



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Θερμότητας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***«ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ
ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΗΛΙΑΚΗ ΛΙΜΝΗ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ»***

Της Προπτυχιακής Φοιτήτριας

Μαρίας Σ. Πασίρογλου

Επιβλέπων

Κίμων Αντωνόπουλος, Καθηγητής,
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2008

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	1
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^Ο ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
1.1 Το ενεργειακό πρόβλημα – Η σημασία της αποθήκευσης ενέργειας.....	4
1.2 Αποθήκευση Θερμότητας.....	4
1.2.1 Γενικά.....	4
1.2.2 Μέθοδοι αποθήκευσης θερμότητας.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^Ο ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΩΣ ΑΙΣΘΗΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ.....	7
2.1 Γενικά.....	7
2.2 Υδάτινη θερμική Αποθήκη.....	7
2.2.1 Υδάτινες αποθήκες ομοιόμορφης θερμοκρασίας.....	8
2.2.1.1 Μελέτη διαστασιολόγησης της δεξαμενής.....	12
2.2.1.2 Εκτίμηση όγκου αποθήκευσης.....	14
2.2.1.3 Εκτίμηση θερμικών απωλειών.....	14
2.2.2 Θερμικά διαστρωμένη υδάτινη αποθήκη.....	15
2.2.3 Τύποι δεξαμενών.....	17
2.2.4 Διάβρωση.....	19
2.2.5 Βελτιστοποίηση της υδάτινης θερμικής αποθήκης.....	20
2.2.6 Σύγκριση μεταξύ της υδάτινης θερμικής αποθήκης ομοιόμορφης θερμοκρασίας και της θερμικά διαστρωμένης.....	20
2.3 Ηλιακή λίμνη.....	21
2.3.1 Απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας.....	23
2.3.2 Θερμική ανάλυση της λίμνης.....	26
2.3.3 Θερμικές απώλειες άκρων.....	29
2.3.4 Αριθμητικά αποτελέσματα.....	29
2.3.5 Δημιουργία, διατήρηση και ευστάθεια της λίμνης.....	30
2.3.6 Μειονεκτήματα της τεχνολογίας των ηλιακών λιμνών.....	31
2.3.7 Οικονομική Θεώρηση.....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^Ο ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΩΣ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ.....	32
3.1 Αποθήκευση σε Υλικά Αλλαγής Φάσης (PCM).....	32
3.1.1 Γενικά.....	32
3.1.2 Υλικά αποθήκευσης.....	33
3.1.2.1 Ανόργανες ενώσεις.....	34
3.1.2.2 Οργανικές ενώσεις.....	35
3.1.3 Συστήματα αποθήκευσης με PCMs.....	36
3.1.3.1 Αριθμητική ανάλυση της τοποθέτησης σε κάψουλες.....	40
3.1.4 Οικονομική Θεώρηση.....	42
3.1.5 Συμπεράσματα.....	42
3.2 Θερμική Κλίνη Στερεών (Rock Bed).....	43
3.2.1 Η Θερμική Διαδικασία.....	50
3.2.2 Βελτιστοποίηση του θερμικού στρώματος.....	54
3.2.3 Οικονομική Θεώρηση.....	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ	56
4.1 Γενικά.....	56
4.1.1 Πυκνότητες Ενέργειας.....	56
4.1.2 Αποθήκευση σε χαμηλές θερμοκρασίες	57
4.1.3 Χρόνος αποθήκευσης.....	57
4.1.4 Μεταφορά θερμότητας	57
4.1.5 Αντλίες θερμότητας	59
4.2 Κατηγορίες θερμοχημικών συστημάτων	62
4.2.1 Αέριες αντιδράσεις.....	62
4.2.2 Θερμοχημική απόληψη και αποθήκευση ενέργειας σε συστήματα του τύπου Στερεό I → Στερεό II + Q	65
4.2.3 Θερμοχημική απόληψη και αποθήκευση ενέργειας σε συστήματα του τύπου Στερεό I → Στερεό II + Αέριο	66
4.2.4 Φωτοχημική μετατροπή και αποθήκευση ηλιακής ενέργειας.....	68
4.2.4.1 Κριτήρια για την επιλογή συστήματος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για φωτοχημική μετατροπή της ηλιακής ενέργειας.....	68
4.2.4.2 Χρήση πολυξομεταλλικών ενώσεων Mo, W και V	69
4.3 Αποθήκευση μέσω της παραγωγής υδρογόνου	72
4.3.1 Γενικά.....	72
4.3.2 Τεχνολογίες παραγωγής H ₂ με χρήση ηλιακής ενέργειας.....	74
4.3.2.1 Καταλυτική αναμόρφωση φυσικού αερίου παρουσία ατμού.....	74
4.3.2.2 Οι φωτοηλεκτροχημικές κυψέλες (PEC's).....	77
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΣ ΜΑΚΡΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ	78
5.1 Γενικά.....	78
5.2 Υδάτινη αποθήκη μακροταμίευσης και διεποχιακή αποθήκη.....	79
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΕ ΗΛΙΑΚΗ ΛΙΜΝΗ	86
6.1 Περιγραφή του συστήματος αναφοράς.....	86
6.2 Το θερμοκρασιακό προφίλ της ηλιακής λίμνης	88
6.3 Αριθμητικοί υπολογισμοί.....	90
6.3.1 Μέση στιγμιαία άμεση και διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου G _b και G _d	90
6.3.2 Ολική στιγμιαία ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου G _w	93
6.3.3 Μέση ημερήσια ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου H και θερμοκρασιακή μεταβολή στη ζώνη NCZ.....	96
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ.....	100
 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	111

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας στον Τομέα Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στη συγκεκριμένη σχολή.

Αρχικά, θα πρέπει να δώσω τις ευχαριστίες μου στον κύριο Καθηγητή Κίμωνα Αντωνόπουλο για την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας για τη δυνατότητα ενασχόλησής μου με το αντικείμενο αυτό.

Σε προσωπικό επίπεδο, ευχαριστώ πολύ τη μητέρα μου Σωτηρία, τον πατέρα μου Σταύρο και τον αδερφό μου Σίμο, οι οποίοι μου συμπαραστέκονται τόσο ηθικά, όσο και υλικά. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους μου τους φίλους καθώς και όλα τα άτομα τα οποία στην πάροδο της φοίτησής μου στη σχολή συνέβαλλαν με τον οποιονδήποτε τρόπο στην πρόοδό μου, τόσο την πνευματική όσο και την νοητική.

Πασίρογλου Μαρία

Οκτώβριος 2008

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Το ενεργειακό πρόβλημα – Η σημασία της αποθήκευσης ενέργειας

Η προστασία του φυσικού περιβάλλοντος και η ποιότητα ζωής είναι άμεσα συνδεδεμένες με την ενέργεια της οποίας η παραγωγή και κατανάλωση προκαλεί σε ποσοστό 90% τη ρύπανση του περιβάλλοντος. Ιδιαίτερα μετά την ενεργειακή κρίση του 1973 μια σοβαρή προσπάθεια άρχισε στις βιομηχανικές χώρες με στόχους είτε τη μείωση της κατανάλωσης των συμβατικών καυσίμων ή την αυτάρκεια σε ενέργεια. Η έρευνα στράφηκε τόσο στη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όσο και στην εξοικονόμηση ενέργειας. Ειδικά για την εξοικονόμηση, αξίζει να αναφερθεί ότι περίπου το 50% της παγκόσμιας ενέργειας απορρίπτεται στο περιβάλλον αχρησιμοποίητο. Υπάρχουν δύο τρόποι για να μειωθεί το ποσοστό αυτό:

- Βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας, η οποία έχει ως αποτέλεσμα μείωση της κατανάλωσης ενέργειας
- Χρησιμοποίηση της ενέργειας που έχει ήδη απορριφθεί

Στο πλαίσιο αυτό, αλλά και εξαιτίας της χρονικής μεταβολής τόσο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όσο και των ενεργειακών αναγκών, είναι αναγκαίο να αναπτυχθούν κατάλληλα συστήματα **αποθήκευσης ενέργειας**.

Οι μελέτες που ακολούθησαν απέδειξαν ότι η ενεργειακή αποθήκη θα μπορούσε να βοηθήσει στη βελτίωση της απόδοσης των μεγάλων, κυρίως, ενεργειακών μονάδων, να μειώσει τις ενεργειακές ανάγκες, να επιτρέψει να χρησιμοποιηθούν οι ενεργειακές πηγές πιο αποδοτικά και να μειώσει το χρόνο ή το ρυθμό υστέρησης μεταξύ διάθεσης και ζήτησης της ενέργειας.

1.2 Αποθήκευση Θερμότητας

1.2.1 Γενικά

Το κύριο χαρακτηριστικό ενός συστήματος αποθήκευσης θερμότητας είναι ότι η βασική είσοδος και έξοδος του είναι θερμική ενέργεια.

Η αποθήκευση μπορεί να γίνει τόσο σε χαμηλές θερμοκρασίες όσο και σε υψηλές. Με τον όρο χαμηλές, εννοούμε θερμοκρασίες που δεν ξεπερνούν το κανονικό σημείο βρασμού του νερού (100° C), ενώ με τον όρο υψηλές θερμοκρασίες, τις μεγαλύτερες από 250° C.

Γενικά, ένα σύστημα αποθήκευσης θα πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Να είναι συμπαγές, να έχει μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης ανά μονάδα μάζας και όγκου.
- Να διαθέτει μεγάλη απόδοση αποθήκευσης.
- Να διαθέτει μέσο αποθήκευσης με τις κατάλληλες ιδιότητες στη θερμοκρασιακή περιοχή λειτουργίας.
- Να διατηρεί ομοιόμορφη θερμοκρασία.
- Ικανότητα φόρτισης και εκφόρτισης με το μεγαλύτερο ρυθμό εισόδου/ εξόδου θερμότητας, αλλά χωρίς θερμοκρασιακή βαθμίδα.

- Πλήρης αντιστρεπτότητα.
- Ικανότητα να υποστεί ένα μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης χωρίς απώλειες στην απόδοση και τη χωρητικότητα αποθήκευσης.
- Αμελητέες θερμικές απώλειες στο περιβάλλον.
- Υψηλή ταχύτητα φόρτισης/ εκφόρτισης.
- Μακρά διάρκεια ζωής.
- Χαμηλό κόστος.
- Μη διαβρωτικό.
- Να μην υπάρχουν κίνδυνοι πυρκαγιάς και τοξικότητας (παράμετροι ασφάλειας).

Ωστόσο, πέρα από τα χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχει το σύστημα αποθήκευσης, σημαντικό ρόλο έχουν και οι προϋποθέσεις που θα πρέπει να πληροί το υλικό αποθήκευσης που χρησιμοποιείται:

- Υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα.
- Υψηλή θερμική διάχυση.
- Υψηλό ειδικό βάρος.
- Να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως θερμικό και ψυκτικό μέσο.
- Χημική και γεωμετρική σταθερότητα.
- Να μην είναι εύφλεκτο, να μην διαβρώνει και να μην είναι τοξικό.
- Να έχει χαμηλή πίεση ατμών (στην περίπτωση αερίου).
- Να έχει χαμηλό κόστος, τόσο αυτό όσο και το δοχείο που θα το περιέχει.
- Να είναι ικανοποιητικής μηχανικής αντοχής.
- Το φάσμα θερμοκρασιών λειτουργίας του να είναι ευρύ.

Μία άλλη συνιστώσα που πρέπει να εξεταστεί είναι η βέλτιστη θερμική χωρητικότητα της θερμικής αποθήκης. Ειδικά για τις ηλιακές εφαρμογές, η χωρητικότητα της ενεργειακής αποθήκης βασίζεται στα εξής:

1. Στην αναμενόμενη και χρονικά μεταβαλλόμενη ηλιακή ακτινοβολία.
2. Στο μέγεθος και τις μεταβολές των ενεργειακών αναγκών.
3. Στο βαθμό αξιοπιστίας που πρέπει να έχει η εγκατάσταση.
4. Στη διαθέσιμη βοηθητική ενεργειακή πηγή.
5. Στην οικονομική ανάλυση, η οποία θα καθορίσει τι ποσοστό από τις ετήσιες ενεργειακές ανάγκες θα καλύψει το ηλιακό σύστημα και τι η βοηθητική πηγή.

Η θερμότητα μπορεί να αποθηκευτεί σε μεμονωμένα στερεά υλικά ή σε υγρά σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και η ανάκτηση της ενέργειας αυτής να γίνει με ικανοποιητική απόδοση.

Η αποθήκευση θερμότητας, όταν δε γίνεται σε χημικά συστήματα (δηλαδή με αμφίδρομες αντιδράσεις), πραγματοποιείται με δύο τρόπους. Ο ένας αφορά αποθήκευση σε ένα μέσο με μεγάλη θερμοχωρητικότητα και στον άλλο εκμεταλλευόμαστε τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης ή εξαέρωσης διαφόρων χημικών ουσιών.

Μέσα αποθήκευσης που προτάθηκαν είναι το νερό, πέτρες και διάφορα ένυδρα άλατα. Το νερό είναι ένα μέσο, το οποίο οπωσδήποτε προτιμάται εξαιτίας του μικρού κόστους όταν η θερμότητα που αποθηκεύεται πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε θερμοκρασίες μικρότερες των 100° C. Άλλα υλικά που μελετώνται για αποθήκευση θερμότητας είναι τα χαλίκια και το χώμα. Για εφαρμογές σε υψηλές θερμοκρασίες προτιμώνται ρινίσματα από παλιοσιδερίκα. Σε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες η

μεταφορά της θερμότητας γίνεται με αέρα που θερμαίνεται μετά από διαβίβασή του μέσα από πορώδη υλικά.

Τα κύρια προβλήματα σε μια εγκατάσταση αποθήκευσης θερμότητας είναι τα εξής:

- Η διαμόρφωση μιας κατάλληλης επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας με στόχο τη γρήγορη μεταφορά της στο σύστημα για αποθήκευση, αλλά και την ταχεία απόληψή της.
- Ο περιορισμός των απωλειών στο περιβάλλον με στόχο την αύξηση του χρόνου αποθήκευσης στα επίπεδα που χρειάζεται.

Τελευταία, εξετάζεται η αποθήκευση θερμότητας μέσα στη γη (underground storage). Στην περίπτωση αυτή, έχουμε ελαχιστοποίηση των μονώσεων.

1.2.2 Μέθοδοι αποθήκευσης θερμότητας

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται εξαρτώνται από τη θερμοκρασία στην οποία γίνεται η αποθήκευση. Σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, η ηλιακή θερμική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί ως:

- Θερμοκρασιακή θερμότητα (sensible energy storage)
- Θερμότητα που συνδέεται με μεταβολή κάποιας φυσικής κατάστασης, όπως η θερμότητα τήξης ή εξαέρωσης (heat of fusion, heat of vaporization)
- Θερμότητα, που συνδέεται με κάποια φυσική διεργασία, όπως η θερμότητα διάλυσης (heat solution) ή η θερμότητα προσρόφησης (heat of absorption)
- Θερμότητα, που σχετίζεται με κάποια αμφίδρομη χημική αντίδραση (heat of reaction)

Γενικά, υπάρχουν τρεις μέθοδοι για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας:

- Αποθήκευση ως **αισθητή θερμότητα**
- Αποθήκευση ως **λανθάνουσα θερμότητα**
- Αποθήκευση ως **ενέργεια χημικών δεσμών**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΩΣ ΑΙΣΘΗΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

2.1 Γενικά

Κατά αυτή τη μέθοδο αποθήκευσης, η ηλιακή θερμική ενέργεια χρησιμοποιείται για τη θέρμανση ορισμένων, κατάλληλα επιλεγμένων υγρών ή στερεών υλικών. Η παραλαβή της ενέργειας αυτής γίνεται κατά την ψύξη των υλικών αυτών. Η θερμότητα που αποθηκεύεται με τη μέθοδο αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$Q = n \int_{T_1}^{T_2} c_p dT$$

Όπου n είναι η ποσότητα σε moles του υλικού που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση, c_p η γραμμομοριακή θερμοχωρητικότητά του, T_1 η θερμοκρασία στην οποία αρχίζει η παροχή της ηλιακής θερμικής ενέργειας και T_2 η θερμοκρασία στην οποία σταματά η παροχή αυτή.

Είναι προφανές, ότι υλικά κατάλληλα για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής πρέπει να έχουν υψηλή θερμοχωρητικότητα και σχετικά χαμηλό κόστος. Κλασικό παράδειγμα είναι το H_2O , το οποίο χρησιμοποιείται συνήθως. Εκτός από εξαιρετικά χαμηλή τιμή, έχει και σχετικά υψηλή θερμοχωρητικότητα ($4.180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$). Συστήματα αποθήκευσης που χρησιμοποιούν νερό μπορούν να λειτουργούν σε αρκετά μεγάλη περιοχή θερμοκρασιών ($5-95^\circ \text{ C}$). Είναι φανερό ότι η λειτουργία υδατικών συστημάτων αποθήκευσης σε πολύ ψυχρά κλίματα απαιτεί τη χρήση αντιπηκτικών ουσιών, τα οποία αυξάνουν το κόστος. Το νερό χρησιμοποιείται σε όλα σχεδόν τα συστήματα οικιακής κλίμακας. Εκτός από το νερό, χρησιμοποιούνται ορισμένα στερεά ή υγρά υλικά, π.χ. υγρό νάτριο.

Η μέθοδος αυτή αποθήκευσης που θα αναλυθεί εκτενώς στο κεφάλαιο αυτό, έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Εξαιρετικά χαμηλή πυκνότητα ενέργειας
- Μικρό σχετικά χρόνο αποθήκευσης
- Εξαιρετικά μικρή δυνατότητα μεταφοράς της θερμικής ενέργειας
- Χαμηλό κόστος υλικού
- Απλότητα στη σχεδίαση των εγκαταστάσεων

Οι δύο τελευταίοι παράγοντες θεωρούνται σήμερα πολύ σημαντικοί. Έτσι, υδατικά συστήματα αποθήκευσης χρησιμοποιούνται σήμερα σε πάρα πολλές περιπτώσεις.

2.2 Υδάτινη θερμική Αποθήκη

Έχουν αναφερθεί, προηγούμενα, οι επιθυμητές ιδιότητες που πρέπει να έχει το υλικό της θερμικής αποθήκης. Το νερό, έχοντας σε μέγιστο βαθμό εκείνες τις ιδιότητες αλλά και για λειτουργικούς λόγους, φαίνεται να αποτελεί ένα ιδανικό μέσο αποθήκευσης ειδικά σε χαμηλές θερμοκρασίες. Τα κυριότερα πλεονεκτήματά του είναι:

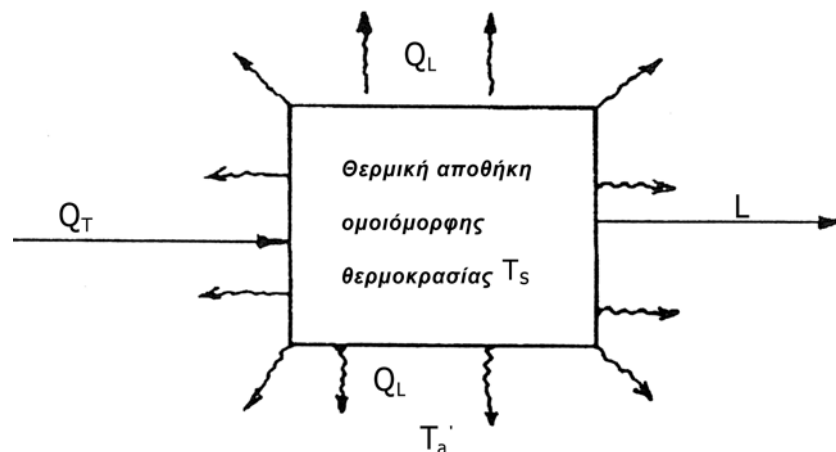
- Η μεγάλη δυνατότητα θερμικής αποθήκευσης ανά μονάδα όγκου, χάρη στη μεγάλη ειδική θερμοχωρητικότητα του.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί συγχρόνως ως ρευστό που μεταφέρει τη θερμότητα και ως αποθηκευτικό μέσο.
- Έχει ευρεία θερμική περιοχή λειτουργίας από 0-100° C, που μπορεί να διευρυνθεί ακόμα προς τα κάτω με ειδικά πρόσθετα.
- Η σχεδόν δωρεάν προμήθειά του και η εύκολη εύρεσή του, ειδικά στις μεγάλες ποσότητες που απαιτούν ορισμένα είδη αποθηκών, όπως οι διεποχιακές.

Οι υδάτινες θερμικές αποθήκες διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- ▶ Οι υδάτινες αποθήκες ομοιόμορφης θερμοκρασίας
- ▶ Οι θερμικά διαστρωμένες

2.2.1 Υδάτινες αποθήκες ομοιόμορφης θερμοκρασίας

Ονομάζεται έτσι η υδάτινη αποθήκη, στην οποία η θερμοκρασία σε οποιοδήποτε σημείο της είναι η ίδια. Αυτό γίνεται πρακτικά δυνατό μόνο με υγρό αποθηκευτικό μέσο. Όταν προσδίδεται ενέργεια σε μία υδάτινη αποθήκη ομοιόμορφης θερμοκρασίας, η θερμοκρασία της ανεβαίνει σχετικά αργά σε σχέση με μία διαστρωμένη θερμικά, αλλά πρακτικά ομοιόμορφα για όλο το υγρό μέσο. Ας θεωρήσουμε μία τέτοια αποθήκη στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1

Σχηματική αναπαράσταση υδάτινης αποθήκης ομοιόμορφης θερμοκρασίας

Έστω ότι σε χρόνο dt η θερμοκρασία της αποθήκης, μεταβάλλεται κατά dT_s . Το ενεργειακό ισοζύγιο της αποθήκης θα είναι:

$$(m_s C_{ps})dT_s = (Q_T - L - Q_L)dT \quad (2.1)$$

όπου m_s είναι η μάζα του αποθηκευτικού μέσου, C_{ps} η ειδική θερμοχωρητικότητά του, $Q_T dT$ η συνολική ενέργεια που προσδίδεται στην αποθήκη σε χρόνο dt , $L dT$ το

χρήσιμο θερμικό φορτίο ή ενέργεια που απομαστεύεται στον ίδιο χρόνο, $Q_L dT$ οι θερμικές απώλειες της αποθήκης στον ίδιο επίσης χρόνο. Οι στιγμιαίες θερμικές απώλειες είναι:

$$Q_L = (UA)_s (T_s - T_a') \quad (2.2)$$

και για χρόνο t

$$Q_{Lt} = (UA)_s (\bar{T}_s - \bar{T}_a') \quad (4.2.a)$$

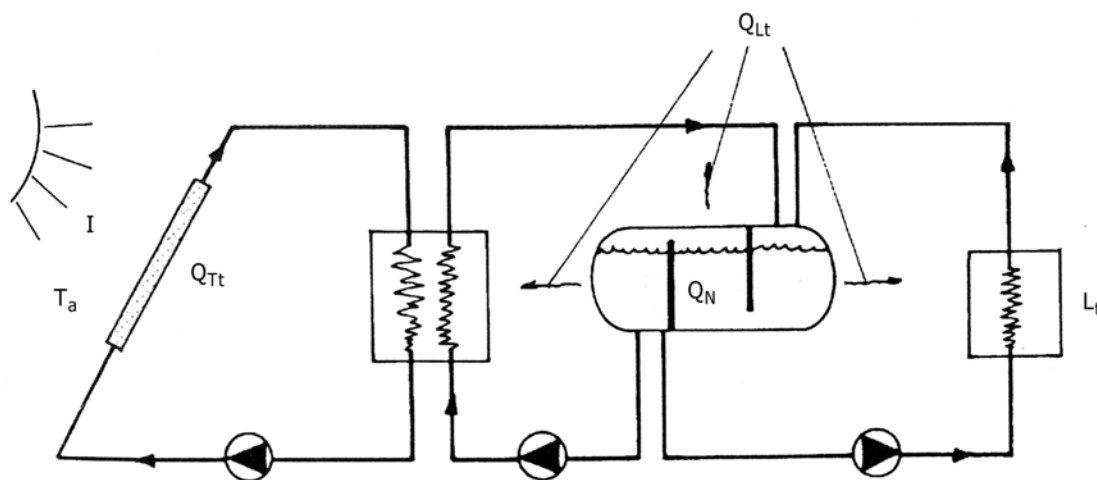
όπου είναι Q_{Lt} οι συνολικές απώλειες σε χρόνο t , $(UA)_s$ το γινόμενο της επιφάνειας της αποθήκης επί τον συντελεστή θερμοδιαπερατότητας, \bar{T}_a' η μέση θερμοκρασία του αέρα γύρω από την αποθήκη σε χρόνο t και \bar{T}_s η μέση θερμοκρασία της αποθήκης στον ίδιο χρόνο. Εισάγοντας την 2.2 στην 2.1, έχουμε:

$$(m_s C_{ps}) \frac{dT_s}{dt} = Q_T - L - (UA)_s (T_s - T_a') \quad (2.3)$$

Εάν θεωρήσουμε ότι σε ένα μικρό χρονικό διάστημα t , η τελική θερμοκρασία της αποθήκης γίνεται T_s^+ , τότε η 4.3 γίνεται:

$$(m_s C_{ps}) \frac{T_s^+ - T_s}{t} = Q_T - L - (UA)_s (\bar{T}_s - \bar{T}_a') \quad (2.4)$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι η γενική εξίσωση της αποθήκης ομοιόμορφης θερμοκρασίας και από αυτήν είναι δυνατό να υπολογισθεί η νέα θερμοκρασία T_s^+ . Έτσι, βηματικά μπορούν να υπολογισθούν οι θερμοκρασίες της αποθήκης.



Σχήμα 2.2

Θερμικό σύστημα με ηλιακό συλλέκτη και αποθήκη ομοιόμορφης θερμοκρασίας

Ας θεωρήσουμε τώρα μία υδάτινη αποθήκη ομοιόμορφης θερμοκρασίας μέσα σε ένα θερμικό σύστημα, όπου η προσδιδόμενη ενέργεια είναι ηλιακή. Εάν σε ένα χρονικό διάστημα t είναι Q_N η ενέργεια που απομένει στην αποθήκη, Q_{Tt} η ενέργεια που προσδίδεται μέσω του ηλιακού συστήματος στην αποθήκη, L_t οι απαιτήσεις της κατανάλωσης και Q_{Lt} οι θερμικές απώλειες της δεξαμενής, τότε έχουμε:

$$Q_N = Q_{Tt} - L_t - Q_{Lt} \quad (2.5)$$

Ας θεωρήσουμε τώρα ότι ο χρόνος t είναι μικρός και ότι κατά τη διάρκειά του η αρχική θερμοκρασία της αποθήκης T_s γίνεται T_s^+ . Τότε η μέση θερμοκρασία της μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι:

$$\bar{T}_s = \frac{T_s + T_s^+}{2} \quad (2.5.a)$$

Επίσης, αν θεωρήσουμε ότι η μάζα του αποθηκευτικού μέσου είναι m_s και C_{ps} η ειδική θερμοχωρητικότητα του, τότε:

$$Q_N = m_s C_{ps} (T_s^+ - T_s) \quad (2.6)$$

Λύνοντας την εξίσωση 2.6 ως προς T_s^+ και εισάγοντας την τιμή του στην 2.5.a, έχουμε:

$$\bar{T}_s = T_s + \frac{Q_N}{2m_s C_{ps}} \quad (2.7)$$

Η ποσότητα Q_{Tt} δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{Tt} = A_c F_i' [\bar{\tau} \alpha I_t - U_L (\bar{T}_s - \bar{T}_a) t] \quad (2.8)$$

αν θεωρήσουμε ότι F_i' είναι ο συνδυασμένος συντελεστής απόδοσης συλλέκτη και θερμικού εναλλάκτη που μεσολαβεί μεταξύ συλλέκτη και δεξαμενής, όπου $F_i' = n F_i$ και όπου n ο συντελεστής απόδοσης του θερμικού εναλλάκτη.

Εισάγοντας το \bar{T}_s από την εξίσωση 2.7 στην 2.8 και την τελευταία στην 2.5, έχουμε:

$$Q_N = \frac{A_c F_i' [\bar{\tau} \alpha I_t - U_L (T_s - \bar{T}_a) t] - (L_t + Q_{Lt})}{1 + \frac{A_c F_i' U_L t}{2m_s C_{ps}}} \quad (2.9)$$

Επίσης, μπορεί να βρεθεί και το Q_{Tt} , εάν το Q_N από την εξίσωση 2.9 εισαχθεί στην 2.5 οπότε έχουμε:

$$Q_{Ti} = \frac{A_c F_i' [\overline{\tau\alpha} I_t - U_L (T_s - \overline{T}_a) t]}{1 + \frac{A_c F_i' U_L t}{2m_s C_{ps}}} + \frac{L_t + Q_{Lt}}{1 + \frac{2m_s C_{ps}}{A_c F_i' U_L t}} \quad (2.10)$$

Ας διερευνήσουμε το φορτίο L_t . Αυτό αποτελείται, στην περίπτωση θέρμανσης ενός κτιρίου, από το φορτίο αερισμού Q_V και από το φορτίο θερμοδιαπερατότητας Q_f . Αν, επιπλέον, θεωρήσουμε ότι χρησιμοποιείται ενέργεια από τη θερμική αποθήκη για τη θέρμανση νερού χρήσης, τότε έχουμε και ένα άλλο φορτίο Q_w . Έτσι:

$$L_t = Q_V + Q_f + Q_w \quad (2.11)$$

Το φορτίο αερισμού Q_V , δίνεται από τη σχέση:

$$Q_V = C_{pa} \rho_a V (T_i - \overline{T}_a) t \quad (2.12)$$

Όπου είναι \overline{T}_a η μέση εξωτερική θερμοκρασία στο χρόνο t , T_i η επιθυμητή και σταθερή εσωτερική θερμοκρασία στο χρόνο t , C_{pa} η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα, ρ_a η πυκνότητά του και V ο όγκος του αέρα για τον αερισμό στη μονάδα του χρόνου.

Το φορτίο λόγω θερμοδιαπερατότητας του Q_f , δίνεται από τη σχέση:

$$Q_f = \overline{U}_V A (T_i - \overline{T}_a) t \quad (2.13)$$

Όπου είναι \overline{U}_V ο μέσος συντελεστής θερμοδιαπερατότητας του κτιρίου και A η συνολική επιφάνεια του κτιρίου.

Έτσι, η σχέση 2.9 αφού αντικατασταθούν το Q_{Lt} από τη σχέση 4.2.α και το Q_f και Q_w από τις σχέσεις 2.12 και 2.13 γίνεται:

$$Q_N = \frac{A_c F_i' [\overline{\tau\alpha} I_t - U_L (T_s - \overline{T}_a) t] - \left[(C_{pa} \rho_a V + \overline{U}_V A) (T_i - \overline{T}_a) t + Q_w + (UA)_s (T_s - \overline{T}_a) t \right]}{1 + \frac{A_c F_i' U_L + (UA)_s t}{2m_s C_{ps}}} \quad (2.14)$$

Επίσης, η σχέση 2.10 γίνεται:

$$Q_{Ti} = \frac{A_c F_i' [\overline{\tau\alpha} I_t - U_L (T_s - \overline{T}_a) t]}{1 + \frac{A_c F_i' U_L t}{2m_s C_{ps} + (UA)_s t}} + \frac{(C_{pa} \rho_a V + \overline{U}_V A) (T_i - \overline{T}_a) t + Q_w + (UA)_s (T_s - \overline{T}_a) t}{1 + \frac{2m_s C_{ps} + (UA)_s t}{A_c F_i' U_L t}} \quad (2.15)$$

Η σχέση 2.14 παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον γιατί συνδέει όλες τις παραμέτρους της ηλιακής διαδικασίας θέρμανσης ενός κτιρίου και εφοδιασμού του με ζεστό νερό. Συνδέει, δηλαδή:

α) Τα κλιματικά δεδομένα I_t , T_a , T_i , T_a'

β) Τα χαρακτηριστικά του συλλέκτη και του ηλιακού κυκλώματος A_c , F_i' , τ_a , U_L

γ) Τα χαρακτηριστικά της θερμικής αποθήκης $(UA)_s$, m_s , C_{ps} , T_s

δ) Τα χαρακτηριστικά του κτιρίου V , A , U_V

και μπορούμε από αυτή να υπολογίσουμε την απομένουσα θερμική ενέργεια της αποθήκης Q_N , έχοντας όλα τα άλλα δεδομένα και βέβαια την αρχική θερμοκρασία της. Έχοντας υπολογίσει το Q_N υπολογίζουμε από τη σχέση 2.7 τη νέα θερμοκρασία της αποθήκης T_s^+ μετά χρόνο t που είναι βέβαια η αρχική θερμοκρασία για το επόμενο βήμα. Έτσι, βηματικά, μπορούμε να υπολογίσουμε τις θερμοκρασίες T_s και το Q_N της αποθήκης.

Σχετικά με την επιλογή του χρονικού βήματος, ο Lunde υποδεικνύει ότι μπορεί να είναι ημερήσιο για πολύ μεγάλη θερμοχωρητικότητα της αποθήκης. Εάν αυτή είναι μεταξύ 0,2 μέχρι 0,4 MJ/°C και ανά τετραγωνικό μέτρο συλλέκτη, τότε το σφάλμα είναι της τάξεως των $\pm 5\%$. Φυσικά, εάν το βήμα γίνει ωριαίο, το σφάλμα γίνεται πολύ μικρότερο, αμελητέο.

Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπολογίζονται οι θερμικές απώλειες στους σωλήνες των κυκλωμάτων, θεωρούμενες ως αμελητέες. Σε μία, όμως, πραγματική ηλιακή διαδικασία, αυτές πρέπει να ελεγχθούν και, αν είναι αμελητέες, να παραληφθούν. Διαφορετικά, θα πρέπει να προστεθεί στις απώλειες του συστήματος ο όρος:

$$(UA)_p (T_s - \bar{T}_a)$$

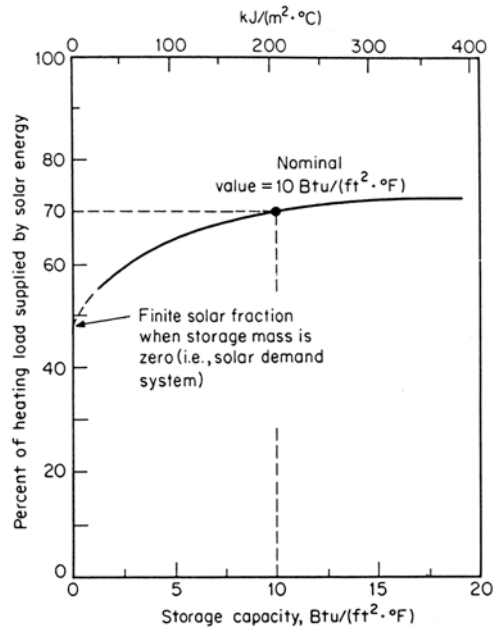
Όπου είναι $(UA)_p$ το γινόμενο της επιφάνειας επί τον συντελεστή θερμοδιαπερατότητας των σωλήνων.

2.2.1.1 Μελέτη διαστασιολόγησης της δεξαμενής

Γενικά, η διαστασιολόγηση μίας θερμικής μονάδας αποθήκευσης εξαρτάται από την ποσότητα και το είδος του υλικού αποθήκευσης έτσι ώστε να παρέχει το επιθυμητό ποσό θερμικής ενέργειας, η επιλογή της μόνωσης να συμβαδίζει με τις συνθήκες λειτουργίας και να είναι οικονομικά αποδεκτή.

Η πιο απλή διαδικασία σχεδιασμού περιλαμβάνει την εφαρμογή προσεγγιστικών μεθόδων. Αυτές οι μέθοδοι δίνουν, συνήθως, ικανοποιητικά αποτελέσματα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για την προκαταρκτική μελέτη όσο και για τους τελικούς υπολογισμούς. Περισσότερο πολύπλοκες διαδικασίες υπολογισμού εμπεριέχουν, συνήθως, εφαρμογές σε υπολογιστή, ειδικά για τις διαδικασίες της βελτιστοποίησης.

Για τις ηλιακές εφαρμογές που αφορούν θέρμανση χώρων και νερού χρήσης κατοικιών, η λεπτομερής προσομοίωση σε υπολογιστή με ωριαίους υπολογισμούς έχει δείξει ότι αύξηση της μάζας του υλικού αποθήκευσης ανά μονάδα συλλεκτικής επιφάνειας πέρα από ένα συγκεκριμένο μέγεθος δεν προσφέρει σχεδόν καμία βελτίωση στην ετήσια απόδοση του συστήματος. Ένα τυπικό αποτέλεσμα τέτοιων υπολογισμών φαίνεται στο σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3
Επίπτωση της ικανότητας αποθήκευσης ανά ποσοστό θερμικού φορτίου από ηλιακή ενέργεια

Όπως φαίνεται στο σχήμα, το ετήσιο ποσοστό φορτίου θέρμανσης μένει ανεπηρέαστο για αύξηση της ικανότητας αποθήκευσης πάνω από 10 με 15 Btu/(ft²·°F) ή 200 με 300 kJ/(m²·°C). Κατά συνέπεια, το κριτήριο για σχεδιασμό μίας μονάδας αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, είναι:

$$\frac{m_s C_{ps}}{A_c} = 10 \text{ με } 15 \text{ Btu}/(\text{ft}^2 \cdot ^\circ \text{F}) = 200 \text{ με } 300 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ \text{C}) \quad (2.16)$$

Όπου τα μεγέθη m_s , C_{ps} και A_c έχουν αναφερθεί προηγούμενα.

Για μία καθημερινή θερμοκρασία περίπου 22° C, η μονάδα μπορεί να αποθηκεύσει από 400 έως 600 Btu ανά τετραγωνικό πόδι συλλέκτη, ή περίπου τόση ενέργεια όση μπορεί να μετατρέψει ένα σύνηθες σύστημα ηλιακών συλλεκτών κατά τη διάρκεια μίας χειμωνιάτικης ηλιόλουστης μέρας στη Ν. Αμερική. Για μάζες αποθήκευσης που υπερβαίνουν αυτήν την ποσότητα, το σύστημα δεν μπορεί να διαθέσει ένα ικανοποιητικό ποσό ενέργειας. Επιπλέον, τόσο οι θερμικές του απώλειες, όσο και το κόστος του θα αυξηθούν. Ωστόσο, οι επιπτώσεις για υπερδιαστασιολόγηση δεν είναι τόσο σημαντικές όσο αυτές τις υποδιαστασιολόγησης. Η υποδιαστασιολόγηση μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της ετήσιας απόδοσης του συστήματος. Το γεγονός αυτό προκαλείται, αρχικά, από την αύξηση της θερμοκρασίας του συλλέκτη και, συνεπώς, την απώλεια αποδοτικότητας εξαιτίας του ανεπαρκούς μεγέθους της μονάδας αποθήκευσης. Μία μικρή μονάδα αποθήκευσης φορτίζεται, προφανώς, πλήρως κατά τη διάρκεια μίας ηλιόλουστης μέρας και σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και εξάγει ρευστό σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από αυτή που θα εξήγαγε μία μεγαλύτερη μονάδα.

2.2.1.2 Εκτίμηση όγκου αποθήκευσης

Ο απαιτούμενος όγκος αποθήκευσης που πληροί τις απαιτήσεις για σύστημα θέρμανσης νερού κατοικίας, όπως επίσης και για σύστημα θέρμανσης χώρων κατοικίας για δεδομένο χρονικό διάστημα, μπορεί να εκτιμηθεί με τη χρήση της παρακάτω εξίσωσης για αποθήκευση αισθητής θερμότητας:

$$V_s = \frac{[(UA + W_i C_{pi}) + (UA)_s] F \theta + Q_w}{(\rho C_p)_s (1 - \varepsilon)(T_o - T_{\min})} \quad (2.17)$$

Όπου UA είναι το γινόμενο της θερμοδιαπερατότητας επί την επιφάνεια, $W_i C_{pi}$ είναι η απορροφητική ικανότητα αέρα του συστήματος σε καθημερινή βάση, $(UA)_s$ είναι το γινόμενο της επιφάνειας της αποθήκης επί τον συντελεστή θερμοδιαπερατότητας, F είναι το κλάσμα ανά μήνα κατά τη διάρκεια του οποίου η μονάδα αποθήκευσης πρέπει να παρέχει ενέργεια, θ είναι ο μέσος μηνιαίος αριθμός των ημερών, Q_w το συνολικό φορτίο ζεστού νερού που πρέπει να παρέχεται από το σύστημα αποθήκευσης κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου και ε το ποσοστό κενού χώρου του θερμικού στρώματος.

2.2.1.3 Εκτίμηση θερμικών απωλειών

Σημαντικός παράγοντας για τον σχεδιασμό μίας θερμικής αποθήκης είναι η μόνωση της δεξαμενής, έτσι ώστε να μειώνονται οι θερμικές απώλειες. Ορισμένοι κανονισμοί επιβάλλουν μόνωση τέτοια ώστε οι απώλειες κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου να μην υπερβαίνουν το 10% της ικανότητας αποθήκευσης. Αντίθετα, σε άλλους κανονισμούς αναφέρεται ότι οι απώλειες αυτές δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 2% σε διάρκεια 12 ωρών. Για συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει ο όρος $(UA)_s$, ώστε να ικανοποιούνται και οι δύο κανονισμοί, καθορίζεται από τη σχέση:

$$\exp\left[-\frac{(UA)_s}{(mC_p)_s} t_o\right] = 1 - f_o \frac{T_o - T_{\min}}{T_o - T_a} \quad (2.18)$$

Όπου m_s είναι η μάζα του υλικού αποθήκευσης, t_o η απαιτούμενη περίοδος για ψύξη, f_o το κλάσμα των ειδικών θερμικών απωλειών, T_o η αρχική θερμοκρασία αποθήκευσης, T_{\min} η ελάχιστη απαιτούμενη θερμοκρασία για αποθήκευση και T_a η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Για μικρές τιμές του f (από 0,02 έως 0,05) η εξίσωση 2.18 μπορεί προσεγγιστικά να γραφεί ως εξής:

$$\frac{(UA)_s}{(mC_p)_s} t_o = f_o \frac{T_o - T_{\min}}{T_o - T_a} \quad (2.19)$$

ή

$$U_s = \frac{f_o (mC_p)_s (T_o - T_{\min})}{A_s t_o (T_o - T_a)} \quad (2.20)$$

Στις εξισώσεις 12, 13 και 14 οι τιμές που προκύπτουν για τα μεγέθη $(UA)_s$ και U_s είναι οι μέγιστες δυνατές, έτσι ώστε να πληρούνται οι κανονισμοί. Εφόσον η ικανότητα αποθήκευσης Q δίνεται από τη σχέση:

$$Q = (mC_p)_s (T_o - T_{\min})$$

Με αντικατάστασή της στη σχέση 2.20, έχουμε:

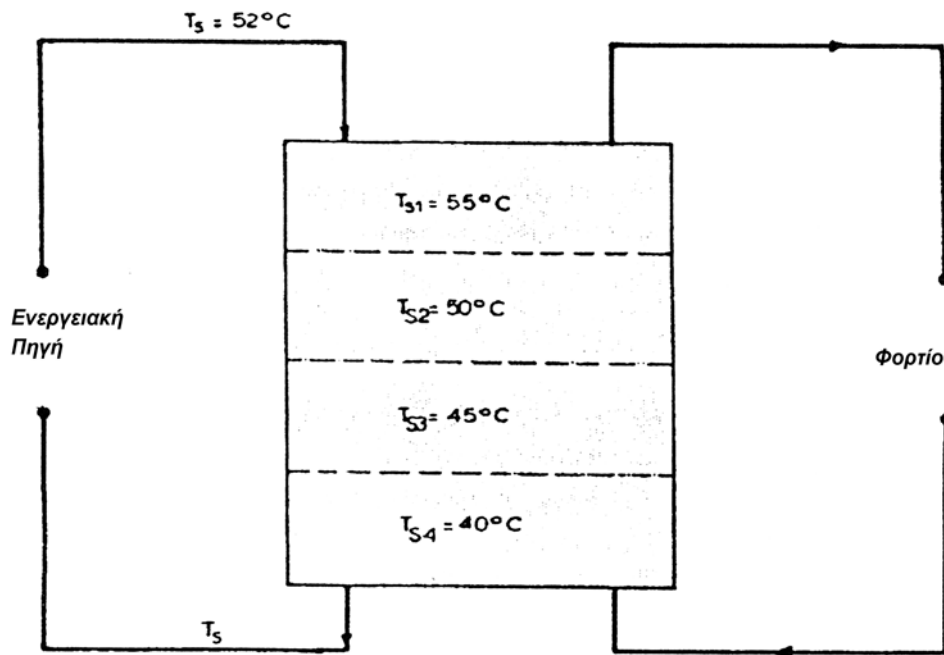
$$U_s = \frac{f_o Q / A_s t_o}{T_o - T_a} \quad (2.21)$$

Η εξίσωση 2.21 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας U_s , σε $\text{Btu}/(\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ \text{F})$ [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ \text{C}$], και έτσι κάνουμε εκτιμήσεις για το είδος και το πάχος της μόνωσης της αποθήκης, έτσι ώστε οι απώλειες να μην υπερβούν το κλάσμα f της ικανότητας αποθήκευσης Q .

2.2.2 Θερμικά διαστρωμένη υδάτινη αποθήκη

Με τον όρο αυτόν καλούμε τη θερμική αποθήκη, στην οποία το θερμό νερό εισόδου στη δεξαμενή δεν αναμιγνύεται με το κρύο νερό εξόδου από αυτήν. Αυτό, πρακτικά, συμβαίνει όταν η εισαγωγή του θερμού νερού γίνεται από το πάνω μέρος της αποθήκης και η εξαγωγή προς την πηγή θέρμανσης από το κάτω μέρος και όταν η ταχύτητα του νερού είναι αρκετά μικρή, έτσι που να μην αναμιγνύεται το θερμό νερό εισαγωγής στην αποθήκη με το κρύο νερό που εξέρχεται. Αυτό επιτυγχάνεται, βέβαια, γιατί το θερμό νερό, έχοντας μικρότερο ειδικό βάρος από το κρύο, παραμένει στην κορυφή της αποθήκης ενώ το κρύο στον πυθμένα της.

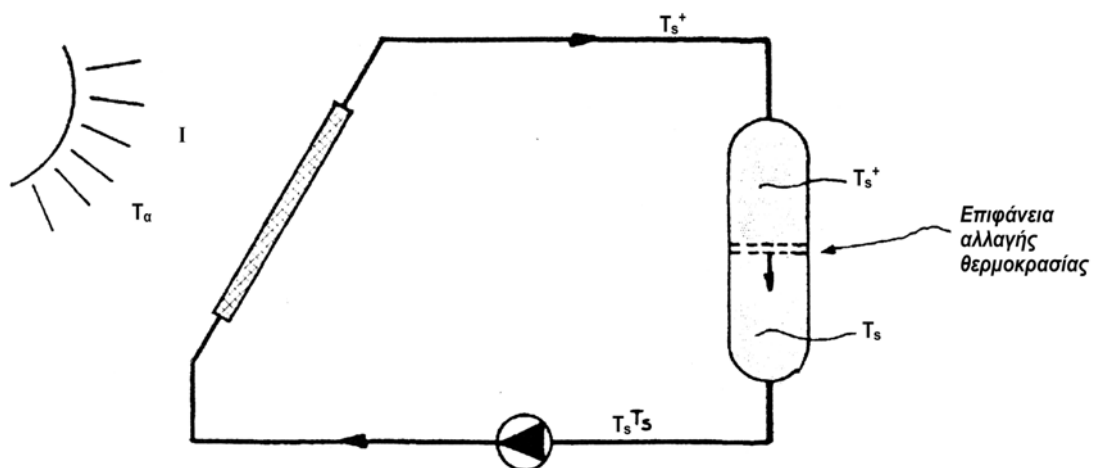
Για να παραμείνει μία αποθήκη θερμικά διαστρωμένη πρέπει, επίσης, το θερμό νερό που εισάγεται σε αυτήν να κατεβαίνει κάθε φορά στο στρώμα νερού, που έχει την ίδια με αυτό θερμοκρασία. Αν, για παράδειγμα, $T_{\text{si}}=52^\circ \text{C}$ είναι η θερμοκρασία του εισαγόμενου θερμού νερού, τότε αυτό πρέπει να κατέβει στο δεύτερο στρώμα της αποθήκης του σχήματος 2.4. Αυτό συμβαίνει, αλλά κατά την κάθοδό του το ζεστό νερό παρασύρει μαζί του και νερό του ανώτερου και θερμότερου στρώματος και έτσι η θερμική στρωμάτωση δεν μπορεί, στην πράξη, να είναι τέλεια. Έτσι, φορτίζεται η υδάτινη θερμικά διαστρωμένη αποθήκη. Η εκφόρτισή της ακολουθεί τον αντίθετο ακριβώς δρόμο, δηλαδή το θερμό νερό από την αποθήκη φεύγει προς την κατανάλωση από το πάνω μέρος της και επιστρέφει κρύο στον πυθμένα για να μη διαταραχθεί η θερμική διαστρωμάτωση της αποθήκης. Πρέπει εδώ να τονίσουμε ότι η φόρτιση και η εκφόρτιση της αποθήκης μπορεί να γίνεται και ταυτόχρονα, σε αντίθεση με τη θερμική κλίση στερεών, η οποία είναι και αυτή θερμικά διαστρωμένη, αλλά η φόρτιση και η εκφόρτιση της δεν μπορούν να είναι ταυτόχρονες.



