



3 ΗΛΙΑΚΑ ΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ



Εισαγωγή

Ο Ήλιος αποτελεί τη βασική και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας για τον πλανήτη. Οι απαρχές της ανάπτυξης εφαρμογών αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας χάνονται στα βάθη των αιώνων. Σήμερα έχουν αναπτυχθεί συστήματα που αξιοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία για παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας. Η άμεση μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων, τα οποία παρουσιάζονται στο 4^ο κεφάλαιο του παρόντος βιβλίου. Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή θερμότητας πραγματοποιείται με τα **ηλιακά θερμικά συστήματα**, τα οποία παρουσιάζονται σ' αυτό το κεφάλαιο.

Τα ηλιακά θερμικά συστήματα γενικά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στα **παθητικά ηλιακά συστήματα** και τα **ενεργητικά ηλιακά συστήματα**. Παρ' όλο που ο διαχωρισμός αυτός, σε μερικές περιπτώσεις, δεν είναι εντελώς σαφής, σήμερα θεωρείται, μεθοδολογικά, ευρύτερα αποδεκτός.

Τα **παθητικά ηλιακά συστήματα** μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε θερμότητα μέσω των δομικών στοιχείων ενός κτιρίου (π.χ., μέσω των τοίχων, των παραθύρων κ.λπ.). Ο σχεδιασμός και η χρησιμοποίηση παθητικών συστημάτων εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας ονομάζεται (κυρίως από αρχιτέκτονες, πολιτικούς μηχανικούς κ.λπ.) και εφαρμογή της παθητικής ηλιακής αρχιτεκτονικής [passive solar architecture] στο σχεδιασμό των κτιρίων¹.

Στα **ενεργητικά ηλιακά συστήματα** η συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και η αποθήκευση και η μεταφορά της σε μορφή θερμότητας γίνονται με

¹ Ο σχεδιασμός των ανοιγμάτων του κτιρίου ή των διαφανών καλυμμάτων (π.χ., παραθύρων) ή των συστημάτων σκίασης είναι στοιχείο της παθητικής ηλιακής αρχιτεκτονικής.



τεχνολογικά συστήματα ξεχωριστά από τα οικοδομικά στοιχεία του κτιρίου². Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα μπορούν στη συνέχεια να διαχωριστούν σε ηλιακά συστήματα **θέρμανσης νερού** (με χρήσεις, κυρίως, της κάλυψης των αναγκών σε ζεστό νερό για κτίρια, συμπεριλαμβανομένης της θέρμανσης χώρων), καθώς και σε **θερμικά συστήματα ισχύος** [solar thermal power systems]. Στα τελευταία το υλικό μέσο μεταφοράς της θερμότητας (το νερό ή άλλο υγρό) θερμαίνεται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (>300°C) και η θερμότητα που αναπτύσσεται χρησιμοποιείται για τη λειτουργία ατμοστροβίλων που παράγουν *ηλεκτρική ενέργεια*. Επίσης ένας άλλος διαχωρισμός για τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα είναι ο διαχωρισμός τους ανάλογα με το ύψος της θερμοκρασίας στην οποία θερμαίνουν το υγρό υλικό μέσο (συνήθως νερό) μεταφοράς της θερμότητας [heat transport fluid]. Με βάση αυτό το κριτήριο χωρίζονται σε συστήματα χαμηλών ($\theta < 80^{\circ}\text{C}$), μέσων ($\theta < 200\text{-}250^{\circ}\text{C}$) και υψηλών θερμοκρασιών ($\theta > 250^{\circ}\text{C}$). Τα θερμικά ηλιακά συστήματα χαμηλών και μέσων θερμοκρασιών χρησιμοποιούνται κυρίως για τη θέρμανση ζεστού νερού χρήσης ή για θέρμανση και κλιματισμό χώρων (ηλιακός κλιματισμός-δροσισμός)³ κ.λπ., ενώ τα θερμικά ηλιακά συστήματα υψηλών θερμοκρασιών είναι, ουσιαστικά, τα θερμικά συστήματα ισχύος που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.

Στο πρώτο μέρος του παρόντος κεφαλαίου θα παρουσιαστούν τα παθητικά ηλιακά συστήματα, ενώ στο δεύτερο και στο τρίτο μέρος θα παρουσιαστούν –αντίστοιχα– τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα χαμηλών και μέσων θερμοκρασιών και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα υψηλών θερμοκρασιών (θερμικά συστήματα ισχύος). Τα τρία μέρη του παρόντος κεφαλαίου μπορούν να διαβαστούν με όποια σειρά επιθυμεί ο αναγνώστης, καθώς υπάρχει σχετική αυτοτέλεια μεταξύ τους.

² Οι ηλιακοί συλλέκτες, για παράδειγμα, ανήκουν στην κατηγορία των ενεργητικών ηλιακών συστημάτων.

³ Η σημασία της ενέργειας που καταναλώνεται για θέρμανση και ψύξη είναι τεράστια, καθώς αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης στην Ευρώπη (49% για ψύξη και θέρμανση, 31% για μεταφορές και 20% ηλεκτρική ενέργεια). Πηγή: http://www.estif.org/fileadmin/estif/content/events/downloads/Potential%2520Solar%2520Thermal_Webinar.pdf (29.11.2010).



3.1 Παθητικά θερμικά ηλιακά συστήματα [Passive Solar Energy Systems]

3.1.1 Εισαγωγή

Τα παθητικά θερμικά ηλιακά συστήματα χρησιμοποιούνται κυρίως για τη θέρμανση των χώρων ενός κτιρίου. Ο σχεδιασμός τους συνδέεται με τη βιοκλιματική αρχιτεκτονική⁴ που έχει στόχο την εξασφάλιση συνθηκών θερμικής και οπτικής άνεσης⁵ σε ένα κτίριο αξιοποιώντας την ηλιακή ενέργεια. Η έννοια του βιοκλιματικού σχεδιασμού ή της βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής είναι ευρύτερη απ' αυτή των παθητικών θερμικών ηλιακών συστημάτων και δε θα παρουσιαστεί ως σύνολο στα πλαίσια αυτού του βιβλίου. Η παρουσίαση θα περιοριστεί μόνο στα σημεία που αφορούν την ενσωμάτωση των παθητικών θερμικών ηλιακών συστημάτων στο βιοκλιματικό σχεδιασμό ενός κτιρίου⁶, δηλαδή στα σημεία που εξασφαλίζουν τη θέρμανση των χώρων του κτιρίου με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας.

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, τα παθητικά θερμικά ηλιακά συστήματα συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια, την αποθηκεύουν και τη διανέμουν στο κτίριο αξιοποιώντας τα δομικά στοιχεία του κτιρίου (δηλαδή το κέλυφος του κτιρίου, τα ανοίγματα –παράθυρα κ.λπ.–, τον προσανατολισμό του κτιρίου κ.λπ.) και δε χρησιμοποιούν ξεχωριστές μηχανολογικές κατασκευές (όπως, π.χ., ηλιακοί συλλέκτες)⁷. Σε μερικές περιπτώσεις, για την κυκλοφορία της θερμότητας στο κτίριο μπορεί να χρησιμοποιηθούν κάποιες επιπλέον συσκευές (όπως, π.χ., ανεμιστήρες κ.λπ.).

3.1.2 Βασικές αρχές

Για να γίνει αντιληπτό το πώς λειτουργεί ένα παθητικό θερμικό ηλιακό σύστημα είναι αναγκαίο να περιγραφούν (με συντομία) οι τρεις τρόποι μεταφοράς της θερμότητας, όπως και βασικές έννοιες που αφορούν τη μεταφορά και την αποθήκευση της θερμότητας, καθώς και στο ενεργειακό ισοζύγιο ενός κτιρίου⁸.

⁴ http://www.cres.gr/energy-saving/enimerosi_bioclimatikos.htm.

⁵ Για την έννοια της θερμικής άνεσης [thermal comfort] βλ. <http://www.hse.gov.uk/temperature/thermal/explained.htm>.

⁶ Για παράδειγμα, δε θα γίνει αναφορά στις πλευρές του βιοκλιματικού σχεδιασμού που αφορούν στο δροσισμό ενός κτιρίου κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, που αποτελεί βασικό στόχο για την εξασφάλιση θερμικής άνεσης.

⁷ Βέβαια υπάρχουν και περιπτώσεις που χρησιμοποιείται συνδυασμός παθητικών και ενεργητικών ηλιακών θερμικών συστημάτων και τότε μιλάμε για υβριδικά συστήματα.

⁸ Περισσότερα και αναλυτικότερα όσον αφορά ορισμούς και τεχνικά στοιχεία μπορεί κάποιος να βρει σε πιο εξειδικευμένα βιβλία ή βιβλία με πιο εκτεταμένες παρουσιάσεις, π.χ., Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 105-115, Duffie & Beckman, 2006, σελ. 548-577.



α) Οι τρεις (3) τρόποι μεταφοράς της θερμότητας

Η θερμότητα μεταφέρεται βασικά μέσω τριών βασικών μηχανισμών: μέσω επαφής [conduction], συμμεταφοράς [convection] και ακτινοβολίας [radiation]. Παρακάτω γίνεται σύντομη αναφορά σε κάθε ένα μηχανισμό:

Μεταφορά θερμότητας μέσω επαφής [conduction] συμβαίνει από ένα υλικό σε ένα άλλο όταν τα δύο υλικά είναι σε επαφή μεταξύ τους και υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας (π.χ., από τη θερμή εστία προς τον πάτο ενός μαγειρικού σκεύους).

*Μεταφορά θερμότητας μέσω συμμεταφοράς [convection]*⁹ συμβαίνει όταν ένα ρευστό (υγρό ή αέριο) μετακινείται στο χώρο καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του (π.χ., από τον πάτο ενός μαγειρικού σκεύους το νερό μεταφέρει θερμότητα προς τα πάνω κυκλοφορώντας ανοδικά)¹⁰.

Μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας [radiation] συμβαίνει όταν ένα υλικό ανάλογα με τη θερμοκρασία του εκπέμπει ακτινοβολία στο υπέρυθρο φάσμα μεταφέροντας έτσι θερμότητα στο περιβάλλον¹¹.

β) Ενεργειακό ισοζύγιο στα κτίρια

Σε ένα κτίριο υπάρχει σειρά από *ενεργειακές ροές* που καθορίζουν τελικά τη θερμοκρασία των εσωτερικών του χώρων. Οι *θετικές*¹² *ενεργειακές ροές* που αυξάνουν τη θερμοκρασία ονομάζονται *ενεργειακές απολαβές [energy gains]*, ενώ οι *αρνητικές ενεργειακές ροές* ονομάζονται *ενεργειακές απώλειες [energy losses]*. Στις *ενεργειακές απολαβές* περιλαμβάνονται: η θερμότητα που μπορεί να προσφέρουν στο κτίριο διάφορες συσκευές θέρμανσης των χώρων (π.χ., καλοριφέρ, κλιματιστικά κ.λπ.), η θερμότητα που εκπέμπουν τα σώματα των ανθρώπων και οι ηλεκτρικές συσκευές που βρίσκονται στους χώρους, η θερμότητα που εισέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία κ.λπ. Στις *ενεργειακές απώλειες* (προς το περιβάλλον) περιλαμβάνονται οι απώλειες θερμότητας του κελύφους του κτιρίου (τοίχοι στέγη, ανοίγματα κ.λπ.), από τον αέρα που εισέρχεται στο κτίριο [ventilation and infiltration] κ.λπ. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα έχουν ως στόχο να αυξήσουν

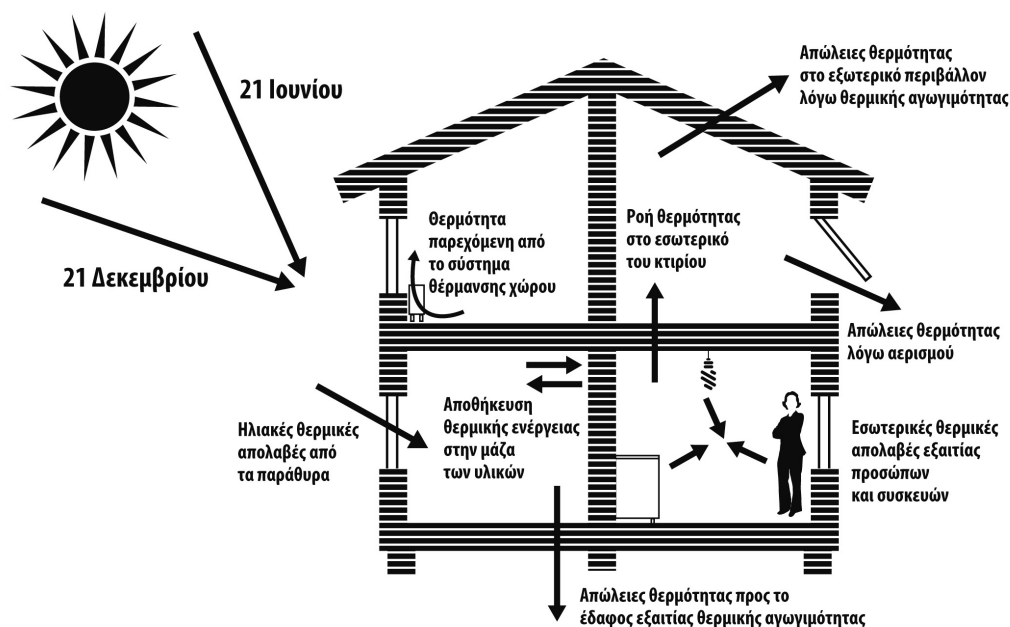
⁹ Ή διαφορετικά με ρεύματα μεταφοράς.

¹⁰ Στο δωμάτιο ενός κτιρίου ο θερμός αέρας ανεβαίνει προς τα πάνω θερμαίνοντας τα πιο ψυχρά στρώματα του αέρα.

¹¹ Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε τοίχο του κτιρίου μεταφέρει θερμότητα (κυρίως στο φάσμα της υπέρυθρης υψηλής συχνότητας) στον τοίχο και ο τοίχος επανεκπέμπει (με μια χρονική υστέρηση) μέρος της θερμότητας σε υψηλότερο μήκος κύματος (υπέρυθρη μικρής συχνότητας).

¹² Όσον αφορά τη θέρμανση.

την ενεργειακή απολαβή¹³ του κτιρίου που οφείλεται στην παρουσία της ηλιακής ακτινοβολίας¹⁴.



Σχήμα 3.1 Βασικές ενεργειακές ροές σε ένα κτίριο.

Στη συνέχεια περιγράφονται και εξηγούνται βασικές παράμετροι των παθητικών ηλιακών θερμικών συστημάτων, καθώς και βασικές εφαρμογές τους.

3.1.3 Βασικές έννοιες για το σχεδιασμό των παθητικών θερμικών ηλιακών συστημάτων

Η βασική αρχή του σχεδιασμού των παθητικών θερμικών ηλιακών συστημάτων είναι η αξιοποίηση των δομικών στοιχείων του κτιρίου έτσι ώστε να επιτρέπεται, στο μέγιστο δυνατό βαθμό, η εισαγωγή της ηλιακής ακτινοβολίας στο κτίριο, η αποθήκευση της θερμότητας σε δομικά στοιχεία του κτιρίου και η κυκλοφορία της για τη μέγιστη δυνατή θέρμανση των χώρων του κτιρίου.

¹³ Η διαφορετικά τα θερμικά οφέλη.

¹⁴ Στα πλαίσια του παρόντος βιβλίου δεν εξετάζουμε τους τρόπους με τους οποίους μπορούμε να μειώσουμε τις ενεργειακές απώλειες ενός κτιρίου (όπως, π.χ., οι μονώσεις που μπορούμε να εξασφαλίσουμε), που οικονομοτεχνικά είναι το πρώτο στοιχείο για τη σωστή ενεργειακή απόδοση ενός κτιρίου.

Τα στοιχεία σχεδιασμού παθητικών θερμικών ηλιακών συστημάτων μπορούν να διαχωριστούν σε πέντε κατηγορίες¹⁵.

α) Προσανατολισμός ανοιγμάτων – διαφανούς υλικού

Το πρώτο στοιχείο που περιλαμβάνει ο σχεδιασμός είναι ο *προσανατολισμός* των παθητικών συστημάτων που πρέπει να είναι νότιος (στις περιοχές του Βόρειου Ημισφαιρίου της Γης), ώστε κατά τη διάρκεια του χειμώνα (που τα κτίρια έχουν τις μέγιστες ανάγκες θέρμανσης) να υπάρχει η μέγιστη ηλιακή πρόσπτωση. Το κύριο συστατικό στοιχείο ενός ανοίγματος είναι η γυάλινη επιφάνεια (ή άλλο διαφανές υλικό) που συνήθως υπάρχει (π.χ., σε ένα παράθυρο)¹⁶. Αυτή θα πρέπει (με μέγιστη απόκλιση 30°) να έχει νότιο προσανατολισμό και να μη σκιάζεται από άλλα κτίρια ή δένδρα, έτσι ώστε να εισέρχεται στο κτίριο η μέγιστη δυνατή ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας.

β) Ο απορροφητής

Η επιφάνεια που απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία (υπό τη μορφή θερμότητας) θα πρέπει να βρίσκεται σε οπτική επαφή με τον Ήλιο έτσι ώστε να δέχεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ποσοστό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Η επιφάνεια μπορεί να είναι:

- τοίχος ή πάτωμα
- δεξαμενή νερού
- επένδυση στον τοίχο από υλικό αλλαγής φάσης¹⁷.

γ) Το υλικό του απορροφητή – αποθηκευτή

Το υλικό το οποίο απορροφά τη θερμότητα είναι συνήθως το ίδιο στο οποίο αποθηκεύεται η θερμότητα (αποθηκευτής ή αποθήκη θερμότητας). Αυτό το υλικό μπορεί να είναι είτε το υλικό της τοικοποιίας ή του πατώματος (τσιμέντο, πέτρα, ξύλο κ.λπ.) είτε κάποιο άλλο υλικό (υλικό αλλαγής φάσης) είτε το νερό (όταν υπάρχει ξεχωριστή δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας)¹⁸. Οι βασικές φυσικές ιδιότητες

¹⁵ http://www.energysavers.gov/your_home/designing_remodeling/index.cfm/mytopic=10270 (10.1.2011).

¹⁶ Να τονιστεί ότι το γυαλί έχει την ιδιότητα να «επιτρέπει» την είσοδο της μικρού μήκους κύματος ηλιακής θερμικής ακτινοβολίας και να «εμποδίζει» τη μεγάλου μήκους κύματος θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από το εσωτερικό του κτιρίου. Έτσι, «εγκλωβίζεται» θερμότητα στο εσωτερικό ενός χώρου.

¹⁷ Για τα υλικά αλλαγής φάσης [PCM-Phase Change_Materials] βλ. σελ. 70-71 παρόντος βιβλίου.

¹⁸ Στα λεγόμενα *συστήματα διαχωρισμού* είναι διαφορετικό το υλικό που απορροφά τη θερμότητα και διαφορετικό το υλικό στο οποίο αποθηκεύεται (βλ. παρακάτω σελ. 43).

του υλικού που είναι σημαντικές για αυτόν το σκοπό είναι η *θερμική χωρητικότητα* του (θερμοχωρητικότητα)¹⁹, καθώς και ο *χρόνος απόκρισής* του (δηλαδή σε πόσο χρονικό διάστημα απελευθερώνει τη θερμότητα). Αυτά (μαζί και με άλλες μεταβλητές) καθορίζουν το ρυθμό με τον οποίο απελευθερώνεται θερμότητα προς τον εσωτερικό χώρο του κτιρίου.

δ) Κυκλοφορία θερμότητας

Η θερμότητα από τον απορροφητή κυκλοφορεί στους χώρους του κτιρίου με τους τρεις φυσικούς τρόπους [conduction, convection, radiation] που αναφέρθηκαν παραπάνω. Σε ορισμένες περιπτώσεις όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί και κάποιο ξεχωριστό τεχνικό μέσο, όπως ανεμιστήρες κ.λπ.

ε) Έλεγχος

Στην κλασική μορφή ενός παθητικού θερμικού ηλιακού συστήματος δεν υπάρχει οποιοδήποτε στοιχείο ελέγχου. Σε μερικές περιπτώσεις όμως, όπως, όταν, για παράδειγμα, ο συνολικός βιοκλιματικός σχεδιασμός του κτιρίου περιλαμβάνει και το δροσισμό για τους καλοκαιρινούς μήνες (όπως συμβαίνει σε περιοχές με θερμό κλίμα, π.χ., Βόρεια Αφρική, Μεσόγειος κ.λπ.), τότε μπορεί να υπάρξει σύστημα ελέγχου (με θερμοστάτες) που μπορεί να θέτει τους ανεμιστήρες σε λειτουργία ή να ενεργοποιεί σκίαστρα, τέντες κ.λπ.²⁰.

3.1.4 Τεχνικές σχεδιάσεις παθητικών θερμικών ηλιακών συστημάτων

Ανάλογα με τη μορφή και τη διάταξη ενός παθητικού ηλιακού συστήματος είναι δυνατόν να γίνει διάκριση σε τέσσερις (4) κατηγορίες: *συστήματα άμεσης απολαβής* [direct gain systems], *συστήματα έμμεσης απολαβής* [indirect gain systems], *συστήματα διαχωρισμού* [decoupled systems] και *ηλιακά αίθρια* [sunspaces]. Οι διαχωριστικές γραμμές ανάμεσα στις παραπάνω κατηγορίες δεν είναι πάντα σαφώς καθορισμένες²¹.

¹⁹ Θερμοχωρητικότητα [heat capacity] υλικού ονομάζεται η θερμότητα που χρειάζεται να λάβει για να αυξηθεί η θερμοκρασία του κατά ένα βαθμό Kelvin (1 K).

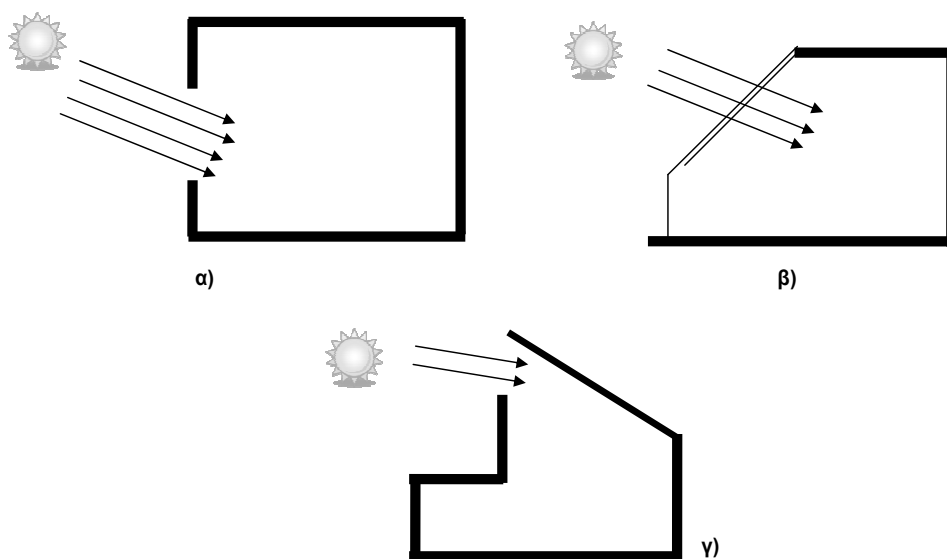
²⁰ Το σύστημα ελέγχου μπορεί να υπάρχει και σε υβριδικά συστήματα που χρησιμοποιούν και ενεργητικά θερμικά ηλιακά συστήματα.

²¹ Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 115.

α) Συστήματα άμεσης απολαβής [direct gain systems]

Στα συστήματα αυτά η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται μέσα στο κτίριο μέσω ανοιγμάτων (που αποτελούνται από διαφανές υλικό, π.χ., γυαλί) και αποθηκεύεται (σε μορφή θερμότητας) στους εσωτερικούς τοίχους και τα πατώματα του κτιρίου. Η απελευθέρωση της θερμότητας γίνεται σε άμεσο χρονικό διάστημα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία του απορροφητή (τοίχος-πάτωμα) και η θερμοκρασία του χώρου να αυξάνονται σχεδόν ταυτόχρονα. Η χρονική υστέρηση της προσφοράς θερμότητας από τους απορροφητές εξαρτάται από το είδος της θερμικής μάζας από την οποία αποτελούνται (μπετόν, πέτρα, τούβλο, ξύλο κ.λπ.).

Τυπικά συστήματα άμεσης απολαβής είναι τα παράθυρα, οι φωταγωγοί ή άλλες γυάλινες (συνήθως) επιφάνειες με νότιο προσανατολισμό.



Σχήμα 3.2 Ορισμένα τυπικά συστήματα άμεσης απολαβής α) παράθυρο β) γυάλινη επέκταση γ) φωταγωγός.

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι ότι η χρονική υστέρηση προσφοράς θερμότητας είναι μικρή (δηλαδή προσφέρουν τη θερμότητα όσο υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία) και συνεπώς δεν μπορούν να ανταποκριθούν στη διαφορά φάσης (ημερήσια ή εποχική) που υπάρχει ανάμεσα στη θερμότητα που προσφέρεται από την ηλιακή ακτινοβολία και τις ανάγκες θέρμανσης ενός κτιρίου



(κυρίως κατοικιών)²². Γι' αυτό τέτοια συστήματα συνδυάζονται συνήθως με ενεργητικά ηλιακά θερμικά συστήματα. Όμως σε περιπτώσεις κτιρίων που στεγάζουν γραφεία και δημόσιες υπηρεσίες το μειονέκτημα περιορίζεται σημαντικά, καθώς πολλές από τις ώρες ηλιοφάνειας (πρωινές και μεσημεριανές ώρες) συμπίπτουν με τις ώρες λειτουργίας του κτιρίου. Επίσης αυτά τα συστήματα, αν σχεδιαστούν σωστά, μπορούν να προσφέρουν στο φυσικό φωτισμό των κτιρίων εξοικονομώντας ενέργεια που δαπανάται για τεχνητό φωτισμό.

Τα πλεονεκτήματα των συστημάτων αυτών είναι ο (σχετικά) απλός σχεδιασμός τους, η ευκολία με την οποία ελέγχονται (σκίαστρα, κουρτίνες κ.λπ.), το σχετικά φθινό κόστος τους, καθώς και οι ελάχιστες θερμικές απώλειες που έχουν (εφόσον αποδίδουν σχεδόν αμέσως τη θερμότητα στους χώρους που επιθυμούμε).

Β) Συστήματα έμμεσης απολαβής [indirect gain systems]

Στα συστήματα αυτά (που ονομάζονται και ηλιακοί τοίχοι [solar walls]) η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στην εξωτερική επιφάνεια τοίχου του κτιρίου, απορροφάται από τη θερμική μάζα του υλικού (απορροφητής) και στη συνέχεια μεταφέρεται στην άλλη πλευρά του τοίχου (εσωτερική πλευρά) όπου απελευθερώνεται ως θερμότητα στο εσωτερικό του κτιρίου. Συνεπώς υπάρχει *χρονική υστέρηση* ανάμεσα στην πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας και την απελευθέρωση θερμότητας στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου. Αυτή η χρονική υστέρηση (διαφορά χρονικής φάσης) εξαρτάται από το είδος του υλικού του απορροφητή (τη θερμική αγωγιμότητα και θερμοχωρητικότητα του υλικού), καθώς και το πάχος του τοίχου²³.

Ένας τέτοιος ηλιακός τοίχος²⁴, στην πιο απλή εκδοχή του, αποτελείται από το απορροφητικό υλικό (πάχους συνήθως 20-40 cm)²⁵ και ένα μονό ή διπλό υαλοπίνακα μπροστά του (Σχ. 3.3α και 3.3β). Το γυαλί μειώνει τις θερμικές απώλειες του τοίχου προς το περιβάλλον γιατί εμποδίζει την εξαγωγή της θερμικής ακτινοβολίας

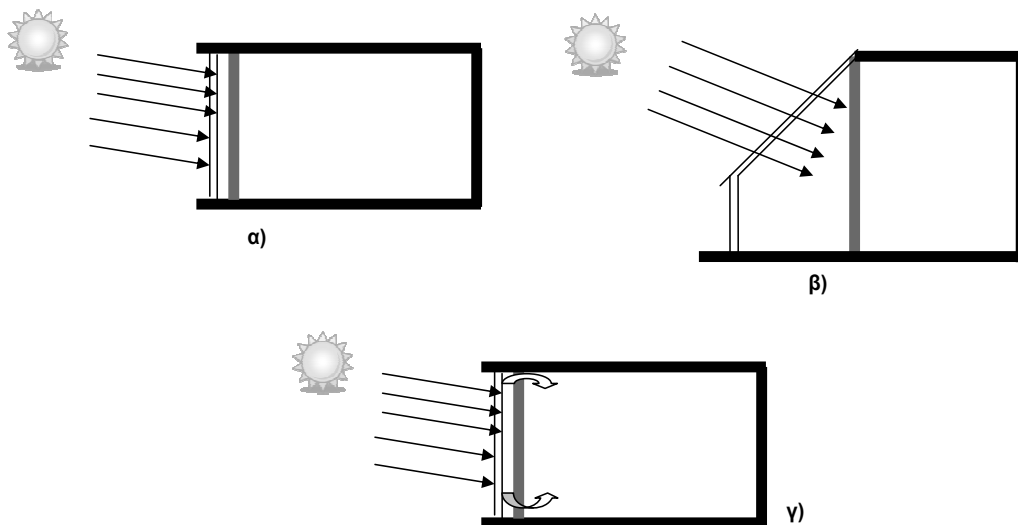
²² Οι μεγαλύτερες ανάγκες θέρμανσης σε μια χειμερινή ημέρα είναι συνήθως το απόγευμα-βράδυ που δεν υπάρχει προσφορά ηλιακής ακτινοβολίας. Τη μέρα, που η προσφορά ηλιακής ακτινοβολίας είναι μεγάλη, οι ανάγκες θέρμανσης των χώρων κατοικίας είναι (σχετικά) μικρές. Παρόμοιο πρόβλημα υπάρχει και με τις εποχές όπου η προσφορά ηλιακής ακτινοβολίας και αναγκών θέρμανσης είναι αντίστροφες (χειμώνας = μικρή ηλιακή προσφορά-μεγάλες ανάγκες θέρμανσης, καλοκαίρι = μεγάλη ηλιακή προσφορά-μικρές ανάγκες θέρμανσης).

²³ Σε λιθοδομή η θερμότητα μεταφέρεται με ένα μέσο ρυθμό 2,5 cm/h. Αυτό θεωρητικά σημαίνει ότι σε τοίχο πάχους 20 cm η θερμότητα φτάνει από την εξωτερική στην εσωτερική πλευρά του και εκπέμπεται στον εσωτερικό χώρο μέσα σε χρονικό διάστημα περίπου 8 h (χρονική υστέρηση). http://www.energysavers.gov/your_home/designing_remodeling/index.cfm/mytopic=10300 (10.11.2011).

²⁴ Τέτοιου είδους τοίχοι ονομάζονται και τοίχοι Trombe (προς τιμήν του Γάλλου επινοητή τους Felix Trombe).

²⁵ http://www.energysavers.gov/your_home/designing_remodeling/index.cfm/mytopic=10300 (10.11.2011).





Σχήμα 3.3 Διαφορετικοί τύποι ηλιακών τοίχων: α) απλός ηλιακός τοίχος β) ηλιακός τοίχος με γυάλινη επέκταση γ) ηλιακός τοίχος με κυκλοφορία αέρα.

μεγάλου μήκους κύματος που εκπέμπει η εξωτερική πλευρά του τοίχου όταν θερμαίνεται. Η εξωτερική πλευρά του υλικού έχει συνήθως σκούρο χρώμα και ειδική επίστρωση για τη μεγαλύτερη δυνατή απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας.

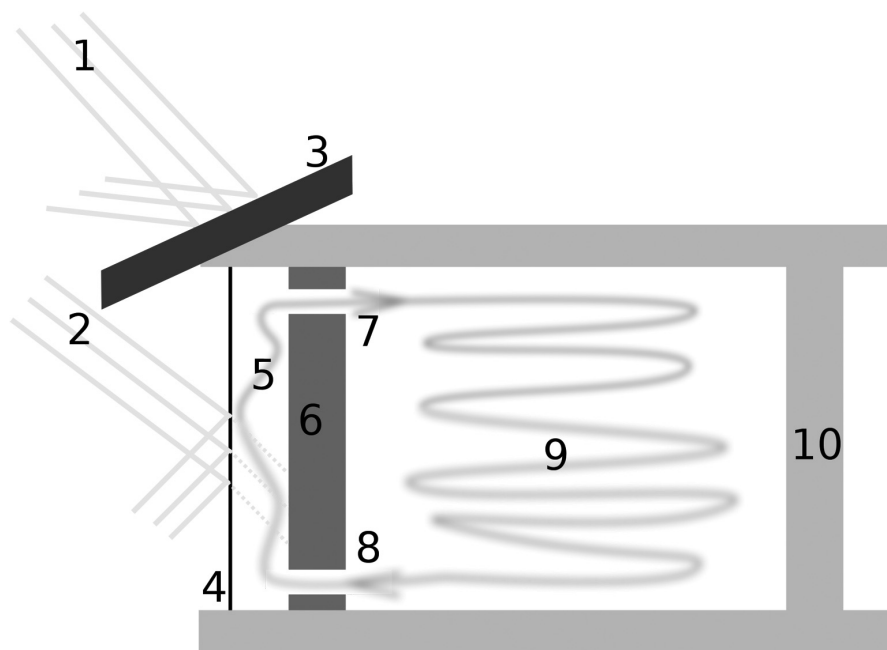
Η θερμότητα μπορεί να μεταφέρεται στο εσωτερικό του κτιρίου είτε απευθείας μέσω του απορροφητικού υλικού του τοίχου είτε (και) από αέρα που κυκλοφορεί στο διάκενο ανάμεσα στον υαλοπίνακα και τον τοίχο (Σχ. 3.3γ). Ο θερμαινόμενος αέρας κυκλοφορεί μέσω αεραγωγών στο εσωτερικό του κτιρίου μεταφέροντας τη θερμότητα²⁶. Κατά τη διάρκεια της νύχτας ή όταν η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα είναι μεγαλύτερη απ' αυτήν του αέρα που βρίσκεται στο διάκενο, οι θυρίδες μπορεί να είναι κλειστές για να μην ψυχραίνεται ο εσωτερικός χώρος.

Τα συστήματα έμμεσης απολαβής έχουν (σχετικά) απλή δομή και λειτουργία καθώς και μικρότερη διακύμανση μεταξύ θερμοκρασίας περιβάλλοντος και εσωτερικής θερμοκρασίας κτιρίου (σε σχέση με τα συστήματα άμεσης απολαβής), αφού παρουσιάζουν τη χρονική υστέρηση που περιγράφηκε. Συνήθως συνδυάζονται με συστήματα άμεσης απολαβής και με ενεργητικά ηλιακά θερμικά συστήματα.

²⁶ Σ' αυτή την περίπτωση υπάρχει μεταφορά θερμότητας στο εσωτερικό του κτιρίου και με τους τρεις βασικούς τρόπους: από επαφή [conduction], από ακτινοβολία [radiance] και από ρεύματα αέρα - συμμεταφορά [convection].

