες μέθοδοι ανήκουν στην κατηγορία των μεθόδων σταθερού τομέα (fixed-domain methods), οι οποίες αντιμετωπίζουν τη στερεή και την υγρή φάση ως ένα ενιαίο μέσο.

Η γενική εξίσωση που παρατίθεται παρακάτω, γνωστή ως η συνθήκη του Stephan, περιγράφει την παραπάνω διαδικασία:

$$\lambda \rho \left(\frac{ds}{dt} \right) = k_s \left(\frac{\delta T_s}{\delta t} \right) - k_l \left(\frac{\delta T_l}{\delta t} \right)$$

όπου: λ η λανθάνουσα θερμότητα τήξης, ρ η πυκνότητα, $s(t)$ η θέση της επιφάνειας, k η θερμική αγωγιμότητα, t ο χρόνος και T η θερμοκρασία. Οι δείκτες s και l υποδεικνύουν τις φάσεις του στερεού και του υγρού αντίστοιχα.

6.10.1 Μέθοδος ενθαλπίας

Η μέθοδος της ενθαλπίας βασίζεται στην αριθμητική επίλυση της διαφορικής εξίσωσης μεταφοράς ενθαλπίας, η οποία χρησιμοποιείται στην ανάλυση φαινομένων αλλαγής φάσης υπό μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας. Βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι δεν είναι απαραίτητο να είναι γνωστές οι οριακές συνθήκες στο κινούμενο μέτωπο αλλαγής φάσης, διευκολύνοντας έτσι τη διαφοροποίηση του χώρου. Μια από τις πιο αξιόπιστες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για να δώσουν αποτελέσματα σύμφωνα με τη μέθοδο της ενθαλπίας είναι η μέθοδος υπερπήδησης κόμβων (Node jumping), κατά την οποία το πλέγμα παραμένει σταθερό και το μέτωπο αλλαγής φάσης βρίσκεται συνεχώς πάνω σε ορισμένο κόμβο του πλέγματος. Κατά τη μοντελοποίηση βάσει της μεθόδου της ενεργού ενθαλπίας, χρησιμοποιούνται οι εξής παραδοχές για την τήξη και τη στερεοποίηση των PCM:

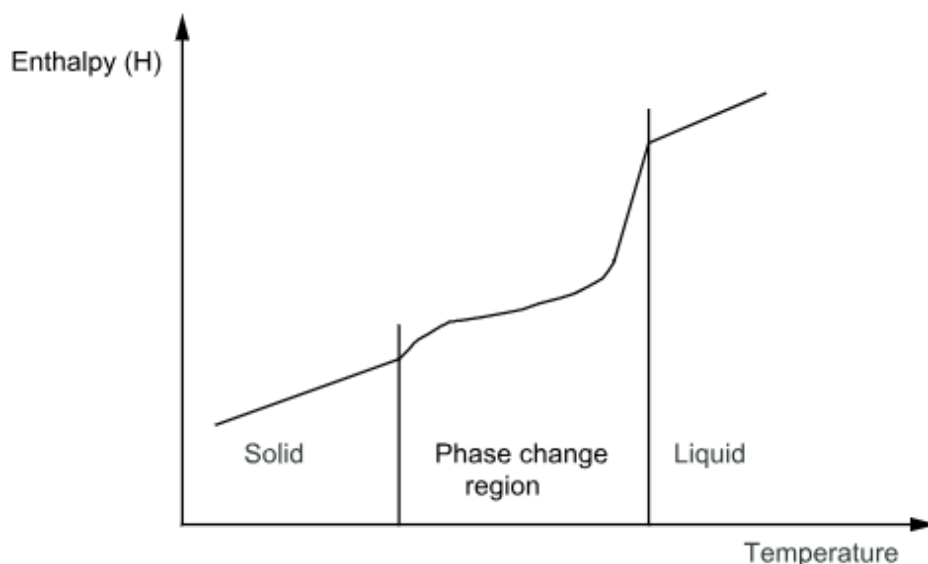
- το PCM μπορεί, σε μακροσκοπική κλίμακα, να θεωρηθεί ως ένα συνεχές μέσο
- η μεταφορά θερμότητας δια συναγωγής στο εσωτερικό του PCM είναι αμελητέα
- οι θερμικές ιδιότητες (θερμοχωρητικότητα και θερμική αγωγιμότητα) του PCM είναι σταθερές σε κάθε φάση, η θερμοχωρητικότητα όμως μπορεί να είναι ασυνεχής μεταξύ στερεής και υγρής φάσης. Αντίθετα, η θερμική αγωγιμότητα θεωρείται ανεξάρτητη της κατάστασης του PCM
- η αλλαγή φάσης λαμβάνει χώρα υπό σταθερή πίεση

- η υπόψυξη είναι αμελητέα
- για PCM πολλών συστατικών που υποβάλλονται σε μετασχηματισμό σε ένα εύρος θερμοκρασιών δεν θεωρούνται φαινόμενα διαχωρισμού κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης

Αναπτύσσοντας τη μέθοδο της ενθαλπίας, το πρόβλημα αλλαγής φάσης απλοποιείται αφού η εξίσωση του Stephan που αναφέραμε παραπάνω ισχύει και για τις δύο φάσεις, οπότε οι συνθήκες της διεπιφάνειας επιτυγχάνονται αυτόματα και δημιουργείται μία πολτώδης ζώνη ανάμεσα στις δύο φάσεις του στερεού και του υγρού. Χάρη σε αυτή τη ζώνη αποφεύγονται απότομες ασυνέχειες που θα μπορούσαν να προκαλέσουν αριθμητικές αστάθειες. Το πάχος και η ποιότητα διακριτοποίησης αυτής της ζώνης είναι καθοριστικής σημασίας για τη συμπεριφορά του μοντέλου. Η μέθοδος της ενθαλπίας μπορεί να αντιμετωπίσει και πολτώδη και ισοθεμικά προβλήματα. Η θερμοκρασία σε ένα συγκεκριμένο σημείο του πλέγματος μπορεί να ταλαντώνεται με το χρόνο.

Η μέθοδος της ενθαλπίας έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε πολλές περιπτώσεις και είναι η πιο αρμόζουσα για τυπικές εφαρμογές, υπό τον περιορισμό ότι δεν υπάρχει καμία μεταβολή στο αριθμητικό μοντέλο στην διεπιφάνεια.

Εικόνα 6.10.1 : Σχέση ενθαλπίας-θερμοκρασίας κατά την αλλαγή φάσης .[17]



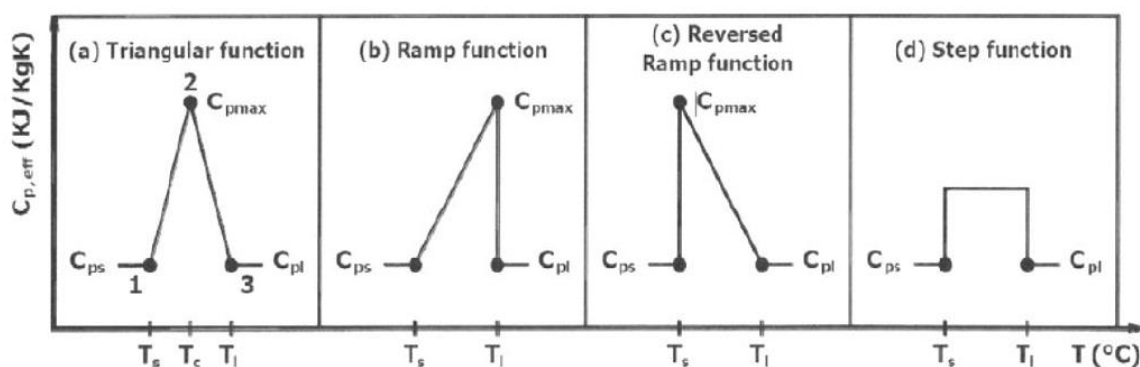
Οι καμπύλες ενθαλπίας - θερμοκρασίας επιτρέπουν την αξιολόγηση της διακύμανσης των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών σε σχέση με τη θερμοκρασία. Η μέθοδος της ενθαλπίας είναι μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τη μελέτη οποιουδήποτε υλικού και όχι μόνο των Υλικών Αλλαγής Φάσης.

6.10.2 Μέθοδος ενεργού θερμοχωρητικότητας

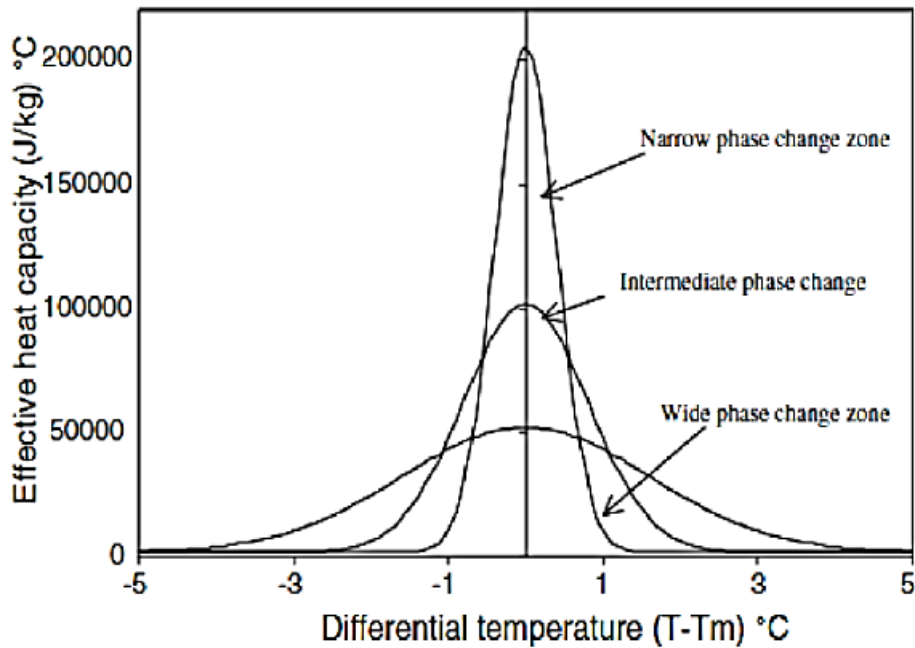
Πολλά Υλικά Αλλαγής Φάσης περιέχουν συστατικά που υποβάλλονται σε χημικές αντιδράσεις όχι μόνο κατά την παραγωγή τους αλλά και μετά την ενσωμάτωσή τους σε δομικά στοιχεία ενός κτιρίου. Η εμφάνιση αυτή των χημικών αντιδράσεων μπορεί να αλλάξει τη θερμική συμπεριφορά ενός συγκεκριμένου υλικού αφού συνοδεύεται από παραγωγή ή απορρόφηση θερμότητας, ανάλογα με το είδος της αντίδρασης. Τα φαινόμενα αυτά εντείνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Όταν οι αντιδράσεις γίνονται γρηγορότερα, κυρίως για ορισμένες συνιστώσες του υλικού, προκύπτει αυξημένος κίνδυνος πυρκαγιάς. Εξαιτίας των παραπάνω, αναπτύχθηκε το μοντέλο της ενεργού θερμοχωρητικότητας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, το οποίο περιλαμβάνει τις θερμικές επιδράσεις των χημικών αντιδράσεων και των διεργασιών αλλαγής φάσης.

Η μέθοδος της ενεργού θερμοχωρητικότητας είναι εξαιρετικά εύχρηστη αφού ακολουθεί τη διαδικασία της συνηθισμένης αριθμητικής λύσης της διαφορικής εξίσωσης μεταφοράς ενέργειας. Η θερμοχωρητικότητα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αλλαγής φάσης είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, συμβολίζεται με $C_{p,eff}(T)$ και ονομάζεται συνάρτηση της Ενεργού Θερμοχωρητικότητας. Η επιλογή της σωστής συνάρτησης $C_{p,eff}(T)$ είναι εξέχουσας σημασίας. Η ενεργός θερμοχωρητικότητα του υλικού είναι ευθέως ανάλογη της αποθηκευμένης ενέργειας, της ενέργειας που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης αλλά και της ειδικής θερμότητας, ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογη του θερμοκρασιακού εύρους τήξης ή στερεοποίησης.

Τα μόνα δεδομένα τα οποία απαιτούνται ώστε να δημιουργηθούν απλές συναρτήσεις $C_{p,eff}(T)$ είναι η θερμότητα αλλαγής φάσης του PCM, που συμβολίζεται ως H , οι θερμοκρασίες T_s και T_l στο τέλος των δύο περιοχών φάσεων του PCM και οι αντίστοιχες θερμοχωρητικότητες του υλικού σε αυτά τα σημεία C_{ps} και C_{pl} αντίστοιχα.



Εικόνα 6.10.2.1 : Συναρτήσεις ενεργού θερμοχωρητικότητας $C_{p,eff}(T)$



Εικόνα 6.10.2.2 : Μεταβολή της ενεργού θερμοχωρητικότητας συναρτήσει της διαφορικής θερμοκρασίας

Σημειώνεται ότι σε όλες τις προσεγγίσεις εμφανίζεται ένα ασυνεχές σημείο αναβαθμού στη συμπεριφορά της ενεργούς θερμοχωρητικότητας, το οποίο μπορεί να προκαλέσει αριθμητικές ταλαντώσεις. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της αδυναμίας που υπάρχει να αξιολογηθεί η μήτρα του μεγέθους της χωρητικότητας.

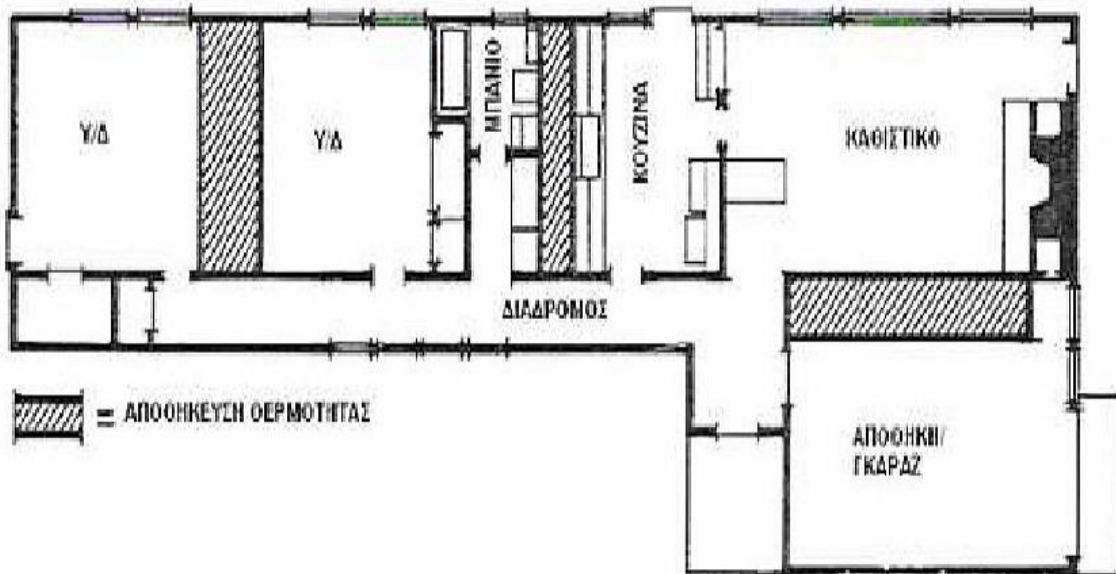
Η μέθοδος της Ενεργού Θερμοχωρητικότητας μπορεί να αποδειχτεί ιδιαίτερα χρήσιμη για την εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός υλικού ακόμα και σε ακραίες περιπτώσεις, όπως παραδείγματος χάρη, στην περίπτωση πυρκαγιάς σε ένα κτίριο.

Χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου θα γίνει και στην παρούσα μελέτη αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε δεξαμενή με PCM.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Εφαρμογές PCM για αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε κτιριακές εγκαταστάσεις

7.1 Ιστορική αναδρομή στις εφαρμογές PCM

Η Δρ. Maria Telkes ήταν η πρώτη που ασχολήθηκε με την εφαρμογή των Υλικών Αλλαγής Φάσης σε κτίρια. Το 1948 κατασκευάστηκε το πρώτο μεγάλης κλίμακας πείραμά της στην περιοχή Dover Mass, στη Βοστώνη των ΗΠΑ. Η επιλογή της περιοχής από την Telkes έγινε βάσει των ετήσιων επιπέδων ηλιοφάνειας, που για την περιοχή ήταν πάνω από τις μέσες τιμές, εξασφαλίζοντας έτσι τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση του ηλιακού συστήματος. Το εν λόγω κτίσμα διέθετε έναν όροφο πέντε δωματίων εκ των οποίων τα δύο ήταν υπνοδωμάτια, επιφάνειας 135 m². Η ηλιακή ακτινοβολία παρείχε θερμότητα μέσω 28 ηλιακών συλλεκτών, η οποία στη συνέχεια οδηγείτο μέσω ανεμιστήρων σε τρία δοχεία αποθήκευσης θερμότητας. [9], [18]



Εικόνα 7.1.1 : Κάτοψη πρώτου σπιτιού με χρήση PCM από την Telkes

Τα δοχεία χρησιμοποιούσαν ως PCM το άλας του Glauber. Συνολικά περιλαμβάνονταν 21 τόνοι PCM, συνολικής αποθηκευτικής ικανότητας 11 MJ και σημείου τήξης 32 °C. Με βάση τα οικονομικά δεδομένα της εποχής θεωρείται μία ακριβή κατασκευή, αφού κόστισε 20.000 \$, από τις οποίες οι 3.000 \$ αφορούσαν στο θερμαντικό σύστημα (συνολικό ποσοστό κόστους 15%).

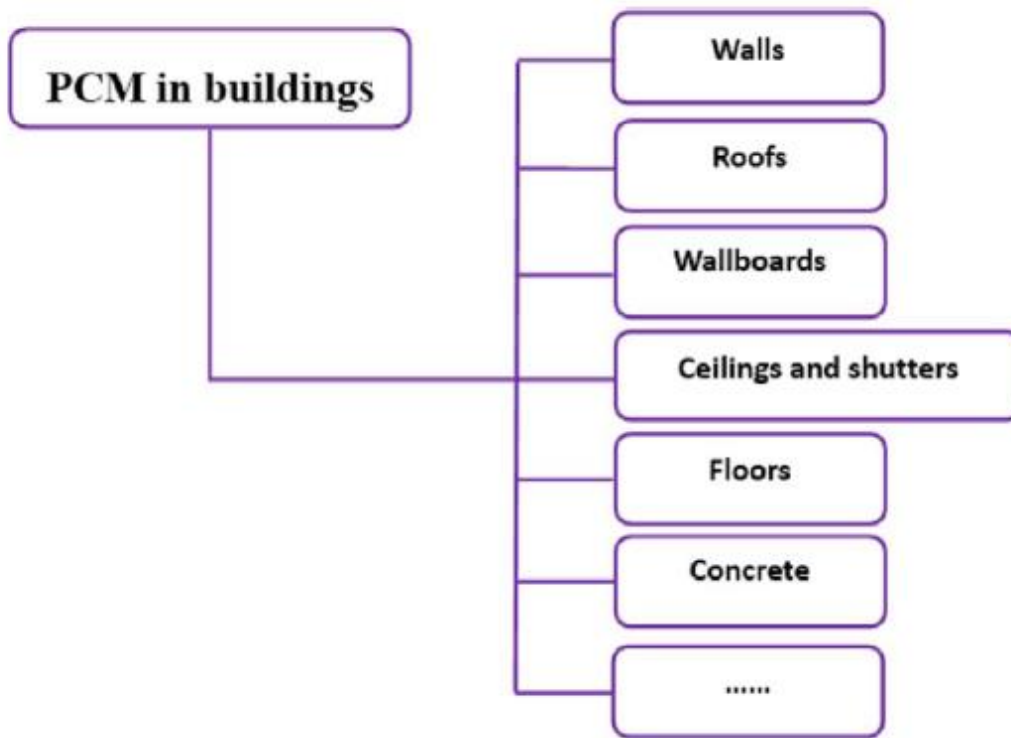
Τα δύο πρώτα έτη λειτουργίας του, το σύστημα θέρμανσης αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματικό, ακόμα και σε περιόδους με επτά συνεχόμενες ημέρες συννεφιάς. Λειτουργήσε με επιτυχία παρέχοντας ένα άνετο περιβάλλον περίπου 21°C , χωρίς να χρειαστεί οποιοδήποτε βοηθητικό σύστημα θέρμανσης. Τον τρίτο χρόνο όμως, το σύστημα άρχισε να εμφανίζει σοβαρά προβλήματα, καθώς το άλας του Glauber είχε διαχωριστεί σε διάλυμα και άνυδρο άλας (Na_2SO_4), χάνοντας έτσι την αποθηκευτική του ιδιότητα. Παρατηρήθηκε επίσης ότι τα δοχεία αποθήκευσης άρχισαν να διαβρώνονται, με αποτέλεσμα να αυξάνονται δραματικά οι απώλειες του συστήματος. [9]

Το 1953 ο Lawrence Gardshire κατασκεύασε ένα ηλιακό σπίτι με PCM στην περιοχή του New Mexico. Το κτίριο ήταν διώροφο και κάθε όροφος είχε επιφάνεια 102 m^2 . Ο Gardshire, όπως και η Telkes, χρησιμοποίησε δοχεία αποθήκευσης με PCM, χωρητικότητας 1.9 m^3 . Αντί όμως να τα εγκαταστήσει ανάμεσα στα δωμάτια, τα εγκατέστησε στη στέγη, δίπλα στους ηλιακούς συλλέκτες. Η καινοτομία ήταν ότι πρόσθεσε διφθορικό νάτριο στο άλας του Glauber, ως πηκτικό παράγοντα, έτσι ώστε να υποβοηθάται η στερεοποίηση του αλάτος και να αποφεύγεται κατά το δυνατόν ο διαχωρισμός του. Δυστυχώς, και αυτή η κατασκευή αντιμετώπισε τα ίδια προβλήματα με την κατασκευή της Telkes, αν και πιο καθυστερημένα, λόγω αύξησης της διάρκειας ζωής του PCM έπειτα από την προσθήκη του πηκτικού παράγοντα. [9] , [19]

Η επόμενη προσπάθεια κατασκευής ηλιακού σπιτιού με PCM έγινε το 1959 στον Καναδά από τους J.Hodgins και T.Hoffman. Το κτίριο ήταν δύο ορόφων, επιφάνειας 111 m^2 . Η M.Telkes, λόγω της προηγούμενης εμπειρίας της, ανέλαβε τον σχεδιασμό της αποθήκευσης ενέργειας. Και σε αυτή την περίπτωση, η Telkes επέλεξε ως Υλικό Αλλαγής Φάσης το άλας του Glauber (ένυδρο άλας, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, σημείο τήξης στους 32°C). [9] , [18]

Προκειμένου να ξεπεραστούν τα προαναφερθέντα προβλήματα, το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας εκτός από τους 12 τόνους PCM που περιλάμβανε, εμπλουτίστηκε με πυριτικό άλας νατρίου και χρώμιο, ουσία που εμποδίζει τη διάβρωση. Το PCM τοποθετήθηκε σε κυλινδρικά δοχεία χάλυβα, διαμέτρου 0.1 m και ύψους 0.6 m , τα οποία στηρίχθηκαν κάθετα στους τοίχους. Παρά τα ικανοποιητικά αποτελέσματα, οι προσπάθειες δεν συνεχίστηκαν από αυτή την ομάδα επιστημόνων. [9] , [19]

7.2 Κατηγορίες εφαρμογών PCM σε κτίρια



Εικόνα 7.2.1 : Κατηγορίες εφαρμογής PCM σε κτίρια

Στην εικόνα 7.2.1 παρατίθενται οι κατηγορίες εφαρμογής των PCM στα κτίρια. Εφόσον τα PCM συνήθως καταλήγουν να είναι σχεδόν θερμοστατικά κατά την αλλαγή φάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της θερμοκρασίας των συστημάτων.

Η χρήση των PCM για την αποθήκευση ενέργειας είναι μια αποτελεσματική μέθοδος βελτίωσης της αποδοτικότητας στη χρήση ενέργειας και της προστασίας του περιβάλλοντος. Επιπλέον, τα PCM βοηθούν στην εξομάλυνση των διακυμάνσεων της ζήτησης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. [20]

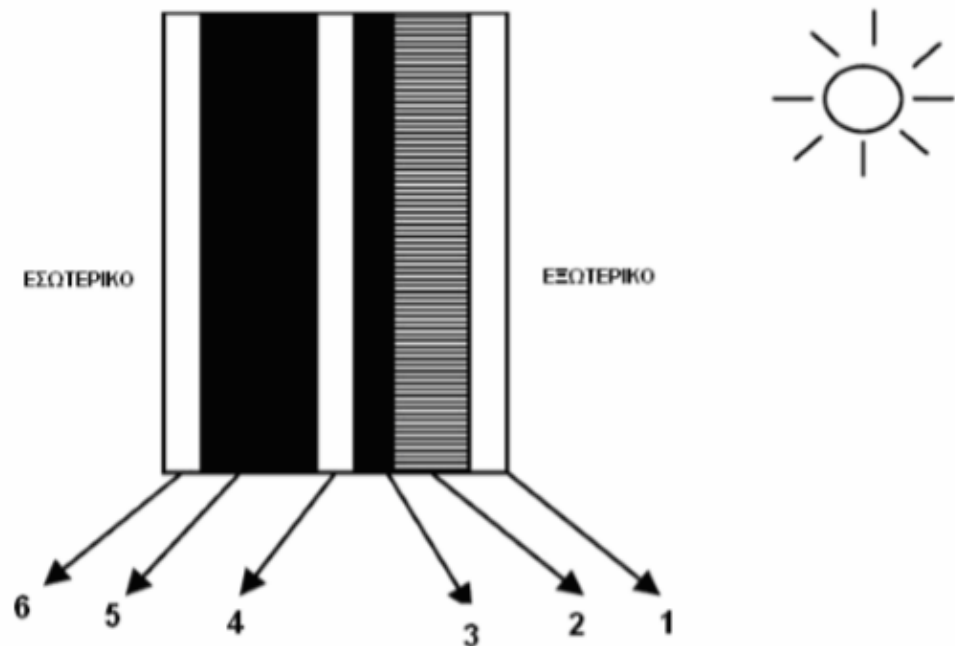
7.2.1 Ηλιακοί τοίχοι

Ένα σύστημα αποθήκευσης θερμότητας με PCM που συναντάται στην τοιχοποιία, είναι οι «ηλιακοί τοίχοι» (solar walls). Η ιδιότητά τους να απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία που δέχονται οφείλεται στο υλικό αλλαγής φάσης που εμπεριέχουν. Με λίγα λόγια, ένας ηλιακός τοίχος είναι στην ουσία ένας τοίχος Trombe στον οποίο έχει αντικατασταθεί η λιθοδομή με υλικό αλλαγής φάσης. Για να γίνει πλήρως κατανοητή η λειτουργία των ηλιακών τοίχων, ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των τοίχων Trombe.

