

# Κεφάλαιο 3

## Ηλιακοί Συλλέκτες

### 3.1 Εισαγωγή

Η πλέον διαδεδομένη συσκευή εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ο ηλιακός συλλέκτης. Πρακτικά, είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας ο οποίος μετατρέπει την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα. Στη συνέχεια η θερμότητα μεταφέρεται με κάποιο ρευστό προς εκμετάλλευση. Μια απλή μορφή ενός ηλιακού συλλέκτη για θέρμανση νερού είναι ένα μαύρο δοχείο τοποθετημένο στον Ήλιο. Τα πρώτα συστήματα, που κατασκευάστηκαν στις ΗΠΑ μετά το 1890, ήταν απλές παραλλαγές αυτού του συστήματος. Η περίοδος ακμής των πρώτων συστημάτων θέρμανσης νερού, στις ΗΠΑ διήρκεσε μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του '50. Στη συνέχεια το ενδιαφέρον υποχώρησε λόγω της διεύδυσης των φθηνών συμβατικών καυσίμων. Τα ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού εμφανίστηκαν ξανά στο προσκήνιο μετά την πετρελαϊκή κρίση του 1973.

Σήμερα, η τεχνολογία έχει εξελιχθεί σε μεγάλο βαθμό και οι ηλιακοί συλλέκτες θέρμανσης νερού που κυκλοφορούν εμπορικά καλύπτουν ένα μεγάλο μέρος των ενεργειακών αναγκών κυρίως σε οικιακό και λιγότερο σε εμπορικό και βιομηχανικό επίπεδο. Η Ελλάδα αποτελεί μια χώρα όπου η χρήση μικρών οικιακών θερμοσιφωνικών συστημάτων θέρμανσης νερού χρήσης είναι διαδεδομένη, ενώ διαθέτει σημαντική τεχνογνωσία και παραγωγή σε ηλιακούς συλλέκτες.

### Τύποι ηλιακών συλλεκτών

Ο ηλιακός συλλέκτης είναι η καρδιά του ηλιακού συστήματος θέρμανσης. Ο συλλέκτης απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία και τη μετατρέπει σε θερμότητα για τη θέρμανση του ρευστού (αέριου ή υγρού μέσου). Το ρευστό χρησιμοποιείται στη συνέχεια για να θερμάνει – άμεσα ή έμμεσα:

- ▶ νερό για οικιακή χρήση,
- ▶ εσωτερικό χώρο κτηρίου,
- ▶ νερό σε πισίνες κολυμβητηρίου,
- ▶ νερό ή αέρα για βιομηχανικές χρήσεις,
- ▶ αέρα για διεργασίες ξήρανσης,

- ▶ Θερμοκινούμενες ψυκτικές μηχανές.

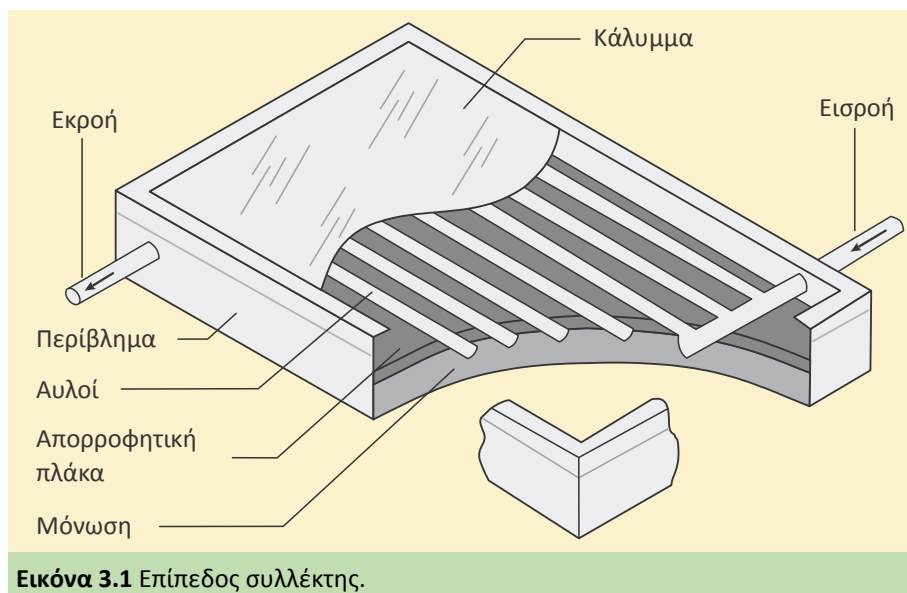
Για τους παραπάνω σκοπούς υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλιακών συλλεκτών:

- ▶ Επίπεδοι συλλέκτες (χωρίς κάλυμμα, απλοί υαλοκάλυπτοι, επιλεκτικής βαφής υαλοκάλυπτοι).
- ▶ Συλλέκτες κενού.
- ▶ Συγκεντρωτικοί συλλέκτες.

Ο *επίπεδοι συλλέκτες* είναι η πλέον διαδεδομένη μορφή για οικιακή χρήση. Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που το νερό χρήσης πρέπει να βρίσκεται σε μεσαίες θερμοκρασίες, το πολύ 80°C. Αξιοποιούν τόσο την άμεση όσο και την διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία. Δεν απαιτούν την ύπαρξη συστήματος παρακολούθησης του Ήλιου, εκτός από μικρές προαιρετικές αλλαγές στην κλίση κάθε εποχή για βελτίωση της απόδοσης ενώ παράλληλα χρειάζονται ελάχιστη συντήρηση. Τα βασικά στοιχεία ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη είναι (Εικόνα 3.1):

- ▶ Απορροφητική επιφάνεια από χαλκό, αλουμίνιο ή χάλυβα, η οποία μπορεί να είναι βαμμένη με μαύρο χρώμα ή με ειδική επιλεκτική βαφή.
- ▶ Δίκτυο μεταφοράς του ρευστού, το οποίο απαγάγει τη θερμότητα, καθώς εφάπτεται στην εσωτερική/πίσω πλευρά της απορροφητικής επιφάνειας.
- ▶ Κάλυμμα, συνήθως από γυαλί αλλά και από διαφανές πλαστικό.
- ▶ Θερμομόνωση στο πίσω μέρος, και τα πλάγια.
- ▶ Περίβλημα που συγκρατεί την κατασκευή και προσφέρει προστασία από το περιβάλλον (βροχή, υγρασία, σκόνη).