Σχήμα 2.4
Θερμικά διαστρωμένη υδάτινη αποθήκη

Ας θεωρήσουμε στο σχήμα 2.5 μία θερμικά διαστρωμένη υδάτινη δεξαμενή με πηγή φόρτισής της ηλιακούς συλλέκτες. Ας θεωρήσουμε ακόμη ότι δεν υπάρχουν απώλειες στους σωλήνες και την αποθήκη. Τότε, σε μία χρονική περίοδο t , θα έχουμε:

$$Q_t = A_c F_i [\tau \alpha I_t - U_L (\bar{T}_s - \bar{T}_a) t] \quad (2.22)$$



Σχήμα 2.5
Θερμικό σύστημα με ηλιακό συλλέκτη και θερμικά διαστρωμένη αποθήκη

Έπειτα από χρόνο t_s η αποθήκη έχει θερμοκρασία ομοιόμορφη T_s^+ . Έτσι, η αποθήκη θερμάνθηκε κατά

$$Q_s = m_s C_{ps} (T_s^+ - T_s) \quad (2.23)$$

Ταυτόχρονα, η συλλεγείσα θερμότητα από τον συλλέκτη είναι:

$$Q_c = w_f C_{ps} (T_s^+ + T_s) t_s \quad (2.24)$$

Όπου w_f είναι η παροχή του νερού που περνά από τους συλλέκτες.
Αλλά $Q_s = Q_c$, άρα

$$t_s = m_s / w_f \quad (2.25)$$

Ακόμα, από την εξίσωση 2.23, η νέα θερμοκρασία του νερού στην αποθήκη είναι:

$$T_s^+ = T_s + \frac{Q_s}{m_s C_{ps}} \quad (2.26)$$

Έπειτα από τον χρόνο t_s , η διαδικασία επαναλαμβάνεται με αρχική θερμοκρασία πλέον T_s^+ για έναν δεύτερο κύκλο. Εάν οι συνθήκες δεν είναι σταθερές, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε τη διαδικασία βηματικά με χρονικό βήμα $t < t_s$.

2.2.3 Τύποι δεξαμενών

Η επιλογή του τύπου της δεξαμενής εξαρτάται, αρχικά, από τις απαιτήσεις λειτουργίας της αποθήκης. Για εφαρμογές θέρμανσης χώρων, η δεξαμενή πρέπει να επιτυγχάνει τη μέγιστη θερμοκρασία αποθήκευσης, η οποία είναι περίπου 71°C . Γενικά, αυτές οι εφαρμογές δεν απαιτούν δεξαμενή υπό πίεση. Αντιθέτως, τέτοιου τύπου δεξαμενή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα κλιματισμού, στα οποία η θερμή αποθήκευση γίνεται σε θερμοκρασία άνω των 77°C , ενώ η ψυχρή αποθήκευση πραγματοποιείται σε θερμοκρασία μικρότερη των 13°C . Απαραίτητη δε, θα ήταν σε συστήματα άμεσης θέρμανσης πόσιμου νερού μέχρι θερμοκρασίας 60°C . Για συστήματα με αντλία θερμότητας απαιτείται μία θερμοκρασία στη δεξαμενή της τάξης των 38°C , για την οποία, προφανώς, δεν απαιτείται μεγάλη μόνωση.

Τα υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους δεξαμενές είναι ατσάλι, υαλοβάμβακας, σκυρόδεμα ή ξύλο με επένδυση πλαστικού. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτών των υλικών συνοψίζονται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1
Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα διάφορων τύπων δεξαμενών

Ατσάλινη δεξαμενή	Δεξαμενή από υαλοβάμβακα	Δεξαμενή από σκυρόδεμα	Ξύλινη δεξαμενή με πλαστική επένδυση
Πλεονεκτήματα			
Σχεδιασμός για αντοχή στην πίεση	Διατίθενται δεξαμενές με εργοστασιακή μόνωση	Όχι πολύ μεγάλο κόστος	Χαμηλό κόστος
Περισσότερη πείρα στην κατασκευή δεξαμενών τέτοιου είδους	Ικανοποιητική πείρα στην κατασκευή δεξαμενών τέτοιου είδους	Δυνατότητα χύτευσης επιτόπου ή προηγουμένως	Εύκολη εγκατάσταση σε εσωτερικό χώρο
Εύκολη σύνδεση με την υδραυλική εγκατάσταση	Μερικές δεξαμενές τέτοιου είδους είναι ειδικά σχεδιασμένες για συστήματα αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας		
Μερικές δεξαμενές τέτοιου είδους είναι ειδικά σχεδιασμένες για συστήματα αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας	Ο υαλοβάμβακας δεν διαβρώνεται ή σκουριάζει		
Μειονεκτήματα			
Δύσκολα εγκαθίστανται σε εσωτερικό χώρο	Περιορισμένη μέγιστη θερμοκρασία, ακόμα και με ειδική ρητίνη	Απαιτείται ειδικός σχεδιασμός για να αποφεύγονται τα ραγίσματα, οι διαρροές με συνέπεια μεγάλο κόστος	Περιορισμένη μέγιστη θερμοκρασία
Υπόκεινται σε διάβρωση και σκουριά	Σχετικά μεγάλο κόστος	Δε λειτουργούν υπό πίεση	Δε λειτουργούν υπό πίεση
Σχετικά μεγάλο κόστος	Δύσκολη εγκατάσταση σε εσωτερικό χώρο	Δύσκολη σύνδεση με την υδραυλική εγκατάσταση χωρίς διαρροές	Δεν είναι κατάλληλες για υπόγεια εγκατάσταση
	Δεν λειτουργούν υπό πίεση		

2.2.4 Διάβρωση

Η διάβρωση στις μεταλλικές δεξαμενές, ειδικά στις ατσάλινες, είναι ο πρωτεύων παράγοντας που επηρεάζει το σχεδιασμό και το χειρισμό ενός συστήματος, το οποίο χρησιμοποιεί το νερό ως μέσο αποθήκευσης. Το ποσοστό της διάβρωσης αυξάνει απότομα με το επίπεδο της θερμοκρασίας. Για τις ατσάλινες δεξαμενές υπάρχουν τέσσερις τύποι διάβρωσης που μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα: η ηλεκτροχημική διάβρωση, η οξείδωση, η γαλβανική οξείδωση και η διάβρωση από οξύ. Οι μέθοδοι για την αποφυγή της διάβρωσης περιλαμβάνουν στεγανοποίηση του συστήματος, προσθήκη αντιοξειδωτικών για χημική διάβρωση, χρήση ειδικών καλυμμάτων ή δακτυλίων, χρήση προστασίας καθόδου, αύξηση του πάχους των μετάλλων και χρήση μη οξειδωτικών κραμάτων. Η στεγανοποίηση, η κάλυψη και η χρήση θειικού νατρίου ως συλλέκτη οξυγόνου είναι ευρέως διαδεδομένες. Οποιοδήποτε αντιοξειδωτικό πρέπει να ελέγχεται περιοδικά. Τα συστήματα ζεστού νερού δεν μπορούν να στεγανοποιηθούν και η χρήση των αντιοξειδωτικών δε συνίσταται. Σε αυτή την περίπτωση, γίνεται, συνήθως, χρήση επένδυσης με γυαλί ή πέτρα.

Η γαλβανική οξείδωση συναντάται σε περιπτώσεις που ανόμοια μέταλλα (χαλκός και ατσάλι, για παράδειγμα) σχηματίζουν μια ηλεκτρική επαφή, παρουσία νερού. Αυτό μπορεί να αποτραπεί με την αποφυγή χρήσης ανόμοιων μετάλλων ή μονώνοντας τα ηλεκτρικά.

Στη βιβλιογραφία, γενικά, συνιστώνται τα παρακάτω για τις ατσάλινες δεξαμενές:

- Χρήση τεσσάρων στρωμάτων εποξειδικής φαινόλης στο εσωτερικό της δεξαμενής.
- Χρήση μίας πλάκας μαγνησίου σαν προστασία καθόδου.
- Ηλεκτρική μόνωση ανόμοιων μετάλλων, εκτός από την άνοδο μαγνησίου, με διηλεκτρικούς δακτυλιοειδείς τριβείς, φλάντζες και επικαλύμματα.
- Χρήση θειικού νατρίου ως συλλέκτη οξυγόνου.
- Αποφυγή της χρήσης χρωματικού τύπου αντιοξειδωτικό. Είναι ιδιαίτερα τοξικά, προκαλούν καρκινογένεση και προκαλούν βλάβες στις αντλίες.
- Αν είναι εφικτό, περιορισμός της μέγιστης θερμοκρασίας της δεξαμενής στους 71° C ή και χαμηλότερα.
- Προστασία του εξωτερικού μιας θαμμένης δεξαμενής με δύο στρώματα εποξειδικής πίσσας και μίας ανόδου μαγνησίου. Αντίθετα, προστασία με ένα στρώμα βασικού χρώματος και δύο στρώματα βερνικιού για την προστασία του εξωτερικού μιας δεξαμενής τοποθετημένης πάνω στο έδαφος.
- Αν η δεξαμενή θα λειτουργεί υπό πίεση, πρέπει να λειτουργεί σύμφωνα με τους κανονισμούς της ASME για boiler και δοχεία πίεσεως.
- Δεν επιτρέπεται η εγκατάσταση μεγάλων ατσάλινων δεξαμενών σε υπόγεια, στενούς χώρους ή άλλες τοποθεσίες στις οποίες τυχόν τροποποιήσεις του κτιρίου θα υπέβαλλαν την αντικατάστασή τους.

2.2.5 Βελτιστοποίηση της υδάτινης θερμικής αποθήκης

Στην υδάτινη αποθήκη, όπου το νερό είναι ταυτόχρονα μέσο μεταφοράς και αποθήκευσης θερμότητας, πρέπει να γίνουν ορισμένες παραδοχές ώστε να προχωρήσουμε στη βελτιστοποίηση. Στην περίπτωση αυτή, θεωρούμε ότι η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να παραλάβει το νερό σε μία ηλιακή θερμική διαδικασία αποθηκεύεται στην υδάτινη αποθήκη, δεδομένου ότι κατά τη μεταφορά της ενέργειας αυτής δεν έχουμε απώλειες. Επίσης, θεωρούμε ότι η υδάτινη αποθήκη είναι ομοιόμορφης θερμοκρασίας. Κατά συνέπεια, οι κρίσιμες παράμετροι για τη βελτιστοποίησή της είναι οι παρακάτω:

- Η **μάζα του νερού**. Μεγάλη μάζα συνεπάγεται μεγάλη δυνατότητα αποθήκευσης σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, άρα μεγάλη απόδοση των ηλιακών συλλεκτών. Το κύριο μειονέκτημα, βέβαια, των υδάτινων αποθηκών με μεγάλη μάζα είναι οι χαμηλές θερμοκρασίες και επομένως, μικρή απόδοση στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών.
- Οι **απώλειες της αποθήκης**. Αυτές είναι μεγαλύτερες, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας $(T_s - T_a)$ - η οποία τις περισσότερες φορές είναι δεδομένη - και όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής $(UA)_s$. Η τελευταία αυτή παράμετρος συνεπάγεται:
 - **Μείωση της αγωγιμότητας**, δηλαδή υψηλές μονώσεις της αποθήκης, οι οποίες καθορίζονται και από την οικονομικότητά τους
 - **Μείωση της εξωτερικής επιφάνειας** της αποθήκης, δηλαδή μορφές αποθήκης κατά το δυνατόν σφαιρικές ή κυβικές

2.2.6 Σύγκριση μεταξύ της υδάτινης θερμικής αποθήκης ομοιόμορφης θερμοκρασίας και της θερμικά διαστρωμένης

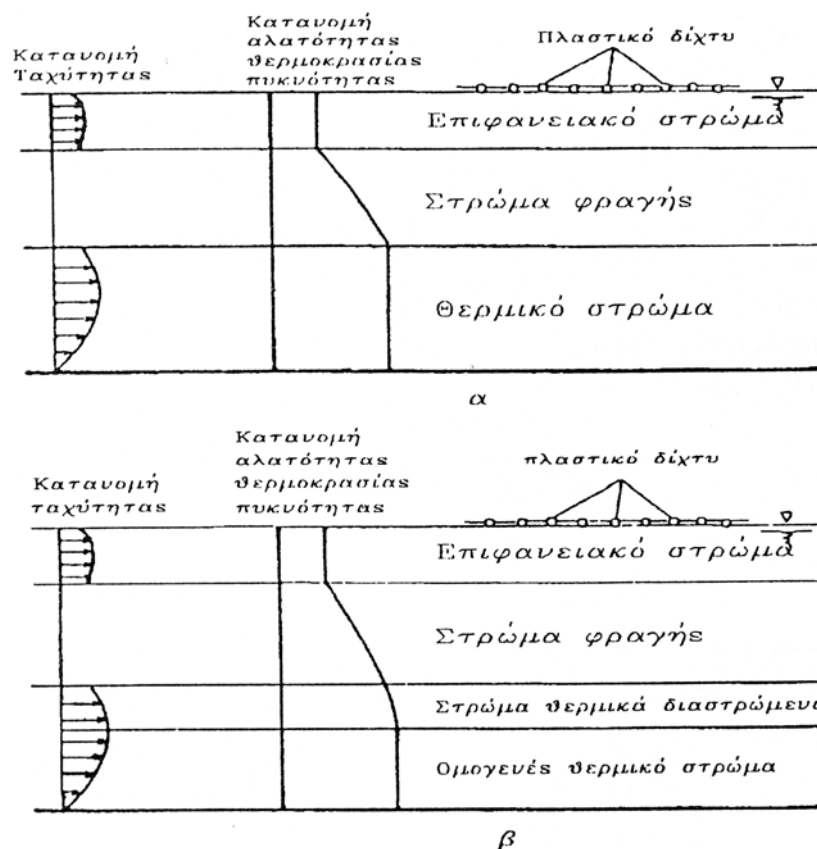
Αρχικά, πρέπει να σημειωθεί ότι διαστρωμένη αποθήκη έχουμε, πρακτικά, όταν η παροχή του νερού είναι χαμηλή για να έχουμε μία μεγάλη διαφορά μεταξύ της υψηλής και της χαμηλής θερμοκρασίας της αποθήκης. Αυτό, ελαττώνει τον συντελεστή απόδοσης F_i των συλλεκτών με συνέπεια να ελαττώνεται και η απόδοσή τους. Συγχρόνως, όμως, αυξάνεται η τελική θερμοκρασία του νερού που εξέρχεται από τους συλλέκτες.

Αντιθέτως, εάν έχουμε υψηλή παροχή και έτσι, χαμηλό χρόνο ανακύκλωσης του νερού t_s , η αποθήκη γίνεται, πρακτικά, ομοιόμορφης θερμοκρασίας και η απόδοση των συλλεκτών ανεβαίνει, ενώ η τελική θερμοκρασία του νερού παραμένει χαμηλή. Πρέπει να σημειωθεί, επίσης, ότι η θερμικά διαστρωμένη αποθήκη τείνει πάντα να γίνει ομοιόμορφης θερμοκρασίας λόγω αγωγής και μεταφοράς του νερού και θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον, φαινόμενο που μελετήθηκε από τους Lavan και Tompson.

Ο Lunde αποδέχεται ότι εφόσον ο χρόνος ανακύκλωσης είναι μικρότερος από μία ημέρα συλλογής ηλιακής ενέργειας (6 έως 8 ώρες) τα δύο συστήματα είναι ισοδύναμα. Είναι γεγονός, όμως, πως στην παρούσα φάση δεν είναι εφικτό να συγκρίνουμε ικανοποιητικά τα δύο συστήματα, αλλά απαιτούνται περισσότερη θεωρητική εργασία και πειράματα για να αποφανθούμε για το πιο αποδοτικότερο.

2.3 Ηλιακή λίμνη

Οι ηλιακές δεξαμενές ή ηλιακές λίμνες (solar ponds) αποτελούν μια ειδική κατηγορία συστημάτων συλλογής με ενσωματωμένη θερμική αποθήκη της συλλεγόμενης ηλιακής ενέργειας. Ηλιακή λίμνη καλείται μια αβαθής τεχνητή λίμνη, με προοδευτικά από την επιφάνεια προς το βυθό αύξηση της περιεκτικότητάς της σε άλας NaCl ή NaCl+MgCl₂ και συνήθως ηλιοαπορροφητικό βυθό. Ένας πιο γενικευμένος ορισμός θεωρεί την ηλιακή λίμνη ως ένα ρηχό υδάτινο σώμα, που μπορεί να παγιδεύσει αποτελεσματικά την ηλιακή ακτινοβολία. Το σχήμα 2.6 μας δίδει ένα σχηματικό διάγραμμα μιας ηλιακής λίμνης.



Σχήμα 2.6
Σχηματικό διάγραμμα της ηλιακής λίμνης

Στις φυσικές ηλιακές λίμνες υπάρχει μια βάρθρωση συγκέντρωσης κάποιου άλατος. Στον πυθμένα υπάρχουν συνήθως αποθέματα άλατος έτσι ώστε η συγκέντρωση του διαλύματος κοντά στον πυθμένα να αντιστοιχεί σε αυτήν του κορεσμένου διαλύματος. Στην επιφάνεια, η συγκέντρωση του άλατος φτάνει περίπου στο μηδέν, επειδή η επιφάνεια ξεπλένεται με το νερό της βροχής και με το νερό ρυακιών. Σε ενδιάμεσο βάθος, η συγκέντρωση παίρνει ενδιάμεσες τιμές και η πυκνότητα νερού των λιμνών αυτών αυξάνεται βαθμιαία με το βάθος. Η αύξηση της πυκνότητας με το βάθος είναι αρκετή ώστε και αν ακόμα θερμανθούν τα κατώτερα στρώματά της, με την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας σε αυτά, να εξακολουθούν να παραμένουν πυκνότερα από τα υπερκείμενα στρώματα. Έτσι, δεν είναι δυνατή η

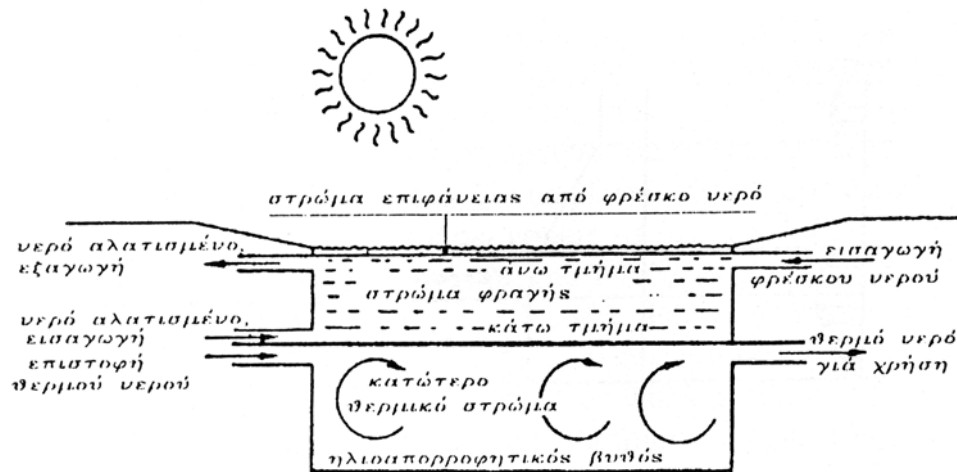
φυσική κυκλοφορία του νερού και η μεταφορά θερμότητας προς τα πάνω γίνεται μόνο με αγωγή. Στις συνηθισμένες λίμνες, αντίθετα, μόλις θερμανθεί μια περιοχή του πυθμένα από οποιαδήποτε αιτία, αποκτά μικρότερη πυκνότητα από τα υπερκείμενα στρώματα και το νερό της περιοχής αυτής ανεβαίνει προς τα πάνω. Έτσι, υπάρχουν ρεύματα που μεταφέρουν τυχόν θερμές μάζες νερού προς την επιφάνεια, όπου ψύχονται γρήγορα με τους γνωστούς μηχανισμούς (εξάτμιση, μεταφορά, ακτινοβολία, αγωγή). Πρέπει να σημειωθεί ότι η μεταφορά θερμότητας στο νερό με αγωγή είναι αρκετά μικρή. Το νερό είναι επίσης αδιαφανές στη θερμική ακτινοβολία και η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία είναι αδύνατη μέσα στη μάζα του νερού. Το βάθος μια ηλιακής λίμνης κυμαίνεται από 1-2 m, μπορούμε δε να διακρίνουμε τρία στρώματα νερού. Το **υδάτινο στρώμα επιφανείας**, όπως λέγεται, το οποίο έχει τη μικρότερη αλατότητα και συνήθως αποτελείται από φυσικό νερό. Το **υδάτινο στρώμα φραγής**, που έχει μια προοδευτικά αυξανόμενη-ανάλογα με το βάθος-αλατότητα και προφυλάσσει από τις θερμικές απώλειες προς τον αέρα το κατώτερο στρώμα. Τέλος, το **κατώτερο θερμικό στρώμα**, που έχει μεγαλύτερη αλατότητα-και μεγαλύτερο ειδικό βάρος-από το προηγούμενο και αποτελεί την κύρια αποθήκη της ηλιακής ενέργειας που δεσμεύεται. Αυτή η στρωμάτωση του νερού, ιδίως του στρώματος φραγής ανάλογα με την αλατότητα επιτυγχάνεται, κατά την κατασκευή της ηλιακής λίμνης με προσαγωγή του νερού με μικρή ταχύτητα και σε μικρά στρώματα πάχους 10-20 cm προοδευτικά ελαττούμενης αλατότητας.

Για να διατηρείται η σταθερότητα της λίμνης πρέπει να απομακρύνεται από την επιφάνειά της αλμυρό νερό και να αντικαθίσταται από γλυκό. Επειδή δεν υπάρχει φυσική κυκλοφορία η μεταφορά άλατος από κάτω προς την επιφάνεια γίνεται με διάχυση. Αυτή είναι μια αρκετά αργή διαδικασία.

Ο βυθός της ηλιακής λίμνης είναι, συνήθως, βαμμένος μαύρος για να απορροφά και να αποδίδει την ηλιακή ενέργεια που φτάνει εκεί, στο θερμικό στρώμα. Ο βυθός και οι παράπλευρες επιφάνειες της λίμνης πρέπει να αποτελούνται από υλικά μη διαβρεκτά, που να παρουσιάζουν δηλαδή τις λιγότερες δυνατές διαρροές. Για να εμποδίσουμε τη διαρροή θερμότητας προς τη γη, ο βυθός μονώνεται όταν μετρηθούν κάτω από αυτόν μεγάλες ταχύτητες κίνησης των υπόγειων υδάτων. Οι ταχύτητες αυτές κυμαίνονται συνήθως από 1 cm/έτος μέχρι 1m/ημέρα και έτσι η απόφαση για τη μόνωση του βυθού εξαρτάται και από το μέγεθος της ηλιακής λίμνης. Αν η κίνηση των υπογείων υδάτων είναι μικρή, ο βυθός δεν μονώνεται και θερμότητα μεταδίδεται και αποθηκεύεται και στο έδαφος κάτω από το βυθό.

Η επιφάνεια της λίμνης σκεπάζεται με ένα πλαστικό δίχτυ. Έτσι, αποφεύγεται ο κυματισμός σε περίπτωση ισχυρών ανέμων που αφενός καταστρέφει τη στρωμάτωση της λίμνης και αφετέρου μειώνει το ποσοστό της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας λόγω μεγαλύτερης ανακλαστικότητας που παρουσιάζουν οι κυματισμοί στην ηλιακή ακτινοβολία.

Από φυσική άποψη, σε μια ηλιακή λίμνη συμβαίνουν τα εξής: η ηλιακή ακτινοβολία που πέφτει απορροφάται από το υδάτινο σώμα κατά ποσοστό $(1-\rho)$, αν ρ είναι ο συντελεστής ανακλαστικότητας της επιφάνειας του νερού. Ειδικότερα, οι υπέρυθρες ακτινοβολίες απορροφώνται εξ' ολοκλήρου σχεδόν στα πρώτα εκατοστά, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες οι οποίες διαπερνούν κατά μεγαλύτερο μέρος το υδάτινο στρώμα και απορροφώνται από τον βυθό. Ήδη από τον βυθό η θερμότητα διαδίδεται, με μεταφορά κυρίως, στο υπερκείμενο θερμικό στρώμα. Για τον λόγο αυτό, το θερμικό στρώμα παρουσιάζει μια διαρκή κίνηση, όπως στο σχήμα 2.7 και υψηλότερη θερμοκρασία αλλά και, λόγω μεγάλης αλατότητας, μεγαλύτερο ειδικό βάρος και έτσι δεν αναμιγνύεται με το υπερκείμενο στρώμα φραγής, το οποίο θεωρείται ακίνητο. Η ανύψωση της θερμοκρασίας που επιτυγχάνεται μπορεί να φτάσει στους 90° C.



Σχήμα 2.7
Μορφή του θερμικού στρώματος

Όπως προαναφέρθηκε, το κατώτερο θερμικό στρώμα χρησιμοποιείται για την αποθήκευση θερμότητας. Συνεπώς, το μέγεθος του στρώματος αυτού εξαρτάται από τη χρήση για την οποία προορίζεται η λίμνη, ενώ το μέγεθος του στρώματος φραγής από την ανάγκη να υπάρχει μια μονωτική επιφάνεια. Η άριστη επιλογή των δύο μεγεθών εξαρτάται από τη θερμοκρασία λειτουργίας (θερμοκρασία του κατώτερου θερμικού στρώματος), από το κλίμα, την τοποθεσία και το κόστος των υλικών και κατασκευής.

2.3.1 Απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας

Η ηλιακή ακτινοβολία H_s που πέφτει στην επιφάνεια της λίμνης εν μέρει ανακλάται, ενώ η υπόλοιπη $(1-r)H_s$, όπου r είναι η ανακλαστικότητα της επιφάνειας του νερού, περνά μέσα στο νερό και μέρος της απορροφάται κατά τη διαδρομή μέχρι τον πυθμένα. Η απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας από το νερό είναι διάφορη για τα

διάφορα μήκη κύματος. Το μέρος του φάσματος από 3000 \AA μέχρι 6000 \AA περνά δεκάδες μέτρα χωρίς να απορροφάται σημαντικά, ενώ το κοντινό υπέρυθρο απορροφάται μέσα σε μερικά cm ή mm. Είναι δυνατό να εκφράσουμε την απορρόφηση σαν άθροισμα τεσσάρων εκθετικών όρων με διάφορους συντελεστές. Έτσι, έχουμε για την ακτινοβολία που φτάνει σε βάθος x :

$$H(x) = (1-r) \cdot H_s \cdot \sum_{j=1}^4 n_j \cdot e^{-\mu_j x} \quad (2.27)$$

όπου

		Μήκος κύματος
$n_1=0.237$	$\mu_1=0.32 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$	0.2-0.6 μm
$n_2=0.193$	$\mu_2=4.5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$	0.6-0.75 μm
$n_3=0.167$	$\mu_3=3.0 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$	0.75-0.90 μm
$n_4=0.179$	$\mu_4=3.5 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^{-1}$	0.90-1.20 μm

Ο τύπος αυτός ισχύει κατά προσέγγιση και πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή. Είναι ικανοποιητικός για προβλήματα ηλιακών λιμνών ενώ για άλλα προβλήματα και ειδικά για στενές φασματικές περιοχές, χρειάζεται διαίρεση του φάσματος σε ενδιάμεσες περιοχές. Ο συντελεστής n_j δίνει το ποσοστό της ενέργειας σε κάθε φασματική περιοχή. Παρατηρούμε ότι $n_1+n_2+n_3+n_4=0.776$. Το υπόλοιπο 22,4% της ακτινοβολίας αντιστοιχεί στη φασματική περιοχή $\lambda > 1,2 \mu\text{m}$ και απορροφάται στο πρώτο cm της λίμνης, έτσι ώστε να μην προσφέρει τίποτα στη θέρμανση της λίμνης. Παρατηρούμε ότι η ακτινοβολία που φτάνει μέχρι τη ζώνη μεταφοράς είναι στο ορατό μέρος του φάσματος. Άρα, χρειαζόμαστε μαύρη επιφάνεια στον πυθμένα (όπως έχει ήδη αναφερθεί) για την απορρόφηση της ακτινοβολίας που φτάνει μέχρι εκεί και τη θερμική μετατροπή της. Η ακτινοβολία που περνά το 1 m είναι περίπου το 35% της συνολικής ακτινοβολίας. Αυτό είναι και το ανώτερο φράγμα στη θεωρητική απόδοση μιας ηλιακής λίμνης.

Επειδή η σχέση 2.27 είναι δύσχρηστη, χρησιμοποιείται η απλούστερη προσέγγιση:

$$H(x) = (1-r) \cdot H_s \cdot [0.727 - (0.056) \cdot \ln(100x)] \quad (2.28)$$

όπου το x είναι σε m και ισχύει για $0.1 < x < 5.0$ m

Η γωνία πρόσπτωσης θ_1 της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του νερού δίνεται από τον τύπο:

$$\cos \theta_1 = \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \left(\pi \frac{t_h}{12} \right) + \sin \phi \cdot \sin \delta \quad (2.29)$$

όπου ϕ είναι το γεωγραφικό πλάτος, δ είναι η απόκλιση του ήλιου που δίνεται από τη σχέση:

$$\sin \delta = \sin E \cdot \cos \left(\frac{2\pi t}{365} \right) \quad (2.30)$$

όπου $E=23^\circ 27'$, t είναι ο χρόνος σε ημέρες από την 21^η Ιουνίου και t_h είναι ο χρόνος σε ώρες (αληθινός ηλιακός χρόνος, μεσημβρία: $t_h=0$). Άρα, η γωνία προσπτώσεως μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας και κατά τη διάρκεια του χρόνου για την ίδια ώρα της ημέρας.

Ο παράγοντας $(1-r)$ στις εξισώσεις 2.27 και 2.28 εξαρτάται από τη γωνία θ_1 . Πράγματι, για δεδομένη γωνία θ_1 , βρίσκουμε τη γωνία διαθλάσεως θ_2 από τη σχέση:

$$\sin \theta_2 = \left(\frac{\sin \theta_1}{n} \right) \quad (2.31)$$

όπου $n=1.33$ είναι ο δείκτης διαθλάσεως του νερού ως προς τον αέρα. Μετά από τον τύπο του Fresnel βρίσκουμε το r :

$$r = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \right] \quad (2.32)$$

Στον πίνακα 2.2 δίνονται για διάφορες τιμές της θ_1 , οι αντίστοιχες της θ_2 και η ανακλαστική απώλεια r . Δίνονται, επίσης, το $\frac{1}{\cos\theta_2}$, το οποίο είναι πάντα μεγαλύτερο του 1 και παριστάνει τον παράγοντα με τον οποίο πρέπει να πολλαπλασιάσουμε το βάθος για να βρούμε το πραγματικό μήκος της διαδρομής του φωτός μέσα στο νερό για να φτάσει στο βάθος αυτό. Η ανακλαστική απώλεια r είναι αρκετά μικρή για γωνίες $\theta_1 < 60^\circ$ που είναι και οι πρακτικά ενδιαφέρουσες. Για $\theta_1 < 40^\circ$, η απώλεια αυτή είναι γύρω στο 2%, όπως φαίνεται από τον πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2

Γωνία διαθλάσεως θ_2 , ανακλαστική απώλεια r και $1/\cos\theta_2$ για διάφορες γωνίες προσπτώσεως θ_1 στην επιφάνεια του νερού ($n=1.333$)

θ_1	θ_2	r	$\frac{1}{\cos\theta_2}$
0	0	0.02	1.00
10	7.50	0.02	1.01
20	14.90	0.02	1.04
30	22.08	0.021	1.08
40	28.90	0.024	1.15
50	35.17	0.033	1.23
60	40.63	0.059	1.32
70	44.95	0.133	1.41
80	47.77	0.347	1.49
90	48.75	1.0	1.52

Είναι δυνατόν να γίνουν υπολογισμοί λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβολές των r και $\frac{1}{\cos\theta_2}$ κατά τη διάρκεια της ημέρας και του χρόνου. Ένα τέτοιο υπολογιστικό μοντέλο αποδεικνύεται τελικά αρκετά πολύπλοκο, ώστε πολλοί ερευνητές υποθέτουν κάποια ισοδύναμη γωνία θ_1 , ανεξάρτητη του χρόνου. Αποδεικνύεται, ότι αν ληφθεί για τη γωνία αυτή η θέση του ήλιου στις 2 μ.μ., στις 21 Μαρτίου στον τόπο της λίμνης, οι υπολογισμοί δίνουν κάπως μικρότερη τιμή για την απόδοση της λίμνης από την πραγματική. Επίσης, μπορεί να ληφθεί:

$$\overline{\mu_j} = \frac{\mu_j}{\cos\theta_2} \quad (2.33)$$

Η διάχυτη ακτινοβολία είναι δυνατόν να συμπεριληφθεί στην άμεση, χωρίς μεγάλο λάθος, ειδικά για την περίπτωση αυτή, επειδή η φασματική κατανομή της διάχυτης είναι μετατοπισμένη σε μικρότερα μήκη κύματος και είναι αποτελεσματικότερη στην αύξηση της θερμοκρασίας της λίμνης αν και οι ανακλαστικές απώλειες είναι κάπως μεγαλύτερες.

2.3.2 Θερμική ανάλυση της λίμνης

Σε γενικές γραμμές, ακολουθούμε την προσεγγιστική μέθοδο των Rabl και Nielsen που έχει γίνει ευρύτερα δεκτή.

Θα θεωρήσουμε την κατάσταση ισορροπίας (steady state), αφού αποκατασταθεί κάποια σταθερή κατανομή θερμοκρασιών στα διάφορα μέρη της λίμνης. Η υπόθεση αυτή απλοποιεί σημαντικά την περιγραφή και δεν αποτελεί περιορισμό, δεδομένου ότι μας ενδιαφέρει, κυρίως, η συμπεριφορά της λίμνης μετά από αρκετό χρόνο λειτουργίας. Επίσης, για απλότητα, παραλείπουμε κατ' αρχή τα πολύπλοκα φαινόμενα άκρων, δηλαδή δεχόμαστε λίμνη πολύ μεγάλης επιφάνειας ($A \rightarrow \infty$). Επειδή η ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια έχει περίπου τη μορφή:

$$H(t) = \bar{H} + \tilde{H}_o \cos \omega t \quad (2.34)$$

και η θερμοκρασία του αέρα:

$$T_a(t) = \bar{T}_a + \tilde{T}_{ao} \cos(\omega t - \delta_a) \quad (2.35)$$

όπου στο δεύτερο μέλος των εξισώσεων 2.34 και 2.35 έχουμε ένα σταθερό και έναν ημιτονοειδή όρο, έπεται ότι και η θερμοκρασία της ζώνης μεταφοράς της λίμνης μπορεί να γραφτεί ως:

$$T(t) = \bar{T} + \tilde{T}_o \cos(\omega t - \delta) \quad (2.36)$$

όπου \bar{T} η μέση θερμοκρασία, \tilde{T}_o το πλάτος της μεταβολής της και δ η διαφορά φάσεως σχετικά με την ηλιακή ακτινοβολία.

Η θερμοκρασία σε βάθος x στη μονωτική ζώνη, $v(x,t)$ γράφεται σαν άθροισμα ενός σταθερού και ενός χρονικά μεταβαλλόμενου όρου:

$$v(x,t) = v(x) + \bar{v}(x,t) \quad (2.37)$$

Βρίσκουμε, αρχικά, τον χρονικά σταθερό όρο $\bar{v}(x)$ λύνοντας την εξίσωση:

$$K_w \cdot \frac{d^2 \bar{v}(x)}{dx^2} = \frac{d\bar{H}}{dx} \quad (2.38)$$

όπου K_w η θερμική αγωγιμότητα του νερού με συνοριακές συνθήκες

$$\bar{v}(0) = \bar{T}_a \quad \text{και} \quad \bar{v}(l_1) = \bar{T} \quad (2.39)$$

Μετά από πράξεις, βρίσκουμε:

$$\bar{v}(x) = \bar{T}_a + \frac{x}{l_1} [\bar{T} - \bar{T}_a] + \left[\frac{(1-r) \cdot \bar{H}_s}{K_w} \cdot \sum_{j=1}^4 \frac{n_j}{\mu_j} (1 - e^{-\mu_j l_1}) \right] \cdot \left[1 - \frac{x}{l_1} \right] \quad (2.40)$$

Η εξίσωση που εκφράζει τη συνθήκη: η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη ζώνη μεταφοράς απορροφάται εκεί και ισούται με τη θερμότητα που φεύγει προς το μονωτικό στρώμα συν τη θερμότητα Q_u που παίρνουμε από τη ζώνη μεταφοράς για θέρμανση ή οποιαδήποτε άλλη χρήση (ανά μονάδα επιφάνειας και μονάδα χρόνου), είναι:

$$\bar{H}(x=l_1) = K_w \left. \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right|_{x=l_1} + Q_u \quad (2.41)$$

Από τις εξισώσεις 2.40 και 2.41 βρίσκουμε τη μέση θερμοκρασία του νερού \bar{T} :

$$\bar{T} = \bar{T}_a + \frac{(1-r) \cdot \bar{H}_s}{K_w} \sum_{j=1}^4 \frac{n_j}{\mu_j} \left(1 - e^{-\bar{\mu}_j l_1}\right) - \frac{l_1}{K_w} Q_u \quad (2.42)$$

Από την εξίσωση 2.42, φαίνεται ότι μέση θερμοκρασία του νερού στο κατώτερο τμήμα της λίμνης εξαρτάται από το ρυθμό με τον οποίο εξάγουμε θερμότητα από τη λίμνη ανά μονάδα επιφάνειας της λίμνης Q_u , από το βάθος του μονωτικού στρώματος l_1 και από την ηλιακή ακτινοβολία που πέφτει στην επιφάνεια της λίμνης. Πρέπει να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία δεν εξαρτάται από το βάθος του στρώματος μεταφοράς. Από τη σχέση 2.42 φαίνεται ότι η \bar{T} αρχικά αυξάνεται με το l_1 μέχρι ένα μέγιστο (τυπικά για l_1 γύρω στο 1 με 2 m) και μετά μειώνεται.

Ο υπολογισμός του πλάτους της μεταβολής της θερμοκρασίας \tilde{T}_o και της διαφοράς φάσεως δ γίνεται με παρόμοιο τρόπο. Βρίσκεται ότι:

$$\delta = \delta_\alpha + \arctan\left(\frac{R\beta + \alpha}{R\alpha - \beta}\right) \quad (2.43)$$

και

$$\tilde{T} = \frac{a \cos(\delta - \delta_\alpha) + \beta \sin(\delta - \delta_\alpha)}{(K_g / \sigma_g) + (K_w / \sigma_w) \cdot G_+} \quad (2.44)$$

όπου

$$R = \frac{(K_g / \sigma_g) + (K_w / \sigma_w) \cdot G_+}{(K_g / \sigma_g) + (K_w / \sigma_w) \cdot G_- + \rho_w \cdot l_w \cdot \omega} \quad (2.45)$$

$$\alpha = C \cos \delta_\alpha + S \sin \delta_\alpha + \bar{T}_{ao} \left(\frac{Q_u}{T_r - \tilde{T}_a} + 2 \cdot \frac{K_w}{w} F_+ \right) \quad (2.46)$$

$$\beta = -C \sin \delta_\alpha + S \cos \delta_\alpha + 2T_{ao} \cdot \frac{K_w}{\sigma_w} F_- \quad (2.47)$$

$$C = (1-r)\tilde{H}_{so} \cdot \sum_{i=1}^4 CA_i \left\{ CB_i + CD_i \left[\frac{F_+}{2} \cdot (CD_i)^2 + F_- + CB_i \left(G_- + \frac{G_+}{2} \cdot (CD_i)^2 \right) \right] \right\} \quad (2.48)$$

$$CA_i = \frac{n_i}{1 + \frac{(CD)^2}{4}}, \quad CB_i = e^{-\bar{\mu}_i l_i} \quad (2.49)$$

$$CD_i = \bar{\mu}_i \sigma_w \quad l_i = \frac{l_1}{\sigma_w} \quad (2.50)$$

$$S = (1-r)\tilde{H}_{so} \cdot \sum_{i=1}^4 CA_i \cdot \left\{ \frac{(CD_i)^2}{2} \cdot (CB_i) + CD_i \left[\frac{(CD_i)^2}{2} F_- - F_+ + \left(\frac{CB_i}{2} \right) \cdot \left(\frac{(CD_i)^2}{2} \cdot G_- + G_+ \right) \right] \right\} \quad (2.51)$$

$$F_{\pm} = \frac{\sin(l_i)ch(l_i) \pm sh(l_i)\cos(l_i)}{ch(2l_i) - \cos(2l_i)} \quad (2.52)$$

$$G_{\pm} = \frac{sh(2l_i) \pm \sin(2l_i)}{ch(2l_i) - \cos(2l_i)} \quad (2.53)$$

K_g είναι η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους στην περιοχή της λίμνης

$$\sigma_g = (2K_g / \rho\omega)^{\frac{1}{2}} \quad (2.54)$$

και

$$\sigma_w = (2K_w / \rho\omega)^{\frac{1}{2}} \quad (2.55)$$

T_r είναι η μέση θερμοκρασία του χώρου που θέλουμε να θερμάνουμε ($\sim 223^\circ \text{K}$).

2.3.3 Θερμικές απώλειες άκρων

Για μεγάλες λίμνες, η παραπάνω ανάλυση δίνει με καλή προσέγγιση τη θερμοκρασία της λίμνης. Το πρόβλημα, όμως, γίνεται εξαιρετικά πολύπλοκο για μικρές λίμνες, αν δεχτούμε διαφορετικές θερμικές ιδιότητες για το έδαφος και το νερό.

Στην περίπτωση αυτή των μικρών λιμνών ακτίνας a μπορούμε να υπολογίσουμε περίπου το σφάλμα στον υπολογισμό της θερμοκρασίας από τον τύπο:

$$(T_a / T_\infty) = \frac{a}{2l_1} \cdot \left[1 + \frac{2l_1}{a} - \sqrt{1 + \frac{4l^2}{a^2}} \right] \quad (2.56)$$

όπου T_a είναι η θερμοκρασία για τον πυθμένα της λίμνης ακτίνας a , T_∞ είναι η αντίστοιχη θερμοκρασία όπως υπολογίζεται από τους τύπους 2.36, 2.42, 2.43 και 2.44 και l_1 είναι το βάθος του μονωτικού στρώματος. Έτσι, για μια λίμνη ακτίνας $a=20$ m και $l_1=1$ m, έχουμε:

$$(T_a / T_\infty) = 0.95$$

Ενώ για $a=10$ m και 5 m έχουμε $\left(\frac{T_a}{T_\infty}\right) = 0.90$ και 0.81 αντίστοιχα. Επομένως, για μια

μικρή λίμνη το σφάλμα από τη χρησιμοποίηση των τύπων που δόθηκαν μπορεί να είναι σημαντικά.

2.3.4 Αριθμητικά αποτελέσματα

Στον πίνακα 2.3 δίνονται μερικά αποτελέσματα υπολογισμών με τους τύπους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα αποτελέσματα αυτά υπολογίστηκαν για $l_2=1.80$ m, $l_1=1$ m και για θέρμανση ενός σπιτιού 200 m² περίπου.

Από τα αποτελέσματα αυτά, παρατηρούμε ότι η μέση θερμοκρασία \bar{T} αυξάνεται με την επιφάνεια A σύμφωνα με τη σχέση:

$$\bar{T} = \bar{T}_\infty - \frac{C}{A} \quad \text{όπου} \quad \bar{T}_\infty = \lim_{A \rightarrow \infty} \bar{T} \quad (2.57)$$

Πίνακας 2.3
Αποτελέσματα υπολογισμών

A	\bar{T}	\tilde{T}_o	δ
100	42,9	38,6	83,1
120	56,0	35,6	82,0
140	65,3	33,3	81,1
160	72,3	31,7	80,4

Σημείωση: Θερμοκρασία της ζώνης μεταφοράς $\bar{T}(^{\circ}C)$ είναι η μέση θερμοκρασία, $\tilde{T}(^{\circ}C)$ το πλάτος μεταβολής, δ (μέρες) η διαφορά φάσεως για μία λίμνη εμβαδού $A(m^2)$, βάθους ζώνης μεταφοράς 1,80 m και μονωτικής ζώνης 1,0 m.

Το πλάτος μεταβολής της θερμοκρασίας \tilde{T}_o μειώνεται με την αύξηση της επιφάνειας A για σταθερή παροχή θερμότητας της λίμνης. Επίσης, η καθυστέρηση φάσεως δ μειώνεται λίγο με την αύξηση του A . Αν αυξήσουμε το βάθος της ζώνης μεταφοράς h_2 παρατηρούμε μείωση του πλάτους \tilde{T}_o και για $h_2 \rightarrow \infty$ $\tilde{T}_o \rightarrow \infty$.

2.3.5 Δημιουργία, διατήρηση και ευστάθεια της λίμνης

Για τη δημιουργία της απαιτούμενης βάρθρωσης στη συγκέντρωση άλατος έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι “γεμίματος” της λίμνης. Όπως προαναφέρθηκε, στον πυθμένα και στις πλάγιες επιφάνειες τοποθετείται μαύρο, συνθετικό κάλυμμα. Κατόπιν, ετοιμάζονται διαλύματα πυκνά (~30%) για το κατώτερο θερμικό στρώμα και ρίχνονται στη λίμνη. Μετά, ρίχνονται γύρω στα 6 έως 10 στρώματα, διαδοχικά μικρότερης πυκνότητας μέχρι να γεμίσει η λίμνη. Η λίμνη που προκύπτει έχει ασυνεχή κατανομή συγκέντρωσης, αλλά σε διαστήματα εβδομάδας μεταπίπτει στη συνεχή γραμμική κατανομή, λόγω διαχύσεως. Τα στρώματα ρίχνονται στη λίμνη προσεκτικά με ειδικό διαχύτη (diffuser) κατασκευασμένο από δύο επίπεδες επιφάνειες στο κέντρο των οποίων καταλήγει ο σωλήνας γεμίματος. Έτσι, η ροή της διάλυσης γίνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να υπάρχει μόνο οριζόντια συνιστώσα ταχύτητας του υγρού και αποφεύγεται η ανάμειξη των στρωμάτων. Η ταχύτητα αυτή δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 0.12 ms^{-1} , επειδή η κινητική ενέργεια του υγρού έχει σαν τελικό αποτέλεσμα κάποια ανάμειξη της λίμνης.