Ο τοίχος Trombe αποτελεί ένα θεμελιώδες παράδειγμα έμμεσου ενεργειακού κέρδους στις κτιριακές εφαρμογές. Στην ουσία πρόκειται για έναν πλίνθινο τοίχο που τοποθετείται στη νότια πλευρά ενός οικοδομήματος. Σε απόσταση περίπου 4 ιντσών μπροστά από την επιφάνειά του τοποθετείται γυάλινη ή πλαστική, μονή ή διπλή, υαλοκατασκευή. Η δέσμευση της ηλιακής ενέργειας πραγματοποιείται στο κενό που δημιουργείται μεταξύ τοίχου και υαλοκατασκευής. Η εξωτερική επιφάνεια του τοίχου φέρει μαύρο χρωματισμό προς απορρόφηση της θερμότητας, η οποία με τη σειρά της αποθηκεύεται στη μάζα του. Η θερμική συνεισφορά του τοίχου προς το χώρο που είναι εγκατεστημένος, ολοκληρώνεται μέσα σε ένα χρονικό διάστημα ωρών, ξεκινώντας τη στιγμή που η εσωτερική θερμοκρασία του τελευταίου γίνει μικρότερη αυτής στην επιφάνεια του τοίχου. Οι παραδοσιακοί τοίχοι Trombe βασίζονται στη λειτουργία τους στην εκμετάλλευση της αισθητής θερμότητας που λαμβάνουν μέσω δέσμευσης της ηλιακής ενέργειας. Η χρήση υλικών αλλαγής φάσης σε συνεργασία με τους τοίχους Trombe δίνει τη δυνατότητα μεγαλύτερης ενεργειακής αποθήκευσης ανά μονάδα μάζας, καθώς εκμεταλλεύεται εκτός της αισθητής και τη λανθάνουσα θερμότητα. Η αρχική αυτή σκέψη οδήγησε στην τροποποίηση των τοίχων Trombe, ενσωματώνοντας τα υλικά αλλαγής φάσης και δημιουργώντας τους ηλιακούς τοίχους. [16]

Οι ηλιακοί τοίχοι αποτελούνται από έξι βασικά τμήματα όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 7.2.1.1. Ξεκινώντας από την εξωτερική πλευρά του, ο ηλιακός τοίχος φέρει γυάλινη επιφάνεια (1) η οποία ακολουθείται από διαφανές μονωτικό υλικό (2). Τα δυο αυτά υλικά επιτρέπουν στην ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος να τα διαπεράσει, αποτρέποντας ταυτόχρονα τη μετάδοση θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία. Επόμενο στη σειρά συστατικό είναι το PCM (3). Τοποθετημένο σε διαφανές πλαστικό δοχείο από πολυεστέρα, απορροφά και αποθηκεύει την ενέργεια κυρίως με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Ακολουθεί ένα διάκενο (4) από το οποίο διέρχεται και θερμαίνεται ο αέρας για τον αερισμό και οδηγείται στο χώρο. Στο τέλος, έχοντας φτάσει στην εσωτερική πλευρά του τοίχου, βρίσκονται δυο ακόμη βασικά δομικά συστατικά του, η μόνωση (5) και ο σοβάς (6). Συχνά χρησιμοποιούμενα PCM στους τοίχους

αυτούς είναι τα ένυδρα άλατα και οι υδρογονάνθρακες. Πολλές φορές γίνεται χρήση ειδικών μεταλλικών πρόσθετων για την αύξηση της συνολικής αγωγιμότητας και απόδοσης.



Εικόνα 7.2.1.1 : Δομή ηλιακών τοίχων

Οι ηλιακοί τοίχοι παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλα συστήματα:

- Καταλαμβάνουν μικρότερο όγκο και είναι πολύ ελαφρύτεροι για δεδομένη ποσότητα αποθηκευμένης θερμότητας, σε σχέση με άλλους τοίχους αποθήκευσης ενέργειας, λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας των PCM.
- Χαρακτηρίζονται από υψηλής αποδοτικότητας μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε λανθάνουσα θερμότητα. Αυτό ουσιαστικά οφείλεται στη χρήση του γυαλιού και του διαφανούς μονωτικού υλικού που το ακολουθεί. Το πρώτο επιτρέπει την άμεση διέλευση και απορρόφηση της ακτινοβολίας από το PCM ενώ το δεύτερο εξασφαλίζει μηδενικές απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας στον περιβάλλοντα χώρο.
- Συντελούν στη μείωση των θερμικών απωλειών του χώρου. Μετά από πειράματα διαπιστώθηκε ότι οι απώλειες αγωγής είναι μειωμένες στις επιφάνειες όπου βρίσκεται εγκατεστημένος κάποιος ηλιακός τοίχος. Συντελούν στη μείωση των θερμικών απωλειών του χώρου. Μετά από πειράματα διαπιστώθηκε ότι οι απώλειες αγωγής είναι μειωμένες στις επιφάνειες όπου βρίσκεται εγκατεστημένος κάποιος ηλιακός τοίχος. [21]

7.2.2 Γυψοσανίδες με ενσωματωμένα PCM

Οι γυψοσανίδες με ενσωματωμένα PCM θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν τις παραδοσιακές γυψοσανίδες κατά τη διάρκεια της κατασκευής ή και της ανακαίνισης ενός κτιρίου, παρέχοντάς του τη δυνατότητα θερμικής αποθήκευσης. Η αποθηκευμένη θερμότητα μπορεί να διανέμεται σε όλη του την έκταση, ενισχύοντας έτσι το παθητικό σύστημα και περιορίζοντας τα απαιτούμενα μέγιστα ηλεκτρικά φορτία ψύξης - θέρμανσης.

Οι γυψοσανίδες με PCM αποτελούν μία εξαιρετικά ενδιαφέρουσα εφαρμογή για κτιριακές κατασκευές. Κατά τη διάρκεια των προηγούμενων 20 ετών, πολλά είδη καψουλών μεγάλων διαστάσεων διατέθηκαν στο εμπόριο τόσο για ενεργητικά όσο και για παθητικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων άμεσου κέρδους. Παρόλα αυτά, η επιφάνεια των περισσότερων εμπορικών προϊόντων με αποθηκευμένα PCM σε κάψουλες, δεν ήταν ικανή να μεταδώσει θερμότητα στο κτίριο έπειτα από την τήξη του PCM λόγω άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Στο πλαίσιο αυτό έχουν διεξαχθεί πολλές έρευνες, οι οποίες αναφέρονται παρακάτω. [22]

Οι Peirpo et al μελέτησαν μια γυψοσανίδα με ενσωματωμένο PCM ως μέσο αποθήκευσης σε μια ελαφριά κατασκευής κατοικία έκτασης 120 m² στο Madison, Wisconsin, η οποία διέθετε καλή μόνωση και μια μεγάλη νότια επιφάνεια κατασκευασμένη από γυαλί. Το κτίριο μπορούσε να επιτύχει εξοικονόμηση ενέργειας έως και 3GJ το χρόνο, ή αλλιώς το 15 % του ετήσιου ενεργειακού κόστους. Επιπλέον, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης, η βέλτιστη αποθήκευση ενέργειας προκύπτει όταν το PCM έχει θερμοκρασία τήξης περίπου 1 έως 3^oC πάνω από τη μέση θερμοκρασία δωματίου. [23]

Οι Stetiu και Feustel, μελέτησαν τη χρήση διπλής γυψοσανίδας με PCM για την περαιτέρω αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας ενός κτιρίου, έτσι ώστε οι θερμοκρασίες του δωματίου να διατηρηθούν πιο κοντά στα ανώτερα όρια θερμικής άνεσης, χωρίς τη χρήση μηχανικής ψύξης. Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση μιας οικίας με υψηλά εσωτερικά φορτία και δεδομένες καιρικές συνθήκες για την περιοχή Sunnyvale, California, έδειξαν σημαντική πτώση της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα όταν η θερμότητα αποθηκεύεται στο PCM των γυψοσανίδων. Αν και οι προσομοιώσεις έδειξαν σημαντικά πιθανά οφέλη από τη χρήση των PCM στους τοίχους, οι ερευνητές κατέληξαν στο ότι η ψύξη του κτιρίου μέσω της κίνησης του αέρα στον χώρο αποτελεί έναν μη αποδοτικό τρόπο μεταφοράς της θερμότητας. Η κίνηση του αέρα κοντά στους τοίχους, η οποία καθορίζει και το ποσό της συναλλασσόμενης θερμότητας, είναι σχετικά μικρή. Σε περιόδους λοιπόν που η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι σχετικά υψηλή

καθώς και στη διάρκεια της νύχτας θα ήταν αποδοτική η εξαναγκασμένη παροχή αέρα κατά μήκος των επιφανειών των τοίχων προκειμένου να διευκολύνεται η ανταλλαγή θερμότητας. Η μειωμένη ικανότητα απόρριψης του αέρα που χρησιμοποιείται για ψύξη το καλοκαίρι απαιτεί είτε αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας είτε μείωση του ποσού της θερμότητας που αποθηκεύεται. [24]

Ο Neeper εξέτασε τη δυναμική μίας γυψοσανίδας με ενσωματωμένα λιπαρά οξέα και παραφίνες κεριά ως PCM τα οποία υπόκειντο σε ημερήσια θερμοκρασιακή διακύμανση του δωματίου, χωρίς όμως να προσπίπτει άμεσα σε αυτά ηλιακή ακτινοβολία. Η παρατήρηση που έγινε από τον συγγραφέα είναι ότι η μέγιστη τιμή της ημερήσιας αποθηκευμένης ενέργειας προκύπτει όταν η τιμή της θερμοκρασίας τήξης του PCM στις κάψουλες πλησιάζει την τιμή της θερμοκρασίας που δημιουργεί την αίσθηση της άνεσης. Βρέθηκε μάλιστα ότι η ημερήσια αποθηκευμένη ενέργεια μειώνεται όταν η αλλαγή φάσης πραγματοποιηθεί μέσα σε ένα εύρος θερμοκρασιών. [25]

Οι προσομοιώσεις των «ενεργειακών» κτιρίων βοηθούν στην εκτίμηση των διαφόρων εφαρμογών των PCM για λόγους αποθήκευσης θερμότητας στα κτίρια. Έτσι, το Fraunhofer Institute στη Γερμανία διεξήγαγε μια προσομοίωση σχετικά με την θερμική συμπεριφορά των κτιριακών στοιχείων προκειμένου να συγκρίνει τη δυναμική απόδοση διαφόρων ειδών τοίχου που περιείχαν ποικίλα PCM. Ως βάση τους χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο που εξετάζει την αλλαγή φάσης και είναι εμπειρικά αποδεδειγμένο από μετρήσεις σε δείγματα τοίχων, διαστάσεων 0,5x0,5 m². Ερευνήθηκε η επίδραση που έχουν τα PCM συναρτήσει της ποσότητάς τους, του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης και της κατασκευής και χρήσης του κτιρίου. Με τη βοήθεια θερμογράφων αποτυπώθηκε ποσοτικά η επίδραση του PCM στα κατασκευαστικά υλικά, δηλαδή σε τέσσερα δείγματα τοίχων με διαφορετική ποσότητα PCM στο καθένα, τα οποία θερμάνθηκαν σε ειδικό φούρνο και στη συνέχεια παρακολουθήθηκε η ψύξη τους. Η ποικιλία στις τιμές της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας, συναρτήσει του χρόνου, αποδεικνύει την επίδραση των ΥΑΦ. Όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα του PCM, τόσο περισσότερο διαρκεί η αποβολή της θερμότητας που αυτό έχει απορροφήσει. Επομένως, σε συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος, η θερμική μάζα ενός στοιχείου του κτιρίου μπορεί να αυξηθεί σημαντικά λόγω της διαδικασίας αλλαγής φάσης, έτσι ώστε η θερμική άνεση που συνδέεται με τις βαριές κατασκευές των κτιρίων να μπορεί να προσεγγισθεί και από κατασκευαστικά υλικά που προορίζονται συνήθως για πιο ελαφριές κατασκευές.

Ωστόσο, οι γυψοσανίδες με PCM παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα. Η κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης ποικίλει ανάλογα με το κλίμα της εκάστοτε περιοχής, ενώ η επίτευξη σωστής θερμοκρασίας γίνεται ακόμη δυσκολότερη σε περιοχές που έχουν ανάγκη τόσο από θέρμανση όσο και από ψύξη. Άλλα προβλήματα που προκύπτουν είναι η διάβρωση, η

αναφλεξιμότητά τους και θέματα που αφορούν στην εφαρμογή τους όπως, για παράδειγμα, η δυνατότητα βαφής του τοίχου. [25] , [26]

7.2.3 Δάπεδα με ενσωματωμένα PCM

Η ενδοδαπέδια θέρμανση εμφανίζει το μεγάλο πλεονέκτημα της ομοιόμορφης θερμικής άνεσης σε ολόκληρο το χώρο τον οποίο θερμαίνει, για θερμοκρασίες περίπου 25 με 28⁰C. Το περιβάλλον που διαμορφώνεται μέσω της ενδοδαπέδιας θέρμανσης είναι πολύ φιλικό προς τον άνθρωπο, ενώ το σύστημα δεν παρουσιάζει προβλήματα ή κινδύνους για τους χρήστες και δεν παρεμβαίνει στην αισθητική του χώρου, γεγονός που καθιστά την εφαρμογή κατάλληλη για οποιοδήποτε είδος εσωτερικού χώρου. Η ενδοδαπέδια θέρμανση μπορεί να εφαρμοστεί με συστήματα ύδατος (θερμά-υγρά) και με ηλεκτρικά συστήματα (ξηρά).

Στα συστήματα ύδατος το νερό θερμαίνεται κυρίως μέσω καύσης πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Συνεπώς, η εφαρμογή των PCM δεν προσφέρει κάποιο ιδιαίτερο πλεονέκτημα εάν ως ενεργειακή πρώτη ύλη διατίθενται μόνο συμβατικά καύσιμα. Αυτό φυσικά δεν ισχύει στην περίπτωση που η ενδοδαπέδια θέρμανση χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με συστήματα εκμετάλλευσης μιας διαφορετικής πηγής ενέργειας, όπως λόγω χάρη η ηλιακή. [27]

Αν κατά τη διάρκεια θέρμανσης του νερού μέσω ηλιακής ακτινοβολίας δεν υπάρχουν απαιτήσεις θέρμανσης του χώρου, τότε η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται στο PCM που βρίσκεται το δάπεδο. Η φόρτιση του PCM εξασφαλίζει κατ' αυτόν τον τρόπο θερμότητα για μετέπειτα χρήση.

Από την άλλη πλευρά, τα ηλεκτρικά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα Υλικά Αλλαγής Φάσης, εκμεταλλευόμενα το χαμηλό κόστος του ηλεκτρισμού στις ώρες μη αιχμής. Σε τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται κυρίως σφαιρίδια PCM τα οποία καλύπτουν τις ηλεκτρικές αντιστάσεις. [27] , [28]

Έχει επίσης μελετηθεί το κατά πόσον επηρεάζεται η ενδοδαπέδια θέρμανση από τη χρήση χαλιών και ξύλινων επενδύσεων πατώματος πάνω από τσιμέντο ή μίγμα γύψου -τσιμέντου. Υλικά όπως το τσιμέντο και τα μίγματα αυτού αποτελούν τη θερμική μάζα του δαπέδου και τα μέσα αποθήκευσης της ενέργειας.

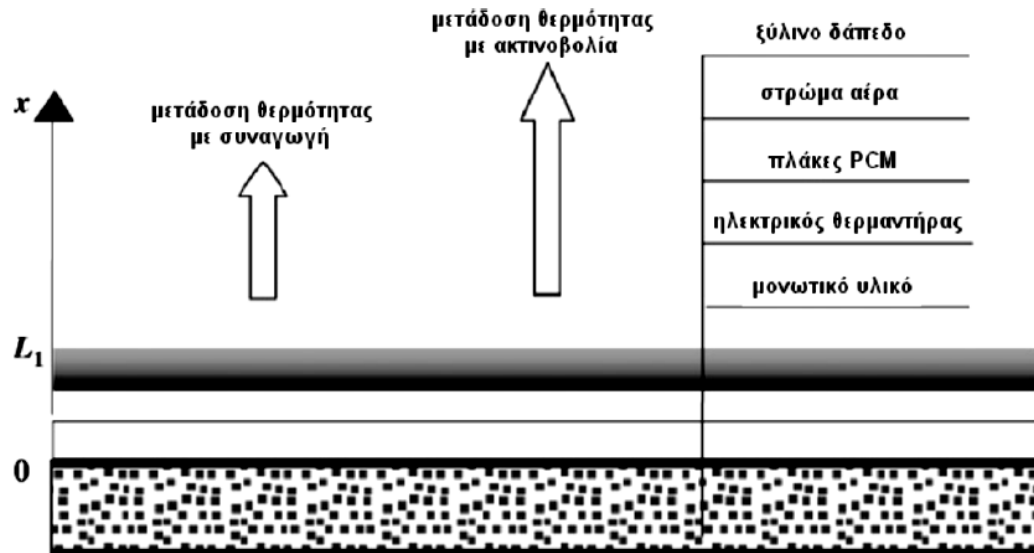
Γενικότερα, η θέρμανση μέσω ακτινοβολίας εμφανίζει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τη θέρμανση μέσω συναγωγής. Ένα από αυτά είναι η εξοικονόμηση ζωτικού χώρου καθώς, στα συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης, η ακτινοβολία απορροφάται άμεσα από το δάπεδο. Η θερμική μάζα του δαπέδου αποθηκεύει την ακτινοβολία κάνοντας δυνατή την καλύτερη κατανομή των ενεργειακών φορτίων κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ωστόσο, όσο πυκνότερη είναι η θερμική μάζα του δαπέδου, τόσο μεγαλύτερες είναι και οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου. Ένα υλικό με μεγάλη πυκνότητα το οποίο αποτελεί συνήθως τη θερμική μάζα του δαπέδου είναι το τσιμέντο. Η χρήση PCM αντί άλλων υλικών εγγυάται μεγάλη αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας μέσα στο μικρό εύρος θερμοκρασιών που συναντώνται στην πλειοψηφία των κτιρίων. [28]

Οι Kunring Lina et al. προώθησαν ένα νέο είδος ενδοδαπέδιου ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης με πλάκες PCM σταθερού σχήματος. Σε αντίθεση με τα συμβατικά Υλικά Αλλαγής Φάσης, τα σταθερού σχήματος PCM μπορούν να διατηρήσουν το σχήμα τους αμετάβλητο κατά τη διαδικασία της αλλαγής φάσης αποφεύγοντας συνεπώς τον κίνδυνο διαρροής τους. Το σύστημα αυτό μπορεί να φορτιστεί χρησιμοποιώντας το φθινό νυχτερινό ηλεκτρικό ρεύμα και να αποδώσει την αποθηκευμένη ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας. [27]

Για να υπολογιστεί η θερμική απόδοση του ενδοδαπέδιου ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης με πλάκες PCM σταθερού σχήματος, το σύστημα εφαρμόστηκε σε ένα πειραματικό σπίτι στα πλαίσια μελέτης του πανεπιστημίου της Tsinghua στο Πεκίνο. Οι διαστάσεις του πειραματικού σπιτιού ήταν: $M \times P \times Y = 3m \times 2m \times 2m$. Διέθετε ένα παράθυρο νότιου προσανατολισμού, διαστάσεων $1,6m \times 1,5m$, με διπλό τζάμι καλυμμένο με μαύρη κουρτίνα. Η οροφή και οι τοίχοι ήταν κατασκευασμένα από πολυεστερικά πάχους $100mm$, καλυμμένα από μέταλλο. Το ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης περιελάμβανε μόνωση πολυεστερίνης πάχους $120mm$, ηλεκτρικούς θερμαντήρες, PCM πάχους $15mm$, ξύλινα στηρίγματα, στρώμα αέρα πάχους $10mm$ και δάπεδο πάχους $8mm$. Στην εικόνα 64 αναπαρίσταται η κατασκευή του εν λόγω συστήματος θέρμανσης [27]. Το πείραμα κατέληξε στα εξής συμπεράσματα:

- Η θερμοκρασία του PCM διατηρήθηκε στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά το τέλος της λειτουργίας των θερμαντήρων. Πάνω από το 50% της ηλεκτρικής θερμικής ενέργειας μεταφέρθηκε από την περίοδο της μέγιστης ζήτησης σε περίοδο μικρότερης ζήτησης, γεγονός που μεταφράζεται σε σημαντικό οικονομικό όφελος λόγω του διαφορετικού κόστους του ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ μέρας και νύχτας. [29]

- Η μικρή διαφορά στην εσωτερική θερμοκρασία κατά μήκος της κατακόρυφης διεύθυνσης εμφανίστηκε εξαιτίας του γεγονότος ότι η ενδοδαπέδια θέρμανση μπορούσε να ζεστάνει τον εσωτερικό αέρα ομοιόμορφα, συνεπώς το σύστημα θέρμανσης αποδείχθηκε ενεργειακά αποδοτικό. [27]



Εικόνα 7.2.3.1 : Σχηματική αναπαράσταση ενδοδαπέδιου ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης με πλάκες PCM σταθερού σχήματος

Οι δυνατότητες χρήσης PCM σε ενδοδαπέδια θέρμανση μελετήθηκαν και από άλλους ερευνητές [29] , [30]. Μία από τις περιπτώσεις μελέτης, [30], αφορά σε στρώμα PCM, με σημείο τήξης περί τους 40⁰C, πάχους 30mm, τοποθετημένο ανάμεσα στον θερμαντήρα και στα πλακάκια του δαπέδου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το στρώμα αυτό είναι ικανό να παρέχει την αναγκαία θερμότητα κατά τη διάρκεια της μέρας, όταν ο θερμαντήρας χρησιμοποιείται μόνο οκτώ ώρες κατά τη διάρκεια της νύχτας, επιτυγχάνοντας μεταφορά θερμότητας της τάξεως των 7,2 MJ/m² ανά ημέρα, και ουσιαστικά μεταφέροντας ηλεκτρική ενέργεια από περιόδους αυξημένης ζήτησης σε περιόδους περιορισμένης ζήτησης. Στα πλαίσια μια άλλης μελέτης [31] , δυο πλάκες σκυροδέματος με διαστάσεις 0,5m x 0,5m x 0,5m κατασκευάστηκαν για να προσομοιώσουν τα συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με και χωρίς PCM. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σύστημα με μέσο αποθήκευσης θερμότητας το CaCl₂ 6H₂O είναι ικανό να εξασφαλίσει ομοιόμορφη θέρμανση κατά τη διάρκεια της ημέρας και να κρατήσει την επιφάνεια του δαπέδου κοντά στην επιθυμητή θερμοκρασία των 24⁰C . [32]

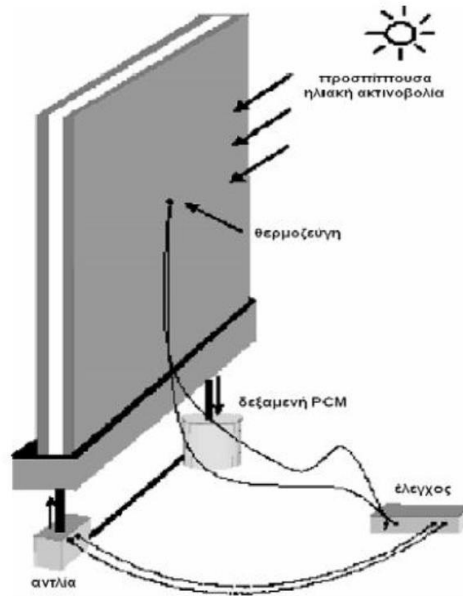
7.2.4 Ενεργειακά αποδοτικά παράθυρα

Η μετατροπή ενός απλού παραθύρου σε ενεργειακά αποδοτικό μπορεί να πραγματοποιηθεί με ποικίλους τρόπους. Ένας από αυτούς είναι και η χρήση παραθυρόφυλλων που περιέχουν Υλικό Αλλαγής Φάσης στις εξωτερικές επιφάνειες παραθύρων. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, οι γρίλιες παραμένουν ανοιχτές έτσι ώστε η εξωτερική τους πλευρά να είναι εκτεθειμένη στην ηλιακή ακτινοβολία. Έτσι το PCM απορροφά την ακτινοβολία και την αποθηκεύει ως θερμότητα αλλαγής φάσης ενώ τήκεται.

Κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν τα παραθυρόφυλλα είναι κλειστά και τα παράθυρα ανοιχτά, η αποθηκευμένη θερμότητα αποδίδεται στο χώρο. Κατά την εφαρμογή αυτού του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, διαπιστώθηκε ότι η χρήση παντζουριών με PCM μπορεί να μειώσει τη θερμοκρασία του δωματίου έως και 2⁰C. [75]

Μια πρωτότυπη ιδέα που προτάθηκε είναι τα θερμικά ενεργά παράθυρα με κινούμενες κουρτίνες με PCM. Ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από ένα παράθυρο και μια κουρτίνα με PCM και με δυνατότητα κίνησης. Το παράθυρο διαθέτει διπλά τζάμια, ανάμεσα στα οποία υπάρχει ένα κενό, ενώ στην άκρη βρίσκεται ένας εξαεριστήρας. Οι πλευρές και το κάτω μέρος του παραθύρου είναι σφραγισμένα, εκτός από δύο τρύπες στο κάτω μέρος οι οποίες επικοινωνούν, μέσω πλαστικού σωλήνα, με μια αντλία και μια δεξαμενή γεμάτη PCM. Η αντλία με τη σειρά της επικοινωνεί με τη δεξαμενή του PCM, το οποίο είναι σε υγρή μορφή. Η λειτουργία της αντλίας ελέγχεται από έναν αισθητήρα διαφοράς θερμοκρασίας. Όταν η διαφορά θερμοκρασίας αγγίζει μία προκαθορισμένη τιμή, τότε ξεκινά η λειτουργία της αντλίας και το PCM αντλείται έως ότου γεμίσει το κενό μεταξύ των φύλλων του παραθύρου. Εξαιτίας της χαμηλότερης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας, το PCM ξεκινά να ψύχεται σχηματίζοντας ένα στερεό στρώμα το οποίο αυξάνεται σε πάχος με το χρόνο, αποτρέποντας έτσι τη μείωση της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι όλη η ποσότητα του υλικού να αλλάξει φάση και να βρεθεί σε στερεή κατάσταση. Αν η σχεδίαση του παραπάνω συστήματος γίνει σωστά, έχει προβλεφθεί πως η εκ νέου αύξηση της εξωτερικής θερμοκρασίας θα ξεκινήσει πριν ολοκληρωθεί η στερεοποίηση του PCM. [75]

Αντίστοιχη εφαρμογή έχει υλοποιηθεί σε πραγματικό κτίριο, συγκεκριμένα σε οίκο ευγηρίας, το οποίο φέρει υαλοπίνακες με ενσωματωμένο ΥΑΦ, όπως φαίνεται στην εικόνα 7.2.4.1:



Εικόνα 7.2.4.1 : Σχηματική αναπαράσταση ενδοδαπέδιου ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης με πλάκες PCM σταθερού σχήματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Υπολογιστικό μέρος

8.1 Περιγραφή εφαρμογής

Η παρούσα εφαρμογή μελετά σύστημα εποχιακής αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας σε εξωτερική δεξαμενή με χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCM) για θέρμανση κατοικίας.