γ) Συστήματα διαχωρισμού [decoupled systems]

Τα λεγόμενα συστήματα διαχωρισμού είναι συστήματα στα οποία ο απορροφητής της ηλιακής ακτινοβολίας (π.χ., ένας εξωτερικός τοίχος) δεν επικοινωνεί απευθείας με τον εσωτερικό τοίχο, αλλά υπάρχει ανάμεσά τους δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας. Αυτή η δεξαμενή μπορεί να περιέχει υγρό μέσο αποθήκευσης της θερμότητας (νερό) ή κάποιο στερεό υλικό μεγάλης θερμοχωρητικότητας (πέτρα, χαλίκι κ.λπ.). Μπροστά από την εξωτερική όψη του τοίχου υπάρχει φυσικά ο υαλοπίνακας (μονός ή διπλός) και ανάμεσα στον υαλοπίνακα και τον εξωτερικό τοίχο στρώμα αέρα. Στον εξωτερικό τοίχο μπορεί να τοποθετηθεί επίστρωση επιλεκτικής απορρόφησης που απορροφά ισχυρά σε όλο το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας και εκπέμπει ελάχιστο ποσοστό θερμότητας στο υπέρυθρο φάσμα προς τον υαλοπίνακα. Η θερμική ενέργεια που απορροφάται από τον εξωτερικό τοίχο διοχετεύεται προς τη δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας και τον εσωτερικό τοίχο και από εκεί με αργό ρυθμό προς τον εσωτερικό χώρο. Επίσης ο αέρας που κυκλοφο-



Σχήμα 3.4 Βασικός τύπος ενός συστήματος διαχωρισμού [Decoupled system]. 1.&2. ηλιακή ακτινοβολία, 3. στέγη, 4. υαλοπίνακας, 5. θάλαμος κυκλοφορίας αέρα, 6. εξωτερικός τοίχος, «δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας» και εσωτερικός τοίχος, 7. έξοδος θερμού αέρα προς το δωμάτιο, 8. είσοδος ψυχρού αέρα στο θάλαμο κυκλοφορίας αέρα, 9. δωμάτιο, 10. μόνωση τοίχων δωματίου.

(Πηγή: commons.wikimedia.org)

ρεί ανάμεσα στον υαλοπίνακα και τον εξωτερικό τοίχο απάγει τη θερμότητα και τη μεταφέρει στο εσωτερικό του κτιρίου²⁷. Ουσιαστικά τα συστήματα διαχωρισμού είναι είδος διπλού ηλιακού τοίχου (τοίχος Trombe). Αν η κυκλοφορία του αέρα γίνεται με το φυσικό τρόπο της συμμεταφοράς [convection], τότε το σύστημα είναι αμιγώς παθητικό, ενώ, όταν υπάρχουν ανεμιστήρες ή άλλοι μηχανικοί υποστηρικτικοί μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας, τότε για το χαρακτηρισμό του συστήματος χρησιμοποιείται και ο όρος ημιπαθητικό [semi-passive].

Το βασικό πλεονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι ότι εξαιτίας του μονωτικού στρώματος και της ξεχωριστής δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας η θερμότητα μεταφέρεται με αργό ρυθμό και με χρονική υστέρηση που μπορεί να φτάσει τις 8 έως 10 h²⁸. Έτσι μπορεί να ελεγχθεί η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου με σχετική ανεξαρτησία από τις θερμοκρασίες του εξωτερικού τοίχου, του απορροφητή και της δεξαμενής θερμότητας [heat accumulator]. Επίσης λόγω της θερμικής μόνωσης του απορροφητή και του εσωτερικού χώρου, οι απώλειες προς το περιβάλλον τις νυχτερινές ώρες είναι πολύ μικρότερες. Το βασικό μειονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι το υψηλό κόστος κατασκευής και η μεγαλύτερη ευαισθησία σε δυσλειτουργίες (π.χ., διαρροές)²⁹.

δ) Ηλιακά αίθρια [sunsaces]

Τα ηλιακά αίθρια είναι ξεχωριστοί χώροι που δημιουργούνται στις νότιες πλευρές κτιρίων (κυρίως οικιών) και η κατακόρυφη πλευρά τους (η οποία βλέπει προς τον Ήλιο) αποτελείται από υαλοπίνακες³⁰. Το αίθριο επικοινωνεί με τους διπλανούς χώρους του κτιρίου με πόρτες, παράθυρα και αεραγωγούς στο άνω και το κάτω τμήμα του. Ο αέρας στο εσωτερικό του αιθρίου θερμαίνεται και εισέρχεται στους διπλανούς εσωτερικούς χώρους από τους άνω αεραγωγούς. Ταυτόχρονα ψυχρός

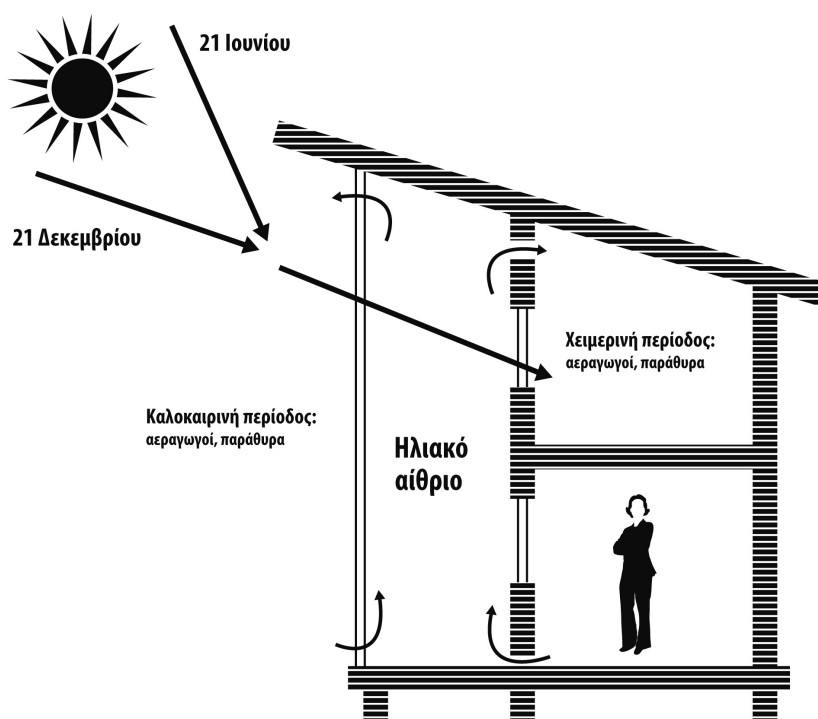
²⁷ Συνήθως υπάρχουν περσίδες από τις οποίες εξέρχεται ψυχρός αέρας από το κάτω τμήμα των εσωτερικών χώρων προς το χώρο της δεξαμενής θερμότητας και του απορροφητή, και από εκείνο το χώρο ο ζεστός αέρας εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου από περσίδες που υπάρχουν στο άνω τμήμα των δωματίων.

²⁸ P. Torcellini and S. Pless, 2004, *Trombe Walls in Low-Energy Buildings: Practical Experiences*, National Renewable Energy Laboratory, <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/36277.pdf> (9/2/2012).

²⁹ Για περισσότερα βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 119-120, Duffie & Beckman, 2006, σελ. 549.

³⁰ Πολλές φορές αυτά τα ηλιακά αίθρια ονομάζονται και θερμοκήπια εξαιτίας της ομοιότητάς τους σε ορισμένα στοιχεία με τα κλασικά θερμοκήπια που χρησιμοποιούνται για την καλλιέργεια φυτών. Και στις δύο περιπτώσεις η θερμότητα εγκλωβίζεται στο εσωτερικό λόγω της βασικής ιδιότητας του γυαλιού να επιτρέπει την είσοδο της μικρού μήκους κύματος ηλιακής θερμικής ακτινοβολίας και να εμποδίζει τη μεγάλου μήκους κύματος θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από το εσωτερικό του αιθρίου.

αέρας απ' αυτούς τους χώρους εισέρχεται στο αίθριο μέσω των αεραγωγών στο κάτω τμήμα. Το άνω τμήμα του αιθρίου μπορεί να καλύπτεται από υαλοπίνακα ή να αποτελεί προέκταση της στέγης (με την κατάλληλη μόνωση)³¹. Σε πολλά ηλιακά αίθρια υπάρχουν και αεραγωγοί προς το εξωτερικό περιβάλλον (στο άνω και το κάτω τμήμα) που με την εισαγωγή και την εξαγωγή αέρα μπορεί να ρυθμίζεται (σε ένα βαθμό) η θερμοκρασία στο εσωτερικό τους.



Σχήμα 3.5 Η αρχή λειτουργίας του ηλιακού αιθρίου.

³¹ Στην πρώτη περίπτωση υπάρχει μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό κατά τη διάρκεια της ημέρας αλλά μεγαλύτερες απώλειες θερμότητας στη διάρκεια της νύχτας. Στη δεύτερη περίπτωση η θερμοκρασία στη διάρκεια της ημέρας είναι μικρότερη, αλλά είναι και μικρότερες οι απώλειες θερμότητας τις νυχτερινές ώρες.

3.2 Ενεργητικά ηλιακά συστήματα χαμηλών και μέσων θερμοκρασιών

3.2.1 Εισαγωγή

Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα έχουν σχεδιαστεί για να μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε θερμότητα. Η θερμότητα στη συνέχεια χρησιμοποιείται για διάφορες εφαρμογές, όπως παραγωγή ζεστού νερού για οικιακή χρήση, για τη θέρμανση κολυμβητικών δεξαμενών, για τη θέρμανση και τον κλιματισμό χώρων (ηλιακός κλιματισμός-δροσισμός) κ.λπ.

Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ζεστού νερού για οικιακή χρήση είναι σήμερα η πιο διαδεδομένη μορφή αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας σ' όλο τον κόσμο και στην Ευρώπη. Η πιο απλή κατασκευή που μπορεί να αξιοποιηθεί για τη θέρμανση του ζεστού νερού είναι ένα δοχείο γεμάτο νερό που συνήθως εγκαθίσταται στο δώμα κτιρίου, έχει μαύρο χρώμα (για την απορρόφηση όσο το δυνατόν μεγαλύτερου ποσοστού της ηλιακής ακτινοβολίας) και συνδέεται με το δίκτυο σωληνώσεων του κτιρίου. Τέτοιες πρωτόγονες κατασκευές υπήρχαν από το τέλος του 19^{ου} αιώνα σε σπίτια της νότιας κυρίως Ευρώπης (Ισπανία, Ιταλία, Ελλάδα κ.λπ.). Ο σύγχρονος θερμοσίφωνας (όπως είναι γνωστός σήμερα, δηλαδή ένας ηλιακός συλλέκτης συνδεδεμένος με το δοχείο αποθήκευσης του νερού) εμφανίστηκε για πρώτη φορά (ως κατοχυρωμένη πατέντα) στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ το 1909³². Από εκεί διαδόθηκε στις υπόλοιπες πολιτείες των ΗΠΑ (κυρίως τις νότιες). Στο Μαϊάμι μεταξύ του 1935-1941 το 80% των καινούριων σπιτιών είχαν εγκατεστημένους ηλιακούς θερμοσίφωνες³³. Η ευρύτερη διάδοση των ηλιακών θερμοσιφώνων σε όλο τον κόσμο και στην Ευρώπη άρχισε ουσιαστικά μετά την πετρελαϊκή κρίση της δεκαετίας του 1970 και σήμερα αποτελεί έναν από τους βασικούς τρόπους θέρμανσης οικιακού νερού στην Ευρώπη. Τον υψηλότερο αριθμό εγκατεστημένων ηλιακών συλλεκτών (εκφρασμένο σε m²) στην Ευρώπη (2009) τον έχει η Γερμανία (12.899.800 m²), ενώ η Ελλάδα βρίσκεται στην τρίτη θέση (4.076.200 m²)³⁴. Το 2008 η Γερμανία εγκατέστησε 1.920.000 m² ηλιακών συλλεκτών, με δεύτερη την Ισπανία (466.000 m²) και τρίτη την Ιταλία (421.000 m²). Η Ελλάδα βρίσκεται στην 6^η θέση με 300.000 m² εγκατεστημένων ηλιακών

³² Boyle et al, 2004, σελ. 36.

³³ ο.π.

³⁴ <http://www.eurobserv-er.org/pdf/baro197.pdf> (11/11/2010).



συλλεκτών³⁵. Η Κύπρος είναι η πρώτη χώρα στην Ευρώπη σε κατά κεφαλήν εγκατεστημένους ηλιακούς συλλέκτες ($873 \text{ m}^2/1.000$ κατοίκους).³⁶

3.2.2 Βασικές αρχές

Στα ενεργητικά ηλιακά θερμικά συστήματα η μονάδα στην οποία προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία και στην οποία γίνεται η απορρόφησή της, καθώς και η μετατροπή της σε θερμότητα, ονομάζεται **ηλιακός θερμικός συλλέκτης**. Οι κυριότερες κατηγορίες ηλιακών θερμικών συλλεκτών είναι αυτές των **επίπεδων ηλιακών συλλεκτών** και των **συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών**. Στα ηλιακά θερμικά συστήματα χαμηλών και μέσων θερμοκρασιών χρησιμοποιούνται κυρίως οι *επίπεδοι συλλέκτες*, ενώ οι *συγκεντρωτικοί συλλέκτες* χρησιμοποιούνται κυρίως (αλλά όχι μόνο) στα θερμικά ηλιακά συστήματα ισχύος.

Ένας τυπικός *επίπεδος ηλιακός συλλέκτης* αποτελείται από τον **απορροφητή [absorber]**, δηλαδή την επίπεδη επιφάνεια που απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία, το **διαφανές κάλυμμα**, το **δίκτυο σωληνώσεων** με το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας, το **πλαίσιο** (συνήθως μεταλλικό ή πλαστικό), καθώς και τη **θερμομόνωση του πλαισίου**. Ανάλογα με το σχεδιασμό του συλλέκτη μπορεί ένα ή περισσότερα από τα συστατικά του μέρη να απουσιάζει. Τα συστατικά μέρη όμως που υπάρχουν πάντα είναι ο απορροφητής και το απαραίτητο δίκτυο σωληνώσεων με το ρευστό (υγρό ή αέριο) μεταφοράς της θερμότητας. Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τον απορροφητή διέπεται από τις γνωστές φυσικές αρχές απορρόφησης ακτινοβολίας και μεταφοράς θερμότητας. Οι φυσικές αρχές, καθώς και οι φυσικές έννοιες που συνδέονται με αυτές θα παρουσιαστούν παρακάτω.

α) Απορρόφηση, εκπομπή, ανάκλαση και μετάδοση ακτινοβολίας

Η βασική φυσική αρχή των ηλιακών θερμικών συστημάτων είναι η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος ($0,3 \mu\text{m} < \lambda < 3 \mu\text{m}$) [short-wave solar radiation] σε θερμική ενέργεια. Το φαινόμενο αυτής της ενεργειακής μετατροπής ονομάζεται *φωτο-θερμικό φαινόμενο*. Βασικά φυσικά μεγέθη που καθορίζουν το φωτο-θερμικό φαινόμενο είναι η *απορρόφηση ακτινοβολίας α* (ή ο συντελεστής απορρόφησης α)³⁷, η *εκπομπή ακτινοβολίας ε* (ή ο συντελεστής εκπομπής ε), η

³⁵ <http://www.eurobserv-er.org/pdf/baro197.pdf> (11/11/2010).

³⁶ <http://www.eurobserv-er.org/pdf/baro197.pdf> (11/11/2010).

³⁷ Η διαφορά ανάμεσα στην απορρόφηση και στο συντελεστή απορρόφησης είναι ο τρόπος που εκφράζεται ο αριθμός, δηλαδή η απορρόφηση συνήθως εκφράζεται με ποσοστιαία μορφή (π.χ., 30%), ενώ ο συντελεστής απορρόφησης εκφράζεται με δεκαδικό αριθμό (π.χ., 0,3). Το ίδιο ισχύει και σε όλες τις άλλες περιπτώσεις που υπάρχει η διάκριση ανάμεσα, π.χ., στην εκπομπή και στο συντελεστή εκπομπής κ.λπ.



ανάκλαση ρ (ή συντελεστής ανάκλασης ρ) και η μετάδοση τ (ή συντελεστής μετάδοσης τ).

Ο συντελεστής απορρόφησης a ενός σώματος³⁸ ορίζεται ως το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που απορροφά ένα σώμα, δηλαδή είναι το πηλίκο:

$$a = (\text{απορροφούμενη ακτινοβολία}) / (\text{προσπίπτουσα ακτινοβολία})$$

Ο συντελεστής εκπομπής ε ενός σώματος ορίζεται ως το πηλίκο της ακτινοβολίας που εκπέμπει ένα σώμα προς την ακτινοβολία που θα εξέπεμπε το μέλαν σώμα [black body]³⁹ αν ήταν στην ίδια θερμοκρασία, δηλαδή:

$$\varepsilon = (\text{εκπεμπόμενη ακτινοβολία από το σώμα}) / (\text{εκπεμπόμενη ακτινοβολία από το μέλαν σώμα})$$

Ο συντελεστής ανάκλασης ρ ορίζεται ως το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που ανακλά ένα σώμα, δηλαδή είναι το πηλίκο:

$$\rho = (\text{ανακλώμενη ακτινοβολία}) / (\text{προσπίπτουσα ακτινοβολία})$$

Τέλος ο συντελεστής διαπερατότητας ακτινοβολίας τ ενός σώματος εκφράζει το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που περνάει διαμέσου του σώματος, δηλαδή είναι το πηλίκο:

$$\tau = (\text{ακτινοβολία που διαπερνά το σώμα}) / (\text{προσπίπτουσα ακτινοβολία})$$

Ως συνέπεια των παραπάνω ορισμών, για σώμα στο οποίο προσπίπτει Η/Μ ακτινοβολία θα ισχύει: $a + \rho + \tau = 1$ ⁴⁰.

Για τους συντελεστές εκπομπής ε και απορρόφησης a όλων των σωμάτων ισχύει ο νόμος του Kirchhoff⁴¹ που (σε μια απλουστευτική εκδοχή) λέει ότι τα σώματα εκπέμπουν ακτινοβολία με τον ίδιο τρόπο που απορροφούν ή με άλλα λόγια ότι οι συντελεστές εκπομπής ε και απορρόφησης a ενός σώματος είναι ίσοι, δηλαδή $\varepsilon = a$.

³⁸ Ο συντελεστής απορρόφησης a ενός σώματος είναι φυσικό μέγεθος που εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, όπως επίσης και από την κατεύθυνση πρόσπτωσης της ακτινοβολίας πάνω στο σώμα. Για πλήρη ορισμό και για παραπάνω λεπτομέρειες βλ. Duffie & Beckman, 2006, σελ. 175-177.

³⁹ Για την έννοια του «μέλανος σώματος» βλ. σελ. 9.

⁴⁰ Όλοι οι συντελεστές απορρόφησης, εκπομπής, ανάκλασης και μετάδοσης ακτινοβολίας που ορίστηκαν παραπάνω εξαρτώνται από το μήκος κύματος λ της ακτινοβολίας, για αυτό και πολύ συχνά αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως a_λ , ε_λ , ρ_λ , και τ_λ .

⁴¹ Για περισσότερα βλ. Duffie & Beckman, 2006, σελ. 177-178.



β) Οπτικά χαρακτηριστικά απορροφητών

Στα θερμικά ηλιακά συστήματα είναι βασικό στοιχείο οι συντελεστές απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας των διαφόρων σωμάτων. Ιδιαίτερα στα ενεργητικά ηλιακά συστήματα οι ηλιακοί συλλέκτες έχουν ένα υλικό (απορροφητής [absorber]) το οποίο πρέπει να απορροφά τη μέγιστη δυνατή ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας και να τη μετατρέπει σε θερμότητα. Ένας ιδανικός απορροφητής (μέλαν σώμα) θα είχε συντελεστή απορρόφησης $\alpha = 1$, ενώ συντελεστή ανάκλασης ρ και συντελεστή διαπερατότητας ακτινοβολίας τ ίσους με το μηδέν ($\rho = \tau = 0$) για όλα τα μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας ($0,3 \mu\text{m} < \lambda < 3 \mu\text{m}$). Στην πραγματικότητα αυτό δεν μπορεί να συμβεί. Γι' αυτό γίνεται η διάκριση μεταξύ ενός ιδανικού και ενός πραγματικού απορροφητή. Ενώ ένας ιδανικός απορροφητής απορροφά όλες τις ακτινοβολίες σε όλο το φάσμα των μηκών κύματος, πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι ένας πραγματικός απορροφητής έχει συντελεστή απορρόφησης $\alpha = 1$ σε συγκεκριμένα φάσματα μηκών κύματος, ενώ σε συγκεκριμένα μήκη κύματος έχει σχεδόν μηδενική απορρόφηση (επιλεκτική απορρόφηση). Αυτή η ιδιότητα είναι πολύ βασική και επιθυμητή για τους απορροφητές για λόγους που θα εξηγηθούν παρακάτω, όταν γίνει αναφορά στα τεχνικά χαρακτηριστικά των ηλιακών συλλεκτών.

Ένας πραγματικός απορροφητής, ενώ έχει συντελεστή διαπερατότητας ακτινοβολίας $\tau = 0$, δεν έχει ιδανικές τιμές για τους συντελεστές απορρόφησης α και ανάκλασης ρ . Οι καλοί πραγματικοί απορροφητές έχουν τιμές α και ρ που πλησιάζουν τις ιδανικές τιμές. Στον Πίνακα 3.1 φαίνονται οι τιμές των α και ρ για κάποιους πραγματικούς επιλεκτικούς απορροφητές και για μη-επιλεκτικό απορροφητή.

Ο επιλεκτικός απορροφητής έχει διαφορετικούς συντελεστές α και ρ όσον αφορά το συνολικό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας (οι συντελεστές αυτοί συμβολίζονται με α_s, ρ_s) και διαφορετικούς στο φάσμα της υπέρυθρης μεγάλου μήκους κύματος ($\lambda > 3 \mu\text{m}$) ακτινοβολίας (α_l, ρ_l)⁴². Για το συνολικό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας οι τιμές του α_s είναι κοντά στο 1 (0,70-0,95 ανάλογα με το υλικό) και του ρ κοντά στο μηδέν (0,05 η μικρότερη), ενώ για το φάσμα της υπέρυθρης μεγάλου μήκους κύματος ($\lambda > 3 \mu\text{m}$) ακτινοβολίας συμβαίνει το αντίστροφο⁴³. Στη βιβλιογραφία οι επιλεκτικοί απορροφητές ονομάζονται και επιφάνειες [surfaces] α/ϵ , καθώς ο λόγος α_s/ϵ_l καθορίζει την ποιότητα του επιλεκτικού απορροφητή. Όσο πιο μεγάλος είναι αυτός ο λόγος τόσο καλύτερος θεωρείται ο απορροφητής. Στον Πίνακα 3.1 οι

⁴² s = solar, l = infrared.

⁴³ Αυτές οι ιδιότητες των επιλεκτικών απορροφητών είναι επιθυμητές για λόγους που θα εξηγηθούν παρακάτω.



λόγοι κυμαίνονται από 9 έως 19, με μεγαλύτερο αυτόν του οξειδίου του τιτανίου που θεωρείται εξαιρετικός επιλεκτικός απορροφητής.

Πίνακας 3.1 Οπτικά χαρακτηριστικά απορροφητών.

Απορροφητής	Ηλιακό φάσμα			Υπέρυθρο φάσμα			
	$\alpha_s(\epsilon_s)$	τ_s	ρ_s	$\alpha_I(\epsilon_I)$	τ_I	ρ_I	
Μαύρο νικέλιο (επιλεκτικός απορροφητής)	0,88	0	0,12	0,07	0	0,93	12,57
Μαύρο χρώμιο (επιλεκτικός απορροφητής)	0,87	0	0,13	0,09	0	0,91	9,67
Πλέγμα αλουμινίου (επιλεκτικός απορροφητής)	0,70	0	0,30	0,07	0	0,93	10,00
Οξείδιο του τιτανίου (επιλεκτικός απορροφητής)	0,95	0	0,05	0,05	0	0,95	19,00
Μη επιλεκτικός απορροφητής	0,97	0	0,03	0,97	0	0,03	1,00

γ) Οπτικά χαρακτηριστικά διαφανών καλυμμάτων

Ένας επίπεδος ηλιακός θερμικός συλλέκτης διαθέτει, τις περισσότερες φορές, πάνω από τον απορροφητή διαφανές κάλυμμα για να μειώνει τις απώλειες θερμότητας που μπορούν να συμβούν στον απορροφητή λόγω ρευμάτων συμμεταφοράς [convection heat losses]. Το υλικό κατασκευής αυτών των διαφανών καλυμμάτων είναι συνήθως το γυαλί. Ένα ιδανικό διαφανές κάλυμμα θα είχε συντελεστή διαπερατότητας ακτινοβολίας $\tau = 1$ για την ηλιακή ακτινοβολία (έτσι ώστε όλη η ηλιακή ακτινοβολία να το διαπερνούσε και να έφτανε στον απορροφητή) και μηδενικούς συντελεστές απορρόφησης και ανάκλασης. Στην πραγματικότητα τα διαφανή καλύμματα που χρησιμοποιούνται έχουν συντελεστές που προσεγγίζουν τις ιδανικές τιμές. Στον παρακάτω Πίνακα 3.2 φαίνονται τρία τέτοια υλικά που κατασκευάζονται από γυαλί.

Πίνακας 3.2 Οπτικά χαρακτηριστικά διαφανών καλυμμάτων.

	Ηλιακό φάσμα			Υπέρυθη ακτινοβολία		
	$\alpha_s(\epsilon_s)$	τ_s	ρ_s	$\alpha_l(\epsilon_u)$	τ_l	ρ_l
Απλό γυαλί	0,02	0,97	0,01	0,94	0	0,06
Γυαλί που ανακλά την υπέρυθη ακτινοβολία (In_2O_3)	0,10	0,85	0,05	0,15	0	0,85
Γυαλί που ανακλά την υπέρυθη ακτινοβολία (ZnO_2)	0,20	0,79	0,01	0,16	0	0,84

Ο συντελεστής διαπερατότητας τ στο φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι πολύ υψηλός (κοντά στο 1), ενώ η διαπερατότητα τ στο υπέρυθρο φάσμα μεγάλου μήκους κύματος (που είναι και η ακτινοβολία που εκπέμπει ο απορροφητής εξαιτίας της ανόδου της θερμοκρασίας του) είναι μικρή (και η ανάκλαση μεγάλη), γεγονός που συντελεί στη μεγαλύτερη απόδοση του ηλιακού συλλέκτη⁴⁴.

δ) Ενεργειακό ισοζύγιο ηλιακού συλλέκτη

Το ενεργειακό ισοζύγιο ενός σώματος που απορροφά ηλιακή ακτινοβολία (απορροφητής) και τη μετατρέπει σε θερμότητα είναι (γενικά) το παρακάτω:

$$\dot{G}_{G,abs} A_c = (\dot{Q}_{useful} + \dot{Q}_{conv,abs} + \dot{Q}_{rad,abs} + \dot{Q}_{refl,abs} + \dot{Q}_{cond,abs}) A_c^{45} \quad (3.1)$$

όπου

$\dot{G}_{G,abs}$: η ολική ηλιακή ακτινοβολία (ηλιακή ενέργεια) ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας που προσπίπτει στην επιφάνεια του απορροφητή [absorber]⁴⁶

⁴⁴ καθώς η θερμότητα που μεταφέρεται σ' αυτά τα μήκη κύματος εγκλωβίζεται στο εσωτερικό του συλλέκτη και δε διαφεύγει στο περιβάλλον.

⁴⁵ Από τα μεγέθη που εμφανίζονται στη συγκεκριμένη εξίσωση η αλγεβρική ποσότητα $\dot{Q}_{useful}$ είναι θετική, ενώ όλες οι άλλες ποσότητες που εκφράζουν απώλειες ενέργειας ($\dot{Q}_{conv,abs}$, $\dot{Q}_{rad,abs}$, $\dot{Q}_{refl,abs}$, $\dot{Q}_{cond,abs}$) έχουν (θεωρητικά) αρνητικές αλγεβρικές τιμές. Όμως στη συγκεκριμένη εξίσωση λαμβάνονται με θετικές αλγεβρικές τιμές για να ικανοποιείται η αρχή διατήρησης της ενέργειας, όπως εύκολα μπορεί να αντιληφθεί ο αναγνώστης.

⁴⁶ Μονάδα μέτρησης στο SI είναι W/m^2 .

- A_c : η επιφάνεια του συλλέκτη
 $\dot{Q}_{conv,abs}$: οι απώλειες θερμότητας (ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας) λόγω ρευμάτων μεταφοράς [convection]
 $\dot{Q}_{rad,abs}$: οι απώλειες θερμότητας (ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας) λόγω ακτινοβολίας (μεγάλου μήκους κύματος)
 $\dot{Q}_{refl,abs}$: οι απώλειες (ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας) λόγω ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας
 $\dot{Q}_{cond,abs}$: οι απώλειες θερμότητας (ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας) λόγω αγωγής [conduction]
 $\dot{Q}_{useful}$: η χρήσιμη θερμότητα (ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας) που μεταφέρεται από τον απορροφητή στο υλικό μέσο κυκλοφορίας της θερμότητας του συλλέκτη.

Παρακάτω περιγράφεται (σύντομα) με ενεργειακούς όρους η εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου. Αρχικά ορίζεται ως σύστημα ο ηλιακός συλλέκτης στον οποίο προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία με ρυθμό $\dot{G}_{G,coll}$. Ένα μέρος αυτής της ενέργειας ($\dot{G}_{G,abs} = \tau_{cov} \dot{G}_{G,coll}$) διαπερνά το διαφανές κάλυμμα και προσπίπτει στον απορροφητή (όπου τ_{cov} ο συντελεστής διαπερατότητας του διαφανούς καλύμματος). Απ' αυτή την ενέργεια $\dot{G}_{G,abs}$ ένα μέρος της (το μεγαλύτερο) μετατρέπεται σε χρήσιμη θερμότητα $\dot{Q}_{useful}$ η οποία μεταφέρεται στο υλικό μέσο κυκλοφορίας της θερμότητας (συνήθως νερό) που υπάρχει στο δίκτυο σωληνώσεων του συλλέκτη. Το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας που δε γίνεται χρήσιμη θερμότητα ($\dot{Q}_{conv,abs} + \dot{Q}_{rad,abs} + \dot{Q}_{refl,abs} + \dot{Q}_{cond,abs}$) είναι οι απώλειες του συλλέκτη.

Οι απώλειες (ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας) λόγω ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας $\dot{Q}_{refl,abs}$ μπορούν να εκφραστούν ως:

$$\dot{Q}_{refl,abs} = \tau_{cov} \dot{G}_{G,coll} \rho_{abs}$$

όπου ρ_{abs} είναι ο συντελεστής ανάκλασης του απορροφητή.

Συνεπώς η χρήσιμη θερμότητα (ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας) που μεταφέρεται από τον απορροφητή στο υλικό μέσο κυκλοφορίας της θερμότητας του συλλέκτη μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\dot{Q}_{useful} = \dot{G}_{G,abs} \dot{G}_{G,abs} - (\dot{Q}_{conv,abs} + \dot{Q}_{rad,abs} + \dot{Q}_{refl,abs} + \dot{Q}_{cond,abs})$$

$$\dot{Q}_{useful} = \tau_{cov} \dot{G}_{G,coll} - \dot{Q}_{refl,abs} - \dot{Q}_{rad,abs} - (\dot{Q}_{conv,abs} + \dot{Q}_{cond,abs})^{47}$$

$$\dot{Q}_{useful} = \tau_{cov} \dot{G}_{G,coll} - \tau_{cov} \dot{G}_{G,coll} \rho_{abs} - \dot{Q}_{rad,abs} - (\dot{Q}_{conv,abs} + \dot{Q}_{cond,abs})$$

$$\dot{Q}_{useful} = \tau_{cov} \dot{G}_{G,coll} (1 - \rho_{abs}) - \dot{Q}_{rad,abs} - (\dot{Q}_{conv,abs} + \dot{Q}_{cond,abs})$$

$$\dot{Q}_{useful} = \tau_{cov} \dot{G}_{G,coll} \alpha_{abs} - \dot{Q}_{rad,abs} - (\dot{Q}_{conv,abs} + \dot{Q}_{cond,abs})$$

Χωρίς να αναφερθούν λεπτομέρειες⁴⁸ οι συνολικές θερμικές απώλειες του απορροφητή (ανά μονάδα επιφάνειας) λόγω αγωγής [conduction] $\dot{Q}_{cond,abs}$ και συμμεταφοράς [convection] $\dot{Q}_{conv,abs}$ μπορούν να εκφραστούν με τη βοήθεια ενός συνολικού συντελεστή [coefficient] μεταφοράς θερμότητας του συλλέκτη $\dot{U}_{L,coll}$ ο οποίος εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο χάνει θερμότητα ο συλλέκτης εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του απορροφητή και του περιβάλλοντος.

$$\dot{Q}_{conv,abs} + \dot{Q}_{cond,abs} = \dot{U}_{L,coll} (T_{abs} - T_a)$$

όπου

T_{abs} : η μέση θερμοκρασία του απορροφητή (σε βαθμούς K)

T_a : η θερμοκρασία του περιβάλλοντος [ambient temperature] (σε βαθμούς K)

$\dot{U}_{L,coll}$ συντελεστής [coefficient] μεταφοράς θερμότητας (σε W/m²K)

Επίσης μπορεί να θεωρηθεί (σε μια πρώτη προσέγγιση) ότι οι απώλειες θερμότητας (ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας) λόγω ακτινοβολίας (μεγάλου μήκους κύματος) $\dot{Q}_{rad,abs}$ είναι αμελητέες (σε σχέση με τις άλλες απώλειες)⁴⁹.

Συνεπώς η χρήσιμη θερμότητα Q_u (μονάδα μέτρησης W = J/s) μπορεί να εκφραστεί με την παρακάτω σχέση:

⁴⁷ Στην παρούσα εξίσωση ο συλλέκτης ταυτίζεται με τον απορροφητή, καθώς θεωρείται ότι όλες οι θερμικές απώλειες προέρχονται από τον απορροφητή.

⁴⁸ Για περισσότερα όσον αφορά τις απώλειες και γενικά το ενεργειακό ισοζύγιο στους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες βλ. Duffie & Beckman, 2006, σελ. 238-321, Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 126-129.

⁴⁹ Σε διαφορετικά βιβλία της βιβλιογραφίας μπορεί ο συντελεστής $\dot{U}_{L,coll}$ να περιλαμβάνει και τις απώλειες λόγω εκπομπής ακτινοβολίας. Σε κάθε περίπτωση η τελική σχέση που δίνει τη χρήσιμη ενέργεια $\dot{Q}_{useful}$ είναι η ίδια.

$$Q_u = \dot{Q}_{useful} A_c = (\tau_{cov} \alpha_{abs} \dot{G}_{G,coll}) A_c - \dot{U}_{L,coll} (T_{abs} - T_a) A_c \quad (3.2)$$

όπου A_c η επιφάνεια του απορροφητή (συνεπώς και του συλλέκτη).

Με βάση τα παραπάνω μπορεί να οριστεί ο στιγμιαίος συντελεστής απόδοσης $\eta_{instant}$ ηλιακού συλλέκτη ως το πηλίκο της στιγμιαίας χρήσιμης θερμότητας $\dot{Q}_{useful}$ προς την ολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (ηλιακή ενέργεια) ανά μονάδα χρόνου $\dot{G}_{G,coll}$.

$$\eta_{instant} = \dot{Q}_{useful} / \dot{G}_{G,coll} = (\tau_{cov} \alpha_{abs}) - \frac{U_{L,coll} (T_{abs} - T_a)}{\dot{G}_{G,coll}} \quad (3.3)$$

Επίσης μπορεί να οριστεί ο μέσος συντελεστής απόδοσης η που αφορά σε χρονική περίοδο t και θα είναι ίσος με:

$$\eta = \frac{A_c \int_0^t Q_{useful} dt}{A_c \int_0^t G_{G,coll} dt} \quad (3.4)$$

όπου τα ολοκληρώματα στον αριθμητή και τον παρανομαστή δίνουν τη συνολική χρήσιμη θερμότητα που παρείχε ο συλλέκτης τη χρονική περίοδο t και τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία που έπεσε πάνω στον ηλιακό συλλέκτη την ίδια χρονική περίοδο, αντίστοιχα.