Μερικές φορές, εμφανίζεται ένα στρώμα με σταθερή συγκέντρωση άλατος (convection layer) σε μία κατά τα άλλα σταθερή λίμνη. Αυτό το στρώμα έχει την τάση άλλες φορές να εξαφανίζεται μόνο του και άλλες, να αυξάνεται επικίνδυνα σε πάχος. Οι λόγοι δεν είναι εξακριβωμένοι και φαίνεται ότι έχουν σχέση με τη θέρμανση των κάθετων τοιχωμάτων της λίμνης. Το στρώμα αυτό είναι δυνατόν να αφαιρεθεί χωρίς να διαταραχθεί η ευστάθεια της λίμνης.

Η αύξηση της πυκνότητας με το βάθος x εκφράζεται από τη σχέση $\frac{\partial \rho}{\partial x} > 0$, αλλά η συνθήκη αυτή δεν είναι αρκετή.

Έχει αποδειχθεί ότι πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$\frac{\partial s}{\partial x} > \left(\frac{\nu + \kappa_T}{\nu + \kappa_S} \right) \cdot \left(-\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial s} \right)^{-1} \quad (2.58)$$

όπου ν , κ_T και κ_S είναι οι διαχυτότητες (diffusivities) για την ορμή, τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση.

Η ανίσωση 2.58 είναι δυνατόν να γραφτεί, ως:

$$\frac{\partial s}{\partial x} > (-1.14) \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right) \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial s}\right)^{-1} \quad (2.59)$$

Ανάλυση της εξίσωσης 2.59 για το MgCl_2 και το NaCl δείχνει ότι η συνθήκη αυτή ικανοποιείται με το MgCl_2 (το κυριότερο κατάλοιπο των αλυκών) και δυσκολότερα με το NaCl .

2.3.6 Μειονεκτήματα της τεχνολογίας των ηλιακών λιμνών

Συνοπτικά, τα σημαντικότερα προβλήματα που παρουσιάζονται στις τεχνητές λίμνες είναι τα εξής:

- Αέρας. Ο αέρας προκαλεί κυματισμό στην επιφάνεια που μερικές φορές συμβάλλει στην ανάπτυξη ενός, μη επιθυμητού στρώματος μεταφοράς 30-50 cm στην επιφάνεια της λίμνης. Αυτό αποφεύγεται με τη χρησιμοποίηση ειδικών επιπλεόντων κατασκευών (wave dumpers). Αυτά κατασκευάζονται από κενούς σωλήνες σχήματος τετραγώνου και συνδέονται μεταξύ τους.
- Τα ίδια περίπου φαινόμενα είναι δυνατόν να προκαλέσει και πολύ δυνατή βροχή. Η αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού είναι ίδια με αυτή των εσωτερικών στρωμάτων μεταφοράς.
- Ξένες ύλες. Διάφορα ξένα αντικείμενα (φύλλα, χαρτιά, κ.λ.π.) είναι δυνατόν να πέσουν στη λίμνη. Αυτά, συνήθως, αιωρούνται σε βάθος που ταιριάζει με την πυκνότητά τους και προκαλούν μείωση της οπτικής διαπερατότητας της λίμνης και επομένως και της απόδοσής της. Είναι δυνατόν να ληφθούν προστατευτικά μέτρα (περίφραξη με λεπτό σύρμα). Επιπλέον, σκόνη πάντα πέφτει στη λίμνη. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, έχουν προταθεί διαφανή καλύμματα σε επαφή με το νερό της επιφάνειας, αλλά αποδείχτηκε ότι, στην πράξη, προκαλούν περισσότερα προβλήματα.
- Ανάπτυξη μικροοργανισμών. Έχει παρατηρηθεί η ανάπτυξη φωτοσυνθετικών μικροοργανισμών (algae) μέσα στη λίμνη. Αυτοί απορροφούν στο ορατό μέρος του φάσματος και ελαττώνουν σημαντικά την οπτική διαπερατότητα της λίμνης. Διάφορες τεχνικές έχουν εφαρμοστεί για την καταπολέμησή τους. Ωστόσο, η μέθοδος πρέπει να προσαρμόζεται στις εκάστοτε συνθήκες.
- Μεγάλη εξάτμιση. Έχει παρατηρηθεί ότι, κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες, το στρώμα επιφάνειας ελαττώνεται λόγω εξάτμισης και για το λόγο αυτό, πρέπει να αναπληρώνεται.
- Η μείξη των δύο κατώτερων υδάτινων στρωμάτων - του στρώματος φραγής και του θερμικού στρώματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της υψηλής θερμοκρασίας του τελευταίου. Το φαινόμενο αυτό αποφεύγεται με προσαγωγή στα δύο κατώτερα στρώματα νερού κατάλληλης αλατότητας.

2.3.7 Οικονομική Θεώρηση

Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετοί οικονομικοί υπολογισμοί για τις ηλιακές λίμνες. Το κόστος κατασκευής και λειτουργίας είναι πολύ χαμηλό. Είναι χαμηλότερο από αυτό των κοινών ηλιακών συλλεκτών.

Από το συνολικό κόστος, το 50% περίπου είναι το κόστος του άλατος, 25% της πλαστικής επένδυσης και το υπόλοιπο είναι κόστος εκσκαφής, εργατικά, σωληνώσεις και όργανα ελέγχου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΩΣ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

3.1 Αποθήκευση σε Υλικά Αλλαγής Φάσης (PCM)

3.1.1 Γενικά

Η αποθήκευση σε υλικά αλλαγής φάσης, **PCMs (Phase Change Materials)**, είναι μία μέθοδος που αναπτύσσεται τα τελευταία χρόνια και η οποία εμφανίζει αρκετά μεγαλύτερες ενεργειακές πυκνότητες σε σχέση με τη συνήθη τεχνική της αποθήκευσης ως αισθητής θερμότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα συστήματα αυτά να απαιτούν μικρότερους όγκους. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην ενέργεια που εκλύεται ή απορροφάται κατά την αλλαγή φάσης. Γενικά, είναι δυνατές οι ακόλουθες μετατροπές κατά φθίνουσα σειρά εμπλεκόμενου ποσού λανθάνουσας θερμότητας:

- Στερεό $\begin{matrix} \leftarrow \\ \rightarrow \end{matrix}$ αέριο
- Υγρό $\begin{matrix} \leftarrow \\ \rightarrow \end{matrix}$ αέριο
- Στερεό $\begin{matrix} \leftarrow \\ \rightarrow \end{matrix}$ υγρό

Εκτός από τις παραπάνω, θερμότητα αποθηκεύεται και ανακτάται κατά τη μετατροπή από μία κρυσταλλική δομή σε άλλη.

Οι δύο πρώτες μορφές αλλαγής φάσης δε χρησιμοποιούνται, καθώς το βασικό τους πρόβλημα είναι ο σχηματισμός αερίου και κατά συνέπεια η σημαντική μεταβολή όγκου η οποία κάνει περισσότερο πολύπλοκη τη λειτουργία του συστήματος. Έτσι, η πιο συνηθισμένη διεργασία είναι η **τήξη** και η **πήξη** του μέσου αποθήκευσης.

Τα PCMs διατίθενται σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και θερμοτήτων αλλαγής φάσης. Σε πραγματικά συστήματα, οι διεργασίες της τήξης και της πήξης δε γίνονται σε

σταθερή θερμοκρασία καθώς δεν υπάρχει θερμοδυναμική ισορροπία. Η μεταβολή αυτή της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα εκτός από τη λανθάνουσα θερμότητα να αποθηκεύεται και ένα μέρος αισθητής θερμότητας.

Ένα σύστημα αποθήκευσης της λανθάνουσας θερμότητας πρέπει να έχει τουλάχιστον τρία συστατικά στοιχεία:

- ◆ ένα κατάλληλο υλικό αλλαγής φάσης (PCM) για τη συγκεκριμένη θερμοκρασιακή περιοχή λειτουργίας
- ◆ ένα σύστημα που θα περιέχει το PCM
- ◆ έναν κατάλληλο εναλλάκτη θερμότητας για μεταφορά της θερμότητας αποτελεσματικά από την πηγή στο PCM και από το PCM στη ζήτηση

3.1.2 Υλικά αποθήκευσης

Σε αντίθεση με τα υλικά που αποθηκεύουν αισθητή θερμότητα, τα PCMs λειτουργούν μόνο σε συγκεκριμένη θερμοκρασία δηλαδή τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, γι' αυτό το PCM πρέπει να προσαρμόζεται στη θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος.

Υλικά αλλαγής φάσης με χαμηλό σημείο τήξεως (0-150° C) παρουσιάζουν ενδιαφέρον για τη θέρμανση και την ψύξη του χώρου, ενώ PCMs με υψηλότερο σημείο τήξης απαιτούνται για εφαρμογές όπως εγκαταστάσεις παραγωγής ρεύματος και συστήματα παραγωγής ατμού (θερμότητα διεργασιών). Υπάρχουν διάφορα κριτήρια επιλογής κατάλληλου υλικού αλλαγής φάσης για αποθήκευση θερμότητας, τα οποία είναι τα παρακάτω:

ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΑ

- Σημείο τήξης στην επιθυμητή θερμοκρασιακή περιοχή λειτουργίας.
- Υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης ανά μονάδα μάζας, έτσι ώστε μικρότερη ποσότητα υλικού να απαιτείται για να αποθηκεύσει συγκεκριμένο ποσό ενέργειας.
- Μεγάλη πυκνότητα, έτσι ώστε να απαιτείται μικρότερος όγκος.
- Υψηλή ειδική θερμότητα.
- Μεγάλη θερμική αγωγιμότητα, με αποτέλεσμα οι βαθμίδες θερμοκρασίας, που χρειάζονται για τη φόρτιση και την εκφόρτιση του συστήματος, να είναι μικρές.
- Το υλικό πρέπει να τήκεται πλήρως, έτσι ώστε η υγρή και η στερεή φάση να έχουν την ίδια σύσταση (congruent melting). Στην αντίθετη περίπτωση, η διαφορά στις πυκνότητες ανάμεσα στις δύο φάσεις θα προκαλέσει το διαχωρισμό τους και, κατά συνέπεια, αλλαγή στη χημική σύσταση του υλικού.
- Μικρή μεταβολή όγκου κατά την αλλαγή φάσης.

ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ

- Λίγη ή καθόλου υπέρψυξη (supercooling) κατά την τήξη, το τήγμα πρέπει να κρυσταλλώνεται στο θερμοδυναμικό σημείο πήξης του. Αυτό επιτυγχάνεται όταν έχουμε υψηλούς ρυθμούς δημιουργίας πυρήνων και ανάπτυξης των σχηματιζόμενων κρυστάλλων. Μερικές φορές, η υπέρψυξη μειώνεται αισθητά με την προσθήκη κάποιου μέσου πυρήνωσης (nucleating agent) στο PCM.

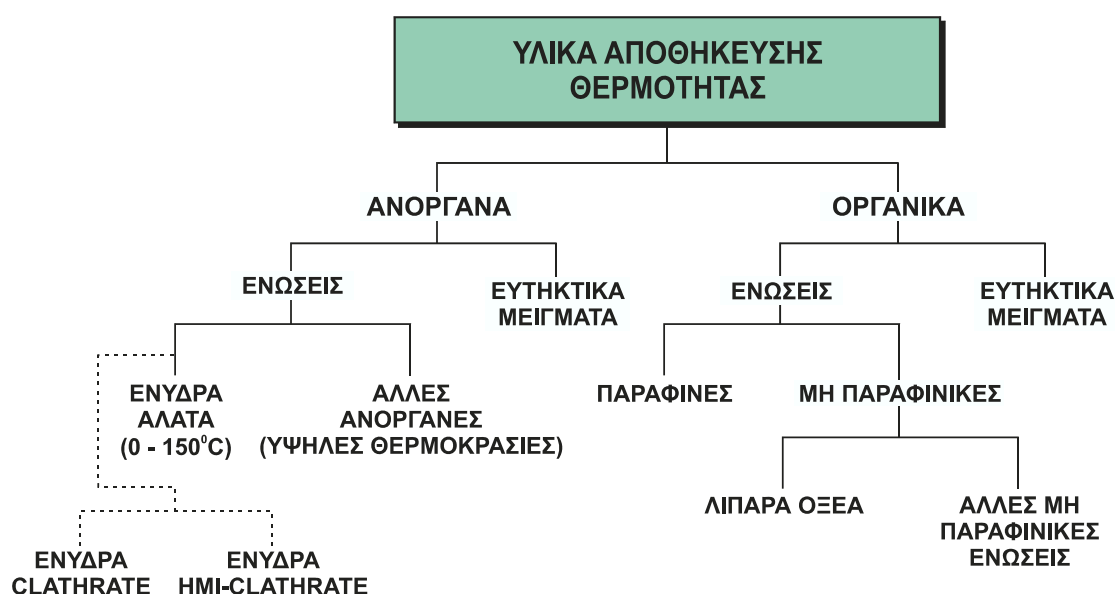
ΧΗΜΙΚΑ

- Χημική σταθερότητα
 - Να μην αποσυντίθεται χημικά, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του συστήματος
 - Μη διαβρωτικό
- Μη δηλητηριώδες, μη εύφλεκτο, μη εκρηκτικό

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ

- Διαθέσιμο σε μεγάλες ποσότητες
- Φθηνό

Υλικά αλλαγής φάσης κατάλληλα για την αποθήκευση θερμότητας υπάρχουν τόσο ανάμεσα στις οργανικές όσο και στις ανόργανες ενώσεις. Γενικά, έχουμε την κατηγοριοποίηση που φαίνεται στο σχήμα 3.1



Σχήμα 3.1
Υλικά αποθήκευσης θερμότητας

Τα περισσότερα από τα υλικά αυτά έχουν μελετηθεί στο εργαστήριο ως προς τις θερμοφυσικές τους ιδιότητες, ενώ πολύ λίγα από αυτά έχουν δοκιμασθεί σε πραγματικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας για έλεγχο της συμπεριφοράς τους.

3.1.2.1 Ανόργανες ενώσεις

Τα *ένυδρα άλατα* έχουν συγκεντρώσει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τη θερμοκρασιακή περιοχή 0°-150° C. Στην περίπτωση, βέβαια, των εφυδατωμένων αλάτων είναι προτιμότερο να αναφερόμαστε σε λανθάνουσα θερμότητα μετατροπής και αυτό γιατί, σε πολλές περιπτώσεις, έχουμε απομάκρυνση των μορίων ύδατος και διάλυση του εναπομείναντος άλατος σε αυτό. Ωστόσο, τα εφυδατωμένα άλατα παρουσιάζουν δύο βασικά προβλήματα, αυτά της **υπέρψυξης** και της **μη**

“σύμπτωτης” τήξης. Για την αντιμετώπιση της **υπέρψυξης** προτείνονται οι παρακάτω λύσεις, οι οποίες έχουν στόχο να προωθήσουν τη διεργασία της δημιουργίας πυρήνων.

1. Με προσθήκη μικρής ποσότητας παραγόντων πυρήνωσης.
2. Με μηχανικά μέσα, όπως χρήση δοχείου με ανώμαλη επιφάνεια τοιχωμάτων ή εναλλάκτη θερμότητας με τραχεία επιφάνεια.
3. Με διατήρηση μέσα στο PCM μίας περιοχής σε χαμηλή θερμοκρασία όταν το υπόλοιπο υλικό τήκεται με θέρμανση.

Για την αντιμετώπιση της **μη σύμπτωτης τήξης** υπάρχουν οι ακόλουθες λύσεις:

1. Χρήση προσθέτων που προκαλούν πύκνωση και παρεμποδίζουν την καθίζηση άνυδρου άλατος ή ένυδρου με λιγότερα μόρια νερού, διατηρώντας τα σε αιώρηση.
2. Με μηχανικά μέσα, όπως η ανάδευση.
3. Με προσθήκη επιπλέον ποσότητας νερού, έτσι ώστε όλο το άνυδρο άλας να μπορεί να διαλυθεί στο νερό στο σημείο τήξης.
4. Με τοποθέτηση του PCM σε κάψουλες για να μειωθεί ο διαχωρισμός.

Σε άλλες έρευνες που έχουν διεξαχθεί, ωστόσο, έχει εισαχθεί η τεχνική της μεταφοράς θερμότητας με απευθείας επαφή ενός μη αναμίξιμου υγρού με το PCM για την αντιμετώπιση και των δύο προβλημάτων που προαναφέρθηκαν.

Γενικά, στα συστήματα που χρησιμοποιούν την τήξη εφυδατωμένων αλάτων για την αποθήκευση ηλιακής ενέργειας συναντούμε δύο ακόμη ομάδες προβλημάτων:

- Προβλήματα σχεδίασης εγκαταστάσεων. Αυτά σχετίζονται με την ικανότητα διάβρωσης των ουσιών που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση.
- Προβλήματα σχεδίασης εναλλακτών θερμότητας. Αυτό έγκειται στην εξασφάλιση ταχυτήτων παραλαβής θερμότητας ανάλογες προς τις ταχύτητες πήξης.

Ορισμένα από τα ένυδρα άλατα τα οποία έχουν μελετηθεί σε μεγαλύτερο βαθμό είναι: $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ (Glauber's Salt) (Αυτό αποσυντίθεται στους $32^\circ C$ προς ένα κορεσμένο διάλυμα Na_2SO_4 σε ισορροπία με άνυδρο στερεό Na_2SO_4 . Η πυκνότητα ενέργειας του συστήματος αυτού είναι σχετικά υψηλή), $CaCl_2 \cdot 6H_2O$, $NaOAc \cdot 3H_2O$ (ένυδρο οξικό νάτριο), $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$, $Mg(NO_3)_2$ και τα διάφορα εύτηκτα τους μίγματα όπως $NaOAc \cdot 3H_2O$ -ουρία, $(CO(NH_2)_2)$ ή $NaOAc \cdot 3H_2O - C_4H_6O_6$.

3.1.2.2 Οργανικές ενώσεις

Οι **οργανικές ενώσεις**, σε σύγκριση με τα ανόργανα ένυδρα άλατα, έχουν:

- μειωμένη ικανότητα μεταφοράς θερμότητας
- μικρότερη πυκνότητα
- μεγαλύτερο κίνδυνο ανάφλεξης
- μεγαλύτερη τάση για “ενόχληση”
- συνήθως υψηλότερο κόστος

Το ενδιαφέρον εστιάζεται στις **παραφίνες**, καθώς διατίθενται ευρέως και με χαμηλότερο κόστος, καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών τήξης, έχουν υψηλή

λανθάνουσα θερμότητα τήξης, είναι χημικά σταθερές και επιδεικνύουν αμελητέα υπέρψυξη. Προβλήματα δημιουργεί, ωστόσο, η περιορισμένη θερμική αγωγιμότητα, η μεγάλη μεταβολή όγκου κατά την αλλαγή φάσης και το γεγονός ότι οι βιομηχανικές παραφίνες (επειδή αποτελούν μίγματα ενώσεων και όχι καθαρές παραφίνες) τήκονται σε μία περιοχή θερμοκρασιών και όχι σε ένα αυστηρά καθορισμένο σημείο τήξης. Για την αντιμετώπιση της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας των παραφινών, υπάρχουν τεχνικές όπως τοποθέτηση του υλικού σε κάψουλες, εισαγωγή μεταλλικών τεμαχίων στο υλικό (μειώνοντας, όμως, τη θερμοχωρητικότητα του συστήματος).

Άλλες οργανικές ενώσεις που έχουν μελετηθεί για να χρησιμοποιηθούν ως PCMs στην αποθήκευση θερμότητας είναι τα λιπαρά οξέα (κυρίως στεαρικό και παλμιτικό οξύ και τα ομόλογά τους) και οι πολυαιθυλενογλυκόλες. Οι μη παραφινικές οργανικές ενώσεις παρουσιάζουν υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης, αστάθεια στις υψηλές θερμοκρασίες ενώ, όπως και οι άλλες οργανικές ενώσεις, έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Ειδικότερα, τα κορεσμένα λιπαρά οξέα εμφανίζουν μικρή μεταβολή όγκου και περιορισμένη ή καθόλου υπέρψυξη. Παρόλη την ικανοποιητική συμπεριφορά τους, δεν επιλέγονται συνήθως λόγω του υψηλού κόστους.

Αρκετές μελέτες έχουν γίνει και για τα υλικά εκείνα που μετατρέπονται από μία στερεή μορφή σε μία άλλη, καθώς παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της απουσίας υγρής φάσης. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν το διασταυρωμένο πολυαιθυλένιο και οι πολυαλκοόλες.

Στον πίνακα 3.1 αναφέρονται ορισμένα PCMs και οι ιδιότητές τους.

3.1.3 Συστήματα αποθήκευσης με PCMs

Μία εγκατάσταση αποθήκευσης με υλικά αλλαγής φάσης αποτελείται από το σύστημα που περιέχει το PCM και το μέσο μεταφοράς θερμότητας. Η ανάπτυξή του απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή σε διάφορους κρίσιμους παράγοντες, όπως το υλικό κατασκευής, η προστασία που παρέχει από τις αρνητικές επιδράσεις του περιβάλλοντος (απώλεια ή απορρόφηση υγρασίας από τα ένυδρα άλατα και τις πολυγλυκόλες, οξείδωση από τον αέρα) και ο χειρισμός.

Τα συστήματα που έχουν μελετηθεί, ελεγχθεί και σε ορισμένες περιπτώσεις έχουν διατεθεί και στο εμπόριο είναι τα ακόλουθα.

- ♦ **Αποθήκευση όγκου (bulk storage)** σε δεξαμενές με εναλλάκτες θερμότητας.
- ♦ **Τοποθέτηση σε κάψουλες μεσαίου μεγέθους (μακροκάψουλες, macroencapsulation)**
- ♦ **Τοποθέτηση σε μικροκάψουλες (microencapsulation)**

Η επιλογή του καλύτερου εξαρτάται από την εφαρμογή, την ύπαρξη κατάλληλου PCM, τη μέθοδο και τις απαιτήσεις για τη μεταφορά θερμότητας, το κόστος και αρκετούς άλλους παράγοντες.

Οι απαιτήσεις για ένα σύστημα το οποίο θα περιέχει το υλικό αλλαγής φάσης είναι ποικίλες και σημαντικές. Επομένως, το υλικό πρέπει να πληροί τα εξής:

- Να είναι συμβατό με το PCM
- Να έχει την ικανότητα να μεταφέρει θερμότητα αρκετά γρήγορα για να φορτίζει και να εκφορτίζει την εγκατάσταση αποθήκευσης θερμότητας
- Να είναι σταθερό στις ακραίες θερμοκρασίες λειτουργίας
- Να αντέχει στις τάσεις που προκύπτουν από τη μεταβολή όγκου που συνοδεύει την αλλαγή φάσης

Πίνακας 3.1
Ιδιότητες PCM

Θερμοκρασία τήξης (°C)	Υλικό	Λανθάνουσα θερμότητα		Θερμική αγωγιμότητα στερεού Btu/(h* <i>f</i> t*°F) [W/(m*°C)]	Πυκνότητα lb _m /ft ³ (kg/m ³)	Ειδική θερμότητα Btu/(lb _m *°F) [kJ/(kg*°C)]	
		Btu/lb _m (kJ/kg)	Btu/ft ³ (kJ/m ³)			Στερεό	Υγρό
0	H ₂ O	143.1 (334.4)	8191 (0.306*10 ⁶)	1.28 (2.21)	57.24 (916.8)	0.487 (2040)	1.00 (4210)
3.3	Na ₂ SO ₄ , KCl, πρόσθετα	50 (116.5)	4600 (0.172*10 ⁶)		92 (1473)		
7.2	Na ₂ SO ₄ , NH ₄ Cl, KCl, πρόσθετα	50 (116.5)	4600 (0.172*10 ⁶)		92 (1473)		
13	Na ₂ SO ₄ , NaCl, NH ₄ Cl	78 (181.3)	7150 (0.267*10 ⁶)		92 (1473)		
29	CaCl ₂ · 6H ₂ O	82 (190.8)	8364 (0.311*10 ⁶)	0.629 (1.088)	102 (1630)	0.320 (1340)	0.552 (2310)
32.4	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	109 (253)	9940 (0.358*10 ⁶)		91.2 (1416)	0.459 (1920)	0.779 (3260)
36	Na ₂ S ₂ O ₃ · 12H ₂ O	114 (280)	10830 (0.426*10 ⁶)		95 (1520)	0.404 (1690)	0.464 (1940)
49	Na ₂ S ₂ O ₃ · 5H ₂ O	86 (200)	9116 (0.338*10 ⁶)		106 (1690)	0.346 (1450)	0.570 (2389)
57.2	Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O, NH ₄ NO ₃	47 (190.3)	5000 (0.185*10 ⁶)		106 (1690)		
58	Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O, MgCl ₂ · 6H ₂ O	56.8 (132.2)	5783 (0.215*10 ⁶)	0.392 (0.678)	102 (1630)		
89	Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	70.0 (162.8)	7140 (0.265*10 ⁶)	0.353 (0.611)	102 (1630)		
117	MgCl ₂ · 6H ₂ O	72.5 (168.6)	7105 (0.264*10 ⁶)	0.401 (0.694)	98 (1569)		

Η πιο σημαντική ιδιότητα είναι η συμβατότητα του υλικού κατασκευής με το PCM. Ως υλικά κατασκευής χρησιμοποιούνται μέταλλα, πλαστικά, ενώ λιγότερο συχνά το τσιμέντο ή το γυαλί. Σε γενικές γραμμές, τα ένυδρα άλατα είναι συμβατά με τα πλαστικά, ενώ τα οργανικά υλικά με τα μέταλλα.

Εκτός από τις παραπάνω ιδιότητες, είναι απαραίτητο το σύστημα να αντέχει στις για όλα τα δοχεία τάσεις κατά την αποστολή, τη μεταφορά, το χειρισμό ή τις επιδράσεις του περιβάλλοντος. Σημαντική δυσκολία των συστημάτων που περιέχουν PCMs δεν

είναι ο τύπος της τάσης, αλλά η διάρκειά της, καθώς τα PCMs πρέπει να παραμένουν στα δοχεία για όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος.

Ειδικότερα για κάθε ένα από τα συστήματα τα οποία περιέχουν τα PCMs, πρέπει να γίνουν οι ακόλουθες επισημάνσεις.

1. Αποθήκευση σε δεξαμενές

Η δεξαμενή με τον εναλλάκτη θερμότητας είναι η μέθοδος που επιλέγεται συνήθως όταν το μέσο μεταφοράς είναι υγρό. Είναι το σύστημα εκείνο, όπου το PCM περιέχεται σε μία δεξαμενή της οποίας ο ρόλος είναι να συγκρατεί και να προστατεύει το υλικό αλλαγής φάσης, ενώ υπάρχει μία επιφάνεια η οποία διαχωρίζει το μέσο μεταφοράς θερμότητας και το PCM διαμέσου της οποίας γίνεται η εναλλαγή θερμότητας.

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό των δεξαμενών με υλικά αλλαγής φάσης είναι η ανάγκη για πιο μεγάλη επιφάνεια εναλλαγής ή για τη βελτίωση των ιδιοτήτων μεταφοράς θερμότητας. Αυτό είναι επιθυμητό για τους παρακάτω λόγους:

◊ Κατά τη διεργασία πήξης-τήξης, η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας τείνει να καλυφθεί με ένα στρώμα στερεοποιημένου PCM του οποίου το πάχος μεγαλώνει καθώς ο βαθμός εκφόρτισης αυξάνει. Το στερεό αυτό στρώμα ολοένα μειώνει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας.

◊ Ενώ τα PCMs, λόγω της μεγαλύτερης θερμοχωρητικότητάς τους, απαιτούν μικρότερο όγκο συστήματος για την αποθήκευση ενός συγκεκριμένου ποσού θερμότητας, ο ρυθμός μεταφοράς, ο οποίος είναι ο ίδιος, επιβάλλει την ύπαρξη μίας μεγάλης επιφάνειας εναλλαγής.

Για την φόρτιση και την εκφόρτιση, λοιπόν, ενός συστήματος αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας απαιτείται ένας κατάλληλος εναλλάκτης θερμότητας με μεγάλη επιφάνεια εναλλαγής. Γενικά, ο εναλλάκτης θερμότητας χρειάζεται να ικανοποιεί τις παρακάτω απαιτήσεις:

- Θα πρέπει να εξασφαλίζει έναν υψηλό βαθμό μεταφοράς θερμότητας, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ραγδαία φόρτιση και εκφόρτιση του συστήματος. Αυτή είναι μία πολύ πιεστική απαίτηση για τα συστήματα λανθάνουσας θερμότητας, καθώς η θερμική αγωγιμότητα για τα περισσότερα PCMs είναι μικρή. Ένας υψηλός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μπορεί να επιτευχθεί, όπως έχει ήδη αναφερθεί, με την ενσωμάτωση μεταλλικών ελασμάτων, με φυσική ή και εξαναγκασμένη κυκλοφορία του PCM ή ακόμη με την προσθήκη πτερυγίων στους σωλήνες του εναλλάκτη.

- Θα πρέπει να επιτρέπει μόνο μικρές βαθμίδες θερμοκρασίες για τη φόρτιση και την εκφόρτιση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εξασφαλίζοντας μία σημαντικά μεγάλη επιφάνεια εναλλαγής και μικρά μονοπάτια μεταφοράς θερμότητας μέσα στο μέσο.

- Θα πρέπει να εξασφαλίζουν υψηλή θερμική διαχυτότητα.

Οι εναλλάκτες θερμότητας για τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας διακρίνονται σε δύο τύπους:

- **Παθητικοί εναλλάκτες** οι οποίοι δε διαθέτουν κινούμενα μέρη. Αυτοί, τυπικά, περιλαμβάνουν σωλήνες μικρής διαμέτρου (30-50 mm) ή επίπεδους δίσκους (flat pans) (20-30 mm βάθος) μέσα στους οποίους βρίσκεται το PCM. Οι σωλήνες μπορούν να “επιδεθούν” όλοι μαζί όπως σε έναν εναλλάκτη κελύφους αυλών με το μέσο μεταφοράς θερμότητας να ρέει στα κενά που δημιουργούν οι σωλήνες και το PCM να βρίσκεται στο κέλυφος.

- **Ενεργητικοί εναλλάκτες** στους οποίους υπάρχουν συστήματα για την ανάδευση του PCM βελτιώνοντας έτσι τη μεταφορά θερμότητας, αλλά παρεμποδίζοντας τον πιθανό διαχωρισμό των φάσεων. Στα ενεργητικά συστήματα συμπεριλαμβάνονται και οι εναλλάκτες με απευθείας επαφή, οι οποίοι παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της

μεγάλης επιφάνειας εναλλαγής και της απουσίας εναπόθεσης στερεοποιημένου PCM κατά την εκφόρτιση της επιφάνειας του εναλλάκτη.

Η μελέτη που έχει γίνει για δεξαμενές με υλικά αλλαγής φάσης έχει επικεντρωθεί στη βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας και όχι στη λειτουργία και τις εφαρμογές τους. Έχουν, λοιπόν, προταθεί διάφορες πειραματικές εγκαταστάσεις, ενώ τα ολοκληρωμένα συστήματα αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας που λειτουργούν είναι πολύ λίγα.

2. Τοποθέτηση σε μακροκάψουλες

Στη μέθοδο αυτή, το δοχείο λειτουργεί και ως επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας. Ο όγκος του PCM ανά μονάδα μπορεί να ποικίλλει από μερικά γραμμάρια έως μερικά κιλά. Το σχήμα τους ποικίλλει από ορθογώνια πλαίσια έως πλαστικούς σάκους (pouches) με συγκεκριμένο σχήμα.

Τα συστήματα αυτά επιλέγονται, συνήθως, όταν η μεταφορά θερμότητας γίνεται με εξαναγκασμένη κυκλοφορία αέρα, όταν έχουμε εφαρμογές με PCMs χαμηλότερης θερμοκρασίας τήξης όπου απαιτούνται και μικρότεροι όγκοι ή όταν ο όγκος του συστήματος δεν είναι κρίσιμος. Έχει, λοιπόν, μελετηθεί πειραματικά η εφαρμογή τους σε συστήματα ηλιακής ζήρασης προϊόντων, θέρμανσης-ψύξης κτιρίων.

Μία ποικιλία δοχείων μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως φιάλες, πλαστικοί σωλήνες, δοχεία με ελαστικές πλαστικές μεμβράνες κ.α. Η θερμική διαχυτότητα του υλικού της κάψουλας δεν πρέπει να είναι πολύ μικρότερη από αυτή του PCM. Οι περισσότερες μικροκάψουλες είναι από πλαστικό, υπάρχουν όμως και ορισμένες που χρησιμοποιούν μέταλλα και μεμβράνες. Η τάση που επικρατεί είναι να γίνεται χρήση πλαστικών ή μεμβρανών για χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ τα μέταλλα χρησιμοποιούνται για τα PCMs με υψηλό σημείο τήξης.

Το πιο σημαντικό στοιχείο για ένα επιτυχημένο σύστημα αποθήκευσης όπου το PCM περιέχεται σε μικροκάψουλες, είναι ο σχεδιασμός του συστήματος έτσι ώστε να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής και να ταιριάζει απόλυτα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Για να εξασφαλισθεί ικανοποιητική μεταφορά θερμότητας, τα PCM σε μικροκάψουλες έχουν μεγάλη αναλογία επιφάνειας/όγκο. Σε αυτά τα συστήματα δίνεται μικρότερη προσοχή στην εναπόθεση στερεού PCM στην επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Λόγω του μικρού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας του αέρα, η διεπιφάνεια δοχείου-αέρα θα περιορίζει τη μεταφορά θερμότητας. Η ανάπτυξη στερεού στρώματος στην εσωτερική επιφάνεια μεταφοράς μπορεί να μειώσει σημαντικά το συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Ταυτόχρονα, η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα των PCMs μειώνει σημαντικά τον όγκο σε σύγκριση με το νερό ή τα πετρώματα, όμως η απαίτηση για μεταφορά θερμότητας παραμένει η ίδια.

3. Τοποθέτηση σε μικροκάψουλες

Στον τρόπο αυτό αποθήκευσης έχουμε πολύ μικρές διακριτές μονάδες με PCM διεσπαρμένες και συνδεδεμένες μεταξύ τους με μία συνεχή φάση. Η συνεχής αυτή μήτρα πολλές φορές παρέχει όλα όσα απαιτούνται από ένα δοχείο, όπως το να λειτουργεί ως φράγμα για την υγρασία.

Λόγω του μικρού όγκου που έχει κάθε μονάδα του PCM, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην υπέρψυξη. Η ποσότητα του παράγοντα πυρήνωσης πρέπει να είναι μεγάλη και η διασπορά της άριστη, έτσι ώστε να παρέχει ικανοποιητική πυρήνωση. Η καλύτερη λύση, ωστόσο, είναι η χρήση ενός PCM που δεν υπερψύχεται. Πλεονέκτημα, όμως, του μικρού όγκου αποτελεί η δυνατότητα που παρέχεται στα PCMs τα οποία δεν τήκονται συμπτωτικά, να σταθεροποιούνται και να μη διαχωρίζονται οι φάσεις.

Ένα άλλο μειονέκτημα των PCMs σε μικροκάψουλες είναι η μεγάλη αναλογία του υλικού κατασκευής ως προς το PCM. Αυτό μειώνει την ενεργειακή πυκνότητα και αυξάνει την τιμή. Η μεταφορά θερμότητας μπορεί να παρουσιάσει, επίσης, προβλήματα καθώς η μήτρα που περιέχει τις μικροκάψουλες σταματά τη μεταφορά με συναγωγή κατά τη φόρτιση, μειώνοντας έτσι σημαντικά το ρυθμό φόρτισης. Το φαινόμενο αυτό είναι περισσότερο έντονο για τις οργανικές μήτρες. Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν τα συστήματα αυτά αντισταθμίζονται από την ικανότητά τους να αντικαθιστούν εύκολα συμβατικά υλικά, όπως είναι τα οικοδομικά υλικά, αυξάνοντας το ποσό της ενέργειας που μπορούν να αποθηκεύσουν και παρέχοντας δυνατότητα διαχείρισης του φορτίου.

3.1.3.1 Αριθμητική ανάλυση της τοποθέτησης σε κάψουλες

Η ικανότητα αποθήκευσης ενός υλικού αλλαγής φάσης που θερμαίνεται από μία θερμοκρασία T_1 σε μία άλλη T_2 , με μετάβαση σε μία ενδιάμεση φάση θερμοκρασίας T^* , είναι το άθροισμα της μεταβολής της αισθητής θερμότητας του στερεού (η χαμηλότερη θερμοκρασιακή φάση) από την T_1 στην T^* , της λανθάνουσας θερμότητας στη θερμοκρασία T^* και της αισθητής θερμότητας του υγρού (του τήγματος ή της υψηλότερης θερμοκρασιακά φάσης) από την T^* στην T_2 .

$$Q_s = m[(T^* - T_1)C_s + \lambda + (T_2 - T^*)C_l] \quad (3.1)$$

όπου m είναι η μάζα του υλικού, C_s και C_l είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα της στερεής και της υγρής φάσης αντίστοιχα και λ είναι η λανθάνουσα θερμότητα της μεταβατικής φάσης.

Οι Morrison και Abdel-Khalik έχουν αναπτύξει ένα μοντέλο το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί για υλικά αλλαγής φάσης σε κάψουλες, όπου το μήκος της κατεύθυνσης ροής είναι L , η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας του υλικού είναι A και η βρεχόμενη περίμετρος είναι P . Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας διαπερνά την κάψουλα κατά

την κατεύθυνση x με παροχή μάζας \dot{m} και θερμοκρασία εισόδου T_f , όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.

Ένα μοντέλο μπορεί να βασιστεί στις εξής παραδοχές:

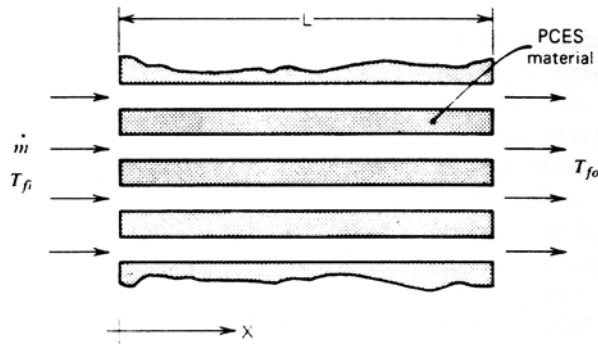
α) Κατά τη διάρκεια της ροής, η μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής στον οριζόντιο άξονα αμελείται

β) Οι απώλειες θερμότητας αμελούνται

Με βάση τα παραπάνω, ο διατήρηση ενέργειας του υλικού δίνει:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{k}{\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{UP}{\rho A} (T_f - T) \quad (3.2)$$

όπου u , T , k και ρ είναι η ειδική εσωτερική ενέργεια, η θερμοκρασία, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και η πυκνότητα του υλικού αλλαγής φάσης αντίστοιχα. T_f και U είναι η θερμοκρασία του κυκλοφορούντος ρευστού και ο συντελεστής της συνολικής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του ρευστού και του υλικού αλλαγής φάσης και τ ο χρόνος.



Σχήμα 3.2
Σχηματική απεικόνιση μίας μονάδας αποθήκευσης με υλικά αλλαγής φάσης

Η διατήρηση ενέργειας του ρευστού δίνει:

$$\frac{\partial T_f}{\partial \tau} + \frac{\dot{m}}{\rho_f A_f} \frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{UP}{\rho_f A_f C_f} (T - T_f) \quad (3.3)$$

όπου ρ_f , A_f και C_f είναι η πυκνότητα, η επιφάνεια ροής και η ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού.

Η ειδική εσωτερική ενέργεια εξαρτάται από τη θερμοκρασία T , το κλάσμα υγρού χ και την ειδική θερμοχωρητικότητα υγρής και στερεάς φάσης C_l και C_s .

$$u = C_s (T - T_{ref}) \quad (T < T^*) \quad (3.4.a)$$

$$u = C_s (T^* - T_{ref}) + \chi \lambda \quad (T = T^*) \quad (3.4.b)$$

$$u = C_s (T^* - T_{ref}) + \lambda + C_l (T - T^*) \quad (T > T^*) \quad (3.4.c)$$

όπου T^* είναι η θερμοκρασία τήξης και T_{ref} είναι η θερμοκρασία αναφοράς, στην οποία η εσωτερική ενέργεια είναι μηδέν.

Οι εξισώσεις και οι οριακές συνθήκες για την ενεργειακή αποθήκευση με υλικά αλλαγής φάσης μπορούν να απλοποιηθούν ανάλογα με την περίπτωση. Έχει αποδειχθεί ότι η συναγωγή κατά τον οριζόντιο άξονα της ροής αμελείται, οπότε οι εξισώσεις 3.2 και 3.3 μετασχηματίζονται στις ακόλουθες:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{UP}{\rho A} (T_f - T) \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{UP}{\left(\dot{m} C_p\right)_f} (T - T_f) \quad (3.6)$$

Αν θέσουμε $\theta = \tau \left(\dot{m} C_p \right)_f / \rho A L \bar{C}$ και $NTU = UPL / \left(\dot{m} C_p \right)_f$ οι εξισώσεις 3.5 και 3.6, παίρνουν τη μορφή:

$$\frac{1}{C} \frac{\partial u}{\partial \theta} = NTU (T_f - T) \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial (X/L)} = NTU (T - T_f) \quad (3.8)$$

Το μοντέλο NTU έχει αποδειχθεί ότι αποτελεί καλή προσέγγιση για πρακτικά συστήματα, όπως είναι η θερμική κλίση στερεών.

Οι Jurinak και Abdel-Khalik έδειξαν ότι για εφαρμογές θέρμανσης κτιρίων, όπου το σημείο τήξης είναι μεταξύ μίας βέλτιστης τιμής (συνήθως, από 5 μέχρι 10° C πάνω από τη θερμοκρασία του χώρου) και των 50° C, είναι πιο κατάλληλη για τον υπολογισμό της ισοδύναμης ικανότητας αποθήκευσης η εμπειρική σχέση που ακολουθεί.

$$\left(\dot{m} C_p \right)_e = m \left[\frac{18,3}{(T^*)^2} \lambda + \left(1 - \frac{18,3}{(T^*)^2} \right) C_s + \frac{18,3}{(T^*)^2} C_l \right] \quad (3.9)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, όλες οι θερμοκρασίες είναι σε °C, το λ σε kJ/kg και το C σε kJ/kgC.

3.1.4 Οικονομική Θεώρηση

Το εγκατεστημένο κόστος μιας μονάδας αποθήκευσης με υλικά αλλαγής φάσης ποικίλλει ανάλογα με το σχεδιασμό του, το μέγεθος και το είδος της εγκατάστασης. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι, από μία έρευνα που πραγματοποίησαν διάφοροι κατασκευαστές, το κόστος κυμαίνεται μεταξύ 10 και 12 δολαρίων ανά ένα εκατομμύριο Btu. Το κόστος αυτό είναι εκφρασμένο στην αξία δολαρίου το 1979. Ωστόσο, από άλλη πηγή, το κόστος κυμαίνεται μεταξύ 6 και 27 δολαρίων ανά ένα εκατομμύριο Btu (αξία δολαρίου το 1980).

3.1.5 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας όσα έχουν αναφερθεί, διαπιστώνουμε ότι η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας παρουσιάζει σοβαρά πλεονεκτήματα σε σχέση με την αισθητή θερμότητα, κυρίως λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας του μέσου αποθήκευσης, η οποία επιτρέπει τη χρήση μικρότερων εγκαταστάσεων αποθήκευσης. Παρά τα πλεονεκτήματα, όμως, που παρουσιάζει, δεν έχει εφαρμοσθεί σε μεγάλη κλίμακα λόγω πολλαπλών προβλημάτων τα οποία αναφέρονται παρακάτω.

- Το μέσο αποθήκευσης της θερμότητας, δηλαδή το PCM, λόγω της φύσης του, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως μέσο μεταφοράς θερμότητας. Γι' αυτό,

συνήθως, απαιτούνται ξεχωριστοί βρόγχοι για το ρευστό προκειμένου να φορτίσει και να εκφορτίσει το σύστημα.

- Τα PCMs, συνήθως, έχουν μικρή θερμική διαχυτότητα, απαιτώντας έτσι ειδικούς (άρα ακριβούς) εναλλάκτες.
- Όπως ήδη έχει επισημανθεί, σε ένα PCM μπορεί, ανάλογα με τη φύση του, να παρουσιασθούν προβλήματα όπως ο διαχωρισμός και η καθίζηση μίας στερεής φάσης, η οποία δεν μπορεί να επαναδιαλυτοποιηθεί και άρα μειώνεται η θερμοχωρητικότητα του συστήματος. Ένα άλλο πρόβλημα είναι η υπέρψυξη, η οποία απαιτεί την προσθήκη ενός παράγοντα πυρήνωσης (αύξηση κόστους). Επίσης, η διάβρωση του δοχείου που περιέχει το PCM δημιουργεί ακαθαρσίες, οι οποίες επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος.
- Ο σχεδιασμός του εναλλάκτη θερμότητας απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή προκειμένου οι ρυθμοί ψύξης του PCM να ακολουθούν τους ρυθμούς απομάκρυνσης θερμότητας. Όπως είναι φανερό, χρειάζεται ειδικός σχεδιασμός, ο οποίος μπορεί να αυξήσει το τελικό κόστος.
- Τα PCMs που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι, συνήθως, υλικά ακριβά και σε συνδυασμό με τον, σχετικά, μικρό χρόνο ζωής τους, το όλο σύστημα δεν είναι οικονομικό.
- Δύο διαφορετικά PCM και δύο δεξαμενές αποθήκευσης είναι αναγκαίες όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν συστήματα θέρμανσης και ψύξης ταυτόχρονα. Η διπλή αυτή αποθήκευση απαιτείται γιατί οι βέλτιστες θερμοκρασίες διανομής είναι διαφορετικές για τη θέρμανση και την ψύξη.
- Εάν η θερμοκρασία αποθήκευσης θερμότητας σε PCM είναι σημαντικά διαφορετική από την ατμοσφαιρική, μπορεί να απαιτείται ειδικά μονωμένο δοχείο.

Η έρευνα που επικεντρώνεται στη μέθοδο αυτή αποθήκευσης πρέπει να επικεντρωθεί στη βελτίωση μεταφοράς θερμότητας π.χ. με την ανάπτυξη συστημάτων άμεσης επαφής με σκοπό την αύξηση της επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας, τη βελτίωση της συμπεριφοράς των ήδη χρησιμοποιούμενων PCMs αλλά και την προώθηση νέων υλικών, πιο οικονομικών, με δοκιμές σε ολοκληρωμένα συστήματα αποθήκευσης και για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Μελέτες πρέπει να γίνουν, επίσης, και για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις τόσο από τη λειτουργία, όσο και από τη διάθεση των αποθεμάτων. Ο σχεδιασμός πρέπει να είναι ο βέλτιστος σε σχέση, κυρίως, με τον εναλλάκτη θερμότητας, τη διάρκεια ζωής, την απόδοση και το κόστος. Έτσι, σε κάθε εφαρμογή, απαιτούνται ρεαλιστικές εκτιμήσεις κόστους σε σχέση με το όφελος, έτσι ώστε να αξιολογηθεί το σύστημα αποθήκευσης και να είναι δυνατή η διάθεσή του στο εμπόριο με όρους ανταγωνιστικούς ως προς τα υπάρχοντα συστήματα.

3.2 Θερμική Κλίνη Στερεών (Rock Bed)

Μία θερμική κλίνη στερεών αποτελείται από ένα σώμα θερμοαπορροφητικών στερεών, διά μέσου των οποίων ένα ρευστό, συνήθως ατμοσφαιρικός αέρας, ρέει όταν μεταφέρεται θερμική ενέργεια από το στερεό προς το ρευστό ή αντίστροφα. Μία ποικιλία από στερεά μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όπως χαλίκια, σίδηρο, τσιμέντο, τούβλα, κεραμικά κ.λ.π.

Τα πλεονεκτήματα στη χρήση μιας τέτοιας θερμικής αποθήκης, ειδικά για τις ηλιακές εφαρμογές, είναι:

- Ο μεγάλος συντελεστής της θερμικής μεταφοράς μεταξύ του αέρα και του στερεού υλικού της αποθήκης, που οδηγεί σε θερμική στρωμάτωση.
- Η μικρή αγωγιμότητα της αποθήκης όταν δεν υπάρχει ροή ρευστού.
- Το μικρό, συνήθως, κόστος τόσο του υλικού της αποθήκης, όσο και του περιβλήματος.