Για την καλύτερη ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, η εφαρμογή πραγματοποιείται πρώτα με χρήση νερού στη δεξαμενή και στη συνέχεια με χρήση PCM προκειμένου να γίνει σύγκριση της αποδοτικότητας των μέσων αποθήκευσης.

Η μελέτη αφορά κατοικία 90 m² στην περιοχή της Αθήνας. Η χωρητικότητα της δεξαμενής και η επιφάνεια του συλλέκτη επιλέχθηκαν κατόπιν δοκιμών ώστε να προκύπτει το επιθυμητό εύρος θερμοκρασιών δεξαμενής. Η διάταξη αποτελείται από ηλιακό συλλέκτη 15m² και δεξαμενή αποθήκευσης όγκου 62m³.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η διάταξη που μελετάμε αποτελεί σύστημα εποχιακής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και η μελέτη αφορά διάστημα ενός έτους. Κατά το διάστημα Μάιος-Οκτώβριος, που αποτελούν μήνες με μεγάλη ηλιοφάνεια, το σύστημα συλλέγει την ηλιακή θερμότητα στη δεξαμενή μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στον ηλιακό συλλέκτη, η οποία θερμαίνει το υλικό που περιέχεται στη δεξαμενή, νερό ή PCM. Από τον μήνα Νοέμβριο έως και τον Απρίλιο, ξεκινά η χρήση της αποθηκευμένης θερμότητας για οικιακούς σκοπούς μέσω δικτύου αγωγών όπου ρέει το θερμό υγρό και οδηγείται σε fancoils, όπου εκεί χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του χώρου και για τις ανάγκες της οικίας σε ζεστό νερό. Παράλληλα συνεχίζεται η αποθήκευση θερμικής ενέργειας κατά τις ώρες ηλιοφάνειας.

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Excel και η πορεία της μελέτης και των σχέσεων που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

8.2 Υπολογισμός μέσης στιγμιαίας άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου G_b & G_d

Για τον υπολογισμό της μέσης στιγμιαίας άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας G_b & G_d χρησιμοποιούμε τις παρακάτω σχέσεις:

$$G_b = M_t + A_t * \sin\left(\frac{360}{365} * D - P_t\right) \quad (8.1)$$

$$G_d = m_t + a_t * \sin\left(\frac{360}{365} * D - p_t\right) \quad (8.2)$$

όπου οι συντελεστές $M_t, A_t, P_t, m_t, a_t, p_t$ δίνονται από τον παρακάτω πίνακα:

Time (hrs)	Mt (W/m2)	At (W/m2)	Pt (degrees)	mt (W/m2)	at (W/m2)	pt (degrees)
7	7	46	86,18	48	111	81,23
8	57	68	87,31	134	127	82,45
9	119	104	87,94	208	133	83,94
10	191	129	88,31	261	129	85,6
11	258	153	89,35	283	117	86,05
12	319	-181	-88,88	271	95	82,71
13	342	-194	-89,18	243	81	81,95
14	325	183	87,21	210	83	87,23
15	269	166	86,22	176	87	89,53
16	183	147	82,1	141	-85	-88,19
17	78	131	79,85	104	-79	-88,97
18	-25	114	77,36	51	91	86,79

και D η ημέρα του έτους για την $21^{\text{η}}$ ημέρα κάθε μήνα, ο οποίος υπολογίζεται από τον παρακάτω πίνακα με βάση τον αύξοντα αριθμό n :

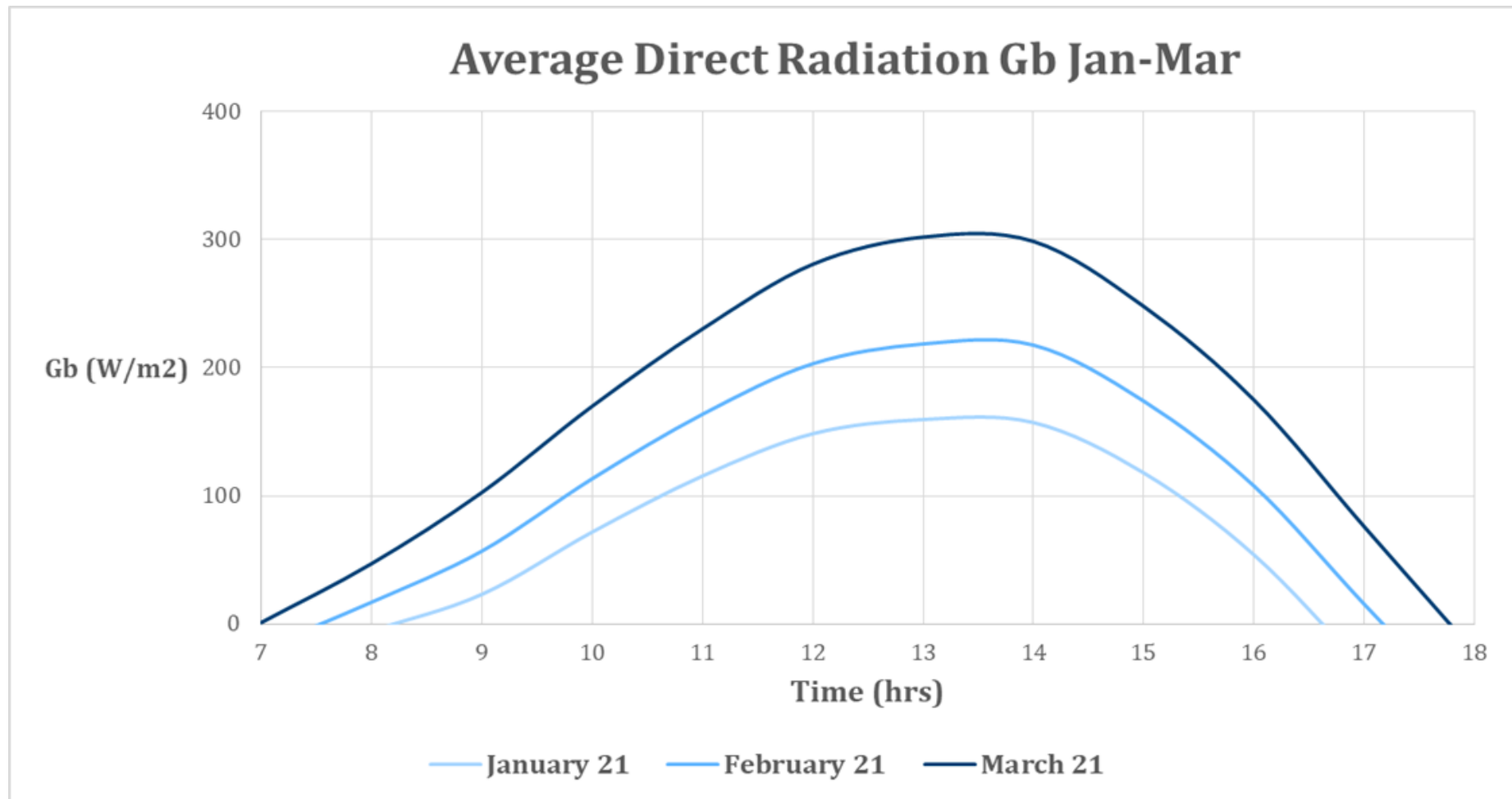
Month	n for i-th day of month	D (Day of Year)
January	i	21
February	$31+i$	52
March	$59+i$	80
April	$90+i$	111
May	$120+i$	141
June	$151+i$	172
July	$181+i$	202
August	$212+i$	233
September	$243+i$	264
October	$273+i$	294
November	$304+i$	325
December	$334+i$	355

Κατόπιν εφαρμογής των τύπων, προέκυψαν οι ωριαίες τιμές G_b & G_d για την 21^η ημέρα κάθε μήνα για το διάστημα Ιανουάριος-Δεκέμβριος:

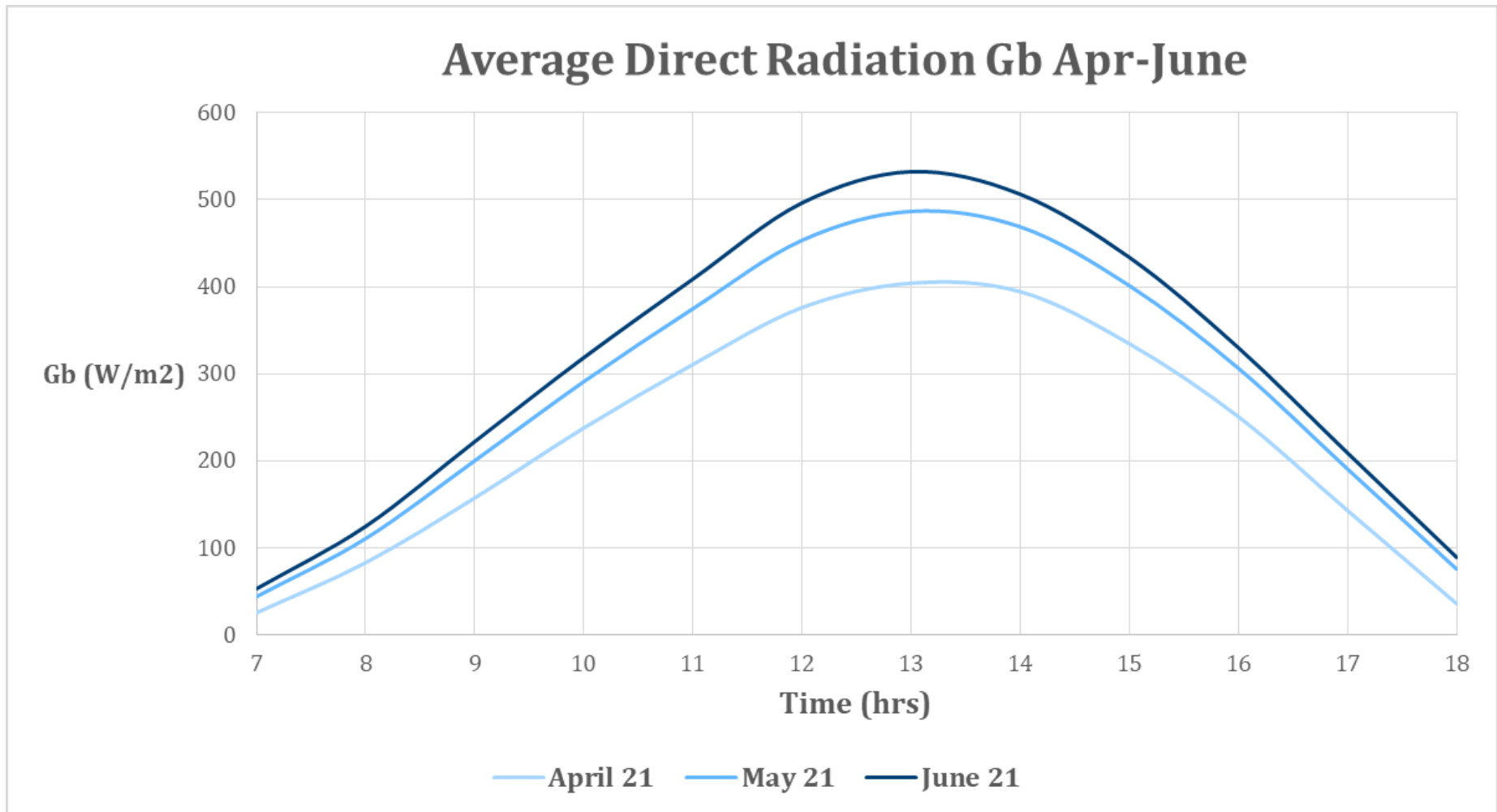
Average direct radiation G_b (W/m ²)												
Time (hrs)	January 21	February 21	March 21	April 21	May 21	June 21	July 21	August 21	September 21	October 21	November 21	December 21
7	-34,847448355	-19,313658745	1,174228045	25,194689078	43,683287379	52,701009445	49,326617850	34,279029942	11,645744811	-11,557649642	-30,387648096	-38,744384553
8	-5,406216847	17,009166671	47,059438224	82,659602390	110,407791107	124,392226304	120,082733377	98,397453905	65,200454558	30,799340575	2,523302102	-10,467806382
9	23,106779576	56,916383921	102,666474680	157,182746767	199,969755146	221,911686871	215,900583670	183,217116813	132,676284583	79,986051093	36,372120846	15,962967129
10	71,735559768	113,325718374	169,917866950	237,585439621	290,908748662	318,527212221	311,493993302	271,307525903	208,789304863	143,380910432	89,017663432	63,310214377
11	115,511785988	163,672693629	230,260049225	310,653783654	374,720188960	408,809856385	401,879640930	355,406031609	281,845950918	204,111733882	138,764729584	106,973711385
12	148,479473330	203,061699579	280,701148532	376,010917262	453,400283222	496,381368178	491,030705308	438,488258441	352,718759432	260,512624680	181,514459141	141,315248662
13	159,575263883	218,516380446	301,943741988	404,068859485	486,731733385	532,320959557	526,068179348	469,305553544	377,142058059	278,351449692	193,981161786	151,362447275
14	157,180972399	217,636097097	298,564198719	394,350195840	468,927270246	506,406705103	494,647260414	436,154297088	346,751772661	254,194774712	178,202659937	143,392621919
15	117,937213633	173,946981079	247,861610510	334,552640312	401,308863164	433,907802114	421,789224787	367,535005641	285,880372321	202,137147321	134,146904602	103,934678890
16	53,951647142	107,702530748	174,804766047	250,602559721	306,240528940	329,864951296	313,822835683	261,531970134	187,403093883	114,276446176	57,731729056	36,086267306
17	-34,450710080	15,367001530	75,837432069	142,764926574	190,545391044	208,999151947	192,148223203	143,582711253	76,780092203	12,257388779	-36,238775510	-52,998356697
18	-120,224836723	-75,103617025	-21,928095098	35,612220972	75,382428638	88,909447223	71,811279514	27,730706452	-31,013114328	-86,440992849	-126,743966725	-138,866127289

Average diffused radiation G_d (W/m ²)												
Time (hrs)	January 21	February 21	March 21	April 21	May 21	June 21	July 21	August 21	September 21	October 21	November 21	December 21
7	-48,626335661	-7,403213166	43,495253999	100,537547958	141,967158631	158,957467945	146,004566258	105,868081628	49,639758430	-5,377188732	-47,461346789	-62,979803053
8	22,139813497	68,282007664	126,145308479	191,714952975	240,048238057	260,847711237	247,375506893	202,501891010	138,579408451	75,313490932	26,183002525	7,103472722
9	89,257138812	136,241182680	196,325293543	265,340620681	317,118028200	340,626290042	328,250044609	282,626062796	216,250217059	149,628625820	96,955082638	75,292868525
10	144,193402512	188,282210602	245,958664397	313,220965046	364,655324483	389,303603370	379,181138370	336,444530306	272,728460536	207,765709417	155,396653039	132,585935725
11	176,672421364	216,289694713	268,445640605	329,521492790	376,463076557	399,269442713	390,552604592	352,169692870	294,552213487	235,556240055	187,750920985	166,622505045
12	187,121791485	221,472488146	264,694234296	313,788150446	350,089412175	365,864001048	356,001832824	322,604051851	274,856320984	227,483402055	190,578140627	176,095776628
13	171,993517764	201,691825260	238,696001781	280,438565081	311,023406284	323,934395800	314,989095369	286,093309781	245,214224161	204,944592747	173,863898922	162,040548582
14	133,873809880	161,281437184	197,981323928	241,427100580	275,260591152	292,273538206	286,954698736	260,437256566	219,894324563	177,912872577	143,437088997	127,635198851
15	94,878129804	122,147974478	159,957592048	205,683615883	242,193263932	261,708120853	257,906464821	231,598242279	189,829373484	145,613607882	108,371156507	90,166489966
16	60,583863641	85,771731359	122,015222222	166,799633079	203,425965429	224,090944228	222,100272510	197,878064783	157,839320361	114,504241913	77,105409235	57,757951726
17	29,615617086	53,492451489	87,405230385	129,000963761	162,743941925	181,445191194	179,046553102	156,059059782	118,595088887	78,354956893	43,911862303	26,423440743
18	-32,182735813	-1,846980071	38,514743559	86,101994192	122,980447744	141,293114509	135,107715012	105,742054516	61,153834720	15,176684646	-22,393920030	-39,387205391

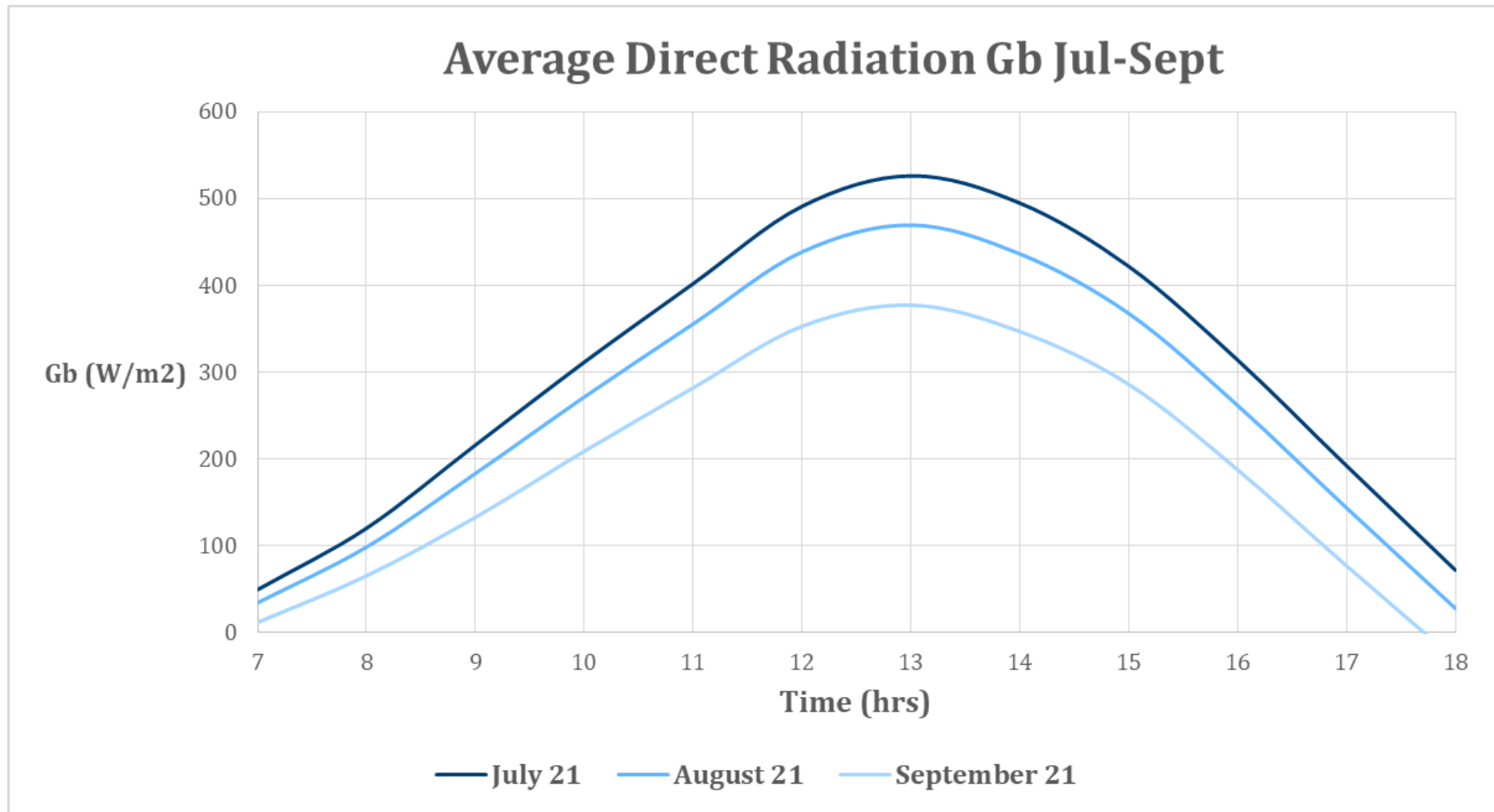
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα για τις ακτινοβολίες G_b & G_d ανά μήνα:



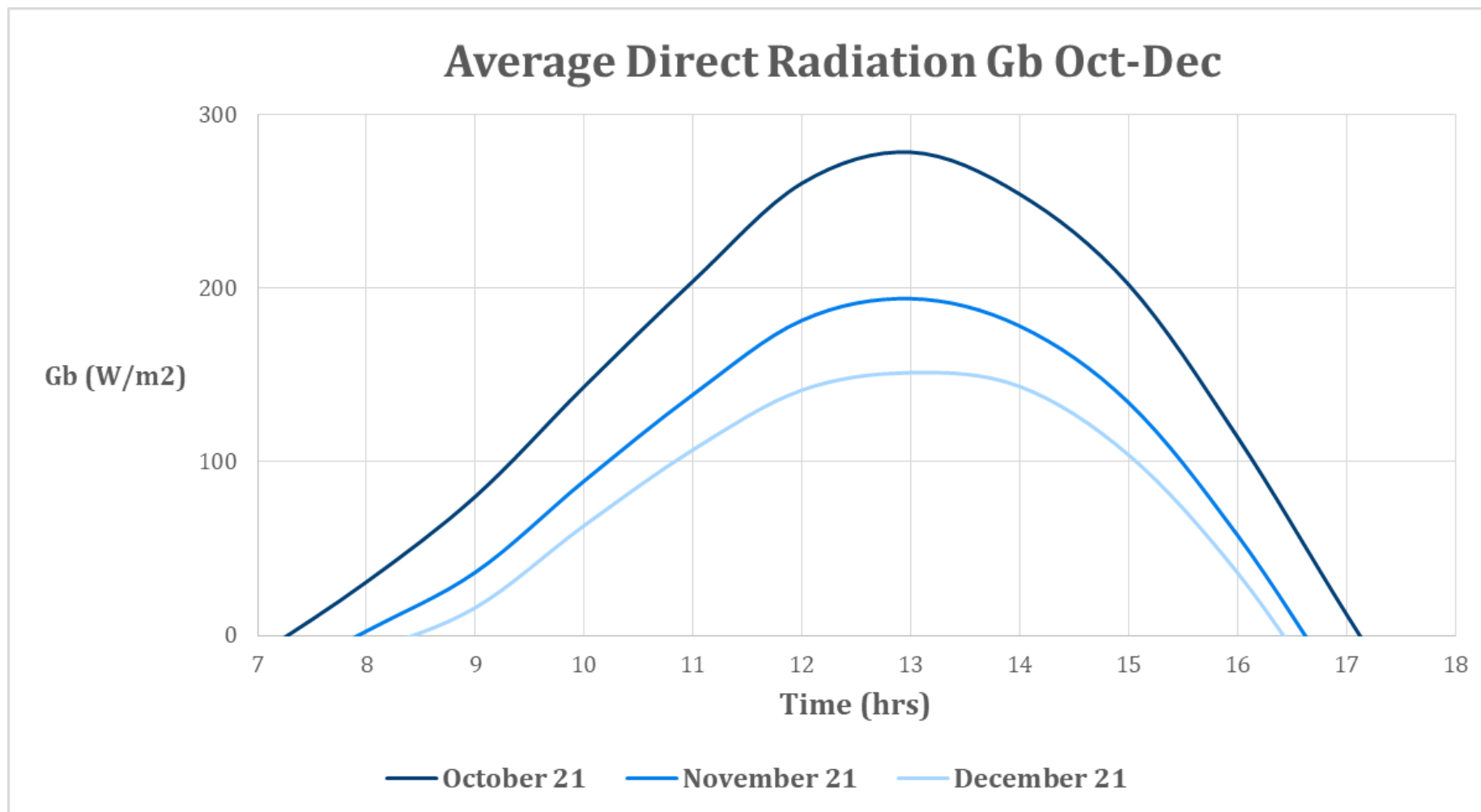
Διάγραμμα 1 : Μέση στιγμιαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου G_b για τις ώρες 7.00-18.00 για τους μήνες Ιανουάριος-Μάρτιος



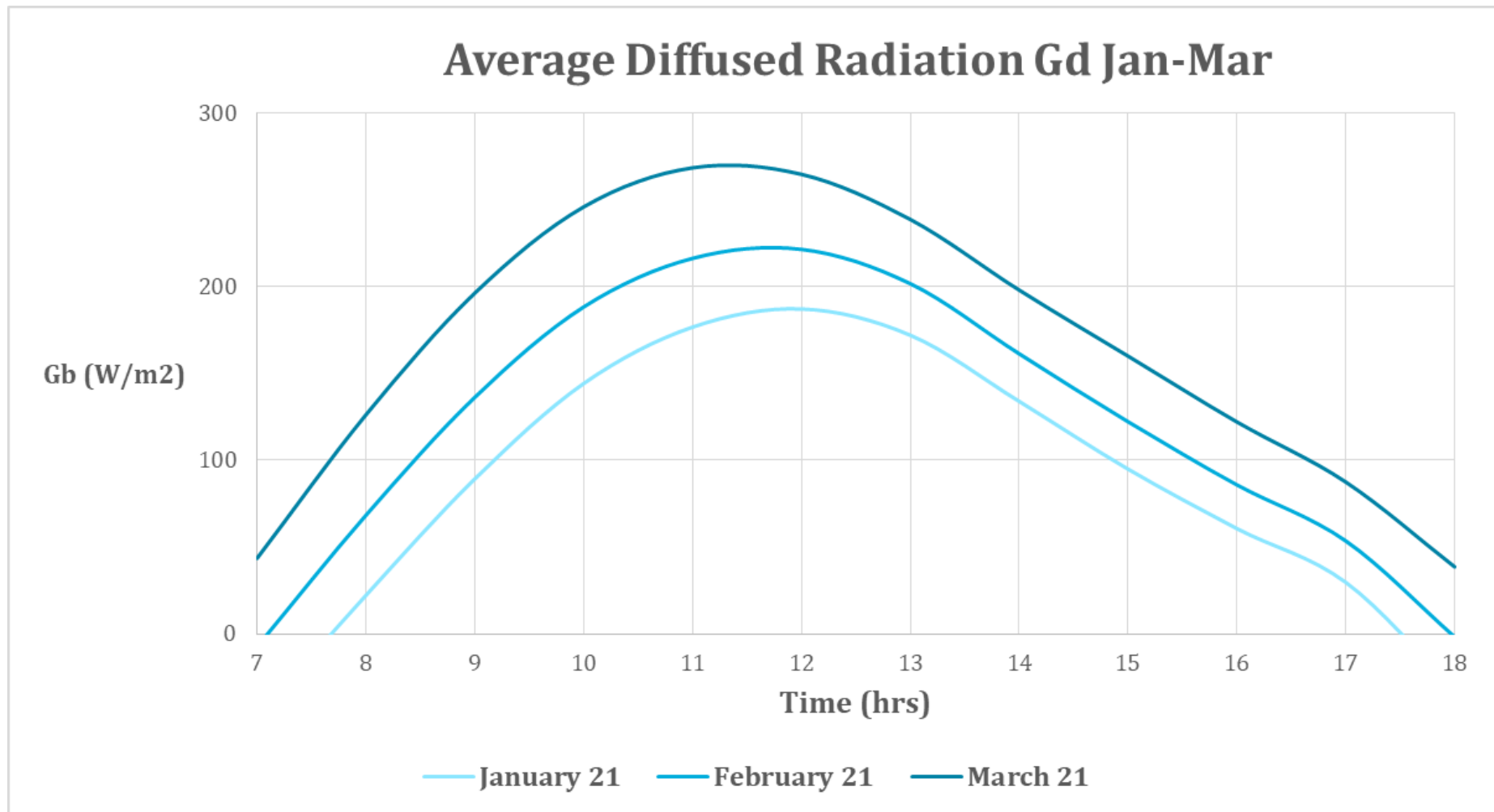
Διάγραμμα 2 : Μέση στιγμιαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου G_b για τις ώρες 7.00-18.00 για τους μήνες Απρίλιος-Ιούνιος