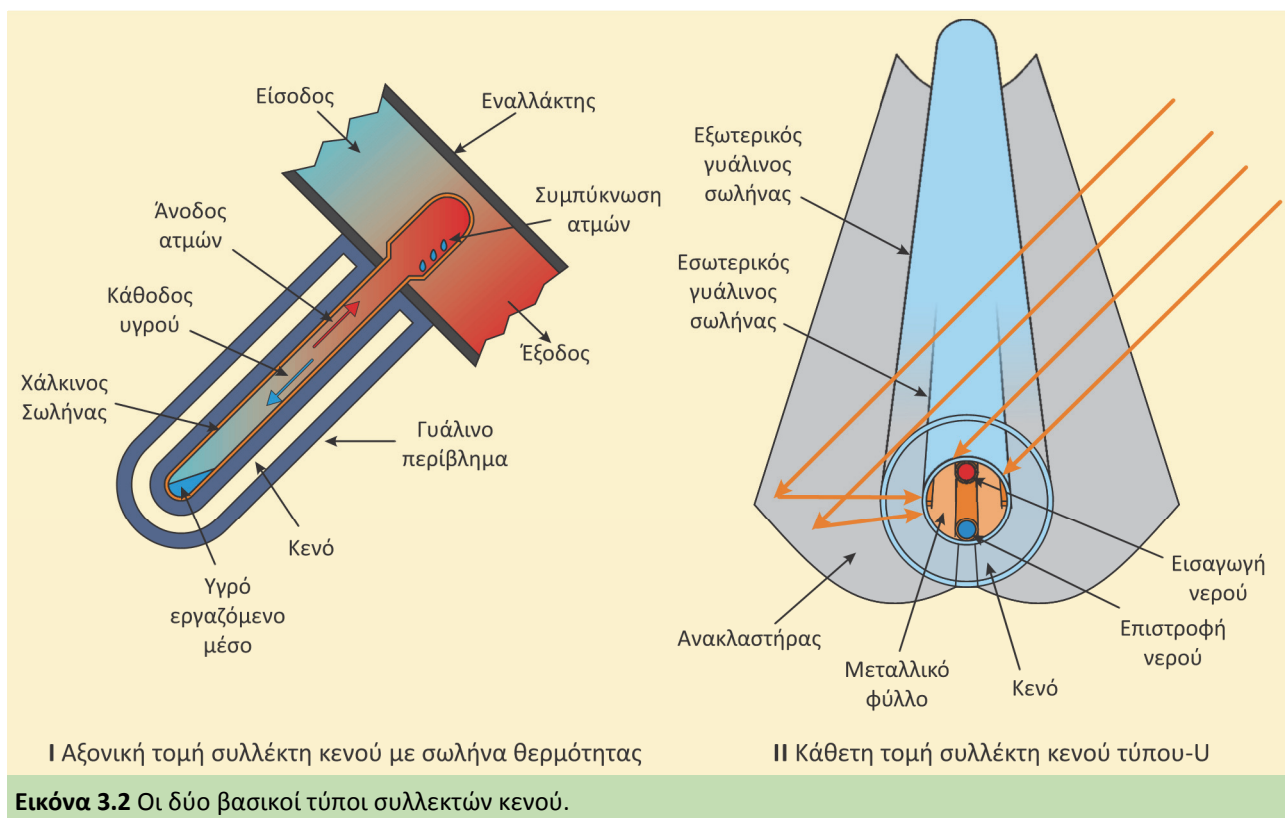
Στην Παράγραφο 3.2 παρουσιάζεται η θερμική ανάλυση ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη.



**Εικόνα 3.1** Επίπεδος συλλέκτης.

Οι *συλλέκτες κενού* είναι συλλέκτες βιομηχανικής και οικιακής χρήσης με προηγμένα τεχνολογικά χαρακτηριστικά. Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες συλλεκτών κενού, οι συλλέκτες κενού με σωλήνα θερμότητας και οι συλλέκτες

κενού τύπου-U<sup>1</sup> (Εικόνα 3.2). Και στις δυο κατηγορίες, η συλλεκτική επιφάνεια αποτελείται από ένα σύστημα αρθρωτών γυάλινων σωλήνων ειδικής κατασκευής και τεχνολογίας. Εντός του κάθε σωλήνα υπάρχει, ομόκεντρα, δεύτερος σωλήνας (θερμαντικός αυλός). Ο εξωτερικός γυάλινος σωλήνας είναι κατασκευασμένος από βιοπυριτικό γυαλί μεγάλης σκληρότητας και αντοχής έτσι ώστε να αντέχει στα εξωτερικά φαινόμενα (π.χ. χαλάζι μεγάλου μεγέθους και ταχύτητας) ενώ έχει ειδικές απορροφητικές επιστρώσεις. Ο εσωτερικός γυάλινος σωλήνας έχει και αυτός επιφάνεια με υψηλό συντελεστή απορροφητικότητας και χαμηλό συντελεστή εκπομπής. Ανάμεσα στους δύο ομόκεντρους σωλήνες υπάρχει κενό της τάξης  $10^{-5}$  bar για τη μείωση των θερμικών απωλειών.