Ωστόσο, η μέθοδος αυτή αποθήκευσης παρουσιάζει και μειονεκτήματα, τα οποία είναι τα ακόλουθα:

- Η μεγάλη πτώση πίεσης που απαιτείται για να διέλθει το ρευστό μέσα από την αποθήκη, που σημαίνει μεγάλο μέγεθος ανεμιστήρα και τελικά μεγάλη κατανάλωση ενέργειας.
- Ο όγκος ενός θερμικού στρώματος είναι συνήθως τρεις φορές μεγαλύτερος από την ισοδύναμη θερμική αποθήκη νερού.
- Το θερμικό στρώμα παρουσιάζει προβλήματα λειτουργίας που είναι σχετικά με τον καλό καθαρισμό του στερεού από σκόνη, προβλήματα υγρασίας, αποχέτευσης κ.λ.π.

Κάθε θερμικό σώμα, σαν μέσο που παίρνει ή δίνει θερμότητα, έχει ορισμένα φυσικά και θερμικά χαρακτηριστικά, τα οποία εξαρτώνται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του και από τα υλικά που το συγκροτούν.

Στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του θερμικού στρώματος θα αναφερθούν τα πιο σπουδαία που είναι:

1. Ο όγκος V (m^3) και το σχήμα της θερμικής κλίνης

Ο όγκος του θερμικού στρώματος χαρακτηρίζει, μαζί με άλλα μεγέθη, την ικανότητά του να αποθηκεύει θερμική ενέργεια και το σχήμα του τις θερμικές απώλειες, για ένα συγκεκριμένο τρόπο μόνωσης. Θεωρητικά, το σφαιρικό σχήμα δίνει, για τον ίδιο όγκο, τη μικρότερη εξωτερική επιφάνεια. Παρουσιάζει, όμως, δυσκολίες στην κατασκευή και στη λειτουργία της αποθήκης. Αντί αυτού, κατασκευάζονται συνήθως κυλινδρικές αποθήκες, με μήκος ανάλογο με το χώρο που προσφέρεται για την τοποθέτησή τους.

2. Το μήκος L (m) και η τομή κάθετη προς αυτό

Το μήκος είναι ένα κρίσιμο μέγεθος, γιατί από αυτό εξαρτάται ευθέως ανάλογα η πτώση πίεσης του αέρα που διέρχεται μέσα από τη θερμική αποθήκη και, φυσικά, δεν μπορεί να μεγαλώσει πολύ, αντίθετα μάλιστα, πρέπει να κρατείται σε μικρά μεγέθη, αφετέρου εισέρχεται και στους υπολογισμούς της θερμικής συμπεριφοράς της αποθήκης.

3. Η διατομή A (m^2)

Η διατομή είναι ένα μέγεθος, από το οποίο εξαρτάται η πτώση πίεσης και υπεισέρχεται στους θερμικούς υπολογισμούς της κλίνης.

Μεταξύ των φυσικών χαρακτηριστικών του θερμικού στρώματος, τα πιο σπουδαία είναι:

1. Η ισοδύναμη διάμετρος των στερεών D_{pe} (m)

Ορίζεται ως η διάμετρος των σφαιρικών στερεών που καταλαμβάνουν τον ίδιο όγκο και τον ίδιο αριθμό με τα πραγματικά που απαρτίζουν την κλίνη και δίνεται από τη σχέση:

$$D_{pe} = \left(\frac{6m_p}{n\rho_p N} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.10)$$

όπου m_p είναι η μάζα των στερεών, ρ_p η πυκνότητα του υλικού των στερεών και N ο αριθμός των στερεών που απαρτίζουν την κλίνη.

2. Το ποσοστό κενού χώρου του θερμικού στρώματος ε

Ορίζεται ως ο λόγος του όγκου μεταξύ των στερεών προς τον συνολικό όγκο της κλίνης και μετράται αφού ζυγίσουμε τη θερμική κλίνη πριν και μετά την πλήρωσή της με ρευστό, π.χ. νερό, οπότε:

$$\varepsilon = \frac{m_w / \rho_w}{V} \quad (3.11)$$

όπου m_w και ρ_w είναι η μάζα και η πυκνότητα του νερού αντίστοιχα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, θεωρητικά, εάν όλα τα στερεά είναι τέλειες σφαίρες της ίδιας διαμέτρου, το ποσοστό του κενού χώρου είναι σταθερό, ανεξάρτητο από το μέγεθος των σφαιρών εξαρτώμενο μόνο από τον τρόπο τοποθέτησής τους. Όμως, εάν διαφορετικής διαμέτρου σφαίρες αποτελέσουν μία θερμική κλίνη, τότε το ε γίνεται μικρότερο, γιατί οι σφαίρες καταλαμβάνουν τα κενά μεταξύ των μεγαλύτερων.

3. Ο συντελεστής σφαιρικότητας της επιφάνειας των στερεών α

Είναι ο λόγος της επιφάνειας των στερεών από τα οποία αποτελείται η κλίνη προς την επιφάνεια των ισοδύναμων σφαιρών. Η εκτίμηση αυτού του συντελεστή είναι δύσκολη. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι χαλίκια από σπαστήρα έχουν συντελεστή σφαιρικότητας που ποικίλει από 2.5 μέχρι 1.5 συναρτήσει του μεγέθους των χαλικιών από πολύ μικρά μεγέθη μέχρι το μέγεθος των 50 mm, για λεία δε θαλασσινά χαλίκια ο συντελεστής αυτός είναι 1.5 ανεξάρτητα από μέγεθος.

Σημείωση: Η ισοδύναμη διάμετρος, το ποσοστό κενού χώρου και ο συντελεστής σφαιρικότητας είναι ποσότητες που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τα στερεά από τα οποία αποτελείται η θερμική κλίνη.

4. Το μέτρο ροής μάζας του ρευστού G_f (kg/sm²)

Ορίζεται από τον λόγο της μάζας του ρευστού που ρέει μέσα στη θερμική κλίνη ανά μονάδα χρόνου, προς τη διατομή της κλίνης. Η ποσότητα αυτή εισάγει έναν παράγοντα που μέχρι τώρα δεν είχε εκτιμηθεί για τη θερμική κλίνη, δηλαδή το ρευστό που κινείται μέσα σ' αυτή και την ποσότητά του. Όπως είναι φανερό, η πτώση πίεσης και τα άλλα θερμικά χαρακτηριστικά της θερμικής κλίνης συναρτώνται και με το G_f .

5. Η πτώση πίεσης Δp (kg/m²s²)

Σε αντίθεση με έναν εναλλάκτη θερμότητας, όπου η κίνηση του ρευστού μέσα σ' αυτόν ακολουθεί προκαθορισμένο δρόμο, στη θερμική κλίνη το ρευστό ακολουθεί, στρίβοντας συνεχώς, τυχαία μονοπάτια που δημιουργούνται μεταξύ των στερεών. Το μέγεθος και η κατανομή αυτών των οδών είναι συνάρτηση του σχήματος και του ποσοστού κενού χώρου των στερεών και κάθε υπολογισμός της πτώσης πίεσης πρέπει να λάβει υπόψη αυτό το γεγονός.

Οι πρώτοι υπολογισμοί έγιναν από τους Ranz και Ergun. Τον τύπο υπολογισμού του Ergun δέχονται οι Schmidt και Willmott και είναι ο ακόλουθος:

$$\frac{\Delta p}{L} g_c = 1.75 \left[\frac{(1-\varepsilon)G_f \bar{V}}{\varepsilon^3 D_{pe}} \right] + 150.0 \left[\frac{(1-\varepsilon)^2 \mu_f \bar{V}}{\varepsilon^3 D_{pe}^2} \right] \quad (3.12)$$

όπου g_c είναι μία σταθερά εξαρτώμενη από τις χρησιμοποιούμενες μονάδες, \bar{V} η μέση ταχύτητα του ρευστού που δίνεται από τη σχέση $\bar{V} = G_f / \rho_f$ και μ_f το απόλυτο ιξώδες του ρευστού.

Το 1978 ο McCorquodale και άλλοι έδωσαν μία νέα σχέση υπολογισμού, που λαβαίνει υπόψη και τον συντελεστή σφαιρικότητας της επιφάνειας των στερεών α και είναι η ακόλουθη:

$$\Delta p = \frac{LG_f^2(1-\varepsilon)\alpha}{\rho_f D_{pe} \varepsilon^{3/2}} \left[4,74 + 1,66 \frac{(1-\varepsilon)\alpha\mu_f}{G_f D_{pe} \varepsilon^{3/2}} \right] \quad (3.13)$$

όπου ρ_f η πυκνότητα του ρευστού.

Εάν δεν υπάρχουν οι μετρήσεις των α και ε , οι Duffie, Bechman και Shewen υποδεικνύουν να χρησιμοποιηθεί η σχέση των Dunkle και Ellul:

$$\Delta p = \frac{LG_f^2}{\rho_f D_{pe}} \left(21 + 1750 \frac{\mu_f}{G_f D_{pe}} \right) \quad (3.14)$$

Εκτεταμένες μετρήσεις και πειράματα έκαναν οι Chandra, Willits και άλλοι και κατέληξαν στην παρακάτω εξίσωση υπολογισμού του Δp .

$$\frac{\Delta p \cdot \rho_f D_{pe}^3}{\mu_f^2} = \varepsilon^{-2,6} \left[185 \left(\frac{\rho_f \bar{V} D_{pe}}{\mu_f} \right) + 1,7 \left(\frac{\rho_f \bar{V} D_{pe}}{\mu_f} \right)^2 \right] \quad (3.15)$$

για $0.33 < \varepsilon < 0.46$ και $1 < \frac{\rho_f \bar{V} D_{pe}}{\mu_f} < 1000$

Η μέση απόκλιση μεταξύ πειραματικών μετρήσεων και υπολογισμών από τη σχέση 3.14 είναι περίπου 8%. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στη διαφορά μεταξύ των εξισώσεων 3.13 και 3.14. Η πρώτη δεν προβλέπει καμία διαφορά στην πτώση πίεσης όταν η ποσότητα ε αλλάζει, ενώ η δεύτερη δέχεται έναν σχεδόν διπλασιασμό της για $\varepsilon=0.35$ και $\varepsilon=0.45$, αφήνοντας όλα τα άλλα χαρακτηριστικά της θερμικής κλίνης τα ίδια. Αυτή η μεγάλη εξάρτηση του Δp από το ε που προβλέπει η εξίσωση των Chandra και Willits, καθώς και τα πειράματα και οι μετρήσεις τους μας οδηγούν να δεχτούμε την εξίσωση 3.14 για τον υπολογισμό του Δp , ως την πιο έγκυρη.

Τέλος, τα θερμικά χαρακτηριστικά ενός θερμικού στρώματος είναι τα παρακάτω:

1. Ο ογκομετρικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h_v (W/m³°C)

Είναι ο συντελεστής που δίνει το μέτρο της θερμότητας που περνά από το ρευστό στα στερεά ανά κυβικό μέτρο, ανά δευτερόλεπτο και ανά βαθμό θερμοκρασίας. Πολλές μελέτες και πειράματα έχουν γίνει για τον υπολογισμό του h_v . Οι Lof και Howley, Coutier, Farber, Alanis, Saravia, Rovetty και Dunkle, Ellul δέχονται ότι ο h_v εξαρτάται μόνο από τον λόγο G_f/D_{pe} και οι εξισώσεις που προτείνουν είναι:

$$h_v = 650 \left(\frac{G_f}{D_{pe}} \right)^{0.7} \quad (3.16)$$

των Lof και Howley που δέχονται οι Shewen και Duffie, Bechman ή

$$h_v = 700 \left(\frac{G_f}{D_{pe}} \right)^{0.76} \quad (3.17)$$

που στην εμπειριστατωμένη μελέτη τους αποδεικνύουν ότι βρίσκονται πιο κοντά στα πειραματικά δεδομένα. Ας σημειωθεί ότι οι εξισώσεις ισχύουν όταν το h_v εκφράζεται σε $W/m^2 \cdot ^\circ C$, το G_f σε $kg/m^2 \cdot s$ και το D_{pe} σε m.

Οι Chandra και Willits, θεωρώντας ότι ο ογκομετρικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας εξαρτάται από τις μεταβλητές D_{pe} , V , ε , ρ_f , μ_f , λ_f , T_{ai} , όπου ρ_f , μ_f , λ_f είναι το ειδικό βάρος, το απόλυτο ιξώδες και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του αέρα αντίστοιχα και T_{ai} , T_{bi} η απόλυτη θερμοκρασία του αέρα όταν εισέρχεται στη θερμική κλίση και η αρχική θερμοκρασία των στερεών αντίστοιχα ή

$$\frac{h_v D_{pe}^2}{\lambda_f} = F \left(\frac{\rho_f \bar{V} D_{pe}}{\mu_f}, \varepsilon, \frac{T_{ai} - T_{bi}}{T_{ai}} \right),$$

όπου οι αδιάστατοι παράγοντες είναι

$$\frac{\rho_f \bar{V} D_{pe}}{\mu_f} \text{ ο αριθμός Reynolds,}$$

ε το ποσοστό κενού χώρου,

$$\frac{h_v D_{pe}^2}{\lambda_f} \text{ ο τροποποιημένος αριθμός Nusselt,}$$

$\frac{T_{ai} - T_{bi}}{T_{ai}}$ ο λόγος των θερμοκρασιών, καταλήγουν πειραματικά στη σχέση

$$\frac{h_v D_{pe}^2}{\lambda_f} = 1.45 \left(\frac{\rho_f \bar{V} D_{pe}}{\mu_f} \right)^{0.7} \quad (3.18)$$

που ισχύει για $100 < \frac{\rho_f \bar{V} D_{pe}}{\mu_f} < 1000$

την οποία αποδεχόμαστε ως την πιο έγκυρη και η οποία εξαρτά τον ογκομετρικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας όχι μόνο από τα χαρακτηριστικά D_{pe} και G_f αλλά και από τα χαρακτηριστικά του αέρα ρ_f , μ_f , λ_f .

2. Ο επιφανειακός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h_s ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

Ο υπολογισμός του h_s μπορεί να γίνει άμεσα βάσει μεθόδων που χρησιμοποιούν πειραματικά δεδομένα ή έμμεσα, αφού έχει υπολογισθεί ο ογκομετρικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας. Η σχέση μεταξύ του h_v και του h_s , την οποία οι Duffle και Beckman συνιστούν, είναι:

$$h_v = 6h_s(1 - \varepsilon) \frac{a}{D_{pe}} \quad (3.19)$$

Για τον υπολογισμό του h_s , οι Handley και Heggs δίνουν την εξίσωση:

$$h_s = \frac{jG_f C_{pf}}{(N_{pr})^{2/3}} \quad (3.20)$$

όπου

$$j \text{ ο συντελεστής Colburn } j = \frac{C_1 (N_{Rem})^{C_2}}{\varepsilon} \quad (3.21)$$

$$N_{Rem} \text{ ο τροποποιημένος αριθμός Reynolds } N_{Rem} = \frac{2D_{pe} \rho_f \bar{V}}{3(1 - \varepsilon) \mu_f} \quad (3.22)$$

$$N_{pr} \text{ είναι ο αριθμός Prandtl } N_{pr} = \frac{C_{pf} \mu_f}{\lambda_f} \quad (3.23)$$

και C_1, C_2 δίνονται από τον πίνακα 3.2 των Handley και Heggs που ακολουθεί.

Πίνακας 3.2
Υπολογισμός των C_1, C_2 και ε

Είδος στερεών	Μέγεθος σε in	C_1	C_2	ε
Κύλινδρος	1/4*1/4	0,13	-0,27	0,31
Κύλινδρος	3/16*3/16	0,09	-0,20	0,30
Κύλινδρος	1/4*1/2	0,29	-0,36	0,34
Δακτύλιος σιδηρός	1/4*1/4	0,24	-0,31	0,77
Δακτύλιος πορσελάνης	1/4*1/4	0,29	-0,35	0,62
Δακτύλιος πορσελάνης	3/8*3/8	0,29	-0,37	0,56
Σφαίρα μεταλλική		0,26	-0,33	0,37

Πρέπει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με τους Schmidt και Willmot, οι τιμές που θα υπολογισθούν από την εξίσωση 3.20 μπορεί να απέχουν από τις πειραματικές $\pm 25\%$. Τέλος, οι Lof και Hawley συνιστούν για θερμική κλίση στερεών από γρανίτη, την εξίσωση:

$$h_s = 108.7 D_{pe}^{0.3} G_f^{0.7} \quad (W/m^2 \text{ } ^\circ C) \quad (3.24)$$

3. Ο συντελεστής της ενεργού θερμικής αγωγιμότητας της θερμικής κλίνης όταν δε διαρρέεται από ρευστό λ_e ($W/m^\circ C$)

Το θερμικό μέγεθος επεμβαίνει άμεσα

α. Στη θερμική στρωμάτωση μέσα στην κλίνη, η οποία λόγω ακριβώς της θερμικής αγωγιμότητας, τείνει να αποκτήσει ομοιόμορφη θερμοκρασία.

β. Στη θερμική αποφόρτιση της κλίνης προς το περιβάλλον, όταν αποφορτιζόμενα τα εξωτερικά στρώματα, μεταφέρεται θερμότητα προς αυτά από τα εσωτερικά, ανάλογη με τη θερμική αγωγιμότητα της κλίνης. Υπάρχουν πολλές θεωρητικές και πειραματικές μελέτες που περιγράφουν το φαινόμενο και υπολογίζουν την λ_e σε υψηλές θερμοκρασίες, δηλαδή λαμβάνουν υπόψη και την ακτινοβολία των στερεών της κλίνης, ή σε χαμηλές θερμοκρασίες όπου ο παράγοντας αυτός παραλείπεται. Η εξίσωση των Wakao και Kato, η οποία στηρίζεται σε πειραματικά και θεωρητικά δεδομένα, είναι η παρακάτω:

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_f} = \left(\frac{\lambda_e}{\lambda_\phi} \right)_{Nu=0} + 0.707 (Nu)^{0.96} \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_f} \right)^{1.11} \quad (3.25)$$

όπου είναι

λ_f ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ρευστού σε $W/m^\circ C$

$Nu = \frac{h_r D_{pe}}{\lambda_s}$ ο τροποποιημένος αριθμός Nusselt για ακτινοβολία

h_r ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς λόγω ακτινοβολίας σε $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ και

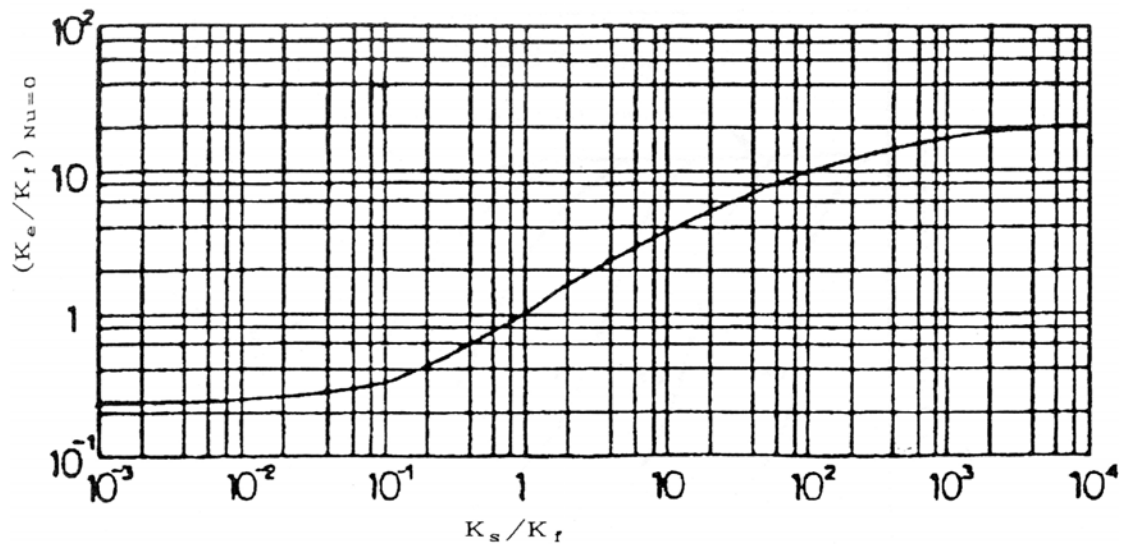
λ_s ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των στερεών σε $W/m^\circ C$

Η εξίσωση ισχύει όταν $20 \leq \frac{\lambda_s}{\lambda_f} \leq 1000$ και $0 \leq Nu \leq 0.3$ ή όταν $10 \leq \frac{\lambda_s}{\lambda_f} \leq 500$ και

$0 \leq Nu \leq 0.1$.

Ο λόγος $\left(\frac{\lambda_e}{\lambda_f} \right)_{Nu=0}$ έχει υπολογιστεί από τους Wakao και Kato και δίνεται ως

συνάρτηση του λόγου λ_s/λ_f στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3

Ο λόγος $\left(\frac{\lambda_e}{\lambda_f}\right)_{Nu=0}$ ως συνάρτηση του λόγου λ_s/λ_f

Τέλος, ο h_r δίνεται από τη σχέση:

$$h_r = \frac{0.227}{\frac{2}{\varepsilon} - 0,264} \left(\frac{273 + \bar{T}}{100} \right)^3 \quad (W/m^2 \cdot ^\circ C) \quad (3.26)$$

ε είναι ο συντελεστής εκπομπής των στερεών της θερμικής κλίνης

\bar{T} η μέση επιφανειακή θερμοκρασία των στερεών σε $^\circ C$

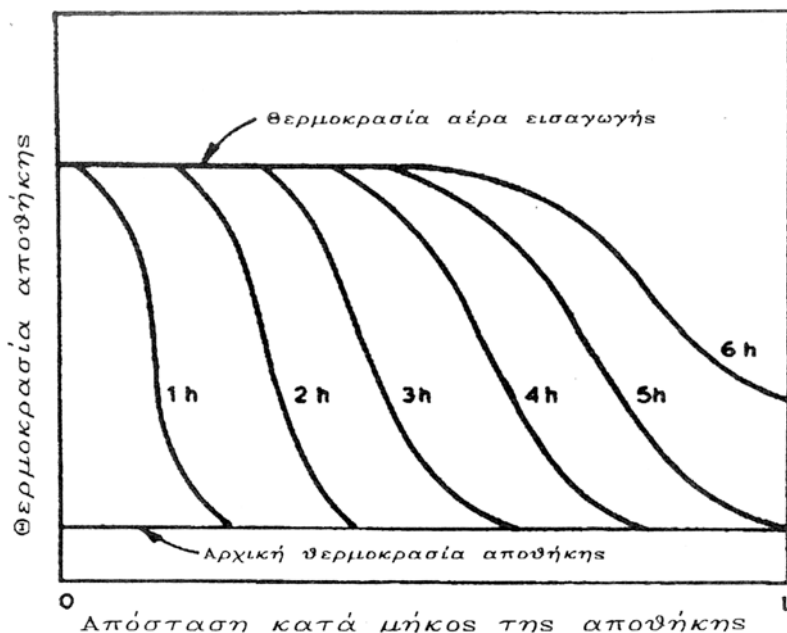
3.2.1 Η Θερμική Διαδικασία

Ο μηχανισμός με τον οποίο μεταφέρεται θερμότητα από το ρευστό στα στερεά που απαρτίζουν τη θερμική κλίνη, είναι δύσκολο να περιγραφεί φυσικά και μαθηματικά και εξαρτάται από:

- ▷ Τη θερμική αγωγή εντός και μεταξύ των στερεών
- ▷ Την ακτινοβολία των στερεών
- ▷ Τη ροή που ακολουθεί το ρευστό ανάμεσα στα στερεά

Μακροσκοπικά, εκείνο που παρατηρείται όταν θερμός αέρας περνά μέσα από μία ψυχρή θερμική κλίνη με ομοιόμορφη θερμοκρασία, είναι μία αύξηση της θερμοκρασίας των στρωμάτων των στερεών που βρίσκονται κοντά στην είσοδο του αέρα και βαθμιαία, με μια χρονική υστέρηση, αύξηση της θερμοκρασίας των

στρωμάτων που βρίσκονται προς την έξοδο του αέρα. Η θερμική κλίνη θεωρείται φορτισμένη, όταν υπάρχει ομοιόμορφη υψηλή θερμοκρασία σε όλο το σώμα των στερεών ίση με τη θερμοκρασία του θερμού εισερχόμενου αέρα. Μία εικόνα αυτής της φόρτισης δείχνει το σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4
Φόρτιση της θερμικής κλίνης

Στο σχήμα 3.4 υποτίθεται ότι η θερμοκρασία εισόδου του αέρα είναι σταθερή. Σε πραγματικές συνθήκες στις ηλιακές εφαρμογές αυτό, βέβαια, δεν είναι πραγματικό και οι καμπύλες φόρτισης-αποφόρτισης γίνονται εξαιρετικά πολύπλοκες. Η πρώτη μαθηματική έκφραση αυτού του φαινομένου δόθηκε από τον Schumann και ονομάστηκε μοντέλο Schumann, με τις παρακάτω προϋποθέσεις που πρέπει να ισχύουν για τη θερμική κλίνη:

- Άπειρη θερμική αγωγιμότητα των στερεών σε κάθε κατεύθυνση κάθετη προς τη διεύθυνση ροής του ρευστού
- Μηδενική θερμική αγωγιμότητα των στερεών κατά τη διεύθυνση της ροής
- Καμία θερμική απώλεια προς το περιβάλλον
- Οι ιδιότητες της κλίνης διατηρούνται σταθερές
- Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ στερεών και αέρα είναι ομοιόμορφος
- Μονοδιάστατη κίνηση του ρευστού
- Ομοιόμορφη αρχική θερμοκρασία της κλίνης
- Μηδενική μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Υπό τις προϋποθέσεις αυτές, οι διαφορικές εξισώσεις για τη θερμική κλίνη είναι:

$$\rho_f C_{pf} \varepsilon \frac{\theta T_f}{\theta t} = -\frac{m_f C_{pf}}{A} X \frac{\theta T_f}{\theta x} + h_v (T_b - T_f) \quad (3.27)$$

$$\rho_b C_{pb} (1 - \varepsilon) \frac{\theta T_b}{\theta t} = h_v (T_f - T_b) \quad (3.28)$$

όπου C_{pf} η ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού, T_f η θερμοκρασία του ρευστού, t ο χρόνος, m_f το μέτρο της ροής του ρευστού, x το μήκος, T_b η θερμοκρασία των στερεών της κλίνης και ε ο συντελεστής εκπομπής των στερεών της κλίνης.

Εάν το ρευστό είναι αέρας, ο όρος $\rho_f C_{pf} \varepsilon (\theta T_f / \theta t)$ στην εξίσωση 3.27 μπορεί να αγνοηθεί. Επίσης, εάν είναι

NTU ο αριθμός των μεταφερόμενων μονάδων $NTU = h_v AL / m_f C_{pf}$

Θ ο αδιάστατος χρόνος $\Theta = tm_f C_{pf} / \rho_f C_{pf} (1 - \varepsilon) AL$

οι εξισώσεις 3.27 και 3.28 μετατρέπονται ως εξής:

$$\frac{\theta T_f}{\theta(x/L)} = NTU (T_b - T_f) \quad (3.29)$$

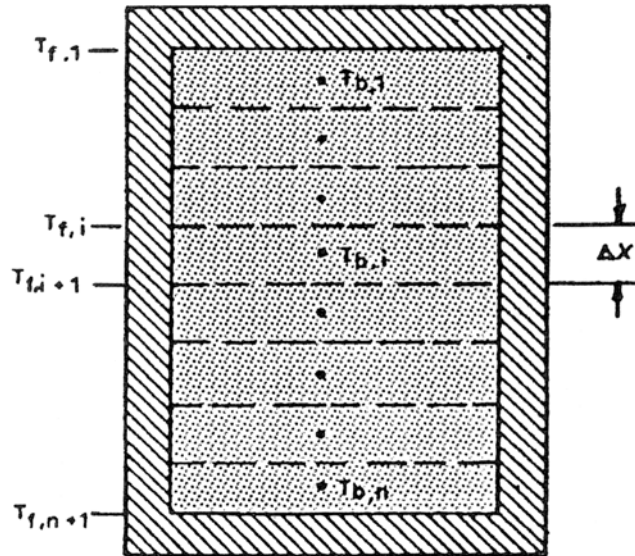
$$\frac{\theta T_b}{\theta \Theta} = NTU (T_f - T_b) \quad (3.30)$$

Για τις ηλιακές εφαρμογές, που η επαναληπτική διαδικασία γίνεται πολλές φορές το χρόνο, οι εξισώσεις αυτές δεν είναι χρήσιμες. Έτσι, έχουν παρουσιασθεί πολλές αριθμητικές λύσεις από πολλούς μελετητές. Εδώ, υιοθετείται η μέθοδος που παρουσίασαν οι Hughes και οι Mumma-Marvin και δέχονται οι Duffie και Beckman. Ας θεωρήσουμε τη θερμική κλίνη του σχήματος 3.5 χωρισμένη σε N τμήματα. Εάν η θερμοκρασία του εισερχόμενου στο τμήμα i αέρα είναι $T_{f,i}$ και $T_{f,i+1}$ είναι η θερμοκρασία του εξερχόμενου από το τμήμα αέρα, τότε η εξίσωση των θερμοκρασιών μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\frac{T_{f,i+1} - T_{b,i}}{T_{f,i} - T_{b,i}} = e^{-NTU(\Delta x/L)} \quad (3.31)$$

Η παραπάνω εξίσωση ισχύει όταν η θερμοκρασία του τμήματος θεωρηθεί ομοιόμορφη. Η θερμότητα που μεταφέρεται από τον αέρα στα στερεά, στο τμήμα με μήκος Δx είναι $m_f C_{pf} (T_{f,i} - T_{f,i+1})$. Αντικαθιστώντας τη θερμοκρασία $T_{f,i+1}$ από τη σχέση 3.31 έχουμε:

$$m_f C_{pf} (T_{f,i} - T_{f,i+1}) = m_f C_{pf} (T_{f,i} - T_{b,i}) \cdot (1 - e^{-NTU/N}) \quad (3.32)$$



Σχήμα 3.5
Θερμική κλίση χωρισμένη σε N τμήματα

Το ενεργειακό ισοζύγιο των στερεών του τμήματος i μπορεί τότε να γραφτεί

$$\frac{dT_{b,i}}{d\Theta} = nN(T_{f,i} - T_{b,i}) \quad (3.33)$$

όπου $n = 1 - e^{-NTU/N}$

Η εξίσωση 3.33 μπορεί να εφαρμοσθεί στα N τμήματα της θερμικής κλίσης και μπορεί να ξαναγραφεί για να εισαχθούν σ' αυτή και οι απώλειες του περιβάλλοντος, ως εξής:

$$\frac{dT_{b,i}}{d\Theta} = nN(T_{f,i} - T_{b,i}) + \frac{(U\Delta A)}{m_f C_{pf}} (T_a' - T_{b,i}) \quad (3.34)$$

όπου είναι T_a' η θερμοκρασία του αέρα γύρω από την κλίση, $(U\Delta A)_i$ το γινόμενο της επιφάνειας της κλίσης επί τον συντελεστή θερμοδιαπερατότητας του δοχείου που την περιέχει.

Σύμφωνα με την προσέγγιση των Crank-Nicolson, η παράγωγος $\frac{dT_{b,i}}{d\Theta}$ μπορεί να

αντικατασταθεί με την ποσότητα $\frac{(T_{b,i}^+ - T_{b,i})}{\Delta\Theta}$, η θερμοκρασία $T_{b,i}$ με την ποσότητα

$\frac{(T_{b,i}^+ + T_{b,i})}{2}$, η θερμοκρασία του αέρα $T_{f,i}$ και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος T_a' με

τις μέσες τιμές τους στο χρόνο $\Delta\Theta$. Έτσι, η εξίσωση 3.34 μπορεί να ξαναγραφεί ως:

$$\frac{T_{b,i}^+ - T_{b,i}}{\Delta\Theta} = nN \left(\bar{T}_{f,i} - \frac{T_{b,i}^+ + T_{b,i}}{2} \right) + \frac{(U\Delta A)_i}{m_f C_{pf}} \left(\bar{T}_a - \frac{T_{b,i}^+ + T_{b,i}}{2} \right) \quad (3.35)$$

Από τη σχέση 3.35 μπορούμε να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία της κλίνης μετά από χρόνο $\Delta\Theta$, $T_{b,i}^+$, όταν είναι γνωστές οι μέσες τιμές των $T_{f,i}$ και T_a' , η αρχική θερμοκρασία της κλίνης στο τμήμα i , $T_{b,i}$ και οι σταθερές που είναι χαρακτηριστικές του είδους της κλίνης. Έτσι, υπολογίζεται η καινούρια θερμοκρασία της κλίνης $T_{b,i}^+$ μετά από χρόνο $\Delta\Theta$ και από αυτήν η $T_{f,i+1}^+$, δηλαδή η θερμοκρασία στην έξοδο του τμήματος i μετά από χρόνο $\Delta\Theta$ από την εξίσωση 3.31. Ο υπολογισμός, φυσικά, αρχίζει από το τμήμα 1 με δεδομένες τις αρχικές θερμοκρασίες $T_{f,1}$, T_a' , τις θερμοκρασίες μετά από χρόνο $\Delta\Theta$, $T_{f,1}^+$, $T_a'^+$ και την αρχική θερμοκρασία της κλίνης $T_{b,1}$. Από τη σχέση 3.31 υπολογίζεται η αρχική θερμοκρασία $T_{f,2}$, η νέα θερμοκρασία του τμήματος 1 μετά από χρόνο $\Delta\Theta$, $T_{b,1}^+$ από τη σχέση 3.35 και η θερμοκρασία του αέρα όταν εγκαταλείπει το πρώτο τμήμα και μετά από χρόνο $\Delta\Theta$, $T_{f,2}^+$, πάλι από τη σχέση 3.31 και ούτω καθεξής. Οι θερμοκρασίες $T_{f,2}$ και $T_{f,2}^+$ αποτελούν τις θερμοκρασίες εισόδου του αέρα για το τμήμα 2. Ο υπολογισμός, έτσι, γίνεται βηματικά και το λάθος υπολογισμών γίνεται τόσο μικρότερο όσο περισσότερα είναι τα τμήματα που έχουμε χωρίσει την κλίνη και όσο μικρότερα είναι τα τμήματα χρόνου που αναφερόμαστε.

3.2.2 Βελτιστοποίηση του θερμικού στρώματος

Η απόδοση του θερμικού στρώματος σαν μέσο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας καθορίζεται από τις παραμέτρους που εξετάστηκαν παραπάνω, δηλαδή τα γεωμετρικά, τα φυσικά και τα θερμικά χαρακτηριστικά. Πέραν αυτών, υπάρχουν ορισμένες άλλες μεταβλητές όπως η αρχική κατάσταση του στρώματος κατά τη διάρκεια της φόρτισης ή της εκφόρτισής του, η θερμοκρασία εισαγωγής του ρευστού και η διάρκεια της αποθήκευσης.

Γενικά, το συνολικό θερμικό φορτίο που μπορεί να αποθηκεύσει ένα θερμικό στρώμα Q_T , μπορεί να εκφρασθεί σαν συνάρτηση των παραπάνω μεταβλητών:

$$Q_T = Q_T [L, G_f, D_{pe}, h_s, t, T_{si}, T_{fi}, \varepsilon, \rho_p, \rho_f, C_{pf}, C_{pb}, (UA)_s, T_a'] \quad (3.36)$$

όπου t ο χρόνος φόρτισης ή εκφόρτισης της αποθήκης, $T_{s,i}$ η αρχική θερμοκρασία του στρώματος, $T_{f,i}$ η αρχική θερμοκρασία του ρευστού, ρ_p η πυκνότητα του υλικού του στρώματος, $(UA)_s$ οι θερμικές απώλειες του στρώματος ανά °C και T_a' η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Οι μεταβλητές, όπως είναι φανερό, είναι πολλές και η προσπάθεια για βελτιστοποίηση είναι πολύ δύσκολη. Έτσι, κάθε φορά πρέπει να ορισθεί ποιες μεταβλητές θεωρούνται σταθερές, δεδομένες και ποιες μπορούν να μεταβάλλονται. Συνήθως, δεδομένες είναι οι παρακάτω μεταβλητές:

- Η θερμοκρασία T_a' του περιβάλλοντος της αποθήκης
- Ο συντελεστής $(UA)_s$

- Η αρχική θερμοκρασία του στρώματος $T_{s,i}$
- Η αρχική θερμοκρασία του ρευστού $T_{f,i}$
- Ο χρόνος φόρτισης ή εκφόρτισης t
- Το ρευστό και οι ιδιότητές του
- Τα στερεά και οι ιδιότητές τους

Γνωρίζοντας τις παραπάνω μεταβλητές και υπολογίζοντας τον επιφανειακό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από τα δεδομένα στοιχεία, οι εναπομένουσες μεταβλητές είναι το μήκος L και το μέτρο ροής μάζας του ρευστού G_f .

Οι παραπάνω μεταβλητές L , G_f , μπορούν βέβαια να μεταβάλλονται μέσα σε καθορισμένα, από ορισμένους περιορισμούς, όρια και για κάθε ζεύγος L , G_f θα μπορούμε να υπολογίσουμε και να μεγιστοποιήσουμε δύο ποσότητες που αποτελούν κατά τους Schmidt και Willmott κριτήρια βελτιστοποίησης της θερμικής κλίνης στερεών.

Η πρώτη είναι ο λόγος της θερμότητας που αποθηκεύτηκε κατά τη θερμική διαδικασία στα στερεά, προς τη διαθέσιμη θερμότητα στο εισερχόμενο ρευστό A^+ .

$$A^+ = \frac{Q_T}{AG_f t C_{pf} (T_{f,i} - T_{s,i})} \quad (3.37)$$

Η δεύτερη είναι ο λόγος της θερμότητας που αποθηκεύτηκε προς εκείνη που θα είχε αποθηκευτεί, αν η θερμική κλίνη είχε φθάσει σε ομοιόμορφη θερμοκρασία, ίση με τη θερμοκρασία του εισερχόμενου ρευστού.

$$Q_t^+ = \frac{Q_T}{\rho_p C_{pb} AL(1 - \varepsilon)(T_{f,i} - T_{s,i})} \quad (3.38)$$

Είναι προφανές ότι όσο το A^+ ή και το Q_t^+ πλησιάζει προς τη μονάδα, τόσο βελτιώνεται η απόδοση του στρώματος.

Πολλά πειράματα έχουν γίνει, είτε μεταβάλλοντας τις ποσότητες L , G_f που εδώ θεωρούνται ανεξάρτητες μεταβλητές, είτε μεταβάλλοντας ακόμα και τις υπόλοιπες μεταβλητές που θεωρήθηκαν σταθερές. Για κάθε τέτοια μεταβολή, ορίζεται και η αντίστοιχη μεταβολή A^+ και Q_t^+ , για τα οποία πρέπει να σημειωθεί ότι η μεγιστοποίηση του ενός δε συνεπάγεται και τη μεγιστοποίηση του άλλου.

3.2.3 Οικονομική Θεώρηση

Το κόστος του στερεού, συνήθως σε μορφή θωρακισμένου αμμοχάλικου, ποικίλει από περιοχή σε περιοχή αλλά εμπίπτει περίπου μεταξύ 3 και 10 δολαρίων ανά τόνο (αξία δολαρίου το 1980). Συνήθως, επειδή υπάρχουν διάφορα είδη και μεγέθη στερεών, κατά τον προκαταρκτικό σχεδιασμό γίνεται μελέτη και επιλογή του στερεού που θα χρησιμοποιηθεί.

Το κόστος της θερμικής κλίνης ποικίλει και αυτό, ανάλογα με την περιοχή και το σχεδιασμό. Γενικά, η θερμική κλίνη από ξύλο είναι η πιο φθηνή, ενώ οι κλίνες από τσιμέντο είναι οι πιο ακριβές. Το κόστος ανά μονάδα όγκου ελαττώνεται όσο ο όγκος αυξάνεται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

4.1 Γενικά

Με τον όρο θερμοχημικά συστήματα, αναφερόμαστε σε συστήματα τα οποία αποθηκεύουν την ηλιακή θερμική ενέργεια ως θερμότητα χημικής αντίδρασης, δηλαδή ως **ενέργεια χημικών δεσμών**. Το πιο βασικό κριτήριο για την επιλογή μιας αμφίδρομης χημικής αντίδρασης είναι οι τιμές της σταθεράς ισορροπίας και των σταθερών ταχύτητας στη θερμοκρασία αποθήκευσης. Και οι δύο αυτές παράμετροι θα πρέπει να έχουν υψηλές τιμές προς την κατεύθυνση της ενδόθερμης αντίδρασης, έτσι που να εξασφαλίζεται ταχύτατη και πλήρης απορρόφηση της ηλιακής θερμότητας. Επιπλέον, η αντίστροφη αντίδραση που οδηγεί στην παραλαβή της θερμότητας πρέπει να έχει ικανοποιητική απόδοση σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

Τα συστήματα αποθήκευσης που χρησιμοποιούν κάποια χημική αντίδραση ονομάζονται θερμοχημικά συστήματα (thermochemical systems). Αυτά παρουσιάζουν ορισμένα ειδικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τα συστήματα που στηρίζονται στις μεθόδους που αναπτύχθηκαν προηγούμενα, τα οποία είναι τα εξής:

- Υψηλές τιμές πυκνοτήτων ενέργειας
- Δυνατότητα αποθήκευσης σε θερμοκρασία δωματίου
- Εξαιρετικά μεγάλους χρόνους αποθήκευσης
- Δυνατότητα μεταφοράς της ενέργειας
- Δυνατότητα λειτουργίας ως αντλιών θερμότητας (heat pumps)
- Χαμηλό ενεργειακό κόστος (energy related costs)

4.1.1 Πυκνότητες Ενέργειας

Τα θερμοχημικά συστήματα αποθήκευσης συνδέονται με πυκνότητες ενεργειών που έχουν τιμές από 2 έως 10 φορές μεγαλύτερες από εκείνες συστημάτων που βασίζονται στις προηγούμενες μεθόδους. Στον πίνακα 4.1 παρέχονται τιμές πυκνοτήτων ενέργειας σε $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ και σε $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ για συστήματα αποθήκευσης, τυπικά κάθε μεθόδου. Παρατηρούμε ότι οι πυκνότητες ενέργειας παίρνουν πολύ μεγάλες τιμές στην περίπτωση της θερμοχημικής αποθήκευσης. Παρατηρούμε, επίσης, ότι τα συστήματα αποθήκευσης που βασίζονται στη θέρμανση του H_2O έχουν πολύ μικρές πυκνότητες ενέργειας.

Πίνακας 4.1
Τιμές πυκνοτήτων ενέργειας για τυπικά συστήματα διαφόρων μεθόδων αποθήκευσης

Σύστημα αποθήκευσης	Πυκνότητα Ενέργειας $\text{kJ}/\text{kgr}^{-1}$	Πυκνότητα Ενέργειας kJ/m^3
Θέρμανση H_2O (ανύψωση θερμοκρασίας κατά 50°C)	209	$209\cdot 10^3$

“Τήξη” $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	355	$552 \cdot 10^3$
Διάλυση H_2SO_4 στο H_2O	230	$327 \cdot 10^3$
Προσρόφηση H_2O σε ζεολίθους 13X	1370	$823 \cdot 10^3$
Θερμοχημική αποθήκευση $NH_4Br(g) \begin{matrix} \rightarrow \\ \leftarrow \end{matrix} NH_{3(g)} + HBr(g)$	1910	$5.540 \cdot 10^3$

4.1.2 Αποθήκευση σε χαμηλές θερμοκρασίες

Τα θερμοχημικά συστήματα έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης ηλιακής θερμικής ενέργειας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό σημαίνει πως τόσο οι αντιδρώσες ουσίες όσο και τα προϊόντα μπορούν, αφού ψυχθούν, να αποθηκευτούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η δυνατότητα αυτή έχει πολλές ευνοϊκές επιπτώσεις, οι οποίες είναι οι εξής:

- Οι χημικές αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στις χημικές ουσίες αποθήκευσης και στις επιφάνειες των χρησιμοποιούμενων δοχείων αποφεύγονται. Συνεπώς, δεν απαιτούνται ειδικά, ανθεκτικά στη διάβρωση, υλικά για την κατασκευή των δοχείων.
- Δεν απαιτούνται πρόσθετα συστήματα θερμικής μόνωσης.
- Αποφεύγονται απώλειες θερμότητας.

4.1.3 Χρόνος αποθήκευσης

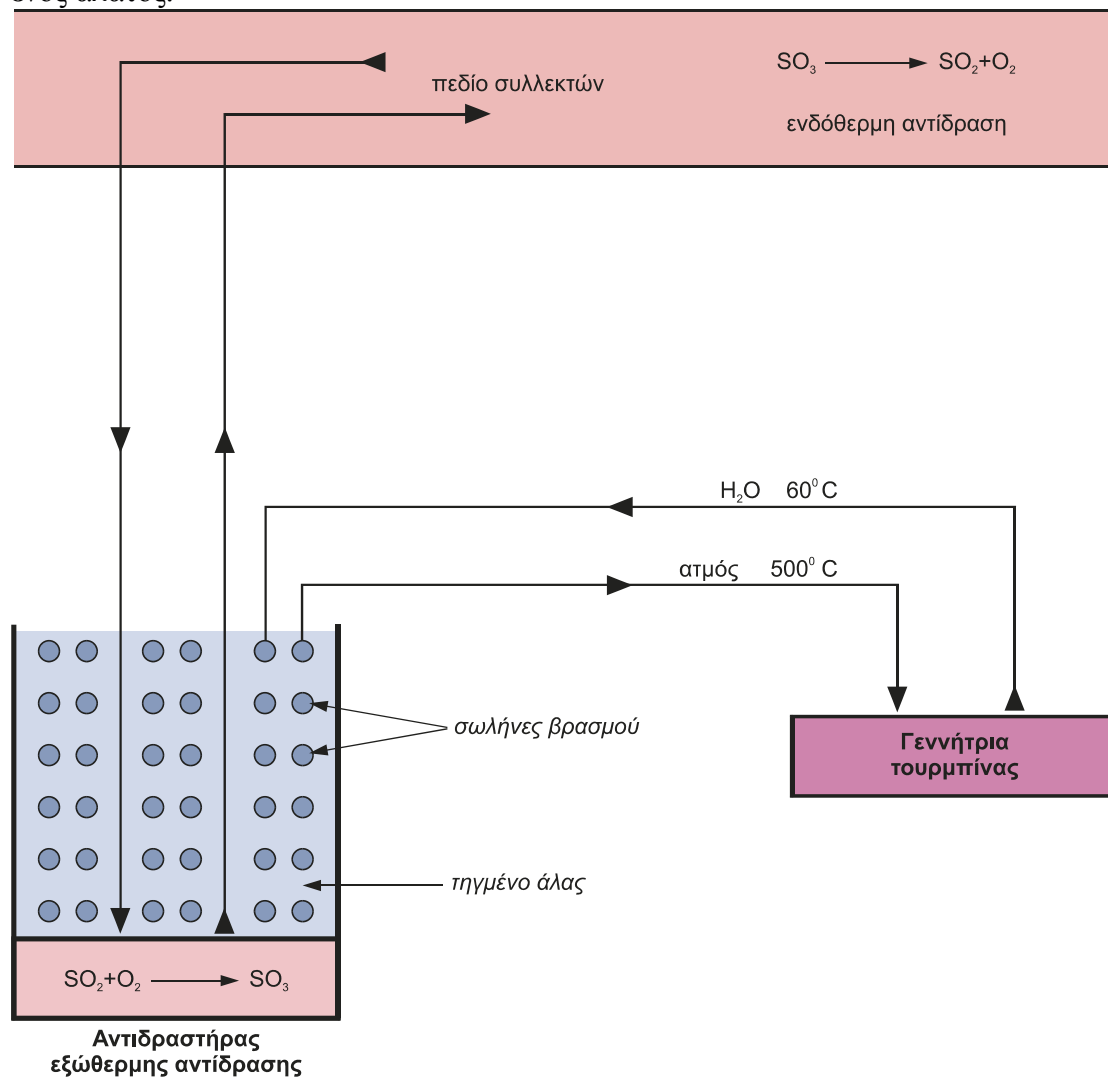
Η δυνατότητα αποθήκευσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος συνδέεται με τη δυνατότητα μακρών χρόνων αποθήκευσης. Αυτό συνεπάγεται πως εποχιακή (seasonal) ή και ετήσια αποθήκευση είναι εφικτή.