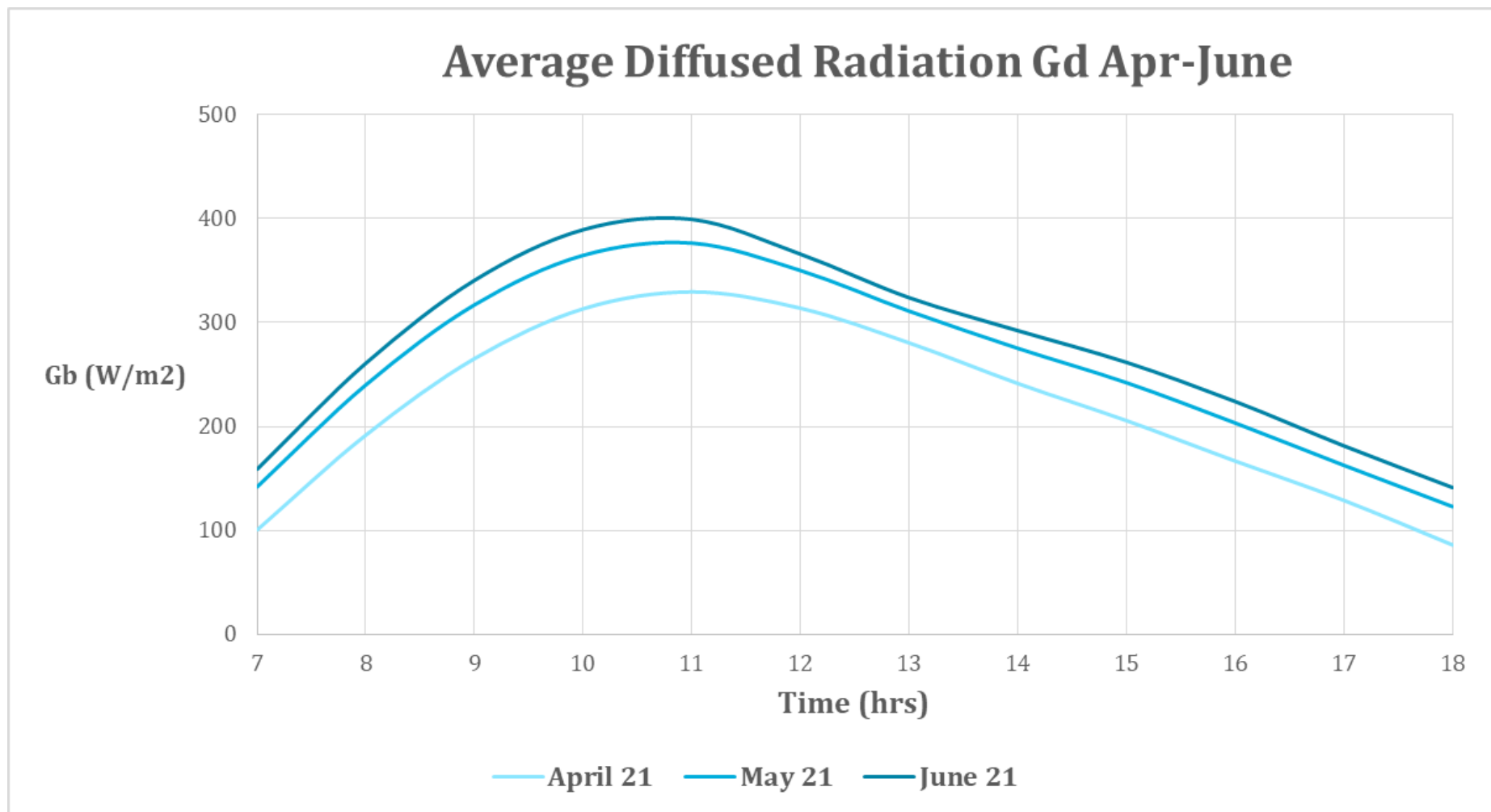
Διάγραμμα 3 : Μέση στιγμιαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου G_b για τις ώρες 7.00-18.00 για τους μήνες Ιούλιος-Σεπτέμβριος



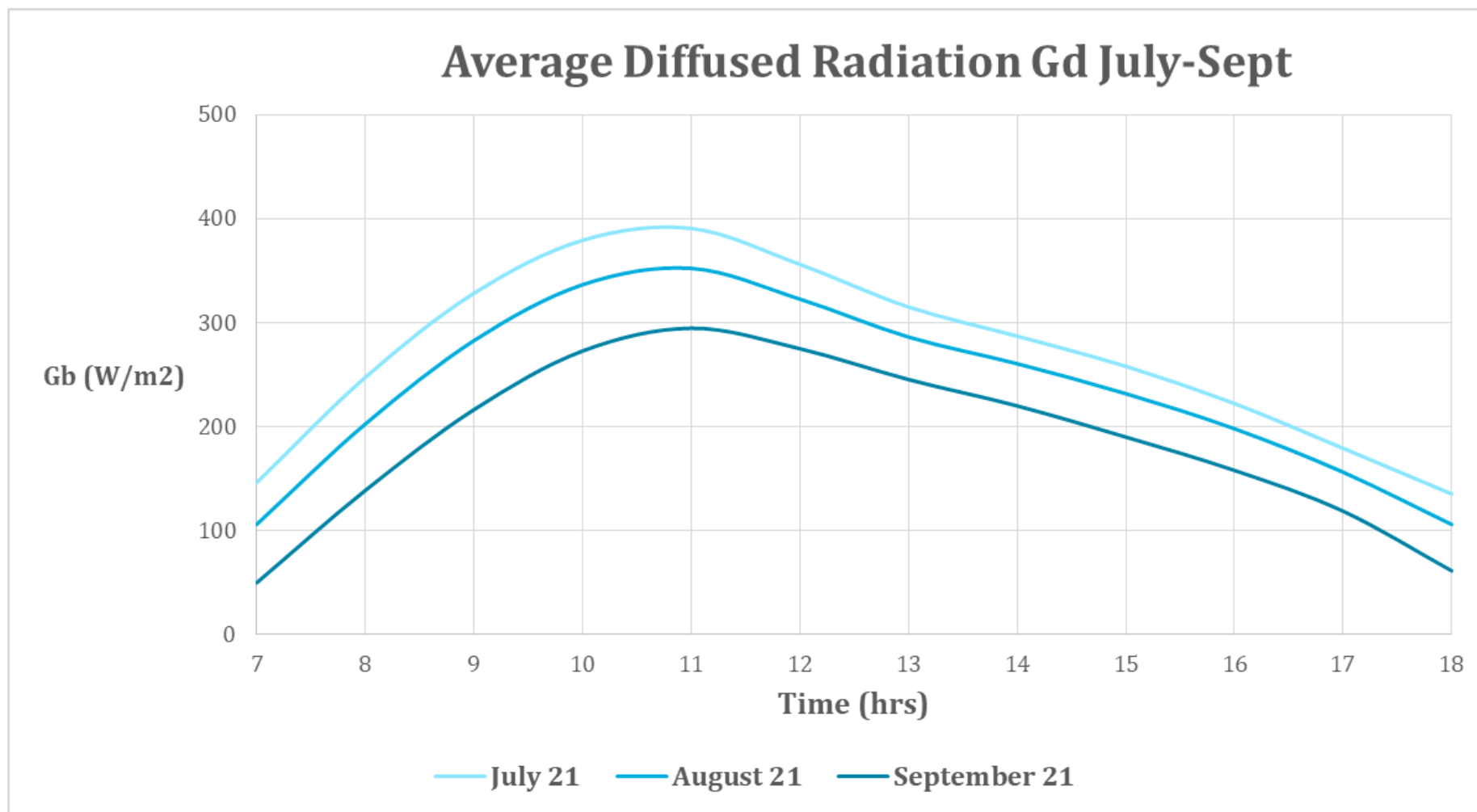
Διάγραμμα 4 : Μέση στιγμιαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου G_b για τις ώρες 7.00-18.00 για τους μήνες Οκτώβριος-Δεκέμβριος



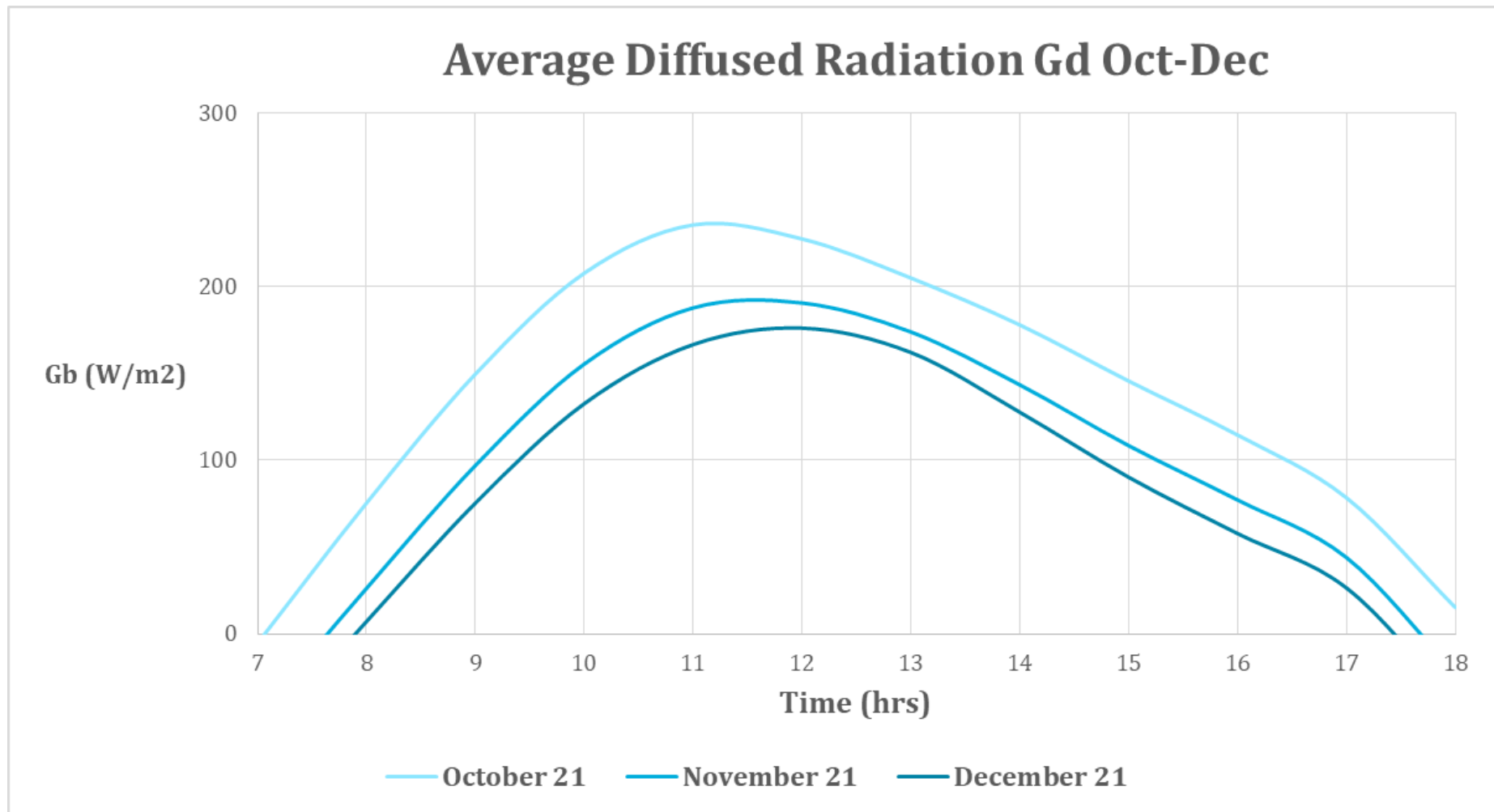
Διάγραμμα 5 : Μέση στιγμιαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου G_d για τις ώρες 7.00-18.00 για τους μήνες Ιανουάριος-Μάρτιος



Διάγραμμα 6 : Μέση στιγμιαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου G_d για τις ώρες 7.00-18.00 για τους μήνες Απρίλιος-Ιούνιος



Διάγραμμα 7 : Μέση στιγμιαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου G_d για τις ώρες 7.00-18.00 για τους μήνες Ιούλιος-Σεπτέμβριος



Διάγραμμα 8 : Μέση στιγμιαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου G_d για τις ώρες 7.00-18.00 για τους μήνες Οκτώβριος-Δεκέμβριο

8.3 Υπολογισμός λόγου R_b

Για τον υπολογισμό του λόγου R_b χρησιμοποιούμε την παρακάτω σχέση:

$$R_b = \frac{\sin \delta * \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta * \cos(\varphi - \beta) * \cos \omega}{\sin \delta * \sin \varphi + \cos \delta * \cos \varphi * \cos \omega} \quad (8.3)$$

όπου $\varphi = \beta = 38^\circ$ η κλίση του συλλέκτη ίση με το γεωγραφικό πλάτος για μέγιστη ετήσια ενέργεια

δ η ηλιακή απόκλιση δηλαδή η γωνιακή θέση του ήλιου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του μεσημβρινού

ω η ωριαία γωνία δηλαδή η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί τον άξονα της με ρυθμό

Για τον υπολογισμό της ωριαίας γωνίας ω ισχύει η σχέση:

$$\omega = 0.25 * (\text{min από το ηλιακό μεσημέρι}) \quad (8.4)$$

Λαμβάνεται $\omega > 0$ για μ.μ και $\omega < 0$ για π.μ.

Για τις ώρες 07.00-18.00 προκύπτουν οι παρακάτω τιμές:

Time (hrs)	min from solar noon (12)	ω (rad)
7	300	-1,308996939
8	240	-1,047197551
9	180	-0,785398164
10	120	-0,523598776
11	60	-0,261799388
12	0	0
13	60	0,261799388
14	120	0,523598776
15	180	0,785398164
16	240	1,047197551
17	300	1,308996939
18	360	1,570796327

Για τον υπολογισμό της ηλιακής απόκλισης δ κάνουμε χρήση του παραπάνω τύπου:

$$\delta = 23.45 * \sin\left(\frac{360 * (284 + n)}{365}\right) \quad (8.5)$$

όπου n η ημέρα του έτους ανά μήνα και προκύπτουν οι παρακάτω τιμές:

Month	Day of Month n	δ (rad)
January	21	-0,35147466
February	52	-0,19593605
March	80	-0,00704508
April	111	0,202092314
May	141	0,351474664
June	172	0,40927592
July	202	0,356771709
August	233	0,205148103
September	264	-0,00352267
October	294	-0,2051481
November	325	-0,35677171
December	355	-0,40927592

Κάνοντας χρήση των παραπάνω τιμών και της σχέσης (8.3) προκύπτουν οι ζητούμενες τιμές Rb.

Rb												
Time (hrs)	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
7	-11,866330078	3,165822183	1,296592875	0,784075343	0,602303125	0,549500262	0,597151782	0,779443602	1,282657704	3,412328229	-10,142541738	-4,101489908
8	2,971909975	1,839538403	1,283143854	0,961265247	0,806752479	0,756359586	0,801955834	0,957653812	1,276042119	1,880396177	3,038866705	3,938573344
9	2,133410308	1,625496625	1,278974092	1,034764920	0,903107069	0,857864861	0,898851486	1,031803149	1,273976827	1,647868904	2,157540754	2,437022818
10	1,896375840	1,545813452	1,277135469	1,071045129	0,953561664	0,912092278	0,949685388	1,068453156	1,273064004	1,562282654	1,911895236	2,084891732
11	1,804131634	1,511711194	1,276291134	1,088609556	0,978724269	0,939419363	0,975061871	1,086208295	1,272644374	1,525814250	1,816710081	1,954903552
12	1,778576634	1,501923901	1,276041944	1,093908580	0,986412993	0,947807457	0,982819231	1,091566352	1,272520475	1,515365527	1,790380789	1,919551969
13	1,804131634	1,511711194	1,276291134	1,088609556	0,978724269	0,939419363	0,975061871	1,086208295	1,272644374	1,525814250	1,816710081	1,954903552
14	1,896375840	1,545813452	1,277135469	1,071045129	0,953561664	0,912092278	0,949685388	1,068453156	1,273064004	1,562282654	1,911895236	2,084891732
15	2,133410308	1,625496625	1,278974092	1,034764920	0,903107069	0,857864861	0,898851486	1,031803149	1,273976827	1,647868904	2,157540754	2,437022818
16	2,971909975	1,839538403	1,283143854	0,961265247	0,806752479	0,756359586	0,801955834	0,957653812	1,276042119	1,880396177	3,038866705	3,938573344
17	-11,866330078	3,165822183	1,296592875	0,784075343	0,602303125	0,549500262	0,597151782	0,779443602	1,282657704	3,412328229	-10,142541738	-4,101489908
18	0,000000001	0,000000002	0,000000047	-0,000000002	-0,000000001	-0,000000001	-0,000000001	-0,000000002	0,000000095	0,000000002	0,000000001	0,000000001

8.4 Υπολογισμός ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου G_t

Ο υπολογισμός της ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου G_t γίνεται βάσει της παρακάτω σχέσης:

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

όπου $\varphi = \beta = 38^\circ$ η κλίση του συλλέκτη ίση με το γεωγραφικό πλάτος για μέγιστη ετήσια ενέργεια

ρ η ανακλαστικότητα του εδάφους ίση με 0,2 για συνηθισμένο έδαφος

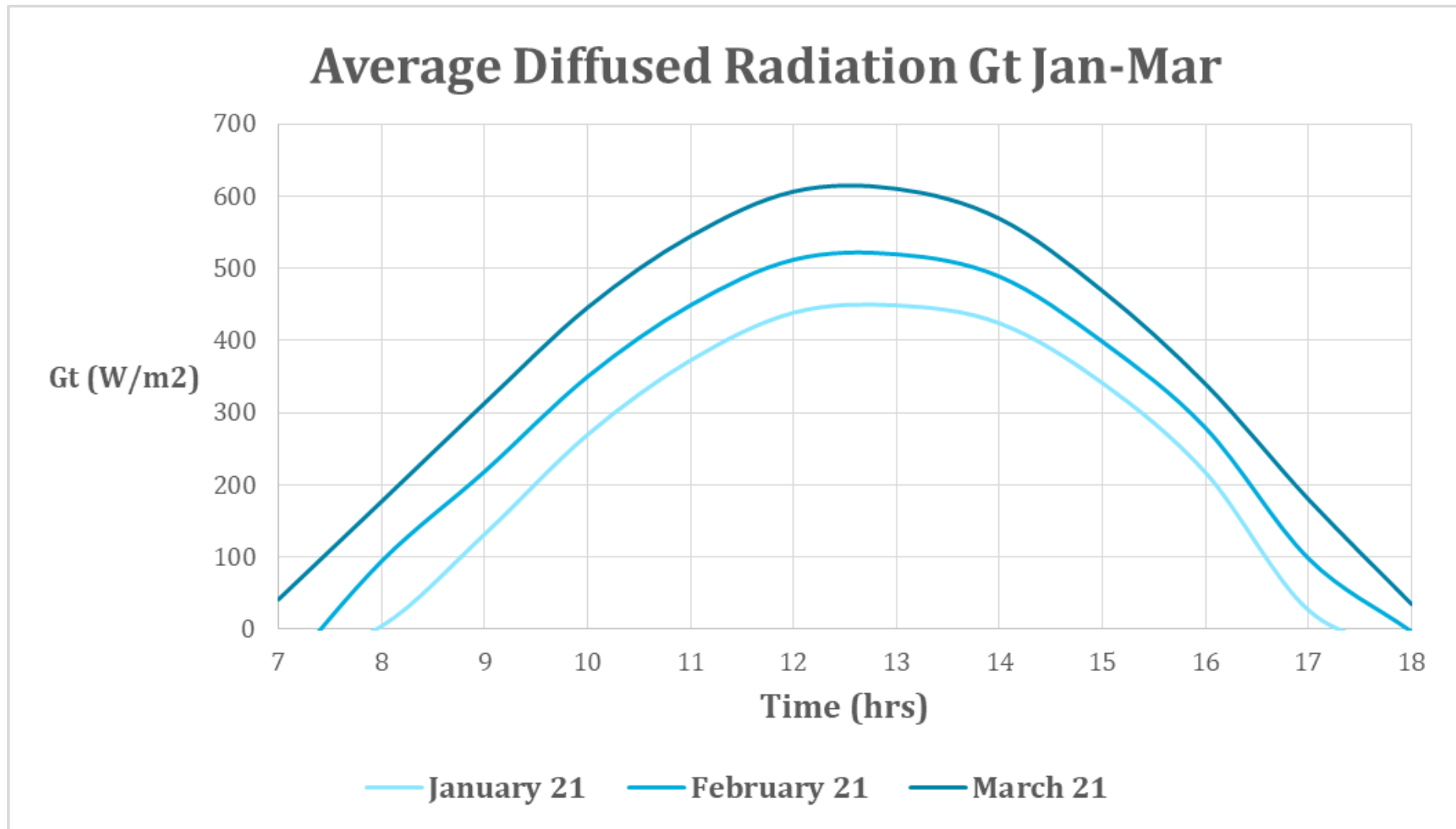
G_b , G_d ίσα με τις τιμές που υπολογίσαμε στην παράγραφο 8.2

Με εφαρμογή του παραπάνω τύπου προκύπτουν οι τιμές της ολικής ακτινοβολίας G_t οι οποίες παρατίθενται στους πίνακες που ακολουθεί για την 21^η μέρα κάθε μήνα του διαστήματος Ιανουάριος-Δεκέμβριος.