Επειδή στις εργαστηριακές δοκιμές της μέτρησης της απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών η θερμοκρασία που υπολογίζεται δεν είναι η θερμοκρασία T_{abs} του απορροφητή (η οποία δεν είναι και ομοιόμορφη σ' όλη την επιφάνειά του), αλλά η θερμοκρασία T_{in} εισαγωγής στο συλλέκτη του θερμικού ρευστού (συνήθως νερό) οι παραπάνω σχέσεις που δίνουν τη χρήσιμη θερμότητα:

$$Q_u = (\tau_{cov} \alpha_{abs}) \dot{G}_{G,coll} A_c - \dot{U}_{L,coll} (T_{abs} - T_a) A_c$$

και τη στιγμιαία απόδοση $\eta_{instant} = \dot{Q}_{useful} / \dot{G}_{G,coll} = (\tau_{cov} \alpha_{abs}) - \frac{U_{L,coll} (T_{abs} - T_a)}{\dot{G}_{G,coll}}$ μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$Q_u = F_R [(\tau_{cov} \alpha_{abs}) \dot{G}_{G,coll} A_c - \dot{U}_{L,coll} (T_{in} - T_a) A_c] \quad (3.5)$$

και

$$\eta_{instant} = \dot{Q}_{useful} / \dot{G}_{G,coll} = F_R (\tau_{cov} \alpha_{abs}) - F_R \frac{U_{L,coll} (T_i - T_a)}{\dot{G}_{G,coll}} \quad (3.6)$$

όπου ο συντελεστής F_R ονομάζεται συντελεστής θερμικής απολαβής του συλλέκτη [heat removal factor] και εκφράζει τη διόρθωση που πρέπει να γίνει στις εξισώσεις όταν χρησιμοποιείται η θερμοκρασία T_{in} εισαγωγής στο συλλέκτη του θερμικού ρευστού κι όχι η θερμοκρασία T_{abs} του απορροφητή. Ο συντελεστής F_R είναι αδιάστατος αριθμός και αντιπροσωπεύει την πραγματική ενεργειακή απολαβή που θα είχε ο συλλέκτης αν η θερμοκρασία του απορροφητή ήταν ίση με τη θερμοκρασία του θερμικού ρευστού που εισάγεται στο συλλέκτη.

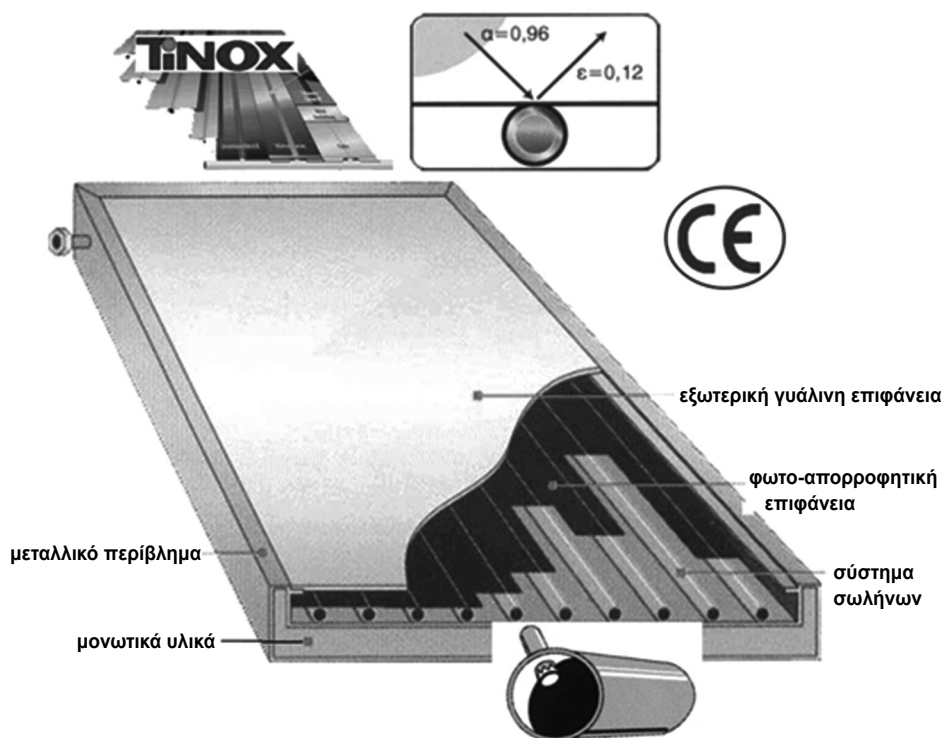
Στα ηλιακά θερμικά συστήματα το βασικό συστατικό στοιχείο είναι ο *ηλιακός συλλέκτης*. Εκτός του συλλέκτη ένα *ηλιακό θερμικό σύστημα* αποτελείται κι από άλλα τμήματα (ανάλογα με το σχεδιασμό και τη χρήση του), όπως το *ρευστό υλικό μέσο μεταφοράς της θερμότητας* και το *ανάλογο σύστημα σωληνώσεων*, η *δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας*, *πιθανοί εναλλάκτες θερμότητας*, *πιθανές αντλίες* και *πιθανοί αισθητήρες*, καθώς και *συσκευές ελέγχου του συστήματος*. Στο επόμενο τμήμα του βιβλίου θα παρουσιαστούν βασικά τεχνικά στοιχεία που αφορούν τα κύρια τμήματα (μέρη) από τα οποία αποτελείται ένα ηλιακό θερμικό σύστημα. Στη συνέχεια θα γίνει αναφορά στην ενεργειακή απόδοση των συστημάτων και στις πηγές απωλειών. Θα ακολουθήσει η παρουσίαση ορισμένων στοιχείων που αφορούν το σχεδιασμό των ηλιακών θερμικών συστημάτων. Αμέσως μετά παρουσιάζονται οι κυριότερες πρακτικές εφαρμογές των ηλιακών θερμικών συστημάτων. Ξεχωριστά θα παρουσιαστεί ο ηλιακός κλιματισμός-δροσισμός [solar cooling]. Στα τελευταία μέρη του τμήματος της τεχνικής περιγραφής θα γίνει αναφορά σε ορισμένες υπολογιστικές μεθόδους για την εκτίμηση του θερμικού φορτίου ενός κτιρίου (που είναι η βασική προϋπόθεση για τον πετυχημένο σχεδιασμό ενός ηλιακού θερμικού συστήματος), καθώς και σε υπολογιστικές μεθόδους που αφορούν γενικότερα το σχεδιασμό και τη μοντελοποίηση ηλιακών θερμικών συστημάτων.

3.2.3 Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες

α) Γενικά - κατασκευή

Ο συλλέκτης είναι το πιο βασικό κομμάτι ενός ηλιακού συστήματος γιατί μετατρέπει σημαντικό τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμότητα, η οποία στη συνέχεια μεταφέρεται μέσω θερμικού ρευστού στα λοιπά τμήματα του συστήματος. Παρακάτω θα γίνει αναφορά στα βασικά μέρη ενός τυπικού επίπεδου ηλιακού συλλέκτη (οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες θα εξεταστούν ξεχωριστά).

Το Σχήμα 3.6 δείχνει τα βασικά μέρη ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη με υγρό θερμικό ρευστό (συνήθως νερό). Αποτελείται από τον απορροφητή (απορροφητική επιφάνεια-absorber), το διαφανές κάλυμμα του απορροφητή, το σύστημα σωληνώσεων κυκλοφορίας του θερμικού ρευστού, το πλαίσιο και τη μόνωση θέρμανσης. Ανάλογα με το σχεδιασμό κάθε συλλέκτη μπορεί να περιλαμβάνει ορισμένα μόνο από τα παραπάνω μέρη⁵⁰. Το βασικό πρότυπο με το οποίο λειτουργεί ένας ηλιακός συλλέκτης είναι ότι η ακτινοβολία απορροφάται από τον απορροφητή, μετατρέπεται σε εσωτερική θερμική ενέργεια και μεταφέρεται ως θερμότητα στο θερμικό ρευστό που κυκλοφορεί μέσα στο σύστημα σωληνώσεων.



Σχήμα 3.6 Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης. Το α και ϵ είναι ο συντελεστής απορρόφησης και εκπομπής αντίστοιχα του απορροφητή).
(Πηγή: Olympic sun)

⁵⁰ Για παράδειγμα, υπάρχουν ακάλυπτοι ηλιακοί συλλέκτες (που χρησιμοποιούνται κυρίως για θέρμανση κολυμβητικών δεξαμενών), οι οποίοι δεν έχουν ούτε το διαφανές κάλυμμα του απορροφητή ούτε θερμική μόνωση.



α) Απορροφητής

Ο απορροφητής μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος [short-wave] σε θερμότητα (φωτοθερμικό φαινόμενο). Καθώς όμως απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνεται ο ίδιος και εκπέμπει θερμική ακτινοβολία (υπέρυθρη) σε μεγάλο μήκος κύματος [long-wave]. Για να είναι πιο αποτελεσματικός ο απορροφητής θα πρέπει να έχει μεγάλο συντελεστή απορρόφησης α ($\alpha \sim 1$) στο ηλιακό φάσμα και μικρό συντελεστή εκπομπής ε ($\varepsilon \sim 0$) στο φάσμα της θερμικής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος⁵¹. Επίσης ο απορροφητής θα πρέπει να έχει καλή θερμική αγωγιμότητα για να μεταφέρεται γρήγορα και αποτελεσματικά η θερμότητα προς το θερμικό ρευστό που βρίσκεται στο σύστημα σωληνώσεων. Τέλος θα πρέπει να είναι ανθεκτικός στις υψηλές θερμοκρασίες (μέχρι 200°C) που αναπτύσσονται στην περιοχή ανάμεσα στον απορροφητή και στο διαφανές κάλυμμα. Το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένοι οι απορροφητές είναι χαλκός ή αλουμίνιο, ενώ τα τελευταία χρόνια κερδίζουν έδαφος όλο και περισσότερο κάποια πολυμερικά υλικά ή χάλυβας. Η εξωτερική τους επιφάνεια επιστρώνεται με βαφή⁵² (συνήθως μαύρου χρώματος) που αποτελεί το πιο σημαντικό στοιχείο του απορροφητή καθώς αυτή πρέπει να έχει τις επιλεκτικές, κατάλληλες ιδιότητες απορρόφησης και εκπομπής ακτινοβολίας (απορροφητές επιλεκτικής επιφάνειας ή επιλεκτικοί απορροφητές).

β) Διαφανές κάλυμμα

Το διαφανές κάλυμμα που τοποθετείται πάνω από την εξωτερική όψη του απορροφητή πρέπει να πληροί δυο βασικές ιδιότητες. Από τη μια πρέπει ο συντελεστής διαπερατότητάς του τ για την ηλιακή ακτινοβολία να είναι μεγάλος (έτσι ώστε το σύνολο σχεδόν της ηλιακής ακτινοβολίας να το διαπερνά και να προσπίπτει στον απορροφητή) και ο συντελεστής διαπερατότητάς του τ για τη θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που εκπέμπει ο απορροφητής να είναι μικρός. Ταυτόχρονα πρέπει να μειώνει τις απώλειες θερμότητας του απορροφητή προς το περιβάλλον λόγω ρευμάτων συμμεταφοράς [convection]. Το συνηθέστερο υλικό από το οποίο κατασκευάζεται το διαφανές κάλυμμα είναι το γυαλί (εναλλακτική λύση είναι κάποιο εξειδικευμένο συνθετικό υλικό). Στο γυαλί μπορούν να προστεθούν ρινίσματα σιδήρου που μειώνουν την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας (και συνεπώς αυξάνουν το συντελεστή διαπερατότητας). Επίσης η κάτω όψη του γυαλιού (που βλέπει προς τον απορροφητή) μπορεί να επιστρωθεί με λεπτό στρώμα το οποίο ανακλά την υπέρυθρη θερμική ακτινοβολία που εκπέμπει ο απορροφητής, έτσι ώστε οι θερμικές απώλειες του συστήματος να είναι ακόμα μικρότερες.

⁵¹ Αυτός είναι ο λόγος που προτιμώνται οι λεγόμενοι επιλεκτικοί απορροφητές.

⁵² Συνήθως τα στρώματα της βαφής είναι περισσότερα από ένα.



γ) Πλαίσιο συλλέκτη - μόνωση

Το πλαίσιο, το οποίο περιβάλλει το συλλέκτη, μπορεί να κατασκευαστεί από αλουμίνιο, γαλβανισμένο χάλυβα, άλλο συνθετικό υλικό, ακόμη κι από ξύλο. Σκοπός του είναι να προσδώσει μηχανική αντοχή στο συλλέκτη, και να τον προστατεύσει από τις περιβαλλοντικές επιδράσεις. Ταυτόχρονα θα πρέπει το πλαίσιο να μην είναι ερμητικά κλειστό, αλλά να έχει μικρό αερισμό, έτσι ώστε να προσαρμόζεται ο εσωτερικός αέρας στις μεταβολές της πίεσης που δημιουργούνται με την αυξομείωση της θερμοκρασίας και ταυτόχρονα να απομακρύνεται η υγρασία. Επίσης στις πλευρές του πλαισίου τοποθετείται μονωτικό υλικό (πολυουρεθάνη ή μεταλλικό μαλλί [mineral wool]) για τη μείωση των θερμικών απωλειών του συλλέκτη.

3.2.4 Είδη επίπεδων ηλιακών συλλεκτών

Καθώς οι εφαρμογές των ηλιακών θερμικών συστημάτων συνεχώς διευρύνονται, σχεδιάζονται και αναπτύσσονται καινούρια είδη ηλιακών συλλεκτών. Στην αγορά σήμερα υπάρχει πλήθος επίπεδων ηλιακών συλλεκτών με μικρές ή μεγάλες διαφοροποιήσεις μεταξύ τους. Σε εξειδικευμένα βιβλία ή ηλεκτρονικές ιστοσελίδες μπορεί ο αναγνώστης να ενημερωθεί αναλυτικά για τα διαφορετικά είδη και τις εφαρμογές τους. Στα πλαίσια του παρόντος βιβλίου θα γίνει αναφορά στους βασικούς τύπους συλλεκτών που χρησιμοποιούνται στις κυριότερες εφαρμογές ηλιακών θερμικών συστημάτων (για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, καθώς και για ηλιακή θέρμανση και ψύξη κτιρίων ή θέρμανση κολυμβητικών δεξαμενών)⁵³. Ο πιο διαδεδομένος διαχωρισμός στους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες γίνεται με βάση το *θερμικό ρευστό* που χρησιμοποιούν για την *πρωτογενή*⁵⁴ απαγωγή της θερμότητας, καθώς και με τον *τρόπο* που απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία και μεταφέρουν τη θερμότητα. Σύμφωνα με τα κριτήρια αυτά οι επίπεδοι συλλέκτες μπορούν να διαχωριστούν στους επίπεδους συλλέκτες με *υγρό θερμικό ρευστό* [liquid type collectors] και στους επίπεδους συλλέκτες με *αέριο θερμικό ρευστό* [air type collectors]. Μια τρίτη ξεχωριστή κατηγορία είναι οι *συλλέκτες κενού* [evacuated tube collectors].

⁵³ Δε θα γίνει εδώ αναφορά στους συγκεντρωτικούς (παραβολικούς) συλλέκτες, γιατί αυτοί χρησιμοποιούνται κυρίως στα ηλιακά θερμικά συστήματα ισχύος, τα οποία εξετάζονται παρακάτω.

⁵⁴ Χρησιμοποιείται ο όρος πρωτογενής για να μπορεί να γίνει πιο ξεκάθαρος ο διαχωρισμός μεταξύ των δύο κατηγοριών συλλεκτών (επίπεδοι με υγρό θερμικό ρευστό και συλλέκτες κενού), καθώς στην πρώτη κατηγορία κάποιο υγρό (συνήθως νερό) υποδέχεται τη θερμότητα από τον απορροφητή, ενώ στη δεύτερη η θερμότητα μεταφέρεται διά μέσου μείγματος υγρού-αερίου (π.χ., αιθανόλης) σε δίκτυο σωληνώσεων στο οποίο κυκλοφορεί νερό ή γλυκόλη.



α) Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες με υγρό θερμικό ρευστό

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι συλλέκτες που χρησιμοποιούνται (κυρίως) για θέρμανση κολυμβητικής δεξαμενής και οι συλλέκτες που χρησιμοποιούνται (κυρίως) για θέρμανση Νερού Χρήσης (ΘΝΧ) ή για ηλιακή θέρμανση και ψύξη κτιρίων.

● *Ηλιακοί συλλέκτες για θέρμανση κολυμβητικής δεξαμενής*

Η πιο απλή εκδοχή τέτοιων συλλεκτών (που είναι και η συνηθέστερη) περιλαμβάνει έναν απορροφητή και το σύστημα σωλήνων στο οποίο κυκλοφορεί το θερμικό ρευστό (συνήθως νερό). Οι συλλέκτες αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούνται κυρίως για τη θέρμανση του νερού κολυμβητικής δεξαμενής σε ανοικτό χώρο [open-air swimming pool]. Η απαιτούμενη θέρμανση του νερού γίνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Συνεπώς είναι περιττό κάποιο σύστημα θερμικής μόνωσης ή ακόμα και η ύπαρξη διαφανούς καλύμματος μπροστά από τον απορροφητή. Το υλικό από το οποίο κατασκευάζεται ο απορροφητής είναι κυρίως το EPDM [Ethylene-Propylen-Dien-Monomers], το οποίο είναι ανθεκτικό τόσο στην υπεριώδη ακτινοβολία UV όσο και σε θερμοκρασίες ακόμα και μέχρι 150°C⁵⁵. Αυτού του τύπου οι απορροφητές είναι πολύ φτηνοί και με μεγάλη απόδοση για τις συγκεκριμένες εφαρμογές.

● *Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες με διαφανές κάλυμμα*

Αυτού του τύπου οι ηλιακοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται όταν χρειάζεται να γίνει θέρμανση του θερμικού ρευστού σε υψηλότερες θερμοκρασίες (50°C < θ). Οι πιο συνηθισμένες εφαρμογές είναι για τη ΘΝΧ (σε οικίες ή ξενοδοχεία), καθώς και για ηλιακή θέρμανση και δροσισμό⁵⁶ κτιρίων. Για να επιτευχθούν υψηλότερες θερμοκρασίες του θερμικού ρευστού απαιτείται η ελαχιστοποίηση των θερμικών και οπτικών απωλειών. Για τη μείωση των θερμικών απωλειών χρησιμοποιείται μονωτικό υλικό στις πλαϊνές και τις πίσω πλευρές του συλλέκτη. Επίσης υπάρχει το διαφανές κάλυμμα που μειώνει τις θερμικές απώλειες λόγω ρευμάτων μεταφοράς [convection]. Οι οπτικές απώλειες μειώνονται με την κατάλληλη επιλογή απορρο-

⁵⁵ Τέτοιες θερμοκρασίες συνήθως δεν εμφανίζονται γιατί δεν υπάρχει η θερμική μόνωση που προσφέρει το ειδικό υλικό και το διαφανές κάλυμμα.

⁵⁶ Όταν γίνεται αναφορά σε ηλιακά συστήματα, χρησιμοποιείται η έκφραση δροσισμός αντί της λέξης ψύξη ή κλιματισμός για να επισημανθεί το γεγονός ότι τα ηλιακά συστήματα μπορούν να μειώσουν τη θερμοκρασία ενός χώρου σε θερμοκρασίες 26-27°C (τυπικές τιμές) κι όχι σε χαμηλότερες, όπως τα συμβατικά συστήματα ψύξης.



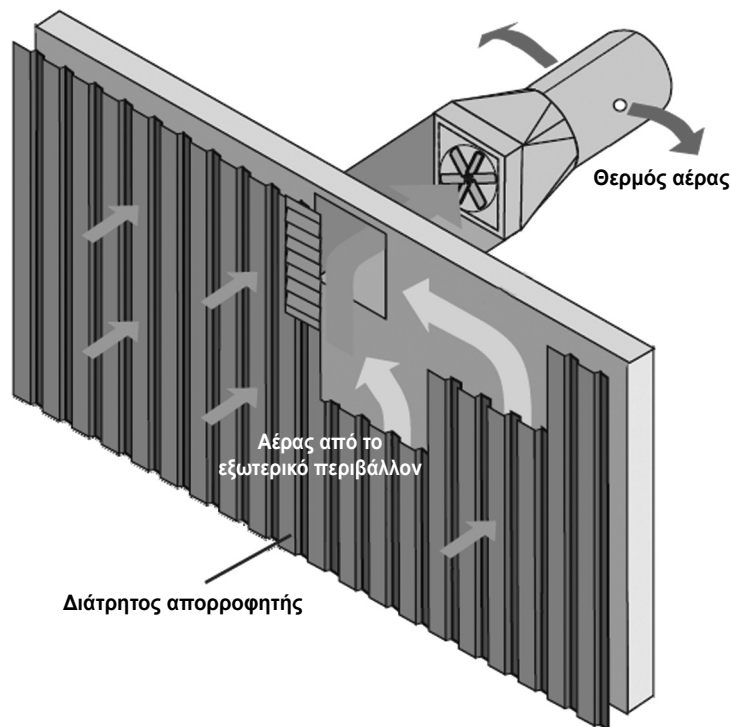
φητή (συνήθως επιλεκτικής επιφάνειας, ώστε να μεγιστοποιηθεί η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας), καθώς και με την επιλογή διαφανούς καλύμματος του οποίου η διαπερατότητα πρέπει να είναι μέγιστη στη μικρού μήκους κύματος ηλιακής ακτινοβολίας. Οι ηλιακοί συλλέκτες παράγονται (ως ανεξάρτητες μονάδες) με επιφάνεια η οποία συνήθως κυμαίνεται από 1 έως 16 m². Οι συλλέκτες εγκαθίστανται συνήθως στις στέγες. Υπάρχει η δυνατότητα να γίνει ενσωμάτωση των ηλιακών συλλεκτών στις στέγες αρκεί εκείνες να έχουν την κατάλληλη κλίση. Σ' αυτή την περίπτωση το πλαίσιο των συλλεκτών μπορεί να είναι κατασκευασμένο από ξύλο (όπως γίνεται σε περιπτώσεις συλλεκτών στην Αυστρία ή στη Γερμανία)⁵⁷. Αν οι συλλέκτες δεν ενσωματωθούν στις στέγες (που είναι και το συνηθέστερο στην Ελλάδα) τότε το πλαίσιο θα πρέπει να είναι κατασκευασμένο από αλουμίνιο ή χάλυβα για να αντέχει στην έκθεσή του στην ηλιακή ακτινοβολία και στη μεγαλύτερη καταπόνησή του από τις κλιματικές συνθήκες. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα ενσωμάτωσης των ηλιακών συλλεκτών στους νότιους τοίχους του κτιρίου. Αυτό συνιστάται συνήθως σε συστήματα που έχουν σχεδιαστεί για να καλύπτουν ταυτόχρονα ανάγκες ΘΝΧ και θέρμανσης χώρου σε συνδυασμό με μονάδες βιομάζας (τα λεγόμενα combi-systems).

β) Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες με αέριο θερμικό ρευστό

Μια δεύτερη κατηγορία επίπεδων ηλιακών συλλεκτών με διαφανές κάλυμμα είναι όσοι χρησιμοποιούν ως θερμικό ρευστό τον *αέρα*. Τέτοιοι ηλιακοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται κυρίως στα συστήματα θέρμανσης χώρων⁵⁸ και στα συνδυασμένα συστήματα θέρμανσης χώρων και ζεστού νερού χρήσης [combi-systems]. Ο αέρας εισάγεται από τη μία πλευρά του συλλέκτη και, αφού έρθει σε επαφή με όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ποσοστό της επιφάνειας του απορροφητή, εξέρχεται από την άλλη πλευρά. Η κυκλοφορία του αέρα επιτυγχάνεται είτε με φυσικό τρόπο (ρεύματα μεταφοράς) είτε με τη βοήθεια ανεμιστήρων.

⁵⁷ Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 133.

⁵⁸ Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την ξήρανση γεωργικών προϊόντων.



Σχήμα 3.7 Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας ενός ηλιακού συλλέκτη αέρα.
(Πηγή: commons.wikimedia.org)

Επειδή ο αέρας έχει πολύ μικρότερη θερμοχωρητικότητα από το νερό, για να γίνει αποτελεσματικότερη η μεταφορά θερμότητας από τον απορροφητή στον αέρα (θερμικό ρευστό) ο απορροφητής σχεδιάζεται ώστε η ενεργή επιφάνειά του να γίνει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη⁵⁹. Παρ' όλες τις προσαρμογές που μπορούν να γίνουν σ' αυτού του είδους τους συλλέκτες η απόδοσή τους είναι μικρότερη από τους ηλιακούς συλλέκτες με υγρό θερμικό ρευστό και για αυτό χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές χαμηλότερης θερμοκρασίας. Τα βασικότερα πλεονεκτήματά τους σε σύγκριση με τους ηλιακούς συλλέκτες με υγρό θερμικό ρευστό είναι ότι ο αέρας δεν είναι διαβρωτικός, δεν παγώνει (όπως το νερό) και είναι δωρεάν. Τα βασικότερα μειονεκτήματα (εκτός της χαμηλότερης απόδοσης) είναι ότι οι σωληνώσεις

⁵⁹ Ενεργή επιφάνεια ονομάζεται η επιφάνεια με την οποία αλληλεπιδρά ο αέρας και έτσι επιτυγχάνεται η μεταφορά θερμότητας. Ένας τρόπος αύξησης της ενεργής επιφάνειας είναι να κατασκευάζεται η επιφάνεια με πολλές πτυχώσεις, δηλαδή κυματιστή.



είναι πιο ογκώδεις⁶⁰, οι ανεμιστήρες καταλαμβάνουν μεγαλύτερο χώρο από τις αντλίες⁶¹ και η ηλεκτρική κατανάλωση των ανεμιστήρων είναι μεγαλύτερη απ' αυτή των αντλιών.



Εικόνα 3.1 Μια εγκατάσταση δύο επίπεδων ηλιακών συλλεκτών αέρα στη νότια πλευρά ενός κτιρίου στις ΗΠΑ.

(Πηγή: commons.wikimedia.org)

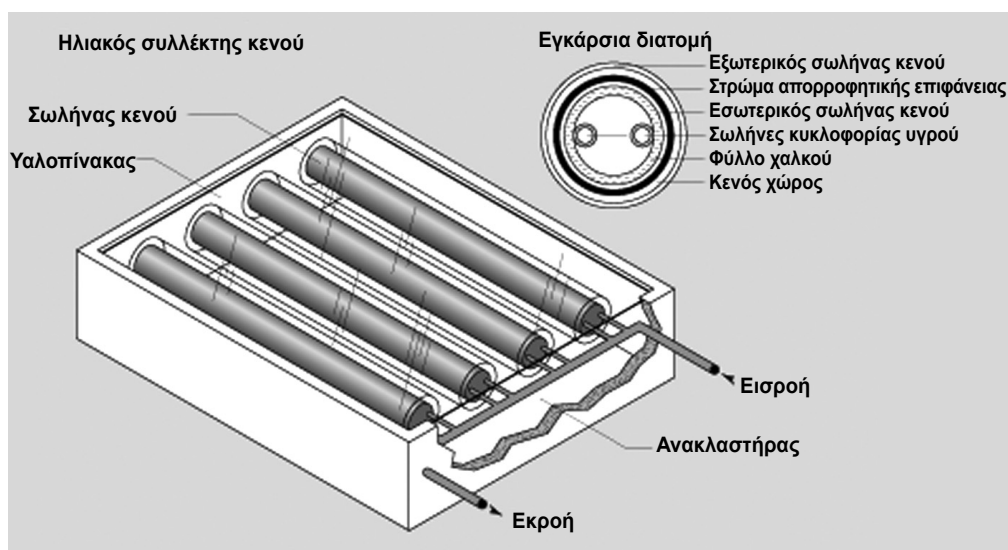
γ) Συλλέκτες κενού [evacuated tube collectors]

Αυτοί οι ηλιακοί συλλέκτες ονομάζονται έτσι εξαιτίας του σχεδιασμού και του τρόπου λειτουργίας τους, που στηρίζεται στην ύπαρξη μονωμένου σωλήνα με στρώμα κενού (σωλήνας κενού).

⁶⁰ Καθώς ο όγκος του αέρα που χρειάζεται είναι μεγαλύτερος από αυτόν του υγρού, αφού ο αέρας έχει μικρότερη θερμοχωρητικότητα από το υγρό.

⁶¹ Σε κάποια ΗΘΣ υγρών συλλεκτών χρειάζονται αντλίες για την κυκλοφορία του θερμικού ρευστού (βλ. παρακάτω), ενώ σ' αυτά των αέριων συλλεκτών χρειάζονται ανεμιστήρες.

Τι είναι όμως αυτός ο σωλήνας; Στην πραγματικότητα είναι σύστημα που περιλαμβάνει εσωτερικό και εξωτερικό σωλήνα (τον ένα μέσα στο άλλον) και ανάμεσά τους υπάρχει κενό. Ο εξωτερικός σωλήνας είναι κατασκευασμένος από διαφανές βοριοπυριτικό γυαλί (π.χ., Pyrex) (διαμέτρου ~25 mm) και έχει υψηλή αντοχή (για να αντέχει ακόμα και χαλαζόπτωση)⁶². Ο εσωτερικός σωλήνας είναι κι αυτός κατασκευασμένος από το ίδιο υλικό, αλλά είναι επιστρωμένος με ειδική επιλεκτική επίστρωση που απορροφά ισχυρά την ηλιακή ακτινοβολία και θερμαίνεται. Οι απώλειες θερμότητας λόγω αγωγής και συμμεταφοράς⁶³ (από την επιφάνεια του εσωτερικού σωλήνα) προς τα έξω μειώνονται εξαιτίας της δημιουργίας κενού αέρος μεταξύ των δύο σωλήνων (εσωτερικού και εξωτερικού)⁶⁴. Η θερμότητα που απορροφάται από την ειδική επίστρωση μεταφέρεται μέσω ενός ειδικού θερμικού αυλού [heat pipe] σε νερό το οποίο κυκλοφορεί μέσα σε σωλήνα που βρίσκεται στην κορυφή του συλλέκτη (βλ. Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8 Σχηματική αναπαράσταση ενός ηλιακού συλλέκτη κενού.
(Πηγή: commons.wikimedia.org)

⁶² Κορογιαννάκης Π., Τσούτσος Θ., Γκούσκος Ζ., 2008, σελ. 12.

⁶³ Είναι ο μονολεκτικός ελληνικός όρος που χρησιμοποιείται (αντί για τον περιφραστικό μεταφορά θερμότητας με ρεύματα) για την απόδοση του αγγλικού όρου convection.

⁶⁴ Συνολικά απορροφάται το 93% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.



Εικόνα 3.2 Ηλιακός συλλέκτης κενού εγκατεστημένος στη νότια πλευρά στέγης σε κατοικία στη Γερμανία.

(Πηγή: commons.wikimedia.org)

Πώς όμως μεταφέρεται η θερμότητα μέσα στο θερμικό αυλό; Μέσα στο θερμικό αυλό υπάρχει μικρή ποσότητα υγρού (π.χ., μεθανόλης) που υφίσταται έναν κύκλο εξάτμισης-συμπύκνωσης. Στην αρχή αυτού του κύκλου η θερμότητα που αναπτύσσεται στην ειδική επιλεκτική επιφάνεια του εσωτερικού σωλήνα του συλλέκτη κενού μεταφέρεται στο θερμικό αυλό και προκαλεί την εξάτμιση του υγρού. Ο ατμός ταξιδεύει μέχρι το σημείο (συμπυκνωτής) που βρίσκεται ο σωλήνας κυκλοφορίας του νερού και συμπυκνώνεται αποδίδοντας τη λανθάνουσα θερμότητά του στο νερό. Στη συνέχεια ο υγροποιημένος ατμός επιστρέφει στο αρχικό σημείο για να ξαναρχίσει ο κύκλος. Η θερμότητα μεταφέρεται μέσω του νερού (ή άλλου υγρού, όπως γλυκόλη) στη δεξαμενή θερμότητας ή σε άλλο σημείο για να συνεχιστεί η θερμική διαδικασία για την οποία έχει σχεδιαστεί ο συλλέκτης (θέρμανση νερού χρήσης, ηλιακή θέρμανση, ηλιακός δροσισμός κ.λπ.).

Οι συλλέκτες κενού μπορούν να λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τους κλασικούς επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες και επιτυγχάνουν μεγαλύτερους συντελεστές απόδοσης απ' αυτούς σε ημερήσια βάση κυρίως για θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ περιβάλλοντος και συλλέκτη μεγαλύτερες από 30-50°C⁶⁵.

⁶⁵ Kaltshmit et al, 2007, σελ. 138.



Σχήμα 3.9 Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας ενός ηλιακού συλλέκτη κενού.
(Πηγή: commons.wikimedia.org)

Βέβαια το κόστος τους είναι μεγαλύτερο (σε σχέση με τους κλασικούς επιπέδους ηλιακούς συλλέκτες) και πάντα για την εγκατάστασή τους χρειάζεται οικονομικο-τεχνική μελέτη κόστους-απόδοσης [cost-effectiveness] για να διαπιστωθεί η βιωσιμότητα της εγκατάστασης⁶⁶.

3.2.5 Χαρακτηριστικές καμπύλες επίπεδων ηλιακών συλλεκτών

Η απόδοση των ηλιακών συλλεκτών εξαρτάται καθοριστικά από τις οπτικές και θερμικές απώλειές τους. Οι οπτικές απώλειες του συλλέκτη καθορίζονται ουσιαστικά από το ενεργό γινόμενο του συντελεστή απορρόφησης ακτινοβολίας α_{abs} του απορροφητή και του συντελεστή διαπερατότητας τ_{cov} του διαφανούς καλύμματος. Ο κύριος παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται το γινόμενο $\tau_{\text{cov}} \alpha_{\text{abs}}$ είναι το υλικό κατασκευής του απορροφητή και του διαφανούς καλύμματος, ενώ εξαρτάται συγκριτικά πολύ λιγότερο από το φάσμα της ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία.

⁶⁶ Η παραπάνω παρουσίαση των ηλιακών συλλεκτών κενού αφορά στη βασική αρχή λειτουργίας τους. Η εργαστηριακή και βιομηχανική έρευνα έχει οδηγήσει στην παραγωγή πολλών τύπων ηλιακών συλλεκτών κενού. Για μια παραπάνω ανάλυση βλ. Kalogirou, 2009, σελ. 131-135.

Οι θερμικές απώλειες του συλλέκτη περιγράφονται μέσω του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας $\dot{U}_{L, coll}$ του συλλέκτη και αποτυπώνονται στη σχέση $\dot{U}_{L, coll} (T_{abs} - T_a) A_c$.