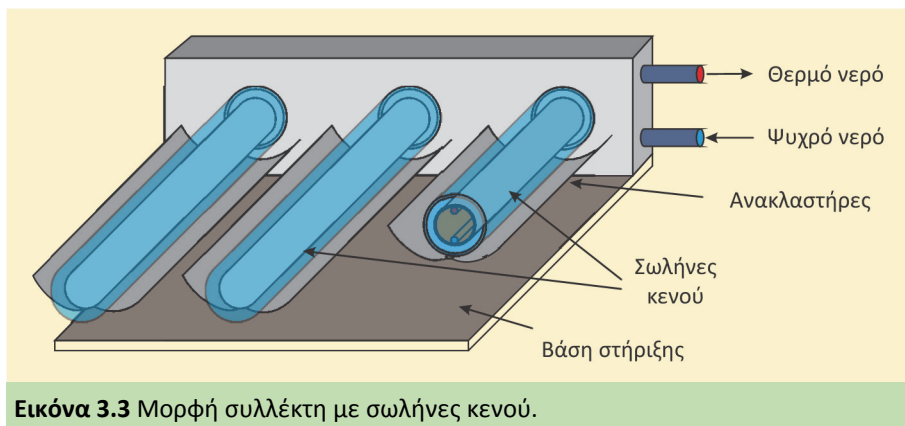


Στους συλλέκτες με θερμοσωλήνα εντός του εξωτερικού γυάλινου σωλήνα είναι τοποθετημένος κλειστός σωλήνας (θερμοσωλήνας) από χάλυβα ή χαλκό με προσαρμοσμένο μεταλλικό περύγιο για συλλογή/απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, μέσα στον οποίο υπάρχει ειδικό πτητικό ρευστό το οποίο εξατμίζεται σε χαμηλή θερμοκρασία. Ο ατμός ανεβαίνει στο άνω μέρος του σωλήνα, όπου με τη βοήθεια ενός θερμικά μονωμένου εναλλάκτη θερμαίνει το νερό χρήσης ή ένα δεύτερο υγρό. Το ειδικό ρευστό, αφού δώσει τη θερμότητα του, συμπυκνώνεται και κατεβαίνει από τον σωλήνα για να θερμανθεί και πάλι (Εικόνα 3.2). Εντός των συλλεκτών η θερμοκρασία του ειδικού ρευστού μπορεί

<sup>1</sup> Ονομάζονται και συλλέκτες κενού άμεσης ροής.

να φτάσει τους 150°C. Στους συλλέκτες με σωλήνα τύπου-U (Εικόνα 3.2II) το εργαζόμενο μέσο είναι ένα μείγμα νερού με αντιψυκτικό που κυκλοφορεί σε χάλκινο σωλήνα με επιστροφή εντός του εσωτερικού γυάλινου σωλήνα και συνδέεται κατευθείαν με το κύκλωμα του νερού που μεταφέρεται στον εναλλάκτη.

Ανάλογα με τις θερμικές ανάγκες επιλέγεται και ο αριθμός των σωλήνων κενού που θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε συλλέκτη. Στους συνηθισμένους εμπορικούς συλλέκτες τοποθετούνται 10 με 15 σωλήνες κενού. Οι συλλέκτες κενού έχουν μεγαλύτερη απόδοση από τους επίπεδους συλλέκτες για μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές ενώ εκμεταλλεύονται τόσο την άμεση όσο και τη διάχυτη ακτινοβολία. Λόγω της ύπαρξης του κενού, οι θερμικές απώλειες είναι μόνο απώλειες ακτινοβολίας με αποτέλεσμα την καλή τους απόδοση σε περιβάλλον χαμηλής θερμοκρασίας, ενώ η θερμοκρασία του νερού μπορεί να ξεπεράσει τους 100°C, καθιστώντας τους ιδανικούς για συστήματα ηλιακής ψύξης ή βιομηχανικές εφαρμογές. Είναι όμως πολύ ακριβότεροι από τους επίπεδους συλλέκτες.



**Εικόνα 3.3** Μορφή συλλέκτη με σωλήνες κενού.

Οι *συγκεντρωτικοί συλλέκτες* (γραμμικής ή σημειακής εστίασης) χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν θερμοκρασίες μεγαλύτερες από αυτές που μπορούν να επιτύχουν οι επίπεδοι και οι συλλέκτες κενού (π.χ. παραγωγή ατμού, ηλεκτροπαραγωγή, τήξη μετάλλων). Χρειάζονται σύστημα παρακολούθησης του ήλιου, αξιοποιούν μόνο την άμεση ηλιακή ακτινοβολία ενώ έχουν υψηλό κόστος αγοράς και συντήρησης.

## Συλλογή ηλιακής ενέργειας

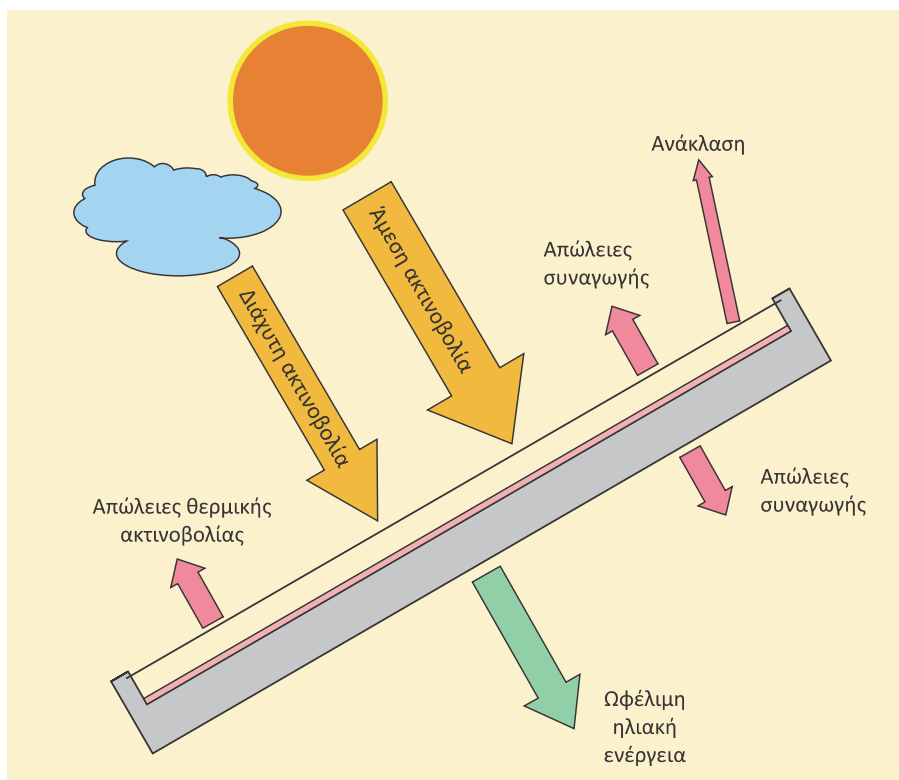
Ως καθαρό ηλιακό κέρδος ορίζεται η διαφορά της ηλιακής ενέργειας που συλλέγεται και της θερμότητας που χάνεται από τα τοιχώματα του συλλέκτη. Η μεγιστοποίηση της ηλιακής ενέργειας που συλλέγεται επιτυγχάνεται με τη συνεχή παρακολούθηση του Ήλιου. Για ακίνητη επιφάνεια συλλογής αυτό εξασφαλίζεται με σειρά μέτρων, όπως:

- ▶ Επιλογή ευνοϊκού προσανατολισμού και κατάλληλη κλίση του συλλέκτη.
- ▶ Εγκατάσταση ανακλαστήρων.
- ▶ Αποφυγή της σκίασης.