4.1.4 Μεταφορά θερμότητας

Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής χημικών αντιδράσεων, τέτοιων ώστε οι αντιδρώσες ουσίες όσο και τα προϊόντα να μεταφέρονται αρκετά εύκολα σε μεγάλες αποστάσεις. Αυτό δίνει τη δυνατότητα φυσικού διαχωρισμού των αντιδραστών στους οποίους γίνονται οι ενδόθερμες αντιδράσεις από αυτούς στους οποίους πραγματοποιούνται οι εξώθερμες. Έτσι, ενώ ο ενδόθερμος αντιδραστήρας μπορεί να βρίσκεται κοντά σε μια εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών, ο εξώθερμος μπορεί να βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από τον τόπο που απαιτείται θερμική ενέργεια. Τα παραπάνω δείχνουν ότι, αρχικά, τα θερμοχημικά συστήματα επιτρέπουν τη διανομή της ηλιακής θερμικής ενέργειας. Δείχνουν, επίσης, ότι όπως και τα συστήματα που βασίζονται στη διάλυση, και τα θερμοχημικά είναι συστήματα δύο δοχείων.

Στο σχήμα 4.1 εικονίζεται η χρησιμοποίηση του θερμοχημικού συστήματος $2SO_3 \begin{matrix} \rightarrow \\ \leftarrow \end{matrix} 2SO_2 + O_2$ (sol-chem system) που προτάθηκε από τον Chubb για τη μεταφορά της θερμικής ενέργειας από ένα πεδίο υψηλής συγκέντρωσης παραβολικών

συλλεκτών προς ένα σύστημα αποθήκευσης που χρησιμοποιεί τη θερμότητα τήξης ενός άλατος.

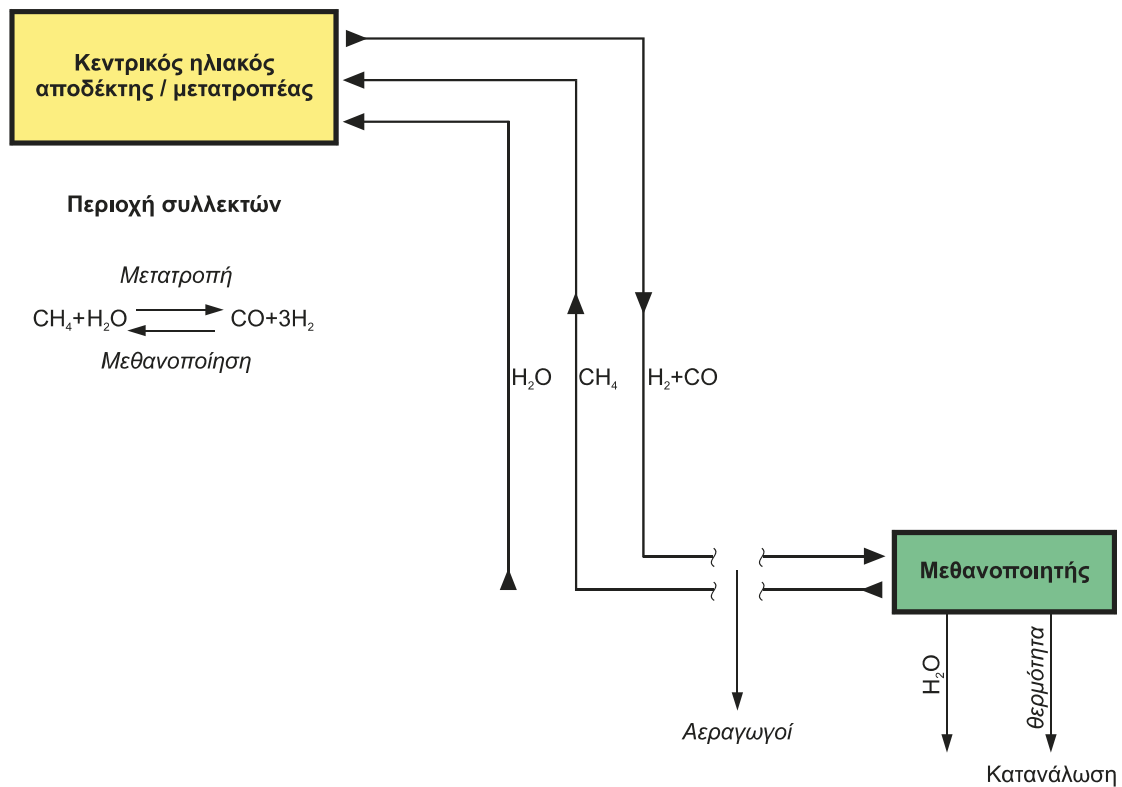


Σχήμα 4.1

Χρησιμοποίηση του θερμοχημικού συστήματος $2SO_3 \xrightleftharpoons{\quad} 2SO_2 + O_2$ για τη διανομή της ηλιακής θερμικής ενέργειας

Στο σχήμα 4.2 εικονίζεται ένα σύστημα υψηλής συγκέντρωσης ηλιακών συλλεκτών, από το οποίο παράγεται θερμότητα και όχι ηλεκτρισμός. Σε τέτοιου είδους συστήματα, οι θερμοχημικές αντιδράσεις χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της θερμικής ενέργειας από τον τόπο των συλλεκτών στον τόπο κατανάλωσής της.

Η ενδόθερμη αντίδραση της μετατροπής (reforming reaction) των CH_4 και H_2O προς CO και H_2 γίνεται με τη βοήθεια της ηλιακής θερμικής ενέργειας. Η αντίθετη αντίδραση της μεθανοποίησης (methanation reaction), η οποία γίνεται στον τόπο της κατανάλωσης χρησιμεύει για την παραλαβή θερμότητας.

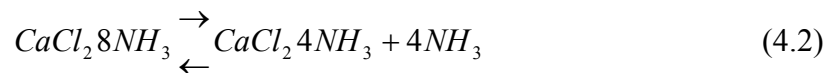
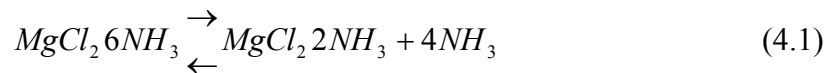


Σχήμα 4.2

Μεταφορά θερμικής ενέργειας από κεντρικό ηλιακό αποδέκτη προς την κατανάλωση χρησιμοποιώντας το θερμοχημικό σύστημα $CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3H_2$

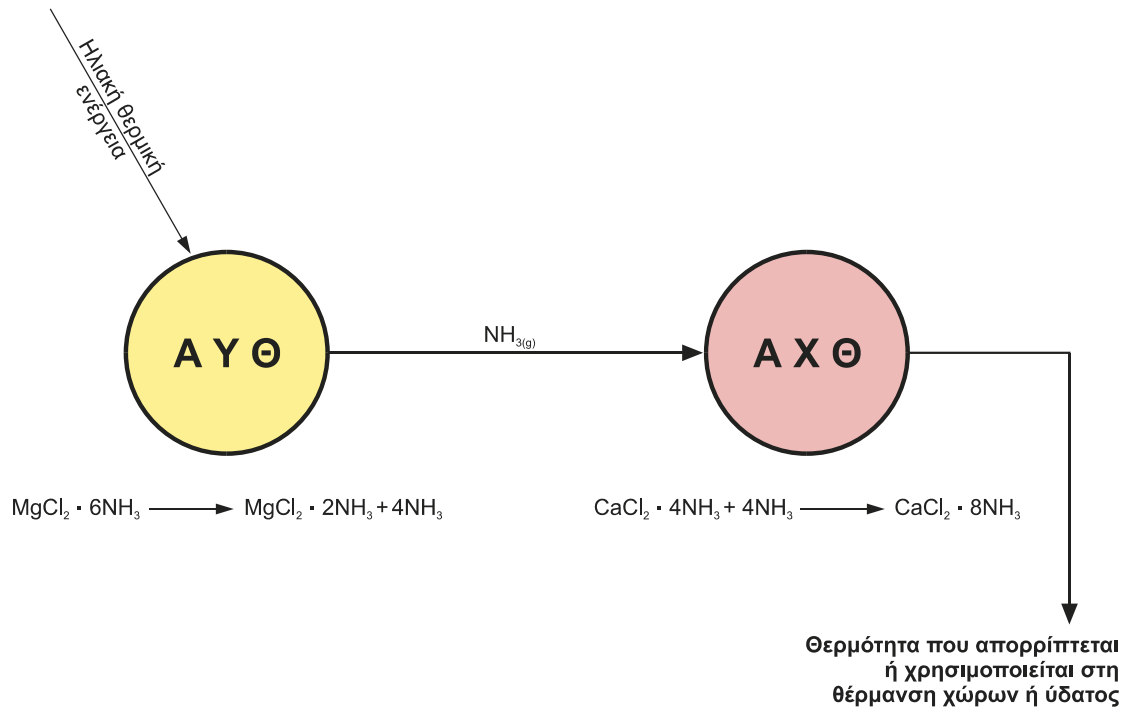
4.1.5 Αντλίες θερμότητας

Τα θερμοχημικά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή αντλιών θερμότητας, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση και για την ψύξη χώρων. Ας θεωρήσουμε μια αντλία θερμότητας για την κατασκευή της οποίας απαιτούνται δύο θερμοχημικά συστήματα με κοινό αέριο προϊόν, π.χ.



Οι αντιδράσεις πρέπει να επιλέγονται με τέτοιο τρόπο, ώστε η μία να πραγματοποιείται σε υψηλότερη θερμοκρασία από την άλλη. Εδώ, η πρώτη αντίδραση γίνεται σε υψηλότερη θερμοκρασία από τη δεύτερη. Κατά τη διάρκεια του κύκλου φόρτισης της αντλίας (σχήμα 4.3), η ηλιακή θερμική ενέργεια χρησιμοποιείται για τη διάσπαση του $MgCl_2 \cdot 6NH_3$ στον αντιδραστήρα υψηλής

θερμοκρασίας (Α.Υ.Θ.). Η διάσπαση μπορεί να γίνεται είτε με άμεση απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας, είτε με τη χρήση κάποιου αγωγού, ο οποίος μεταφέρει την ηλιακή θερμότητα.

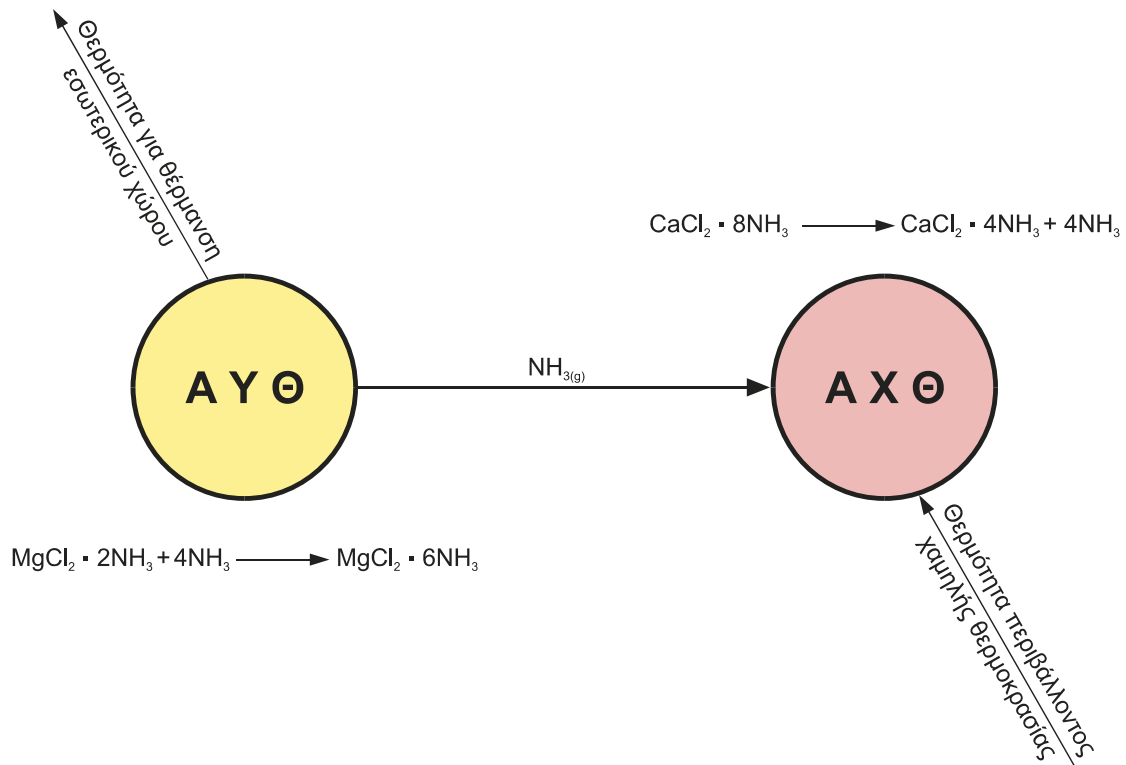


Σχήμα 4.3
Κύκλος φόρτισης της αντλίας θερμότητας

Η παραγόμενη αμμωνία αντιδρά εξώθερμα με το $CaCl_2 \cdot 4NH_3$ προς $CaCl_2 \cdot 8NH_3$ στον αντιδραστήρα χαμηλής θερμοκρασίας (Α.Χ.Θ.). Η θερμότητα που παράγεται στον αντιδραστήρα αυτόν μπορεί είτε να απορρίπτεται, είτε να χρησιμοποιείται για τη θέρμανση χώρων ή νερού.

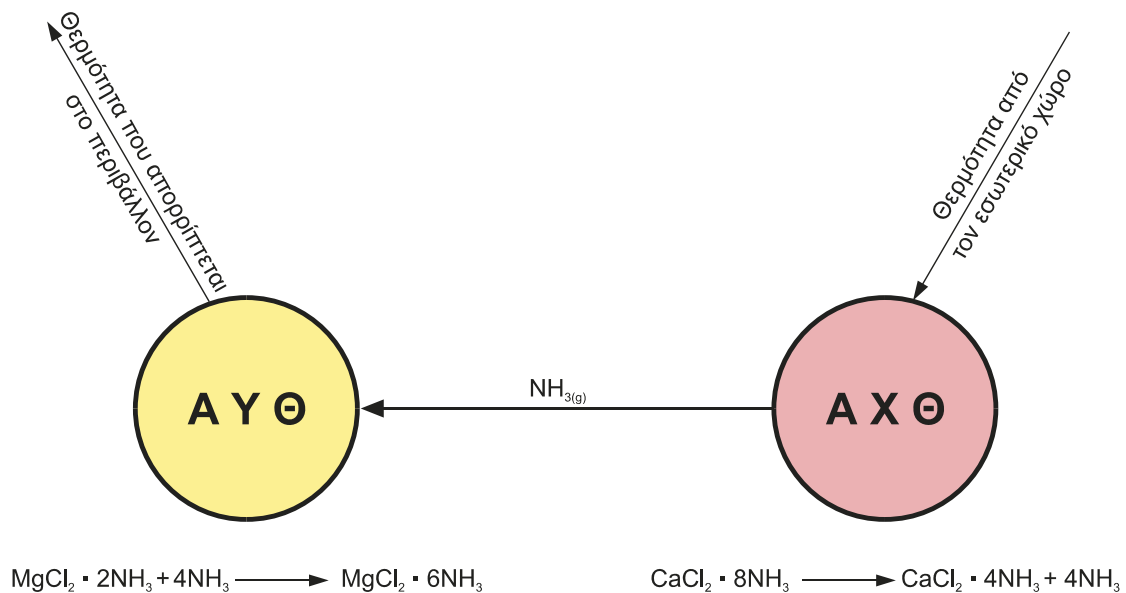
Υπάρχουν δύο τρόποι εκφόρτισης της αντλίας θερμότητας. Ο πρώτος (σχήμα 4.4), οδηγεί στη θέρμανση εσωτερικού χώρου.

Η απαιτούμενη θερμότητα προέρχεται από το περιβάλλον, το οποίο έχει στην περίπτωση αυτή σχετικά χαμηλή θερμοκρασία. Με τη βοήθεια της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, διεξάγεται η ενδόθερμη αντίδραση στον αντιδραστήρα χαμηλής θερμοκρασίας. Η παραγόμενη αμμωνία χρησιμοποιείται στον αντιδραστήρα υψηλής θερμοκρασίας. Εκεί, η αντίδραση που διεξάγεται είναι εξώθερμη.



Σχήμα 4.4
Κύκλος εκφόρτισης αντλίας θερμότητας που οδηγεί στη θέρμανση εσωτερικών χώρων

Ο δεύτερος τύπος εκφόρτισης οδηγεί στην ψύξη εσωτερικών χώρων (σχήμα 4.5)



Σχήμα 4.5
Κύκλος εκφόρτισης αντλίας εσωτερικών χώρων που οδηγεί στην ψύξη εσωτερικών χώρων

Στη διάταξη αυτή, η θερμότητα του εσωτερικού χώρου καταναλίσκεται για τη διεξαγωγή της διάσπασης $CaCl_2 \cdot 8NH_3$ προς $CaCl_2 \cdot 4NH_3$. Η παραγόμενη αμμωνία μεταφέρεται στον αντιδραστήρα υψηλής θερμοκρασίας, όπου επάγει την εξώθερμη αντίδραση του $MgCl_2 \cdot 2NH_3$ προς $MgCl_2 \cdot 6NH_3$. Η παραγόμενη θερμότητα απορρίπτεται στο περιβάλλον.

Με τη σύνδεση, συνεπώς, των δύο θερμικών συστημάτων έχουμε μεταφορά θερμότητας από τον εσωτερικό χώρο προς το περιβάλλον.

4.2 Κατηγορίες θερμοχημικών συστημάτων

Οι αντιδράσεις που συνήθως χρησιμοποιούνται στα θερμοχημικά συστήματα υπάγονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

1^η κατηγορία

- Αέριες αντιδράσεις (συνήθως καταλυόμενες)
- Θερμικές διασπάσεις του τύπου:
Στερεό I → Στερεό II + Αέριο ή Υγρό
- Διάφορες άλλες αντιδράσεις

2^η κατηγορία

- Θερμικές διασπάσεις υβριδίων
- Θερμικές διασπάσεις ανθρακικών αλάτων
- Θερμικές διασπάσεις θεικών αλάτων
- Αντιδράσεις απόσπασης NH_3
- Θερμικές διασπάσεις υδροξειδίων

4.2.1 Αέριες αντιδράσεις

Οι πιο σημαντικές αντιδράσεις που έχουν έως σήμερα προταθεί, καθώς και οι αντίστοιχες τιμές πυκνοτήτων ενέργειας παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2. Στον πίνακα αυτό αναγράφονται, επίσης και οι θερμοκρασίες στις οποίες επιτυγχάνεται απόδοση 10 και 90% ως προς την ενδόθερμη κατεύθυνση.

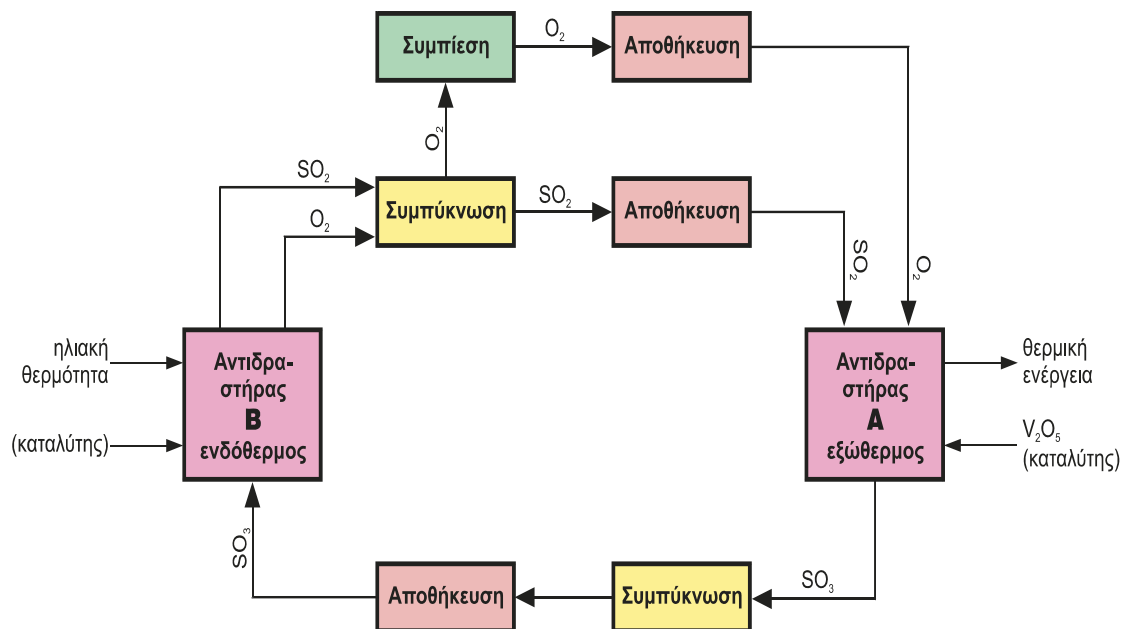
Πίνακας 4.2

Χημικές αντιδράσεις με τις αντίστοιχες πυκνότητες ενέργειας και θερμοκρασίες

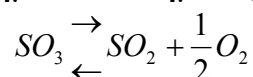
Χημική αντίδραση	Πυκνότητα ενέργειας		Θερμοκρασία (° K)	
	kJ/kg	kJ/m ³	Απόδοση 10%	Απόδοση 90%
$CO(g) + 3H_{2(g)} \rightleftharpoons CH_{4(g)} + H_2O_{(g)}$	6.053	306.000	754	1466
$C_2H_{4(g)} + H_{2(g)} \rightleftharpoons C_2H_{6(g)}$	4.561	559.000	841	1205

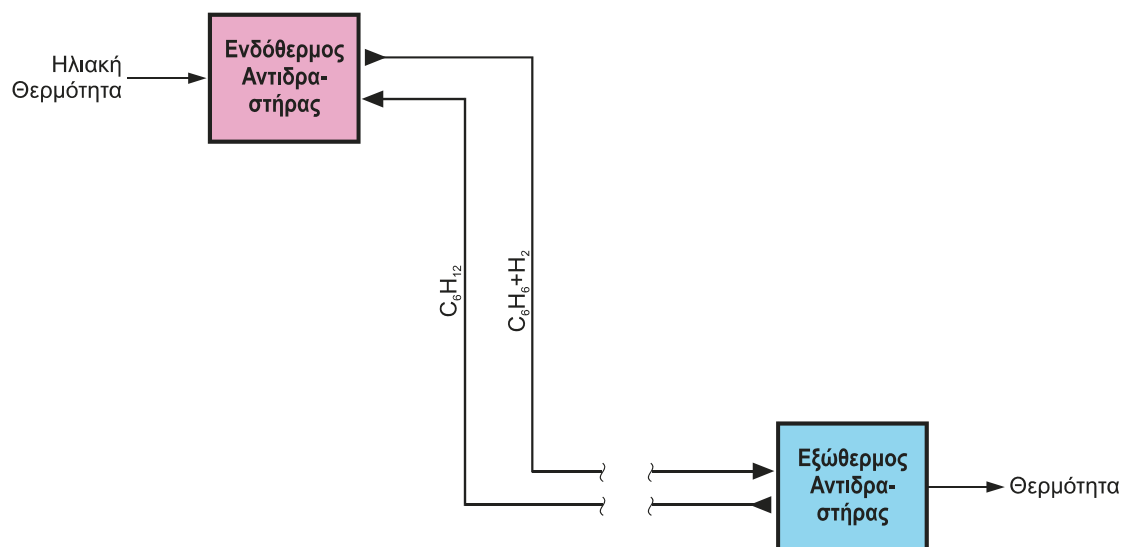
$SO_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightleftharpoons SO_{3(g)}$	1.235	794.000	792	1235
$2CO_{(g)} + 2H_{2(g)} \rightleftharpoons CH_{4(g)} + CO_{2(g)}$	4.118	362.000	778	1152
$H_{2(g)} + 3H_{2(g)} \rightleftharpoons 3NH_{3(g)}$	2.635	132.000	343	523
$NO_{(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightleftharpoons NO_{2(g)}$	1.240	257.001	543	330

Είναι προφανές ότι οι τιμές πυκνότητας ενέργειας που περιλαμβάνονται στον πίνακα ισχύουν για την προϋπόθεση ότι όλες οι ουσίες βρίσκονται στην αέρια φάση. Ωστόσο, ο πίνακας αυτός δεν μπορεί να θεωρηθεί πλήρης, καθώς προτείνονται συνεχώς καινούριες αντιδράσεις για την κατασκευή θερμοχημικών συστημάτων. Στα σχήματα 4.6 και 4.7 φαίνονται απλοποιημένες σχηματικές παραστάσεις συστημάτων αποθήκευσης και μεταφοράς ενέργειας, οι οποίες βασίζονται στις αντιδράσεις $SO_3 \rightleftharpoons SO_2 + \frac{1}{2}O_2$ και $C_6H_{12} \rightleftharpoons C_6H_6 + 3H_2$, αντίστοιχα.

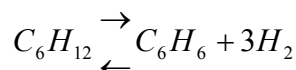


Σχήμα 4.6
Σχηματική παράσταση θερμοχημικού συστήματος που βασίζεται στην αντίδραση





Σχήμα 4.7
Χημικό σύστημα μεταφοράς θερμότητας που βασίζεται στην αντίδραση

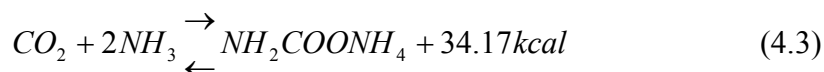


Οι περισσότερες αντιδράσεις του πίνακα 4.2 πραγματοποιούνται, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, σε καταλυτικούς αντιδραστήρες. Το γεγονός αυτό δημιουργεί ορισμένα προβλήματα, τα οποία σχετίζονται:

1. Με τη λειτουργία των αντιδραστήρων
 2. Με τους χρησιμοποιούμενους καταλύτες
 3. Με τη διάβρωση των συσκευών
1. Οι καταλυτικοί αντιδραστήρες λειτουργούν, συνήθως, κάτω από σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας, σύστασης εισόδου και σύστασης εξόδου. Αντιθέτως, η ηλιακή θερμική ενέργεια αυξομειώνεται με το χρόνο κατά τρόπο κυκλικό. Ωστόσο, οι επιδράσεις της κυκλικής μεταβολής της ηλιακής θερμικής ενέργειας στην αποτελεσματική λειτουργία των αντιδραστήρων και στη σταθερότητα των καταλυτών δεν έχουν επαρκώς μελετηθεί.
 2. Ορισμένες αντιδράσεις πραγματοποιούνται σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία, με αποτέλεσμα οι καταλύτες που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν να είναι ιδιαίτερα ακριβοί. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η έρευνα στο θέμα των καταλυτών για την κατανόηση του μηχανισμού των αντιδράσεων, που θα μπορούσε να οδηγήσει σε προβλέψεις αναφορικά με τη δραστηριότητα και το χρόνο ζωής των καταλυτών.
 3. Από τις αντιδράσεις που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2 μόνο η πρώτη παρουσιάζει σοβαρά προβλήματα διάβρωσης. Η έρευνα, συνεπώς, πρέπει να στραφεί προς την κατεύθυνση της ανάπτυξης καινούριων υλικών, ικανών να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες, πιέσεις και σε συνθήκες οξειδωσης και θείωσης.

4.2.2 Θερμοχημική απόληψη και αποθήκευση ενέργειας σε συστήματα του τύπου Στερεό I → Στερεό II + Q

Ένα σύστημα του είδους αυτού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε θερμοκρασίες από 80-120° C είναι αυτό που παρέχει η αντίδραση του CO₂ με NH₃ προς καρβαμιδικό αμμώνιο, αλλά και η θερμική διάσπαση του καρβαμιδικού αμμωνίου προς διοξείδιο του άνθρακα και αμμωνία.



Βέβαια, η αντίδραση αυτή, όταν πραγματοποιείται σε μεγάλες πιέσεις και θερμοκρασίες (μεγαλύτερες από 140° C), οδηγεί στο σχηματισμό ουρίας. Συνεπώς, η αντίδραση θα πρέπει να πραγματοποιείται αυστηρά στα πλαίσια των θερμοκρασιών που αναφέρθηκαν και σε ξηρό περιβάλλον. Το σύστημα αυτό παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα τα οποία είναι τα εξής:

- Οι πρώτες ύλες είναι πολύ φθηνές, προσιτές και διαθέσιμες σε μεγάλες ποσότητες.
- Η πυκνότητα ενέργειας είναι πολύ μεγάλη και ίση με 1005 kcal/kgNH₃ ή 777 kcal/kgCO₂. Αυτό, πρακτικά, σημαίνει ότι η ενέργεια που παράγεται από 4 kg CO₂ είναι ίση με αυτή που παράγεται από 1 kg λιγνίτη καλής ποιότητας.
- Η απόδοση της αντίδρασης (η οποία είναι συνάρτηση της παραγόμενης ενέργειας) είναι σημαντικά μεγάλη σε μια περιοχή θερμοκρασιών 80-110° C και πιέσεων 2407-9793 mmHg.
- Οι ταχύτητες σχηματισμού του καρβαμιδικού αμμωνίου στην περιοχή 80-110° C δίνουν μεγάλο ρυθμό παραγωγής θερμότητας.
- Ο ρυθμός διάσπασης του καρβαμιδικού αμμωνίου είναι πολύ ικανοποιητικός.

Στο σύστημα αυτό, ο διαχωρισμός των αερίων CO₂ και NH₃ κατά το στάδιο της αποθήκευσης γίνεται με υγροποίηση της αμμωνίας με συμπίεση ή εκλεκτική διάλυση της σε κατώτερες αλκοόλες. Με το σύστημα αυτό, το ποσό της ωφέλιμης ενέργειας εξαρτάται από την προέλευση του CO₂. Με τον όρο ωφέλιμη ενέργεια, θεωρούμε το % ποσοστό της ενέργειας που απομένει εάν αφαιρέσουμε το ποσοστό της ενέργειας που καταναλώθηκε για τη λειτουργία του συστήματος παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας.

	Κλειστό σύστημα (%)	Ανοικτό σύστημα	
		CO ₂ από αλκοολική ζύμωση (%)	CO ₂ από καυσαέριο (%)
με υγροποίηση NH ₃	56	65	15
με διάλυση NH ₃	86	95	46

Σημείωση: Όταν αναφερόμαστε σε **κλειστό κύκλωμα**, εννοούμε ότι η ίδια ποσότητα CO₂ και NH₃ χρησιμοποιείται σε όλους τους κύκλους λειτουργίας του συστήματος

και για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Στο **ανοικτό σύστημα**, κρατάμε μόνο την NH_3 στο κύκλωμα, ενώ το CO_2 απορρίπτεται μετά την πρώτη χρήση.

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, η ωφέλιμη ενέργεια εξαρτάται, επίσης, από τον τρόπο διαχωρισμού των αερίων, καθώς και από τον αν το σύστημα είναι ανοικτό ή κλειστό.

Σε ό,τι αφορά στον τρόπο διαχωρισμού, ο διαχωρισμός με διάλυση είναι αποδοτικότερος καθώς η ενέργεια που καταναλώνεται για τη λειτουργία του συστήματος είναι μικρότερη. Μεταξύ κλειστού και ανοικτού κυκλώματος, το ανοικτό δίνει περισσότερη ωφέλιμη ενέργεια επειδή δεν καταναλώνεται ενέργεια για τη δέσμευση του CO_2 . Το CO_2 που προέρχεται από τις βιομηχανίες ταχείας αλκοολικής ζύμωσης αποδίδει περισσότερη ωφέλιμη ενέργεια από το CO_2 των καυσαερίων των εργοστασίων. Στην περίπτωση που το CO_2 είναι προϊόν αλκοολικής ζύμωσης, ο διαχωρισμός της NH_3 από το CO_2 γίνεται με διάλυση της NH_3 και το CO_2 απορρίπτεται μετά την πρώτη χρήση. Όταν το CO_2 προέρχεται, όμως, από καυσαέρια εργοστασίων, ο διαχωρισμός γίνεται με υγροποίηση της NH_3 μετά από συμπίεση και το CO_2 απορρίπτεται σε ένα ανοικτό κύκλωμα.

4.2.3 Θερμοχημική απόληψη και αποθήκευση ενέργειας σε συστήματα του τύπου Στερεό I \rightarrow Στερεό II + Αέριο

Οι αντιδράσεις του τύπου αυτού παρουσιάζουν ορισμένα προβλήματα, τα οποία σχετίζονται με την κινητική των αντιδράσεων, με φαινόμενα εκτόνωσης καθώς και με τη μεταφορά θερμότητας.

- Κινητική των αντιδράσεων

Το κύριο πρόβλημα αναφορικά με την κινητική των αντιδράσεων είναι η έλλειψη πειραματικών πληροφοριών. Οι μελέτες, που έχουν διεξαχθεί, αφορούν ουσιαστικά μόνο σε ενδόθερμες διασπάσεις. Επίσης, οι μελέτες αυτές έχουν πραγματοποιηθεί κάτω από συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας οι οποίες διαφέρουν αρκετά από εκείνες στις οποίες λειτουργούν τα θερμοχημικά συστήματα. Στον τομέα αυτό, το πιο σημαντικό πρόβλημα είναι η επίδραση της ανακύκλωσης των ουσιών πάνω στην κινητική των αντιδράσεων. Έτσι, ενώ για τη μέτρηση των κινητικών παραμέτρων στις συνθήκες κινητικές μελέτες οι αντιδρώσες ουσίες χρησιμοποιούνται μία μόνο φορά και στη συνέχεια απορρίπτονται, τα θερμοχημικά συστήματα αποθήκευσης λειτουργούν με αντιδρώσες ουσίες, οι οποίες έχουν παραχθεί κατά τον προηγούμενο κύκλο από τα προϊόντα. Αυτό το γεγονός, όταν πρόκειται για στερεές ουσίες, μπορεί να έχει επιδράσεις στη δραστηρότητά τους (reactivity) και αυτό εξαιτίας διεργασιών συγκόλλησης (sintering) των στερεών σωματιδίων, που οδηγούν στη μείωση της ειδικής επιφάνειας. Η επίδραση της ανύψωσης πάνω στην κινητική της διάσπασης ή σχηματισμού των στερεών ουσιών εξαρτάται από τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας κάτω από τις οποίες γίνεται η αντίδραση. Πολύ συχνά, κατά τη διάρκεια των διαφόρων ανακυκλώσεων, παρατηρείται σημαντική αύξηση του όγκου του στερεού που μπορεί να φτάσει το 200%. Αυτό προκαλεί ορισμένες συνέπειες, όπως η συγκόλληση των σωματιδίων και η δημιουργία τάσεων.

- Μεταφορά θερμότητας

Ίσως το πιο σημαντικό πρόβλημα που παρουσιάζουν τα θερμοχημικά συστήματα αποθήκευσης που βασίζονται στις θερμικές διασπάσεις στερεών είναι η δυσκολία στη

μεταφορά θερμότητας από το στερεό προς αυτό. Αυτό συμβαίνει επειδή τα χρησιμοποιούμενα στερεά υλικά είναι πορώδη αλλά και επειδή, συνήθως, παρουσιάζουν μικρή θερμική αγωγιμότητα. Έτσι, δημιουργούνται προβλήματα που σχετίζονται με τις ταχύτητες προσφοράς και απόληψης θερμότητας. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, τα στερεά διαλύονται σε ορισμένα κατάλληλα υγρά.

Στον πίνακα 4.3, που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι πιο σημαντικές αντιδράσεις του τύπου Στερεό I → Στερεό II + Αέριο ή Υγρό, καθώς και οι αντίστοιχες τιμές πυκνότητας ενέργειας.

Πίνακας 4.3
Αντιδράσεις του τύπου Στερεό I → Στερεό II + Αέριο ή Υγρό και οι αντίστοιχες πυκνότητες ενέργειας

Χημική αντίδραση	Πυκνότητα Ενέργειας	
	kJ/kg	kJ/m ³
$Li_{(s)} + \frac{1}{2} H_{2(g)} \rightleftharpoons LiH_{(s)}$	11.403	897.000
$Mg_{(s)} + H_{2(g)} \rightleftharpoons MgH_{2(s)}$	2.893	204.000
$KF_{(s)} + HF_{(l)} \rightleftharpoons KHF_{2(s)}$	1.031	1.813.000
$NaF_{(s)} + HF_{(l)} \rightleftharpoons NaHF_{2(s)}$	832	1.431.000
$BaO_{(s)} + H_2O_{(l)} \rightleftharpoons Ba(OH)_{2(s)}$	598	2.283.000
$MgO_{(s)} + H_2O_{(l)} \rightleftharpoons Mg(OH)_{2(s)}$	644	1.280.000
$CaO_{(s)} + H_2O_{(l)} \rightleftharpoons Ca(OH)_{2(s)}$	880	1.861.000
$Li_2O_{(s)} + CO_{2(g)} \rightleftharpoons Li_2CO_{3(s)}$	3.029	2.899.000
$Na_2O_{(s)} + CO_{2(g)} \rightleftharpoons Na_2CO_{3(s)}$	3.014	3.548.000
$CaO_{(s)} + CO_{2(g)} \rightleftharpoons CaCO_{3(s)}$	1.776	2.239.000
$MgO_{(s)} + CO_{2(g)} \rightleftharpoons MgCO_{3(s)}$	1.387	1.576.000
$BaO_{(s)} + CO_{2(g)} \rightleftharpoons BaCO_{3(s)}$	1.353	2.976.000

$CaO_{(s)} + SO_{3(l)} \rightleftharpoons CaSO_{4(s)}$	2.539	5.821.000
$NiCl_{2(s)} + 6NH_{3(l)} \rightleftharpoons [Ni(NH_3)_6] \cdot Cl_{2(s)}$	1.347	1.515.000
$FeCl_{2(s)} + 6NH_{3(l)} \rightleftharpoons [Fe(NH_3)_6] \cdot Cl_{2(s)}$	302	326.000
$CaCl_{2(s)} + 6NH_{3(l)} \rightleftharpoons [Ca(NH_3)_6] \cdot Cl_{2(s)}$	210	202.000
$[Ni(NH_3)_2]Cl_{2(s)} + 4NH_{3(l)} \rightleftharpoons [Ni(NH_3)_6]Cl_{2(s)}$	1.048	-

4.2.4 Φωτοχημική μετατροπή και αποθήκευση ηλιακής ενέργειας

4.2.4.1 Κριτήρια για την επιλογή συστήματος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για φωτοχημική μετατροπή της ηλιακής ενέργειας

Τα συστήματα που θα επιλεγθούν πρέπει να πληρούν ορισμένες προϋποθέσεις, οι οποίες είναι οι παρακάτω:

1. Το σύστημα πρέπει να έχει ικανότητα απορρόφησης του ορατού φωτός, καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που φτάνει στην επιφάνεια της γης είναι ορατή ακτινοβολία.
2. Όταν εκτεθεί σε ακτινοβολία ορατού φωτός, το σύστημα πρέπει να υφίσταται μια ενδόθερμη φωτοαντίδραση (πρωτεύουσα φωτοαντίδραση). Πρόκειται, ουσιαστικά, για μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε λανθάνουσα θερμότητα.
3. Η πρωτεύουσα φωτοαντίδραση πρέπει να ακολουθηθεί από άλλες (θερμικές ή φωτοχημικές) αντιδράσεις, οι οποίες με τη σειρά τους θα οδηγήσουν το σύστημα στην αρχική του κατάσταση. Τη διαδικασία αυτή, που είναι κυκλική, υπαγορεύουν τόσο οικονομικοί όσο και οικολογικοί λόγοι.
4. Η αποδιδόμενη ποσότητα ενέργειας από την πρωτεύουσα φωτοαντίδραση πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο μεγάλη, ώστε το σύστημα να είναι αποδοτικό αλλά και οικονομικό.
5. Τουλάχιστον μία από τις εξώθερμες αντιδράσεις του κύκλου πρέπει να λαμβάνει χώρα υπό ελεγχόμενες συνθήκες (χρήσιμη αντίδραση). Το γεγονός αυτό, δίνει τη δυνατότητα χρησιμοποίησης της χημικής λανθάνουσας θερμότητας.
6. Η προαναφερθείσα “χρήσιμη αντίδραση” πρέπει να αποδίδει όσο το δυνατόν περισσότερο μέρος της ηλιακής ενέργειας που απορροφήθηκε, με στόχο, φυσικά, της αποδοτικότερη και οικονομικότερη λειτουργία του συστήματος.
7. Τα αντιδρώντα της “χρήσιμης αντίδρασης” πρέπει να είναι κατάλληλα για αποθήκευση και μεταφορά.
8. Τα έξοδα εγκατάστασης και συντήρησης του συστήματος πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η φωτοχημική μετατροπή (αναφερόμαστε στον **άμεσο φωτοδιαχωρισμό**) φαίνεται να είναι ένας συμβατός τρόπος αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας, Ωστόσο, στην εφαρμογή της μεθόδου αυτής, προκύπτουν πολλά προβλήματα, τα οποία αποτελούν αντικείμενο έρευνας. Σε έναν τομέα της έρευνας αυτής, εξετάζεται για το αν το νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την φωτοχημική αποθήκευση ηλιακής ενέργειας.

Το νερό δεν έχει μεγάλη απορροφητικότητα ορατής ακτινοβολίας, οπότε αρχικά δε φαίνεται εφικτή η χρησιμοποίησή του. Ωστόσο, η άμεση φωτοχημική διάσπαση δεν είναι ο μόνος τρόπος για τον διαχωρισμό του νερού σε οξυγόνο και υδρογόνο. Γίνονται προσπάθειες για **αισθητό διαχωρισμό**, όπως επίσης εφαρμόζεται και η χρήση καταλυτών για τη διάσπαση του νερού.

4.2.4.2 Χρήση πολυοξομεταλλικών ενώσεων Mo, W και V

Έχει παρατηρηθεί ότι οι πολυοξομεταλλικές ενώσεις μολυβδενίου (Mo), βολφραμίου (W) και βανασίου (V) υφίστανται σταδιακή πολυηλεκτρονιακή αναγωγή με διάφορα χημικά αντιδραστήρια και ηλεκτροχημικές μεθόδους. Η αναγωγή είναι αντιστρεπτή, με την έννοια ότι, υπό κατάλληλες συνθήκες, επανοξειδώνονται από το ατμοσφαιρικό οξυγόνο χωρίς να αλλοιωθεί η δομή τους. Οι ουσίες αυτές είναι φωτοευαίσθητες στο εγγύς ορατό και υπεριώδες φως, παρουσία μεγάλης ποικιλίας οργανικών ουσιών. Η φωτοευαίσθησία οδηγεί στην πολυηλεκτρονιακή αναγωγή των πολυοξομεταλλικών ενώσεων με ταυτόχρονη οξείδωση των οργανικών ουσιών. Οι ιδιότητες αυτές αποτελούν τη βάση για τη χρησιμοποίηση των ουσιών αυτών στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας στους τομείς της παραγωγής υδρογόνου.

Στον πίνακα 4.4 αναφέρονται τρόποι φωτοχημικής παραγωγής υδρογόνου και οξυγόνου από το νερό

Πίνακας 4.4
Τρόποι φωτοχημικής παραγωγής υδρογόνου και οξυγόνου από το νερό

	Τρόπος φωτοαντίδρασης	Κατάσταση καθορισμού ενέργειας
A.	Άμεσος φωτοδιαχωρισμός	
1	$H_2O + h\nu \rightarrow H + H + O$	Σχηματισμός $H + H + O$
	$H + H \rightarrow H_2$	
	$O \rightarrow \frac{1}{2}O_2$	
2	$H_2O + h\nu \rightarrow H_2 + O$	Απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας
	$O \rightarrow \frac{1}{2}O_2$	
B.	Αισθητός φωτοδιαχωρισμός	
	$A + h\nu \rightarrow A^*$	Σχηματισμός $H_2 + O$
	$A^* + H_2O \rightarrow A + H_2 + O$	
	$O \rightarrow \frac{1}{2}O_2$	

Γ.	Καταλυτικός φωτοδιαχωρισμός (φωτοκατάλυση) οξειδωσης	
1	$X + H_2O + h\nu \rightarrow X^+ + H + OH^-$	Σχηματισμός $H + \frac{1}{4}O_2$
	$H + H \rightarrow H_2$	
	$X^+ + \frac{1}{2}H_2O \rightarrow X + H^+ + \frac{1}{4}O_2$	
2	$Y + H_2O + h\nu \rightarrow Y^- + H^+ + OH$	Σχηματισμός $OH + \frac{1}{2}H_2$
	$OH \rightarrow \frac{1}{2}H_2O + \frac{1}{4}O_2$	
	$Y^- + H_2O \rightarrow Y + OH^- + \frac{1}{2}H_2$	
3	$Z + 2H_2O + h\nu \rightarrow Z^{++} + H_2 + 2OH^-$	Σχηματισμός $H_2 + \frac{1}{2}O_2$
	$Z^{++} + H_2O \rightarrow Z + 2H^+ + \frac{1}{2}O_2$	
4	$2X + 2H_2O + 2h\nu \rightarrow 2X^+ + H_2 + 2OH^-$	Σχηματισμός $H_2 + \frac{1}{2}O_2$
	$2X^+ + H_2O \rightarrow 2X + 2H^+ + \frac{1}{2}O_2$	

Σε σχέση με τον παραπάνω πίνακα, μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής:

- Άλλοι τρόποι άμεσου φωτοδιαχωρισμού είναι πιθανοί.
- Στον αισθητό φωτοδιαχωρισμό, το στοιχείο που απορροφά το φως δε λαμβάνει μέρος στην αντίδραση, αλλά μεταφέρει την ενέργεια που έχει αποκτήσει (λόγω διέγερσης) σε ένα άλλο στοιχείο, το οποίο αντιδρά.
- Στον φωτοδιαχωρισμό με χρήση καταλυτών, το στοιχείο που απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία λαμβάνει μέρος στη φωτοχημική αντίδραση και στη συνέχεια ανατροφοδοτείται από μία άλλη (θερμική) αντίδραση. Πρέπει να σημειωθεί ότι, τα ζεύγη X^+/X , Y/Y^- και Z^{++}/Z πρέπει να έχουν συγκεκριμένη δυνατότητα οξειδωσης, ώστε τα X^+ και Z^{++} να μπορούν να οξειδώνουν το νερό αλλά και ταυτόχρονα, το Y^- να το ελαττώνει.
- Η διαδικασία Γ3 απαιτεί τη μεταφορά δύο ηλεκτρονίων για κάθε φωτόνιο που απορροφάται.
- Η διαδικασία Γ4 απαιτεί την ταυτόχρονη απορρόφηση δύο φωτονίων από δύο γειτονικά ενεργά κέντρα.