Ο τύπος που δίνει το συντελεστή απόδοσης⁶⁷ ενός συλλέκτη είναι ο παρακάτω:

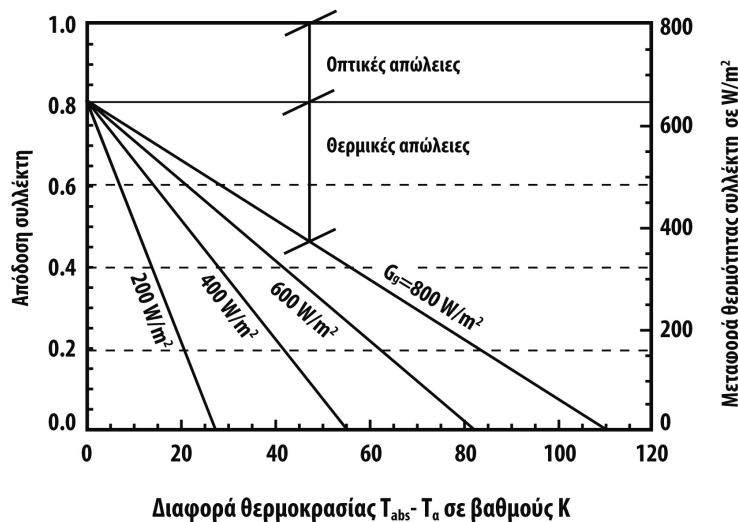
$$\eta_{instant} = \dot{Q}_{useful} / \dot{G}_{G, coll} = (\tau_{cov} \alpha_{abs}) - \frac{U_{L, coll} (T_{abs} - T_a)}{\dot{G}_{G, coll}}$$

ή αν εκφραστεί συμπεριλαμβάνοντας και το F_R :

$$\eta_{instant} = \dot{Q}_{useful} / \dot{G}_{G, coll} = F_R (\tau_{cov} \alpha_{abs}) - F_R \frac{U_{L, coll} (T_i - T_a)}{\dot{G}_{G, coll}}$$

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω σχέσεις, η απόδοση η ενός συλλέκτη για δεδομένες τιμές των τ_{cov} , α_{abs} , F_R , $\dot{U}_{L, coll}$ (που δίδονται από τους κατασκευαστές) εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασιών $(T_{abs} - T_a)$ ή $(T_i - T_a)$ και από την πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας $\dot{G}_{G, coll}$ που προσπίπτει στο συλλέκτη.

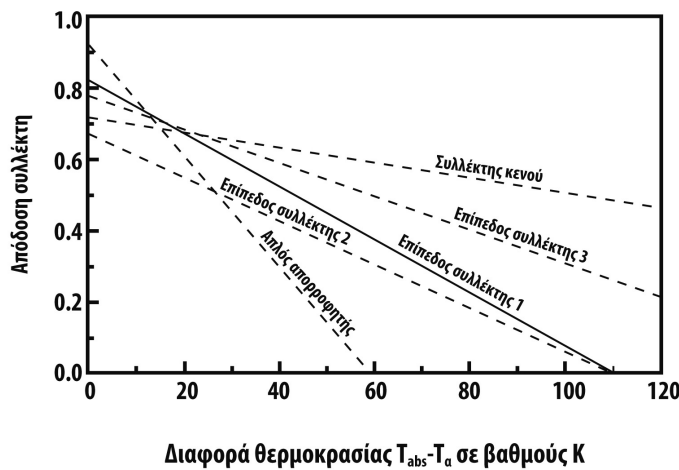
Στα Σχήματα 3.10 και 3.11 δίνονται οι γραφικές παραστάσεις του συντελεστή απόδοσης η [collector efficiency] διαφόρων συλλεκτών σε συνάρτηση με τη διαφορά θερμοκρασιών $(T_{abs} - T_a)$ ή $(\theta_{abs} - \theta_a)$ ⁶⁸.



Σχήμα 3.10 Γραφική παράσταση του συντελεστή απόδοσης η [collector efficiency] επίπεδου ηλιακού συλλέκτη για μεταβαλλόμενες τιμές πυκνότητας ηλιακής ακτινοβολίας σε συνάρτηση με τη διαφορά θερμοκρασιών απορροφητή και περιβάλλοντος $(T_{abs} - T_a)$.

⁶⁷ Για το θέμα που εξετάζεται στο παρόν τμήμα του βιβλίου δεν ενδιαφέρει ουσιαστικά αν γίνεται αναφορά στο μέσο ή στιγμιαίο συντελεστή απόδοσης.

⁶⁸ Οι διαφορές θερμοκρασίας $(T_{abs} - T_a)$ και $(\theta_{abs} - \theta_a)$ ταυτίζονται.



Σχήμα 3.11 Γραφική παράσταση του συντελεστή απόδοσης η [collector efficiency] διαφόρων επιπέδων μη συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών (επίπεδων ηλιακών συλλεκτών) σε συνάρτηση με τη διαφορά θερμοκρασιών απορροφητή και περιβάλλοντος ($T_{abs} - T_a$).

Στο Σχήμα 3.10 οι (θεωρητικές) καμπύλες είναι ευθείες που αντιστοιχούν σε διαφορετικές πυκνότητες ηλιακής ακτινοβολίας. Το σημείο τομής στον άξονα y είναι το γινόμενο $\tau_{cov} \alpha_{abs}$. Όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας $\dot{G}_{G, coll}$ (π.χ. 800 W/m^2) τόσο μικρότερη είναι η κλίση της ευθείας, που σημαίνει ότι ο συλλέκτης αποδίδει καλύτερα ακόμα κι όταν η θερμοκρασιακή διαφορά ($T_{abs} - T_a$) είναι μεγάλη. Σε χαμηλές τιμές πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας $\dot{G}_{G, coll}$ (π.χ., 200 W/m^2) οι συλλέκτες αποδίδουν καλά μόνο σε μικρές θερμοκρασιακές διαφορές ($T_{abs} - T_a$).

Στο Σχήμα 3.11 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις του συντελεστή απόδοσης η διαφόρων μη συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών (επίπεδων ηλιακών συλλεκτών) σε συνάρτηση με τη διαφορά θερμοκρασιών ($T_{abs} - T_a$) ή ($\theta_{abs} - \theta_a$).

Όπως φαίνεται απ' το Σχήμα 3.11, ο απλούστερος συλλέκτης-απλός απορροφητής που χρησιμοποιείται κυρίως για τη θέρμανση νερού δεξαμενών κολύμβησης έχει την πιο «απότομη» καμπύλη που σημαίνει ότι για μικρές σχετικά διαφορές θερμοκρασίας ($T_{abs} - T_a$) έχει την πιο υψηλή απόδοση⁶⁹. Αυτό αποδεικνύεται και από τον υψηλότερο συντελεστή οπτικής απόδοσης που έχει ο συλλέκτης (στον οποίο υπολογίζονται μόνο οι οπτικές απώλειες), πράγμα φυσιολογικό, αφού απουσιάζει

⁶⁹ Αυτή η υψηλή απόδοση αυξάνει τη συνολική χρήσιμη θερμική ενέργεια που αποδίδει ο συλλέκτης, καθώς τέτοιοι συλλέκτες χρησιμοποιούνται κυρίως για τη θέρμανση κολυμβητικής δεξαμενής τους θερμούς μήνες του χρόνου (καλοκαίρι, ύστερη άνοιξη, πρώιμο φθινόπωρο).

το διαφανές κάλυμμα. Όταν όμως οι διαφορές θερμοκρασίας ($T_{\text{abs}} - T_a$) γίνουν μεγαλύτερες, τότε η απόδοση μικραίνει πολύ. Από το διάγραμμα φαίνονται επίσης οι υψηλότερες αποδόσεις που έχουν οι συλλέκτες κενού για όλο σχεδόν το εύρος των θερμοκρασιών (ιδιαίτερα για μεγάλες διαφορές του $T_{\text{abs}} - T_a$). Τέλος φαίνεται ότι οι συλλέκτες, οι οποίοι προορίζονται για σταθερή λειτουργία όλον το χρόνο έχουν πιο ομαλές καμπύλες (λιγότερο απότομες), καθώς είναι επιθυμητό η απόδοσή τους να μην επηρεάζεται (όσο το δυνατόν) από τις θερμοκρασιακές διαφορές ($T_{\text{abs}} - T_a$). Από τους κλασικούς επίπεδους συλλέκτες εκείνος που έχει την πιο ομαλή καμπύλη είναι εκείνος με την επιλεκτική απορροφητική επιφάνεια.

3.2.6 Υπόλοιπα στοιχεία (μέρη) ηλιακών θερμικών συστημάτων

Εκτός από τον ηλιακό συλλέκτη (που αποτελεί το βασικό τμήμα ενός ηλιακού θερμικού συστήματος) υπάρχουν ορισμένα άλλα βασικά στοιχεία που συνιστούν ένα ηλιακό θερμικό σύστημα, όπως η αποθήκη θερμότητας, οι αισθητήρες και τα συστήματα ελέγχου, το θερμικό ρευστό, το σύστημα των σωληνώσεων, οι εναλλάκτες θερμότητας και οι αντλίες.

α) Αποθήκη θερμότητας [Heat store]

Η ανάγκη για την ύπαρξη αποθήκης θερμότητας στο σχεδιασμό των ηλιακών θερμικών συστημάτων (ΗΘΣ) έχει προκύψει γιατί η διαθεσιμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας δε συμπίπτει πάντα χρονικά με τη ζήτηση της παραγόμενης θερμότητας (για παράδειγμα, τις νυχτερινές ώρες που δεν είναι διαθέσιμη η ηλιακή ακτινοβολία, υπάρχει ζήτηση για θερμό νερό χρήσης). Μια αποθήκη θερμότητας (όπως υποδηλώνει και η ονομασία της) αποθηκεύει τη θερμότητα που παράγει ένα ΗΘΣ και την αποδίδει στο χρήστη όταν εκείνος επιθυμεί. Τα βασικά στοιχεία που αποτελούν μια αποθήκη θερμότητας είναι το *υλικό μέσο αποθήκευσης* της θερμότητας (π.χ., νερό, άμμος, γρανίτης κ.λπ.), το *μονωτικό δοχείο*, καθώς και το *σύστημα εισαγωγής και εξαγωγής* της θερμότητας από το δοχείο.

Οι αποθήκες θερμότητας μπορούν να διαχωριστούν ανάλογα με τη χρονική διάρκεια αποθήκευσης της θερμότητας σε αποθήκες *βραχείας διάρκειας* [short term storage], *ημερήσιας διάρκειας* [daily storage] και *εποχιακής διάρκειας* [seasonal storage]. Οι πρώτες (*βραχείας διάρκειας*) μπορούν να αποθηκεύσουν τη θερμότητα μόνο για λίγες ώρες. Τέτοιος τυπικός τύπος δεξαμενής είναι οι εξωτερικές δεξαμενές νερού που έχουν οι ηλιακοί θερμοσίφωνες. Οι δεξαμενές *ημερήσιας διάρκειας* μπορούν να αποθηκεύσουν τη θερμότητα για μία ή μερικές μέρες. Τέτοιες αποθήκες θερμότητας έχουν συνήθως τα ΗΘΣ για θέρμανση νερού χρήσης που υπάρχουν

σε βορειότερες χώρες της Ευρώπης (με εσωτερική δεξαμενή και αντλία κυκλοφορίας νερού), καθώς και τα λεγόμενα *compri systems* (δηλαδή συστήματα που χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα για θέρμανση νερού χρήσης και θέρμανση χώρων κτιρίου)⁷⁰. Οι δεξαμενές θερμότητας *εποχιακής διάρκειας* σχεδιάζονται για ΗΘΣ που πρέπει να καλύψουν τις συνολικές ανάγκες για θερμότητα μιας εγκατάστασης σε μεγάλο βάθος χρόνου, συνεπώς απαιτούνται δεξαμενές μεγάλου όγκου⁷¹. Γι' αυτό χρησιμοποιούνται μονωμένες δεξαμενές νερού, υδροφορείς και κατάλληλα διαμορφωμένες κατακόρυφες διατρήσεις του εδάφους⁷².

Η βασική φυσική ιδιότητα που καθορίζει την καταλληλότητα ενός υλικού μέσου να αποτελέσει υλικό αποθήκευσης της θερμότητας είναι η *θερμοχωρητικότητα του* [*heat capacity*]. Τα συνηθέστερα υλικά που χρησιμοποιούνται ως υλικά μέσα αποθήκευσης της θερμότητας είναι το νερό, τα βότσαλα(χαλίκια), ο γρανίτης, το συνθετικό λάδι και ο σίδηρος.

Η θερμοχωρητικότητα δεν είναι το μόνο κριτήριο για την επιλογή του υλικού αποθήκευσης της θερμότητας σε ένα ΗΘΣ. Για τη λήψη της απόφασης λαμβάνονται υπόψη διάφοροι οικονομοτεχνικοί παράγοντες, όπως η διαθεσιμότητα αυτού του υλικού, η συμβατότητά του με άλλα υλικά της κατασκευής (για την αποφυγή ανεπιθύμητων αλληλεπιδράσεων, π.χ., διάβρωση), η φιλικότητά του προς το περιβάλλον κ.λπ.

Υπάρχει ποικιλία σχεδιασμών για τις αποθήκες θερμότητας. Έτσι, μπορούν να προκύψουν αρκετές κατηγοριοποιήσεις. Μια κατηγοριοποίησή τους μπορεί να γίνει ανάλογα με τον τύπο της θερμικής διαδικασίας στον οποίο στηρίζεται η συσσώρευση και αποθήκευση της θερμότητας (φυσική ή χημική διαδικασία), καθώς και με την υλική φάση (στερεή ή υγρή κατά βάση) του υλικού αποθήκευσης θερμότητας. Οι τρεις βασικότερες κατηγορίες αποθηκών θερμότητας ανάλογα με το υλικό αποθήκευσης της θερμότητας είναι οι αποθήκες θερμότητες με υγρό (συνήθως νερό) [*liquid storage*], με στερεό υλικό [*solid-matter storage*] και με υλικά λανθάνουσας θερμότητας [*latent heat storage*].

● *Υγρή αποθήκευση* [*liquid storage*]

Είναι το είδος της αποθήκης θερμότητας που χρησιμοποιείται κατά κανόνα (ιδιαίτερα στα ΗΘΣ χαμηλών θερμοκρασιών). Συνήθως το υγρό (νερό) τοποθετείται σε ξεχωριστό δοχείο είτε στη φυσική του πίεση είτε υπό πίεση. Τα δοχεία κατα-

⁷⁰ Στη βιβλιογραφία ο όρος *compri systems* χρησιμοποιείται συνήθως για ηλιακά θερμικά συστήματα τα οποία έχουν ως βοηθητική πηγή θερμότητας [*backup system*] ένα λέβητα βιομάζας.

⁷¹ Τέτοιες δεξαμενές χρησιμοποιούνται σε συστήματα τηλεθέρμανσης [*district heating*] (βλέπε παρακάτω στο παρόν βιβλίο).

⁷² Για περισσότερα για τις δεξαμενές εποχιακής διάρκειας βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 143.

σκευάζονται από χάλυβα ή άλλου είδους αντιδιαβρωτικό υλικό. Σε ξεχωριστές περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί και πυρίμαχο γυαλί ενισχυμένο με συνθετικές ίνες. Το δοχείο μονώνεται από το εξωτερικό περιβάλλον με ορυκτό μαλλί, αφρό πολουρεθάνης ή άλλα μονωτικά υλικά. Επίσης μονώνονται οι σωλήνες εισαγωγής και εξαγωγής του νερού και οι άλλες συνδέσεις. Στα ΗΘΣ θέρμανσης ζεστού νερού χρήσης έχει υπολογιστεί ότι οι ετήσιες θερμικές απώλειες (συμπεριλαμβανομένων και όλων των θερμικών γεφυρών) από τη δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας κυμαίνονται μεταξύ 10% και 15% της θερμότητας που μεταφέρεται από το συλλέκτη στην αποθήκη θερμότητας.

● Στερεή αποθήκευση [solid storage]

Η αποθήκευση θερμότητας σε στερεά υλικά χρησιμοποιείται κυρίως σε συστήματα με συλλέκτες αέρος (για ΗΘΣ θέρμανσης χώρων) και η αποθήκη θερμότητας είναι συνήθως ενσωματωμένη στο κτίριο. Η αποθήκη θερμότητας μπορεί να είναι γεμίσματα από βότσαλο [fills of pebbles] ή άλλο είδος πετρώματος ή ακόμα και ολόκληρα τμήματα του κτιρίου (π.χ., τοίχοι, πατώματα ή ταβάνια). Δηλαδή μπορεί (για παράδειγμα) το εσωτερικό ενός πατώματος ή ένας κατακόρυφος τοίχος να γεμιστεί με το στερεό υλικό αποθήκευσης της θερμότητας. Όταν η αποθήκη θερμότητας αποτελείται από ξεχωριστό τμήμα (δοχείο -δεξαμενή) με στερεό υλικό (βότσαλο ή κάτι άλλο), ο θερμός αέρας που έρχεται από τον ηλιακό συλλέκτη εισέρχεται στο χώρο της δεξαμενής από πάνω και απελευθερώνοντας τη θερμότητά του στο υλικό αποθήκευσης της θερμότητας βαραίνει (καθώς ψύχεται) και εξέρχεται από το κάτω τμήμα της δεξαμενής. Όταν το υλικό βρίσκεται μέσα στα δομικά στοιχεία του κτιρίου (πατώματα, τοίχοι κ.λπ.), τότε ο θερμός αέρας εισέρχεται στο εσωτερικό των δομικών στοιχείων μέσω αγωγών (καναλιών) και θερμαίνει το υλικό.

Καθώς η θερμοχωρητικότητα συνήθως των στερεών υλικών είναι μικρότερη απ' αυτή των υγρών, ο όγκος του στερεού που απαιτείται για την αποθήκευση ίσου ποσού θερμότητας είναι διπλάσιος ή τριπλάσιος σε σύγκριση με τα υγρά υλικά. Αυτό το μειονέκτημα αντισταθμίζεται από το γεγονός ότι η αποθήκευση σε στερεό υλικό γίνεται και σε ψηλότερες θερμοκρασίες απ' ό,τι στο υγρό και μπορεί να γίνει και χωρίς τη βοήθεια αυξημένης πίεσης (που ορισμένες φορές είναι απαραίτητη όταν υπάρχει υγρό υλικό αποθήκευσης).

● Αποθήκευση θερμότητας με υλικά λανθάνουσας θερμότητας⁷³

Η αλλαγή φάσης (στερεό-υγρό -αέριο) ενός υλικού με την ταυτόχρονη προσφορά ή έκλυση θερμότητας μπορεί να αξιοποιηθεί για την αποθήκευση της θερμότητας.

⁷³ Τα υλικά αυτά ονομάζονται συνήθως στη βιβλιογραφία υλικά αλλαγής φάσης [phase change materials].



τητας. Η αλλαγή φάσης ενός υλικού πραγματοποιείται σε σταθερή θερμοκρασία. Κατά τη διαδικασία τήξης [melting] ενός στερεού ή εξάτμισης [evaporation] ενός υγρού θα πρέπει να προσφερθεί θερμότητα στο υλικό. Αντίθετα εκλύεται από το υλικό θερμότητα κατά τη διαδικασία στερεοποίησης [solidification] ή συμπύκνωσης [condensation] του⁷⁴. Αυτή η θερμότητα που εκλύεται από ένα υλικό όταν αλλάζει φάση ονομάζεται *λανθάνουσα θερμότητα* [latent heat]. Αν αυτή η αλλαγή φάσης πραγματοποιείται σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η θερμότητα που παράγει ένα ΗΘΣ για να δημιουργηθεί αλλαγή φάσης σε υλικό (υλικό αλλαγής φάσης)⁷⁵ και έτσι να αποθηκευτεί η θερμότητα στη μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Για να αποδώσει πίσω τη θερμότητα που έχει αποθηκεύσει το υλικό αρκεί να δημιουργηθούν οι κατάλληλες συνθήκες, ώστε να πραγματοποιηθεί η αντίστροφη αλλαγή φάσης σ' αυτό το υλικό.

Στην περίπτωση των ΗΘΣ χαμηλών θερμοκρασιών (<80°C) χρησιμοποιούνται υλικά αλλαγής φάσης μόνο από τη στερεή στην υγρή κατάσταση, καθώς η αλλαγή φάσης από την υγρή στην αέρια δημιουργεί προβλήματα με την πίεση των αερίων.

Το βασικό πλεονέκτημα της αποθήκευσης θερμότητας με τα υλικά αλλαγής φάσης είναι η μεγάλη ενεργειακή πυκνότητά τους και η σχεδόν σταθερή θερμοκρασία αλλαγής φάσης. Όμως έχουν και μειονεκτήματα⁷⁶, από τα οποία το βασικότερο είναι οι αλλαγές όγκου που συμβαίνουν κατά τις διαδικασίες αλλαγής φάσης.

β) Θερμικό ρευστό

Το ρευστό που μεταφέρει τη θερμότητα θα πρέπει να συγκεντρώνει όσο το δυνατόν περισσότερα απ' τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- υψηλή θερμοχωρητικότητα
- χαμηλό ιξώδες

⁷⁴ Η θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιούνται τα ζεύγη των δύο αντίστροφων διαδικασιών τήξη-στερεοποίηση και συμπύκνωση-εξάτμιση είναι ίδια για κάθε ζεύγος διαδικασιών.

⁷⁵ Τα υλικά αυτά μπορεί να είναι οργανικές ή ανόργανες ουσίες. Περισσότερα για τα υλικά αλλαγής φάσης [PCM] και για τα είδη τους υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία, π.χ., βλ. Mehling et al, 2008, ή Belén Zalba et al, 2003, *Review on thermal energy storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications*, Applied Thermal Engineering, Volume 23, Issue 3, σελ. 251-283 ή Kenisarin et al, 2007, *Solar energy storage using phase change materials*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 11, Issue 9, σελ. 1913-1965.

⁷⁶ Όπως είναι η υπερβολική ψύξη κάποιων υλικών κατά τη διαδικασία που απελευθερώνουν τη θερμότητα. Επίσης πρόβλημα αποτελεί η διαφορετική θερμική αγωγιμότητα της υγρής και στερεής φάσης κάποιων υλικών. Τέλος υπάρχει πρόβλημα με τη διάβρωση όταν το υλικό αλλαγής φάσης είναι κάποιο είδος ανόργανου αλατιού.



- να μην παγώνει ή να βράζει στις θερμοκρασίες λειτουργίας του ΗΘΣ
- να μην είναι εύφλεκτο ή τοξικό
- να μη διαβρώνει τους σωλήνες κυκλοφορίας
- να είναι βιολογικά διασπάσιμο

Κανένα ρευστό δε συγκεντρώνει όλα τα χαρακτηριστικά στο μέγιστο βαθμό. Το νερό είναι το ρευστό που ικανοποιεί τα περισσότερα και για αυτό έχει και την ευρύτερη χρήση. Επειδή όμως παγώνει σε θερμοκρασίες γύρω στο 0°C, χρησιμοποιείται σε καθαρή μορφή μόνο σε περιοχές με θερμό (ή εύκρατο) κλίμα (όπως π.χ., σε πολλά μέρη της Ελλάδας). Σε χώρες της κεντρικής και της βόρειας Ευρώπης χρησιμοποιούνται μείγματα νερού με κάποιο αντιψυκτικό [antifreeze] υλικό, καθώς και ένα αντιδιαβρωτικό υλικό. Τα πιο συνηθισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι η αιθυλογλυκόλη [ethylene-glycol] και η προπυλογλυκόλη [propylene-glycol]. Στα ΗΘΣ θέρμανσης νερού χρήσης χρησιμοποιείται η πιο ασφαλής [food-safe] προπυλογλυκόλη. Τα κυριότερα μειονεκτήματα αυτών των μειγμάτων σε σχέση με το νερό είναι η μικρότερη θερμοχωρητικότητα και το υψηλότερο ιξώδες.

γ) Σύστημα σωληνώσεων, αντλίες

Ο συλλέκτης συνδέεται με την αποθήκη (δεξαμενή) θερμότητας με σύστημα σωληνώσεων. Η ισχύς του ΗΘΣ και το υλικό του απορροφητή καθορίζουν το είδος του υλικού από το οποίο κατασκευάζονται οι σωληνώσεις⁷⁷. Ο χαλκός, ο χάλυβας ή το πολυεθυλένιο είναι τα κυριότερα υλικά κατασκευής των σωληνώσεων. Η διατομή των σωληνώσεων επιλέγεται ανάλογα με το συνολικό σχεδιασμό του ΗΘΣ, ώστε να σχεδιαστούν και να διαστασιολογηθούν ορθά και οι (πιθανές) αντλίες ή τα συστήματα ελέγχου. Για τον περιορισμό των θερμικών απωλειών το δίκτυο των σωληνώσεων μονώνεται εξωτερικά με ορυκτό μαλλί, πολυουρεθάνη ή αφρό καουτσούκ. Στα ΗΘΣ για θέρμανση νερού χρήσης, παρά τη μόνωση, το 10-15% της θερμότητας που παρέχει ο συλλέκτης χάνεται στο δίκτυο των σωληνώσεων κατά τη μεταφορά στη δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας⁷⁸.

Στα ΗΘΣ εξαναγκασμένης κυκλοφορίας [forced circulation] για την κυκλοφορία του θερμικού ρευστού στο σύστημα είναι απαραίτητη αντλία. Το είδος της αντλίας που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από την επιθυμητή ροή θερμικού ρευστού. Οι αντλίες συνήθως τροφοδοτούνται ηλεκτρικά από το κεντρικό δίκτυο εναλλασσό-

⁷⁷ Για παράδειγμα, αν ο απορροφητής είναι κατασκευασμένος από αλουμίνιο, οι σωληνώσεις, συνήθως, δεν κατασκευάζονται από χαλκό γιατί υπάρχει ο κίνδυνος της διάβρωσης.

⁷⁸ Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 146.

μενου ρεύματος, αλλά υπάρχει και η δυνατότητα να είναι αντλίες συνεχούς ρεύματος, ώστε να συνδέονται με υβριδικά αυτόνομα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνουν οι αντλίες είναι το 1-2% της συνολικής θερμικής ενέργειας που παράγει το ΗΘΣ (για μεγαλύτερα συστήματα είναι ακόμα μικρότερη).⁷⁹

δ) Εναλλάκτες θερμότητας

Οι εναλλάκτες θερμότητας⁸⁰ χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά θερμότητας από ένα υλικό μέσο σ' ένα άλλο, όταν αυτά τα δύο μεταξύ τους χωρίζονται με υλικό-φυσικό εμπόδιο⁸¹. Η απόδοση των εναλλακτών εξαρτάται από:

- τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο υλικών μέσων
- την επιφάνεια του εναλλάκτη
- το είδος του θερμικού ρευστού και την ταχύτητα ροής [flow speed] μεταξύ των δύο πλευρών ενός εναλλάκτη

Στα ΗΘΣ μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο εξωτερικοί όσο και εσωτερικοί εναλλάκτες θερμότητας⁸².

ε) Αισθητήρες και συστήματα ελέγχου

Το είδος του ΗΘΣ και οι ανάγκες της συγκεκριμένης εγκατάστασης καθορίζουν τόσο το είδος του συστήματος ελέγχου όσο και το είδος και τον αριθμό των αισθητήρων. Στα ΗΘΣ για θέρμανση νερού χρήσης (ηλιακοί θερμοσίφωνες) που είναι εγκατεστημένα στη νότια Ευρώπη (όπως στην Ελλάδα) δε χρησιμοποιούνται τέτοια συστήματα. Γενικότερα στα συστήματα *φυσικής κυκλοφορίας* του θερμικού ρευστού δε συνηθίζεται η εγκατάσταση συστημάτων ελέγχου. Όμως στα ΗΘΣ *εξαναγκασμένης κυκλοφορίας [forced circulation]* τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως στην κεντρική και τη βόρεια Ευρώπη το κύκλωμα κυκλοφορίας του θερμικού ρευστού παρακολουθείται από σύστημα ελέγχου με τους αντίστοιχους αισθητήρες. Ο

⁷⁹ Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 147.

⁸⁰ Για περισσότερα όσον αφορά τους εναλλάκτες θερμότητας βλ. http://www.cres.gr/energy_saving/bio-mixania/paragogiki_diadikasia_enallaktes.htm (13/5/2011).

⁸¹ Για παράδειγμα, στα ΗΘΣ θέρμανσης νερού χρήσης με ξεχωριστό κύκλωμα κυκλοφορίας του θερμικού ρευστού στο συλλέκτη από το κύκλωμα κυκλοφορίας του νερού χρήσης, υπάρχει εναλλάκτης που απάγει τη θερμότητα από το κύκλωμα κυκλοφορίας του θερμικού ρευστού και τη μεταφέρει στη δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας (εδώ τα δύο υλικά είναι το θερμικό ρευστό και το υλικό αποθήκευσης της θερμότητας).

⁸² Για περισσότερα βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 146-147 και Kalogirou, 2009, σελ. 266-267, 293-296.

σκοπός του είναι να εξασφαλίζει στο σύστημα τη μεγαλύτερη απόδοση (ανάλογα και με τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία) και να το προστατεύει σε περίπτωση προβληματικής λειτουργίας.

Η φυσική παράμετρος που μετριέται και ελέγχεται είναι η θερμοκρασία, καθώς ο έλεγχος του συστήματος βασίζεται στις θερμοκρασιακές διαφορές. Οι αισθητήρες σε ένα τέτοιο σύστημα ελέγχου τοποθετούνται στον ηλιακό συλλέκτη⁸³ και στη δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας. Όταν η θερμοκρασία του θερμικού ρευστού στο συλλέκτη υπερβαίνει ένα όριο πάνω από τη θερμοκρασία του νερού στη δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας, τότε δίνεται εντολή από το σύστημα ελέγχου να λειτουργήσει η αντλία και να κυκλοφορήσει το θερμικό ρευστό στο σύστημα μεταφέροντας θερμότητα. Αν η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ συλλέκτη και δεξαμενής πέσει κάτω από κάποιο όριο, δίνεται εντολή για τη διακοπή της λειτουργίας της αντλίας. Σε ορισμένα συστήματα μπορεί να υπάρξει και συμπληρωματικός μηχανισμός που μετράει την πίεση του θερμικού ρευστού και ανάλογα ενεργοποιεί ή όχι την αντλία.

Εκτός από τον έλεγχο των θερμοκρασιακών διαφορών ελέγχονται ανεξάρτητα τόσο η θερμοκρασία νερού στη δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας όσο και η θερμοκρασία του συλλέκτη. Στη δεξαμενή θερμότητας η θερμοκρασία δεν πρέπει να υπερβαίνει κάποιο όριο, καθώς πάνω από τους 70°C μπορούν να δημιουργηθούν ασβεστολιθικά ιζήματα που κατακάθονται στη δεξαμενή. Επίσης τόσο στη δεξαμενή όσο και στο συλλέκτη πρέπει να αποφευχθεί ο κίνδυνος εξάτμισης του νερού⁸⁴ και δημιουργίας υψηλών πιέσεων. Για αυτόν το σκοπό υπάρχουν απλά (συνήθως) συστήματα που μέσω εξάτμισης-συμπύκνωσης (ακόμα και στους εναλλάκτες θερμότητας) ή άλλων μεθόδων μειώνουν τις υψηλές πιέσεις⁸⁵.

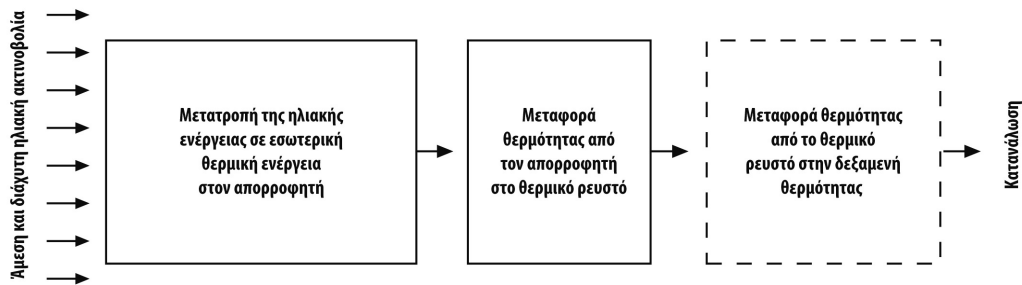
⁸³ Συνήθως στην έξοδο του ζεστού νερού που κατευθύνεται προς τη δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας.

⁸⁴ Αν, για παράδειγμα, σε ηλιόλουστη καλοκαιρινή ημέρα η θερμοκρασία της δεξαμενής φτάσει στο όριο, θα πρέπει να σταματήσει η αντλία κυκλοφορίας του θερμικού ρευστού στο κύκλωμα του συλλέκτη. Τότε η θερμοκρασία του συλλέκτη θα αρχίσει να αυξάνεται και σε συλλέκτες με επιλεκτική επιφάνεια μπορεί να φτάσει τους 140°C. Το θερμικό ρευστό θα αρχίσει να εξατμίζεται. Η διέξοδός του θα πρέπει να είναι ειδικό δοχείο συμπύκνωσης απ' όπου θα μπορεί στη συνέχεια να επιστρέψει στο σύστημα. Βέβαια, υπάρχει και το ενδεχόμενο (σε ακραίες περιπτώσεις) μέσω βαλβίδων διαφυγής να απελευθερωθεί στο περιβάλλον (για αυτό και το θερμικό ρευστό πρέπει να είναι περιβαλλοντικά φιλικό) και τότε το σύστημα πρέπει να συμπληρωθεί με θερμικό ρευστό.

⁸⁵ Για περισσότερα βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 143-145.

3.2.7 Ενεργειακή αλυσίδα μετατροπών και απώλειες στα ηλιακά θερμικά συστήματα

Οι ενεργειακές μετατροπές που συμβαίνουν σε ηλιακό θερμικό σύστημα εμφανίζονται στο Σχήμα 3.12. Η ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται σε εσωτερική θερμική ενέργεια του απορροφητή. Στη συνέχεια θερμότητα μεταφέρεται από τον απορροφητή στο σύστημα σωληνώσεων του θερμικού ρευστού. Από το θερμικό ρευστό μέσω εναλλακτών η θερμότητα μεταφέρεται στο υλικό της δεξαμενής θερμότητας ή στο μέσο μεταφοράς της θερμότητας (νερό ή αέρας) στον τελικό καταναλωτή.



Σχήμα 3.12 Η αλυσίδα ενεργειακών μετατροπών που συμβαίνουν σε ένα ηλιακό θερμικό σύστημα.

Οι πηγές των απωλειών ενέργειας βρίσκονται στους διάφορους μηχανισμούς μεταφοράς και μετατροπής της ενέργειας (απορροφητής-σύστημα σωληνώσεων θερμικού ρευστού-εναλλάκτες). Είναι προφανές ότι μόνο ένα μέρος της ηλιακής ενέργειας μετατρέπεται σε χρήσιμη θερμότητα που καταλήγει στη θέρμανση νερού (ΘΝΧ) ή στη θέρμανση χώρων. Οι περισσότερες απώλειες (~40%) συμβαίνουν στον απορροφητή κατά τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμική ενέργεια. Οι υπόλοιπες απώλειες εμφανίζονται στη μεταφορά θερμότητας μεταξύ των διαφορετικών τμημάτων του ηλιακού θερμικού συστήματος. Η συνολική απόδοση ενός ηλιακού θερμικού συστήματος επηρεάζεται από τις διαστάσεις του, καθώς και από τη διάταξη των διαφόρων συστατικών μερών του. Επίσης ρόλο παίζει η περιοχή εγκατάστασής του, όπως και η χρήση του (οικία ή δημόσιο κτίριο). Για τις κλιματικές συνθήκες της κεντρικής Ευρώπης και για σύστημα θέρμανσης νερού χρήσης (ΘΝΧ) η τελική απόδοσή του έχει υπολογιστεί στο ~25% (ξεκινώντας από την ηλιακή ακτινοβολία και καταλήγοντας στη χρησιμοποιούμενη θερμότητα για τη θέρμανση του καταναλωμένου νερού χρήσης) ή στο ~32% για τη θερμότητα που καταλήγει στη δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας⁸⁶.

⁸⁶ Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 148.