- Επιλογή υλικών συλλέκτη με βέλτιστα χαρακτηριστικά, π.χ. επιλογή διαφανών καλυμμάτων/υαλοπινάκων με υψηλές τιμές συντελεστή διαπερατότητας της ηλιακής ακτινοβολίας, αντοχή, αντίσταση σε οπτική γήρανση στην περίπτωση συνθετικών καλυμμάτων.

Ο γενικός σχεδιασμός του συστήματος πρέπει να γίνεται έτσι ώστε να εξασφαλίζεται υψηλή απορρόφηση τις κατάλληλες ώρες της ημέρας και του έτους. Γενικά, στην περίπτωση των μη κινούμενων συλλεκτών η μέγιστη ποσότητα ηλιακής ενέργειας στη διάρκεια του έτους συλλέγεται με προσανατολισμό νότιο (για το βόρειο ημισφαίριο) και κλίση με γωνία ίση με το γεωγραφικό πλάτος της θέσης. Η μεταβολή της κλίση ανά εποχή μπορεί να βελτιώσει την συλλεγόμενη ακτινοβολία. Αν ο συλλέκτης δεν μπορεί να τοποθετηθεί προς τον νότο τότε η ηλιακή ακτινοβολία μειώνεται ελαφρά για το διάστημα των γωνιών από 30° ανατολικά ή δυτικά του νότου. Η ποσότητα της ενέργειας που συλλέγεται μπορεί να ελαττωθεί από την παρουσία νεφών, από την κάλυψη με σκόνη ή από τη σκίαση από διπλανά κτίρια ή βλάστηση.

Το ποσό της ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από το μέγεθος της διαθέσιμης αποθήκης θερμότητας στο κτήριο και τη μορφή της ζήτησης. Για παράδειγμα, όταν η μεγαλύτερη απαίτηση ηλιακής ενέργειας σε ένα ξενοδοχείο είναι το απόγευμα του καλοκαιριού, τότε θα πρέπει να αλλάξει ο προσανατολισμός και στραφεί δυτικά. Η ροή της ηλιακής ενέργειας προς το συλλέκτη και οι απώλειες του προς το περιβάλλον παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.4 Ροή ηλιακής ενέργειας σε ηλιακό συλλέκτη.

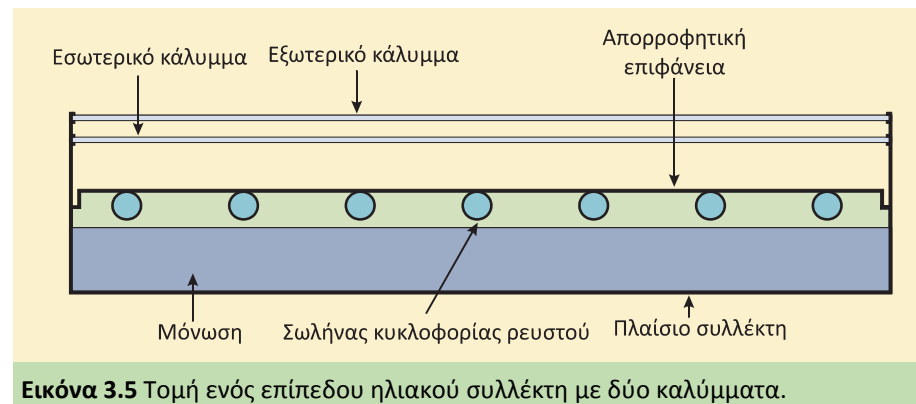
## 3.2 Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης

### Εισαγωγή

Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν απόδοση ενέργειας σε θερμοκρασίες έως και 80°C, ενώ εκμεταλλεύονται την άμεση και τη διάχυτη ακτινοβολία. Δεν υπάρχει απαίτηση μηχανισμού κίνησης για την παρακολούθηση του ήλιου και συνεπώς είναι μηχανικά απλοί. Οι κύριες εφαρμογές τους είναι η θέρμανση νερού χρήσης και η θέρμανση χώρου, ενώ στις δυνατές εφαρμογές περιλαμβάνεται ο κλιματισμός και η παραγωγή θερμότητας για βιομηχανικές χρήσεις.

Τα κύρια μέρη ενός επίπεδου συλλέκτη παρουσιάζονται σε τομή στην Εικόνα 3.5:

- ▶ Η μαύρη απορροφητική επίπεδη επιφάνεια, όπου προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία, είναι εφοδιασμένη με σύστημα κυκλοφορίας του ρευστού που απάγει τη θερμότητα και τη μεταφέρει στο δοχείο αποθήκευσης. Το σύστημα κυκλοφορίας αποτελείται από σωλήνες προσκολλημένους ή ενσωματωμένους στην απορροφητική επιφάνεια ή από αγωγούς λόγω της κατάλληλης διαμόρφωσης του απορροφητή.
- ▶ Ένα ή περισσότερα διαφανή καλύμματα πάνω από την πλάκα απορρόφησης ώστε να μειώνονται οι θερμικές απώλειες με συναγωγή και ακτινοβολία προς το περιβάλλον.
- ▶ Μόνωση της οπίσθιας και των παραπλεύρων επιφανειών ώστε να μειώνονται οι θερμικές απώλειες.
- ▶ Πλαίσιο που περιβάλλει τα ανωτέρω για προστασία και σταθερότητα.



**Εικόνα 3.5** Τομή ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη με δύο καλύμματα.

Στη *μόνιμη κατάσταση* λειτουργίας η συμπεριφορά του συλλέκτη περιγράφεται από το ισοζύγιο ενέργειας, που εκφράζει το διαχωρισμό της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας σε ωφέλιμη ενέργεια και θερμικές απώλειες.

$$\dot{q}_u = A_c \left( S - U_L \cdot (T_{pm} - T_a) \right) \quad (3.1)$$

όπου  $\dot{q}_u$  είναι η ωφέλιμη αποδιδόμενη ισχύς,  $A_c$  η επιφάνεια του απορροφητή,  $S$  η απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία,  $U_L$  ο συντελεστής θερμικών απωλειών

από το συλλέκτη στο περιβάλλον με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία,  $T_{pm}$  η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας απορρόφησης και  $T_a$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η εξίσωση (3.1) δεν είναι εύχρηστη στον υπολογισμό της αποδιδόμενης ισχύος  $\dot{q}_u$  επειδή περιέχει τη μέση θερμοκρασία της επιφάνειας απορρόφησης, η οποία εξαρτάται από τον τύπο του συλλέκτη, την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και τις συνθήκες εισόδου του ρευστού. Για το λόγο αυτό η εξίσωση (3.1) τροποποιείται έτσι ώστε να εξαρτάται από τις συνθήκες εισόδου του ρευστού οι οποίες είναι εύκολα μετρήσιμες.