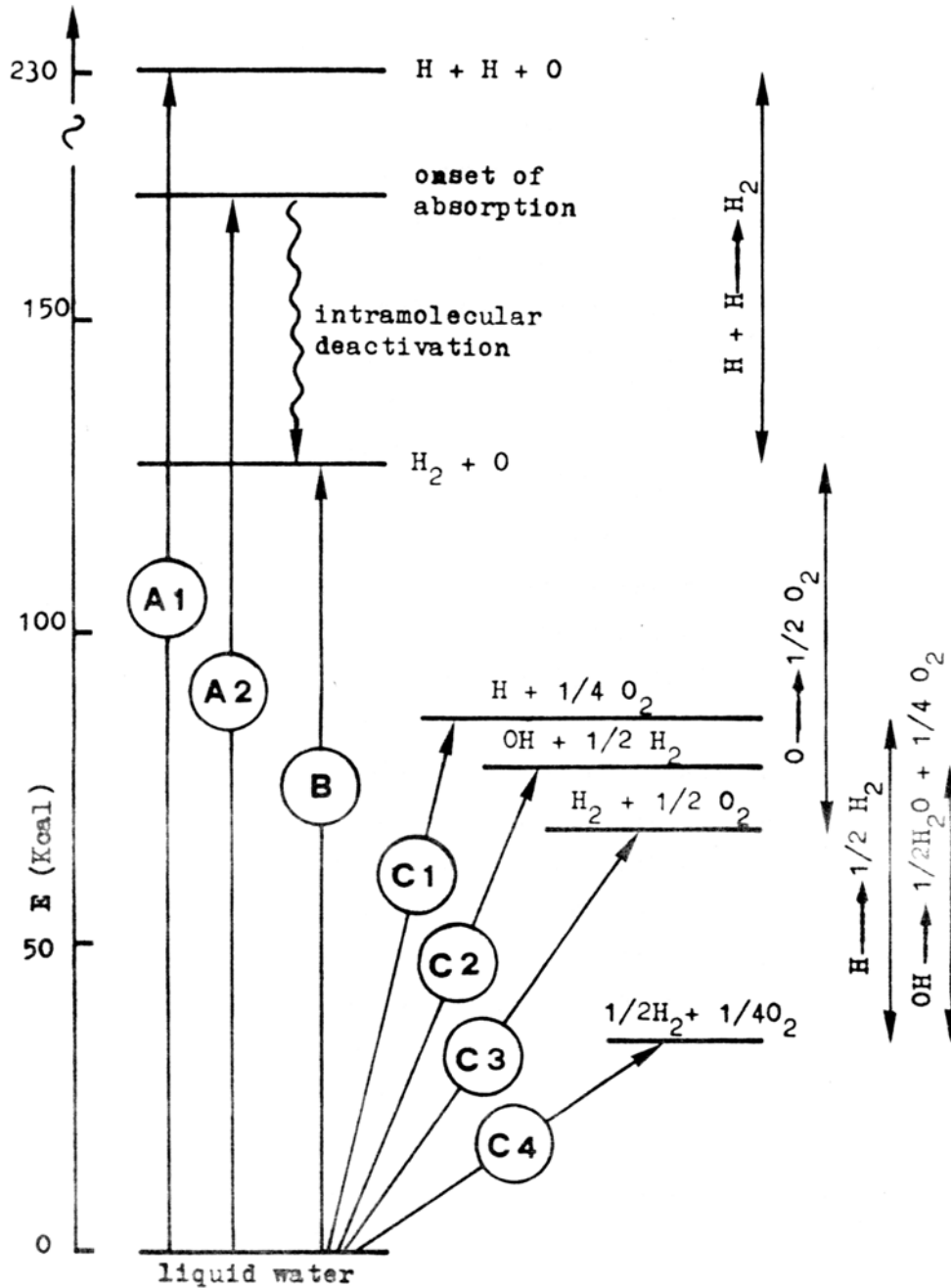
Στον αισθητό φωτοδιαχωρισμό, ο ευαισθητοποιητής πρέπει να έχει την ικανότητα να απορροφά την ορατή ακτινοβολία (κριτήριο 1). Επίσης, πρέπει να ικανοποιεί τα κριτήρια 3,4,6 και 8 που αφορούν την πρωτεύουσα αντίδραση του συστήματος.

Στην φωτοκατάλυση, εφαρμόζεται ένας νέος τρόπος διεξαγωγής της πρωτεύουσας αντίδρασης, με αποτέλεσμα μόνο τα κριτήρια 5 και 7 του άμεσου φωτοδιαχωρισμού να ισχύουν και σε αυτή την περίπτωση.

Από ενεργειακής άποψης, ωστόσο, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι το ποσό ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε κάθε περίπτωση φωτοδιαχωρισμού είναι περίπου το ίδιο, παρά το γεγονός ότι οι τρεις μέθοδοι έχουν διαφορετικό ενεργειακό κατώφλι. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι η πιο σημαντική αντίδραση είναι κοινή για όλες τις μεθόδους. Αυτή είναι η εξής:



Το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας που απορροφάται στον άμεσο και στον αισθητό φωτοδιαχωρισμό χάνεται, καθώς οι διαδικασίες της ενδομοριακής αποδιέγερσης των διεγερμένων μορίων και της ραγδαίας επαναφοράς τους στην ουδέτερη κατάσταση γίνονται πολύ γρήγορα για να μπορέσουν να ελεγχθούν. Το πραγματικό πλεονέκτημα στη διαδικασία της φωτοκατάλυσης είναι ότι -εν μέρει- αποφεύγεται ο σχηματισμός στοιχείων υψηλής ενέργειας, τα οποία συναντώνται στις άλλες μεθόδους.



Σχήμα 4.8
Ενεργειακό διάγραμμα των διάφορων φωτοχημικών μεθόδων του πίνακα 4.4

4.3 Αποθήκευση μέσω της παραγωγής υδρογόνου

4.3.1 Γενικά

Πιστεύεται ότι το υδρογόνο θα είναι το μελλοντικό καύσιμο και το σπουδαιότερο μέσο αποθήκευσης ενέργειας. Η διαπίστωση αυτή έγινε από το γεγονός ότι το αέριο αυτό μπορεί να παραχθεί από το νερό με τη χρήση υψηλής ποιότητας ενέργειας από μία πρωτογενή πηγή. Το υδρογόνο που παράγεται με αυτό τον τρόπο μπορεί να καεί στη συνέχεια σ' ένα κλειστό χημικό κύκλωμα. Έτσι, παίρνουμε θερμική ενέργεια χωρίς ρύπανση του περιβάλλοντος. Η δυνητική αποθήκευση υδρογόνου και η φθινή μεταφορά του σε μεγάλες αποστάσεις, οδηγεί στην ιδέα του “**Hydrogen Economy**”. Η ιδέα αυτή είναι μια προτεινόμενη μέθοδος παραγωγής ενέργειας μέσω της διάσπασης του υδρογόνου και του οξυγόνου.



*Σχήμα 4.9
Εφαρμογές της Τεχνολογίας Υδρογόνου*

Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί με διάφορες μεθόδους:

1. Καταλυτική αναμόρφωση φυσικού αερίου παρουσία ατμού
2. Αναγωγή του H_2O με άνθρακα
3. Ηλεκτρολυτική διάσπαση του νερού
4. Βιοχημικά

5. Θερμική διάσπαση του νερού
6. Μερική οξείδωση βαρέων ορυκτελαίων

Πριν από το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, η παραγωγή του υδρογόνου γινόταν με τη μέθοδο (2). Σήμερα, οι μέθοδοι (1) και (6) είναι επικρατέστερες. Αυτές οι μέθοδοι δεν είχαν σαν στόχο την επίλυση του ενεργειακού προβλήματος, αλλά την παραγωγή πρώτης ύλης για σπουδαία βιομηχανικά προϊόντα, όπως είναι η αμμωνία κ.ά. Αντίθετα, η μέθοδος (5) που αφορά τη θερμική διάσπαση του νερού και η (3) που αφορά την ηλεκτρολυτική του διάσπαση, έχουν γίνει αντικείμενα έντονης ερευνητικής δραστηριότητας. Ο στόχος των ερευνών είναι η παραγωγή υδρογόνου από το νερό με ηλιακή ενέργεια. Η διανομή του υδρογόνου είναι δυνατή, όπως προαναφέρθηκε, σε μεγάλες αποστάσεις με κόστος μικρότερο από εκείνο που απαιτείται για τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η πρόταση για μελλοντική λύση του ενεργειακού προβλήματος με βάση το υδρογόνο επήλθε λόγω ορισμένων χαρακτηριστικών του υδρογόνου, τα οποία είναι τα παρακάτω:

- Η αφθονία του υδρογόνου στη φύση.
- Μετά την καύση του μετατρέπεται σε νερό, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν περιβαλλοντικές επιπτώσεις.
- Η ανά μονάδα μάζας απόδοσή του σε ενέργεια είναι πολύ μεγάλη, περίπου τριπλάσια από αυτή του φυσικού αερίου.
- Η χρήση του στα στοιχεία καυσίμου παρέχει τη δυνατότητα αθόρυβης παραγωγής ενέργειας και ελαχιστοποίηση της ηχητικής ρύπανσης.

Η αντίδραση παραγωγής του υδρογόνου είναι ενδόθερμη και είναι η εξής:



Η ενθαλπία της αντίδρασης είναι $h=58.14$ kcal/mol στους 150 °C και η ελεύθερη ενέργεια στην ίδια θερμοκρασία 52.99 kcal/mol. Στην παραπάνω αντίδραση έχουμε ελάττωση της ελεύθερης ενέργειας με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ αλλάζει πρόσημο στους 4700 °C. Στη θερμοκρασία αυτή, θα άρχιζε να λειτουργεί ένα υποθετικό ηλεκτροχημικό στοιχείο καυσίμου που θα παρείχε υδρογόνο και οξυγόνο από H_2O με παράλληλη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε θερμοκρασία 2000 °C το σημείο ισορροπίας της αντίδρασης διάσπασης του νερού παρέχει ένα μίγμα H_2O , H_2 , O_2 που περιέχει 1% υδρογόνο. Έτσι, συμπεραίνουμε ότι η απευθείας μαζική παραγωγή υδρογόνου απαιτεί μεγάλες θερμοκρασίες. Η επίτευξη, όμως, υψηλών θερμοκρασιών παρουσιάζει την αδυναμία της περιοχής θερμότητας με τόσο υψηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, μια περιοχή τέτοιων υψηλών θερμοκρασιών παρουσιάζει το πρόβλημα της αντοχής των υλικών. Το γεγονός ότι το νερό διασπάται δύσκολα σε H_2 και O_2 οφείλεται στη μεγάλη θετική τιμή της ενθαλπίας της αντίδρασης διάσπασης του νερού ΔH . Για να πραγματοποιηθεί η αντίδραση προς τα δεξιά θα πρέπει να έχουμε ελάττωση της ελεύθερης ενέργειας ΔG .

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (4.6)$$

Όπου ΔS είναι η εντροπία της αντίδρασης.

Μια σημαντική μείωση του ΔG θα έχουμε αν δημιουργήσουμε μία μεγάλη τιμή στο κλάσμα των μερικών πιέσεων.

$$\frac{P_{H_2O}}{\left(P_{H_2} - P_{O_2}^{\frac{1}{2}} \right)} \quad (4.7)$$

Η ελάττωση της ελεύθερης ενέργειας σε χαμηλά επίπεδα μπορεί να επιτευχθεί αν η αντίδραση της διάσπασης πραγματοποιηθεί σε περισσότερα στάδια. Στα στάδια αυτά μπορεί να υπεισέρχονται και άλλα χημικά συστατικά, τα οποία θα πρέπει στο τέλος να παραμείνουν αναλλοίωτα. Η θερμοκρασία στην οποία θα πραγματοποιείται η κάθε χημική αντίδραση σε κάθε στάδιο θα πρέπει να εκλέγεται έτσι ώστε να έχουμε μεγιστοποίηση της θετικής ΔS και ελαχιστοποίηση της αρνητικής.

4.3.2 Τεχνολογίες παραγωγής H_2 με χρήση ηλιακής ενέργειας

Οι τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου με χρήση ηλιακής ενέργειας αποτελούν αντικείμενο έρευνας από τη δεκαετία του 1970. Εκτός από τη μέθοδο της ηλεκτρόλυσης μέσω φωτοβολταϊκών ή φωτοχημικών κυψελών, έχουν ερευνηθεί και διάφορες θερμοχημικές μέθοδοι. Σε ορισμένες από αυτές, χρησιμοποιούνται συλλέκτες οι οποίοι διασπών το νερό σε υψηλές θερμοκρασίες (2300-2600 °C), διαδικασία η οποία δε χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της πολυπλοκότητάς της και της χαμηλής απόδοσής της (1-2%). Σε άλλες μεθόδους, χρησιμοποιείται η θερμότητα από ηλιακούς συλλέκτες ως καταλύτης για την αναμόρφωση του φυσικού αερίου, παρουσία ατμού.

4.3.2.1 Καταλυτική αναμόρφωση φυσικού αερίου παρουσία ατμού

Σε πολύ υψηλή θερμοκρασία (700-1100 °C) και παρουσία καταλύτη με βάση τον σίδηρο (νικέλιο), ο ατμός αντιδρά με μεθάνιο και παράγει υδρογόνο και μονοξείδιο του άνθρακα:



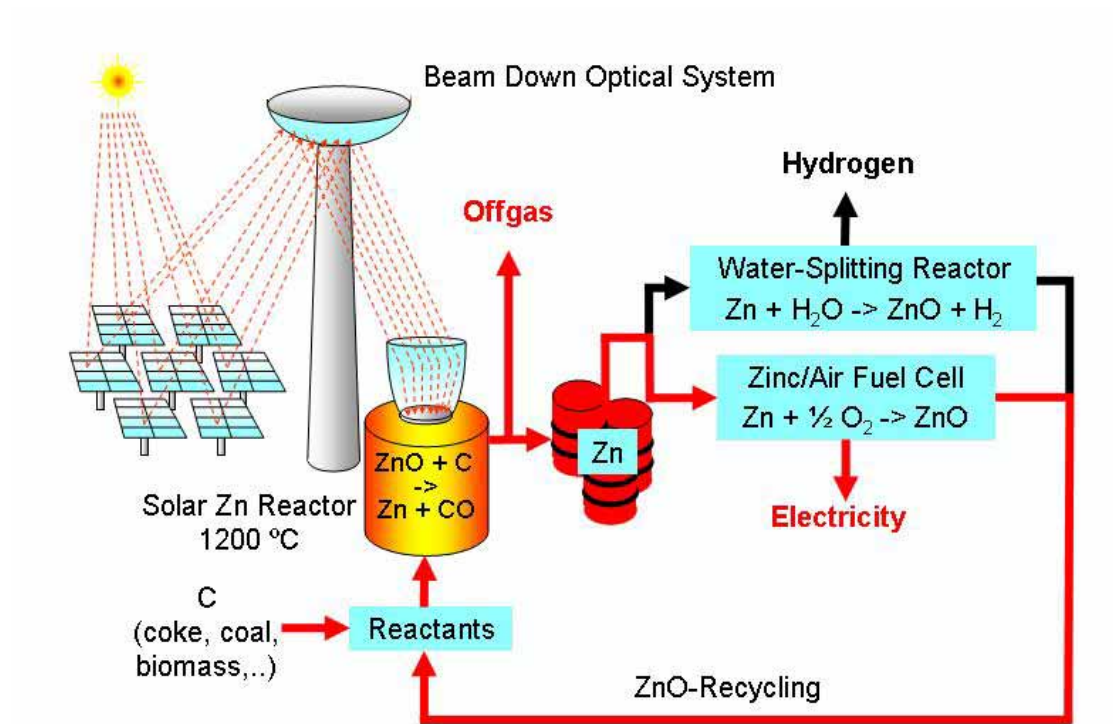
Από το παραγόμενο μονοξείδιο του άνθρακα μπορεί να παραχθεί επιπλέον υδρογόνο από μία αντίδραση μεταβολής αερίου, η οποία πραγματοποιείται σε χαμηλότερη θερμοκρασία και η οποία είναι η παρακάτω:



Στις Η.Π.Α. παράγονται ετησίως εννέα εκατομμύρια τόνοι υδρογόνου, κυρίως από την αναμόρφωση του φυσικού αερίου παρουσία ατμού.

Οι θερμοχημικοί κύκλοι, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από τη διάσπαση και την αναδημιουργία των αντιδρώντων αποτελούν ένα νέο τρόπο παραγωγής υδρογόνου. Στη διαδικασία **Solzinc** (Solar carbothermic production of Zn from ZnO) που βρίσκεται υπό ανάπτυξη στο Ινστιτούτο Weizmann χρησιμοποιείται ένας κλίβανος που τροφοδοτείται από ηλιακή ενέργεια ισχύος 1 MW για να αποσυνθέσει οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO) σε θερμοκρασίες πάνω από 1200 °C. Η αρχική αυτή

αντίδραση παράγει καθαρό ψευδάργυρο, ο οποίος στη συνέχεια μπορεί να αντιδράσει με νερό και να παράγει υδρογόνο. Με τη διαδικασία αυτή παραγωγής ψευδαργύρου υπάρχουν πολύ λιγότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Το αρχικό προϊόν (ZnO) μπορεί να ανακυκλωθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί στον ηλιακό αντιδραστήρα.



Σχήμα 4.10
Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας Solzinc

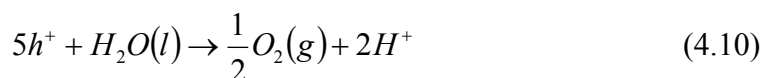
Στην τεχνολογία **S2P** (Sandia's Sunshine to Petrol) χρησιμοποιείται η υψηλή θερμοκρασία που παράγεται από συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία σε συνδυασμό με έναν καταλύτη από οξείδιο του ζirkονίου και σιδηρίτη για τη διάσπαση του ατμοσφαιρικού διοξειδίου του άνθρακα σε οξυγόνο και μονοξείδιο του άνθρακα. Το μονοξείδιο του άνθρακα μπορεί, εν συνεχεία, να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή μεθανόλης.



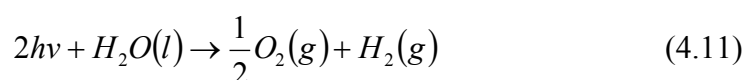
*Σχήμα 4.11
Ο ηλιακός κλίβανος της τεχνολογίας S2P*

4.3.2.2 Οι φωτοηλεκτροχημικές κυψέλες (PEC's)

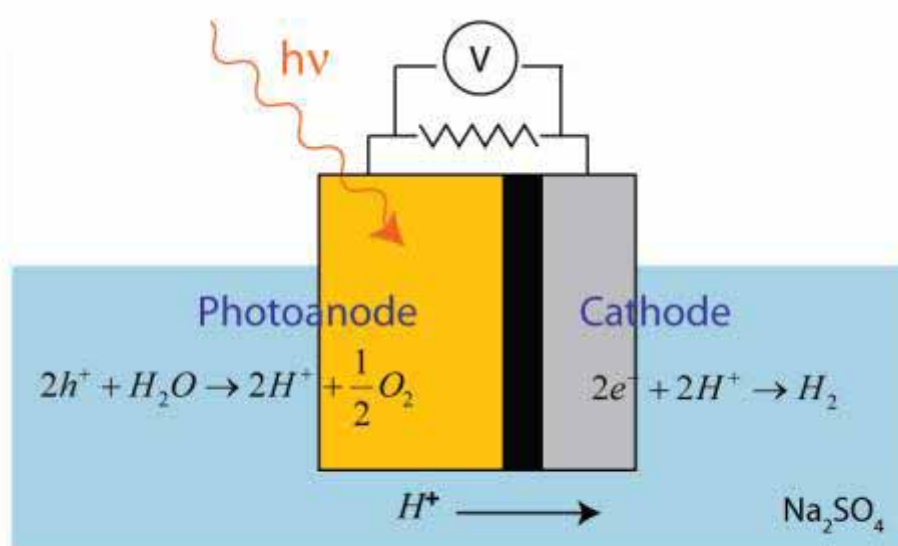
Οι φωτοηλεκτροχημικές κυψέλες (PEC's) αποτελούνται από έναν ημιαγωγό (μία άνοδο και μία κάθοδο), τοποθετημένο μέσα σε έναν ηλεκτρολύτη και συνδεδεμένο με ένα εξωτερικό κύκλωμα και μπορούν να παράγουν υδρογόνο μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού. Όταν στον ημιαγωγό προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία αναπτύσσεται ηλεκτρικό δυναμικό. Το νερό οξειδώνεται στην άνοδο, σύμφωνα με την αντίδραση:



Στην κάθοδο, τα ιόντα H^+ μειώνονται προς σχηματισμό αέριου υδρογόνου, σύμφωνα με την αντίδραση:



Για να πραγματοποιηθεί η παραπάνω εξίσωση, πρέπει να πληρούνται ορισμένες προϋποθέσεις. Πρώτον, ο ημιαγωγός πρέπει να παρέχει ένα επαρκές δυναμικό, ώστε τα προϊόντα να είναι σε σταθερή αναλογία. Επιπλέον, πρέπει να απορροφά ένα τμήμα του ηλιακού φάσματος. Η αγωγιμότητα και το σθένος των δεσμών των άκρων του ημιαγωγού πρέπει να υπερνικούν το δυναμικό οξειδοαναγωγής του υδρογόνου και του οξυγόνου. Τέλος, ο ημιαγωγός πρέπει να είναι ανθεκτικός στη διάβρωση από τον ηλεκτρολύτη. Οι προϋποθέσεις αυτές δημιουργούν σημαντικούς περιορισμούς στην επιλογή του υλικού του ημιαγωγού. Οξειδία, όπως το οξείδιο του τιτανίου (TiO_2) είναι το ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό στα φωτοηλεκτρόδια των PCM's, όπως επίσης και οι ημιαγωγοί νιτριδίων.



Σχήμα 4.12
Σχηματική απεικόνιση μίας PEC

Υπάρχουν δύο είδη φωτοηλεκτροχημικών κυψελών: αυτές που χρησιμοποιούν τις επιφάνειες των ημιαγωγών σαν καταλύτες (η επιφάνεια του ημιαγωγού απορροφά ηλιακή ενέργεια και δρα σαν ηλεκτρόδιο για τη διάσπαση του νερού) και αυτές οι οποίες χρησιμοποιούν μεταλλικά σύμπλοκα σαν καταλύτες (όταν το διαλυμένο μεταλλικό σύμπλοκο απορροφά ενέργεια, προκαλεί διαχωρισμό του ηλεκτρικού φορτίου με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται η αντίδραση διάσπασης του νερού). Η απόδοση των κυψελών έχει ξεπεράσει το φράγμα του 10%. Οι εργαστηριακές δοκιμές έχουν επιβεβαιώσει την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας. Το μοναδικό πρόβλημα είναι η διάβρωση των ημιαγωγών που έρχονται σε άμεση επαφή με το νερό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΣ ΜΑΚΡΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ

5.1 Γενικά

Γενικά, οι αποθήκες ενέργειας χρησιμοποιούνται όταν η προσφορά της ενέργειας δεν συμπίπτει με τη ζήτηση. Για ενεργειακές πηγές, όπως η ηλιακή, οι περίοδοι μη προσφοράς ενέργειας που μπορεί να υπάρξουν είναι δυνατόν να είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Σε αυτή την περίπτωση, η ενεργειακή αποθήκη πρέπει να είναι αρκετά μεγάλης θερμοχωρητικότητας, ώστε να καλύψει την κατά κανόνα καθημερινή ζήτηση ενέργειας. Ακόμα, σε ορισμένες διαδικασίες, όπως η θέρμανση ενός κτιρίου από τον ήλιο, η διαθέσιμη ενέργεια κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού δε χρησιμοποιείται. Η προσφορά αυτή ηλιακής ενέργειας το καλοκαίρι, ειδικά για βόρεια γεωγραφικά πλάτη, είναι το μέγιστο ποσοστό της διαθέσιμης κάθε χρόνο ενέργειας. Επίσης, για τα νότια γεωγραφικά πλάτη, το 68% της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας προσφέρεται τους μη χειμερινούς μήνες. Η ανάγκη αποθήκευσης και εκμετάλλευσης της διαθέσιμης ενέργειας από μία εποχή του έτους σε μία άλλη οδήγησε στη δημιουργία των διεποχικών θερμικών αποθηκών, οι οποίες κατά κανόνα αποθηκεύουν ηλιακή ενέργεια τους καλοκαιρινούς μήνες για να την αποδώσουν τους χειμερινούς. Είναι φυσικό ότι οι θερμικές αποθήκες μακροταμίευσης και οι διεποχιακές έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό τη μεγάλη θερμοχωρητικότητα, η οποία εξαρτάται, κυρίως, από τις κλιματολογικές συνθήκες, τους χρησιμοποιούμενους συλλέκτες και τα φορτία που πρέπει να καλυφθούν. Τα δύο κύρια χαρακτηριστικά αυτών των αποθηκών, δηλαδή η μεγάλη χρονική διάρκεια αποθήκευσης και ο κατά κανόνα μεγάλος όγκος τους, δημιουργούν και τα κύρια προβλήματά τους, τα οποία είναι τα εξής:

- Οι μεγάλες θερμικές απώλειες που για να αποφευχθούν χρειάζονται ισχυρές μονώσεις.
- Ο απαγορευτικά μεγάλος, πολλές φορές, όγκος τους σε σχέση με το διαθέσιμο χώρο.
- Το μεγάλο αρχικό κόστος και γενικότερα η οικονομικότητά τους.

Στην πράξη, δε χρησιμοποιείται η θερμική κλίνη στερεών για μακροταμίευση που χρειάζεται περίπου τρεις φορές μεγαλύτερο όγκο από την υδάτινη αποθήκη ίσης θερμοχωρητικότητας. Πέρα από τη υδάτινη αποθήκη, που σε κατάλληλο όγκο, σχήμα και μόνωση χρησιμοποιείται σαν μακροταμιευτής, δύο άλλοι τύποι θερμικών αποθηκών έχουν αναπτυχθεί και είναι οι παρακάτω:

1. Η **ηλιακή λίμνη**, στην οποία η έννοια του συλλέκτη και της αποθήκης συμπίπτουν γιατί, γενικά, ο βυθός μίας τέτοιας τεχνητής λίμνης είναι ο ηλιακός συλλέκτης, πέραν της δέσμευσης της ηλιακής ενέργειας από τη μάζα του νερού της λίμνης.
2. Η **θερμική αποθήκη εδάφους**, όπου το έδαφος χρησιμοποιείται ως αποθηκευτικό και παράλληλα ως μονωτικό μέσο.

5.2 Υδάτινη αποθήκη μακροταμίευσης και διεποχιακή αποθήκη

Στη βιβλιογραφία, θεωρείται ότι οι μακροταμιευτικές αποθήκες ξεκινούν από περιεκτικότητα νερού 200 λίτρων ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας συλλέκτη, τα οποία είναι ικανά, ανάλογα με τις κλιματολογικές συνθήκες, να καλύψουν ανάγκες πολλών ημερών. Τα προβλήματα μίας τέτοιας αποθήκης εστιάζονται, πέρα από την οικονομικότητα του συστήματος και του διαθέσιμου χώρου, στα παρακάτω:

- Θερμικές απώλειες

Οι θερμικές απώλειες της αποθήκης είναι ανάλογες με την εξωτερική τους επιφάνεια, τη μόνωση και βέβαια τη χρονική διάρκεια μέσα στην οποία τις υπολογίζουμε.

Η εξωτερική επιφάνεια είναι λιγότερο δυνατή, αν θεωρήσουμε ότι η αποθήκη είναι σφαιρική ή κυβική, πηγαίνοντας βαθμιαία σε μορφές κυλινδρικές με μεγάλη ακτίνα κύκλου-περίπου στο μέγεθος του ύψους-ή άλλες μορφές όταν αυτές δεν ικανοποιούν από άποψη κατασκευής και τοποθέτησης σε ένα συγκεκριμένο χώρο.

Η θερμοδιαπερατότητα της αποθήκης κατά τον Lunde πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση με $0,5 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2$ για την περίπτωση που οι απώλειες από την αποθήκη δεν είναι απώλειες από το σύστημα. Εάν η ηλιακή ενέργεια προορίζεται μόνο για την παραγωγή θερμού νερού ή η αποθήκη είναι έξω από την κατασκευή ή θαμμένη στο έδαφος, τότε η θερμοδιαπερατότητα πρέπει να είναι μικρότερη από $0,17 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2$. Ένας άλλος πρακτικός κανόνας δίνεται από τους Braun, Klein, και Mitchell. Ο λόγος της χρήσιμης ενέργειας των καταναλώσεων προς την ενέργεια των απωλειών πρέπει να είναι μεγαλύτερος του 20. Τέλος, ο Hooper δέχεται, για οικονομικά βέλτιστο ηλιακό σύστημα, απώλειες περίπου 10% της συλλεγμένης ενέργειας όταν πρόκειται για πολυκατοικία και 25% όταν πρόκειται για μονοκατοικία. Η μόνωση, όμως, είναι και θέμα οικονομικό. Ακριβές και ισχυρές μονώσεις, ίσως αποδεικνύονται αντιοικονομικές σε τελική ανάλυση και έτσι ίσως να είναι οικονομικότερη η βελτιστοποίηση του συστήματος όχι με την αύξηση της μόνωσης αλλά με την αύξηση π.χ. της επιφάνειας των συλλεκτών.

- Πρόβλημα με τη θερμική διεργασία

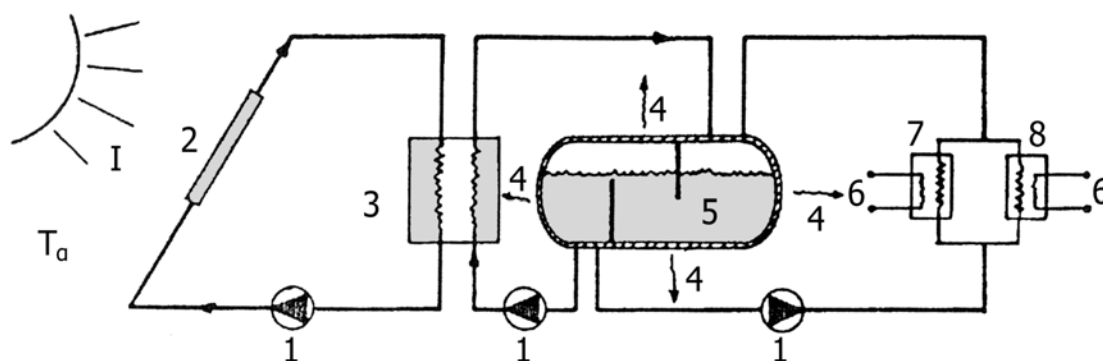
Το καλοκαίρι, η θερμοκρασία της αποθήκης πρέπει να ανεβαίνει όσο υψηλότερα είναι δυνατό για να έχουμε τη μεγαλύτερη δυνατή θερμική αποθήκευση. Αυτό, όμως, σημαίνει ότι, κυρίως κατά τη διάρκεια του χειμώνα και με τις υψηλές θερμοκρασίες

του νερού της αποθήκης και χαμηλές εξωτερικές θερμοκρασίες, η αποδοτικότητα των συλλεκτών πέφτει πολύ χαμηλά. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με παράλληλη ύπαρξη μίας ημερήσιας αποθήκης, η οποία επίσης τροφοδοτεί τις θερμικές καταναλώσεις του συστήματος, ή ακόμα με την απευθείας σύζευξη των συλλεκτών με την κατανάλωση κατά τη διάρκεια της χειμερινής ημέρας, όταν υπάρχει προσφορά ηλιακής ενέργειας και παράλληλα ζήτηση θερμικών φορτίων.

Παράλληλα με τα προβλήματα, οι μακροταμιευτικές και διεποχιακές αποθήκες προσφέρουν σοβαρά πλεονεκτήματα, τα οποία είναι τα παρακάτω:

- ◇ Η κάλυψη των θερμικών αναγκών σε μεγάλο ποσοστό
- ◇ Απαιτούν, συνήθως, μικρότερη επιφάνεια συλλεκτών για την ίδια απόδοση σε σύγκριση με ηλιακά συστήματα μικρότερων αποθηκών.
- ◇ Η μικρή ή καθόλου επένδυση σε βοηθητική ενέργεια και οι πολύ μικρότερες δαπάνες λειτουργίας του συστήματος από ένα συμβατικό.
- ◇ Η μικρότερη εξάρτηση του χρήστη από τα συμβατικά καύσιμα.

Για τη θερμική διεργασία μίας μακροταμιευτικής και διεποχιακής αποθήκης, θεωρούμε το σχήμα 5.1, όπου είναι



Σχήμα 5.1

Θερμικό σύστημα με ηλιακό συλλέκτη και υδάτινη αποθήκη μακροταμίευσης

1. Αντλία
2. Ηλιακός συλλέκτης
3. Θερμικός εναλλάκτης
4. Θερμικές απώλειες από την αποθήκη
5. Υδάτινη αποθήκη
6. Βοηθητική ενέργεια
7. Φορτίο θέρμανσης
8. Φορτίο θερμού νερού χρήσης

Για το παραπάνω σχήμα, οι εξισώσεις 2.9 και 2.10 για την υδάτινη αποθήκη ισχύουν με τις παρακάτω παρατηρήσεις:

α) Ο χρόνος t θεωρείται ότι είναι χρόνος μίας ώρας, ή αν υπάρχουν διαθέσιμα κλιματικά στοιχεία, το χρονικό βήμα μπορεί να είναι μικρότερο.

β) Όταν $\tau\alpha I_t - U_L(T_s - \bar{T}_a) < 0$ η διαδικασία συλλογής ηλιακής ενέργειας διακόπτεται και η αποθήκη δίνει ενέργεια προς τις καταναλώσεις από το δικό της θερμικό περιεχόμενο.

γ) Υπάρχει μία θερμοκρασία βάσης T_{sb1} , κάτω από την οποία θεωρούμε ότι η ποσότητα

$$C_a p_a V (T_i - \bar{T}_a) + \bar{U}_v F (T_i - \bar{T}_a) = 0 \quad (5.1)$$

Για τις εξισώσεις 2.9 και 2.10 δηλαδή ότι δεν προσφέρεται ενέργεια από την αποθήκη για τη θέρμανση χώρου αλλά αυτή καλύπτεται από τη βοηθητική ενέργεια.

δ) Όμοια με το γ, υπάρχει μία θερμοκρασία βάσης T_{sb2} , κάτω από την οποία θεωρούμε ότι $Q_w=0$ για τις εξισώσεις 2.9 και 2.10 δηλαδή ότι δεν προσφέρεται ενέργεια από την αποθήκη για τη θέρμανση νερού χρήσης, αλλά αυτή καλύπτεται από τη βοηθητική ενέργεια.

ε) Υπάρχει, τέλος, μία θερμοκρασία της αποθήκης T_{sp} , πάνω από την οποία διακόπτεται πάλι η κυκλοφορία του νερού στους συλλέκτες, δηλαδή θεωρούμε ότι

$$A_c F_i [\tau\alpha I_t - U_L(T_s - \bar{T}_a)] = 0 \quad (5.2)$$

Η θερμοκρασία T_{sb1} καθορίζεται από τον τελικό θερμικό εναλλάκτη της θέρμανσης και μπορεί να είναι τόσο μικρή έως και 10°C πάνω από την επιθυμητή εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου.

Η T_{sb2} καθορίζεται από την επιθυμητή κατώτερη θερμοκρασία του νερού χρήσης που μπορεί να είναι τόσο μικρή έως 45°C . Μπορεί, βέβαια, να είναι και μικρότερη σε μία παραλλαγμένη διαδικασία, όπου δε θερμαίνεται το νερό χρήσης αλλά προθερμαίνεται.

Η θερμοκρασία T_{sp} , η ανώτερη που μπορεί να επιτύχουμε στην αποθήκη, για τους μεν επίπεδους συλλέκτες καθορίζεται από την καμπύλη απόδοσης του συλλέκτη και είναι εκείνη που η απόδοση μηδενίζεται, για τους συγκεντρωτικούς δε συλλέκτες εξαρτάται από το συλλέκτη, τη θερμική διαδικασία και το ρευστό που τον διατρέχει.

Είναι προφανές ότι παραπάνω αναφερθήκαμε στη διαδικασία και τις συνθήκες που ισχύουν για την ενεργειακή τροφοδότηση της θέρμανσης κτιρίων και νερού χρήσης από τον ήλιο. Παρόμοιοι περιορισμοί ισχύουν και για οποιαδήποτε άλλη ηλιακή θερμική διεργασία στο βιομηχανικό ή στον αγροτικό τομέα.

Υπ' αυτές τις συνθήκες, η ακρίβεια των υπολογισμών είναι πολύ μεγάλη, μπορούμε δε να υπολογίσουμε ανά ώρα τις παρακάτω χρήσιμες ποσότητες της ηλιακής διαδικασίας με τη βοήθεια της εξίσωσης:

$$\bar{T}_s = T_s + \frac{Q_N}{2m_s C_{ps}} \quad (5.3)$$

όπου \bar{T}_s είναι η μέση θερμοκρασία της αποθήκης, Q_N η απομένουσα θερμική ενέργεια στην αποθήκη, m_s η μάζα του αποθηκευτικού μέσου και C_{ps} η ειδική του θερμοχωρητικότητα.

Ο παραπάνω τρόπος υπολογισμού προσφέρει πολύ μεγάλη ακρίβεια στις προβλέψεις και πρέπει να χρησιμοποιείται τουλάχιστον για υπολογισμούς ενός τυπικού ή δυσμενούς έτους εφόσον υπάρχουν τα απαραίτητα ωριαία κλιματικά στοιχεία (I_t , T_a , T_a').

Αντί των εξισώσεων αυτών, αναπτύχθηκαν προσεγγιστικές μέθοδοι για τον ανά μήνα υπολογισμό των Q_T , Q_N και T_s . Η μέθοδος που θα αναφερθεί παρακάτω είναι των Braun, Klein και Mitchell.

Θεωρούμε τη βασική εξίσωση της αποθήκης που είναι

$$Q_N = Q_{Tt} - L_t - Q_{Lt} \quad (5.4)$$

για χρόνο ενός μήνα.

όπου Q_{Tt} είναι η ενέργεια που προσδίδεται μέσω του ηλιακού κυκλώματος στην αποθήκη, L_t οι απαιτήσεις της κατανάλωσης και Q_{Lt} οι θερμικές απώλειες της δεξαμενής.

Τότε το

$$Q_{Tt} = A_c F_i \bar{H}_T (\bar{\tau}\alpha) N \bar{\phi} \quad (5.5)$$

όπου είναι \bar{H}_T ο ανά μήνα μέσος όρος της ημερήσιας ακτινοβολίας πάνω στο επίπεδο του συλλέκτη, N ο αριθμός των ημερών του μήνα και ϕ το τμήμα της ολικής ακτινοβολίας που απορροφάται από το συλλέκτη και είναι χρήσιμη.

Ο υπολογισμός του ϕ γίνεται βάσει των εξισώσεων που δίνουν οι Collares-Pereira και Pabl και είναι για ακίνητους συλλέκτες:

$$\phi = \exp\left[-x + (0,337 - 1,76\bar{K}_T + 0,55R)x^2\right] \quad (5.6.a)$$

$$\text{για } 0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,5 \text{ και } 0 \leq x \leq 1,2$$

$$\phi = 1 - x + (0,50 - 0,67\bar{K}_T + 0,25R)x^2 \quad (5.6.β)$$

$$\text{για } 0,5 \leq \bar{K}_T \leq 0,75 \text{ και } 0 \leq x \leq 1,2$$

$$\phi = 1 - x \quad (5.6.γ)$$

$$\text{για } \bar{K}_T \geq 0,75$$

όπου x είναι

$$x = \frac{Q_L / A_c}{\tau\alpha H_T} = \frac{(UA)_s (\bar{T}_s - \bar{T}_a)}{A_c \tau\alpha H_T} \quad (5.7)$$

\bar{K}_T ο μέσος μηνιαίος δείκτης αιθριότητας, R είναι ο λόγος R_d/R_h και τα R_d και R_h δίδονται από τις παρακάτω συναρτήσεις

Πίνακας 5.1
Συναρτήσεις των R_h και R_d για επίπεδους συλλέκτες

i) $\beta=\varphi, \gamma=0$
$R_h = \frac{1}{d} \left\{ \left[\frac{1}{\cos \phi} + \frac{\rho}{2}(1 - \cos \phi) \right] \left[a \sin \omega_c + \frac{b}{2}(\sin \omega_c \cos \omega_c + \omega_c) \right] - \right. \\ \left. \frac{\rho}{2}(1 - \cos \phi) \cos \omega_s (a \omega_c + b \sin \omega_c) \right\}$
$R_d = \frac{1}{d} \left\{ \left[\frac{1}{\cos \phi} - \frac{1}{2}(1 + \cos \phi) \right] \sin \omega_c + \left[\frac{1}{2}(1 + \cos \phi) \cos \omega_s \right] \omega_c \right\}$
ii) $\beta \neq \varphi, \gamma=0$
$R_h = \frac{1}{d} \left\{ \left[\frac{\cos(\phi - \beta)}{\cos \phi} + \frac{\rho}{2}(1 - \cos \beta) \right] \left[\alpha \sin \omega_c + \frac{b}{2}(\sin \omega_c \cos \omega_c + \omega_c) \right] - \right. \\ \left. - \left[\frac{\cos(\phi - \beta)}{\cos \phi} \cos \omega_s' + \frac{\rho}{2}(1 - \cos \beta) \cos \omega_s \right] [a \omega_c + b \sin \omega_c] \right\}$
$R_d = \frac{1}{d} \left\{ \left[\frac{\cos(\phi - \beta)}{\cos \phi} - \frac{1}{2}(1 + \cos \beta) \right] \sin \omega_c - \left[\frac{\cos(\phi - \beta)}{\cos \phi} \cos \omega_s' - \frac{1}{2}(1 + \cos \beta) \cos \omega_s \right] \omega_c \right\}$

Πίνακας 5.2
Συναρτήσεις των R_h και R_d για παραβολικούς συλλέκτες

i) $\beta=\varphi, \gamma=0$
$R_h = \frac{1}{d \cos \phi} \left[\alpha \sin \omega_c + \frac{b}{2}(\sin \omega_c \cos \omega_c + \omega_c) \right]$
$R_d = \frac{1}{d} \left[\left(\frac{1}{\cos \phi} - \frac{1}{c} \right) \sin \omega_c + \frac{\cos \omega_s}{c} \omega_c \right]$
ii) $\beta \neq \varphi, \gamma=0$
$R_h = \frac{\cos(\phi - \beta)}{d \cos \phi} \left[(\alpha - b \cos \omega_s') \sin \omega_c - a \omega_c \cos \omega_s' + \frac{b}{2}(\sin \omega_c \cos \omega_c + \omega_c) \right]$
$R_d = \frac{1}{d} \left\{ \left[\frac{\cos(\phi - \beta)}{\cos \phi} - \frac{1}{c} \right] \sin \omega_c + \left[\frac{\cos \omega_s}{c} - \frac{\cos(\phi - \beta)}{\cos \phi} \cos \omega_s' \right] \omega_c \right\}$

Για να υπολογίσουμε τα R_h και R_d πρέπει να γνωρίζουμε τις ποσότητες $a, b, d, \omega_s, \omega'_s, \omega_c, c, \rho$.

$$a = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 1,047) \quad (5.8)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 1,047) \quad (5.9)$$

$$d = \sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s \quad (5.10)$$

$$c = D / \pi d \quad (5.11)$$

όπου D και d είναι οι διάμετροι ανακλαστήρα και δέκτη

$$\omega_c = \frac{2\pi c}{t_d} \quad (5.12)$$

όπου t_d είναι το μήκος της ημέρας=24 ώρες

Ο χρόνος t_c ορίζεται με την ακόλουθη διαδικασία:

1. Θεωρούμε ότι $t_c=t_d$ για επίπεδους συλλέκτες ή ότι ο χρόνος t_c δίνεται από την εξίσωση 5.12 και για συγκεντρωτικούς CPC

$$\cos \omega_c = \frac{\tan \delta}{\tan \theta} \quad (5.13)$$

2. Ελαττώνουμε το t_c σε βήματα μισής ώρας, μέχρις ότου το Q_{Ti} γίνει μέγιστο. Το μέγιστο Q_{Ti} μας δίνει το ζητούμενο t_c .

Ας σημειωθεί ότι για τον υπολογισμό του ϕ , όλες οι γωνίες πρέπει να εκφράζονται σε rad.

Οι θερμικές απώλειες της αποθήκης είναι:

$$Q_{L_t} = (UA)_s (\bar{T}_s - \bar{T}'_a) t \quad (5.14)$$

όπου \bar{T}_s είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία της αποθήκης, \bar{T}'_a είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα γύρω από την αποθήκη και t είναι ο χρόνος ενός μηνός.

Η ενέργεια που δίνει η αποθήκη στο κτίριο είναι:

$$L_t = C_a \rho_a V (\bar{T}_i - \bar{T}_a) t + \bar{U}_V A (\bar{T}_i - \bar{T}_a) t + Q_w \quad (5.15)$$

όπου όλα είναι γνωστά και έχουμε μέσες μηνιαίες τιμές.

Υπάρχει, βέβαια, η περίπτωση η αποθήκη να μην έχει τη δυνατότητα να δώσει την παραπάνω ενέργεια γιατί θα κατέβει κάτω από τις θερμοκρασίες βάσης T_{sb1} και T_{sb2} όπως αυτές ορίστηκαν παραπάνω. Τότε, αν θεωρήσουμε ότι $T_{sb1} < T_{sb2}$, η ολική ενέργεια που δίνεται κατά τη διάρκεια του μήνα στο κτίριο είναι:

$$m_f C_{pf} (\bar{T}_s - T_{sb1})$$

Άρα, τελικά, το ποσό ενέργειας που αποδίδεται στο κτίριο είναι το ελάχιστο των δύο ποσοτήτων

$$L_t \text{ και } m_f C_{pf} (\bar{T}_s - T_{sb1})$$

Η μέση μηνιαία θερμοκρασία της αποθήκης \bar{T}_s μπορεί να θεωρηθεί ως μέσος όρος των θερμοκρασιών στην αρχή και στο τέλος του μήνα. Έτσι,

$$\bar{T}_s = \frac{T_{si} + T_{sf}}{2} \quad (5.16)$$

Με βάση τα προαναφερθέντα, η διαδικασία υπολογισμού του Q_N ακολουθεί τα παρακάτω βήματα.

1. Θεωρούμε μία δεδομένη αρχική θερμοκρασία της αποθήκης την 1^η του μηνός T_{si} και εικάζουμε μία τελική T_{sf} . Τότε, η μέση θερμοκρασία της είναι:

$$\bar{T}_s = \frac{T_{si} + T_{sf}}{2}$$

2. Υπολογίζουμε το ϕ , το Q_{Tt} , το L_t και το Q_l σύμφωνα με τα μετεωρολογικά δεδομένα του μήνα, τις παραμέτρους του συστήματος και του κτιρίου και του \bar{T}_s .
3. Έτσι, υπολογίζουμε ένα νέο T_{sf} από τη σχέση:

$$Q_N = Q_{Tt} - L_t - Q_{Ll} = m_f C_{pf} (T_{si} - T_{sf}) \quad (5.17)$$

ή

$$T_{sf} = \frac{Q_{Tt} - L_t - Q_{Ll}}{m_f C_{pf}} + T_{si} \quad (5.18)$$

4. Έχοντας ένα νέο T_{sf} , τα βήματα 1, 2, 3 επαναλαμβάνονται, μέχρις ότου τα υπολογιζόμενα T_{sf} συγκλίνουν.

Όλα τα παραπάνω ισχύουν, εάν η T_{sf} που υπολογίζεται έτσι είναι μεγαλύτερη ή ίση της T_{sb1} . Εάν $T_{sf} < T_{sb1}$ τότε θέτουμε $T_{sf} = T_{sb1}$ και υπολογίζουμε ξανά τα T_s , Q_N , Q_{Ll} και L_t και συνεχίζεται ο υπολογισμός όπως προαναφέρθηκε. Τέλος, εάν η T_{sf} είναι μεγαλύτερη μιας ανώτατης θερμοκρασίας της αποθήκης T_{sp} , τότε θέτουμε $T_{sf} = T_{sp}$ και κάνουμε τα ίδια βήματα.