3.2.8 Στοιχεία σχεδιασμού ηλιακών θερμικών συστημάτων

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία ΗΘΣ, αλλά όλα έχουν (εκτός από τον ηλιακό συλλέκτη) και κάποια (ή όλα) από τα συστατικά μέρη που περιγράφηκαν παραπάνω. Μια κατηγοριοποίηση που μπορεί να γίνει είναι με βάση το είδος της κυκλοφορίας του θερμικού ρευστού (φυσική ή εξαναγκασμένη) και την ύπαρξη ή όχι ξεχωριστών συστημάτων κυκλοφορίας του θερμικού ρευστού στο συλλέκτη και του θερμού νερού (ή άλλου ρευστού) που προορίζεται για τη χρησιμοποίηση στο σύστημα (ΗΘΣ κλειστού κυκλώματος και ΗΘΣ ανοικτού κυκλώματος αντίστοιχα). Με βάση τα παραπάνω κριτήρια τα ΗΘΣ μπορούν να καταταχθούν σε πέντε (5) κατηγορίες:

- ΗΘΣ χωρίς ξεχωριστή αποθήκη θερμότητας
- ΗΘΣ φυσικής κυκλοφορίας θερμικού ρευστού, ανοικτού κυκλώματος
- ΗΘΣ φυσικής κυκλοφορίας θερμικού ρευστού, κλειστού κυκλώματος
- ΗΘΣ εξαναγκασμένης κυκλοφορίας θερμικού ρευστού, ανοικτού κυκλώματος
- ΗΘΣ εξαναγκασμένης κυκλοφορίας θερμικού ρευστού, κλειστού κυκλώματος

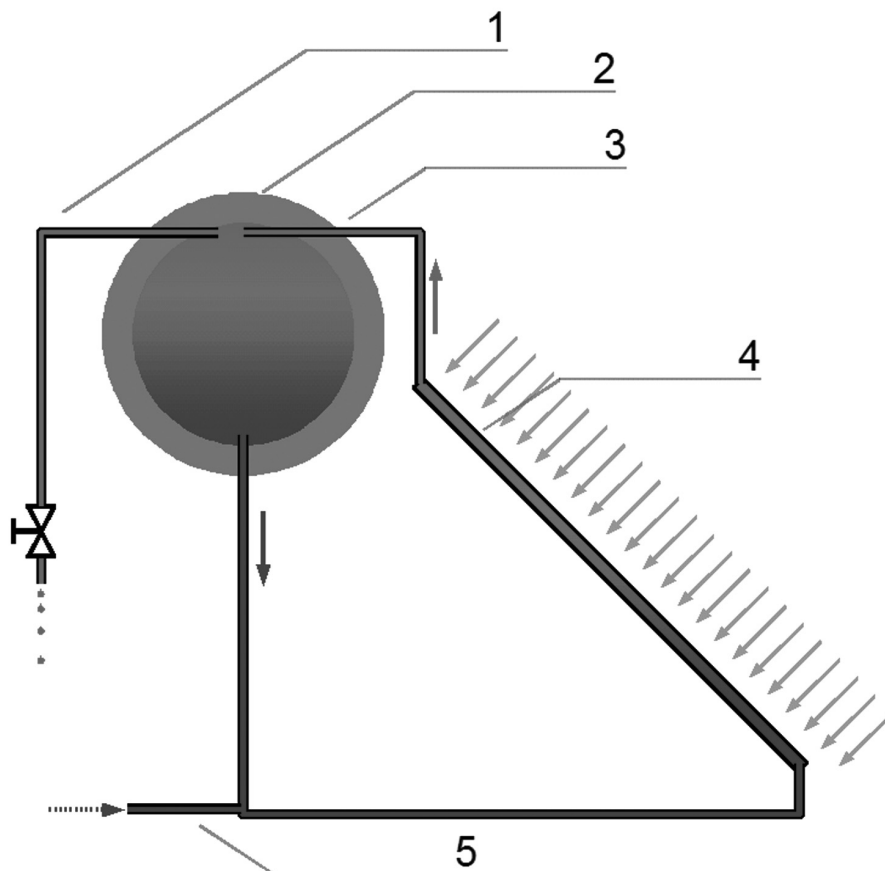
Παρακάτω θα περιγραφούν με συντομία αυτές οι πέντε (5) κατηγορίες ΗΘΣ.

α) ΗΘΣ χωρίς ξεχωριστή αποθήκη θερμότητας

Αυτό είναι το πιο απλό ΗΘΣ καθώς δε διαθέτει αποθήκη θερμότητας και το θερμικό ρευστό είναι το ίδιο το νερό που χρησιμοποιείται από τον καταναλωτή. Το νερό που κυκλοφορεί στο δίκτυο εισάγεται στον ηλιακό συλλέκτη, θερμαίνεται και εξέρχεται από αυτόν. Τέτοια ΗΘΣ χρησιμοποιούνται κυρίως σε θερμά κλίματα για τη θέρμανση νερού χρήσης ή κολυμβητικής δεξαμενής. Μπορεί να είναι είτε φυσικής κυκλοφορίας του θερμικού ρευστού (συνήθως σε συστήματα θέρμανσης νερού χρήσης) είτε εξαναγκασμένης κυκλοφορίας.

β) ΗΘΣ φυσικής κυκλοφορίας θερμικού ρευστού, ανοικτού κυκλώματος

Τα βασικά στοιχεία αυτών των ΗΘΣ είναι ο συλλέκτης, η αποθήκη (δεξαμενή) αποθήκευσης θερμότητας και το δίκτυο των σωληνώσεων (βλέπε Σχήμα 3.13). Αυτά τα ΗΘΣ χρησιμοποιούνται κυρίως σε θερμά κλίματα (π.χ., νότια Ευρώπη, Μ. Ανατολή). Στην Ελλάδα τέτοια συστήματα είναι οι γνωστοί *ηλιακοί θερμοσίφωνες* που χρησιμοποιούνται για τη *θέρμανση νερού χρήσης*. Το θερμικό ρευστό που κυκλοφορεί στο(ους) συλλέκτη(ες) του συστήματος είναι το ίδιο το νερό του δικτύου του



Σχήμα 3.13 Σχηματική αναπαράσταση ΗΘΣ φυσικής κυκλοφορίας θερμικού ρευστού, ανοικτού κυκλώματος. 1. Εξαγωγή ζεστού νερού προς την κατανάλωση, 2. δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας, 3. εισαγωγή ζεστού νερού στη δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας, 4. ηλιακός συλλέκτης, 5. εισαγωγή κρύου νερού από το δίκτυο.
(Πηγή: commons.wikimedia.org)

κτιρίου ή της εγκατάστασης (ανοικτό κύκλωμα). Η λειτουργία αυτού του συστήματος περιγράφεται με συντομία παρακάτω.

Ο συλλέκτης (που στο Βόρειο Ημισφαίριο είναι προσανατολισμένος προς το νότο και με γωνία κλίσης που εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου)⁸⁷ συνδέεται μέσω σωληνώσεων με τη δεξαμενή που βρίσκεται στον ίδιο χώρο (στέγη κτιρίου συνήθως) λίγο πιο ψηλά απ' αυτόν. Η δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας είναι αρχικά γεμάτη με το νερό του δικτύου. Το νερό από το κατώτερο στρώμα

⁸⁷ Στο Νότιο Ημισφαίριο είναι προσανατολισμένος προς το βορρά. Για περισσότερα βλ. κεφ. 2 παρόντος βιβλίου.

της δεξαμενής εισάγεται στην κάτω πλευρά του συλλέκτη και θερμαίνεται από τη θερμότητα που εκπέμπει ο απορροφητής του συλλέκτη⁸⁸. Η θέρμανση του νερού οδηγεί σε μείωση της πυκνότητάς του⁸⁹ και στην άνοδό του προς την πάνω πλευρά του συλλέκτη, από όπου εξέρχεται και επιστρέφει στο άνω τμήμα της δεξαμενής αποθήκευσης της θερμότητας. Εκεί μέρος του αναμειγνύεται με το υπόλοιπο νερό και ανεβάζει τη μέση θερμοκρασία του νερού της δεξαμενής⁹⁰. Από τη δεξαμενή εξέρχεται σωλήνας (που συνήθως βρίσκεται στα ανώτερα στρώματα της δεξαμενής) που μεταφέρει το ζεστό νερό προς την κατανάλωση.

Όσο υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο νερό που βρίσκεται στα κατώτερα στρώματα της δεξαμενής και σε αυτό που βρίσκεται στα ανώτερα, το νερό κυκλοφορεί στο σύστημα. Η φυσική κυκλοφορία του νερού στο σύστημα εξαιτίας της μεταβολής της πυκνότητάς του με τη θέρμανσή του καθιστά περιττή την παρουσία αντλίας κυκλοφορίας του νερού. Επίσης, επειδή η κυκλοφορία του νερού στο δίκτυο σωληνώσεων καθορίζεται με *φυσικό τρόπο* από τη διαφορά θερμοκρασίας του νερού ανάμεσα στο υψηλότερο και στο χαμηλότερο στρώμα της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας και (κυρίως) από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του νερού στο κάτω στρώμα της δεξαμενής θερμότητας και του νερού στο συλλέκτη, δεν υπάρχει ανάγκη για *σύστημα ελέγχου* (μαζί με τους κατάλληλους αισθητήρες) της κυκλοφορίας νερού στο δίκτυο των σωληνώσεων. Η αποφυγή προβλημάτων που μπορούν να δημιουργηθούν από την υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας του νερού και την πιθανή εξάτμισή του επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση βαλβίδων εξαέρωσης.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, αυτά τα ΗΘΣ χρησιμοποιούνται σε θερμά κλίματα, όπου απουσιάζει ο κίνδυνος παγώματος του νερού στο δίκτυο σωληνώσεων και πιθανού σπασίματος των σωληνώσεων⁹¹ λόγω διαστολής του νερού⁹². Όμως παρ'

⁸⁸ Κάτω από την επιφάνεια του απορροφητή υπάρχει ο λεγόμενος υδροσκελετός του συλλέκτη, που είναι δίκτυο σωληνώσεων με μήκος πολλαπλάσιο των διαστάσεων του συλλέκτη (δηλαδή σε σχήμα πολλών Π), ώστε να αυξάνεται η επιφάνεια του νερού που δέχεται τη θερμότητα από τον απορροφητή.

⁸⁹ Η πυκνότητα του νερού στους 20°C είναι $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$, ενώ στους 80°C είναι $\rho = 972 \text{ kg/m}^3$.

⁹⁰ Όπως εύκολα μπορεί κανείς να αντιληφθεί, το νερό της δεξαμενής είναι διαστρωμένο, δηλαδή τα ανώτερα στρώματα περιέχουν νερό με υψηλότερη θερμοκρασία και όσο κατευθυνόμαστε προς τα κάτω η θερμοκρασία μειώνεται. Αυτός είναι και ο λόγος που ο σωλήνας που εξάγει το νερό από τη δεξαμενή προς το συλλέκτη βρίσκεται στο κάτω μέρος της δεξαμενής, ενώ ο σωλήνας που εισάγει το ζεστό νερό από το συλλέκτη βρίσκεται στο πάνω τμήμα της δεξαμενής.

⁹¹ Και καταστροφής και του συλλέκτη, καθώς μέσα στο συλλέκτη υπάρχει ο υδροσκελετός.

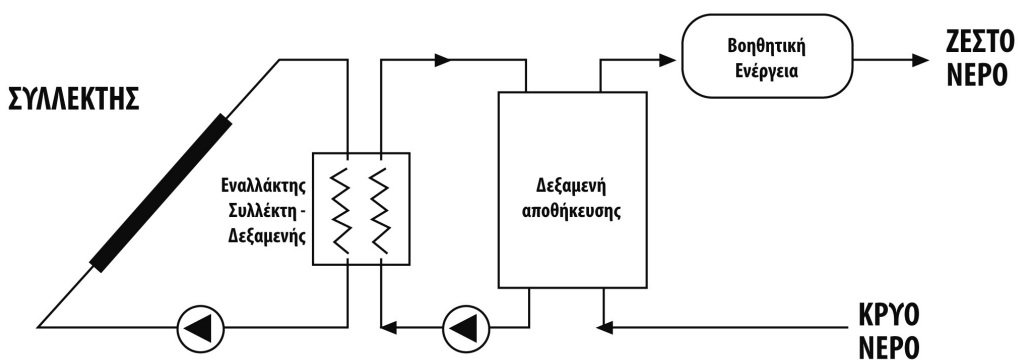
⁹² Όπως είναι γνωστό, το νερό παρουσιάζει μη ομαλή συμπεριφορά από τους -7°C έως το σημείο πήξης του -0°C (σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης), δηλαδή, καθώς το νερό ψύχεται σ' αυτές τις θερμοκρασίες, διαστέλλεται και όταν παγώσει έχει μεγαλύτερο όγκο απ' αυτόν που είχε ως υγρό. Αυτό το γεγονός έχει ως συνέπεια το πιθανό σπάσιμο των σωληνών που το περιέχουν.

όλα αυτά υπάρχει ο κίνδυνος της διάβρωσης των σωληνώσεων από τα άλατα που περιέχει το νερό (τα οποία σε ορισμένες περιοχές είναι πολλά) και γι' αυτό οι σωληνώσεις πρέπει να είναι ανθεκτικές στη διάβρωση.

γ) ΗΘΣ φυσικής κυκλοφορίας θερμικού ρευστού, κλειστού κυκλώματος

Η βασική διαφορά αυτών των ΗΘΣ απ' τα προηγούμενα είναι ότι εδώ υπάρχουν δύο ξεχωριστά συστήματα κυκλοφορίας του ρευστού: το σύστημα κυκλοφορίας του θερμικού ρευστού στο συλλέκτη και το σύστημα κυκλοφορίας του νερού που προορίζεται για κατανάλωση. Η θερμότητα μεταφέρεται από τον απορροφητή του συλλέκτη στο θερμικό ρευστό που κυκλοφορεί στο πρώτο κύκλωμα και στη συνέχεια μέσω εναλλάκτη θερμότητας μεταφέρεται στη δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας (που περιέχει το νερό). Από εκεί μέσω του δεύτερου κυκλώματος το ζεστό νερό προωθείται στην κατανάλωση.

Ο λόγος που επιλέγονται τέτοια συστήματα⁹³ είναι η προστασία του συστήματος από το πάγωμα ή τη διάβρωση. Έτσι στο κύκλωμα κυκλοφορίας του συλλέκτη το θερμικό ρευστό είναι υγρό που παγώνει σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και είναι επίσης αντιδιαβρωτικό (στα ΗΘΣ θέρμανσης νερού χρησιμοποιείται συνήθως προπυλενογλυκόλη). Για λόγους προστασίας του συστήματος από την ανάπτυξη υψηλών πιέσεων θα πρέπει να υπάρχει δοχείο εκτόνωσης και βαλβίδα διαφυγής στο σύστημα κυκλοφορίας του θερμικού ρευστού του συλλέκτη.



Σχήμα 3.14 Σχηματικό διάγραμμα ενεργητικού ηλιακού συστήματος παραγωγής ζεστού νερού.

⁹³ Παρά τη λίγο μικρότερη απόδοση που έχουν σε σχέση με τα ΗΘΣ ανοικτού κυκλώματος, αφού υπάρχει η θερμική βαθμίδα του εναλλάκτη θερμότητας στον οποίο χάνεται ένα μέρος της θερμότητας, γιατί οι αποδόσεις των εναλλακτών είναι της τάξης του 90-95%.

δ) ΗΘΣ εξαναγκασμένης κυκλοφορίας θερμικού ρευστού, ανοικτού κυκλώματος

Αυτά τα ΗΘΣ χρησιμοποιούνται όταν η δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας δεν μπορεί να τοποθετηθεί πάνω από τους ηλιακούς συλλέκτες⁹⁴.

Σ' αυτή την περίπτωση για να κυκλοφορήσει το νερό στο σύστημα θα πρέπει να υπάρχει αντλία. Αν ένα τέτοιο ΗΘΣ χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση δεξαμενής κολύμβησης υπάρχει περίπτωση κατά τη διάρκεια της νύχτας ή μιας ψυχρής συννεφιασμένης ημέρας το νερό στο κύκλωμα κυκλοφορίας να ψυχθεί γρηγορότερα από το νερό της κολυμβητικής δεξαμενής και έτσι να ενεργοποιηθεί η αντίστροφη διαδικασία κυκλοφορίας του νερού μεταφέροντας θερμότητα από την κολυμβητική δεξαμενή προς το συλλέκτη. Για να αποτρέπονται τέτοιου είδους φαινόμενα τοποθετείται συνήθως βαλβίδα αντεπιστροφής στην είσοδο του συλλέκτη.

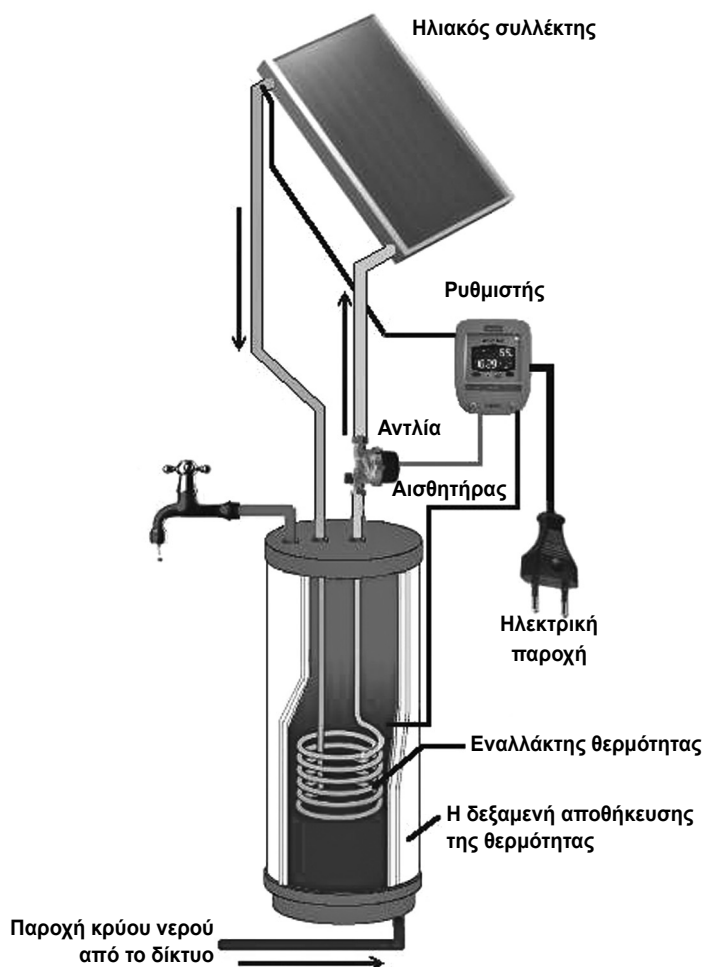
ε) ΗΘΣ εξαναγκασμένης κυκλοφορίας θερμικού ρευστού, κλειστού κυκλώματος

Αυτά είναι ΗΘΣ με δύο ξεχωριστά συστήματα κυκλοφορίας του ρευστού: το σύστημα κυκλοφορίας του θερμικού ρευστού στο συλλέκτη και το σύστημα κυκλοφορίας του νερού (ή άλλου ρευστού) που προορίζεται για την κατανάλωση. Ο σκοπός ύπαρξης των δύο ξεχωριστών συστημάτων κυκλοφορίας είναι ο ίδιος που αναφέρθηκε παραπάνω και για τα ΗΘΣ φυσικής κυκλοφορίας κλειστού κυκλώματος, δηλαδή η προστασία του συστήματος από το πάγωμα ή τη διάβρωση. Τέτοια συστήματα εγκαθίστανται κυρίως στην κεντρική και τη βόρεια Ευρώπη ή γενικά σε περιοχές με ψυχρό κλίμα. Όταν χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές κτιρίου, οι ηλιακοί συλλέκτες εγκαθίστανται στις στέγες, ενώ η δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας στο ισόγειο ή το υπόγειο του κτιρίου. Οι αντλίες φροντίζουν για την κυκλοφορία του θερμικού ρευστού. Επίσης, όπως στα ΗΘΣ φυσικής κυκλοφορίας ανοικτού κυκλώματος, απαιτείται εγκατάσταση δοχείου εκτόνωσης, βαλβίδας διαφυγής και βαλβίδας αντεπιστροφής. Η λειτουργία της αντλίας και συνολικά του συστήματος ελέγχεται από ένα ρυθμιστή [controller].

στ) Σύγκριση μεταξύ ΗΘΣ φυσικής και εξαναγκασμένης κυκλοφορίας

Τα ΗΘΣ φυσικής κυκλοφορίας εγκαθίστανται, όπως προαναφέρθηκε, κυρίως σε περιοχές με θερμό κλίμα, ενώ σε περιοχές με ψυχρότερο κλίμα (π.χ., κεντρική και

⁹⁴ Αυτό ισχύει τόσο για ΗΘΣ θέρμανσης νερού χρήσης όσο και για ΗΘΣ που θερμαίνουν νερό κολυμβητικής δεξαμενής.



Σχήμα 3.15 Σχηματική αναπαράσταση ΗΘΣ εξαναγκασμένης κυκλοφορίας θερμικού ρευστού, κλειστού κυκλώματος.
(Πηγή: commons.wikimedia.org)

Βόρεια Ευρώπη) προτιμώνται τα ΗΘΣ εξαναγκασμένης κυκλοφορίας για λόγους που εξηγήθηκαν παραπάνω. Μια σύγκριση μεταξύ των δύο αυτών ειδών ΗΘΣ δείχνει ότι εκεί που υπάρχει η δυνατότητα είναι προτιμότερη η εγκατάσταση ΗΘΣ φυσικής κυκλοφορίας, καθώς είναι απλούστερα (αφού δε χρειάζονται αντλίες και συστήματα ελέγχου) και συνεπώς πιο αξιόπιστα, με μεγαλύτερο χρόνο ζωής και φθηνότερα από τα ΗΘΣ εξαναγκασμένης κυκλοφορίας. Δύο βασικά μειονεκτήματα των ΗΘΣ φυσικής κυκλοφορίας είναι τα προβλήματα αισθητικής (με την εγκατάσταση των δοχείων αποθήκευσης θερμότητας στις στέγες) που τα ΗΘΣ εξαναγκασμένης κυκλοφορίας δεν τα έχουν (γιατί τα δοχεία αποθήκευσης είναι εγκατεστημένα στο

ισόγειο ή υπόγειο του κτιρίου), καθώς και πιθανά προβλήματα διάβρωσης των σωληνώσεων από κακής ποιότητας νερό του δικτύου (σκληρό με πολλά άλατα) στα ΗΘΣ ανοικτού κυκλώματος.

3.2.9 Εφαρμογές ηλιακών θερμικών συστημάτων

Υπάρχουν πολλές εφαρμογές των ΗΘΣ, όπως θέρμανση νερού κολυμβητικών δεξαμενών, θέρμανση νερού χρήσης σε κτίρια, θέρμανση και ψύξη κτιρίων, συστήματα τηλεθέρμανσης, συστήματα αφαλάτωσης νερού κ.λπ. Στο παρόν τμήμα του κεφαλαίου θα περιγραφούν (με συντομία) ορισμένες από αυτές τις εφαρμογές.

α) Θέρμανση νερού ανοικτής κολυμβητικής δεξαμενής

Τα ΗΘΣ που χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση του νερού σε ανοικτές δεξαμενές έχουν σχετικά απλό σχεδιασμό. Είναι συνήθως ΗΘΣ εξαναγκασμένης κυκλοφορίας θερμικού ρευστού (εδώ του νερού) χωρίς ξεχωριστή αποθήκη θερμότητας. Αποθήκη θερμότητας είναι η ίδια η κολυμβητική δεξαμενή με το νερό που περιέχει. Αυτά τα ΗΘΣ αποτελούνται από τους ηλιακούς συλλέκτες, το σύστημα κυκλοφορίας του νερού και τις αντλίες. Συνήθως δεν είναι απαραίτητη εφεδρική πηγή θερμότητας (συμβατικού καυσίμου ή βιομάζας)⁹⁵ (μπορεί όμως να υπάρχει).

Οι ηλιακοί συλλέκτες δεν είναι απαραίτητο να έχουν υψηλή απόδοση, καθώς η θερμοκρασία του νερού της πισίνας είναι χαμηλή (της τάξεως των 28°C). Συνήθως οι συλλέκτες που χρησιμοποιούνται είναι οι απλοί συλλέκτες χωρίς διαφανές κάλυμμα, που ουσιαστικά αποτελούνται μόνο από τον απορροφητή. Το ενεργειακό ισοζύγιο που αφορά στο νερό της πισίνας περιλαμβάνει θετικές ενεργειακές ροές (θερμότητα που προσφέρεται στο νερό της πισίνας) και αρνητικές (θερμότητα που μεταφέρεται από το νερό της πισίνας στο περιβάλλον). Οι θετικές ενεργειακές ροές περιλαμβάνουν τη θερμότητα από τους συλλέκτες, τη θερμότητα που οφείλεται στην ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο νερό της κολυμβητικής δεξαμενής, καθώς και τη θερμότητα που απελευθερώνεται από τα σώματα των κολυμβητών. Οι αρνητικές ενεργειακές ροές είναι οι θερμικές απώλειες λόγω επαφής (των τοιχωμάτων της πισίνας με το έδαφος ή τον αέρα), λόγω συμμεταφοράς (προς τον αέρα), λόγω ακτινοβολίας και λόγω εξάτμισης νερού από την επιφάνεια της κολυμβητικής δεξαμενής. Επίσης υπάρχουν απώλειες από το κύκλωμα των σωληνώσεων μεταφοράς. Το ενεργειακό ισοζύγιο πρέπει να έχει ως τελικό αποτέλεσμα τη διατήρηση της θερμοκρασίας του νερού της κολυμβητικής δεξαμενής στην επιθυμητή θερμοκρα-

⁹⁵ Αυτό βέβαια εξαρτάται από τη γεωγραφική περιοχή που βρίσκεται η εγκατάσταση και τη διαστασιολόγηση του συστήματος.



σία. Η πιο σημαντική πηγή απώλειας θερμότητας είναι αυτή που συμβαίνει λόγω της εξάτμισης. Για τη μείωση των θερμικών απωλειών η επιφάνεια της πισίνας μπορεί να καλύπτεται το βράδυ με μονωτικό κάλυμμα. Έχει υπολογιστεί ότι η κάλυψη της κολυμβητικής δεξαμενής για 10 h μειώνει τις απώλειες θερμότητας λόγω εξάτμισης κατά 30%, ενώ τις απώλειες λόγω συμμεταφοράς και ακτινοβολίας κατά 16%⁹⁶. Όταν το ενεργειακό ισοζύγιο χρειάζεται κάποια προσθήκη θετικής ενεργειακής ροής αυτή προέρχεται από την εφεδρική πηγή θερμότητας.

Β) Θέρμανση νερού χρήσης σε κτίρια

Τα ΗΘΣ για θέρμανση νερού χρήσης [Solar Domestic Hot Water Systems, SDHW] είναι τα πιο διαδεδομένα ηλιακά θερμικά συστήματα στις χώρες με εύκρατο και θερμό κλίμα (π.χ., Μεσόγειος, Μέση Ανατολή, Βόρεια Αφρική κ.λπ.). Μπορεί να ανήκουν σε μια από τις κατηγορίες ΗΘΣ που αναφέρθηκαν παραπάνω, δηλαδή μπορεί να είναι φυσικής κυκλοφορίας ανοικτού κυκλώματος, φυσικής κυκλοφορίας κλειστού κυκλώματος, εξαναγκασμένης κυκλοφορίας κλειστού κυκλώματος και εξαναγκασμένης κυκλοφορίας ανοικτού κυκλώματος⁹⁷. Τα πρώτα δύο είδη συστημάτων χρησιμοποιούνται σε περιοχές με σχετικά θερμό κλίμα (όπως και η Ελλάδα), ενώ το τρίτο κυρίως σε περιοχές με ψυχρότερο κλίμα (π.χ., κεντρική και βόρεια Ευρώπη). Τα βασικά μέρη αυτών των συστημάτων, όπως και οι αρχές λειτουργίας τους περιγράφονται παραπάνω. Αν θεωρηθεί ότι η ημερήσια κατανάλωση ζεστού νερού για κάθε άτομο είναι 50 L, τότε η επιφάνεια των συλλεκτών θα πρέπει να είναι 7-8 m² για μη επιλεκτικούς επίπεδους συλλέκτες και 5-6 m² επιλεκτικούς συλλέκτες⁹⁸. Το δοχείο αποθήκευσης θερμότητας έχει χωρητικότητα περίπου 1,5-2,5 φορές μεγαλύτερη από την προβλεπόμενη ημερήσια κατανάλωση (200-500 L)⁹⁹.

Τα ΗΘΣ για θέρμανση νερού χρήσης σχεδιάζονται για να μπορούν να καλύπτουν το 100% των αναγκών του κτιρίου για την περίοδο του καλοκαιριού και το 40-80% της συνολικής ετήσιας ζήτησης ανάλογα με την περιοχή που είναι εγκατεστημένο το σύστημα¹⁰⁰.

⁹⁶ Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 152-153.

⁹⁷ Το τελευταίο είναι το λιγότερο συνηθισμένο.

⁹⁸ Οι τιμές αφορούν σε περιοχές της κεντρικής Ευρώπης (Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 154) και αναφέρονται σε συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας κλειστού κυκλώματος. Για την Ελλάδα και για συστήματα φυσικής κυκλοφορίας η επιφάνεια των συλλεκτών χρειάζεται να είναι μικρότερη λόγω αυξημένης ηλιακής ακτινοβολίας. Ένα συνηθισμένο σύστημα στην Ελλάδα για οικογένεια 4 ατόμων περιλαμβάνει επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών 3-5 m² και δεξαμενή 200-250 L.

⁹⁹ ο.π.

¹⁰⁰ http://www.estif.org/st_energy/technology/solar_domestic_hot_water_heating_sdhw/ (29.11.2010).



Ένα τυπικό ΗΘΣ για θέρμανση νερού χρήσης σε οικία οικογένειας 4 ατόμων (ανάλογα με την περιοχή και την κατανάλωση) περιλαμβάνει συλλέκτες με εμβαδόν 2-5 m² και δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας 100-200 L¹⁰¹.

γ) Ηλιακά συστήματα συνδυασμένης λειτουργίας [solar combined systems]

Τα ηλιακά συστήματα συνδυασμένης λειτουργίας (ΗΣΣΛ), τα οποία στην Ευρώπη ονομάζονται συνήθως combi-systems, είναι ΗΘΣ που συνδυάζουν *θέρμανση νερού χρήσης με θέρμανση χώρων* και αφορούν, κυρίως, κτίρια κατοικιών. Η διάδοσή τους είναι μεγάλη ιδιαίτερα σε χώρες της κεντρικής και της βόρειας Ευρώπης. Τα βασικά τμήματα ενός τέτοιου συστήματος είναι τα παρακάτω:

- Ο ηλιακός συλλέκτης με το κύκλωμα κυκλοφορίας του θερμικού ρευστού
- Η δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας
- Το σύστημα ελέγχου
- Το σύστημα διανομής της θερμότητας στους χώρους και στο νερό χρήσης
- Ένα βοηθητικό σύστημα θέρμανσης, βιομάζας ή/και συμβατικού καυσίμου¹⁰²

Η λειτουργία ενός ΗΣΣΛ μπορεί να περιγραφεί με απλά λόγια ως εξής: ο ηλιακός συλλέκτης θερμαίνει θερμικό ρευστό, το οποίο μεταφέρει τη θερμότητα στη δεξαμενή θερμότητας. Από εκεί η θερμότητα διοχετεύεται είτε για τη θέρμανση νερού χρήσης είτε για τη θέρμανση των χώρων του κτιρίου. Ένα σύστημα ελέγχου επιβλέπει τις λειτουργίες του συστήματος (με το απαραίτητο λογισμικό, αισθητήρες, αντλίες, βαλβίδες κ.λπ.). Τέλος το σύστημα είναι συνδεδεμένο με βοηθητικό σύστημα, το οποίο παρέχει την αναγκαία ενέργεια στις χρονικές περιόδους που το θερμικό φορτίο είναι μεγαλύτερο από την προσφορά του ΗΘΣ στη δεδομένη χρονική περίοδο.

Τα ΗΣΣΛ¹⁰³ σχεδιάζονται έτσι ώστε να καλύπτουν τα φορτία θερμότητας όλο το χρόνο. Η παράμετρος που συνυπολογίζεται στο σχεδιασμό τους είναι η παρακάτω: ενώ η ζήτηση του θερμού νερού χρήσης είναι σχεδόν σταθερή όλο το χρόνο, η

¹⁰¹ ο.π.

¹⁰² Δηλαδή πετρελαίου ή φυσικού αερίου, αλλά μπορεί να είναι και βιομάζας (ξύλο ή συσσωματώματα-pellets) ή ακόμα και ηλεκτρικού ρεύματος από το δίκτυο. Στο European Solar CombiSystems, <http://ellekilde.dk/altener-combi/download.html> (3/5/2011) μπορεί ο αναγνώστης να δει παραδείγματα συστημάτων εγκατεστημένων σε κτίρια χωρών της κεντρικής και της βόρειας Ευρώπης με πλήρη στοιχεία για το κάθε σύστημα.

¹⁰³ Μαζί με το βοηθητικό σύστημα [auxiliary subsystem].



ζήτηση για θέρμανση χώρων είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ένταση της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας¹⁰⁴. Ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες (διαθέσιμη ακτινοβολία) και τη ζήτηση, ένα ΗΣΣΛ μπορεί να λειτουργεί σε μια από τις παρακάτω φάσεις¹⁰⁵:

- Αν υπάρχει διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία και το κτίριο δε χρειάζεται θερμικό φορτίο, τότε η θερμότητα αποθηκεύεται στη δεξαμενή θερμότητας.
- Αν υπάρχει διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία και θερμικό φορτίο, τότε η θερμότητα μεταφέρεται απευθείας στην κάλυψη αυτών των αναγκών (νερό χρήσης ή θέρμανση χώρων) ή, αν δεν επαρκεί, χρησιμοποιείται και θερμότητα από τη δεξαμενή¹⁰⁶.
- Αν δεν υπάρχει διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, ενώ υπάρχει θερμικό φορτίο, τότε τη θερμότητα την προσφέρει η δεξαμενή θερμότητας, ενώ, αν αυτή η ποσότητα δεν επαρκεί, τότε μπαίνει σε λειτουργία το βοηθητικό σύστημα [auxiliary subsystem].
- Αν υπάρχει διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, αλλά η δεξαμενή θερμότητας είναι πλήρως φορτισμένη, τότε η θερμότητα αποβάλλεται στο περιβάλλον¹⁰⁷.

Ανάλογα με τον τύπο του συλλέκτη και το θερμικό ρευστό που κυκλοφορεί, τον τύπο της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας, αν το σύστημα είναι ανοικτού ή κλειστού κυκλώματος κ.λπ., υπάρχουν πολλά είδη *συστημάτων συνδυασμένης λειτουργίας*. Ανάμεσα σε όλα αυτά τα είδη και τις παραλλαγές (που εξαρτώνται και από το κλίμα του τόπου εγκατάστασης και άλλες παραμέτρους) μπορεί να γίνει μια βασική κατηγοριοποίηση ανάμεσα στα *συστήματα αέρα* και τα *υγρά συστήματα ή συστήματα νερού*¹⁰⁸. Ένα σύστημα συνδυασμένης λειτουργίας μπορεί να χρησιμοποιήσει συλλέκτες υγρού ή αέρα ανάλογα με το σχεδιασμό του. Όμως το σύστημα που μεταφέρει τη θερμότητα στους χώρους μπορεί να χρησιμοποιεί διαφορετικό θερμικό ρευστό απ' αυτό των συλλεκτών. Συνήθως τα συστήματα αέρα χρησιμο-

¹⁰⁴ Χειμώνας: μεγάλη ζήτηση θέρμανσης χώρων και μικρή διαθεσιμότητα ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ το καλοκαίρι ισχύει το αντίστροφο.

¹⁰⁵ Βλ. Kalogirou, 2009, σελ. 348.

¹⁰⁶ Δεν υπάρχει η δυνατότητα σε όλα τα συστήματα να προσφέρουν απευθείας τη θερμότητα μέσω του κυκλώματος του συλλέκτη αλλά μόνο από το κύκλωμα της δεξαμενής θερμότητας.

¹⁰⁷ Μέσω των διαφόρων συστημάτων που υπάρχουν, όπως βαλβίδες διαφυγής, δοχεία εκτόνωσης κ.λπ.