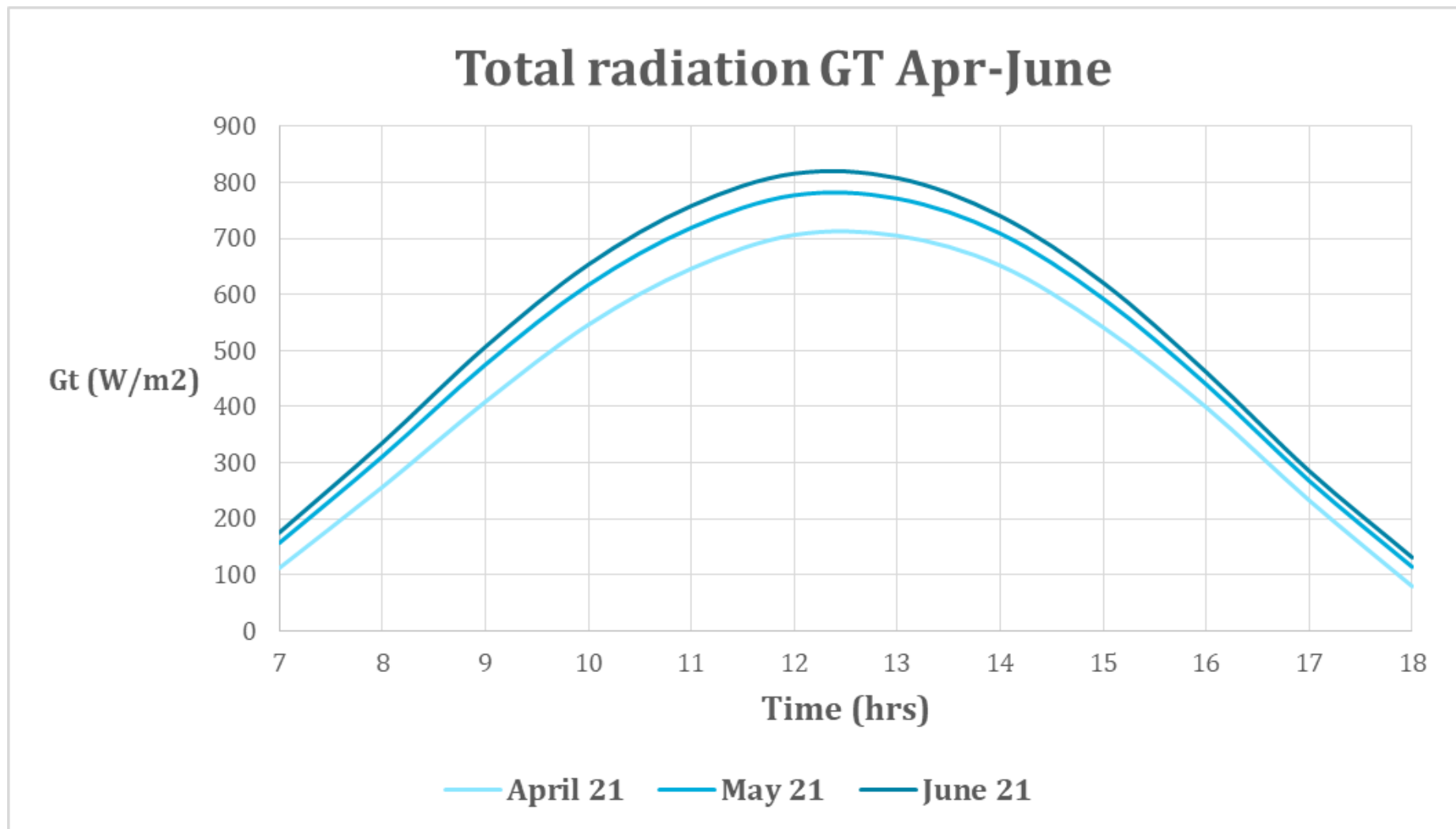
Total Radiation GT January-June						
Time (hrs)	January 21	February 21	March 21	April 21	May 21	June 21
7	-45,241759991	-68,328490612	41,354431640	112,301031142	157,165573448	175,554981650
8	4,081056788	94,141578457	176,830367364	256,668447365	311,105465697	335,451181551
9	131,474597995	218,412472522	313,161933221	408,820174964	475,061026740	506,817173338
10	269,524721336	349,899492315	445,712638311	546,162458221	617,300504721	653,570977421
11	372,538552880	448,844787214	544,442729763	646,345691325	719,232035202	758,123335701
12	438,484395447	511,980483370	606,386303461	706,472860763	777,254864660	815,837021099
13	448,686812922	519,555196779	610,224611073	705,097628155	771,344308749	807,823401177
14	423,928152760	488,643922817	568,829527035	651,681777478	709,011499214	740,114922325
15	340,941481916	398,228071259	468,656854125	541,518022254	592,588504531	620,949033012
16	216,929767809	278,904776696	339,674190567	398,863777803	439,728594520	461,578296275
17	26,374022140	97,931479929	179,931588929	233,027158611	267,749397506	285,335065541
18	-32,002415611	-3,282480150	34,784005902	79,555856178	114,150261124	131,196850766

Total Radiation GT July-December						
Time (hrs)	July 21	August 21	September 21	October 21	November 21	December 21
7	164,125156049	124,336172850	60,614902005	-44,604730141	-44,081014195	-58,460725946
8	325,245801381	281,647218744	211,409176425	127,495106029	31,684266572	-34,949000639
9	499,055273506	451,588592248	369,752235399	270,442906551	167,979091545	108,148870016
10	649,452840331	603,546291307	519,830517288	417,189101330	314,299210634	254,680269658
11	757,812354336	715,886422994	634,239947659	531,345625453	426,867396665	363,884649344
12	818,818151774	783,183124301	707,868788848	608,488226378	503,245846026	435,421307319
13	812,380477711	781,546185852	712,383837224	618,179532569	515,640712346	447,407914011
14	742,867439856	713,609734574	650,036196331	565,339369374	475,756762109	418,810144263
15	624,104455576	598,974830511	543,997985145	470,646809752	391,452932358	338,015246925
16	461,591885291	437,100140756	387,562210028	322,102305010	247,230082026	195,753726432
17	282,679165061	257,784347575	208,648967652	113,796870800	39,420102193	23,059338458
18	125,173483776	97,363444249	55,310804979	12,057310838	-23,181847737	-38,991152363

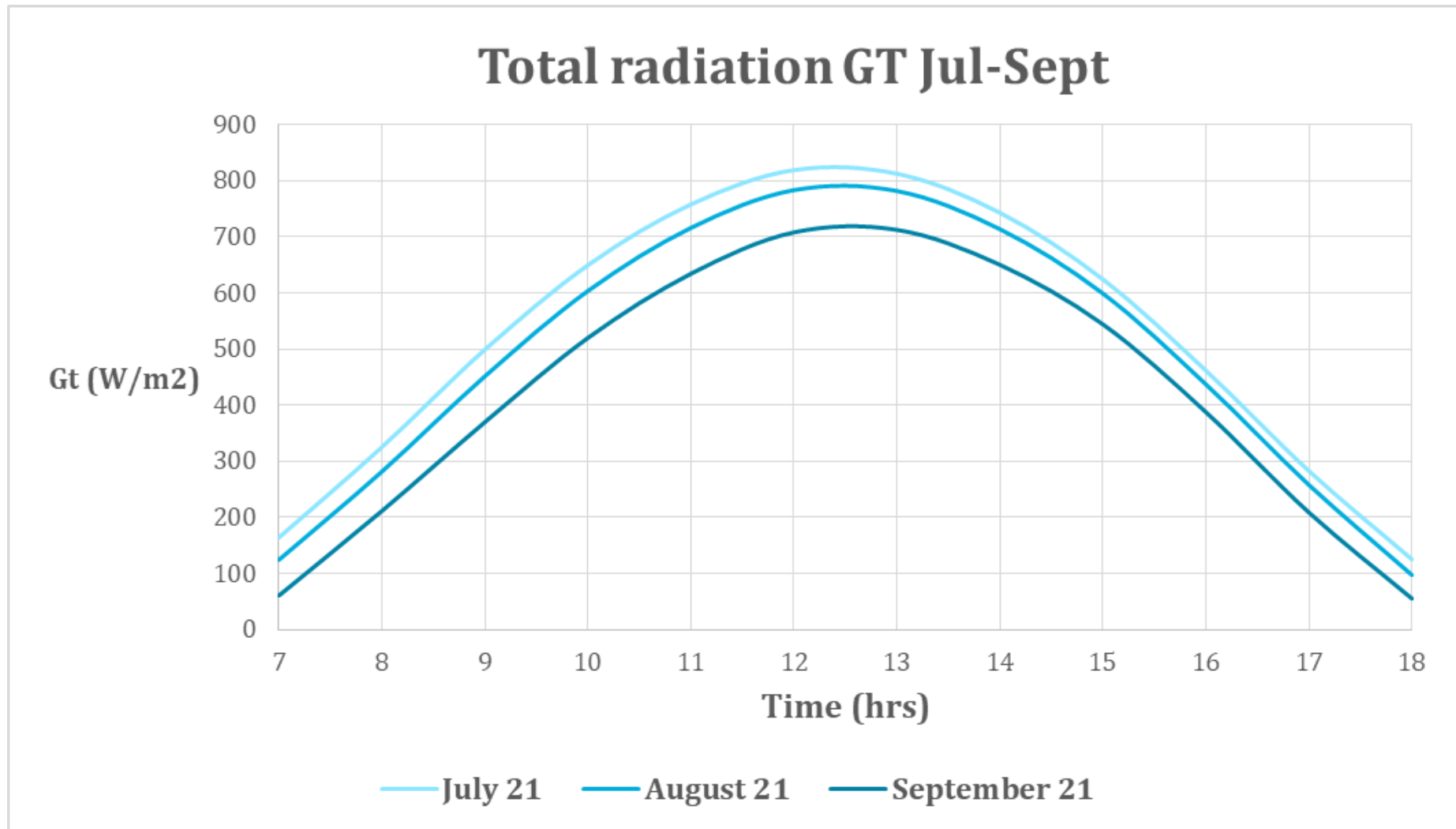
Ακολουθούν τα διαγράμματα της ολικής ακτινοβολίας G_t ανά τρίμηνο του έτους:



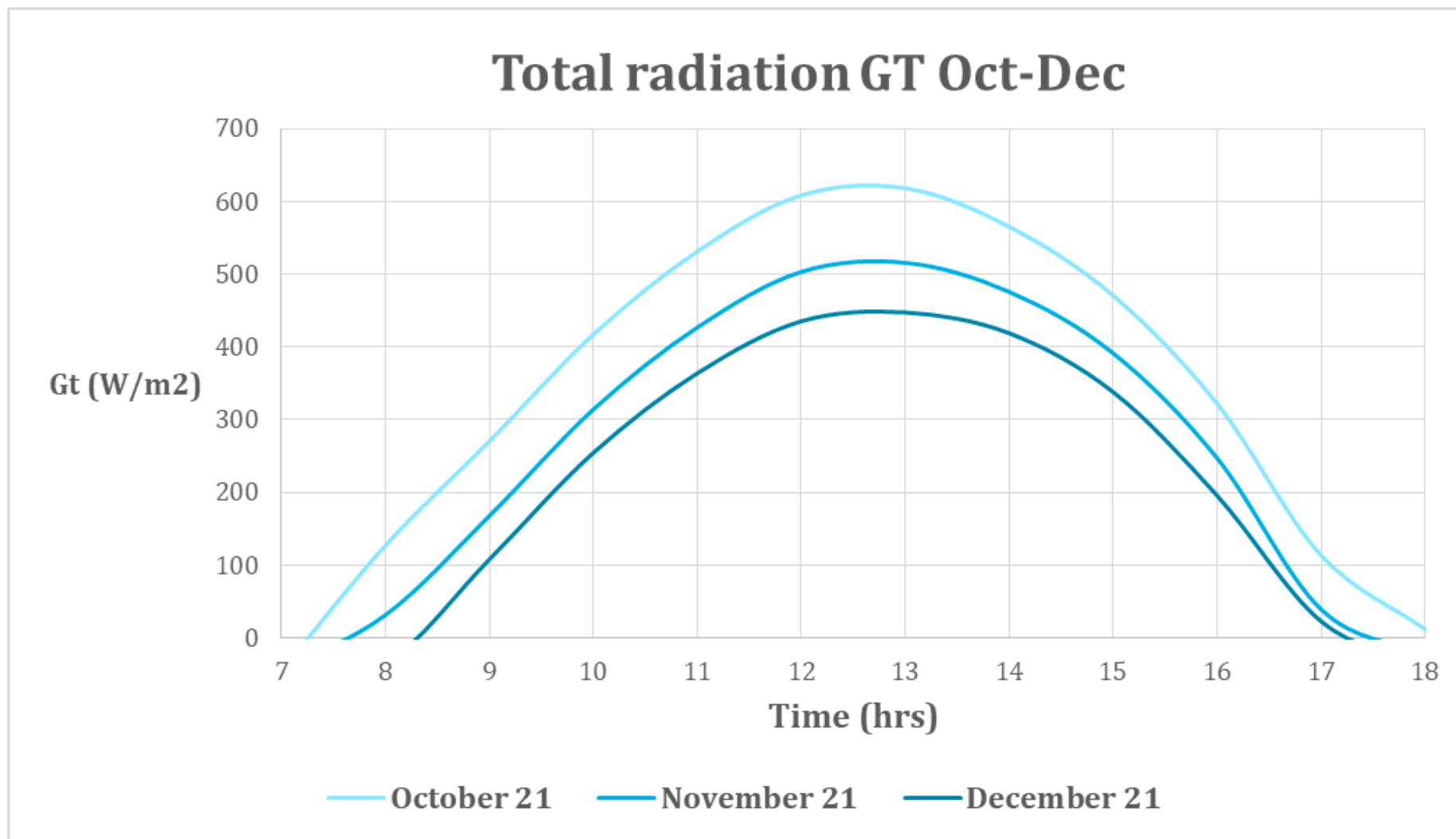
Διάγραμμα 9 : Ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου G_t για τις ώρες 7.00-18.00 για τους μήνες Ιανουάριος-Μάρτιος



Διάγραμμα 10 : Ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου G_t για τις ώρες 7.00-18.00 για τους μήνες Απρίλιος-Ιούνιος



Διάγραμμα 11 : Ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου G_t για τις ώρες 7.00-18.00 για τους μήνες Ιούλιος-Σεπτέμβριος



Διάγραμμα 12 : Ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου G_t για τις ώρες 7.00-18.00 για τους μήνες Οκτώβριος-Δεκέμβριος

8.5 Υπολογισμός θερμοκρασίας περιβάλλοντος

Για τη θερμοκρασία περιβάλλοντος θεωρούμε την 21η ημέρα κάθε μήνα ως μέση ημέρα του μήνα και λαμβάνουμε τις απαιτούμενες τιμές από το βιβλίο του «Κλιματισμού» (Πίνακες Δ.3.3-Δ.3.14) :

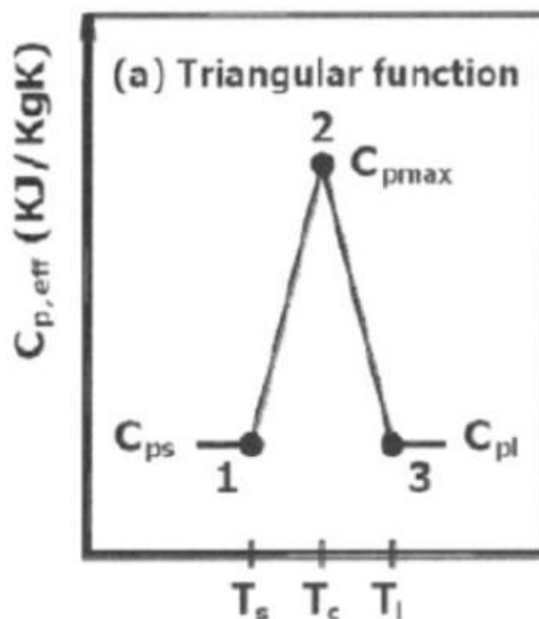
Te (°C) for the 21st day of each month												
T (hrs)	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEPT	OCT	NOV	DEC
7	7,1	8,6	10,4	12,9	19,0	23,4	25,6	25,3	20,9	15,9	11,1	7,9
8	7,6	9,2	11,0	13,8	19,9	24,8	26,8	26,3	21,9	16,6	11,3	8,3
9	8,3	10,1	11,8	14,9	21,0	26,4	28,1	27,5	23,2	17,7	11,7	8,8
10	9,3	11,3	12,7	16,1	22,2	28	29,6	28,9	24,6	19,1	12,4	9,4
11	10,4	12,4	13,5	17,2	23,2	29,4	30,9	30,3	26	20,4	13	10,1
12	11,4	13,5	14,2	18,1	24,0	30,4	31,9	31,4	27,2	21,5	13,6	10,7
13	12,1	14,2	14,6	18,7	24,4	30,9	32,5	32,2	27,9	22,1	14,1	11,1
14	12,5	14,6	14,7	18,9	24,4	30,9	32,6	32,5	28,0	22,3	14,2	11,2
15	12,4	14,5	14,5	18,7	24,1	30,4	32,4	32,3	27,6	22	14	11,1
16	12,1	14	14,0	18,1	23,4	29,6	31,7	31,6	26,8	21,2	13,5	10,8
17	11,5	13,3	13,4	17,4	22,6	28,6	30,8	30,6	25,7	20,1	12,8	10,4
18	10,8	12,4	12,7	16,5	21,7	27,7	29,8	29,5	24,5	19,0	12	9,9
19	10,1	11,5	12,1	15,7	20,9	26,9	28,9	28,5	23,4	18,0	11,4	9,4
20	9,5	10,8	11,6	15	20,3	26,2	28,1	27,6	22,5	17,3	10,9	9,1
21	9,0	10,3	11,3	14,4	19,8	25,7	27,4	26,9	21,8	16,8	10,7	8,8
22	8,8	10,0	11,1	14,0	19,4	25,3	26,8	26,4	21,5	16,6	10,7	8,7
23	8,6	9,8	10,9	13,6	19,1	24,8	26,3	26,0	21,2	16,6	10,9	8,7
24	8,5	9,7	10,8	13,3	18,8	24,2	25,8	25,8	21,1	16,6	11,1	8,7

8.6 Υπολογισμός θερμοχωρητικότητας του PCM RT42 βάσει της τριγωνικής κατανομής

Το PCM RT42 επιλέχθηκε κατόπιν δοκιμών και έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Εύρος θερμοκρασιών $T_s = 38^\circ\text{C}$, $T_l = 42^\circ\text{C}$
- Λανθάνουσα θερμότητα $H = 174 \text{ KJ/Kg}$

Η θερμοχωρητικότητα του PCM υπολογίζεται βάσει της τριγωνικής κατανομής όπως απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σύμφωνα με την τριγωνική κατανομή ισχύουν τα παρακάτω:

- Για θερμοκρασίες $T < T_s$: $C_{ps} = 7000 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$
- Για θερμοκρασίες $T > T_l$: $C_{pl} = 7500 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$
- Για θερμοκρασίες $T_s \leq T \leq T_c$:

$$C_{p,eff}(T) = 4(H - bC_{ps})(T - T_s)/b^2 + C_{ps}$$

- Για θερμοκρασίες $T_c \leq T \leq T_l$:

$$C_{p,eff}(T) = 4(bC_{pl} - H)(T - T_s - b/2)/b^2 + 2H/b - C_{pl}$$

όπου $T_c = (T_l + T_s)/2$ η θερμοκρασία στο μέσο της τριγωνικής κατανομής

$b = T_l - T_s$ το πλάτος της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης

Το PCM βρίσκεται σε ελεύθερη μορφή μέσα στη δεξαμενή και θεωρούμε ότι έχει άμεση επαφή με το νερό.

8.7 Υπολογισμός θερμότητας συλλέκτη και θερμοκρασίας δεξαμενής

Στην πρώτη φάση της εφαρμογής μελετάμε τη διάταξη που επιλέξαμε γειμίζοντας την δεξαμενή με νερό και στη συνέχεια με PCM RT42.

Για να υπολογίσουμε την αποδιδόμενη θερμική ισχύ συλλέκτη προς τη δεξαμενή χρησιμοποιούμε την σχέση που ακολουθεί:

$$Q_u = A_c * F_R * [G_T * (\tau\alpha) - U_L * (T_i - T_a)]$$

όπου

A_c η επιφάνεια του συλλέκτη ίση με 15m^2

$F_R(\tau\alpha)$ και $F_R U_L$ χαρακτηριστικά μεγέθη του συλλέκτη για τα οποία έχουν επιλεχθεί οι τιμές 0,7 και 3,5 αντίστοιχα

G_T η ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου όπως υπολογίστηκε στην παράγραφο 8.4

T_i η θερμοκρασία δεξαμενής για κάθε ώρα και T_a η θερμοκρασία περιβάλλοντος η οποία θεωρείται ίδια για κάθε μέρα και ίση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος για κάθε ώρα της 21ης κάθε μήνα

Εφόσον η εφαρμογή αφορά διάταξη εποχιακής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας ξεκινάμε τους υπολογισμούς από τον μήνα Μάιο οπότε ξεκινάει και η μεγαλύτερη ηλιοφάνεια και αύξηση της θερμοκρασίας στην Ελλάδα. Στόχος της εφαρμογής είναι να αποθηκεύσουμε θερμική ενέργεια , χωρίς να έχουμε κατανάλωση , μέχρι και τον μήνα Οκτώβριο. Στη συνέχεια από τον μήνα Νοέμβρη έως και τον μήνα Απρίλη ξεκινάμε να καταναλώνουμε θερμική ενέργεια για τις ανάγκες της κατοικίας που μελετάμε ενώ παράλληλα συνεχίζουμε να αποθηκεύουμε ενέργεια τις ώρες ηλιοφάνειας.

Για τον υπολογισμό της αποδιδόμενης ισχύος συλλέκτη προς τη δεξαμενή το διάστημα που ξεκινάει η κατανάλωση χρησιμοποιούμε τη σχέση που ακολουθεί:

$$Q_u - Q_L = MC_p(T_{out} - T_{in})$$

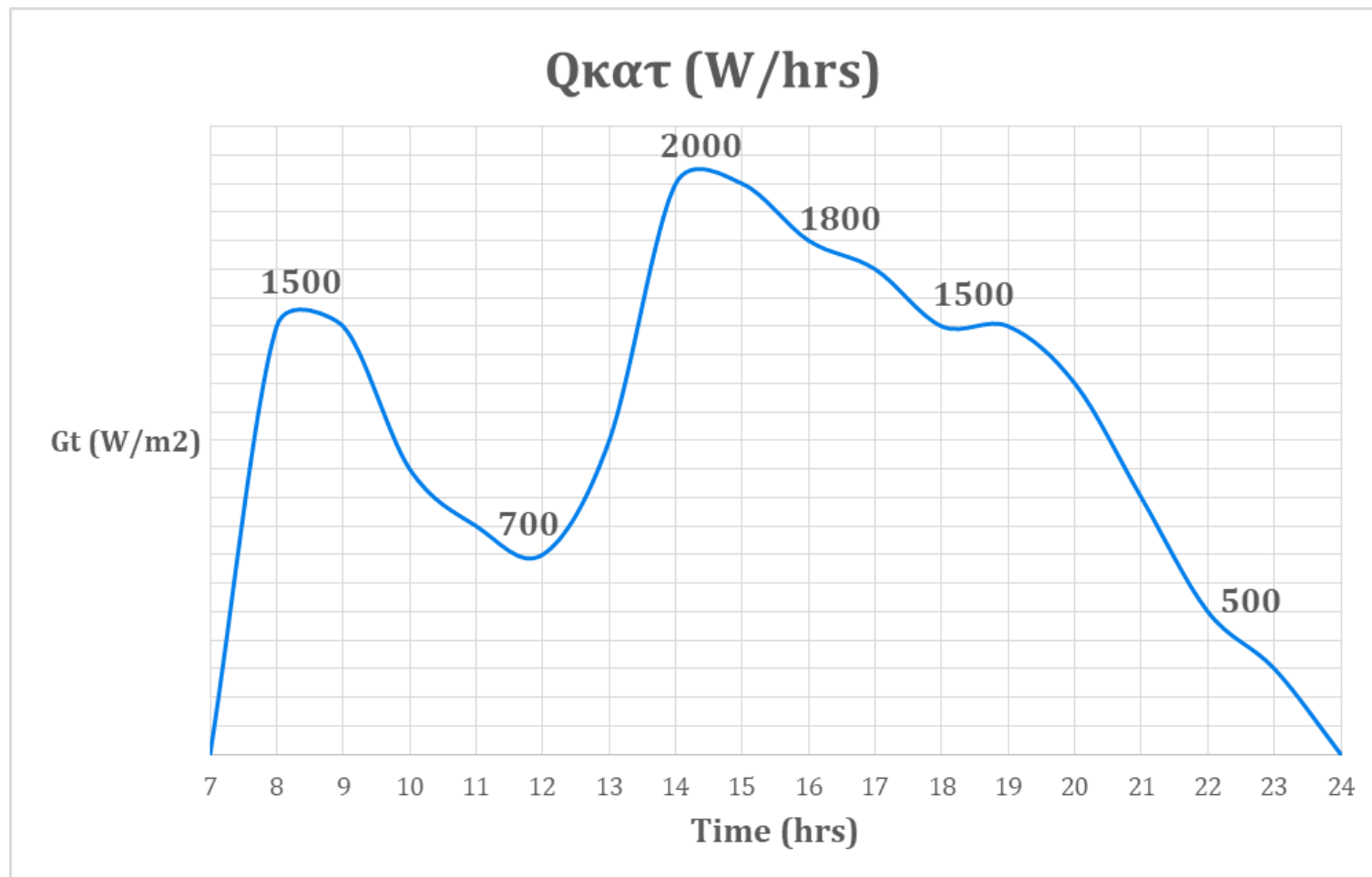
όπου Q_L είναι η κατανάλωση σε W/hrs , M η μάζα του νερού και C_p η θερμοχωρητικότητα του νερού ίση με $4190 \frac{JK}{Kg}$ ενώ για το PCM ίση με τις τιμές που υπολογίσαμε στην προηγούμενη παράγραφο.

Η κατανάλωση θερμότητας υπολογίστηκε ενδεικτικά ανάλογα με τις ανάγκες μιας κατοικίας για τις ώρες 7:00-24:00 και βρίσκονται στον παρακάτω πίνακα και παρατίθενται σχηματικά στο παρακάτω διάγραμμα.

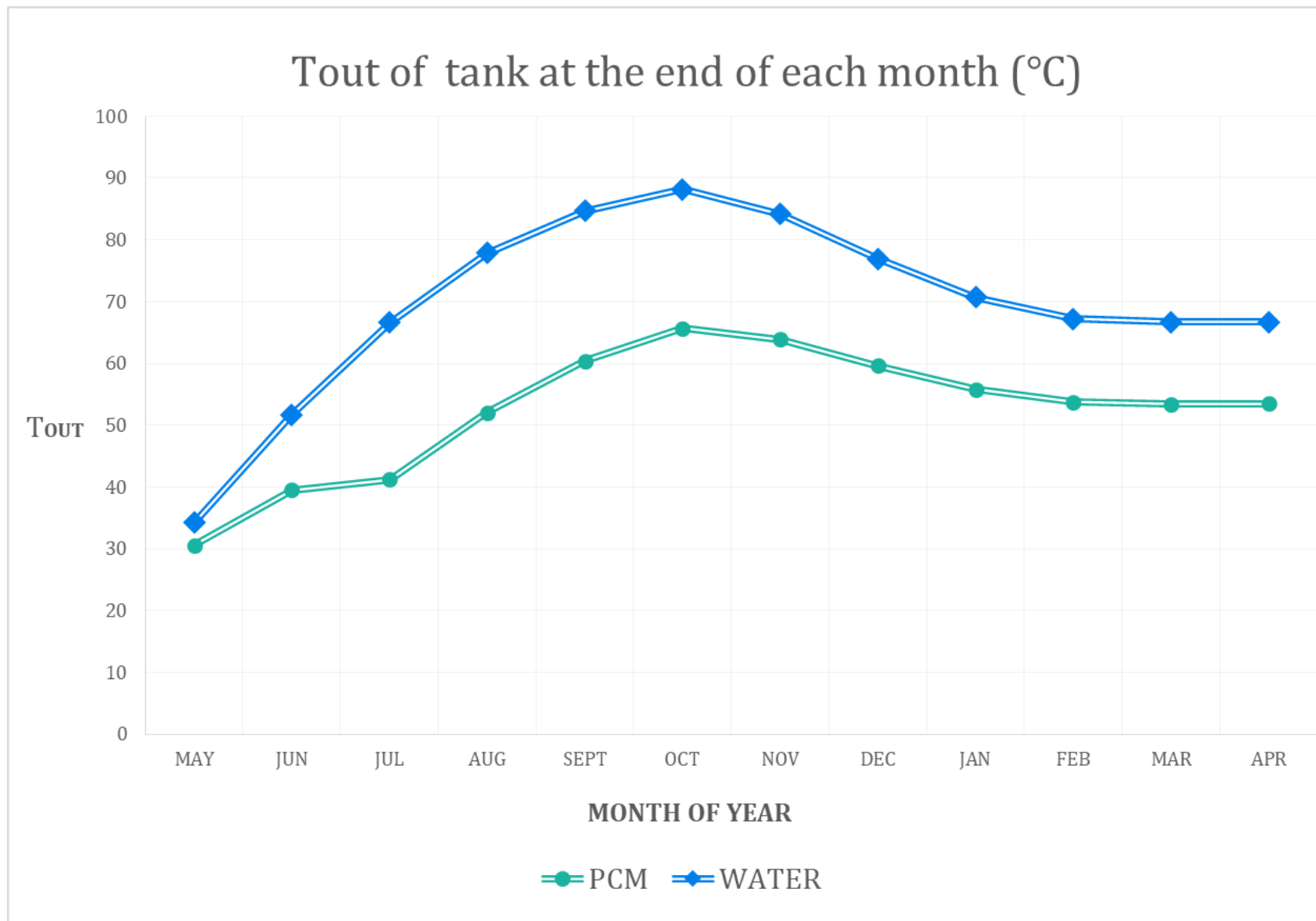
Στον παραπάνω τύπο δεν έχουμε λάβει υπόψη άλλου είδους απώλειες (θερμικές) καθώς θεωρούμε αδιαβατική δεξαμενή και ομοιόμορφη θερμοκρασία σε όλο τον όγκο του υγρού.