Μέτρο της συμπεριφοράς του συλλέκτη είναι ο βαθμός απόδοσης. Ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης ( $\eta_i$ ) είναι ο λόγος της ωφέλιμης αποδιδόμενης ισχύος προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.

$$\eta_i = \frac{\dot{q}_u}{A_c G_T} \quad (3.2)$$

Επιπλέον, ορίζεται ο μέσος βαθμός απόδοσης ( $\eta_{col}$ ), δηλαδή ο λόγος της αποδιδόμενης ενέργειας κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος ( $\delta t$ ), προς την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια κατά το ίδιο χρονικό διάστημα.

$$\eta_{col} = \frac{\int_0^{\delta t} \dot{q}_u dt}{A_c \int_0^{\delta t} G_T dt} \quad (3.3)$$

## Συντελεστής ολικών θερμικών απωλειών

Στην παρούσα ενότητα θα αναλυθεί ο τρόπος υπολογισμός των θερμικών απωλειών του συλλέκτη  $U_L$  ο οποίος χρησιμοποιείται στην εξίσωση (3.1). Ο συντελεστής  $U_L$  αποτελείται από τρεις επιμέρους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας:

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (3.4)$$

όπου:

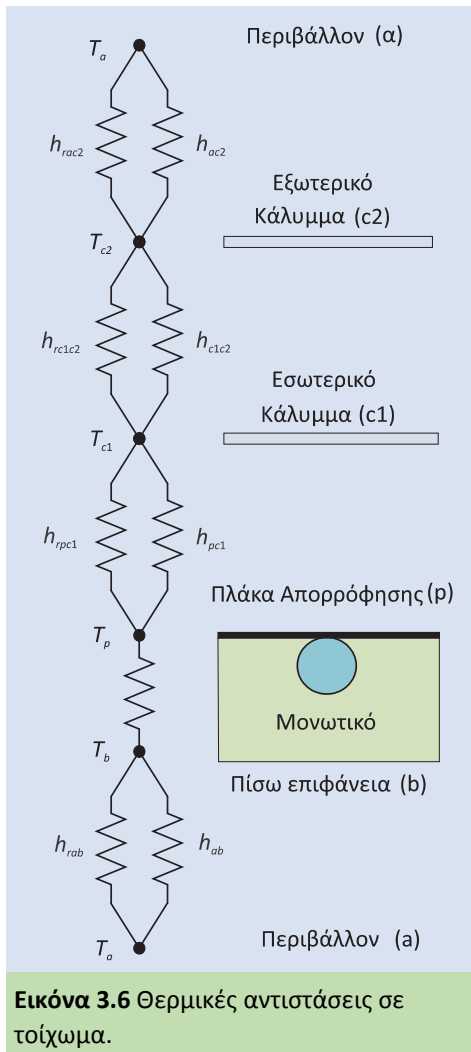
- ▶  $U_t$  ο συντελεστής θερμικών απωλειών από το κάλυμμα,
- ▶  $U_b$  ο συντελεστής θερμικών απωλειών πυθμένα, και
- ▶  $U_e$  ο συντελεστής πλευρικών θερμικών απωλειών.

Στην Εικόνα 3.6 παρουσιάζεται το ισοδύναμο θερμικό κύκλωμα ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη με δύο καλύμματα.



### Εφαρμογή 3.2

Σε μια στιγμή λειτουργίας, η επιφάνεια απορρόφησης έχει θερμοκρασία  $T_p$ . Η απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία  $S$ , κατανέμεται αφ' ενός σε ωφέλιμη θερμική ισχύ,  $\dot{q}_u$  και αφετέρου σε θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον θερμοκρασίας  $T_a$  μέσω των καλυμμάτων και της μόνωσης (πλευρικής και πυθμένα) του συλλέκτη.



### Συντελεστής θερμικών απωλειών από το κάλυμμα

Όπως παρουσιάζεται και στο ισοδύναμο θερμικό δίκτυο, για ένα συλλέκτη με δύο καλύμματα, ορίζονται τρεις ισοδύναμες αντιστάσεις σε σειρά από την απορροφητική πλάκα ( $p$ ) έως το περιβάλλον ( $\alpha$ ). Η πρώτη αντίσταση ( $r_{pc1}$ ) από την απορροφητική πλάκα έως το εσωτερικό κάλυμμα ( $c1$ ), η δεύτερη αντίσταση ( $r_{c1c2}$ ) ανάμεσα στα εσωτερικά καλύμματα και η τρίτη αντίσταση ( $r_{ac2}$ ) από το εξωτερικό κάλυμμα ( $c2$ ) στο περιβάλλον. Οι αντιστάσεις αγωγής των καλυμμάτων θεωρούνται αμελητέες.

Οι θερμικές απώλειες κορυφής,  $q_t''$  είναι:

$$\dot{q}_t'' = \frac{T_p - T_a}{r_t} = \frac{T_p - T_{c1}}{r_{pc1}} = \frac{T_{c1} - T_{c2}}{r_{c1c2}} = \frac{T_{c2} - T_a}{r_{ac2}} \quad (3.5)$$

όπου  $r_t = r_{pc1} + r_{c1c2} + r_{ac2}$

Η κάθε αντίσταση είναι σύνθετη με παράλληλη σύνδεση των θερμικών αντιστάσεων της συναγωγής και της ακτινοβολίας (οι αντιστάσεις είναι ανηγμένες ως προς την επιφάνεια του συλλέκτη). Έτσι:

$$r_{pc1} = \frac{1}{h_{pc1} + h_{rp_c1}} \quad (3.6)$$

$$r_{c1c2} = \frac{1}{h_{c1c2} + h_{rc1c2}} \quad (3.7)$$

$$r_{ac2} = \frac{1}{h_{ac2} + h_{rac2}} \quad (3.8)$$

όπου  $h$  οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή και  $h_r$  οι αντίστοιχοι συντελεστές με ακτινοβολία ανάμεσα στα διάφορα στοιχεία του συστήματος.