¹⁰⁸ Για περισσότερα βλ. Kalogirou, 2009, σελ. 315-386 και ιδιαίτερα 347-360, Solar Heating Systems for Houses, A Design Handbook for Solar Combisystems on <http://www.iea-shc.org/task26/publications/index.html/> (29.11.2010), Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 155-157.



ποιούν τον αέρα ως θερμικό ρευστό για όλες τις φάσεις μεταφοράς της θερμότητας, αλλά τα υγρά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιήσουν το νερό (ή νερό με αντιψυκτικό υγρό) ως θερμικό ρευστό στο κύκλωμα του συλλέκτη και ως υλικό αποθήκευσης της θερμότητας. Η μεταφορά της θερμότητας στους χώρους μπορεί να γίνει μέσω νερού που θα θερμαίνει απευθείας τους χώρους (π.χ., το πάτωμα των δωματίων) ή μέσω ενός εναλλάκτη νερού-αέρα [water-to-air heat exchanger] ο οποίος θα τροφοδοτεί με αέρα τις μονάδες θέρμανσης των δωματίων.

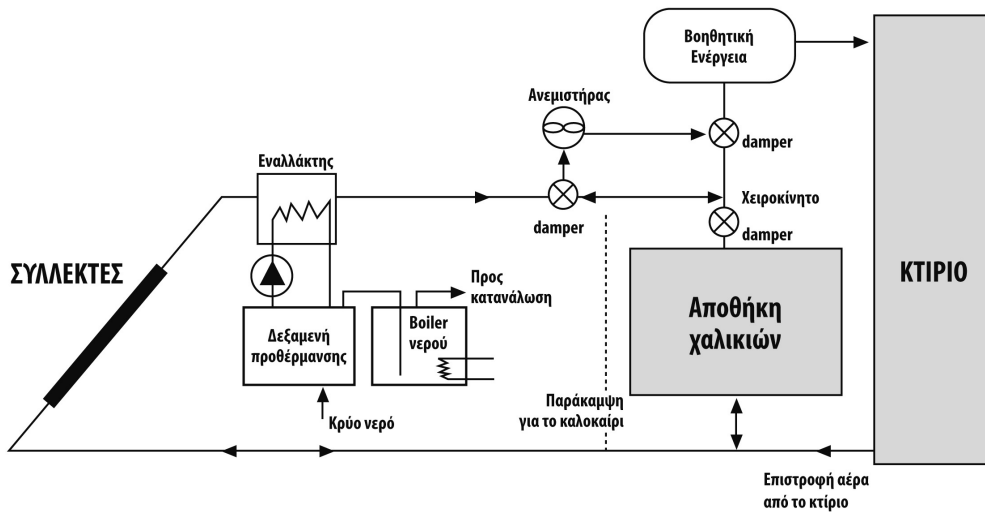
● *Συστήματα Αέρα [Air Systems]*

Το σύστημα περιλαμβάνει τα βασικά μέρη που αφορούν σε όλα τα συστήματα συνδυασμένης λειτουργίας (συλλέκτες, δεξαμενή θερμότητας, σύστημα μεταφοράς θερμότητας, σύστημα ελέγχου, βοηθητική πηγή θερμότητας). Στα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται συλλέκτες αέρα, οι οποίοι συλλέγουν τη θερμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας και τη μεταφέρουν στην αποθήκη (δεξαμενή) θερμότητας μέσω του θερμικού ρευστού (που είναι ο αέρας). Η θερμότητα που είναι αποθηκευμένη στη δεξαμενή στη συνέχεια προωθείται μέσω του αέρα στις εξόδους στα διάφορα σημεία του κτιρίου για τη θέρμανση των χώρων. Επίσης μεταφέρεται μέσω εναλλάκτη αέρα-νερού στη δεξαμενή προθέρμανσης του νερού για χρήση. Μια βοηθητική πηγή θερμότητας [auxiliary] που λειτουργεί με συμβατικό (συνήθως) καύσιμο ή βιοκαύσιμο (π.χ., συσσωματώματα βιομάζας [pellets]) ή ηλεκτρικό ρεύμα του δικτύου, προσφέρει την απαραίτητη θερμότητα όταν η ηλιακή ακτινοβολία δεν επαρκεί¹⁰⁹. Το Σχήμα 3.16 δείχνει το διάγραμμα μιας τυπικής τέτοιας εγκατάστασης.

Η δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας περιέχει στερεό μέσο αποθήκευσης, όπως το βότσαλο ή άλλο είδος πετρώματος, και είναι δεξαμενή «ημερήσιας διάρκειας»¹¹⁰, δηλαδή δεξαμενή που μπορεί να αποθηκεύσει θερμότητα για μία ή μερικές μέρες. Αυτού του είδους τα συστήματα συνήθως εγκαθίστανται σε δημόσια κτίρια που οι ανάγκες θέρμανσης επικεντρώνονται συνήθως στη διάρκεια της ημέρας (που υπάρχει ηλιοφάνεια).

¹⁰⁹ Σήμερα όλα σχεδόν τα ΗΘΣ συστήματα συνδυασμένης χρήσης σχεδιάζονται για να καλύπτουν ένα μέρος του θερμικού φορτίου, καθώς μια συνολική κάλυψη, ιδιαίτερα σε περιοχές της κεντρικής και της βόρειας Ευρώπης, θα ήταν ασύμφορη οικονομοτεχνικά. Επίσης η παρουσία της βοηθητικής πηγής θερμότητας είναι απαραίτητη και για λόγους που συνδέονται με το στοχαστικό χαρακτήρα της ηλιακής ακτινοβολίας (δεν είναι πάντα διαθέσιμη και στην ίδια ένταση).

¹¹⁰ Βλ. σελ. 68 παρόντος βιβλίου.

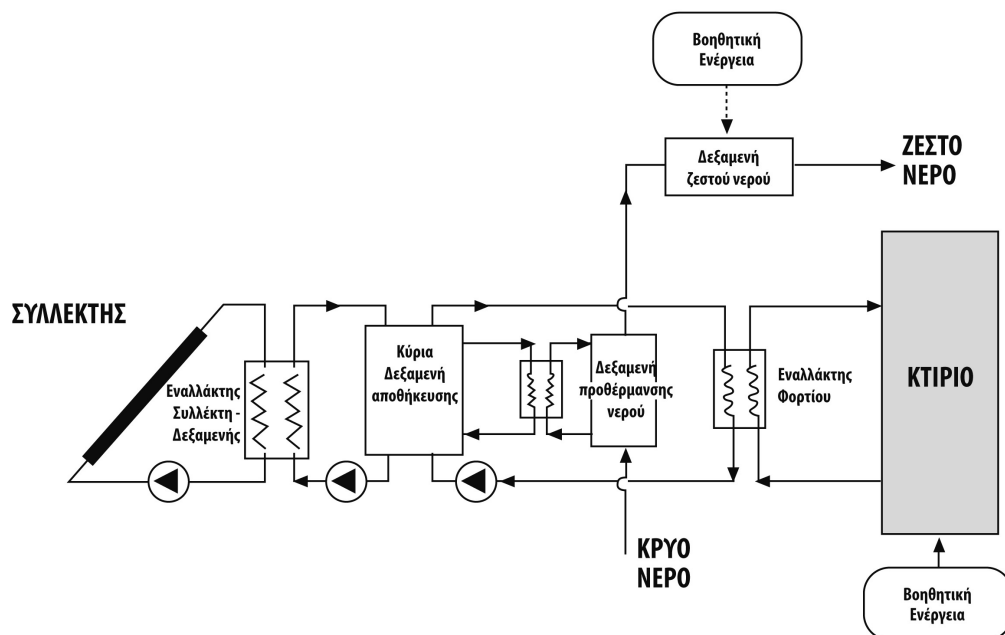


Σχήμα 3.16 Σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος θέρμανσης που χρησιμοποιεί αέρα σαν θερμοαποαγωγό ρευστό και αποθήκη χαλικιών rock-bed.

● Συστήματα υγρού ή συστήματα νερού [Liquid or Water Systems]

Το σύστημα περιλαμβάνει τα βασικά μέρη που αφορούν σε όλα τα συστήματα συνδυασμένης λειτουργίας (συλλέκτες, δεξαμενή θερμότητας, σύστημα μεταφοράς θερμότητας, σύστημα ελέγχου, βοηθητική πηγή θερμότητας). Σ' αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται συλλέκτες υγρού (νερού ή άλλου αντιψυκτικού διαλύματος). Η λειτουργία τους είναι παρόμοια με των συστημάτων αέρα, με κάποιες διαφορές. Η πρώτη είναι ότι η δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας είναι συνήθως υγρού αποθηκευτικού μέσου (συνήθως νερό). Η δεύτερη διαφορά είναι ότι οι συλλέκτες μπορεί να είναι κλειστού κυκλώματος (δηλαδή το υγρό που κυκλοφορεί στους συλλέκτες είναι αντιψυκτικό διάλυμα) και η θερμότητα να μεταφέρεται στη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας με εναλλάκτη. Αυτό γίνεται για την αποφυγή του παγώματος του υγρού στο κύκλωμα κυκλοφορίας του συλλέκτη ιδιαίτερα σε βόρειες περιοχές. Μια τρίτη διαφορά είναι ότι μπορεί ταυτόχρονα να εισέρχεται θερμότητα στη δεξαμενή αποθήκευσης από το συλλέκτη και να εξέρχεται θερμότητα από τη δεξαμενή αποθήκευσης προς το κτίριο. Έτσι, το σύστημα ελέγχου μπορεί να έχει τον ανεξάρτητο έλεγχο του συστήματος κυκλοφορίας του συλλέκτη και του συστήματος κυκλοφορίας της δεξαμενής αποθήκευσης.

Η θερμότητα που απελευθερώνεται από τη δεξαμενή θερμότητας θερμαίνει (μέσω εναλλάκτη) το νερό χρήσης ή (και) μεταφέρεται προς το κτίριο για τη θέρμανση των χώρων του. Οι τελικοί αποδέκτες της θερμότητας στους χώρους του



Σχήμα 3.17 Σχηματικό διάγραμμα συστήματος θέρμανσης που χρησιμοποιεί υγρό ως θερμοαπογωγό ρευστό και αποθηκευτική δεξαμενή.

κτιρίου μπορεί να είναι διαφόρων τύπων, όπως κλασικά σώματα καλοριφέρ, είτε σώματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας αέρα [fan coils] είτε τα πατώματα του κτιρίου (ενδοδαπέδια θέρμανση).

● Σύγκριση συστημάτων αέρα και συστημάτων νερού

Η επιλογή του είδους του ΗΣΣΛ (σύστημα αέρα ή σύστημα νερού) που θα εγκατασταθεί σε ένα κτίριο είναι αποτέλεσμα συνυπολογισμού πολλών παραμέτρων (όπως θερμικό φορτίο, κόστος, κλιματικές συνθήκες του τόπου κ.λπ.). Σ' αυτή την επιλογή συνυπολογίζονται και τα πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα κάθε συστήματος. Τα συστήματα αέρα έχουν κυρίως τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που συνδέονται με τη χρήση των συλλεκτών αέρα (βλ. σελ. 61-62). Επίσης έχουν υψηλότερο κόστος αποθήκευσης της θερμότητας και πιο θορυβώδη λειτουργία. Τα πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα των συστημάτων νερού συνδέονται επίσης με τους ηλιακούς συλλέκτες υγρού (νερού) που χρησιμοποιούν (υψηλότερη και σταθερότερη απόδοση απ' τα συστήματα αέρα, μικρότερη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας κ.λπ.)¹¹¹.

¹¹¹ Για περισσότερα βλ. Kalogirou, 2009, σελ. 347-354.

δ) Συστήματα ηλιακού δροσισμού [solar cooling systems]

Τα ΗΘΣ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη τόσο των φορτίων θέρμανσης [heating] όσο και των φορτίων ψύξης¹¹² [cooling]. Αν συνδυάζεται η θέρμανση και η ψύξη των χώρων ενός κτιρίου, τότε πρόκειται για ηλιακό κλιματισμό (ή για την ακρίβεια δροσισμό). Ενώ τα ΗΘ συστήματα θέρμανσης χώρων (που συνήθως συνδυάζονται και με θέρμανση νερού χρήσης, δηλαδή πρόκειται για συστήματα συνδυασμένης λειτουργίας) είναι αρκετά διαδεδομένα, τα ΗΘ συστήματα δροσισμού χώρων έχουν πολύ μικρή διάδοση. Οι κυριότεροι λόγοι είναι κυρίως το υψηλό κόστος αρχικής επένδυσης, αλλά και η τεχνική πολυπλοκότητα σε σύγκριση με τις συμβατικές εγκαταστάσεις κλιματισμού¹¹³. Τα περισσότερα συστήματα ηλιακού δροσισμού είναι εγκατεστημένα σε βιομηχανικά κτίρια ή εμπορικές εγκαταστάσεις¹¹⁴. Ο ηλιακός δροσισμός των κτιρίων αποτελεί ελκυστική επιλογή για περιοχές με θερμό κλίμα (όπως η Ελλάδα και γενικά η Μεσόγειος) καθώς σ' αυτές τις περιοχές τις θερμές ημέρες του χρόνου που οι ανάγκες ψύξης είναι αυξημένες, ταυτόχρονα είναι μεγάλη και η προσφορά ηλιακής ακτινοβολίας (δηλαδή η ηλιακή ακτινοβολία και το ψυκτικό φορτίο είναι σε φάση). Σε τέτοιες περιοχές μπορεί να συνδυαστεί ο ηλιακός δροσισμός με την ηλιακή θέρμανση (ηλιακός κλιματισμός), καθώς και με τη θέρμανση νερού χρήσης (ή θέρμανση νερού πισίνας) και έτσι το ΗΘΣ να έχει μεγαλύτερο συντελεστή απόδοσης για όλο το ημερολογιακό έτος.

Ένα τυπικό σύστημα ηλιακού δροσισμού αποτελείται από όλα τα συστατικά στοιχεία ενός ηλιακού συστήματος θέρμανσης (συλλέκτες¹¹⁵, δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας, δίκτυο σωληνώσεων, αντλίες) με τη βασική προσθήκη θερμωθούμενου ψύκτη [thermally driven chiller].

Ο ψύκτης είναι η βασική μονάδα όπου μέσω ψυκτικού κύκλου το ψυκτικό μέσο [refrigerator] διαλύματος απορροφητή-ψυκτικού [absorber-refrigerator]¹¹⁶

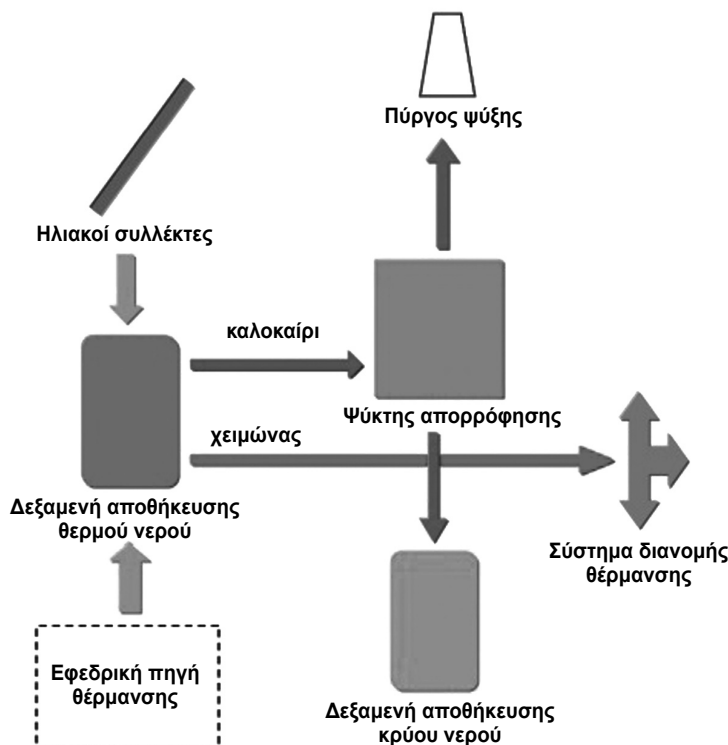
¹¹² Επειδή η ψύξη χώρων με τους κλασικούς συμβατικούς τρόπους μπορεί να μειώσει τη θερμοκρασία του χώρου σε επίπεδα της τάξης των -18°C (με την κατάλληλη προσφορά ηλεκτρικής (συνήθως) ενέργειας), ενώ η ψύξη με τα ΗΘΣ έχει κατώτατο όριο ψύξης -26°C , χρησιμοποιείται, ως πιο κατάλληλος, για τα ΗΘΣ ο όρος δροσισμός αντί του όρου ψύξη.

¹¹³ Κορογιαννάκης Π., Τσούτσος Θ., Γκούσκος Ζ., 2008, σελ. 4

¹¹⁴ Κορογιαννάκης Π., Τσούτσος Θ., Γκούσκος Ζ., 2008, σελ. 18-21. Σ' αυτές τις περιπτώσεις εκτός από το δροσισμό των χώρων μπορούν να συνεισφέρουν στη διατήρηση τροφίμων ή φαρμάκων.

¹¹⁵ Η τεχνολογία του ηλιακού δροσισμού-κλιματισμού απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες για το θερμικό ρευστό ($90-150^{\circ}\text{C}$), για αυτό και οι ηλιακοί συλλέκτες που χρησιμοποιούνται είναι επίπεδοι συλλέκτες επιλεκτικής επιφάνειας ή συλλέκτες κενού.

¹¹⁶ Απορροφητή-ψυκτικού μέσου. Τέτοιο διάλυμα χρησιμοποιείται στους λεγόμενους ψύκτες απορρόφησης [absorption chillers].



Σχήμα 3.18 Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας μονάδας ηλιακού δροσισμού.

ή προσροφητή-ψυκτικού [adsorber-refrigerator]¹¹⁷ απάγει θερμότητα από τους χώρους του κτιρίου και την απορρίπτει στο περιβάλλον. Έτσι, επιτυγχάνεται δροσισμός των χώρων του κτιρίου. Υπάρχουν δύο τύποι ψυκτών: οι ψύκτες απορρόφησης [absorbion chillers], που συνήθως χρησιμοποιούν ως ζευγάρι απορροφητή-ψυκτικού διαλύματα βρωμιούχου λιθίου-νερού [LiBr-H₂O] ή νερού-αμμωνίας [H₂O-NH₃], και οι ψύκτες προσρόφησης [adsorption chillers] που χρησιμοποιούν ως ζευγάρι προσροφητή-ψυκτικού διαλύματα, π.χ., ζεολίθου-νερού [zeolite-water] ή ζεολίθου-μεθανόλης κ.λπ.

Στις διάφορες βαθμίδες του ψύκτη [γεννήτρια-generator, απορροφητής-absorber, εξατμιστής-evaporator, συμπυκνωτής-condenser] το ψυκτικό μέσο [refrigerator] των διαλυμάτων απορροφητή-ψυκτικού ή προσροφητή-ψυκτικού υφίσταται ψυκτικό κύκλο. Η θερμότητα που προσφέρεται από τη δεξαμενή θερμότητας στον ψύκτη χρησιμοποιείται, ώστε το στάδιο της συμπίεσης του ψυκτικού μέσου

¹¹⁷ Προσροφητή-ψυκτικού μέσου. Τέτοιο διάλυμα χρησιμοποιείται στους λεγόμενους ψύκτες προσρόφησης [adsorption chillers].



που στο συμβατικό ψυκτικό κύκλο γίνεται με μηχανικό τρόπο να αντικατασταθεί με μια άλλη ισοδύναμη διαδικασία¹¹⁸ με το ίδιο τελικό αποτέλεσμα.

ε) ΗΘΣ τηλεθέρμανσης [District Heating Solar Thermal Systems]

Τηλεθέρμανση ή θέρμανση από απόσταση [district heating] ονομάζεται η παροχή θερμότητας σε σύνολο κτιρίων από κοινό κεντρικό χώρο παραγωγής της θερμότητας (σταθμός παραγωγής θερμότητας) και διανομής της μέσω δικτύου σωληνώσεων στα ξεχωριστά κτίρια. Η τηλεθέρμανση είναι διαδεδομένη σε περιοχές κυρίως της κεντρικής και της βόρειας Ευρώπης. Η παραγωγή θερμότητας στον κεντρικό σταθμό παραγωγής γίνεται συνήθως από συμβατικά καύσιμα (π.χ., με λέβητες πετρελαίου ή φυσικού αερίου ή εργοστάσια συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας¹¹⁹) ή από ΑΠΕ, όπως η γεωθερμία¹²⁰ ή η βιομάζα¹²¹. Υπάρχει όμως και η δυνατότητα ο κεντρικός σταθμός παραγωγής της θερμότητας να λειτουργεί με σύστημα ηλιακών συλλεκτών. Το σύστημα τότε ονομάζεται *ΗΘΣ τηλεθέρμανσης*. Τέτοια συστήματα δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα κυρίως για τεchnοοικονομικούς λόγους, καθώς συνήθως είναι προτιμότερο (οικονομοτεχνικά) να μειωθούν οι ανάγκες θέρμανσης των κτιρίων μέσω θερμικής μόνωσης στους σκελετούς των κτιρίων ή να εγκατασταθούν ξεχωριστά ΗΘΣ σε κάθε κτίριο. Στην Ευρώπη λειτουργούν εδώ και 20 χρόνια κάποιες επιδεικτικές εγκαταστάσεις σε πόλεις της Γερμανίας, Αυστρίας, Σουηδίας και Δανίας. Ανάλογα με το σχεδιασμό τους μπορούν να καλύψουν το 40-70% των ετήσιων φορτίων θέρμανσης των κτιρίων (οικίες) που καλύπτει το δίκτυο¹²². Πρόκειται για μικρά σύνολα κατοικιών, όπως, για παράδειγμα, η περίπτωση του Friedrichshafen, μιας πόλης 53.000 κατοίκων στη Ν. Γερμανία, όπου 600 κατοικίες έχουν συνδεθεί με έναν τέτοιο ηλιακό σταθμό τηλεθέρμανσης από το 1996¹²³.

¹¹⁸ Η περιγραφή αυτής της διαδικασίας και γενικά του ψυκτικού κύκλου στους ψύκτες ξεφεύγει από τα πλαίσια αυτό του βιβλίου. Για μια αναλυτικότερη περιγραφή βλ. Kalogiou, 2009, σελ. 360-383.

¹¹⁹ Στην Πτολεμαΐδα, για παράδειγμα, λειτουργεί από το 1994 δίκτυο τηλεθέρμανσης που καλύπτει το 75% των αναγκών θέρμανσης της πόλης. Η θερμότητα παράγεται κατά ένα μέρος (75 MW) από μια μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-θερμότητας της ΔΕΗ που λειτουργεί με λιγνίτη και κατά ένα άλλο μέρος από ένα λέβητα πετρελαίου αερίου <http://www.ptolemaida.gr/D-E-TH-P.html> (10/5/2012). Η μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-θερμότητας χρησιμοποιεί μέρος της θερμότητας που αποβάλλεται κατά τη λειτουργία των μηχανών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τη θέρμανση θερμαντικού μέσου (συνήθως νερού) και τη μεταφορά της θερμότητας, στη συνέχεια, στο δίκτυο των κτιρίων που είναι συνδεδεμένα με το σύστημα της τηλεθέρμανσης. Περισσότερα για τις μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-θερμότητας [Combined Heat and Power, CHP] βλ. Breeze, 2005, σελ. 62-74.

¹²⁰ Βλέπε παρόν βιβλίο κεφ. 8.

¹²¹ Βλέπε παρόν βιβλίο κεφ. 6.

¹²² <http://www.solar-district-heating.eu/AboutSDHTakeoff.aspx> (5/11/2011).

¹²³ http://www.energy-cities.eu/db/friedrichshafen_139_en.pdf (7/11/2011).



Ένα τυπικό ΗΘΣ τηλεθέρμανσης, όπως αυτά που είναι εγκατεστημένα σε χώρες της κεντρικής Ευρώπης, αποτελείται από τους συλλέκτες, τη δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας, το σύστημα σωληνώσεων μεταφοράς της θερμότητας από τον κεντρικό σταθμό προς τα κτίρια, καθώς και το σύστημα ελέγχου¹²⁴. Υπάρχουν δύο βασικές παραλλαγές του συστήματος ανάλογα με το αν υπάρχει δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας ημερήσιας διάρκειας [daily storage] ή εποχιακής διάρκειας [seasonal storage]. Στα συστήματα που προορίζονται για κάλυψη αναγκών μόνο ζεστού νερού χρήσης αρκεί η δεξαμενή ημερήσιας διάρκειας, ενώ στα συστήματα που καλύπτουν και ανάγκες θέρμανσης χώρων είναι απαραίτητη η ύπαρξη δεξαμενής εποχιακής διάρκειας¹²⁵. Το μεγαλύτερο πρόβλημα που υπάρχει στα ΗΘΣ τηλεθέρμανσης συνδέεται με τη μείωση των απωλειών θερμότητας που συμβαίνουν κυρίως κατά τη μεταφορά της θερμότητας από τον κεντρικό σταθμό στα κτίρια αλλά επίσης (λιγότερο) και από τη δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας.

στ) ΗΘΣ αφαλάτωσης [Solar Desalination Systems]

Αφαλάτωση ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία απομακρύνεται μεγάλο μέρος του αλατιού-αλμύρας από το θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό μέχρι του σημείου¹²⁶ που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανάγκες ύδρευσης ή άρδευσης. Η διαδικασία αφαλάτωσης απαιτεί μεγάλα ποσά ενέργειας, τα οποία μέχρι σήμερα προέρχονται σχεδόν ολοκληρωτικά από τα συμβατικά καύσιμα¹²⁷. Η δυνατότητα να δοθεί η απαραίτητη ενέργεια από ΑΠΕ (ηλιακή ενέργεια, αιολική ενέργεια, γεωθερμία) έχει πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα σε πιλοτικά συστήματα αφαλάτωσης που έχουν

¹²⁴ Επίσης υπάρχει η πρόβλεψη για τη σύνδεση ενός καυστήρα συμβατικού καυσίμου ή βιομάζας στον κεντρικό σταθμό παραγωγής της θερμότητας, καθώς η ηλιακή ενέργεια καλύπτει ένα μέρος των φορτίων θέρμανσης των κτιρίων (40-70%).

¹²⁵ Στην έκθεση που υπάρχει στο διαδίκτυο http://www.energy-cities.eu/db/friedrichshafen_139_en.pdf (7/11/2011) για την περίπτωση του Friedrichshafen μπορεί ο αναγνώστης να βρει περισσότερες λεπτομέρειες για όλο το σύστημα (και για τη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας). Στο Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 157-159 υπάρχει αναλυτικότερη παρουσίαση των ΗΘΣ τηλεθέρμανσης.

¹²⁶ Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας [World Health Organisation – WHO], το επιτρεπόμενο όριο «αλατότητας» στο νερό είναι 500 ppm ή σε ειδικές περιπτώσεις 1.000 ppm.

¹²⁷ Το 99% της ποσότητας του αφαλατωμένου νερού παγκοσμίως προέρχεται από εγκαταστάσεις αφαλάτωσης που λειτουργούν με συμβατικά καύσιμα και μόνο 1% από ΑΠΕ (Καλογιρίου, 2009, σελ. 453). Ο βασικότερος λόγος που συμβαίνει αυτό είναι το υψηλό κόστος αρχικής επένδυσης και συντήρησης (σε σχέση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας) που έχουν οι εγκαταστάσεις που λειτουργούν με ΑΠΕ. Βέβαια, αν ληφθούν υπόψη το περιβαλλοντικό κόστος και η τάση για αύξηση της τιμής των συμβατικών καυσίμων, η κατάσταση είναι πιθανό να αλλάξει στο μέλλον (ίσως και βραχυπρόθεσμα).

ειδικά σχεδιαστεί για την κάθε ξεχωριστή περίπτωση¹²⁸. Τα ΗΘΣ μπορούν να προσφέρουν την ενέργεια (θερμότητα) που χρειάζονται τα συστήματα αφαλάτωσης θερμικών διεργασιών¹²⁹. Ένα σύστημα αφαλάτωσης που λειτουργεί με ηλιακή θερμική ενέργεια ουσιαστικά αποτελείται από ένα ΗΘΣ που συνδέεται με ένα συμβατικό σύστημα αφαλάτωσης. Η βασική διαφορά είναι ότι η θερμότητα στο σύστημα αφαλάτωσης παρέχεται από το ΗΘΣ. Οι ηλιακοί συλλέκτες θερμαίνουν το νερό της δεξαμενής αποθήκευσης της θερμότητας όπως σε τυπικό ΗΘΣ κλειστού κύκλου. Το θαλασσινό (ή υφάλμυρο) νερό απάγει θερμότητα από τη δεξαμενή αποθήκευσης μέσω εναλλάκτη και στη συνέχεια επιστρέφει στο συμβατικό σύστημα αφαλάτωσης για να συνεχιστεί η διαδικασία. Στο σύστημα υπάρχει πάντα και βοηθητική πηγή θέρμανσης [auxiliary heater] για να παρέχει την απαραίτητη θερμότητα όταν η ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι διαθέσιμη (π.χ., νύχτα) ή δεν επαρκεί.

3.2.10 Υπολογιστικές τεχνικές για την εκτίμηση φορτίων σε ηλιακά θερμικά συστήματα

Η εκτίμηση των θερμικών φορτίων που μπορεί να καλύψει ένα ηλιακό θερμικό σύστημα, καθώς και η διαστασιολόγηση των διαφόρων συστατικών μερών του είναι σύνθετο πρόβλημα γιατί χρειάζεται να γίνουν υπολογισμοί με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος αλλά σε μη προβλέψιμες κλιματικές συνθήκες (ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία κ.λπ.). Για την επίτευξη των βέλτιστων τεχνικών υπολογισμού των θερμικών φορτίων και της διαστασιολόγησης έχουν αναπτυχθεί πολλές σχεδιαστικές μέθοδοι και λογισμικά προσομοίωσης¹³⁰. Σχεδιαστικές μέθοδοι, όπως η μέθοδος χρησιμότητας [utilizability method], η μέθοδος f-chart [f-chart method], η μέθοδος $[\Phi, f\text{-chart method}]$, είναι κάποιες από αυτές που περιγράφονται σε πιο εξειδικευμένα βιβλία¹³¹. Στα πλαίσια του συγκεκριμένου βιβλίου θα περιγραφεί (με συντομία) μια απλή μέθοδος υπολογισμού θερμικών φορτίων θέρμανσης νερού χρήσης ή θέρμανσης χώρων (μέθοδος βαθμοημερών),

¹²⁸ Για μια αναλυτική παρουσίαση βλ. Kalogirou S., 2005, *Seawater desalination using renewable energy sources*, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 31, Issue 3, σελ. 242-281.

¹²⁹ Υπάρχουν δύο βασικές τεχνολογίες συστημάτων αφαλάτωσης: τα συστήματα αφαλάτωσης θερμικών διεργασιών ή αλλαγής φάσης [thermal processes or phase change] και τα συστήματα αφαλάτωσης μεμβράνης [membrane or single phase processes]. Στα πρώτα χρειάζεται η προσφορά θερμικής ενέργειας (θερμότητας) ενώ στα δεύτερα η προσφορά ηλεκτρικής ενέργειας.

¹³⁰ Για περισσότερα βλ. Nafey, A.S., 2005, *Simulation of solar heating systems - An overview*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 9, Issue 6, σελ. 576-591). Επίσης Kalogirou, 2009, σελ. 553-658. Για τα όρια των προσομοιώσεων ιδιαίτερα βλ. ο.π. σελ. 658.

¹³¹ Βλ. ο.π., καθώς και Duffie & Beckman, 2006, σελ. 655-745.

καθώς και η μέθοδος f-chart που μπορεί χρησιμοποιηθεί για τη διαστασιολόγηση ενός ηλιακού θερμικού συστήματος που μπορεί να καλύψει τέτοιου είδους θερμικά φορτία.

α) Υπολογισμός θερμικών φορτίων θέρμανσης νερού χρήσης ή θέρμανσης χώρων

Για να εγκατασταθεί ένα κατάλληλο ηλιακό θερμικό σύστημα για θέρμανση ή (και) ψύξη απαιτείται διαστασιολόγησή του, δηλαδή να καθοριστούν τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά του. Για να γίνει κάτι τέτοιο θα πρέπει αρχικά να υπολογιστούν οι ανάγκες που πρέπει να καλύψει αυτό το σύστημα. Αν πρόκειται για θέρμανση νερού χρήσης ή θέρμανση χώρων, θα πρέπει να υπολογιστεί το **θερμικό φορτίο**. Ο όρος θερμικό φορτίο, όταν αφορά τη θέρμανση (ή ψύξη) χώρων, χρησιμοποιείται για να δηλώσει την ενέργεια που χρειάζεται να προστεθεί ή να αφαιρεθεί από ένα χώρο για να διατηρήσει αυτός τη θερμοκρασία του (κυρίως) και την υγρασία του στις επιθυμητές τιμές (όπως αυτές έχουν αποφασιστεί από το σχεδιαστή του συστήματος).

Για να εκτιμηθεί το θερμικό φορτίο χρειάζεται να υπολογιστούν οι **ενεργειακές απολαβές [gains]** και οι **ενεργειακές απώλειες [losses]** ενός χώρου. Αυτό μπορεί να γίνει με στατικό τρόπο σε ημερήσια, μηνιαία και ετήσια βάση χρησιμοποιώντας κάποιες σταθερές ημερήσιες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας. Επειδή όμως η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να μεταβάλλεται σε αξιοσημείωτα επίπεδα ακόμα και σε ωριαία βάση επηρεάζοντας έτσι τις ενεργειακές ροές (απολαβές-απώλειες) του χώρου,¹³² μόνο μια δυναμική ανάλυση που θα περιλαμβάνει κι αυτά τα μεταβατικά φαινόμενα μπορεί να δώσει ακριβέστερα αποτελέσματα. Πολλές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των θερμικών φορτίων, όπως ισοζυγίου θερμότητας [heat balance], παραμέτρων με βαρύτητα [weighting factors], θερμικού δικτύου [thermal network] κ.λπ.¹³³ Η εξέταση αυτών των μεθόδων ξεφεύγει από τα πλαίσια αυτού του βιβλίου¹³⁴. Εδώ θα παρουσιαστεί (με συντομία) μια απλή μέθοδος υπολογισμού του εποχιακού θερμικού φορτίου θέρμανσης χώρων, η οποία ονομάζεται μέθοδος βαθμοημερών [degree day method], καθώς και ένας απλός τρόπος υπολογισμού του θερμικού φορτίου για θέρμανση νερού χρήσης.

¹³² ή του νερού της δεξαμενής, όταν πρόκειται για ζεστό νερό χρήσης.

¹³³ Kalogirou, 2009, σελ. 315.

¹³⁴ Περισσότερα μπορεί να βρει ο αναγνώστης σε εξειδικευμένα βιβλία, όπως, π.χ., Kalogirou, 2009, Duffie & Beckman, 2006 κ.λπ.

● **Υπολογισμός θερμικού φορτίου θέρμανσης χώρων – Μέθοδος βαθμομερών [degree day method]**

Η μέθοδος των βαθμομερών στηρίζεται στην υπόθεση ότι οι ενεργειακές απώλειες ενός κτιρίου είναι ανάλογες με τη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στο εσωτερικό και το εξωτερικό του.