Η κατανάλωση θερμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας φαίνεται γραφικά στο ακόλουθο διάγραμμα ενώ στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα της θερμοκρασίας εξόδου και της θερμότητας δεξαμενής για την εφαρμογή με νερό και την εφαρμογή με PCM.

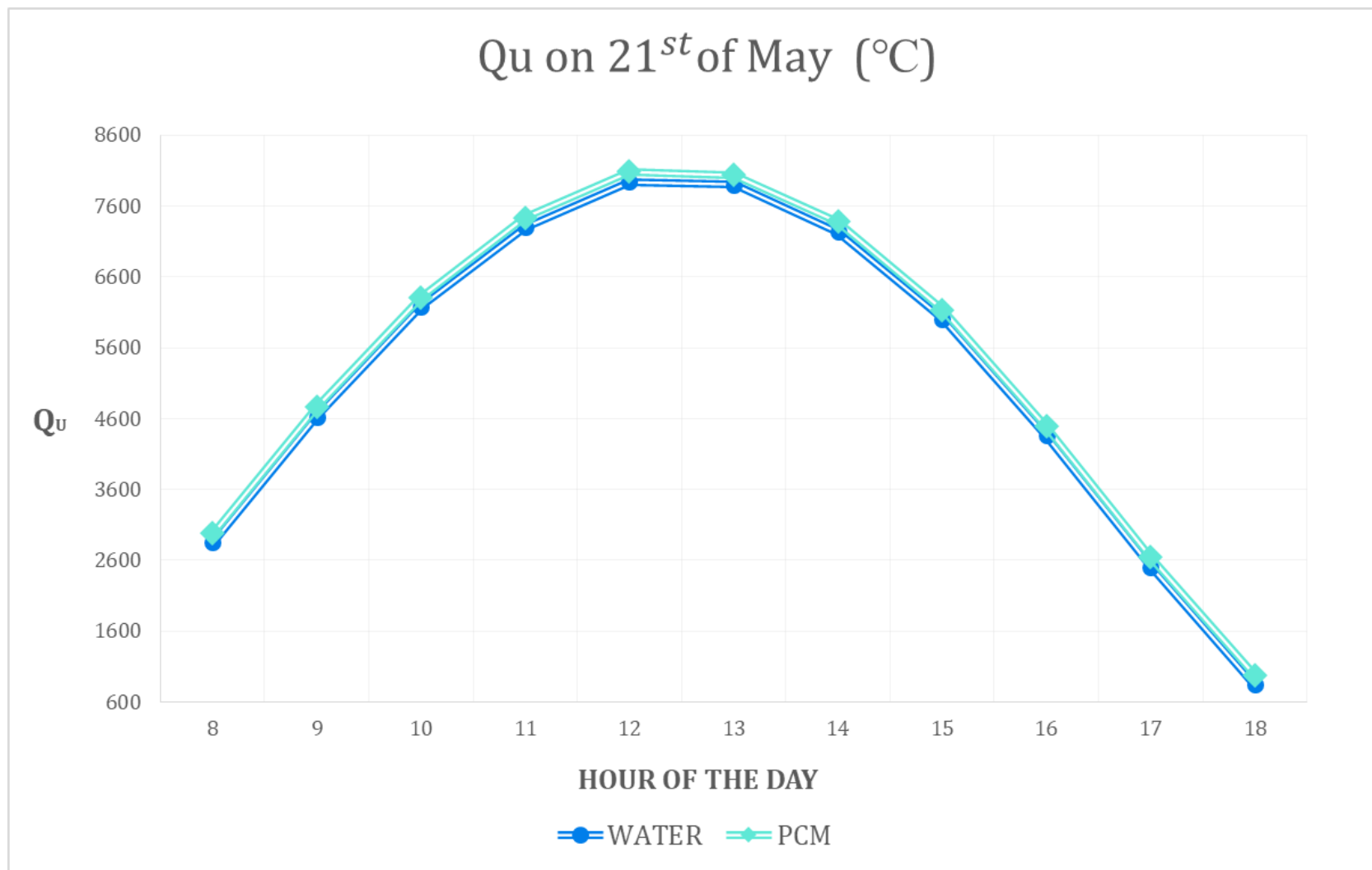
Time (hrs)	Qκατ (W/hrs)
7	0
8	1500
9	1500
10	1000
11	800
12	700
13	1100
14	2000
15	2000
16	1800
17	1700
18	1500
19	1500
20	1300
21	900
22	500
23	300
24	0



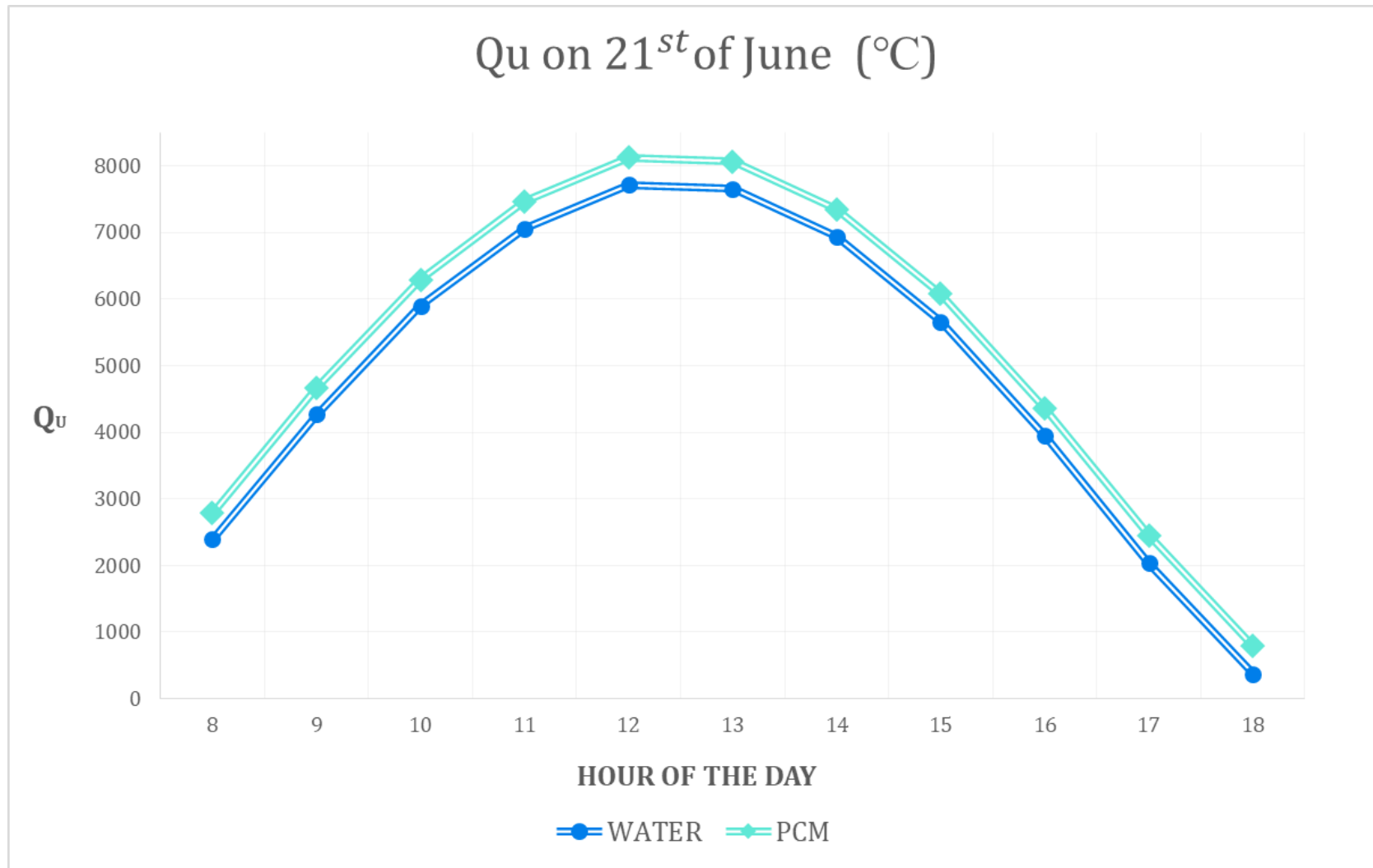
Διάγραμμα 13 : Κατανάλωση θερμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας για τις ώρες 7:00-24:00



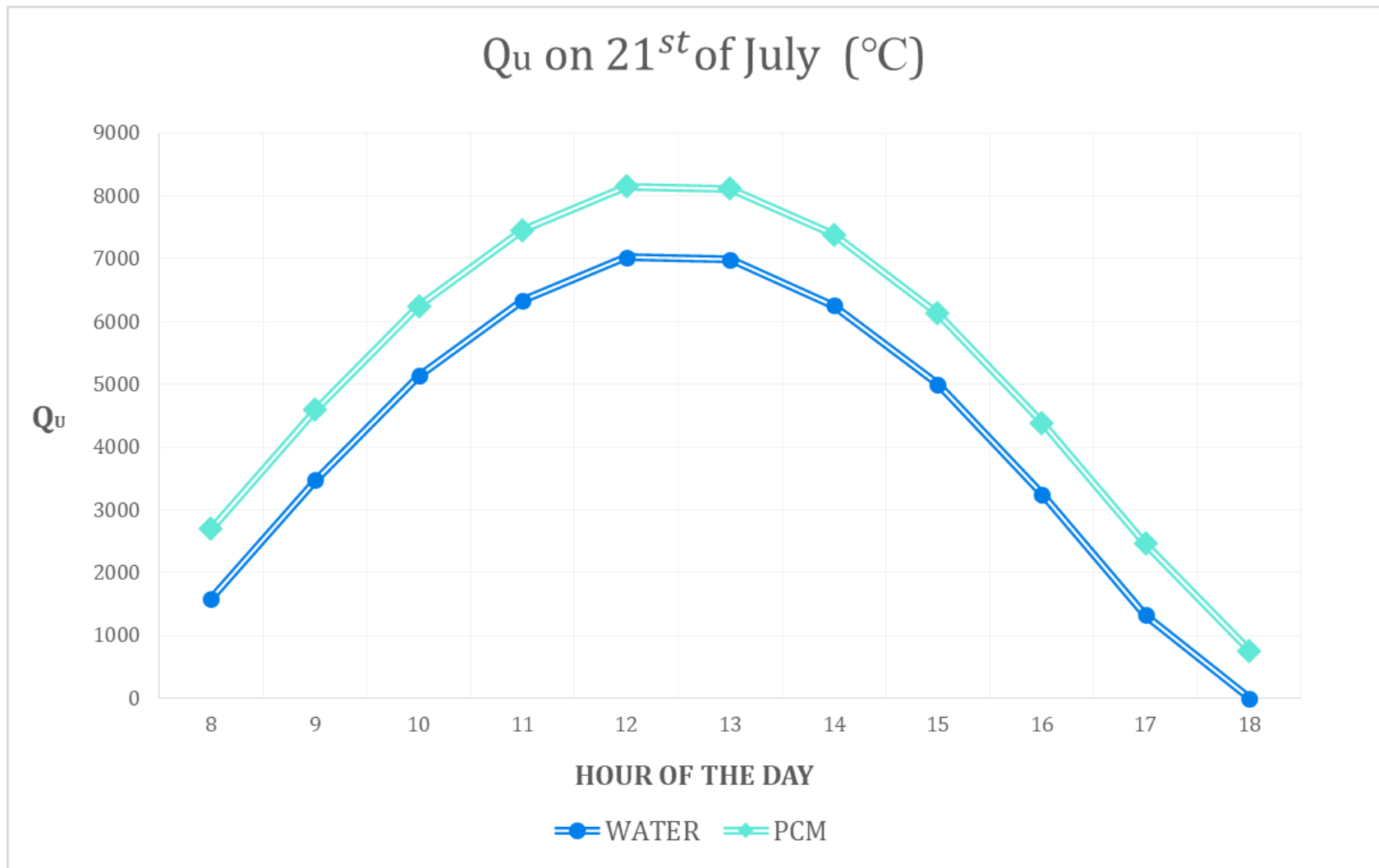
Διάγραμμα 14 : Θερμοκρασία εξόδου δεξαμενής στο τέλος κάθε μήνα για εφαρμογή με νερό και PCM



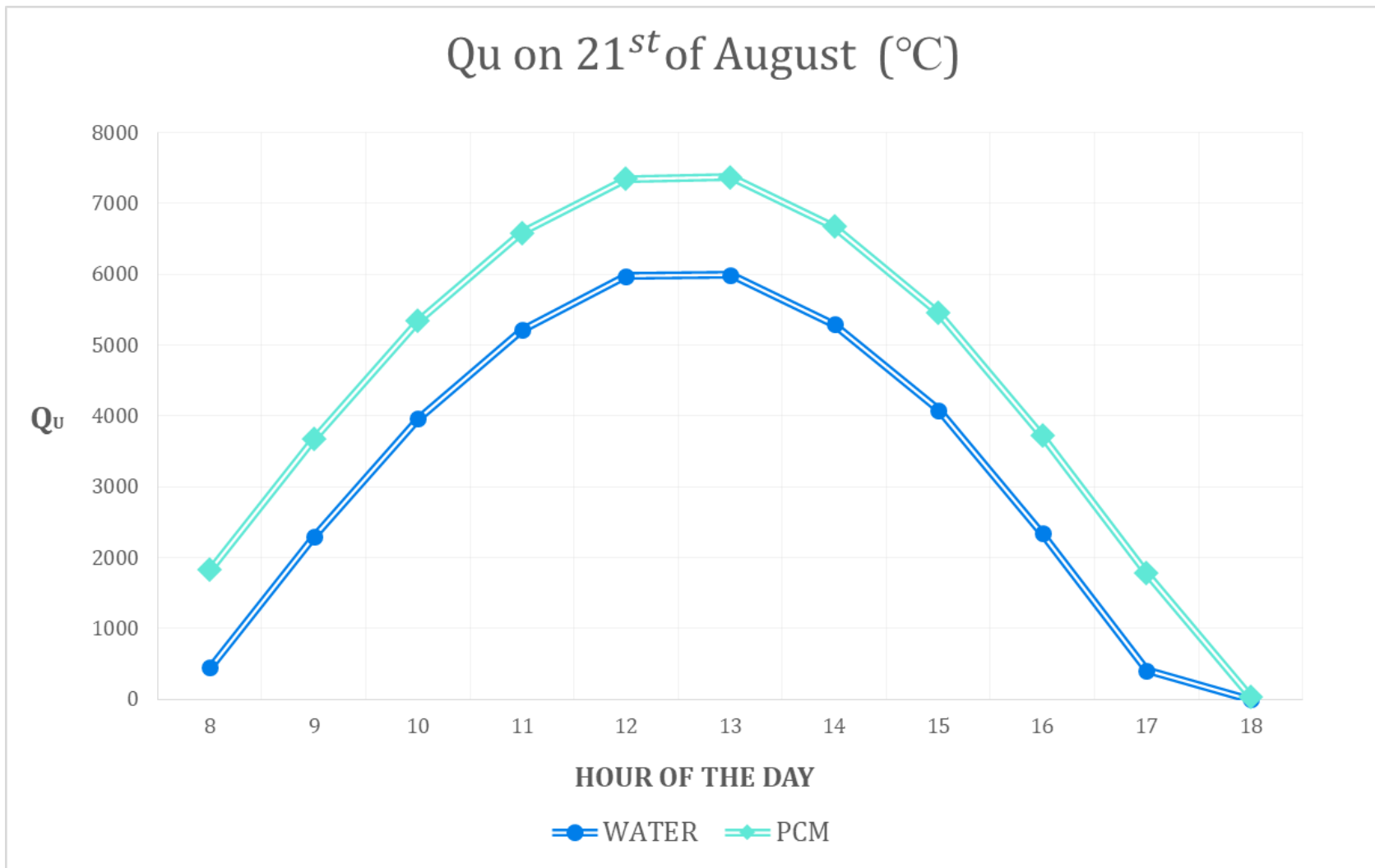
Διάγραμμα 15 : Θερμότητα συλλέκτη ανά ώρα για την 21^η Μαΐου



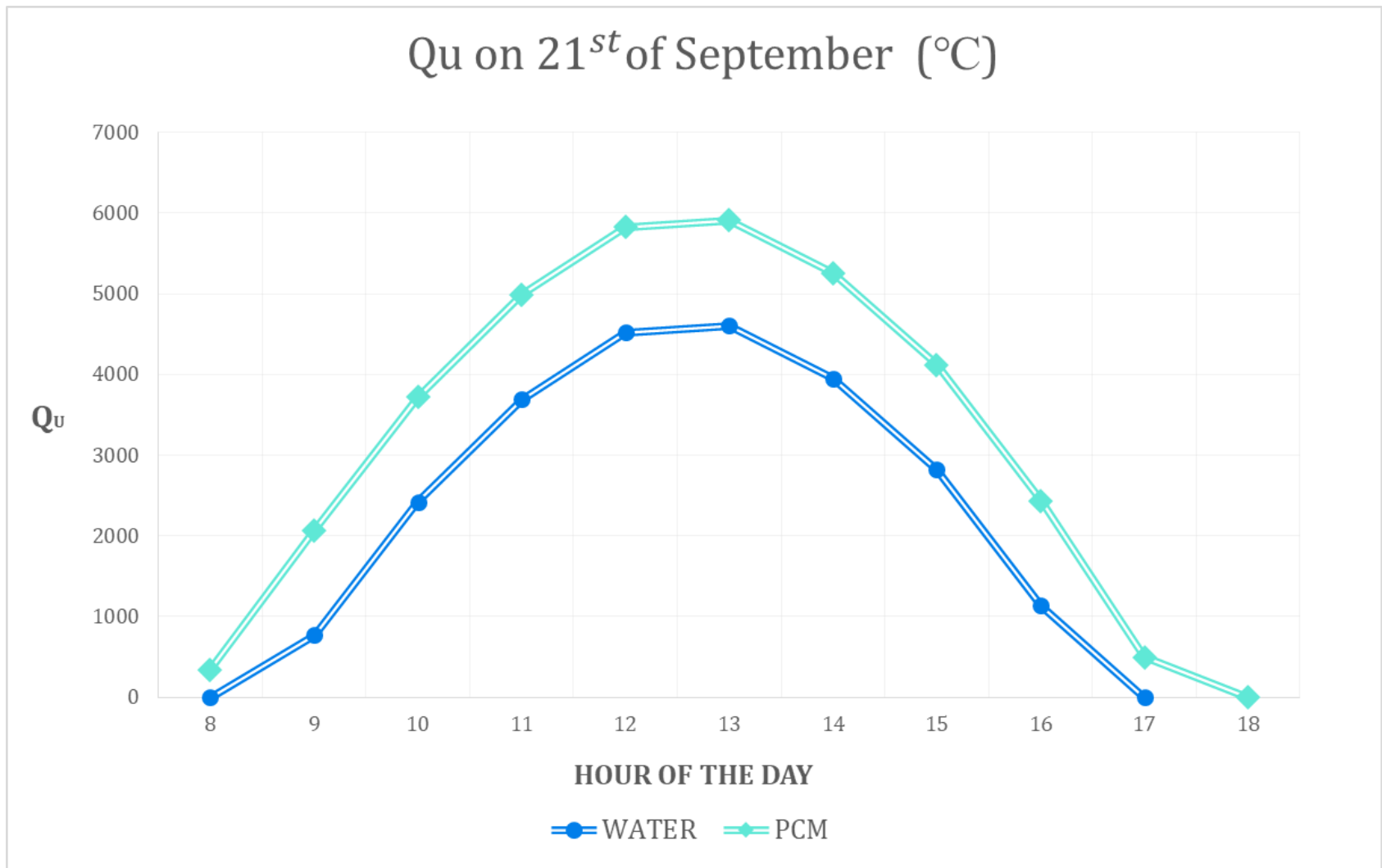
Διάγραμμα 16 : Θερμότητα συλλέκτη ανά ώρα για την 21^η Ιουνίου



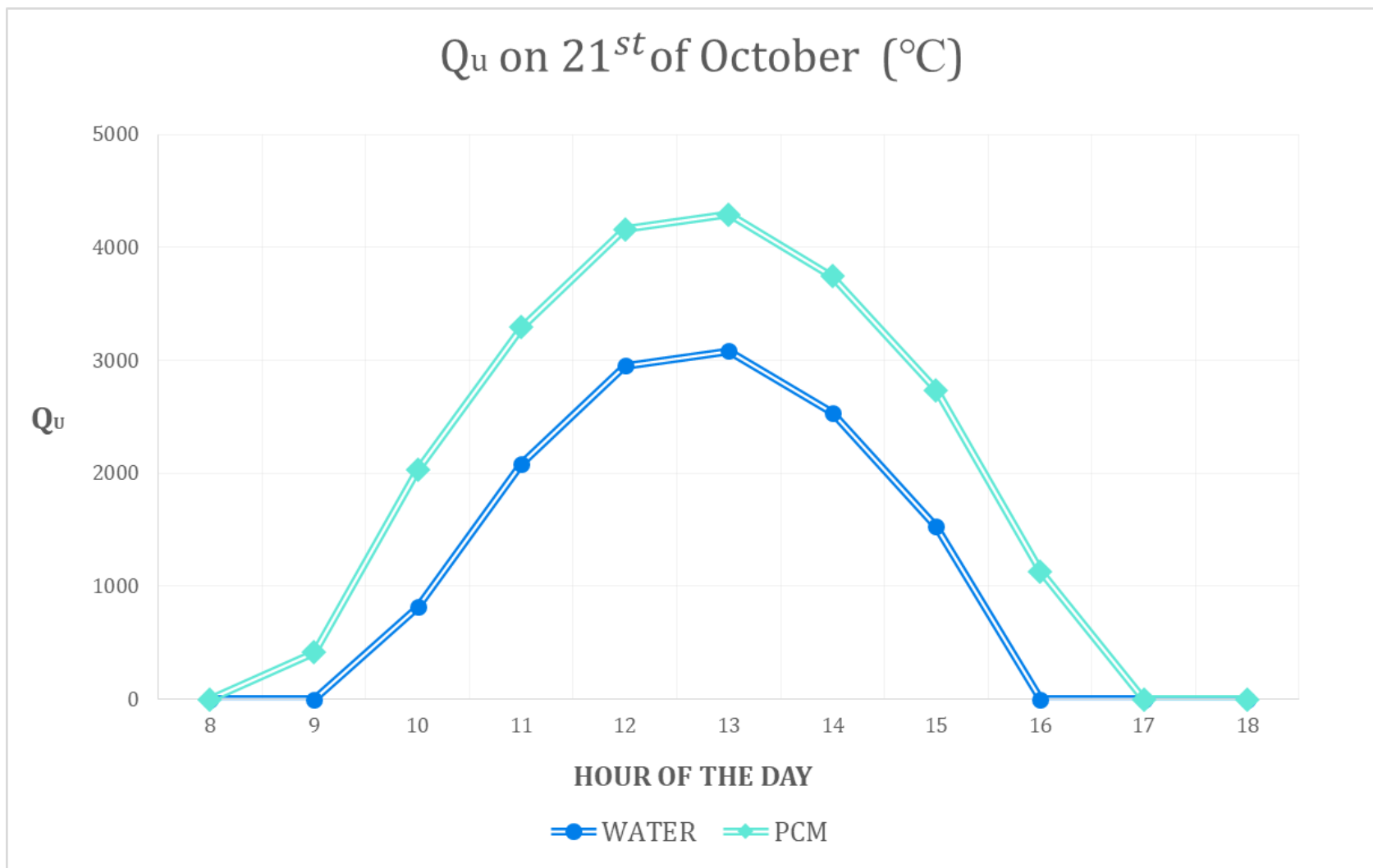
Διάγραμμα 17 : Θερμότητα συλλέκτη ανά ώρα για την 21^η Ιουλίου



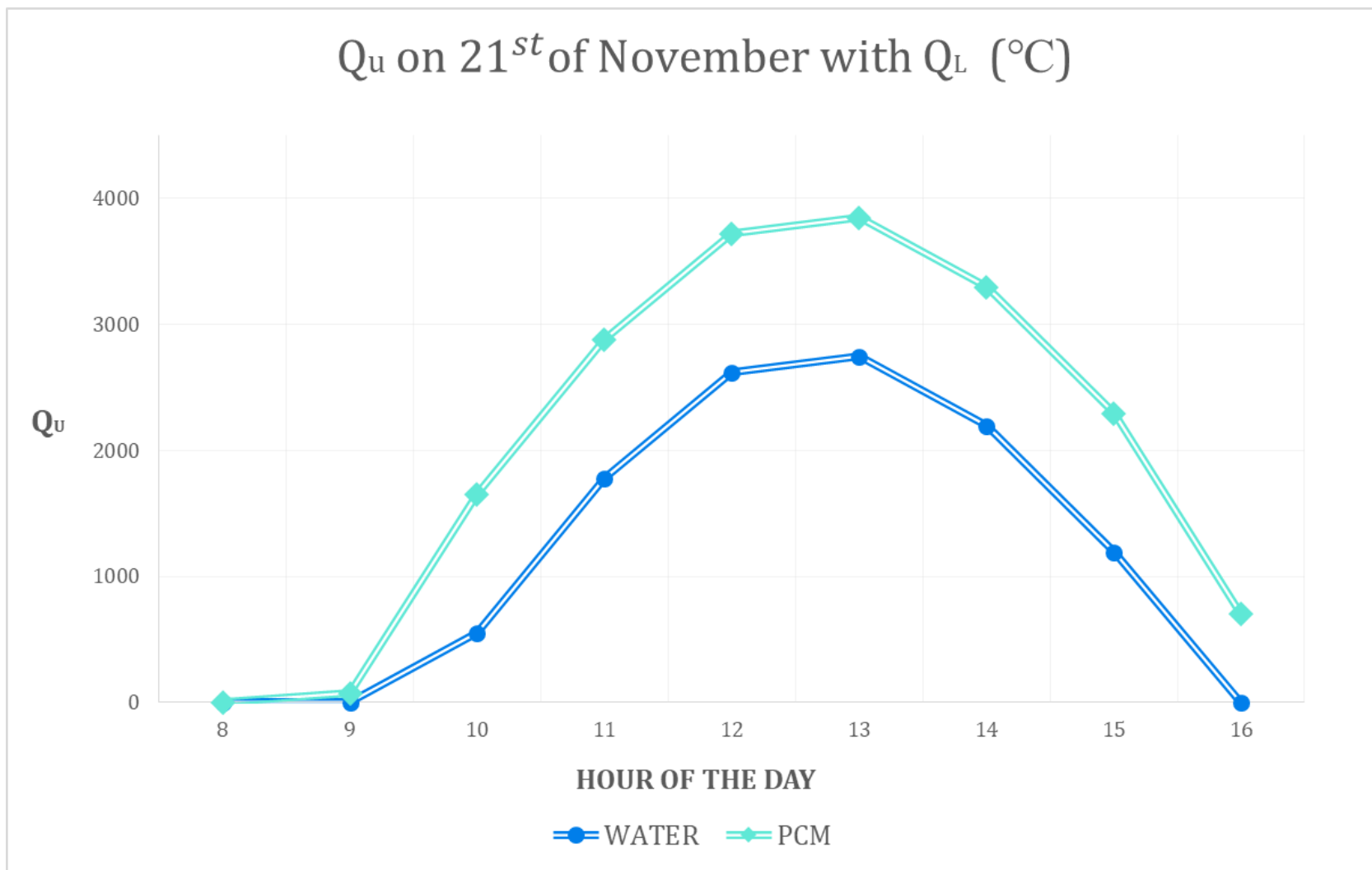
Διάγραμμα 18 : Θερμότητα συλλέκτη ανά ώρα για την 21η Αυγούστου