Η εξίσωση που δίνει το συντελεστή μεταφοράς με ακτινοβολία ανάμεσα στην πλάκα και το εσωτερικό κάλυμμα είναι:

$$h_{rp_c1} = \frac{\sigma (T_p^2 + T_{c1}^2) (T_p + T_{c1})}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1} \quad (3.9)$$

όπου  $\sigma$  είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann ενώ  $\epsilon_p$  και  $\epsilon_c$  είναι οι συντελεστές εκπομπής της απορροφητικής πλάκας και του καλύμματος, αντίστοιχα. Τυπική τιμή για το γυαλί είναι  $\epsilon_c = 0.88$ . Η τιμή του  $\epsilon_p$  ποικίλει ανάλογα με τις ιδιότητες της επιφάνειας απορρόφησης. Έτσι, μια επιλεκτική επιφάνεια έχει υψηλή απορροφητικότητα στην ηλιακή ακτινοβολία αλλά μικρότερο συντελεστή εκπομπής ( $\epsilon_p = 0.1$ ) στην ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που εκπέμπει η επιφάνεια, μειώνοντας έτσι τις θερμικές απώλειες. Τυπική τιμή για μη επιλεκτική επιφάνεια απορρόφησης είναι  $\epsilon_p = 0.95$ . Αντίστοιχα προκύπτει και ο συντελεστής ακτινοβολίας ανάμεσα στα καλύμματα ( $h_{rc1c2}$ ). Η εξίσωση που δίνει το συντελεστή ακτινοβολίας από το εξωτερικό κάλυμμα στο περιβάλλον είναι:

$$h_{ac2} = \varepsilon_c \sigma (T_{c2}^2 + T_a^2) (T_{c2} + T_a) \quad (3.10)$$

Ο συντελεστής συναγωγής ανάμεσα στο κάλυμμα και την πλάκα ( $h_{pc1}$ ) μπορεί να προσεγγιστεί από την εξίσωση του Hollands για τον αριθμό Nusselt:

$$Nu = 1 + 1.446 \left( 1 - \frac{1708}{Ra \cos(\theta)} \right) \left( 1 - \frac{1708 (\sin(1.8 \theta))^{1.6}}{Ra \cos(\theta)} \right) + \left( \left( \frac{Ra \cos(\theta)}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right) \quad (3.11)$$

όπου  $\theta$  η γωνία κλίσης του ηλιακού συλλέκτη και  $Ra$  ο αριθμός Rayleigh. Ο αριθμός Rayleigh δίνεται από τη εξίσωση:

$$Ra = \frac{g \beta' Pr}{\nu^2} (T_p - T_{c1}) L_{pc1}^3 \quad (3.12)$$

όπου:

- ▶  $\beta'$  ο συντελεστής κυβικής διαστολής για ιδανικό αέριο,
- ▶  $Pr$  ο αριθμός Prantdl,
- ▶  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες,
- ▶  $L_{pc1}$  η απόσταση μεταξύ πλάκας απορρόφησης και καλύμματος, και
- ▶  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Οι θερμικές ιδιότητες του αέρα υπολογίζονται για τη μέση θερμοκρασία ανάμεσα στις επιφάνειες ( $T_{pc1} = (T_p + T_{c1})/2$ ) και μπορούν να βρεθούν σε πίνακες (Πίνακας Π.5 του Παραρτήματος). Ο συντελεστής συναγωγής υπολογίζεται από τον αριθμό Nusselt ως:

$$h_{pc1} = \frac{k Nu}{L_{pc1}} \quad (3.13)$$

όπου  $k$  ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για τη μέση θερμοκρασία του αέρα  $T_{pc1}$ . Όμοια προκύπτει και ο συντελεστής συναγωγής ανάμεσα στα δύο καλύμματα ( $h_{c1c2}$ ). Ο συντελεστής συναγωγής ανάμεσα στην εξωτερική επιφάνεια του καλύμματος και το περιβάλλον ( $h_{ac2}$ ) μπορεί να προσεγγιστεί από την εξίσωση:

$$h_{ac2} = \frac{8.6 V^{0.6}}{L_c^{0.4}} \quad (3.14)$$

όπου  $V$  η ταχύτητα του ανέμου και  $L_c$  το μήκος του συλλέκτη. Ο συντελεστής θερμικών απωλειών κορυφής είναι:

$$U_t = \frac{1}{r_{pc1} + r_{c1c2} + r_{ac2}} \quad (3.15)$$

Επειδή συνήθως είναι γνωστές μόνο οι θερμοκρασίες  $T_p$  και  $T_a$  ο υπολογισμός του  $U_t$  στηρίζεται σε επαναληπτική διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω:

1. Εκτιμώνται οι θερμοκρασίες των καλυμμάτων  $T_{c1}$  και  $T_{c2}$ .
2. Υπολογίζονται όλοι οι συντελεστές  $h$  και  $U_t$  από την Εξίσωση (3.15).
3. Υπολογίζονται οι απώλειες κορυφής  $q_t$  από την Εξίσωση (3.5).
4. Υπολογίζονται νέες τιμές των  $T_{c1}$  και  $T_{c2}$  λαμβάνοντας υπόψη πως η μεταφορά θερμότητας μεταξύ των δύο παραλλήλων επιφανειών είναι ίση με  $q_t$  (Εξίσωση (3.5)).
5. Αν οι νέες  $T_{c1}$  και  $T_{c2}$  διαφέρουν από τις αρχικές εκτιμήσεις, επαναλαμβάνονται οι υπολογισμοί από το βήμα 2 έως και τη σύγκλιση.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμικών απωλειών κορυφής,  $U_e$ , έγινε η υπόθεση πως τα καλύμματα είναι αδιαπέραστα από τη μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία (υπέρυθρη) που εκπέμπει η επιφάνεια απορρόφησης. Η υπόθεση αυτή είναι ορθή για γυάλινα καλύμματα αλλά όχι και για πλαστικά για τα οποία πρέπει να γίνει σχετική διόρθωση.