Ας υποτεθεί ότι σε κτίριο προστίθεται θερμότητα (από οποιοδήποτε ενεργειακό σύστημα συμβατικό ή ηλιακό) με ρυθμό $\dot{L}$ και ότι η θερμική απολαβή του κτιρίου από άλλους παράγοντες (όπως οι οικιακές συσκευές, οι άνθρωποι, η εισερχομένη ηλιακή θερμότητα από το κέλυφος του κτιρίου κ.λπ.) είναι $\dot{g}$. Δηλαδή το σύνολο των ενεργειακών απολαβών είναι $\dot{L} + \dot{g}$. Ο ρυθμός των ενεργειακών απωλειών θα είναι (σύμφωνα με την αρχική υπόθεση) ίσος με $(UA)_h (T_h - T_a)$, δηλαδή ανάλογος με τη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στο εσωτερικό και το εξωτερικό του. Το T_h είναι η εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου [h=house] και T_a είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος [a=ambient], ενώ το $(UA)_h$ είναι ο συντελεστής θερμικών απωλειών από το κέλυφος του κτιρίου. Συνεπώς, αν πρέπει να διατηρηθεί σταθερή θερμοκρασία T_h στο εσωτερικό του κτιρίου, τότε το ενεργειακό ισοζύγιο θα είναι:

$$\dot{L} + \dot{g} = (UA)_h (T_h - T_a) \quad (3.7)$$

Αν θεωρηθεί θερμοκρασία του περιβάλλοντος T_b [b= balance] για την οποία οι ενεργειακές απώλειες του κτιρίου είναι ίσες με την ενεργειακή απολαβή $\dot{g}$, τότε θα έχουμε για $T_a = T_b$ το $\dot{L} = 0$ και από (3.7)

$$\dot{g} = (UA)_h (T_h - T_b) \text{ και τελικά}$$

$$T_h = T_b + \dot{g} / (UA)_h \quad (3.8)$$

Από (3.7) και (3.8) θα έχουμε:

$$\dot{L} = (UA)_h (T_b - T_a) \quad (3.9)$$

Η σχέση (3.9) δίνει το ρυθμό με τον οποίο το ηλιακό θερμικό σύστημα πρέπει να αποδίδει θερμότητα έτσι ώστε να διατηρείται η θερμοκρασία του εσωτερικού του κτιρίου στην τιμή $T_h = T_b + \dot{g} / (UA)_h$.

Αν η θερμοκρασία αναφοράς T_b οριστεί στην τιμή των $18,3^\circ\text{C}^{135}$, τότε η εσωτερική θερμοκρασία T_h υπολογίζεται ότι είναι 24°C .

¹³⁵ Αυτή είναι η θερμοκρασία που έχει οριστεί στις ΗΠΑ από την ASHRAE [American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers]. Για περισσότερα βλ. Duffie & Beckman, 2006, σελ. 415-416.

Για να υπολογιστεί το μηνιαίο θερμικό φορτίο L που πρέπει να καλύπτει το ηλιακό θερμικό σύστημα από την (3.9) προκύπτει:

$$L = \int_0^t (UA)_h (T_b - T_a)^+ dt \quad (3.10)$$

όπου $(T_b - T_a)^+$ συμβολίζει τις θετικές τιμές που πρέπει να έχει η διαφορά των θερμοκρασιών, αφού μόνο για θετικές τιμές (δηλαδή όταν $T_b \geq T_a$) χρειάζεται προσφορά θερμικού φορτίου L , έτσι ώστε να διατηρείται η εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου σταθερή.

Αν δεν υπάρχει συνεχής κατανομή θερμοκρασιών, αλλά διακριτή κατανομή, τότε μπορεί να αντικατασταθεί το ολοκλήρωμα με άθροισμα θεωρώντας σταθερά τα μεγέθη $T_b = ct$, $(UA)_h = ct$.

Τότε από την (3.9) προκύπτει:

$$L = (UA)_h \sum_i^N (T_b - T_{av})^+ \Delta t \quad (3.11)$$

όπου $T_{av} = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}$ είναι η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος κάθε ξεχωριστής ημέρας, $T_{\max}$ και $T_{\min}$ η μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία κάθε ημέρας και N ο αριθμός των ημερών του μήνα και Δt το χρονικό διάστημα μιας ημέρας.

Το άθροισμα $\sum_i^N (T_b - T_{av})^+$ εκφράζει τον αριθμό βαθμοημερών θέρμανσης του συγκεκριμένου μήνα στη συγκεκριμένη περιοχή, δηλαδή:

$$(DD)_h = \sum_i^N (T_b - T_{av})^+ \quad \text{όπου } (DD)_h = \text{Degree Days heat}$$

Άρα

$$L = (UA)_h (DD)_h \Delta t \quad (3.12)$$

Αν είναι γνωστές οι βαθμοημέρες θέρμανσης ενός μήνα, μπορεί να υπολογιστεί το θερμικό φορτίο δηλαδή:

$$L = (UA)_h (DD)_h (3600 \times 24)$$

όπου $(UA)_h$ σε $W/^\circ C$, $(DD)_h$ σε $^\circ C$ και L σε J .

Ο αριθμός των βαθμοημερών θέρμανσης κάθε μήνα σε διάφορες περιοχές κάθε χώρας δίνονται από πίνακες που δημοσιεύει η μετεωρολογική υπηρεσία¹³⁶.

¹³⁶ Βλέπε Παράρτημα στο τέλος του βιβλίου.

● **Υπολογισμός θερμικού φορτίου για θέρμανση νερού χρήσης**

Ο υπολογισμός των θερμικών φορτίων για θέρμανση νερού χρήσης μπορεί να γίνει με τη βοήθεια υπολογιστικών λογισμικών και προσομοιώσεων που θα λαμβάνουν υπόψη μεγάλο αριθμό μεταβλητών (όπως αριθμός ατόμων, ηλικία, μέγεθος δεξαμενής, εποχή έτους κ.λπ.). Μ' αυτό τον τρόπο μπορεί να γίνει η λεπτομερής εκτίμηση των θερμικών φορτίων ανά ώρα, μέρα, μήνα και έτος¹³⁷. Εδώ θα παρουσιαστεί (με συντομία) ένας απλός τρόπος υπολογισμού του θερμικού φορτίου.

Το θερμικό φορτίο (ανά μονάδα χρόνου) $\dot{L}$ που πρέπει να καλυφθεί από ένα σύστημα θέρμανσης νερού χρήσης αποτελείται από τρεις όρους.

Ο *πρώτος* $\dot{L}_w$ αφορά στο θερμικό φορτίο που χρειάζεται για τη θέρμανση του νερού από μια θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται αρχικά T_s [supply temperature] σε μια θερμοκρασία T_d [delivery temperature] στην οποία το νερό μεταφέρεται στο χρήστη. Αν $\dot{m}$ είναι ο ρυθμός με τον οποίο κυκλοφορεί το νερό στο δίκτυο του ηλιακού συλλέκτη, τότε θα είναι:

$$\dot{L}_w = \dot{m} C_p (T_d - T_s) \quad (3.13)$$

όπου C_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού.

Ο *δεύτερος όρος* $\dot{L}_t$ αφορά στις απώλειες θερμότητας που πρέπει να καλυφθούν από τη δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας. Αν T_t [tank temperature] είναι η θερμοκρασία του νερού στη δεξαμενή και T_a [ambient temperature] η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, τότε θα ισχύει:

$$\dot{L}_t = (UA)_t (T_t - T_a) \quad (3.14)$$

όπου $(UA)_t$ είναι ο συντελεστής θερμικών απωλειών της δεξαμενής θερμότητας.

Ο *τρίτος όρος* $\dot{L}_p$ αφορά στις απώλειες θερμότητας που οφείλονται στην κυκλοφορία του νερού στο δίκτυο σωληνώσεων μεταφοράς. Ο υπολογισμός των απωλειών αυτών εξαρτάται από το μήκος των σωληνώσεων και από ένα συντελεστή θερμικών απωλειών των συγκεκριμένων σωληνώσεων.

Προφανώς θα ισχύει ότι το συνολικό θερμικό φορτίο (ανά μονάδα χρόνου) $\dot{L}$ θα είναι το άθροισμα των τριών όρων, δηλαδή

$$\dot{L} = \dot{L}_w + \dot{L}_t + \dot{L}_p \quad (3.15)$$

¹³⁷ Για περισσότερα βλ. Duffie & Beckman, 2006, σελ. 414-415. Αναλυτικότερα για παρουσίαση μεθόδων υπολογισμού φορτίων, καθώς και προσομοιώσεων ή σχεδιασμό συστημάτων Duffie & Beckman, 2006, Ch. 10, 19, 20, 21.

β) Σχεδιασμός και μοντελοποίηση σε ηλιακά θερμικά συστήματα – η μέθοδος «f-chart» [f-chart method]

Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η μηνιαία και η ετήσια απόδοση ενεργητικών συστημάτων θέρμανσης σε κάποιο κτίριο ή διαφορετικά το ποσοστό του συνολικού θερμικού φορτίου που μπορεί να καλύψει το συγκεκριμένο σύστημα θέρμανσης. Η μέθοδος εφαρμόζεται βασικά σε χώρους κατοικιών και αφορά σε θερμικά φορτία θέρμανσης χώρων και θέρμανσης νερού χρήσης.

Η βασική παράμετρος στη μέθοδο είναι η επιφάνεια των συλλεκτών. Δευτερεύουσες παράμετροι είναι ο τύπος του συλλέκτη, η χωρητικότητα της αποθήκης θερμικής ενέργειας, ο ρυθμός ροής μάζας και το μέγεθος των εναλλακτών που χρησιμοποιούνται στις πλευρές του συλλέκτη και του φορτίου. Βασική προϋπόθεση είναι ότι η ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται η μεταφορά της θερμικής ενέργειας είναι 20°C.

Η μέθοδος έχει αναπτυχθεί για τρεις (3) τύπους συστημάτων εφαρμογών: Συστήματα θέρμανσης χώρων (και νερού χρήσης) με υγρό ή αέριο θερμικό ρευστό και συστήματα μόνο για θέρμανση νερού χρήσης.

Ας υποθεθεί ότι το συνολικό θερμικό φορτίο του κτιρίου είναι L , το φορτίο που μπορεί να καλύψει η βοηθητική [auxiliary] πηγή ενέργειας¹³⁸ είναι L_{aux} , ενώ η ενέργεια που μπορεί να δώσει το ηλιακό θερμικό σύστημα είναι Q_s [solar]. Προφανώς ισχύει ότι:

$$L = L_{aux} + Q_s \quad (3.16)$$

Για ένα συγκεκριμένο μήνα i το ποσοστό f του συνολικού θερμικού φορτίου L_i που μπορεί να καλύψει το σύστημα θα είναι:

$$f = Q_{s,i} / L_i = L_i - L_{aux,i} / L_i \quad (3.17)$$

Με τη μέθοδο f-chart μπορεί να υπολογιστεί η ποσότητα f ως συνάρτηση δύο αδιάστατων παραμέτρων X και Y . Η παράμετρος X αντιστοιχεί στο κλάσμα των απωλειών του συλλέκτη προς το ολικό θερμικό φορτίο L_i , ενώ η παράμετρος Y αντιστοιχεί στο κλάσμα της συνολικής ηλιακής ενέργειας που απορροφάται από την επιφάνεια των συλλεκτών σε μηνιαία βάση προς το ολικό θερμικό φορτίο L_i .

¹³⁸ Χρειάζεται να είναι μια πηγή που δεν εξαρτάται από τις μετεωρολογικές συνθήκες (δεν είναι δηλαδή στοχαστική). Συνεπώς, μπορεί να είναι μια πηγή συμβατικού καυσίμου (πετρέλαιο, φυσικό αέριο κ.λπ.) ή μια πηγή ΑΠΕ, όπως, π.χ., βιομάζα.

Για τα συστήματα θέρμανσης χώρων (και νερού χρήσης) με υγρό θερμοαγωγό ρευστό το f δίνεται από την παρακάτω σχέση (ή από το διάγραμμα του Σχήματος 3.19)¹³⁹:

$$f = 1,029 \cdot Y - 0,065 \cdot X - 0,245 \cdot Y^2 - 0,0018 \cdot X^2 + 0,0215 \cdot Y^3 \quad (3.18)$$

με $0 < X < 18$, και $0 < Y < 3$.

Οι παράμετροι X και Y μπορούν να υπολογιστούν από τις παρακάτω σχέσεις:

$$X = (A_c/L_i) F_R U_L (F_R' / F_R) (T_{ref} - T_a) \Delta t K_1 K_2$$

$$Y = (A_c/L_i) F_R (\tau_a)_n (F_R' / F_R) [\tau_a / (\tau_a)_n] \overline{H_{\beta}} K_3$$

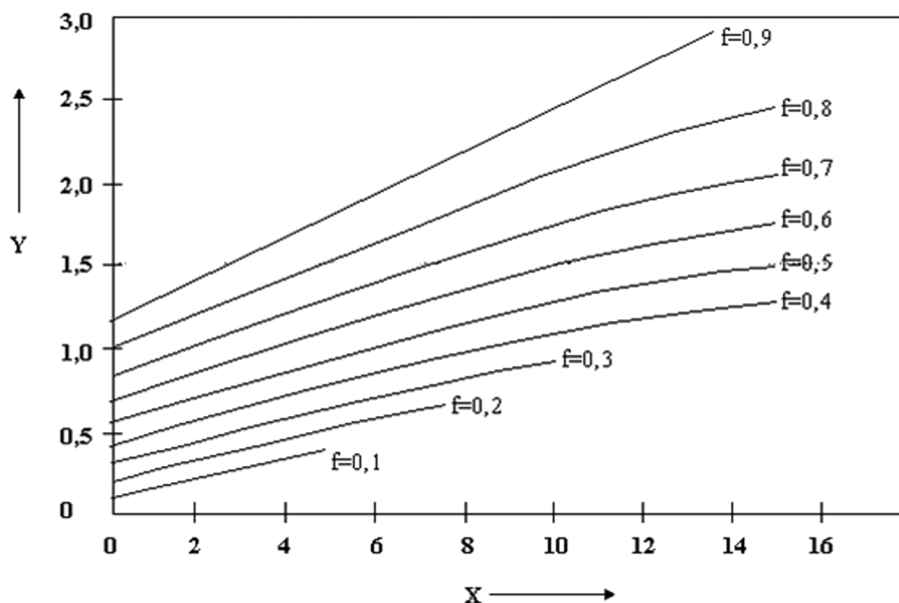
όπου A_c : η επιφάνεια των συλλεκτών, L_i : το μηνιαίο θερμικό φορτίο, $F_R U_L$ και $F_R (\tau_a)_n$: χαρακτηριστικά μεγέθη του συλλέκτη, F_R' / F_R : διορθωτικός παράγοντας συλλέκτη-εναλλάκτη, $[\tau_a / (\tau_a)_n]$: διορθωτικός παράγοντας για το συλλέκτη, T_a : μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος, T_{ref} : θερμοκρασία αναφοράς, $\overline{H_{\beta}}$: μέση μηνιαία πυκνότητα ροής ηλιακής ενέργειας στο επίπεδο του συλλέκτη (συνήθως σε MJ/m²). Τα K_1 , K_2 , K_3 είναι διορθωτικοί παράγοντες που πρέπει να συμπεριληφθούν όταν ορισμένα χαρακτηριστικά του ηλιακού θερμικού συστήματος είναι διαφορετικά από αυτά που προβλέπονται στην πρωτότυπη μελέτη του Klein¹⁴⁰.

Οι τιμές των παραμέτρων X , Y (όπως φαίνεται και από τις παραπάνω σχέσεις) εξαρτώνται από τα συγκεκριμένα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά (επιφάνεια των συλλεκτών, χωρητικότητα της δεξαμενής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, ρυθμός ροής θερμικού ρευστού, μέγεθος εναλλακτών κ.λπ.). Για διάφορες τιμές των X , Y (μέσα στα όρια που προβλέπονται) μπορούν να δημιουργηθούν διαγράμματα [charts]¹⁴¹ από όπου μπορεί να βρεθεί η τιμή του f χωρίς τον υπολογισμό από την παραπάνω εξίσωση.

¹³⁹ Για αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου βλ. το παρακάτω άρθρο όπου πρωτοπαρουσιάστηκε η f-chart method, S. A. Klein, W. A. Beckman and J. A. Duffie, 1976, *A Design Procedure For Solar Heating Systems*, Solar Energy, Vol 18, σελ. 113-127, Pergamon Press.

¹⁴⁰ S. A. Klein, W. A. Beckman and J. A. Duffie, 1976, *A Design Procedure For Solar Heating Systems*, Solar Energy, Vol 18, σελ. 113-127, Pergamon Press.

¹⁴¹ Για αυτό και το όνομα της μεθόδου είναι f-chart.



Σχήμα 3.19 Οι καμπύλες f σε συνάρτηση με τις παραμέτρους X και Y για σύστημα με υγρό θερμοαπαγωγό ρευστό.

Για τα συστήματα θέρμανσης χώρων (και νερού χρήσης) με αέριο θερμικό ρευστό το f δίνεται από την παρακάτω σχέση (ή το αντίστοιχο διάγραμμα του Σχήματος 3.19):

$$f = 1,040 \cdot Y - 0,065 \cdot X - 0,159 \cdot Y^2 - 0,00187 \cdot X^2 + 0,0095 \cdot Y^3 \quad (3.19)$$

με $0 < X < 18$, και $0 < Y < 3$.

Προφανώς η μέση μηνιαία ωφέλιμη ενέργεια (δηλαδή το θερμικό φορτίο που καλύπτεται από τους ηλιακούς συλλέκτες) θα είναι $f \cdot L_i$, ενώ η μέση ετήσια κάλυψη F από τους ηλιακούς συλλέκτες θα δίνεται από τη σχέση

$$F = \frac{\sum f_i L_i}{\sum L_i}$$

όπου $i = 1-12$ (οι μήνες του έτους).

Η μέθοδος f -chart αναπτύχθηκε αρχικά από τους Klein et al, 1976, συσχετίζοντας μεταξύ τους αποτελέσματα μεγάλου αριθμού προσομοιώσεων που έγιναν με



το λογισμικό TRNSYS¹⁴² και αποτέλεσε για χρόνια βασικό σχεδιαστικό εργαλείο για τα ηλιακά θερμικά συστήματα θέρμανσης χώρων και παροχής ζεστού νερού χρήσης (έστω και με τους περιορισμούς που η μέθοδος εμπεριέχει)¹⁴³. Ωστόσο παρά την απλότητα της κεντρικής ιδέας της μεθόδου οι υπολογισμοί που απαιτούνται είναι αρκετά χρονοβόροι. Έτσι, για τη διευκόλυνση των σχεδιαστών έχει αναπτυχθεί το λογισμικό F-Chart, όπου η μέθοδος f-chart εφαρμόζεται πολύ πιο γρήγορα και αποτελεσματικά¹⁴⁴.

¹⁴² <http://www.trnsys.com/>, από τα βασικότερα προγράμματα προσομοιώσεων για ηλιακά θερμικά συστήματα.

¹⁴³ Για το όριο εφαρμογής της μεθόδου και τις αβεβαιότητες που εμπεριέχει βλ. Kalogirou, 2009, σελ. 576-577.

¹⁴⁴ Το πρόγραμμα αναπτύχθηκε από τους ίδιους τους δημιουργούς του TRNSYS, βλ. Kalogirou, 2009, σελ. 577-578.



3.3 Ηλιοθερμικά συστήματα ισχύος [Solar Thermal Power Plants]

3.3.1 Εισαγωγή

Τα ηλιοθερμικά συστήματα ισχύος είναι συστήματα *συγκέντρωσης* της ηλιακής ισχύος [Concentrating Solar Power technologies – CSP]¹⁴⁵ και αξιοποιούν την *άμεση* ηλιακή ακτινοβολία [beam radiation or Direct Normal Irradiation – DNI] για αυτό και οι εγκαταστάσεις πρέπει να τοποθετούνται σε περιοχές (π.χ., έρημοι) με *μεγάλη ηλιοφάνεια* και *υψηλές τιμές άμεσης ακτινοβολίας* της τάξεως των 2.000 kWh/m²/y (τουλάχιστον), ενώ είναι προτιμότερο η ετήσια ηλιακή ακτινοβολία να είναι περισσότερη από 2.800 kWh/m²/y¹⁴⁶.

Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται μέσω απλής διαδικασίας (όσον αφορά την περιγραφή της). Η (άμεση) ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται μέσω συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών σε συγκεκριμένα σημεία, όπου μετατρέπεται σε θερμότητα ανεβάζοντας σε υψηλά επίπεδα τη θερμοκρασία ενός υλικού (υγρού ή στερεού). Στη συνέχεια αυτή η θερμότητα μεταφέρεται (μέσω θερμικού ρευστού) και χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση της λειτουργίας θερμοδυναμικού κύκλου κλασικού θερμοηλεκτρικού ατμοστροβίλου¹⁴⁷. Η θερμότητα που συγκεντρώνεται στη διάρκεια της ημέρας μπορεί επίσης να *αποθηκευτεί* σε δεξαμενή θερμότητας στερεών ή υγρών υλικών (άλατα, κεραμικά κ.λπ.), έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί τις ώρες που δεν υπάρχει Ήλιος (βράδυ) για τη συνέχιση της λειτουργίας των ηλεκτρικών γεννητριών.

Οι ηλιοθερμικές μονάδες που είναι σχεδιασμένες χωρίς συστήματα αποθήκευσης της ενέργειας χρησιμοποιούνται σήμερα (Καλιφόρνια-ΗΠΑ, Ανδαλουσία-Ισπανία) για την κάλυψη των αιχμών του ηλεκτρικού φορτίου σε μεσημεριανές ώρες (καλοκαίρι κυρίως), όταν αυξάνονται οι ανάγκες για ηλεκτρική ενέργεια εξαιτίας των συστημάτων κλιματισμού. Σε περίπτωση που απαιτείται διαθέσιμη ηλεκτρική ενέργεια για περισσότερες ώρες (και το βράδυ) οι μονάδες μπορούν να έχουν συστήματα υποστήριξης [back-up] από συμβατικές πηγές ενέργειας [fossil fuels]. Οι

¹⁴⁵ Τα ηλιοθερμικά συστήματα ισχύος δεν πρέπει να συγχέονται με τα κλασικά συστήματα θέρμανσης ζεστού νερού (ηλιακοί θερμοσίφωνες) ή τα φωτοβολταϊκά συστήματα, που μετατρέπουν απευθείας την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική.

¹⁴⁶ H. Müller-Steinhagen, Franz Trieb, *Concentrating solar power A review of the technology*, Royal Academy of Engineering, ingenia_18_Feb_March_2004, http://www.trec-uk.org.uk/resources/ingenia_18_Feb_March_2004.pdf (10/3/2012).

¹⁴⁷ ή μηχανής Stirling στην περίπτωση του παραβολικού πιάτου εστιακού σημείου.

ηλιοθερμικοί σταθμοί ισχύος (παραβολικών κατόπτρων εστιακής γραμμής) AndaSol 1-50MWe και AndaSol 2-50MWe που άρχισαν τη λειτουργία τους το 2009 στη νότια Ισπανία διαθέτουν συστήματα αποθήκευσης της θερμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας και χρησιμοποίησής της όταν ο Ήλιος δεν είναι διαθέσιμος (μπορούν να διαθέσουν ενέργεια στο δίκτυο μέχρι και 7,5 h μετά τη δύση του Ήλιου τους καλοκαιρινούς μήνες)¹⁴⁸. Επίσης σχεδιάζονται και ηλιοθερμικά συστήματα ισχύος τύπου Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας [Comprined Heat and Power – CHP], που αξιοποιούν και τη δευτερογενή θερμότητα που παράγεται κατά τη λειτουργία όλου του κύκλου της θερμοηλεκτρικής εγκατάστασης για βιομηχανικές εφαρμογές ή για αφαλάτωση θαλάσσιου νερού¹⁴⁹.

3.3.2 Βασικές αρχές

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η αρχή λειτουργίας των ηλιοθερμικών συστημάτων ισχύος είναι η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμότητα¹⁵⁰ και στη συνέχεια η μεταφορά της θερμότητας μέσω θερμικού ρευστού στη μονάδα παραγωγής ηλεκτρισμού όπου αρχικά μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια (μέσω θερμικής μηχανής) και τελικά σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω γεννήτριας. Για να επιτευχθεί το μέγιστο αποτέλεσμα (μέγιστη αποδοτικότητα) χρειάζεται, σύμφωνα με το 2^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα, να αναπτυχθεί η μέγιστη θερμοκρασία στο θερμικό ρευστό που μεταφέρει τη θερμότητα. Για να γίνει αυτό είναι απαραίτητη η *συγκέντρωση* της ηλιακής ακτινοβολίας από συγκεντρωτικούς συλλέκτες [concentrating collectors]. Ανάλογα με τον τύπο συγκέντρωσης της ακτινοβολίας μπορεί να γίνει διαχωρισμός σε συστήματα συγκέντρωσης σε *σημείο* [point] ή σε *γραμμή* [line] (βλέπε παρακάτω Είδη Θερμοηλεκτρικών Τεχνολογιών).

Η διαδικασία λειτουργίας των ηλιοθερμικών συστημάτων ισχύος μπορεί να περιγραφεί σχηματικά με τα παρακάτω στάδια:

- Συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας από το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών
- Απορρόφηση της ενέργειας και μετατροπή της σε θερμότητα
- Μεταφορά της θερμότητας με ένα θερμικό ρευστό

¹⁴⁸ <http://www.solarmillennium.de/upload/Download/Technologie/eng/Andasol1-3engl.pdf> (10/3/2011).

¹⁴⁹ H. Müller-Steinhagen, Franz Trieb, Concentrating solar power A review of the technology, Royal Academy of Engineering, ingenia_18_Feb_March_2004, http://www.trec-uk.org.uk/resources/ingenia_18_Feb_March_2004.pdf (10/3/2012).

¹⁵⁰ Αυτή πραγματοποιείται στο ηλιακό πεδίο [solar field] όπου είναι εγκατεστημένοι οι συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες.

- Μετατροπή της θερμότητας σε μηχανική ενέργεια
- Μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική

Η *συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας* ποσοτικοποιείται από το δείκτη συγκέντρωσης ακτινοβολίας [concentration ratio C]¹⁵¹. Για να μεγιστοποιηθεί ο δείκτης αυτός σημαντικό ρόλο παίζει η *γεωμετρία* τόσο των ηλιακών συλλεκτών όσο και της συνολικής εγκατάστασης συγκέντρωσης της ακτινοβολίας. Το καταλληλότερο σχήμα των συλλεκτών είναι το *παραβολικό* (στις περιπτώσεις των συστημάτων παραβολικών κατόπτρων εστιακής γραμμής και των παραβολικών πιάτων εστιακού σημείου) και η γεωμετρία όλης της εγκατάστασης απορρόφησης είναι παραβολικού σχήματος (στην περίπτωση της τεχνολογίας ηλιακού πύργου).

Επίσης τα συστήματα εφοδιάζονται με συσκευές παρακολούθησης της πορείας του Ήλιου – ηλιακοί ιχνηλάτες [trackers]¹⁵² –, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η απόδοση του συστήματος, καθώς οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες εκμεταλλεύονται μόνο την άμεση ηλιακή ακτινοβολία.

Τα *υλικά της απορρόφησης* της ηλιακής ακτινοβολίας επιλέγονται έτσι ώστε να έχουν το μεγαλύτερο συντελεστή απορρόφησης [absorption coefficient a_{abs}] στο υψηλόσυχνο φάσμα (μικρότερου μήκους κύματος [short-wave]) της ηλιακής ακτινοβολίας (που είναι το μεγαλύτερο τμήμα που φτάνει στο έδαφος) και το μικρότερο συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας [emission coefficient].

Το *θερμικό ρευστό μεταφοράς της θερμότητας* προς τη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να έχει κάποιες ιδιότητες που θα το καθιστούν ιδανικό για την εργασία αυτή. Οι κυριότερες είναι να μπορεί να βρεθεί σε αφθονία (γιατί κάτι τέτοιο χαμηλώνει το κόστος), να έχει μεγάλη θερμοχωρητικότητα και να διατηρεί τις ιδιότητές του στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται (ανάλογα με τον τύπο της εγκατάστασης, κυμαίνονται μεταξύ 400°C και 600°C). Μέχρι τώρα τα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί γι' αυτόν το σκοπό είναι θερμικό λάδι [thermal oil] και τηγμένο άλας [molten salt]¹⁵³, αέρας ή ατμός, όμως γίνεται συνεχώς έρευνα για να αξιοποιηθούν και νέα υλικά¹⁵⁴.

¹⁵¹ Ουσιαστικά πρόκειται για το κλάσμα της ακτινοβολίας που συλλέγει ο συλλέκτης προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Μερικές ενδεικτικές τιμές του δείκτη συγκέντρωσης ακτινοβολίας είναι 600-1.000 (για τα συστήματα ηλιακού πύργου), έως 3.000 (για τα συστήματα παραβολικών πιάτων εστιακού σημείου «Stirling»), 50-90 (για τα συστήματα παραβολικών κατόπτρων εστιακής γραμμής) και 25-50 (για τα συστήματα εστιακής γραμμής τύπου Fresnel).

¹⁵² Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες που παρακολουθούν την πορεία του Ήλιου ονομάζονται στη βιβλιογραφία συχνά ηλιοστάτες [heliostats].

¹⁵³ Συνήθως NaNO_3 , CaCO_3 .

¹⁵⁴ Ανάλογα με το είδος της εγκατάστασης στην οποία χρησιμοποιείται, κάθε θερμικό ρευστό μπορεί να έχει

Οι *θερμικές μηχανές* (όπου μεταφέρεται η θερμότητα) από το υλικό μεταφοράς δουλεύουν μέσω θερμοδυναμικού κύκλου¹⁵⁵ (στην πλειοψηφία των περιπτώσεων αυτών των Clausius-Rankine) και μετατρέπουν τη θερμότητα σε μηχανική ενέργεια. Στη συνέχεια η μηχανική ενέργεια χρησιμοποιείται για την ηλεκτροπαραγωγή (μέσω ηλεκτρικής γεννήτριας που εκμεταλλεύεται το φαινόμενο της μαγνητικής επαγωγής¹⁵⁶).

3.3.3 Είδη θερμοηλεκτρικών τεχνολογιών

Όλες οι θερμοηλεκτρικές εγκαταστάσεις συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας (συνήθως αποκαλούνται Concentrating Solar Power plants) διέπονται από τις βασικές αρχές λειτουργίας που περιγράφηκαν παραπάνω. Τα τέσσερα βασικά τμήματα από τα οποία αποτελούνται είναι ο *συγκεντρωτής [concentrator]* της ηλιακής ακτινοβολίας, ο *λήπτης ή απορροφητής [receiver or absorber]*, το *μέσο μεταφοράς της θερμότητας [transfer medium]* ή *θερμικό ρευστό*¹⁵⁷ και η *μονάδα μετατροπής ισχύος [power conversion unit]*, όπου η θερμότητα τελικά μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι συστημάτων, οι οποίοι μπορούν να «συνεργαστούν» και με άλλα συστήματα ανανεώσιμων ή συμβατικών τεχνολογιών. Σήμερα (2011) οι βασικοί τύποι συστημάτων είναι οι ακόλουθοι τέσσερις (4).

- Συστήματα παραβολικών κατόπτρων εστιακής γραμμής [parabolic trough-shaped mirror reflectors]
- Συστήματα εστιακής γραμμής τύπου Fresnel [linear Fresnel systems]
- Συστήματα κεντρικού δέκτη εστιακού σημείου ή ηλιακού πύργου [central receiver plants ή solar tower]

διαφορετικά μειονεκτήματα ή πλεονεκτήματα. Για παράδειγμα, κάποιο θερμικό ρευστό μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερη απόδοση στο σύστημα αλλά να απαιτεί τέτοιο σχεδιασμό του συστήματος που ανεβάζει σημαντικά το κόστος κατασκευής και συντήρησης. Κάποιο άλλο θερμικό ρευστό μπορεί να προσφέρει μικρότερη απόδοση, αλλά το κόστος να είναι τόσο χαμηλό που να δικαιολογεί την επιλογή του.

¹⁵⁵ Ο θερμοδυναμικός κύκλος είναι μια θερμοδυναμική διαδικασία που συμβαίνει σε μια θερμική μηχανή και περιλαμβάνει μια σειρά από θερμοδυναμικές μετατροπές που συμβαίνουν στο μέσο που κυκλοφορεί (συνήθως νερό) στη μηχανή και η οποία τελικά καταλήγει στην παραγωγή έργου (μηχανικής ενέργειας).

¹⁵⁶ Το φαινόμενο της μαγνητικής επαγωγής είναι η εμφάνιση ηλεκτρικής τάσης στα άκρα ενός αγωγού όταν μεταβάλλεται η μαγνητική ροή που περνάει από την ενεργή επιφάνειά του. Στην περίπτωση των ηλεκτρικών γεννητριών το απλό σχήμα που περιγράφει τη λειτουργία της είναι το ακόλουθο: Ένα μεταλλικό πλαίσιο (ρότορας) περιστρέφεται μπροστά από ένα σύνολο μαγνητών (στάτορας) και στα άκρα του ρότορα εξαιτίας του φαινομένου της μαγνητικής επαγωγής δημιουργείται ηλεκτρική τάση (ηλεκτρεγερτική «δύναμη» επαγωγής – emf) και συνεπώς ηλεκτρικό ρεύμα.

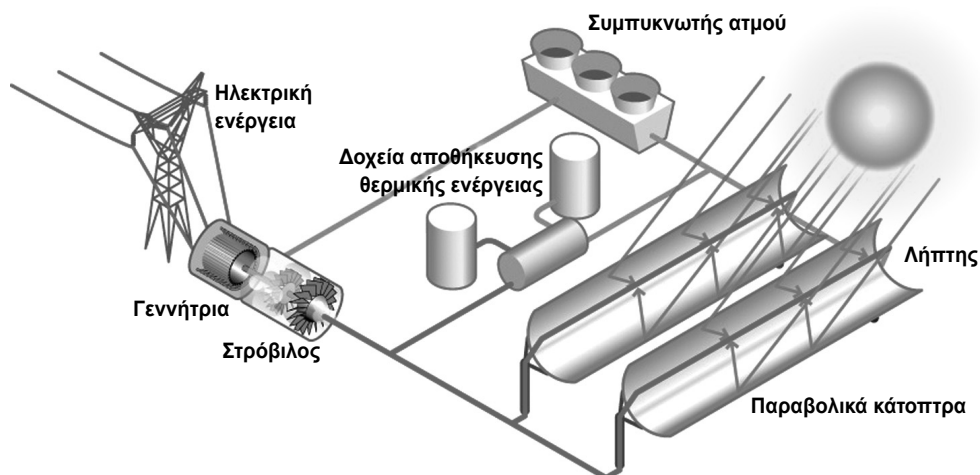
¹⁵⁷ Επίσης μπορεί να συμπεριληφθεί και το μέσο αποθήκευσης [storage medium] της θερμότητας εάν αυτή η δυνατότητα έχει επιλεγεί.

- Παραβολικού πιάτου εστιακού σημείου [parabolic dish ή Dish-Stirling Systems].

Σε όλους τους παραπάνω τύπους συστημάτων μπορεί να γίνει η πρόβλεψη για την υποστήριξη της λειτουργίας τους (τις ώρες που δε θα είναι διαθέσιμη η ηλιακή ακτινοβολία) με κάποιο σύστημα υποστήριξης από συμβατική πηγή (π.χ., φυσικό αέριο) ή ΑΠΕ (π.χ., βιομάζα). Επίσης υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης της θερμότητας σε δεξαμενές με αποθηκευτικό υλικό (π.χ., τηγμένο άλας) που μπορούν να δώσουν αυτονομία στην εγκατάσταση για μερικές ώρες μετά τη δύση του Ήλιου¹⁵⁸.

α) Συστήματα παραβολικών κατόπτρων εστιακής γραμμής [Parabolic trough-shaped mirror reflectors]

Τα συστήματα παραβολικών κατόπτρων εστιακής γραμμής θεωρούνται σήμερα τα πλέον ώριμα συστήματα θερμοηλεκτρικής τεχνολογίας. Αυτά είναι συστήματα εστιακής γραμμής που συγκεντρώνουν την ακτινοβολία και την ανακλούν σε ένα σωλήνα απορρόφησης [absorber pipe] που βρίσκεται στην εστιακή γραμμή των κατόπτρων.