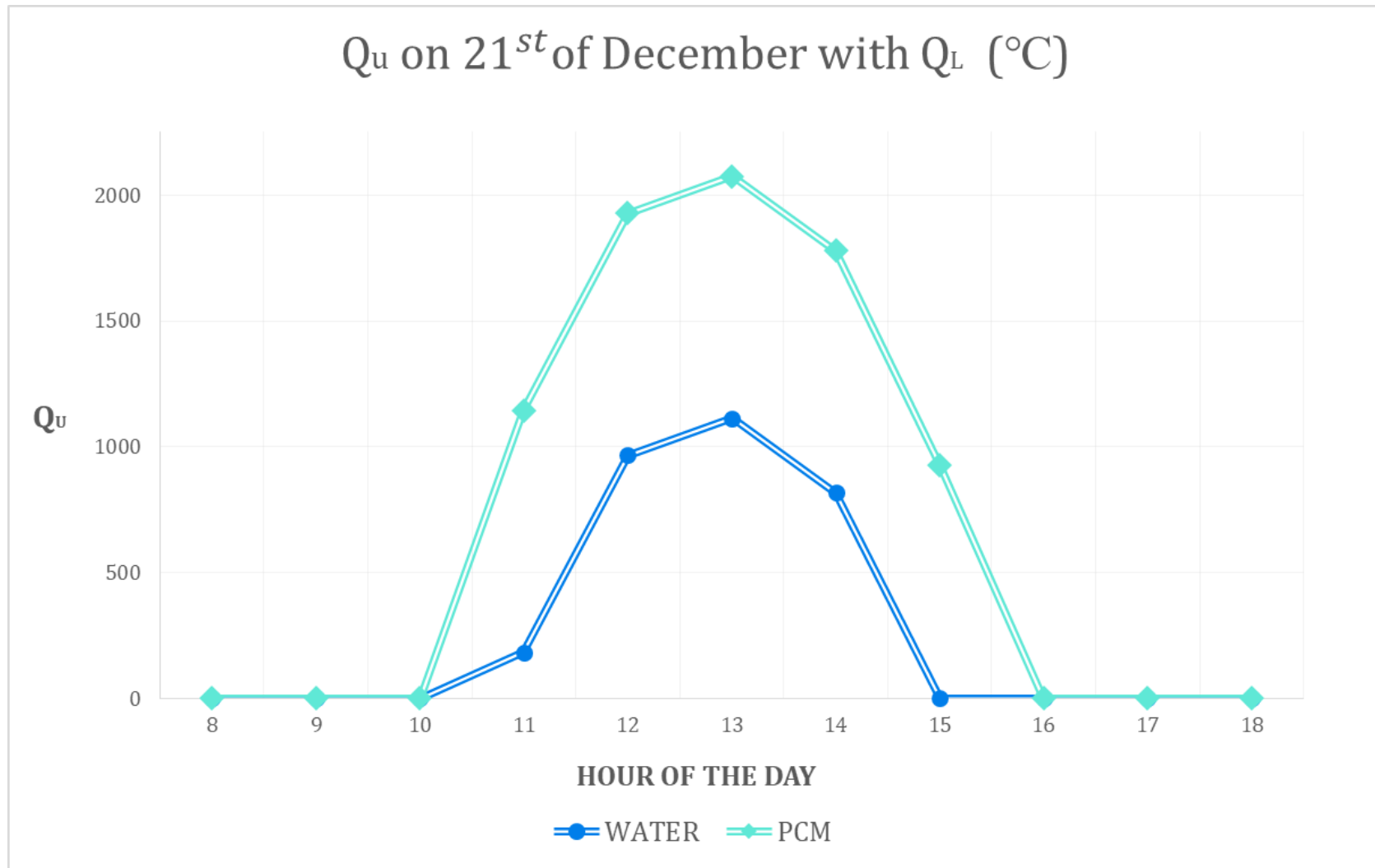
Διάγραμμα 19 : Θερμότητα συλλέκτη ανά ώρα για την 21η Σεπτέμβρη



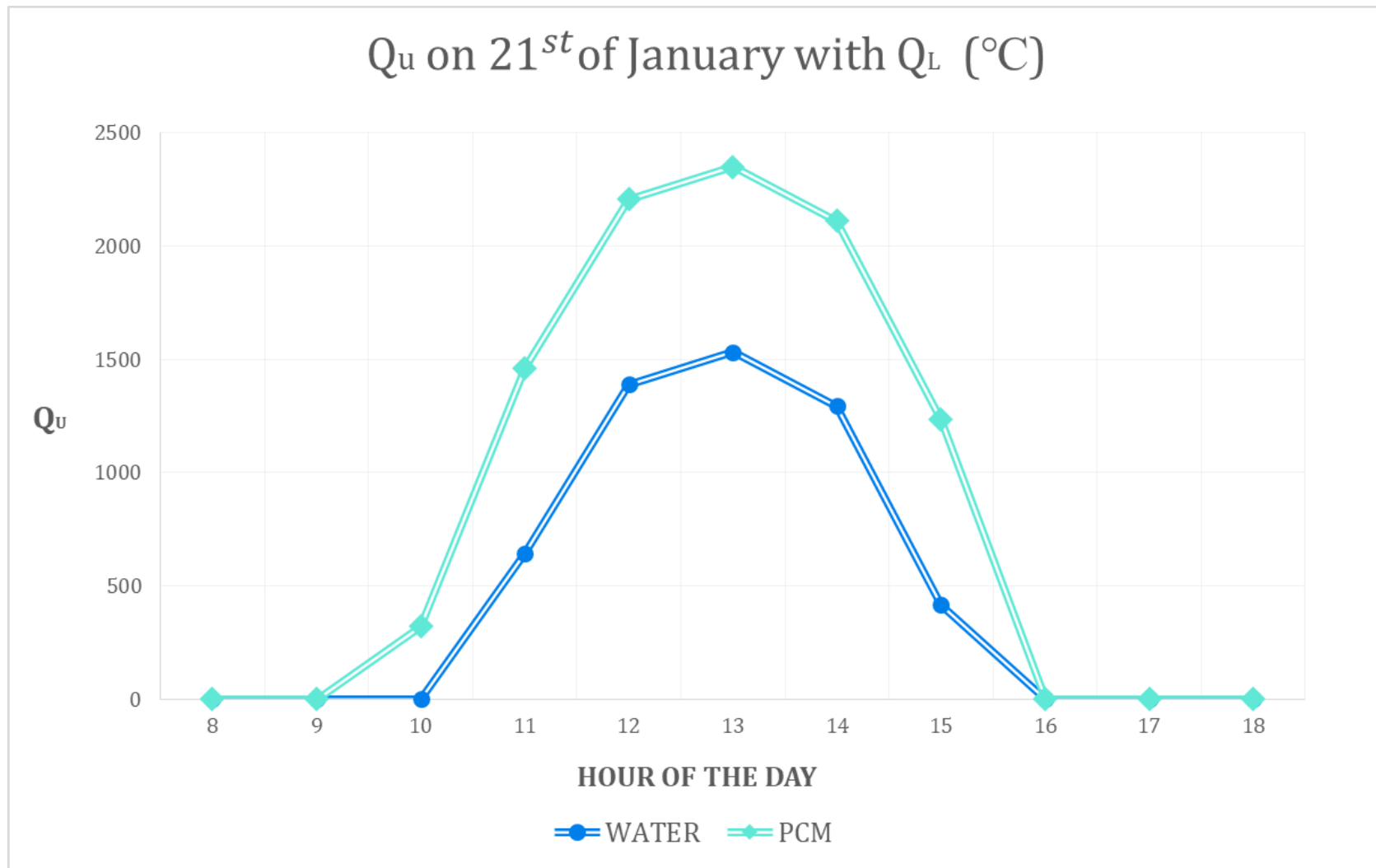
Διάγραμμα 20 : Θερμότητα συλλέκτη ανά ώρα για την 21η Οκτώβρη



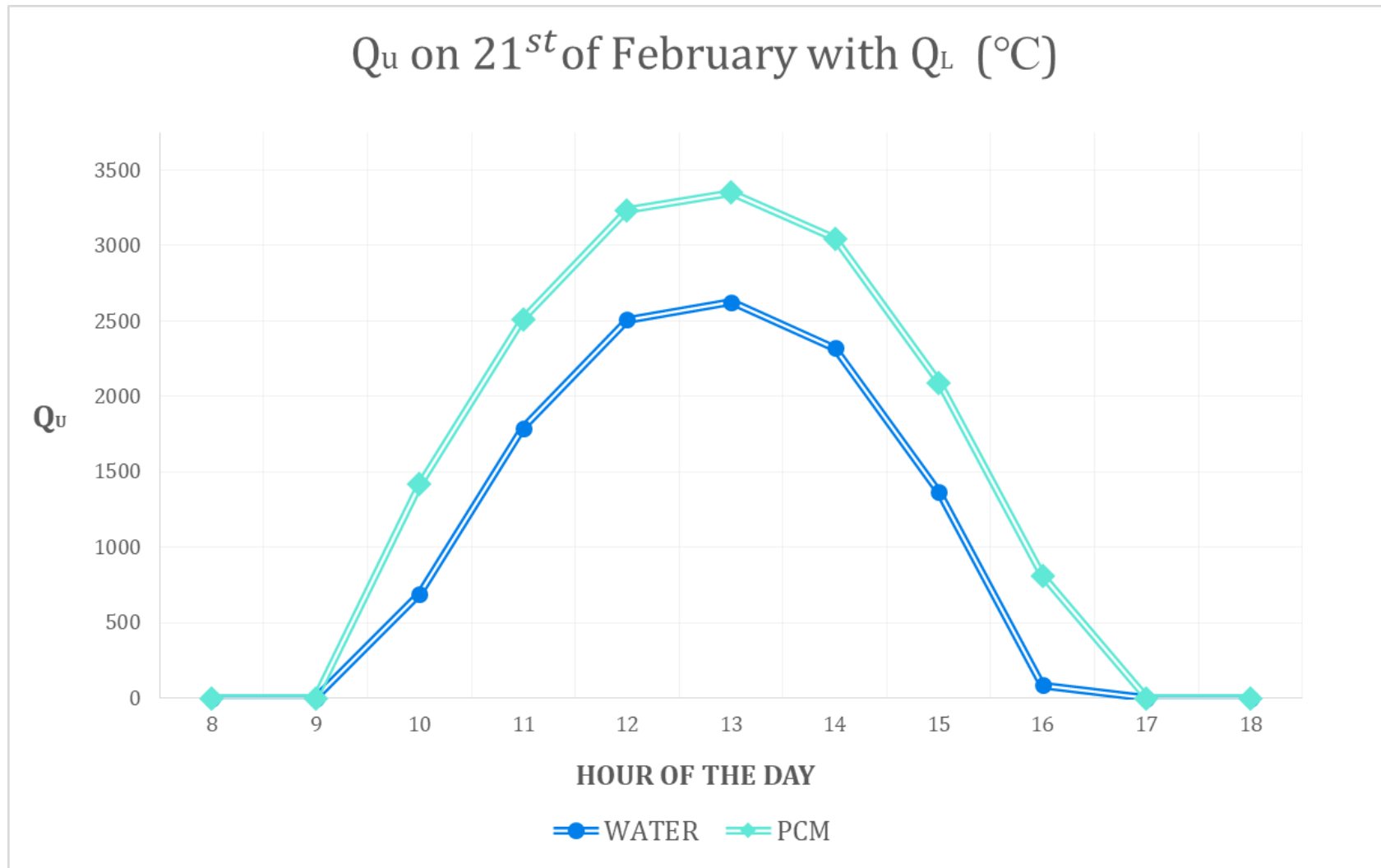
Διάγραμμα 21 : Θερμότητα συλλέκτη ανά ώρα με κατανάλωση Q_L για την 21η Νοέμβρη



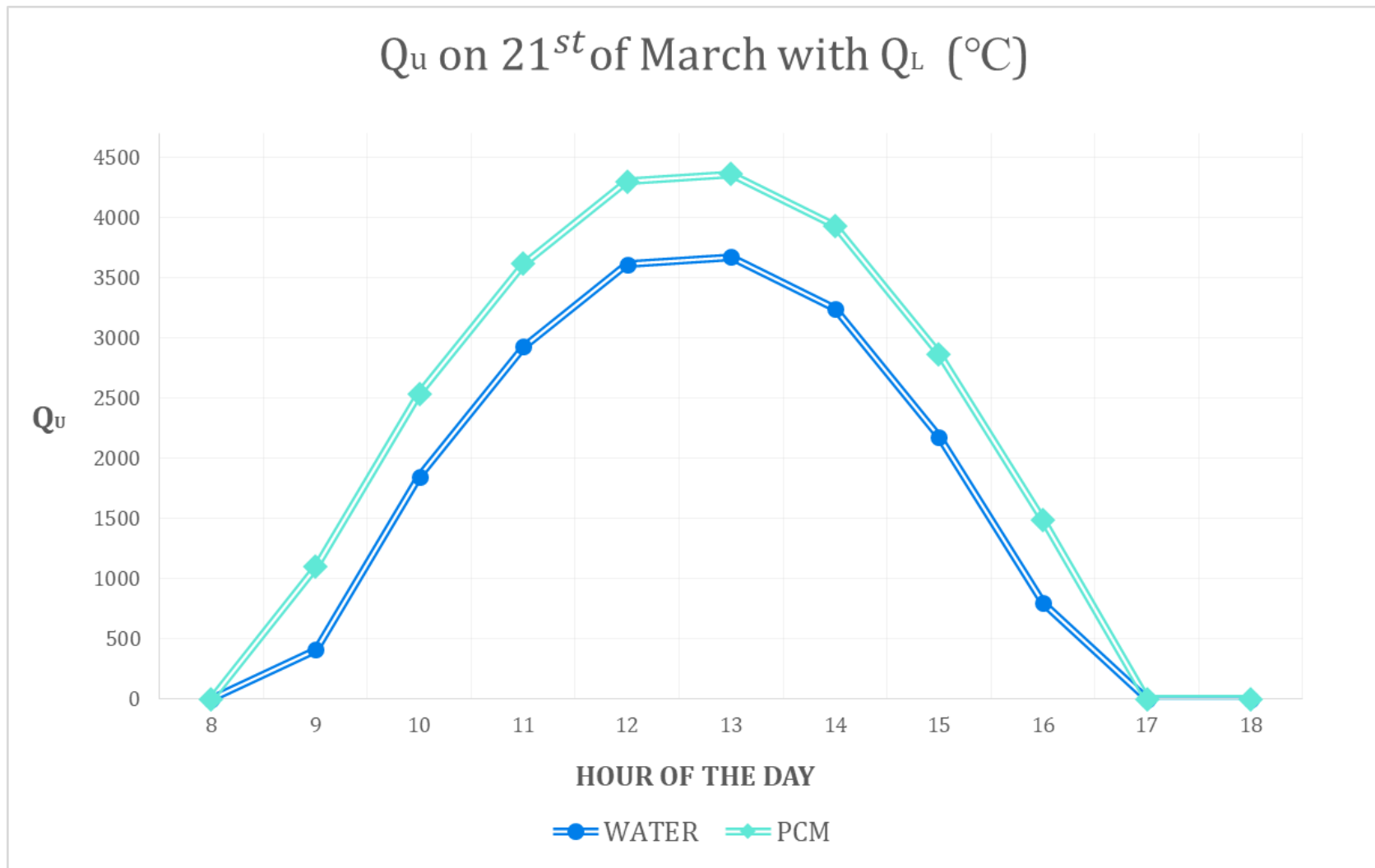
Διάγραμμα 22 : Θερμότητα συλλέκτη ανά ώρα με κατανάλωση Q_L για την 21η Δεκέμβρη



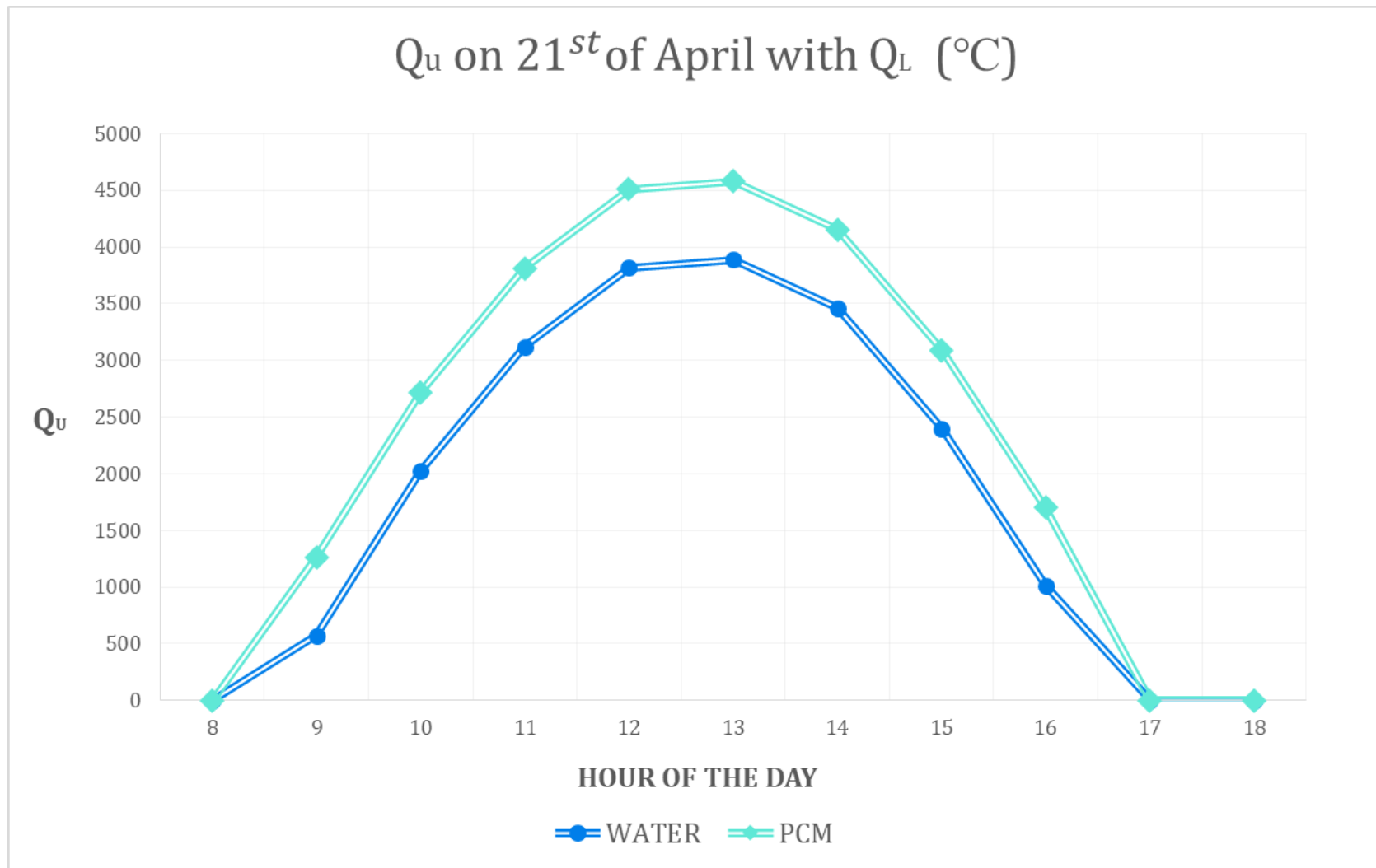
Διάγραμμα 23 : Θερμότητα συλλέκτη ανά ώρα με κατανάλωση Q_L για την 21η Ιανουαρίου



Διάγραμμα 24 : Θερμότητα συλλέκτη ανά ώρα με κατανάλωση Q_L για την 21η Φεβρουαρίου



Διάγραμμα 25 : Θερμότητα συλλέκτη ανά ώρα με κατανάλωση Q_L για την 21η Μαρτίου

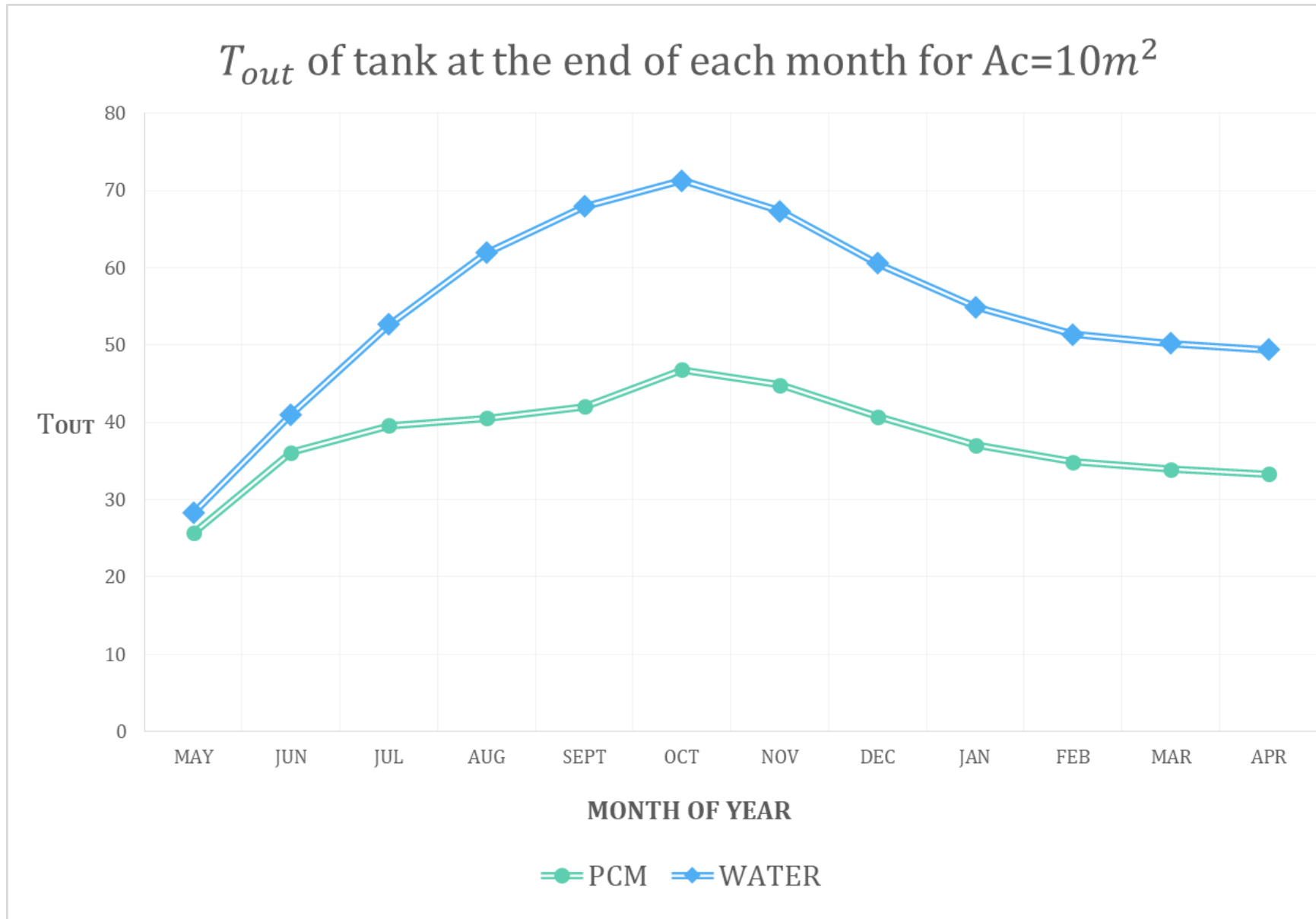


Διάγραμμα 26 : Θερμότητα συλλέκτη ανά ώρα με κατανάλωση Q_L για την 21η Απριλίου

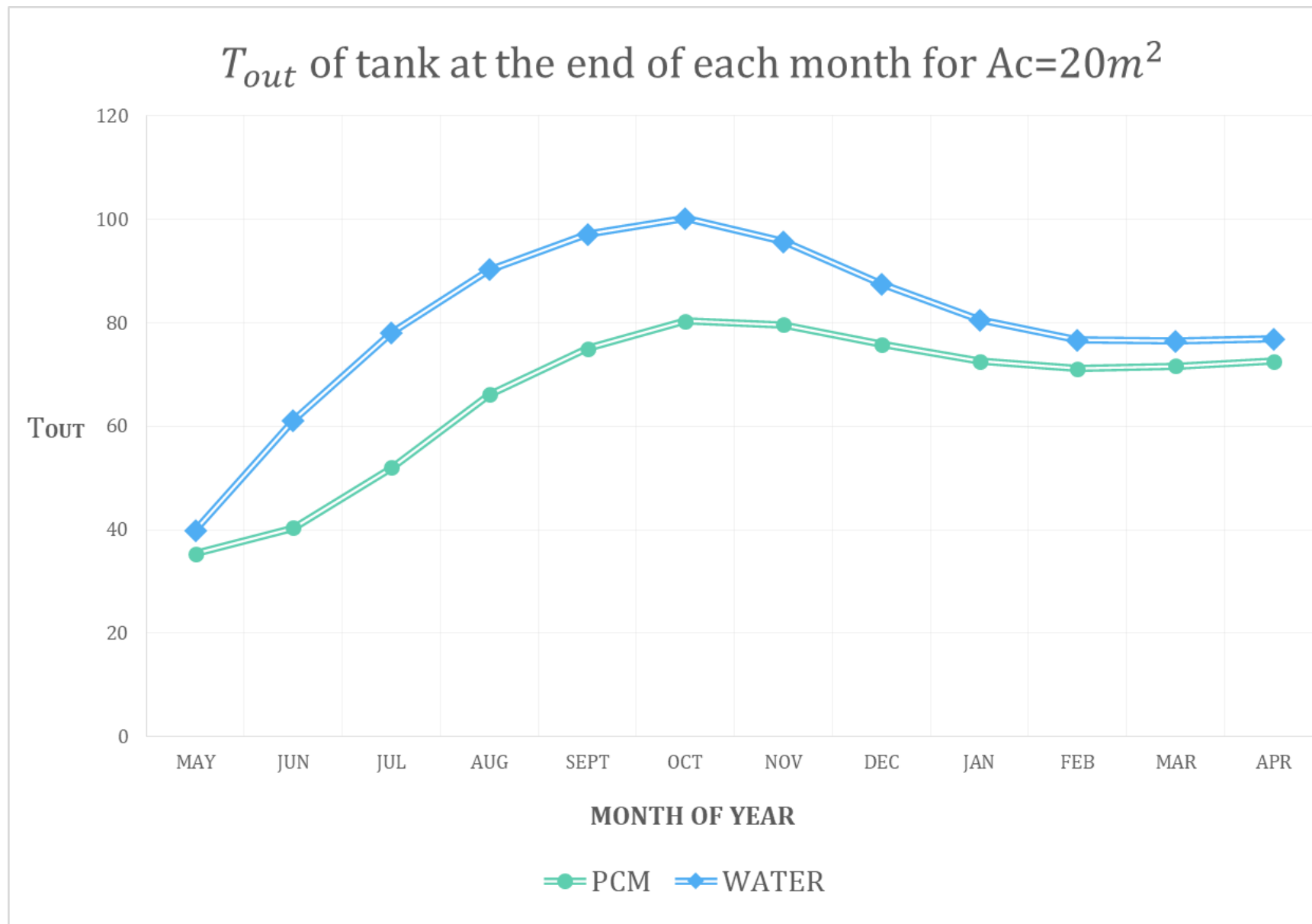
8.8 Παραμετρική μελέτη

Αφού ολοκληρώσαμε τους υπολογισμούς της εφαρμογής όπως περιεγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, πραγματοποιήσαμε μια παραμετρική μελέτη για τη διάταξη με νερό και PCM αντίστοιχα, διατηρώντας σταθερή τη χωρητικότητα της δεξαμενής και διαφοροποιώντας τις τιμές της επιφάνειας συλλέκτη ώστε να διαπιστώσουμε αν οι παράμετροι που επιλέξαμε μας αποδίδουν τα βέλτιστα αποτελέσματα.