Αυτός ο ανά μήνα υπολογισμός γίνεται για κάθε μήνα του έτους αρχίζοντας από κάποιο μήνα της άνοιξης για το βόρειο ημισφαίριο με $T_{si} = T_{sb1}$ και η υπολογιζόμενη T_{sf} ενός μήνα είναι η T_{si} του επόμενου. Στο τέλος του ετήσιου υπολογισμού πρέπει να έχουμε θερμοκρασία αποθήκης περίπου ίση με την T_{sb1} , αλλιώς πρέπει να αλλάξουμε τα στοιχεία είτε της αποθήκης είτε των συλλεκτών

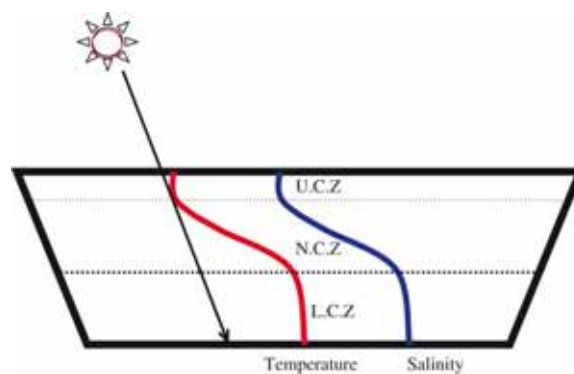
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΕ ΗΛΙΑΚΗ ΛΙΜΝΗ

6.1 Περιγραφή του συστήματος αναφοράς

Το μοντέλο της μικρής ηλιακής λίμνης που θα μελετηθεί είναι κατασκευασμένο από μία πλαστική κυλινδρική δεξαμενή, ύψους ενός μέτρου. Η δεξαμενή είναι μονωμένη με ένα στρώμα πολουρεθάνης, πάχους 150 mm. Ο πυθμένας της δεξαμενής είναι βαμμένος μαύρος και για την έγχυση του ρευστού κατά την οριζόντια διεύθυνση προς όλες τις κατευθύνσεις, χρησιμοποιήθηκε ένας κινητός διαχύτης διαμέτρου 8 cm. Η μεταβλητότητα της αλατότητας επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μία τεχνική αναδιανομής αλατότητας. Κατά τη διαδικασία αυτής της τεχνικής, η λίμνη γεμίζεται μερικώς με ένα διάλυμα NaCl υψηλής αλατότητας. Έπειτα, ψεκάζεται νερό στη λίμνη μέσω του διαχύτη, ο οποίος είναι βυθισμένος στο άνω τμήμα του ήδη υπάρχοντος διαλύματος. Η άλμη διαλύεται σταδιακά, καθώς η στάθμη του νερού ανεβαίνει. Τελικά, ο διαχύτης φτάνει μέχρι το ύψος της επιφάνειας του νερού, στο προκαθορισμένο επίπεδο της στάθμης.

Η προς εξέταση λίμνη, όπως και όλες οι ηλιακές λίμνες μεταβαλλόμενης αλατότητας (οι οποίες έχουν περιγραφεί εκτενώς στο κεφάλαιο 2) αποτελείται από τρία στρώματα: το επάνω στρώμα που ονομάζεται UCZ (Upper Convective Zone) το οποίο στην παρούσα μελέτη έχει πάχος 0.15 m, το ενδιάμεσο στρώμα που ονομάζεται NCZ (Non Convective Zone) το οποίο έχει πάχος 0.60 m και το κατώτερο στρώμα που ονομάζεται LCZ (Lower Convective Zone) και έχει πάχος 0.40 m. Τα στρώματα αυτά, καθώς και η μεταβολή της αλατότητας και της θερμοκρασίας διαμέσου τους φαίνονται αναλυτικά στο σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1

*Σχηματικό διάγραμμα μιας ηλιακής λίμνης μεταβαλλόμενης αλατότητας
UCZ: Upper Convective Zone, LCZ: Lower Convective Zone, NCZ: Non Convective Zone*

Η λίμνη αυτή αποτελεί μέρος μιας πειραματικής μονάδας παραγωγής ενέργειας, η οποία τίθεται, προσωρινά, σε λειτουργία μία φορά το μήνα, με σκοπό να εξεταστεί εάν είναι συμφέρουσα και αποδοτική με σκοπό να μπορεί να χρησιμοποιηθεί συστηματικά. Η μονάδα αυτή περιλαμβάνει, επίσης, έναν μετατροπέα, που ονομάζεται ORC (“Organic Rankine Cycle Engine”), ο οποίος αντλεί ζεστό νερό από τον πυθμένα της λίμνης για να εξατμίσει ένα χημικό με χαμηλό σημείο ζέσεως, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στα ψυγεία. Ο παραγόμενος ατμός μετατρέπεται στη συνέχεια σε αέριο μεγάλης πίεσης, έτσι ώστε να αποτελέσει το εργαζόμενο μέσο σε έναν αεριοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μόλις χρησιμοποιηθεί, το αέριο ψύχεται, συμπυκνώνεται και επανακυκλοφορεί, ακριβώς όπως συμβαίνει σε ένα ψυγείο.

Θεωρούμε ότι μετά από κάθε χρήση, η λίμνη γεμίζεται εκ νέου με νερό προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ξανά τον επόμενο μήνα.



Σχήμα 6.2

Η πειραματική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνει την ηλιακή λίμνη και τη μηχανή ORC

Η πειραματική αυτή μονάδα είναι αντίστοιχη με μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή Alice Springs στην Αυστραλία. Συγκεκριμένα, η ηλιακή λίμνη έχει έκταση 1.600 m², ενώ η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι 15 kW (net). Ανάλογες εφαρμογές για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση νερού από ηλιακή λίμνη, δίνονται στον πίνακα I.

Πίνακας I

Τοποθεσία	Επιφάνεια Λίμνης (m²)	Ισχύς (kW)
Ein Boqek (Israel)	6.250	150
Beith Ha'Arava (Israel)	250.000	5.000
Alice Springs (Australia)	1.600	15
El Paso (USA)	3.350	70/330

6.2 Το θερμοκρασιακό προφίλ της ηλιακής λίμνης

Θεωρώντας ότι το σύστημα της λίμνης έχει μεταβεί σε κατάσταση ευστάθειας, το θερμοκρασιακό προφίλ για το ενδιάμεσο στρώμα της λίμνης (δηλαδή τη NCZ) μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$T(z) = \left(\frac{1}{k}\right) \cdot \int_{z_1}^z (S(z) - Q_o) dz + T_1 \quad (6.1)$$

Όπου k είναι η θερμική συναγωγιμότητα του νερού σε W/m^2 , Q_o ο ρυθμός απώλειας θερμότητας στη LCZ (περιλαμβάνει και τη μεταφορά ενέργειας από τη LCZ στο έδαφος) σε W/m^2 , T_1 η θερμοκρασία της UCZ σε $^{\circ}C$, z η απόσταση κατά τον κατακόρυφο άξονα από την επιφάνεια της λίμνης σε m, z_1 η απόσταση της επιφάνειας επαφής της UCZ με την NCZ από την επιφάνεια της λίμνης σε m και S η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας σε W/m^2 , η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$S(z) = (1 - r) \cdot H \cdot h(z) \quad (6.2)$$

όπου H η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε W/m^2 και $h(z)$ είναι το ποσοστό της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, το οποίο δεν έχει απορροφηθεί σε βάθος z και το οποίο δίνεται είτε από τη σχέση (σύμφωνα με τους Rabl και Nielsen):

$$h(z) = \sum_{n=1}^4 \gamma_n \cdot \exp(-\mu_n \cdot z) \quad (6.3)$$

όπου γ_n και μ_n σταθερές, είτε από τη σχέση (σύμφωνα με τους Bryant και Colbeck):

$$h(z) = a - b \ln(z) \quad (6.4)$$

όπου $a=0.36$ και $b=0.08$

Οι εξισώσεις 6.3 και 6.4 δίνουν περίπου ίδια αποτελέσματα. Επομένως, για λόγους απλοποίησης του προβλήματος θα χρησιμοποιηθεί η εξίσωση 6.4. Συγκεκριμένα, σε αυτή την εξίσωση z είναι το οπτικό μονοπάτι που ακολουθεί η ακτινοβολία μέσα στο νερό και το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$z = \frac{x}{\cos \theta_i} \quad (6.5)$$

όπου x είναι το βάθος της λίμνης και θ_i η γωνία διάθλασης. Ωστόσο, στην παρούσα μελέτη θα ληφθεί $z=x$ για χάρη απλοποίησης. Οπότε, το προφίλ της θερμοκρασίας δίνεται τώρα από την απλουστευμένη σχέση:

$$T(z) = \left(\frac{1}{k}\right) \cdot [(1 - r) \cdot H \cdot (0.44 \cdot (z - z_1) + 0.08 \cdot (z_1 \cdot \ln z_1)) - Q_o \cdot (z - z_1)] + T_1 \quad (6.6)$$

Η παραπάνω εξίσωση υπολογίζει τη μέση θερμοκρασία της ημέρας στην NCZ της λίμνης. Επομένως, η ακτινοβολία H είναι ημερήσια ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου. Ωστόσο, η ανακλαστικότητα r μεταβάλλεται ανάλογα με την ώρα και την ημέρα. Επομένως, θα πρέπει να θεωρήσουμε μία μέση τιμή για όλη την ημέρα. Από μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί, έχουν διεξαχθεί μέσες τιμές για την ανακλαστικότητα του νερού για κάθε μήνα του έτους ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής και οι οποίες φαίνονται στον πίνακα 6.1. Προφανώς, οι υπολογισμοί θα πραγματοποιηθούν για την τυπική μέρα κάθε μήνα για την περίοδο από Μάρτιο μέχρι Οκτώβριο για γεωγραφικό πλάτος $\phi=37.97^\circ$, δηλαδή για την περιοχή της Αθήνας.

Πίνακας 6.1
Μέση μηνιαία ανακλαστικότητα (%) του νερού κατά Fresnel για γεωγραφικό πλάτος 30-40°

Μήνας	Ανακλαστικότητα (%)
Μάρτιος	6.2
Απρίλιος	5.2
Μάιος	4.9
Ιούνιος	4.8
Ιούλιος	4.9
Αύγουστος	5.1
Σεπτέμβριος	5.8
Οκτώβριος	7.5

Η θερμοκρασία T_1 της UCZ είναι περίπου ίση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και παραμένει σχεδόν σταθερή. Οπότε, για καθέναν από τους μήνες που θα εξεταστούν η τιμή της T_1 θα ληφθεί ίση με τη μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος για τον εκάστοτε μήνα. Οι τιμές που θα χρησιμοποιηθούν φαίνονται στον πίνακα 6.2 που ακολουθεί.

Πίνακας 6.2
Μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος

Μήνας	Μέση θερμοκρασία T_a (°C)
Μάρτιος	12.3

Απρίλιος	15.9
Μάιος	20.7
Ιούνιος	25.2
Ιούλιος	28.0
Αύγουστος	27.8
Σεπτέμβριος	24.2
Οκτώβριος	19.5

Επίσης, θεωρούμε ότι η εξάρτηση της θερμικής συναγωγιμότητας k του νερού από τη θερμοκρασία και την αλατότητα είναι σχεδόν αμελητέα, οπότε θα ληφθεί σταθερή και ίση με $k=0.6405 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$. Η τιμή των απωλειών Q_o λαμβάνεται ίση με $Q_o=36 \text{ W/m}^2$.

6.3 Αριθμητικοί υπολογισμοί

6.3.1 Μέση στιγμιαία άμεση και διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου G_b και G_d

Οι εν λόγω ακτινοβολίες προκύπτουν με λογιστική ανάλυση των μετρήσεων της ολικής ακτινοβολίας και προσεγγίζονται (σε kW/m^2) για κάθε ώρα, $t=7, 8, \dots, 18$ της ημέρας και για κάθε μέρα, $D=1 \div 365$, του έτους από τις παρακάτω συσχετίσεις:

$$G_b = M_t + A_t \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot D - P_t\right) \quad (6.7)$$

$$G_d = m_t + a_t \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot D - p_t\right) \quad (6.8)$$

Όπου οι συντελεστές M_t , A_t , P_t , m_t , a_t , p_t δίδονται για κάθε ώρα t στον πίνακα 6.3.

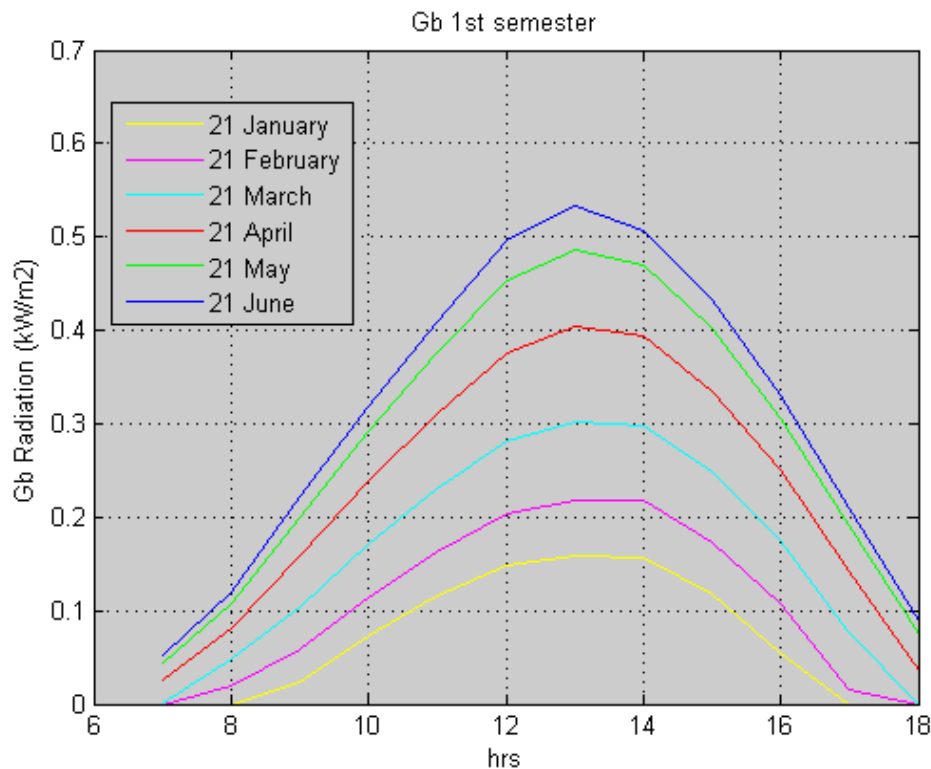
Πίνακας 6.3

Time t hrs LST	M_t kW/m^2	A_t kW/m^2	P_t degrees	m_t kW/m^2	a_t kW/m^2	p_t degrees
07.00	0.007	0.046	86.18	0.048	0.111	81.23
08.00	0.057	0.064	87.31	0.134	0.127	82.45
09.00	0.119	0.104	87.94	0.208	0.133	83.94
10.00	0.191	0.129	88.31	0.261	0.129	85.60
11.00	0.258	0.153	89.35	0.283	0.117	86.05
12.00	0.319	-0.181	-88.88	0.271	0.095	82.71

13.00	0.342	-0.194	-89.18	0.243	0.081	81.95
14.00	0.325	0.183	87.21	0.210	0.083	87.23
15.00	0.269	0.166	86.22	0.176	0.087	89.53
16.00	0.183	0.147	82.10	0.141	-0.085	-88.19
17.00	0.078	0.131	79.85	0.104	-0.079	-88.97
18.00	-0.025	0.114	77.36	0.051	0.091	86.79

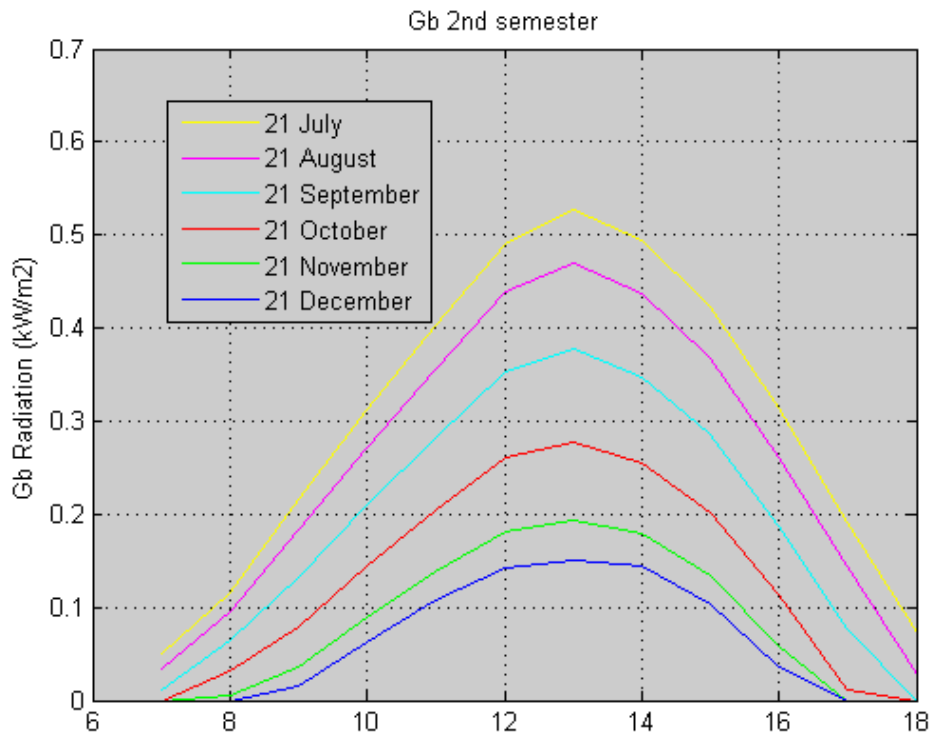
Υπολογίζοντας τις παραπάνω ακτινοβολίες για την 21^η ημέρα κάθε μήνα, προκύπτουν τα εξής διαγράμματα

- Για την στιγμιαία άμεση ακτινοβολία G_b



Σχήμα 6.3

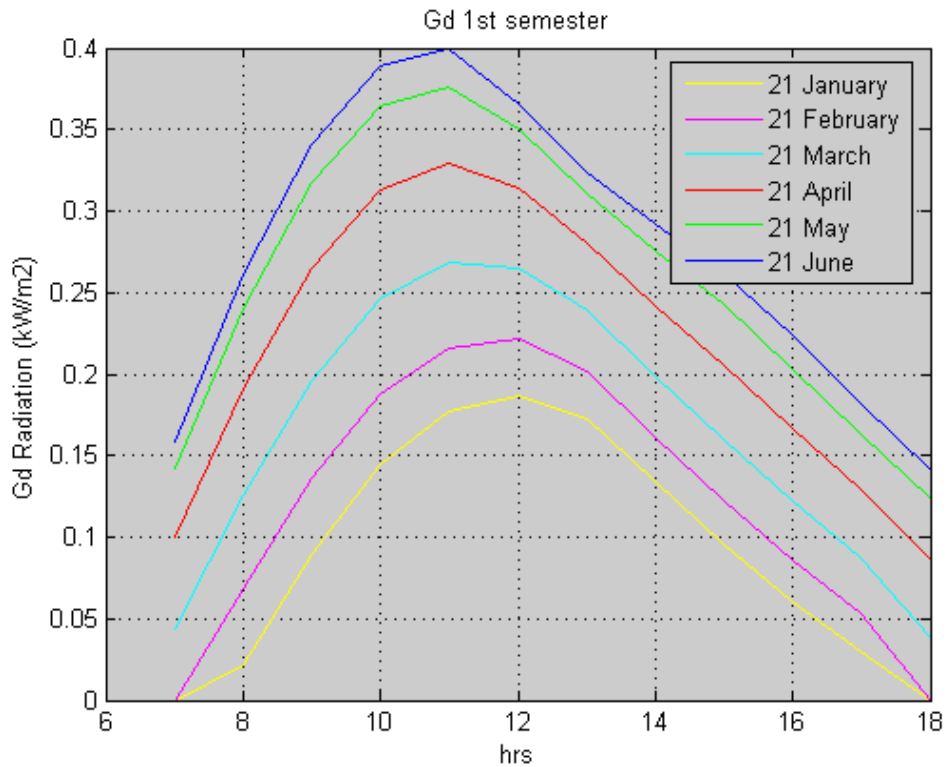
Στιγμιαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου Αθηνών για την 21^η ημέρα κάθε μήνα του πρώτου εξαμήνου του τυπικού έτους για τις ώρες 7 ÷ 18



Σχήμα 6.4

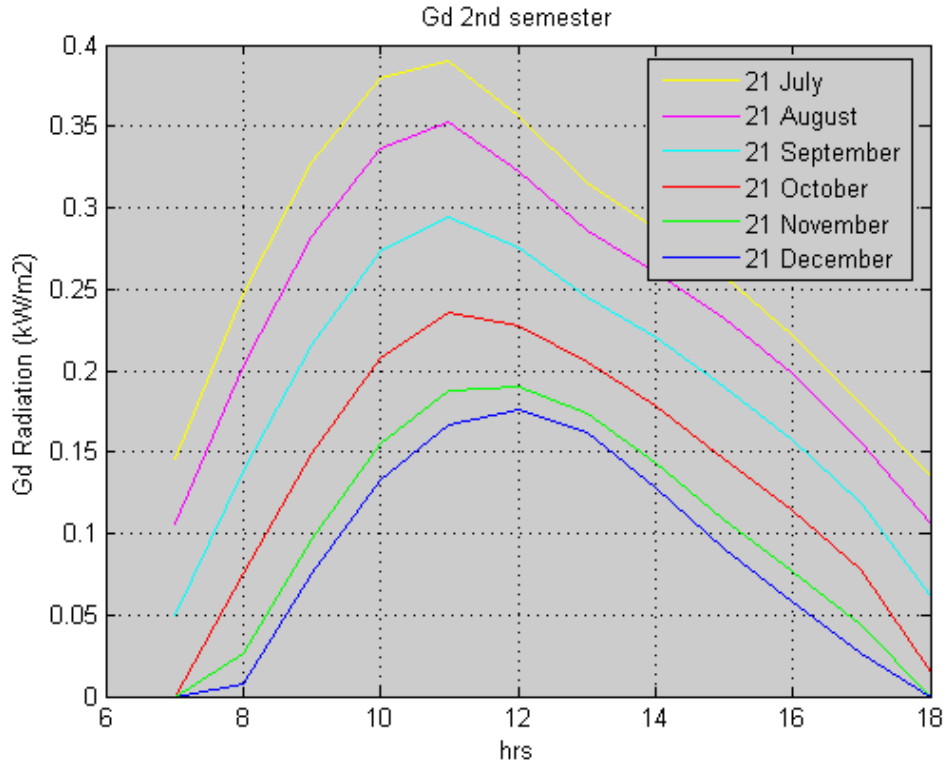
Στιγμαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου Αθηνών για την 21^η ημέρα κάθε μήνα του δεύτερου εξαμήνου του τυπικού έτους για τις ώρες 7 ÷ 18

- Για τη στιγμιαία διάχυτη ακτινοβολία G_d



Σχήμα 6.5

Στιγμαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου Αθηνών για την 21^η ημέρα κάθε μήνα του πρώτου εξαμήνου του τυπικού έτους για τις ώρες 7 ÷ 18



Σχήμα 6.6

Στιγμιαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου Αθηνών για την 21^η ημέρα κάθε μήνα του δευτέρου εξαμήνου του τοπικού έτους για τις ώρες 7 ÷ 18

6.3.2 Ολική στιγμιαία ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου G_w

Γνωρίζοντας τις παραπάνω ακτινοβολίες, μπορούμε να υπολογίσουμε την **ολική ακτινοβολία** που εισέρχεται στην ηλιακή λίμνη G_w (kW/m²) η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$G_w(t) = P \cdot G_{bn}(t) + P_{60} \cdot G_d(t) = P \cdot \frac{G_b(t)}{\cos \theta} + P_{60} \cdot G_d(t) \quad (6.9)$$

όπου

P είναι ένα μέγεθος, το οποίο δείχνει το μέρος της προσπίπτουσας άμεσης ακτινοβολίας, η οποία εισέρχεται στο νερό της λίμνης και υπολογίζεται από η σχέση:

$$P = 1 - \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\sin^2(\theta - \theta_i)}{\sin^2(\theta + \theta_i)} + \frac{\tan^2(\theta - \theta_i)}{\tan^2(\theta + \theta_i)} \right] \quad (6.10)$$

Όπου θ είναι η **γωνία πρόσπτωσης**, η οποία για οριζόντιες επιφάνειες ταυτίζεται με τη γωνία ζενίθ και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\cos \theta = \cos \delta \cdot \cos \Phi \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin \Phi \quad (6.11)$$

Όπου δ , Φ και ω είναι η *ηλιακή απόκλιση*, το *γεωγραφικό πλάτος* (για την Αθήνα $\phi=37.97^\circ$) και η *ωριαία γωνία*, αντίστοιχα.

Η *γωνία διάθλασης* θ_i , η οποία υπολογίζεται από το νόμο του Fresnel, δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta_i} = \frac{n_{water}}{n_{air}} \quad (6.12)$$

Μία πολύ καλή προσέγγιση για την αναλογία για τον δείκτη διάθλασης $\frac{n_{water}}{n_{air}}$ είναι η

τιμή 1.333.

Το μέγεθος P_{60} υπολογίζεται από τη σχέση 6.10 για $\theta=60^\circ$ και $\theta_i=41^\circ$.

Το μέγεθος G_{bn} είναι η *άμεση ακτινοβολία* που δέχεται το *κάθετο επίπεδο* στις ηλιακές ακτίνες και το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση που εξετάζεται, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$G_{bn} = \frac{G_b}{\cos \theta} \quad (6.13)$$

Για τον υπολογισμό, επομένως, της ολικής ακτινοβολίας που δέχεται η λίμνη, υπολογίζεται αρχικά η *ηλιακή κλίση* δ από τη σχέση:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right) \quad (6.14)$$

όπου $n=1 \div 365$ είναι η μέρα του έτους. Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται για την 21^η μέρα κάθε μήνα, για όλο το έτος.

Η *ωριαία γωνία* ω , η οποία είναι η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί τον άξονά της με ρυθμό $15^\circ/h=0.25^\circ/\text{min}$, δίδεται από τη σχέση:

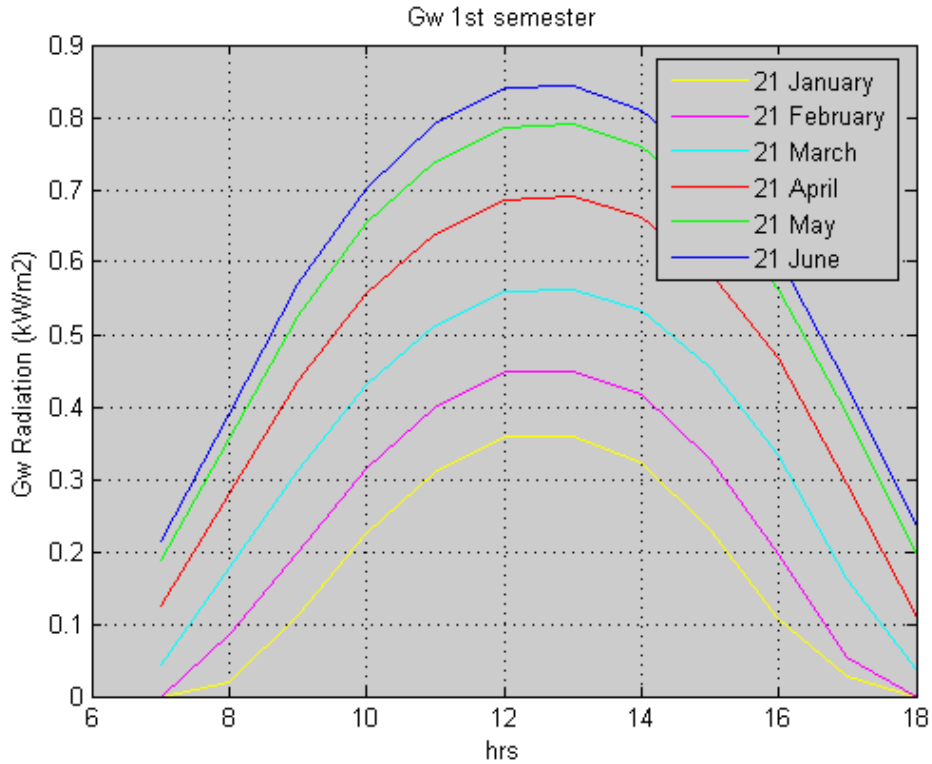
$$\omega = 0.25x(\text{min από το ηλιακό μεσημέρι}) \quad (6.15)$$

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

Η ωριαία γωνία υπολογίζεται για τις ώρες $t=7, 8, \dots, 18$ της 21^{ης} μέρας κάθε μήνα, για όλους τους μήνες του έτους.

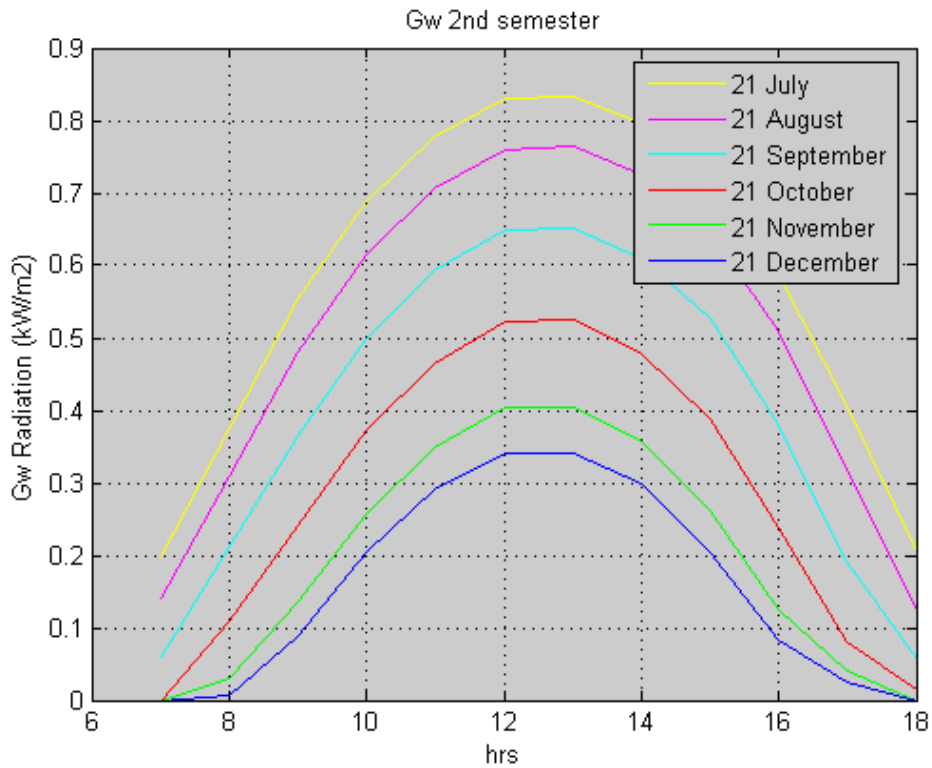
Ακολουθώς, υπολογίζεται η γωνία πρόσπτωσης θ (σχ.6.11) για τις ώρες $t=7, 8, \dots, 18$ της 21^{ης} κάθε μήνα, για ολόκληρο το έτος και, εν συνεχεία, η γωνία διάθλασης θ_i (σχ. 6.12) για τις ίδιες ημέρες και ώρες.

Με γνωστά τα παραπάνω μεγέθη, υπολογίζεται το μέγεθος P για τις ίδιες ημέρες και ώρες και με αντικατάσταση στη σχέση 6.9, λαμβάνουμε τη ζητούμενη ακτινοβολία της λίμνης.



Σχήμα 6.7

Ολική ακτινοβολία που εισέρχεται στη λίμνη για την 21^η ημέρα κάθε μήνα του πρώτου εξαμήνου του τοπικού έτους για τις ώρες 7 ÷ 18



Σχήμα 6.8

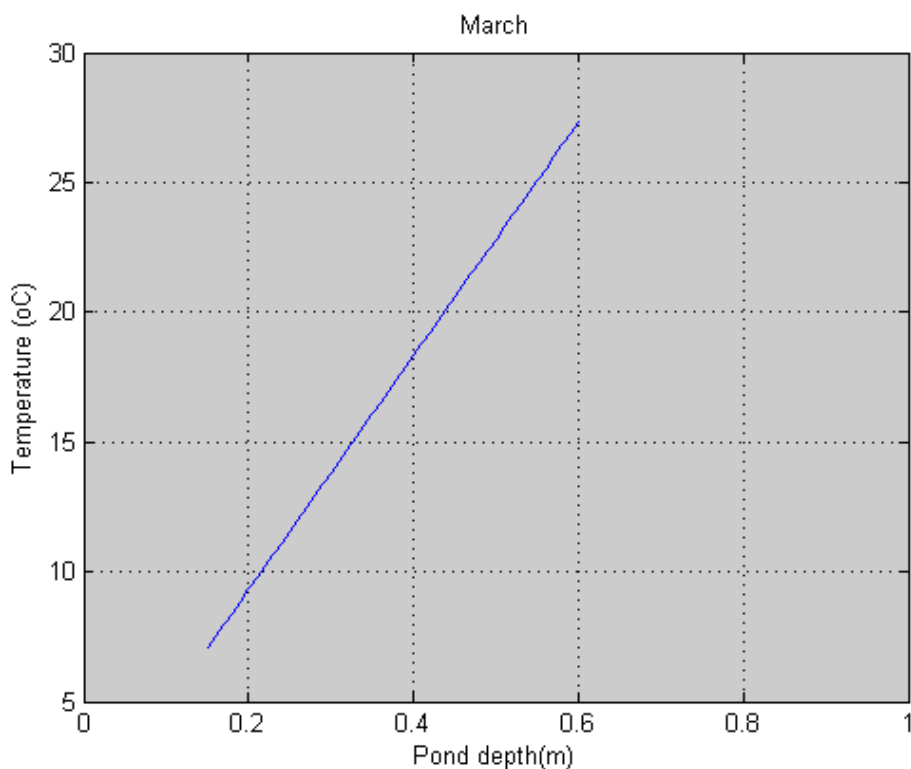
Ολική ακτινοβολία που εισέρχεται στη λίμνη για την 21^η ημέρα κάθε μήνα του δεύτερου εξαμήνου του τοπικού έτους για τις ώρες 7 ÷ 18

6.3.3 Μέση ημερήσια ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου H και θερμοκρασιακή μεταβολή στη ζώνη NCZ

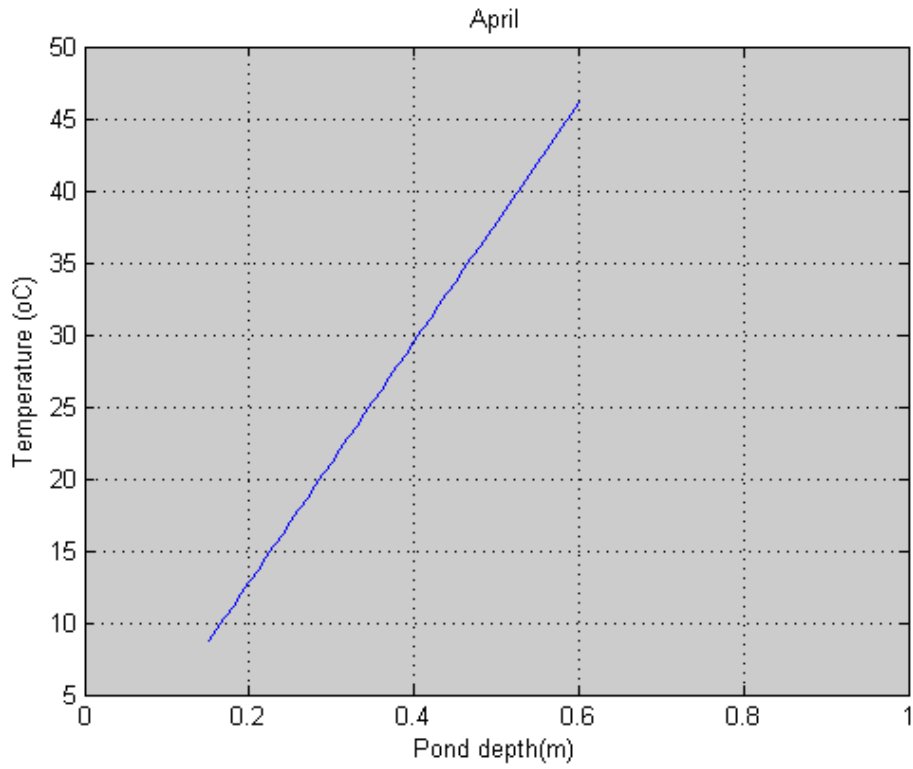
Για κάθε ημέρα, $D=1 \div 365$, του τυπικού έτους, η μέση ημερήσια ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου προσεγγίζεται (σε kWh/m^2) από τη σχέση:

$$H = 4.348 + 2.676 \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot D - 86.410\right) \quad (6.16)$$

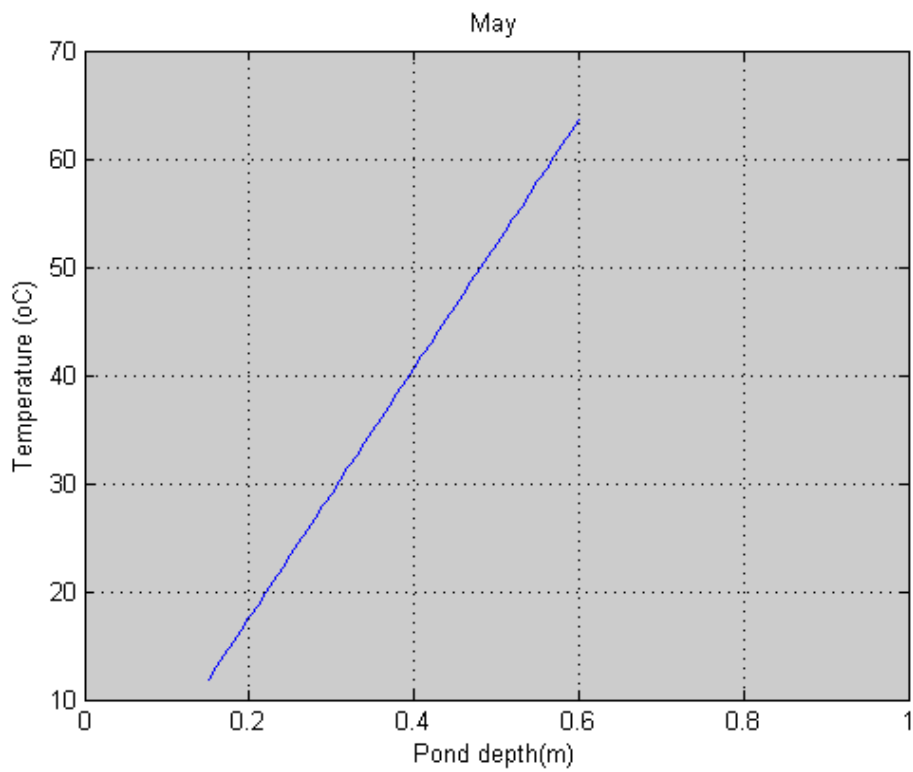
Η εν λόγω ακτινοβολία υπολογίστηκε για την τυπική μέρα του κάθε μήνα της περιόδου από Μάρτιο έως Οκτώβριο. Εν συνεχεία, έγινε αντικατάσταση όλων των μεγεθών στην εξίσωση 6.6 και με τις ανάλογες μετατροπές στις μονάδες υπολογίστηκε η μεταβολή της θερμοκρασίας στην NCZ για κάθε μήνα. Η μεταβολή αυτή φαίνεται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



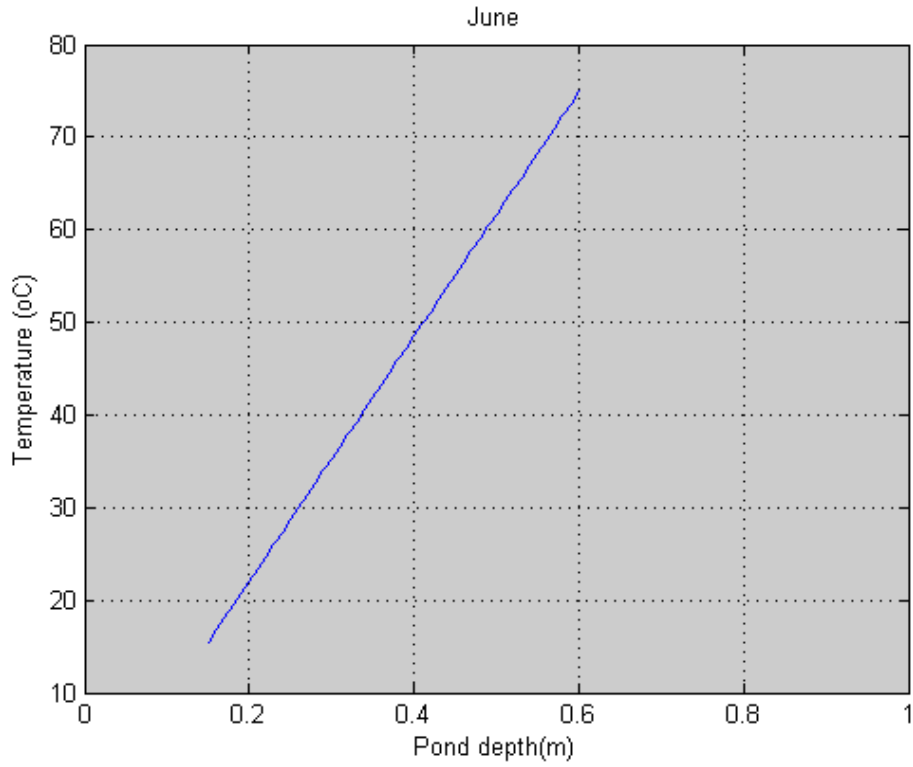
Σχήμα 6.9
Θερμοκρασιακή μεταβολή στην NCZ της λίμνης κατά την τυπική ημέρα του Μαρτίου



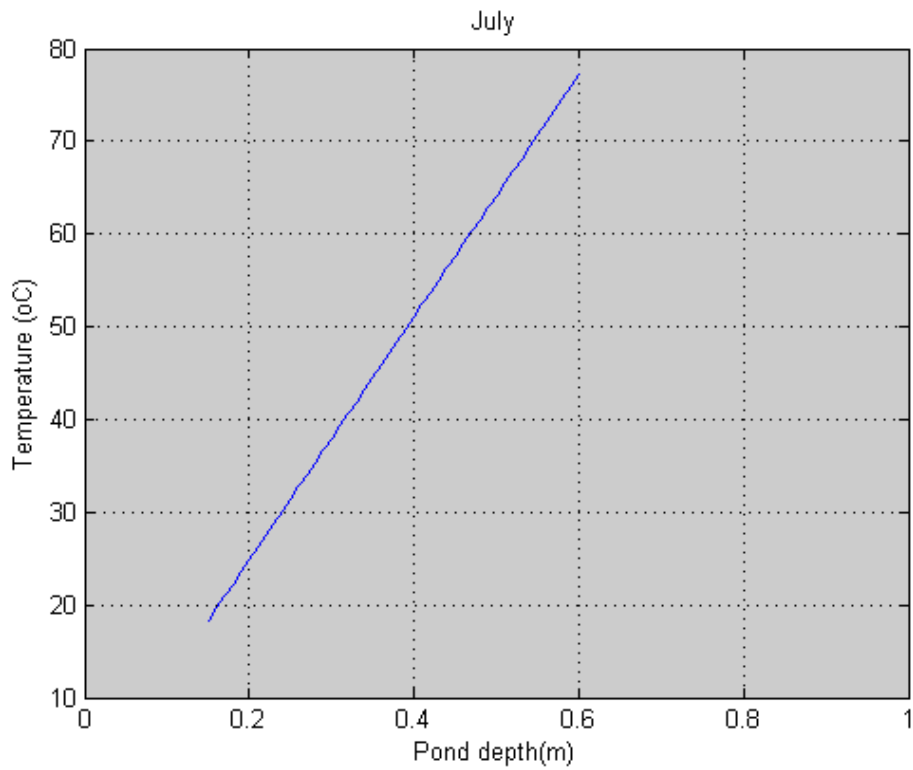
Σχήμα 6.10
Θερμοκρασιακή μεταβολή στην NCZ της λίμνης κατά την τοπική ημέρα του Απριλίου



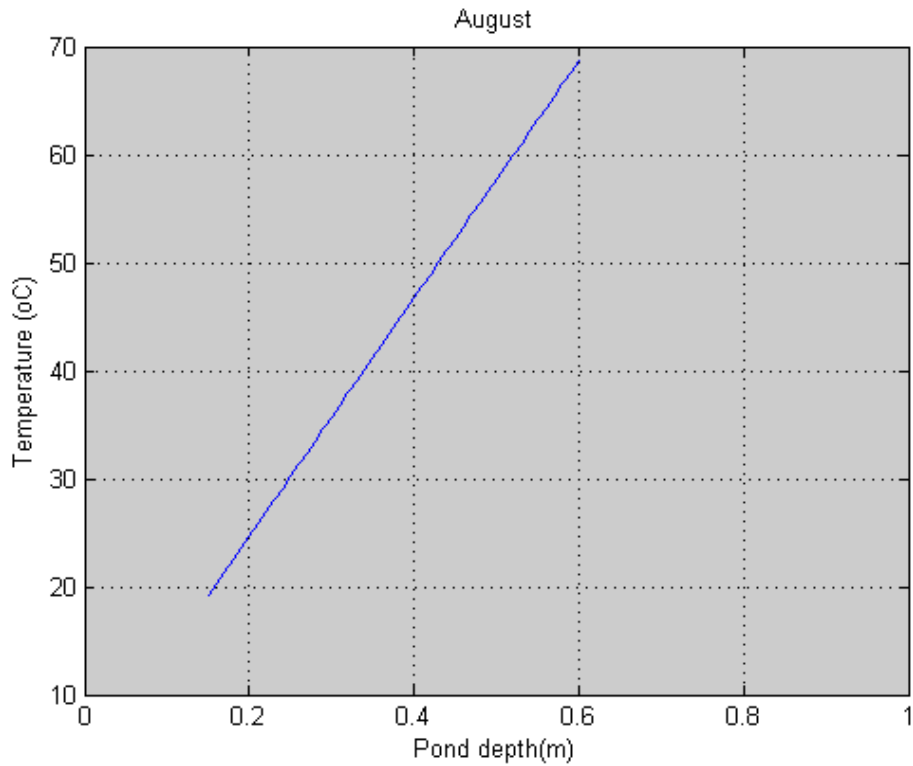
Σχήμα 6.11
Θερμοκρασιακή μεταβολή στην NCZ της λίμνης κατά την τοπική ημέρα του Μαΐου



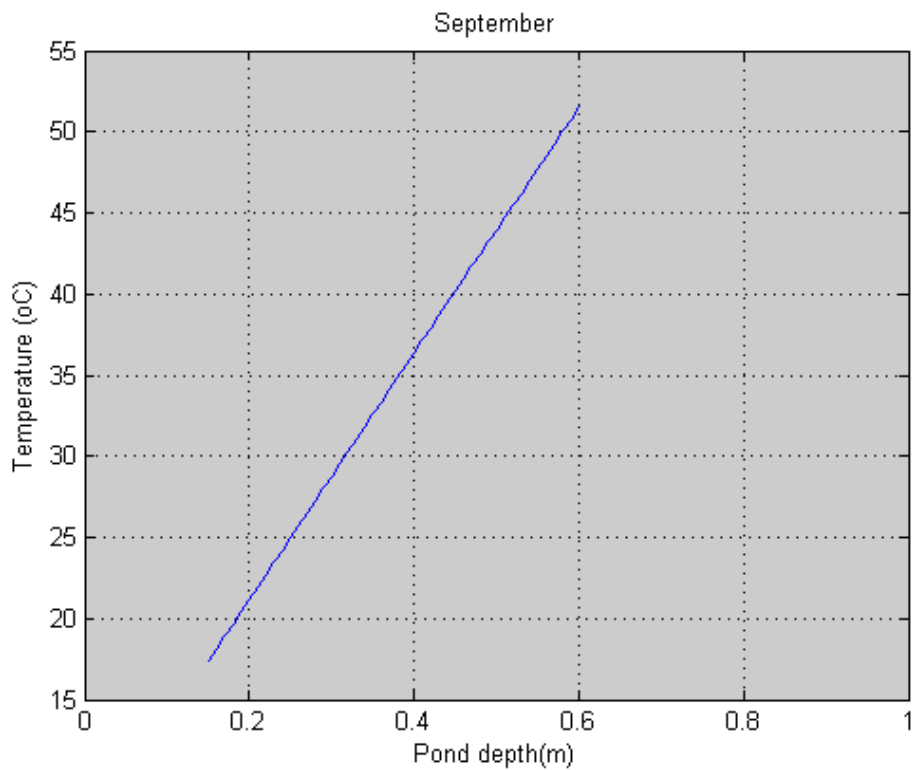
Σχήμα 6.12
Θερμοκρασιακή μεταβολή στην NCZ της λίμνης κατά την τοπική ημέρα του Ιουνίου