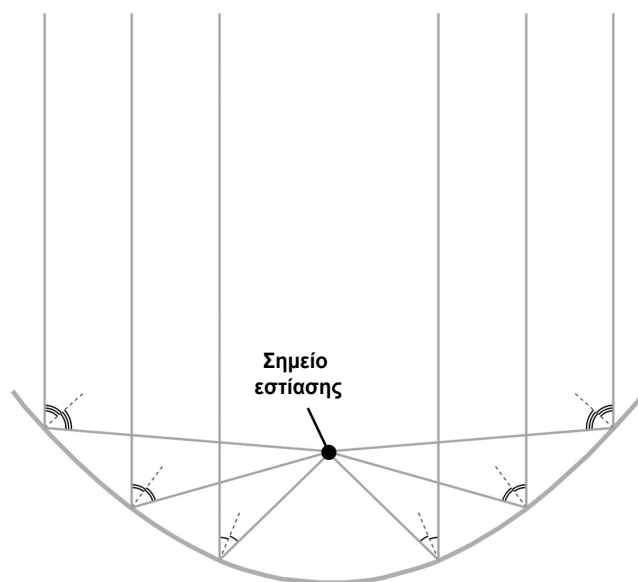
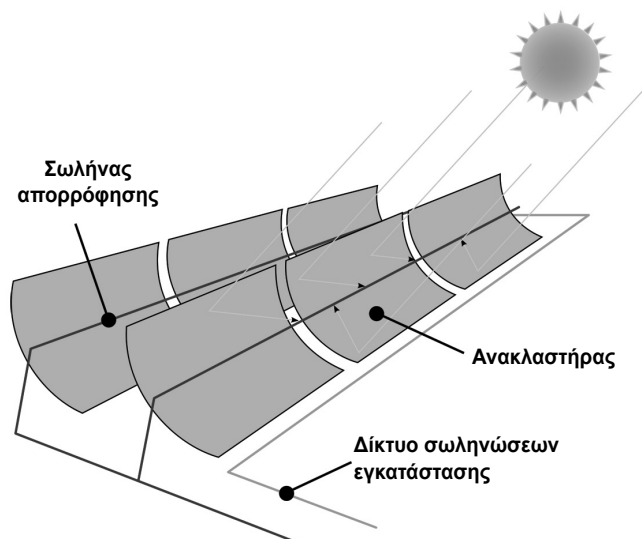
Σχήμα 3.20 Σχηματικό διάγραμμα συστήματος παραβολικών κατόπτρων εστιακής γραμμής. (Πηγή: U.S Department of Energy)

¹⁵⁸ Για τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας μέσω τηγμένου άλατος ο αναγνώστης μπορεί να δει το παράδειγμα του project Solar2 California USA στο Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 188-189.

Επίσης βλ. για τις εγκαταστάσεις Andasol 1-3 στην Ισπανία <http://www.solarmillennium.de/upload/Download/Technologie/eng/Andasol1-3engl.pdf> (12/3/2011).



Ο συγκεντρωτής είναι το κάτοπτρο (σε παραβολικό σχήμα), ενώ ο λήπτης (ή απορροφητής) είναι ο σωλήνας που βρίσκεται στην εστιακή γραμμή.



Σχήμα 3.21 Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει την εστίαση της ηλιακής ακτινοβολίας στο εστιακό σημείο ενός παραβολικού κατόπτρου.
(Πηγή: commons.wikimedia.org)



Τα *κάτοπτρα* (ηλιοστάτες) είναι επενδυμένα στην εσωτερική πλευρά τους με ανακλαστικό υλικό (μεταλλικό φύλλο ή καθρέπτη γυαλιού) ή με σειρά θραυσμάτων γυαλιού που τοποθετούνται έτσι ώστε να παίρνουν το κατάλληλο σχήμα της ποτίστρας-σκάφης [trough]. Τα κάτοπτρα τοποθετούνται σε βάση στήριξης στη διεύθυνση βορράς-νότος και είναι εφοδιασμένα με σύστημα παρακολούθησης του Ήλιου σε μια διάσταση [single axis tracker]. Το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που μπορεί να μεταφερθεί από το κάτοπτρο στο σωλήνα απορρόφησης είναι περίπου 40-70%¹⁵⁹.

Οι *σωλήνες απορρόφησης* [absorbers] κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα και περικλείονται από γυάλινο αερόκενο σωλήνα έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι θερμικές απώλειες. Σε θερμοκρασίες της τάξης των 400°C η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τους σωλήνες σήμερα είναι πάνω από 95%, ενώ ο συντελεστής εκπομπής είναι κάτω από 0,14¹⁶⁰.



Εικόνα 3.3 Σύστημα παραβολικών κατόπτρων εστιακής γραμμής στο Kramer Junction (Καλιφόρνια ΗΠΑ).

(Πηγή: commons.wikimedia.org)

¹⁵⁹ Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 195.

¹⁶⁰ Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 197.



Μέχρι σήμερα το μέσο μεταφοράς θερμότητας που έχει χρησιμοποιηθεί σχεδόν αποκλειστικά είναι το συνθετικό θερμικό λάδι [synthetic thermal oil]. Εξαιτίας της περιορισμένης θερμικής σταθερότητας του λαδιού η μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά είναι 400°C (το μέγιστο). Μια τέτοια θερμοκρασία καθιστά αναγκαία τη συμπίεση του λαδιού σε πίεση περίπου 12-16 bar¹⁶¹. Αυτός είναι και ο λόγος που οι σωλήνες απορρόφησης πρέπει να είναι ανθεκτικοί σε πιέσεις τέτοιας τάξης. Το τελευταίο χρονικό διάστημα έχει προταθεί (και ήδη γίνονται πειραματικές εφαρμογές) σαν εναλλακτική λύση το τηγμένο άλας, το οποίο στοιχίζει λιγότερο, έχει μεγαλύτερη ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας και συνεπώς μεγαλύτερη δύναμη θερμοκρασία εργασίας¹⁶².

Η θερμότητα από το θερμικό ρευστό μεταφέρεται μέσω εναλλακτών στις θερμικές μηχανές που υπάρχουν στη μονάδα ηλεκτρικής ισχύος, όπου γίνεται η μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η συνολική εγκατάσταση μπορεί να υποστηρίζεται από συμβατικές πηγές ενέργειας¹⁶³ σε περίπτωση που χρειάζεται να λειτουργεί κι όταν δεν είναι διαθέσιμη η απαραίτητη (άμεση) ηλιακή ακτινοβολία (τη νύχτα ή σε νεφосκεπείς ημέρες).

Στις νεότερες εγκαταστάσεις (π.χ., Andasol 1,2) έχει προβλεφθεί σύστημα αποθήκευσης της θερμότητας σε δεξαμενές με θερμικό αποθηκευτικό υλικό άλας (28.500 t μείγματος νιτρικών αλάτων, καθώς και αλάτων καλίου και νατρίου) που μπορεί να διαθέσει ενέργεια στο δίκτυο μέχρι και 7,5 h μετά τη δύση του Ήλιου τους καλοκαιρινούς μήνες¹⁶⁴.

Η συνολική απόδοση¹⁶⁵ των συστημάτων παραβολικών κατόπτρων εστιακής γραμμής είναι για τους καλοκαιρινούς μήνες (που έχουν τη μέγιστη απόδοση) περίπου 21%¹⁶⁶. Οι μονάδες Andasol 1,2 (50 mW η καθεμία) που λειτουργούν από το

¹⁶¹ Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 198.

¹⁶² Κάτι που αυξάνει την απόδοση της εγκατάστασης. Για περισσότερα βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 198.

¹⁶³ Για παράδειγμα, σε ορισμένες από τις 9 μονάδες (με την ονομασία Solar Energy Generating Systems / SEGS) που έχουν δημιουργηθεί στην έρημο Mojave της Καλιφόρνια των ΗΠΑ χρησιμοποιείται ως συμβατικό καύσιμο το φυσικό αέριο (http://www.nrel.gov/csp/troughnet/power_plant_data.html). Περισσότερα για το project SEGS (που ήταν το πρώτο σε τόσο μεγάλη κλίμακα παγκοσμίως μπορείτε να δείτε στο 3rd joint report from Greenpeace International, the European Solar Thermal Electricity Association (ESTELA) and IEA SolarPACES since 2003, <http://www.greenpeace.org/international/en/publications/reports/concentrating-solar-power-2009/>, http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_Energy_Generating_Systems κ.λπ.

¹⁶⁴ <http://www.solarmillennium.de/upload/Download/Technologie/eng/Andasol1-3engl.pdf> (3/5/2012).

¹⁶⁵ Μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια δικτύου.

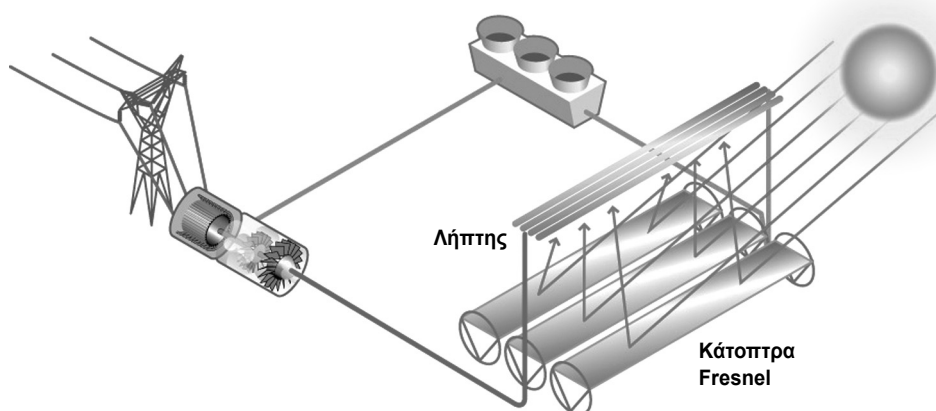
¹⁶⁶ ESTIA, 2005, *Concentrating solar thermal power-now*, http://www.solarpaces.org/Library/CSP_Documents/Concentrated-Solar-Thermal-Power-Plants-2005.pdf (10/3/2012).



2009 στη νότια Ισπανία έχουν μέγιστη απόδοση ~28%, ενώ μέση ετήσια απόδοση ~15%¹⁶⁷.

β) Συστήματα εστιακής γραμμής τύπου Fresnel [Linear Fresnel Reflectors/LFR]

Αυτά τα συστήματα είναι παρόμοια με τα συστήματα παραβολικών κατόπτρων εστιακής γραμμής [trough reflectors], δηλαδή ανακλούν και συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε μια γραμμή (την εστιακή γραμμή). Η βασική διαφορά τους είναι ότι οι ηλιακοί συγκεντρωτικοί συλλέκτες δεν είναι παραβολικού σχήματος αλλά *επίπεδα κάτοπτρα* που παρακολουθούν την πορεία του Ήλιου (ηλιοστάτες). Όλοι οι συλλέκτες (κάτοπτρα) τοποθετούνται στο ίδιο επίπεδο και αρχικά συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα γραμμικό δέκτη [linear receiver]¹⁶⁸. Από το δέκτη η ακτινοβολία ανακλάται σε ένα σωλήνα που βρίσκεται (στην εστιακή γραμμή) σε ύψος περίπου 1,2 m πάνω από το έδαφος. Το θερμικό ρευστό που κυκλοφορεί στο σωλήνα (σε θερμοκρασία ~270°C και πίεση 55 bar¹⁶⁹) είναι ο κορεσμένος ατμός. Ο ατμός μεταφέρει την θερμότητα στη μονάδα παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συνεπάγεται ότι δεν υπάρχουν εναλλάκτες θερμότητας



Σχήμα 3.22 Σχηματικό διάγραμμα συστήματος εστιακής γραμμής τύπου Fresnel.
(Πηγή: U.S Department of Energy)

¹⁶⁷ Έκθεση της γερμανικής εταιρείας κατασκευής «solarmillennium» <http://www.solarmillennium.de/upload/Download/Technologie/eng/Andasol1-3engl.pdf> (10/1/11).

¹⁶⁸ Ύψους 7,40 m. Οι τιμές αυτές εξαρτώνται από τη συγκεκριμένη εγκατάσταση.

¹⁶⁹ Οι συγκεκριμένες τιμές αφορούν το σταθμό PE 1 Novatec Fresnel Plant 1,4 MW που λειτουργεί στην Ισπανία http://www.novatec-biosol.com/files/mne0911_pe_1_borschure_eng.pdf (23/5/2011).



πριν τις θερμικές μηχανές¹⁷⁰, με συνέπεια την αύξηση της απόδοσης της εγκατάστασης.

Κάθε κάτοπτρο μπορεί να περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του και τα κάτοπτρα μπορούν να προσανατολίζονται είτε ξεχωριστά είτε ομαδικά. Συνεπώς, αυτά τα συστήματα χρειάζονται πιο εξελιγμένο σύστημα ελέγχου συγκρινόμενα με τα παραβολικά κάτοπτρα [trough reflectors]. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος¹⁷¹ που μέχρι το 2008 αναπτύχθηκαν εγκαταστάσεις μόνο σε πειραματική κλίμακα και υπήρχε ουσιαστικά μόνο μια μεγάλη εγκατάσταση 1 MW στο Liddell, στην Αυστραλία, που λειτουργούσε από το 2003¹⁷². Από το 2009 λειτουργεί στην Ισπανία (PE 1 Novatec Fresnel Plant) μονάδα 1,4 MW που είναι συνδεδεμένη στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο¹⁷³, ενώ στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ από τον Οκτώβριο του 2008 λειτουργεί μονάδα 5 MW¹⁷⁴. Άλλες μεγαλύτερης ισχύος μονάδες είναι ήδη προγραμματισμένες να κατασκευαστούν τα αμέσως επόμενα χρόνια.

Συγκρινόμενα με τα συστήματα παραβολικών κατόπτρων εστιακής γραμμής τα συστήματα τύπου Fresnel χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες τιμές συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας και χαμηλότερη οπτική απόδοση. Όμως οι υποστηρικτές τους πιστεύουν ότι πρόκειται για τεχνολογία που μπορεί να ανταγωνιστεί τις άλλες τεχνολογίες και ιδιαίτερα τα συστήματα παραβολικών κατόπτρων σε επίπεδο κόστους και ηπιότερων περιβαλλοντικών επιπτώσεων¹⁷⁵. Βέβαια ακόμα αυτά τα συστήματα (σε αντίθεση με τα συστήματα παραβολικών κατόπτρων) δεν έχουν αποδείξει τη δυνατότητά τους να παράγουν ενέργεια σε μεγάλη κλίμακα σε ανταγωνιστικές τιμές κόστους, καθώς και την αξιοπιστία της λειτουργίας τους¹⁷⁶.

¹⁷⁰ Σε περίπτωση που το θερμικό ρευστό δεν είναι ο ατμός αλλά κάποιο άλλο υλικό (όπως συμβαίνει σε άλλες εγκαταστάσεις θερμικής ηλιακής ισχύος), τότε για να μεταφερθεί η ενέργεια (θερμότητα) από το θερμικό ρευστό στον ατμό (με τον οποίο λειτουργούν συνήθως οι θερμικές μηχανές) είναι αναγκαία η παρουσία εναλλακτών.

¹⁷¹ Σύμφωνα με Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 197.

¹⁷² Βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 197 και Lovegrove K., Dennis M., 2006, Solar thermal energy systems in Australia, *International Journal of Environmental Studies* Vol. 63, No. 6, σελ. 791-802.

¹⁷³ <http://www.greenpeace.org/international/en/publications/reports/concentrating-solar-power-2009/p30> (3/5/2011) και http://www.novatec-biosol.com/files/mne0911_pe_1_borschure_eng.pdf (13/5/2011).

¹⁷⁴ Για περισσότερα βλ. http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=37?print και <http://www.solaripedia.com/files/244.pdf> (14/5/2011).

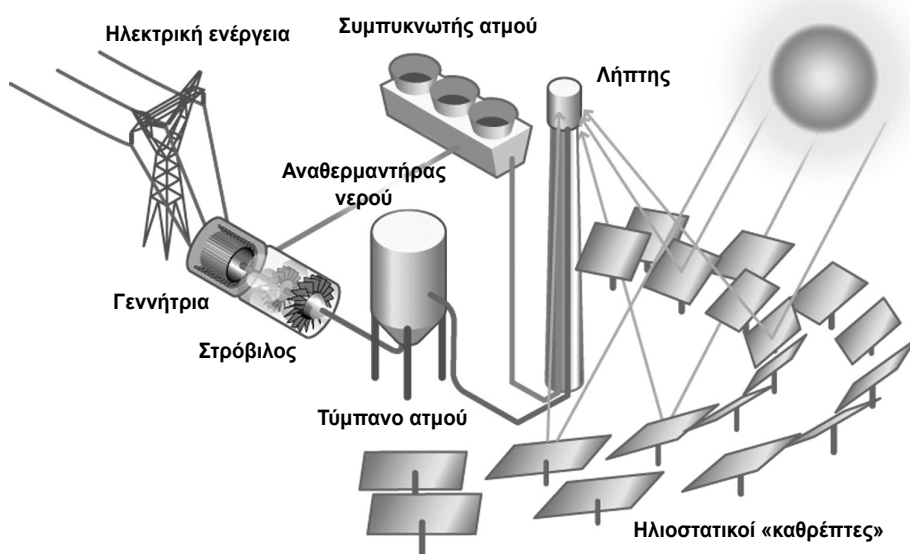
¹⁷⁵ http://www.novatec-biosol.com/index.php?article_id=43&clang=1 (17/01/11). Οι ηπιότερες περιβαλλοντικές συνέπειες περιλαμβάνουν μικρότερη έκταση Γης που καταλαμβάνει το «ηλιακό πεδίο» των συλλεκτών, τις μικρότερες απαιτήσεις σε νερό (για ψύξη και καθαρισμό των κατόπτρων) και μικρότερη «οπτική ρύπανση», καθώς το μεγαλύτερο τμήμα της κατασκευής βρίσκεται σε ύψος περίπου 1,2 m πάνω από το έδαφος.

¹⁷⁶ Για μια συγκεντρωτική παρουσίαση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων των τεσσάρων (4) βασικών τεχνολογιών, βλ. <http://www.greenpeace.org/international/en/publications/reports/concentrating-solar-power-2009/> (20/01/2011).



γ) Συστήματα κεντρικού δέκτη εστιακού σημείου ή ηλιακού πύργου [Central Receiver Plants or Solar Tower]

Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν ως συγκεντρωτές της ηλιακής ακτινοβολίας σύστημα μεγάλων, σχεδόν επίπεδων, ηλιοστατικών καθρεπτών (με επιφάνεια μεγαλύτερη από 100 m²). Οι καθρέπτες [mirrors] τοποθετούνται σε παραβολική διάταξη και παρακολουθούν την τροχιά του Ήλιου με σύστημα tracking δύο αξόνων. Η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται στην κορυφή πύργου στην οποία βρίσκεται ο λήπτης (ή απορροφητής). Εκεί η συγκεντρωμένη (κατά 600-1.000 φορές) ακτινοβολία ανεβάζει τη θερμοκρασία του μέσου που απορροφά τη θερμότητα έως 800°C ακόμα και 1.000°C¹⁷⁷. Στη συνέχεια η θερμότητα μεταφέρεται σε μια θερμική μηχανή (που συνήθως έχει ως θερμικό μέσο λειτουργίας τον ατμό), όπου παράγεται ηλεκτρική ενέργεια.



Σχήμα 3.23 Σχηματικό διάγραμμα συστήματος κεντρικού δέκτη εστιακού σημείου ή ηλιακού πύργου.

(Πηγή: U.S Department of Energy)

Στις δεκαετίες του 1980 και του 1990 λειτούργησαν στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ αρκετές δοκιμαστικές-πειραματικές εγκαταστάσεις¹⁷⁸. Ο πρώτος εμπορικός σταθ-

¹⁷⁷ <http://www.greenpeace.org/international/en/publications/reports/concentrating-solar-power-2009> (22/1/2011).

¹⁷⁸ Για περισσότερα βλ. <http://www.greenpeace.org/international/en/publications/reports/concentrating-solar-power-2009> (22/1/2011).



μός αυτού του τύπου που λειτούργησε το 2007 είναι αυτός στην Abergoa στη Σεβίλλη (Ισπανία, Ανδαλουσία) με ονομαστική ισχύ 11 MW, ο οποίος χρησιμοποιεί ως θερμικό ρευστό μεταφοράς της θερμότητας τον κορεσμένο ατμό¹⁷⁹.

Ένας δεύτερος σταθμός (20 MW) άρχισε τη λειτουργία του τον Απρίλιο του 2009¹⁸⁰.



Εικόνα 3.4 Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί ισχύος ηλιακού πύργου PS20 και PS10 (Ανδαλουσία, Ισπανία). (Πηγή: commons.wikimedia.org)

¹⁷⁹ Η επιφάνεια που καταλαμβάνει ολόκληρη η εγκατάσταση είναι (σύμφωνα με στοιχεία της εταιρείας) 150 acres = 60 ha = 0.61 Km² = 610.000 m². Οι 624 ηλιοστατικοί καθρέπτες (κάτοπτρα) έχουν ο καθένας επιφάνεια 120 m² και καταλαμβάνουν συνολικά έκταση 18.5 acres = 75.000 m². Ο πύργος έχει ύψος 115 m και στην κορυφή του βρίσκεται ο λήπτης [receiver]. Ο λήπτης μετατρέπει το 92% της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται σε θερμική ενέργεια και ανυψώνει τη θερμοκρασία του θερμικού ρευστού μεταφοράς σε περίπου 250°C. Το θερμικό ρευστό μεταφοράς είναι ο κορεσμένος ατμός. Η εγκατάσταση έχει σύστημα αποθήκευσης που μπορεί να δώσει ενέργεια για ~1 h στο 70% του φορτίου. Επίσης σε συνθήκες ασθενούς ηλιακής ακτινοβολίας διαθέτει σύστημα υποστήριξης [backup] με φυσικό αέριο και μπορεί να λειτουργήσει στο 12-15% της ισχύος του. Η συνολική ενέργεια που παράγει σε ετήσια βάση είναι 24,3 GWh η οποία ισοδυναμεί με την ενεργειακή κατανάλωση 5.500 σπιτιών και συνεπάγεται την αποφυγή εκπομπής 6.700 τόνων CO₂. Δύο από τα βασικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει στην ομαλή λειτουργία του ο σταθμός είναι η καθαριότητα της επιφάνειας των «κατόπτρων» και η ταχύτητα των ανέμων, που, αν υπερβεί κάποιο όριο, εμποδίζει τη λειτουργία της εγκατάστασης. Περισσότερα ο αναγνώστης μπορεί να βρει στο <http://www.abengoasolar.com/corp/export/sites/solar/resources/pdf/en/PS10.pdf/> (10/01/2011).

¹⁸⁰ Ο σταθμός αυτός είναι παρόμοιος με τον πρώτο και διαθέτει 1.255 ηλιοστατικούς καθρέπτες-κάτοπτρα, ενώ ο πύργος του έχει ύψος περίπου 165 m.



Ήδη σήμερα σχεδιάζονται και λειτουργούν ηλιοθερμικά συστήματα ηλιακού πύργου με δυνατότητα αποθήκευσης της θερμότητας μέσω τηγμένου άλατος¹⁸¹.

δ) Συστήματα παραβολικού πιάτου εστιακού σημείου [Parabolic Dish or Dish-Stirling Systems]

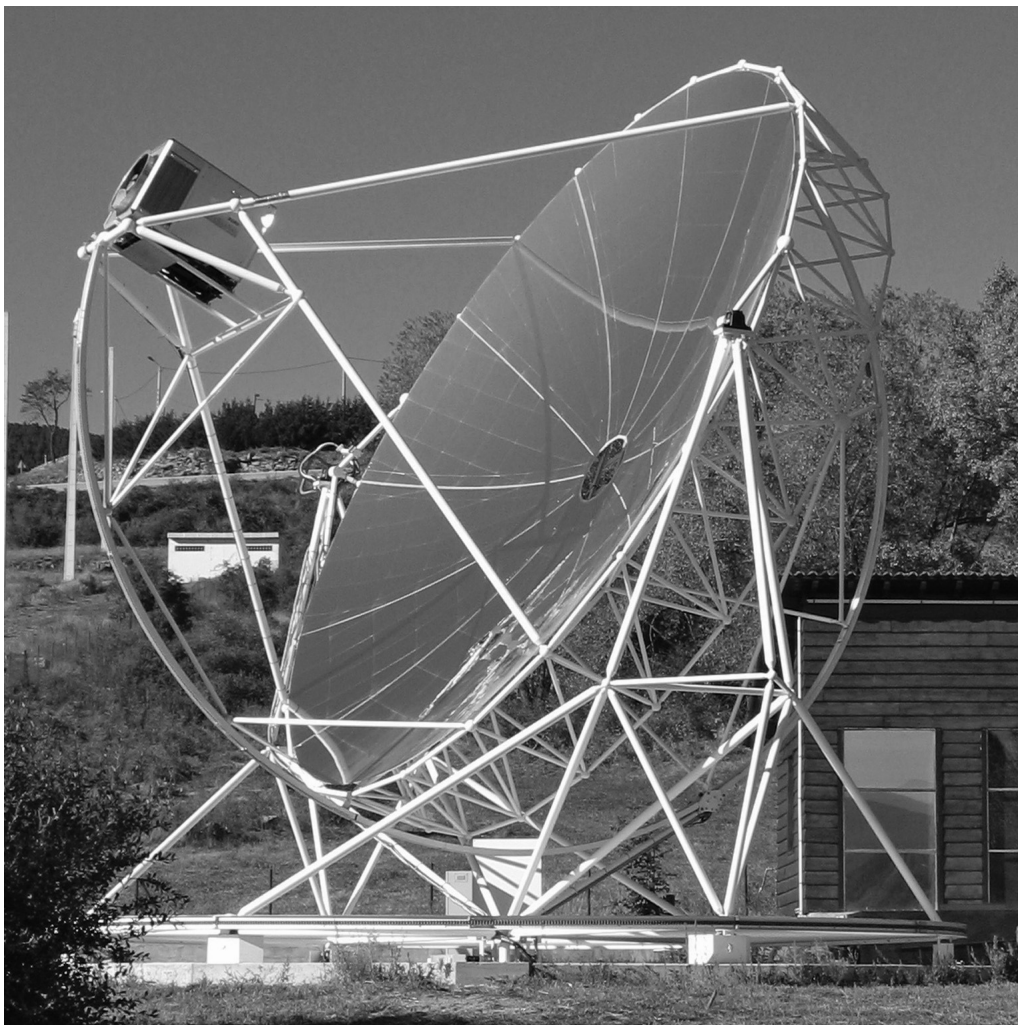
Αυτά τα συστήματα αποτελούνται από *παραβολικό κάτοπτρο* (*συγκεντρωτής-concentrator*), *δέκτη* [*receiver*] που είναι τοποθετημένος στην εστία του κατόπτρου και *θερμική μηχανή Stirling*¹⁸² που έχει ενσωματωμένη και την ηλεκτρογεννήτρια. Η μέγιστη ακτίνα του παραβολικού κατόπτρου είναι συνήθως 25 m. Η εσωτερική επιφάνεια του κατόπτρου μπορεί να έχει κατασκευαστεί ώστε το υλικό που ανακλά και συγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία να δημιουργεί μια ενιαία παραβολική επιφάνεια. Μπορεί όμως η επιφάνεια να είναι κατακερματισμένη από ξεχωριστά κάτοπτρα, τα οποία να μπορούν να στρέφονται και ανεξάρτητα μεταξύ τους. Το κάτοπτρο είναι εφοδιασμένο με ιχνηλάτη [*tracker*] δύο αξόνων που παρακολουθεί την πορεία του Ήλιου και συγκεντρώνει την ενέργεια στο δέκτη. Στο δέκτη η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία στη συνέχεια μεταφέρεται μέσω του θερμικού ρευστού στη θερμική μηχανή (συνήθως Stirling) και ακολούθως μέσω της γεννήτριας παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα.

Στο δέκτη εμφανίζονται οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες του συστήματος (μεταξύ 600°C και 800°C). Υπάρχουν διαφορετικοί σχεδιασμοί δεκτών, ανάμεσά τους και αυτοί του δέκτη τύπου σωλήνα [*tube receiver*] και του δέκτη τύπου θερμικού αυλού [*heat pipe receiver*]. Ο πρώτος τύπος (που είναι και ο πιο απλός) χρησιμοποιεί τους ίδιους σωλήνες που μεταφέρουν τη θερμότητα και στη θερμική μηχανή. Έτσι, η θερμότητα διοχετεύεται κατευθείαν από το δέκτη μέσω του θερμικού ρευστού στη θερμική μηχανή¹⁸³. Στο δεύτερο τύπο [δέκτης τύπου θερμικού αυλού] χρησι-

¹⁸¹ Απ' τον Οκτώβριο του 2011 λειτουργεί στη Σεβίλλη η πρώτη εμπορική εγκατάσταση ηλιακού πύργου ισχύος 19,9 MW με δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας μέσω τήγματος άλατος που επιτρέπει τη συνεχόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι και 15 ώρες χωρίς την παρουσία ηλιακής ενέργειας. Η εγκατάσταση διαθέτει 2.650 ηλιοστάτες σε μια έκταση 185 εκταρίων και προβλέπεται να παράγει ετησίως 110 GWh ηλεκτρικής ενέργειας (ισοδυναμεί με την κάλυψη των αναγκών για 25.000 οικίες και μειώνει την εκπομπή αερίων θερμοκηπίου ίσων με 30.000 τόνους ετησίως). Τα στοιχεία δίνονται από την εταιρεία κατασκευής και λειτουργίας. Για περισσότερα βλ. <http://www.torresolenergy.com/TORRESOL/gemasolar-plant/en> (12/1/2011).

¹⁸² Αντί για μηχανή Stirling μπορεί να είναι μια άλλη μικρή gas turbine [http://www.greenpeace.org/international/en/publications/reports/concentrating-solar-power-2009-\(16/1/2011\)](http://www.greenpeace.org/international/en/publications/reports/concentrating-solar-power-2009-(16/1/2011)).

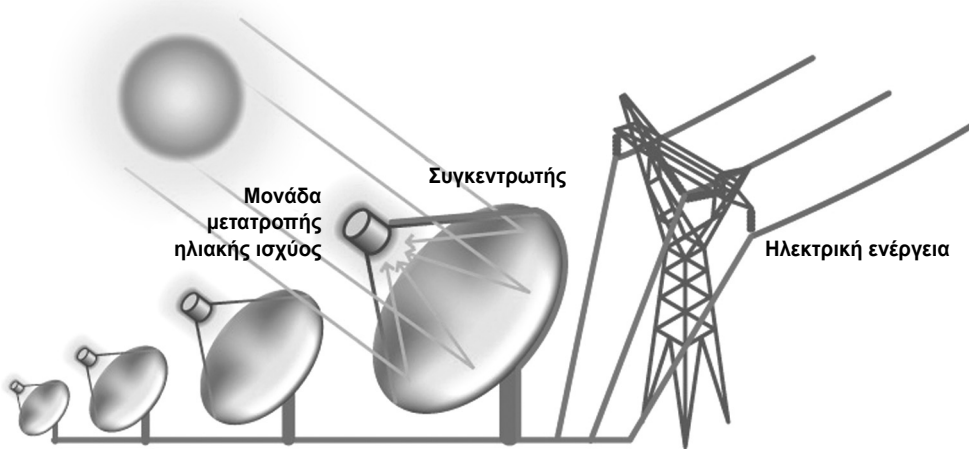
¹⁸³ Στην περίπτωση της μηχανής Stirling το θερμικό ρευστό είναι το αέριο που θα εκτελέσει το θερμικό κύκλο.



Εικόνα 3.5 Παραβολικό «πίατο» εστιακού σημείου στο Font-Romeu-Odeillo, Γαλλία.
(Πηγή: commons.wikimedia.org).

μποιείται ως θερμικό ρευστό υλικό που αλλάζει φάση με τη θερμότητα [phase-change heat transfer medium], όπως είναι το νάτριο. Έτσι, η θερμότητα περνάει από το δέκτη στη θερμική μηχανή μέσω συστήματος που κυκλοφορεί το νάτριο (ως θερμικό ρευστό) και στη συνέχεια μεταφέρεται η θερμότητα στο αέριο¹⁸⁴ που εκτελεί τον κύκλο Stirling στη θερμική μηχανή.

¹⁸⁴ Το αέριο είναι συνήθως ήλιο ή υδρογόνο.



Σχήμα 3.24 Σχηματικό διάγραμμα παραβολικού «πιάτου» εστιακού σημείου.
(Πηγή: U.S Department of Energy)

Η μηχανή Stirling είναι θερμική μηχανή που λειτουργεί με αέριο (συνήθως ήλιο ή υδρογόνο σε θερμοκρασίες 600-800°C), το οποίο υφίσταται κύκλο θερμοδυναμικών διεργασιών (ισόθερμη συμπίεση, ισόχωρη θέρμανση, ισόθερμη εκτόνωση και ισόχωρη ψύξη) και δίνει καθαρό ποσό μηχανικής ενέργειας στο τέλος του κύκλου¹⁸⁵. Σε αντίθεση με τις μηχανές που χρησιμοποιούν τον κύκλο του Otto ή του Diesel, η μηχανή Stirling παίρνει την απαραίτητη θερμότητα από εξωτερική πηγή (εδώ από το θερμικό ρευστό) και για αυτό είναι κατάλληλη για τα ηλιοθερμικά συστήματα.

Τα συστήματα παραβολικού πιάτου εστιακού σημείου μπορούν να σχεδιαστούν και ως υβριδικά και έτσι μπορεί να ληφθεί επιπλέον θερμότητα από μια συμβατική πηγή (όπως, π.χ., φυσικό αέριο) ή μια ΑΠΕ (π.χ., βιομάζα) στις περιπτώσεις που η ηλιακή ακτινοβολία δεν επαρκεί.

Τα συστήματα παραβολικού πιάτου εστιακού σημείου είναι πολύ μικρότερης ισχύος από τα υπόλοιπα ηλιοθερμικά συστήματα. Ένα σύστημα Stirling μπορεί να δώσει ισχύ περίπου 50-100 kW το μέγιστο (τουλάχιστον με τα δεδομένα του 2009). Εξαιτίας αυτού του χαρακτηριστικού τους τα συστήματα αυτά αποτελούν μια ενδε-

¹⁸⁵ Μια χρήσιμη πηγή στην ελληνική γλώσσα για τη μηχανή Stirling είναι το άρθρο που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό «Φυσικός Κόσμος» http://users.kyk.sch.gr/nborbil/STIRLING_ENGINE_FYSIKOS_KOSMOS.pdf (12/2/2011).

Επίσης βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 206-208.



δειγμένη λύση σε περίπτωση που χρειάζεται να εγκατασταθούν σε αποκεντρωμένο δίκτυο παραγωγής ενέργειας (μικροδίκτυα - micro and mini grids) ή σε περιοχές (κυρίως αγροτικές) απομακρυσμένες από το κεντρικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (ιδιαίτερα αν συνδυαστούν με συμβατικές πηγές ενέργειας ή άλλες ανανεώσιμες, π.χ., βιομάζα). Βέβαια είναι δυνατόν να ληφθεί μεγαλύτερη ισχύ εάν πολλά συστήματα Stirling τοποθετούνται σε διάταξη ενός ενεργειακού πάρκου. Η απόδοση αυτών των συστημάτων (ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας προς την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια) είναι πάνω από 30%.¹⁸⁶

¹⁸⁶ ESTIA, Έκθεση της Ευρωπαϊκής Ένωσης Ηλιοθερμικών Βιομηχανιών και της GreenPeace International http://www.solarpaces.org/Library/CSP_Documents/Concentrated-Solar-Thermal-Power-Plants-2005.pdf (12/3/2011).