### Συντελεστής θερμικών απωλειών από τον πυθμένα

Σύμφωνα με την Εικόνα 3.6, στον πυθμένα του συλλέκτη εμφανίζονται εν σειρά η θερμική αντίσταση αγωγής ( $r_{pb}$ ) του μονωτικού υλικού και η θερμική αντίσταση ακτινοβολίας προς το περιβάλλον ( $r_{ba}$ ). Η αντίσταση ακτινοβολίας είναι πολύ μικρή σε σχέση με την αντίσταση αγωγής και γι' αυτό γίνεται η υπόθεση πως  $r_{pb} + r_{ba} = r_{pb}$ . Έτσι, ο συντελεστής θερμικών απωλειών πυθμένα είναι:

$$U_b = \frac{1}{r_{pb}} = \frac{k_{ins}}{L_b} \quad (3.16)$$

όπου  $k_{ins}$  είναι η θερμική αγωγιμότητα και  $L_b$  το πάχος της μόνωσης.

### Συντελεστής πλευρικών θερμικών απωλειών

Υποθέτοντας μονοδιάστατη ροή κατά τη διεύθυνση του πάχους ( $L_e$ ) της πλευρικής μόνωσης, ο συντελεστής πλευρικών θερμικών απωλειών ανηγμένος στη πλευρική επιφάνεια ( $A_e$ ), είναι:

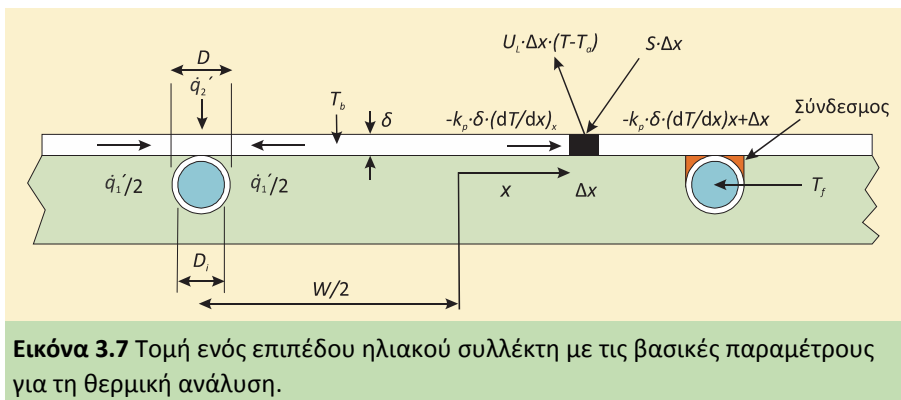
$$U_{es} = \frac{k_{ins}}{L_e} \quad (3.17)$$

Αν ο  $U_e$  αναχθεί (όπως και οι  $U_t$  και  $U_b$ ) στην επιφάνεια του συλλέκτη ( $A_c$ ), προκύπτει:

$$U_e = U_{es} \frac{A_e}{A_c} = \frac{k_{ins}}{L_e} \frac{A_e}{A_c} \quad (3.18)$$

### Κατανομή θερμοκρασίας μεταξύ των σωλήνων

Στην Εικόνα 3.7, παρουσιάζεται η επιφάνεια απορρόφησης σε κάθετη τομή. Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του ελάσματος μεταξύ των σωλήνων, θεωρείται, προς το παρόν, αμελητέα μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος των σωλήνων. Επειδή η πλάκα είναι καλός αγωγός της θερμότητας με μικρό πάχος ( $\delta$ ) θεωρείται αμελητέα μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τη διεύθυνση αυτή. Η περιοχή της πλάκας πάνω από τους σωλήνες έχει θερμοκρασία  $T_b$ . Το ισοζύγιο ενέργειας γράφεται:



**Εικόνα 3.7** Τομή ενός επιπέδου ηλιακού συλλέκτη με τις βασικές παραμέτρους για τη θερμική ανάλυση.

$$S \Delta x - U_L \Delta x (T - T_a) + \left( -k_p \delta \frac{dT}{dx} \right)_x - \left( -k_p \delta \frac{dT}{dx} \right)_{x+\Delta x} = 0 \quad (3.19)$$

όπου  $S$  είναι η απορροφούμενη ηλιακή ενέργεια,  $T$  η θερμοκρασία της πλάκας στη θέση  $x$ ,  $T_a$  η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και  $k_p$  η θερμική αγωγιμότητα της πλάκας. Από την παραπάνω εξίσωση, προκύπτει η διαφορική εξίσωση:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{U_L}{k_p \delta} \left( T - T_a - \frac{S}{U_L} \right) \quad (3.20)$$

με οριακές συνθήκες:

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = 0 \quad \& \quad \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=\frac{W-D}{2}} = T_b \quad (3.21)$$

Η λύση της διαφορικής εξίσωσης με τις παραπάνω οριακές συνθήκες δίνει την κατανομή της θερμοκρασίας στην πλάκα απορρόφησης ανάμεσα στους σωλήνες κατά τη διεύθυνση  $x$ .


$$\frac{T - T_a - \frac{S}{U_L}}{T_b - T_a - \frac{S}{U_L}} = \frac{\cosh(m_{abs} x)}{\cosh\left(m_{abs} \frac{W-D}{2}\right)} \quad (3.22)$$

όπου  $m_{abs} = \sqrt{U_L/k_p \delta}$

### Παράγοντας απόδοσης συλλέκτη

Στην Εικόνα 3.7 η θερμική ισχύς ανά μονάδα μήκους σωλήνα είναι  $\dot{q}'_1$ , η οποία υπολογίζεται από το νόμο του Fourier με παραγωγή της εξίσωσης (3.22) στη θέση  $x = (W - D) / 2$ , δηλαδή:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{q}'_1}{2} &= -k_p \delta \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=\frac{W-D}{2}} \\ &= \frac{k \delta m_{abs}}{U_L} (S - U_L (T_b - T_a)) \tanh\left(m_{abs} \frac{W-D}{2}\right) \end{aligned} \quad (3.23)$$

 **Εφαρμογή 3.3**

Με αντικατάσταση για την τιμή του  $m_{abs}$  προκύπτει:

$$\dot{q}'_1 = (W-D) F (S - U_L (T_b - T_a)) \quad (3.24)$$

όπου:

$$F = \frac{\tanh\left(m_{abs} \frac{W-D}{2}\right)}{m_{abs} \frac{W-D}{2}} \quad (3.25)$$