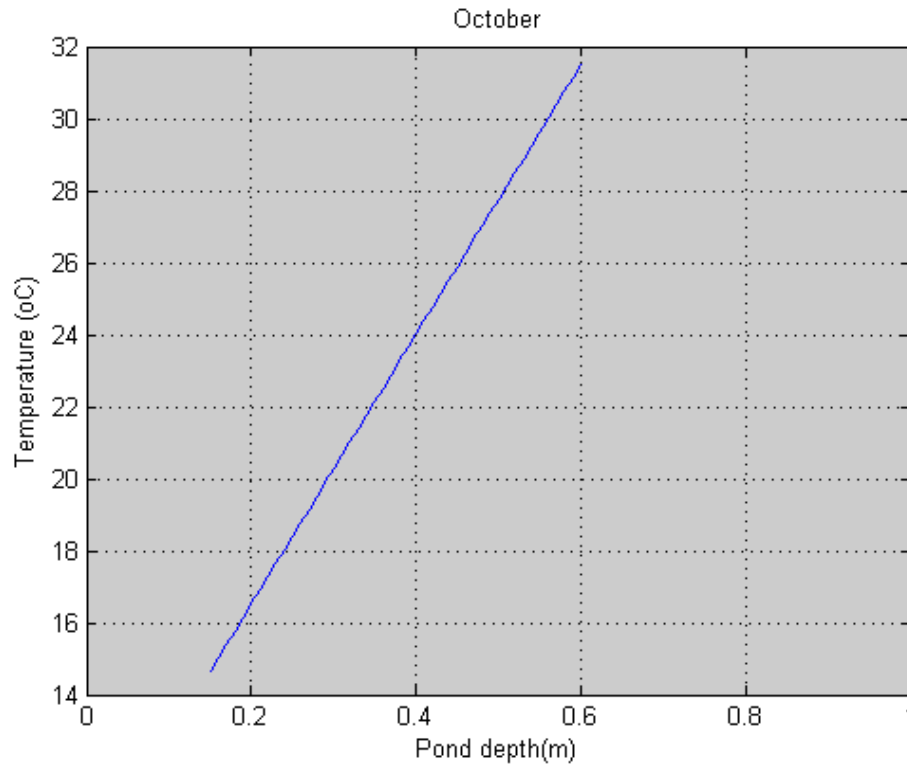
Σχήμα 6.13
Θερμοκρασιακή μεταβολή στην NCZ της λίμνης κατά την τοπική ημέρα του Ιουλίου



Σχήμα 6.14
Θερμοκρασιακή μεταβολή στην NCZ της λίμνης κατά την τοπική ημέρα του Αυγούστου

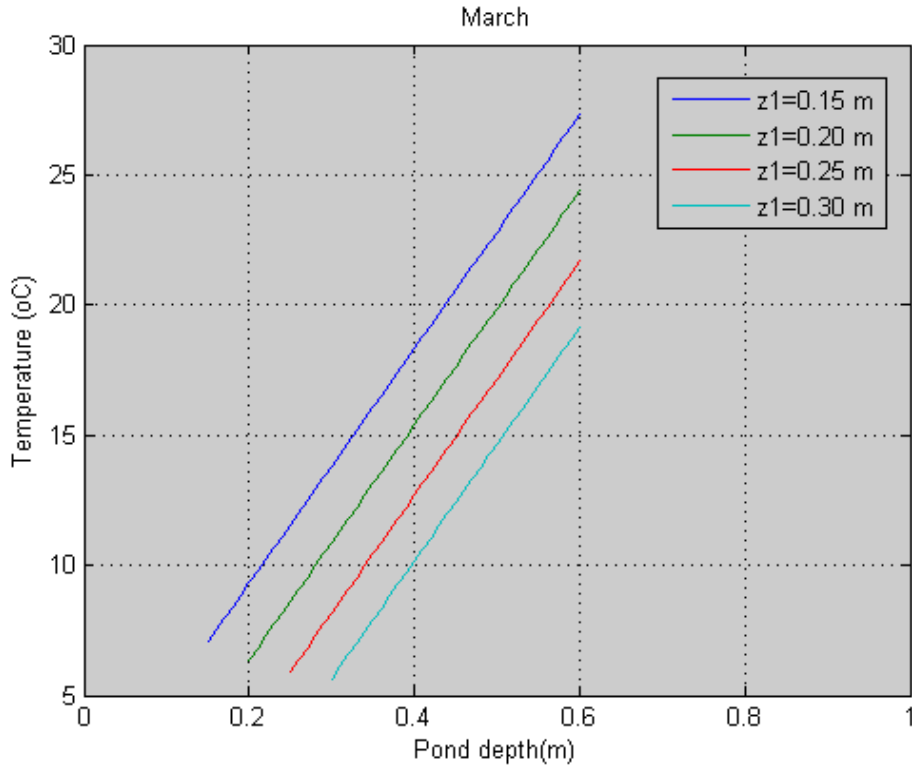


Σχήμα 6.15
Θερμοκρασιακή μεταβολή στην NCZ της λίμνης κατά την τοπική ημέρα του Σεπτεμβρίου

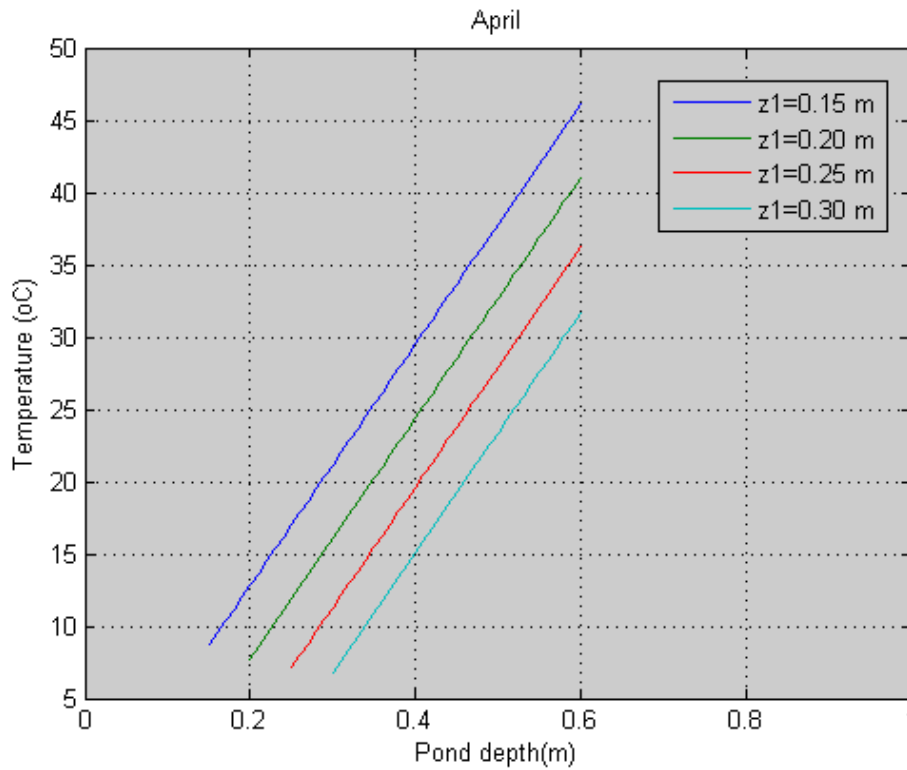


Σχήμα 6.16
Θερμοκρασιακή μεταβολή στην NCZ της λίμνης κατά την τοπική ημέρα του Οκτωβρίου

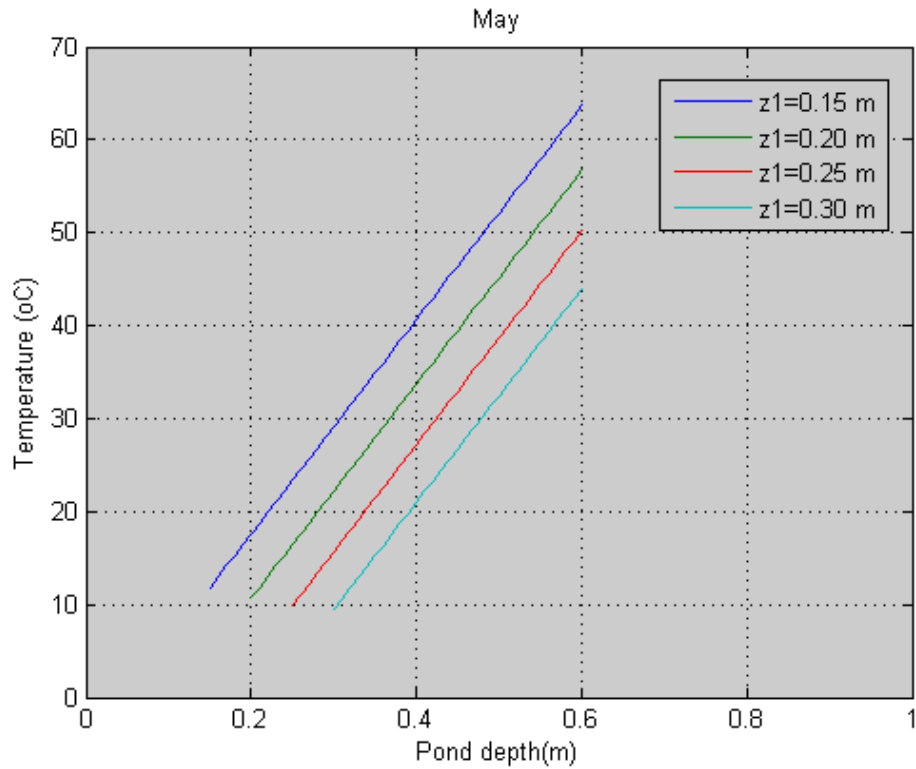
Στη συνέχεια μελετήθηκε η μεταβολή της θερμοκρασίας στη NCZ για διάφορες τιμές του πάχους της UCZ, δηλαδή για διάφορες τιμές του z_1 της σχέσης 6.6 (από 0.15 έως 0.30 m). Σημειώνεται, πως το συνολικό βάθος της λίμνης z παραμένει σταθερό και ίσο με 1 m. Προφανώς, αυξάνοντας την τιμή του z_1 , μεγαλώνει το πάχος της UCZ και μειώνεται το πάχος της NCZ, αντίστοιχα, όπως μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί και από το σχήμα 6.2.



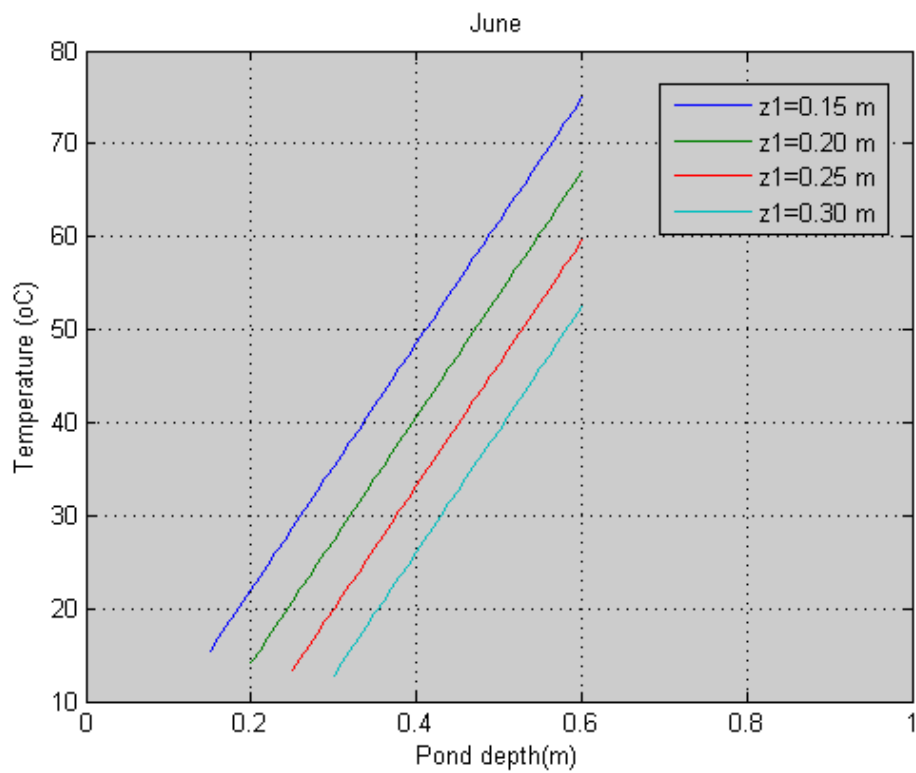
Σχήμα 6.17
Μεταβολή της θερμοκρασίας στη NCZ για διάφορες τιμές του πάχους της UCZ κατά τον μήνα Μάρτιο



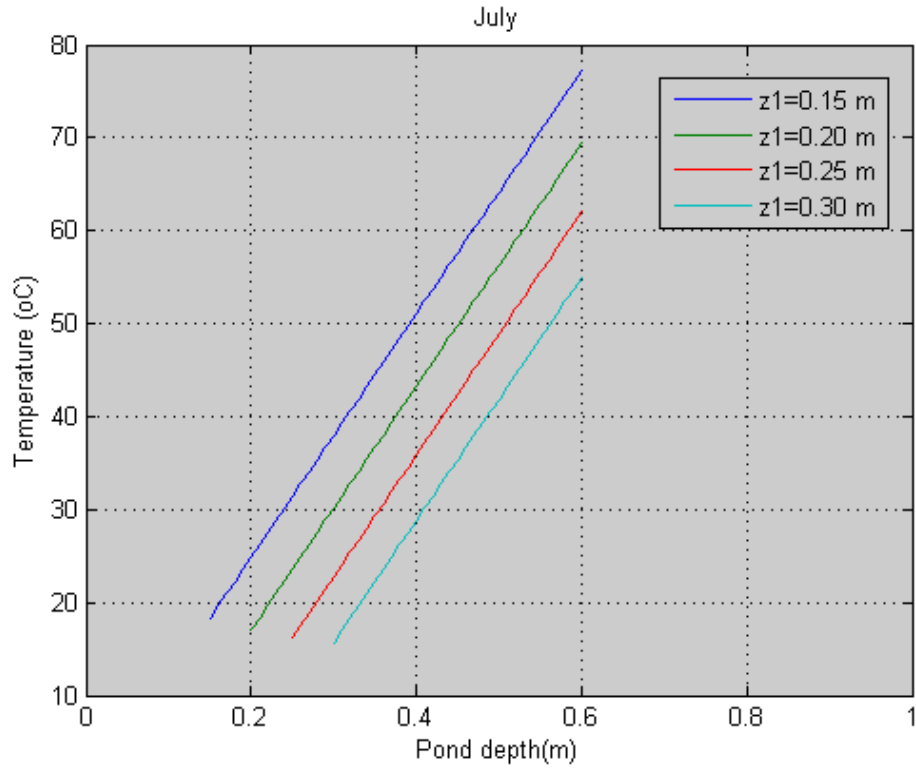
Σχήμα 6.18
Μεταβολή της θερμοκρασίας στη NCZ για διάφορες τιμές του πάχους της UCZ κατά τον μήνα Απρίλιο



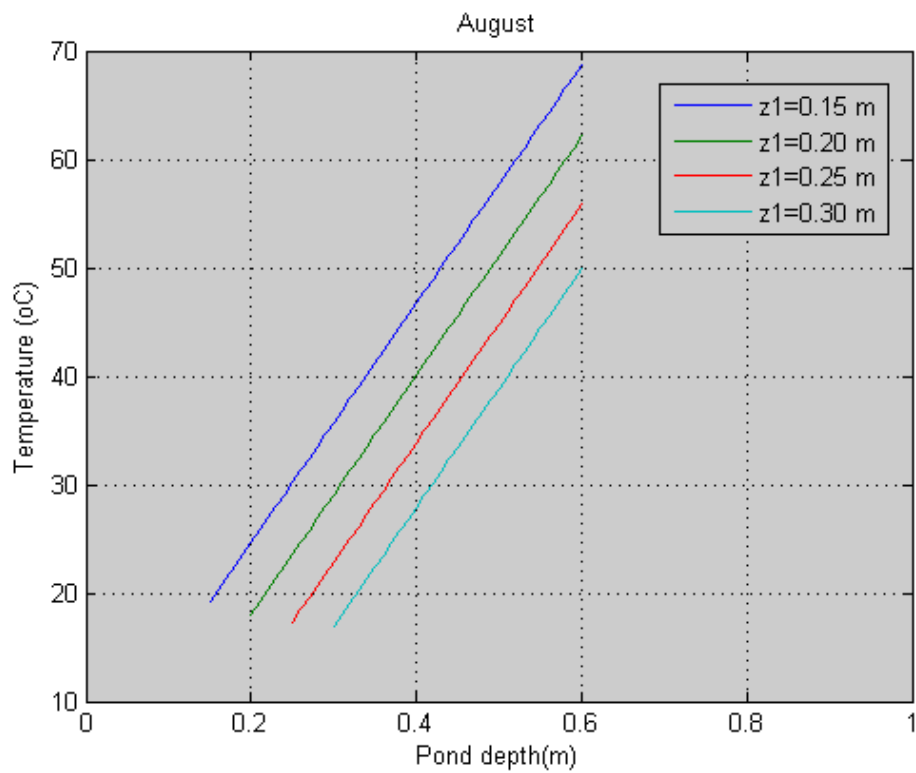
Σχήμα 6.19
Μεταβολή της θερμοκρασίας στη NCZ για διάφορες τιμές του πάχους της UCZ κατά τον μήνα Μάιο



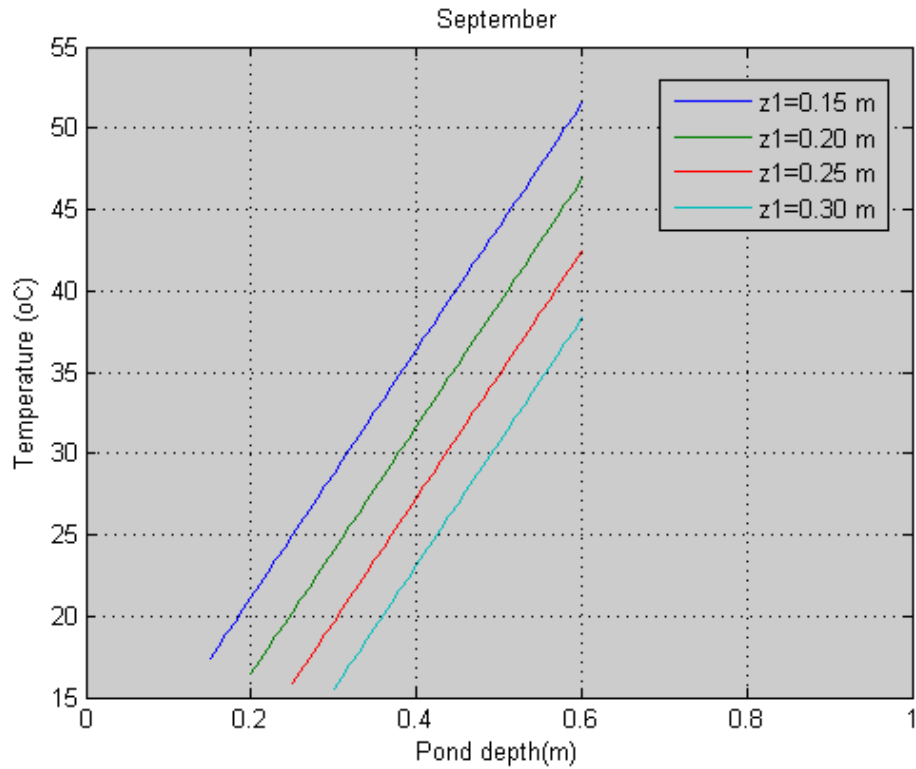
Σχήμα 6.20
Μεταβολή της θερμοκρασίας στη NCZ για διάφορες τιμές του πάχους της UCZ κατά τον μήνα Ιούνιο



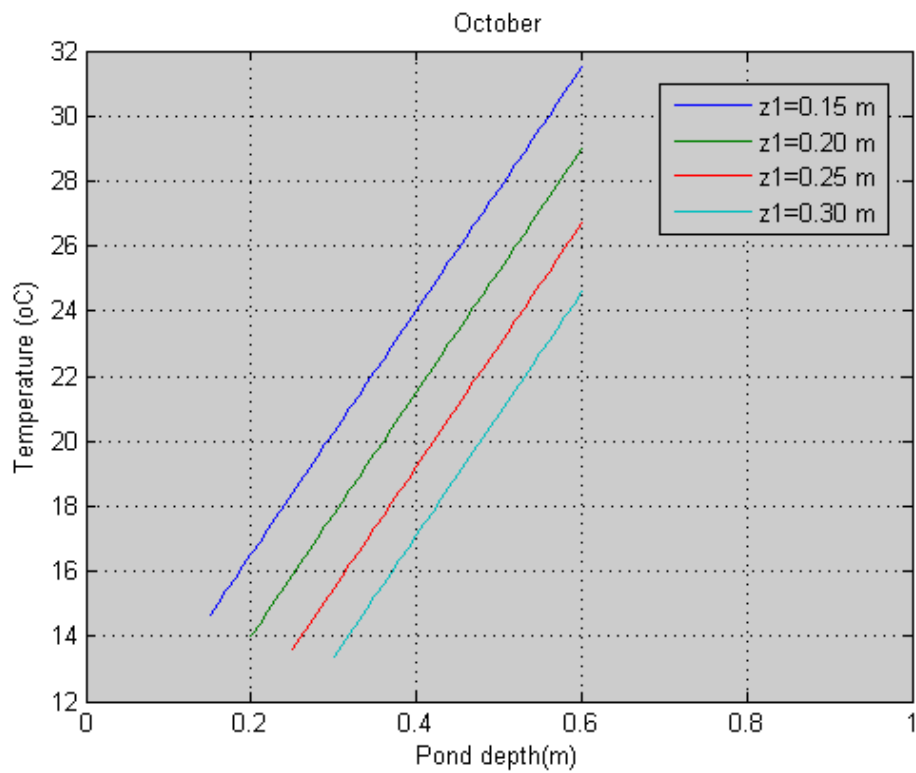
Σχήμα 6.21
Μεταβολή της θερμοκρασίας στη NCZ για διάφορες τιμές του πάχους της UCZ κατά τον μήνα Ιούλιο



Σχήμα 6.22
Μεταβολή της θερμοκρασίας στη NCZ για διάφορες τιμές του πάχους της UCZ κατά τον μήνα Αύγουστο

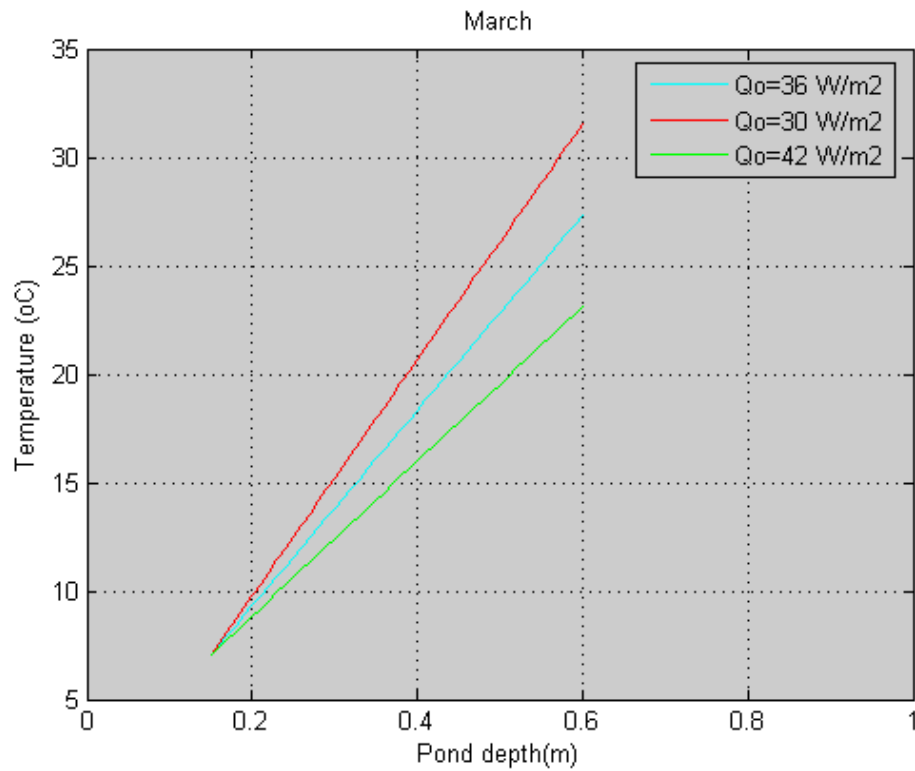


Σχήμα 6.23
Μεταβολή της θερμοκρασίας στη NCZ για διάφορες τιμές του πάχους της UCZ κατά τον μήνα Σεπτέμβριο

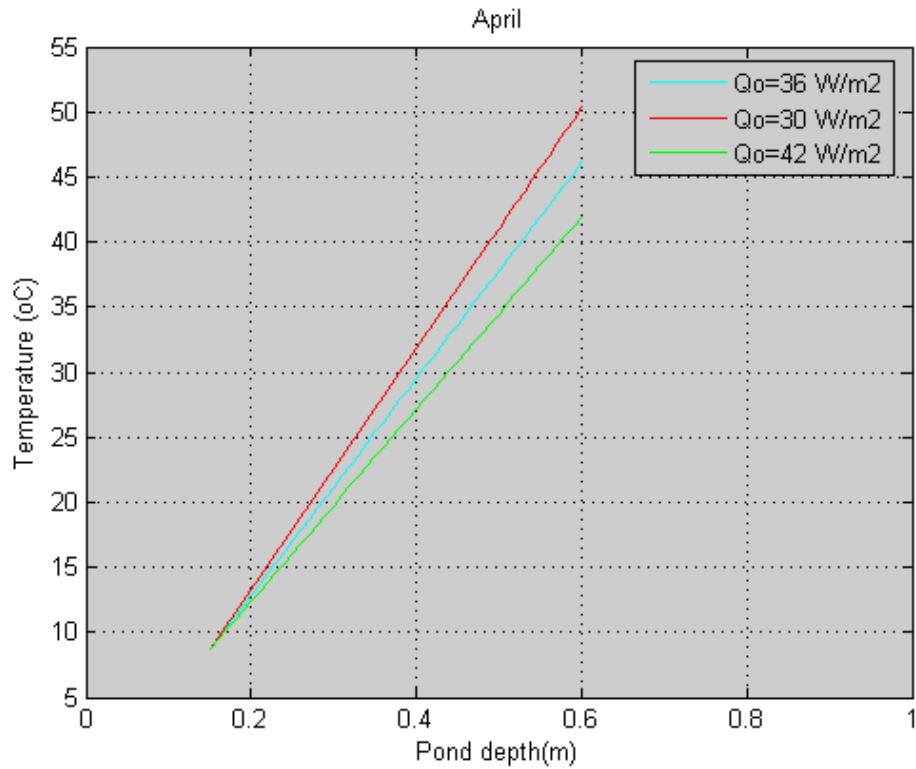


Σχήμα 6.24
Μεταβολή της θερμοκρασίας στη NCZ για διάφορες τιμές του πάχους της UCZ κατά τον μήνα Οκτώβριο

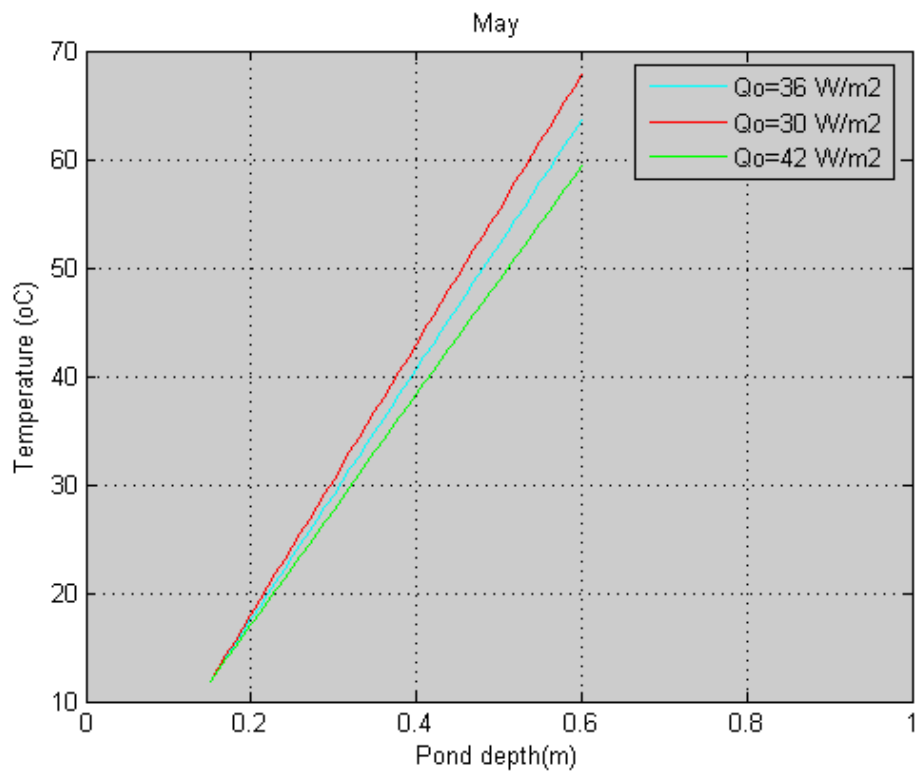
Επίσης, μελετήθηκε η επίδραση των απωλειών Q_o στη διαμόρφωση της θερμοκρασίας στη NCZ.



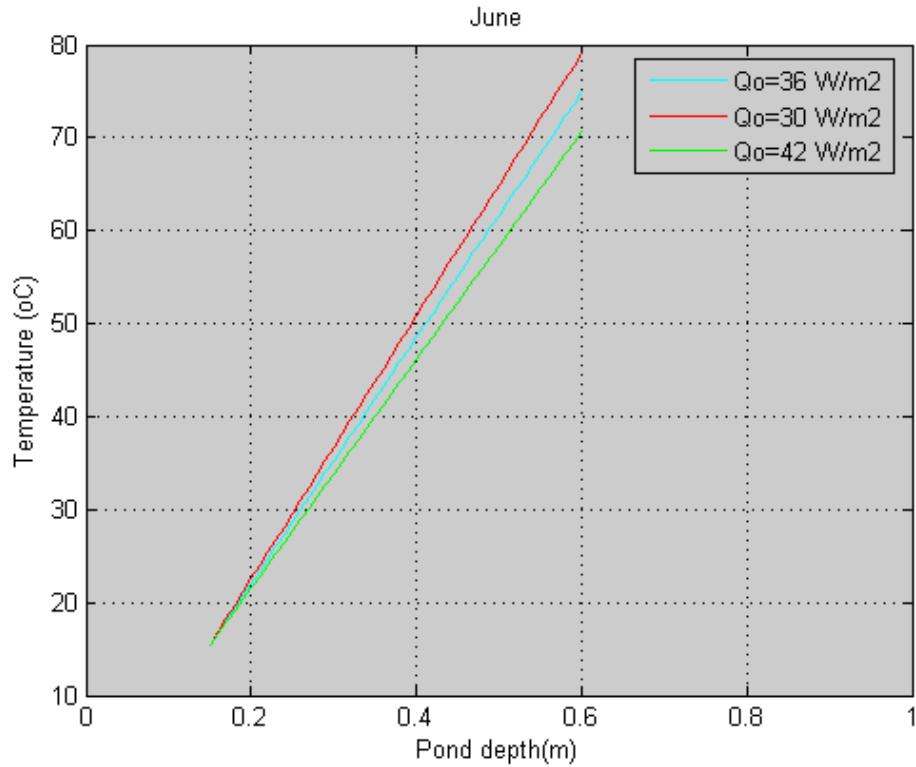
Σχήμα 6.25
Μεταβολή της θερμοκρασίας στη NCZ για διάφορες τιμές των απωλειών Q_o για τον μήνα Μάρτιο



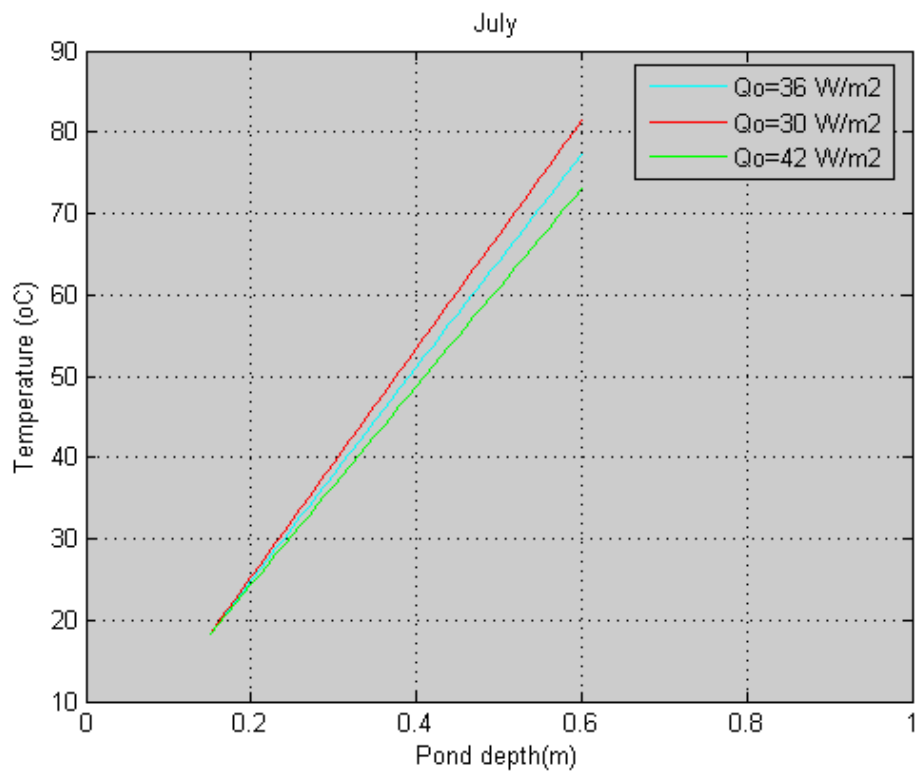
Σχήμα 6.26
Μεταβολή της θερμοκρασίας στη NCZ για διάφορες τιμές των απωλειών Q_o για τον μήνα Απρίλιο



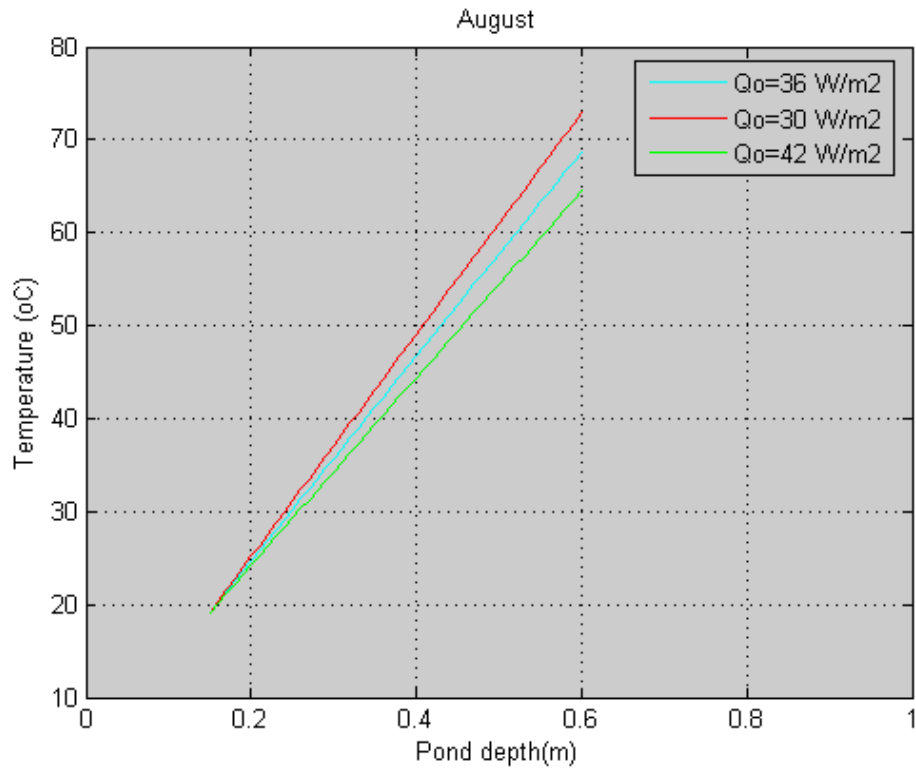
Σχήμα 6.27
Μεταβολή της θερμοκρασίας στη NCZ για διάφορες τιμές των απωλειών Q_o για τον μήνα Μάιο



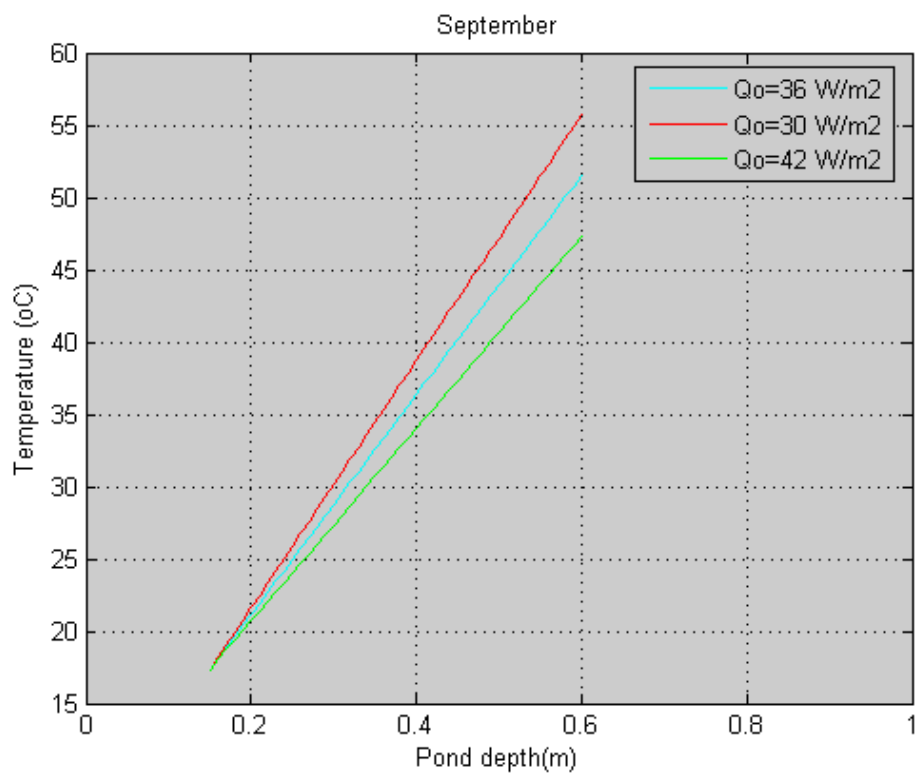
Σχήμα 6.28
Μεταβολή της θερμοκρασίας στη NCZ για διάφορες τιμές των απωλειών Q_o για τον μήνα Ιούνιο



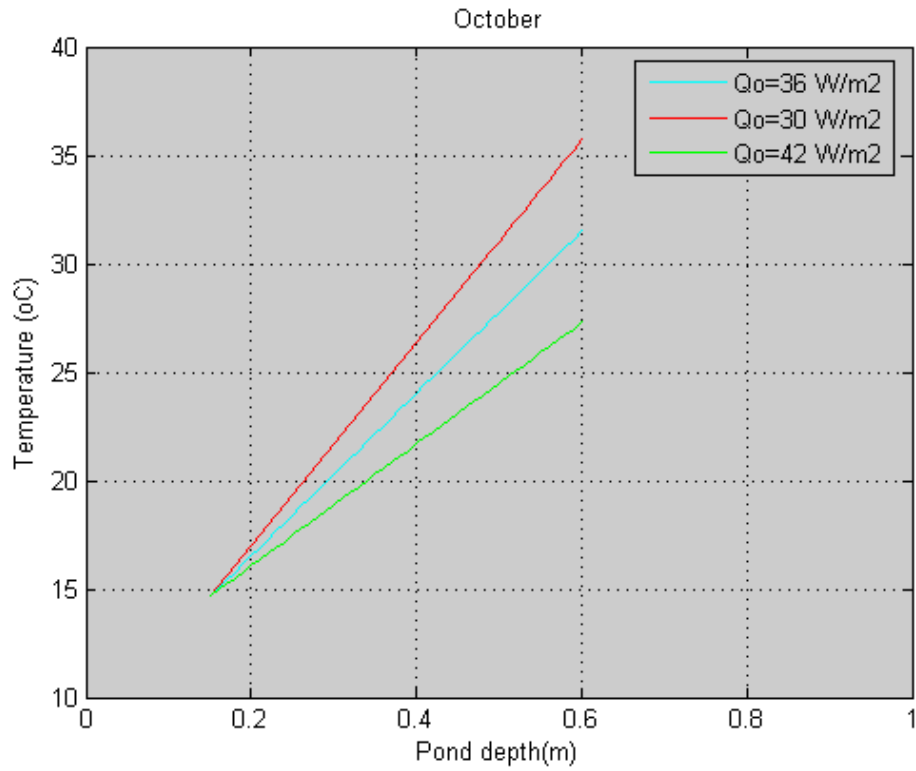
Σχήμα 6.29
Μεταβολή της θερμοκρασίας στη NCZ για διάφορες τιμές των απωλειών Q_o για τον μήνα Ιούλιο



Σχήμα 6.30
Μεταβολή της θερμοκρασίας στη NCZ για διάφορες τιμές των απωλειών Q_o για τον μήνα Αύγουστο



Σχήμα 6.31
Μεταβολή της θερμοκρασίας στη NCZ για διάφορες τιμές των απωλειών Q_o για τον μήνα Σεπτέμβριο



Σχήμα 6.32
Μεταβολή της θερμοκρασίας στη NCZ για διάφορες τιμές των απωλειών Q_o για τον μήνα Οκτώβριο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Η μελέτη της λειτουργίας της ηλιακής λίμνης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, όπως και όλες οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας εξαιτίας του ενεργειακού προβλήματος καθώς και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των ήδη υφιστάμενων τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 6, διαπιστώθηκε πως η παράμετρος που επηρεάζει, κυρίως, τη θερμοκρασία της λίμνης είναι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Συγκεκριμένα, τους μήνες που σημειώνεται μεγαλύτερη ηλιοφάνεια (συνεπώς και μεγαλύτερη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία) έχουμε μεγαλύτερη θερμοκρασιακή άνοδο στη λίμνη. Χρειάζεται, επίσης, να αναφερθεί ότι η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος του εκάστοτε μήνα παίζει ρόλο στην τελική θερμοκρασία της λίμνης, όπως είναι αναμενόμενο. Επιπλέον, παρατηρήθηκε πως αυξανόμενου του πάχους της UCZ (άρα μείωση του πάχους της NCZ), διατηρώντας σταθερό το συνολικό βάθος z της λίμνης, η θερμοκρασία στη NCZ μειώνεται και η μείωση αυτή είναι μεγαλύτερη για μεταβολή του πάχους από 0.15m σε 0.20 m (της τάξης του 13% περίπου) σε σχέση με τις αντίστοιχες μεταβολές από 0.20 m σε 0.25 m και από 0.25 m σε 0.30 m (όπου η μείωση είναι της τάξης του 10.6% και 11.9% περίπου αντίστοιχα). Δεν παρατηρήθηκε εξάρτηση του ποσοστού της μείωσης αυτής από την προσπίπτουσα ακτινοβολία (το ποσοστό της μεταβολής αυτής είναι περίπου σταθερό για όλους τους υπό εξέταση μήνες). Μικρότερη εξάρτηση της θερμοκρασίας στη NCZ διαπιστώθηκε από την τιμή των απωλειών Q_0 , καθώς για μεγάλη μεταβολή στην τιμή των απωλειών προέκυψε σχετικά μικρή μεταβολή της θερμοκρασίας. Επίσης, δεν παρατηρήθηκε εξάρτηση της μεταβολής αυτής από την προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Η παρούσα μελέτη μπορεί να αποτελέσει χρήσιμη πηγή για περαιτέρω μελέτη της αξιοποίησης του νερού της ηλιακής λίμνης και σε άλλες εφαρμογές, όπως είναι η μονάδα αφαλάτωσης. Προφανώς, η θερμοκρασία του νερού της λίμνης είναι ενδεικτικό στοιχείο του ποσού της θερμότητας που μπορεί να αποθηκευτεί στο σύστημα μέσω της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κατά την περίοδο από Μάρτιο μέχρι Οκτώβριο που εξετάστηκε.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Κ. Α. Αντωνόπουλος, Θερμικά – Ηλιακά Συστήματα Μέρος Πρώτο, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2004.

[2] Ινστιτούτο Τεχνολογικών Εφαρμογών / Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής, Πρακτικά 3^{ου} Εθνικού Συνεδρίου για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Α τόμος Θεσσαλονίκη 9-11/11/1988, ΕΛΚΕΠΑ, Εκδόσεις Γιαχούδη – Γιαπούλη.

[3] Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής, Πρακτικά 2^{ου} Εθνικού Συνεδρίου για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Α - Β τόμος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης 6-8 Νοεμβρίου 1985, Εκδόσεις Γιαχούδη – Γιαπούλη.

[4] Edited by G. Furlan, N. A. Mancini, A. A. M. Sayigh, “Nonconventional Energy”, Plenum Press, New York & London 1984.

[5] Unesco International Congress, “The Sun in the Service of Mankind”, Unesco House, Paris 2 – 6 July 1973.

[6] John A. Duffie, William A. Beckman, Solar Energy Laboratory of Wisconsin – Madison, “Solar Engineering of Thermal Processes”, A Wiley – Interscience Publication John Wiley & Sons, 1980.

[7] Ανδρέας Ε. Μοσχάτος Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός, “Ηλιακή Ενέργεια – Συνιστώσες της Ηλιακής Θερμικής Διαδικασίας”, Έκδοση ΤΕΕ, 1992.

[8] Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής - Εργαστήριο Ηλιακών & άλλων Ενεργειακών Συστημάτων ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, 5^ο Εθνικό Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας–Πρακτικά, 6-8 Νοεμβρίου 1996, Αθήνα, Α τόμος, Έκδοση του Ινστιτούτου Ηλιακής Τεχνικής, Εκτύπωση: Εκδόσεις Γιαχούδη – Γιαπούλη.

[9] Π. Γιαννούλης, Α. Α. Κουτινάς, “Ήπιες Μορφές Ενέργειας και Χημική Αποθήκευση Ενέργειας”, Πάτρα 1989.

[10] Ινστιτούτο Τεχνολογικών Εφαρμογών / Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής, Πρακτικά 6^{ου} Εθνικού Συνεδρίου για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Β τόμος, Βόλος 1999.

[11] Κ. Α. Antonopoulos, E. D. Rogdakis, “Correlations for the yearly or seasonally optimum salt-gradient solar pond in Greece”.

[12] M. M. O. Dah, M. Ouni, A. Guizani, A. Belghith, “Study of temperature and salinity profiles development of solar pond in laboratory”.

[13] J. Graham Cogley, “The Albedo of Water as a Function of Latitude”.

[14] www.wikipedia.org

[15] www.noa.gr

[16] www.engineeringtoolbox.com/overall-heat-transfer-coefficients-d_284

[17] <http://www.soilwater.com.au/solar/#POWER>

[18] <http://www.geocities.com/pemnq/solarscan.html>