Συνολικά με την κύρια εφαρμογή στην οποία θεωρήσαμε επιφάνεια συλλέκτη $15m^2$, πραγματοποιούμε 3 δοκιμές για συλλέκτη $10m^2$, $15m^2$ και $20m^2$. Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα θερμοκρασίας της δεξαμενής για την κάθε περίπτωση:



Διάγραμμα 27 : Θερμοκρασία εξόδου δεξαμενής στο τέλος κάθε μήνα για εφαρμογή με νερό και PCM για επιφάνεια συλλέκτη $A_c=10m^2$

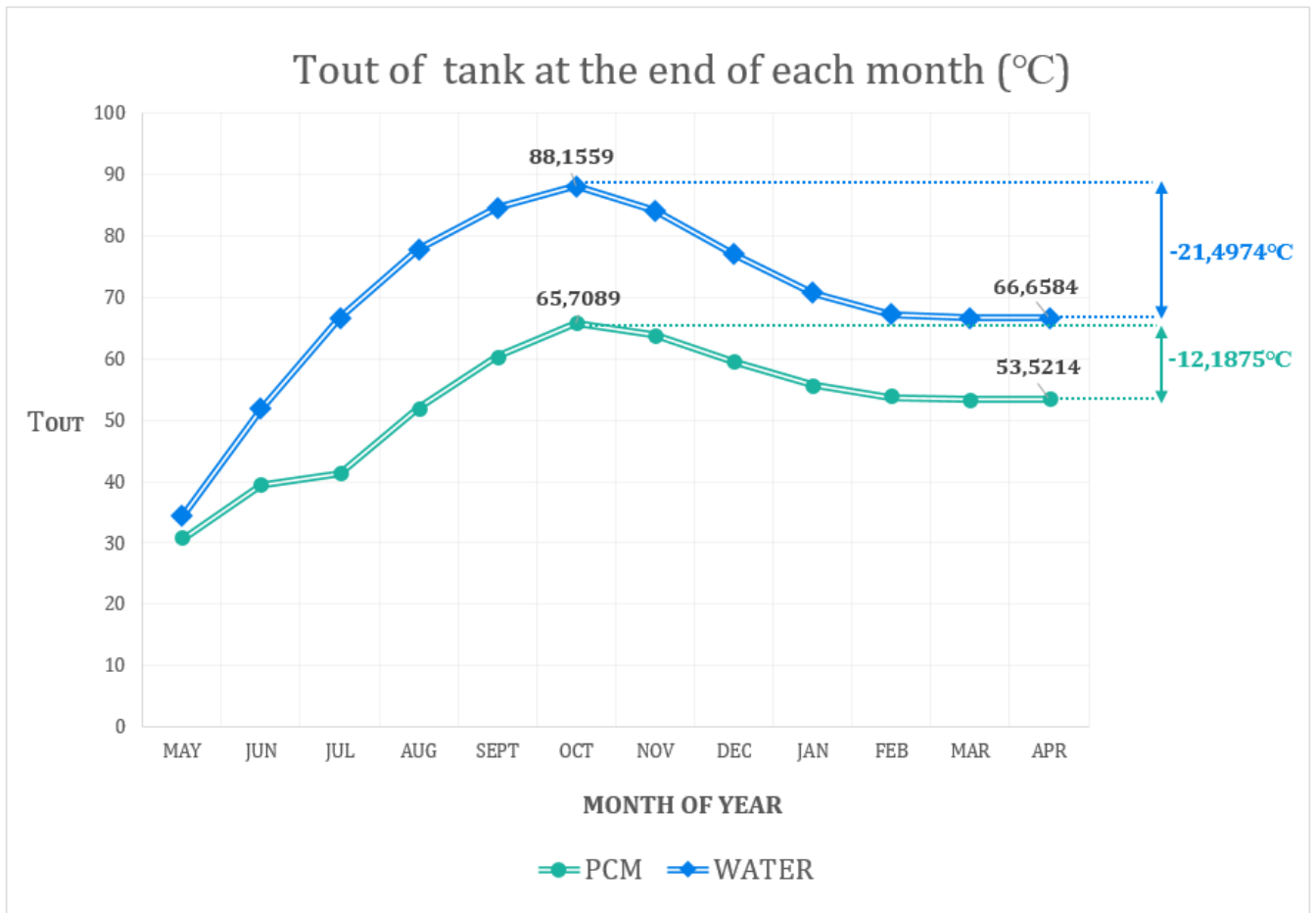


Διάγραμμα 28 : Θερμοκρασία εξόδου δεξαμενής στο τέλος κάθε μήνα για εφαρμογή με νερό και PCM για επιφάνεια συλλέκτη $A_c=20m^2$

8.9 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Αξιολογώντας την εφαρμογή που μελετήσαμε για την περίπτωση του νερού και την περίπτωση του PCM παρατηρούμε τα παρακάτω:

- Στην περίπτωση όπου στη δεξαμενή χρησιμοποιούμε ως αποθηκευτικό μέσο νερό , ξεκινώντας με θερμοκρασία δεξαμενής 15°C , η δεξαμενή φτάνει στην υψηλότερη θερμοκρασία της τον Οκτώβρη (τον μήνα δηλαδή πριν ξεκινήσουμε την κατανάλωση θερμότητας) και είναι ίση με $88,1559^{\circ}\text{C}$. Από τον μήνα Νοέμβρη που ξεκινάμε την κατανάλωση θερμότητας για οικιακή χρήση, η θερμοκρασία αρχίζει και μειώνεται όπως φαίνεται και στο διάγραμμα θερμοκρασιών, αφού και η μειωμένη ηλιοφάνεια εκείνο το χρονικό διάστημα λειτουργεί ανασταλτικά στην αναπλήρωση της χρησιμοποιούμενης θερμότητας. Τον μήνα Απρίλιο ,όταν και τελειώνει η εφαρμογή μετά το πέρας ενός έτους, η θερμοκρασία της δεξαμενής φτάνει την τελική θερμοκρασία της η οποία είναι ίση με $65,6584^{\circ}\text{C}$. Συνολικά, κατά το έτος στο οποίο εφαρμόσαμε την εποχιακή αποθήκευση θερμότητας σε δεξαμενή με νερό ,η δεξαμενή κατά τους μήνες όπου υπήρξε χρήση της θερμότητας έχασε $21,4974^{\circ}\text{C}$.
- Στο σενάριο όπου στη δεξαμενή χρησιμοποιείται ως αποθηκευτικό μέσο το PCM RT42 , η διάταξη μελετάται με τις ίδιες αρχικές συνθήκες λειτουργίας ξεκινώντας με θερμοκρασία δεξαμενής επίσης 15°C . Τον Οκτώβριο που η δεξαμενή φτάνει στο υψηλότερο σημείο θερμοκρασιών , η θερμοκρασία δεξαμενής είναι ίση με $65,7089^{\circ}\text{C}$. Θεωρώντας ίδια κατανάλωση θερμότητας για οικιακή χρήση με πριν κατά το διάστημα Νοέμβριος-Απρίλης, η δεξαμενή καταλήγει στο τέλος της εφαρμογής να έχει θερμοκρασία $53,5214^{\circ}\text{C}$. Συνολικά, κατά το έτος στο οποίο εφαρμόσαμε την εποχιακή αποθήκευση θερμότητας σε δεξαμενή με PCM , η δεξαμενή τους μήνες κατά τους οποίους υπήρξε χρήση θερμότητας έχασε $12,1875^{\circ}\text{C}$. Επίσης, μελετώντας τα διαγράμματα θερμότητας συλλέκτη Q_u κατά τη διάρκεια της 21^{ης} ημέρα κάθε μήνα , τα οποία παρατίθενται στην παράγραφο 8.7 , παρατηρούμε ότι κατά το διάστημα Νοέμβριος-Απρίλιος το PCM συγκριτικά με το νερό διατηρεί σε υψηλότερα επίπεδα την Q_u , δηλαδή έχει καλύτερη αποθηκευτική ικανότητα σε σχέση με το νερό , πράγμα το οποίο διαπιστώνεται και από το γεγονός ότι η πτώση θερμοκρασίας το διάστημα κατανάλωσης για χρήση PCM είναι αισθητά μικρότερη.



Διάγραμμα 29 : Θερμοκρασία εξόδου δεξαμενής στο τέλος κάθε μήνα για εφαρμογή με νερό και PCM

Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η χρήση PCM ως αποθηκευτικού μέσου σε διάταξη εποχιακής αποθήκευσης ενέργειας με δεξαμενή, αποτελεί πιο συμφέρουσα και αποδοτική επιλογή αφού για ίδια μεγέθη συλλέκτη-δεξαμενής και ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος και κατανάλωσης αποθηκεύουμε περισσότερη θερμική ενέργεια η οποία μας επιτρέπει να διατηρούμε σε υψηλότερα επίπεδα τη θερμοκρασία δεξαμενής το διάστημα που η ηλιοφάνεια είναι μειωμένη και κάνουμε χρήση θερμότητας.

Επίσης, το γεγονός ότι το PCM έχει μεγαλύτερη αποθηκευτική ικανότητα μας δίνει τη δυνατότητα να επιτύχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα σε μικρότερο εύρος θερμοκρασιών σε σχέση με το νερό. Αυτό αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα για τους συλλέκτες, αφού το νερό που πηγαίνει εκεί για να θερμανθεί μέσω των αγωγών έχει μικρότερη θερμοκρασία και κατά συνέπεια ο συλλέκτης καλύτερη απόδοση αφού οι απώλειες προς το περιβάλλον είναι μικρότερες.

Όσον αφορά την παραμετρική μελέτη που πραγματοποιήσαμε για σταθερή χωρητικότητα δεξαμενής και διαφορετικές τιμές της επιφάνειας συλλέκτη A_C παρατηρήσαμε τα εξής:

- **Δοκιμή 1^η : Επιφάνεια συλλέκτη ίση με $A_C = 10m^2$ και δεξαμενή $M = 62m^3$**

Στα πλαίσια της παραμετρικής μελέτης σε πρώτη φάση κρατήσαμε σταθερή την χωρητικότητα της δεξαμενής και μειώσαμε την επιφάνεια συλλέκτη σε $A_C = 10m^2$. Από τα διαγράμματα θερμοκρασιών παρατηρούμε ότι η χρήση του PCM στη δεξαμενή εξακολουθεί να παραμένει πιο αποδοτική επιλογή σε σχέση με το νερό, ωστόσο λόγω της μικρότερης επιφάνειας συλλέκτη η θερμοκρασία δεξαμενής δεν αυξάνεται τόσο ώστε να φτάσει στα επιθυμητά επίπεδα για τη χρήση που θέλουμε να κάνουμε. Συγκεκριμένα, το υψηλότερο σημείο θερμοκρασιών ανέρχεται στους $46,8499^\circ C$, δηλαδή 29% μικρότερη συγκριτικά με την βασική διάταξη όπου ο συλλέκτης έχει επιφάνεια $A_C = 15m^2$.

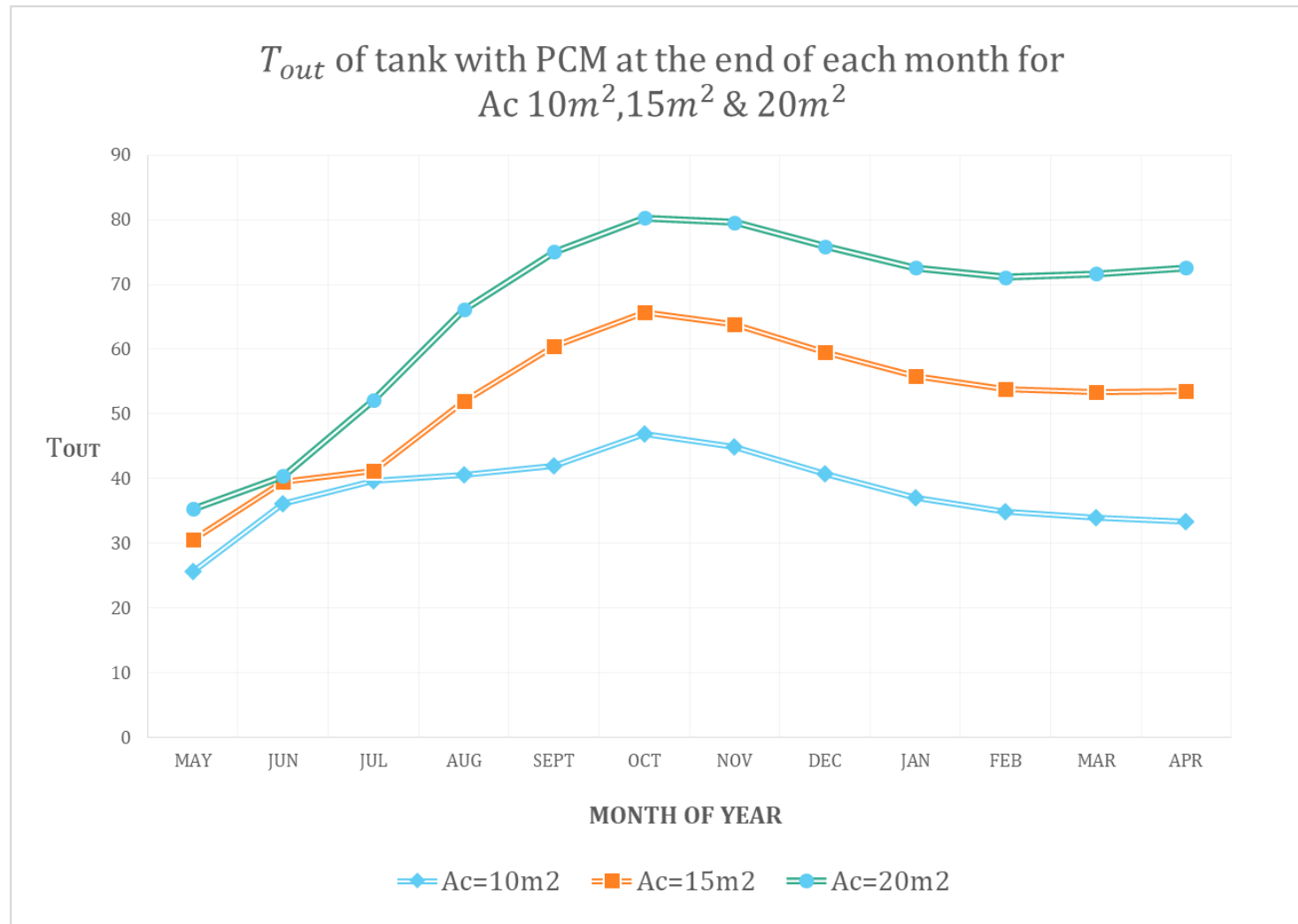
- **Δοκιμή 2^η : Επιφάνεια συλλέκτη ίση με $A_C = 20m^2$ και δεξαμενή $M = 62m^3$**

Στην επόμενη δοκιμή κρατήσαμε και πάλι σταθερή την χωρητικότητα της δεξαμενής και αυξήσαμε αυτή τη φορά την επιφάνεια συλλέκτη σε $A_C = 20m^2$. Υπό αυτές τις συνθήκες, στην περίπτωση που η δεξαμενή είναι γεμισμένη με νερό, η θερμοκρασία δεξαμενής φτάνει σε πολύ υψηλά επίπεδα αγγίζοντας τους $100^\circ C$ στο υψηλότερο σημείο της γεγονός που δεν είναι επιθυμητό καθώς στους $100^\circ C$ το νερό έρχεται σε κατάσταση βρασμού και κατά συνέπεια θα εξατμιστεί κατά ένα μέρος από τη δεξαμενή.

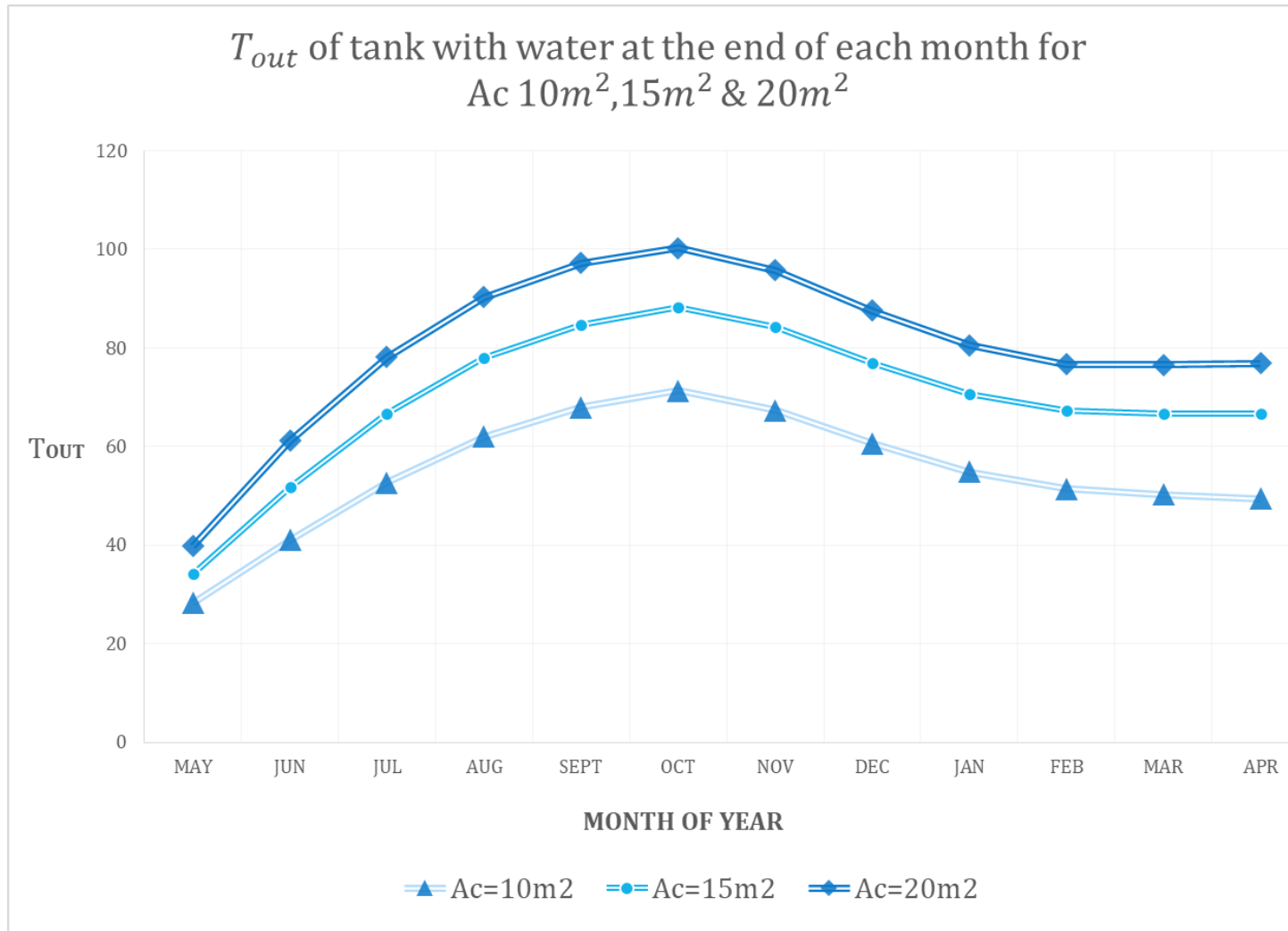
Χρησιμοποιώντας ως αποθηκευτικό μέσο PCM RT42, η καμπύλη θερμοκρασιών δεξαμενής δείχνει ότι η διάταξη αναπτύσσει μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών για ίδια συνθήκες περιβάλλοντος και κατανάλωσης θερμότητας συγκριτικά με την αρχική με επιφάνεια συλλέκτη $A_C = 15m^2$. Συγκεκριμένα, το υψηλότερο σημείο θερμοκρασιών το οποίο εμφανίζεται τον Οκτώβριο ανέρχεται στους $80,2959^\circ C$, δηλαδή 22% μεγαλύτερο. Ακόμα, η πτώση θερμοκρασίας που παρατηρείται μέχρι το πέρας της εφαρμογής τον Απρίλιο είναι μικρή καταλήγοντας η θερμοκρασία δεξαμενής στους $72,5691^\circ C$, είναι δηλαδή 36% μικρότερη σε σχέση με την αρχική εφαρμογή με $A_C = 15m^2$.

Συμπερασματικά, παρόλο που η χρήση συλλέκτη με επιφάνεια $A_C = 20m^2$ αποδίδει καλύτερη θερμοκρασία για τις ίδιες συνθήκες στο ίδιο χρονικό διάστημα, η αυξημένη θερμοκρασία του PCM στη δεξαμενή μπορεί προκαλέσει μεγαλύτερες απώλειες από το συλλέκτη προς το περιβάλλον και ο βαθμός απόδοσης του να μειωθεί.

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα θερμοκρασίας δεξαμενής με νερό και PCM για τις τρεις τιμές επιφάνειας ηλιακού συλλέκτη που μελετήσαμε:



Διάγραμμα 30 : Θερμοκρασία εξόδου δεξαμενής στο τέλος κάθε μήνα για εφαρμογή με PCM , παραμετρική μελέτη για $A_c 10m^2 , 15m^2 \& 20m^2$



Διάγραμμα 40 : Θερμοκρασία εξόδου δεξαμενής στο τέλος κάθε μήνα για εφαρμογή με νερό , παραμετρική μελέτη για $A_c 10m^2 , 15m^2 \text{ \& } 20m^2$

Βιβλιογραφία

- [1] R. W. ., Y. L. J. Xu, «A review of available technologies for seasonal thermal energy storage,» *Science Direct*, 2013.
- [2] V. T. (. C. C. (. D. B. (. Atul Sharma (a), «Review on thermal energy storage with phase change materials and applications,» 2007.
- [3] L. G. Socaciu, «Thermal Energy Storage with Phase Change Material,» *Leonardo Electronic Journal of Practices & Technologies*, 2012.
- [4] «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-change_material.
- [5] «ACT, Advanced Cooling Technologies,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.1-act.com/products/pcm-heat-sinks/pcmselection/>.
- [6] «Global Market Insights,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/phase-change-material-market>.
- [7] «Grand View Research,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/advanced-phase-change-material-apcm-industry>.
- [8] G. A. & K. S.A, «Phase Change Materials Analysis,» *Science Direct*, 1991.
- [9] L. G. A., «Solar Heat Storage : Latent Heat Materials,» 1983.
- [10] T. J., «New materials for Thermal Storage,» 1989.

- [11] L. G.A, «Phase Change Materials for Energy Storage Nucleation to Prevent Supercooling,» 1991.
- [12] F. Y. , T. X. , Y. K. Zhang X.X, «Crystallization & prevention of supercooling of microencapsulated n-alkanes,» *Journal of colloid and interface Science*, 2005.
- [13] H. M. a. L. Cabeza, «Phase Change Materials-Part V.».
- [14] A. G. , M. G. , S. U. Yanio E. Miliana, «A review on encapsulation techniques for inorganic phase change materials & the influence on their thermophysical properties».
- [15] R. S. , F. S. , Y. X. J. D. A. Safaria, «A review on supercooling of Phase Change Materials in thermal energy storage systems».
- [16] D. B. Vineet Veer Tyagi, «PCM thermal storage in buildings: A state of art».
- [17] «Sharcnet,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans_the/Hlp_G_THE3_9.html.
- [18] A. M. K. , S. A. K. R. S. A.-H. Mohammed M. Farid, «A review on phase change energy storage: materials & applications,» 2004.
- [19] L. G.A, «Solar Heat Storage : Latent Heat Materieals Vol. II».
- [20] G. A. , Y. J. , G. F. Xiang Huang, «Morphological Characterization and applications of phase change materials in thermal energy storage : A review».
- [21] M. Eleni, Diploma Thesis : Energy Storage Systems with Phase Change Materials, Athens , Ntua, 2010.
- [22] R. V. , A. V. A. Pasupathy, «Phase change material-based buliding architecture for thermal management in residential and commercial establishments».

- [23] K. P. L. P. Peippo K, «Multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating».
- [24] S. C. Feustel HE, «Thermal performance of phase change wallboard for residential cooling application».
- [25] N. DA, «Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage,» *Solar energy*, 2000.
- [26] H. J. , W. T. , D. M. Kissok JK, «Testing and simulation of phase change wallboard for thermal storage in buildings,» 1998.
- [27] Y. Z. K. Lin, «Experimental study of underfloor electric heating system with shape-stabilized PCM plates».
- [28] S. T. K. Nagano, «Study of a floor supply air conditioning system using granular phase change material to augment building thermal storage». *Energy and Buildings*, vol. 38.
- [29] C. X. Farid MM, «Domestic electrical space heating with heat storage».
- [30] K. W. Farid MM, «Underfloor Heating with latent heat storage,» 2001.
- [31] M. S. Arkar C., «Enhanced solar assisted building ventilation system using sphere encapsulated PCM thermal heat storage,» σε *Advanced Thermal energy storage techniques feasibility studies and demonstration projects 2nd workshop*, Ljubliana, Slovenia, 2002.
- [32] Z. M. , S. W. Na Zhu, «Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials».
- [33] L. G. A., «Solar Heat Storage : Latent Heat Materials Volume I, Background & Scientific Principles,» 1983.