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.7, εκτός από την  $\dot{q}'_1$  ο σωλήνας δέχεται και θερμική ισχύ  $\dot{q}'_2$  (ανά μονάδα μήκους του σωλήνα) που προέρχεται από την απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία στην περιοχή πάνω ακριβώς από το σωλήνα. Άρα:

$$\dot{q}'_2 = D (S - U_L (T_b - T_a)) \quad (3.26)$$

Προσθέτοντας τις εξισώσεις (3.24) και (3.26) κατά μέλη προκύπτει η συνολική θερμική ισχύς  $q_u$  που δέχεται ο σωλήνας ανά μονάδα μήκους:

$$\dot{q}'_u = \dot{q}'_1 + \dot{q}'_2 = ((W-D) \cdot F + D) \cdot (S - U_L \cdot (T_b - T_a)) \quad (3.27)$$

Η θερμική ισχύς η οποία μεταφέρεται στο ρευστό, θερμοκρασίας  $T_f$  μέσα στο σωλήνα, μπορεί να εκφρασθεί ως συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας  $T_b - T_f$  και της θερμικής αντίστασης που μεσολαβεί, δηλαδή:

$$\dot{q}'_u = \frac{T_b - T_f}{\frac{1}{\pi D_i h_{fi}} + \frac{\gamma}{b k_b}} \quad (3.28)$$

όπου:

- ▶  $D_i$  εσωτερική διάμετρος του σωλήνα,
- ▶  $h_{fi}$  συντελεστής συναγωγής ρευστού εσωτερικής επιφάνειας σωλήνα,
- ▶  $k_b$  θερμική αγωγιμότητα συνδέσμου,
- ▶  $b$  εύρος συνδέσμου, και
- ▶  $\gamma$  πάχος συνδέσμου.

Η ποσότητα  $(k_b b) / \gamma$  είναι η ολική θερμική αγωγιμότητα συνδέσμου ( $k_{bond}$ ) και πρέπει να έχει τιμή μεγαλύτερη από  $30 \text{ W/m}^2$  για να δουλεύει ικανοποιητικά ο συλλέκτης. Από τις εξισώσεις (3.27) και (3.28) με απαλοιφή του  $T_b$  προκύπτει:

$$\dot{q}'_u = W F' (S - U_L (T_f - T_a)) \quad (3.29)$$

όπου:

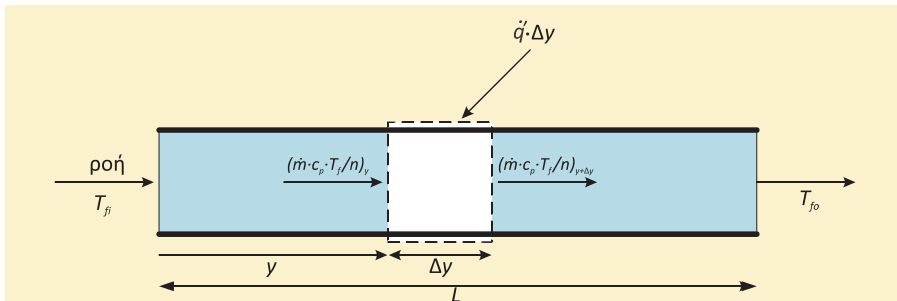
$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left( \frac{1}{U_L (D + (W-D) F)} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} + \frac{\gamma}{b k_b} \right)} \quad (3.30)$$

Το μέγεθος  $F'$  ονομάζεται παράγοντας απόδοσης του συλλέκτη. Σύγκριση των εξισώσεων (3.1) και (3.29) οδηγεί στο συμπέρασμα πως αναπαριστά το λόγο της πραγματικής αποδιδόμενης θερμικής ισχύος προς τη θερμική ισχύ που θα απέδιδε αν κάθε σημείο της πλάκας απορρόφησης είχε την αντίστοιχη θερμοκρασία του ρευστού. Μία άλλη φυσική ερμηνεία του παράγοντα απόδοσης του συλλέκτη, προκύπτει από την εξίσωση (3.30) της οποίας ο παρονομαστής αντιστοιχεί στην ολική θερμική αντίσταση  $1/U_o$  από το ρευστό μέχρι τον αέρα του περιβάλλοντος. Άρα:

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{\frac{1}{U_o}} = \frac{U_o}{U_L} \quad (3.31)$$

## Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τη διεύθυνση της ροής

Η θερμική ισχύς ανά μονάδα μήκους του σωλήνα  $\dot{q}'_u$  μεταφέρεται στο ρευστό που εισέρχεται στο συλλέκτη με θερμοκρασία  $T_{fi}$  και εξέρχεται με μεγαλύτερη θερμοκρασία  $T_{fo}$ . Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας  $T_f$  του ρευστού κατά τη διεύθυνση της ροής διαμορφώνεται το ισοζύγιο ενέργειας στο ρευστό σε ένα στοιχειώδες μήκος του σωλήνα  $\Delta y$ , όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.8.



Εικόνα 3.8 Ισοζύγιο ενέργειας σε στοιχείο ρευστού μέσα στο σωλήνα.

$$\frac{\dot{m}}{n} c_p T_f \Big|_y - \frac{\dot{m}}{n} c_p T_f \Big|_{y+\Delta y} + \dot{q}'_u \Delta y = 0 \quad (3.32)$$

όπου  $\dot{m}$  είναι η συνολική παροχή μάζας του συλλέκτη,  $n$  το πλήθος των παραλλήλων σωλήνων και  $c_p$  η ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού. Αντικαθιστώντας τη θερμική ισχύ  $\dot{q}'_u$  από την εξίσωση (3.29), η εξίσωση του ισοζυγίου μετατρέπεται στη διαφορική εξίσωση:

$$\dot{m} c_p \frac{dT_f}{dy} - n W F' (s - U_L (T_f - T_a)) = 0 \quad (3.33)$$

Η ολοκλήρωση της διαφορικής εξίσωσης με οριακή συνθήκη  $T_f = T_{fi}$  για  $y=0$  και θεωρώντας τα  $F'$  και  $U_L$  ανεξάρτητα της θέσης, δίνει τη θερμοκρασία του ρευστού ως συνάρτηση της απόστασης  $y$  από την είσοδο:

$$\frac{T_f - T_a - \frac{S}{U_L}}{T_{fi} - T_a - \frac{S}{U_L}} = \exp\left(-\frac{U_L n W F' y}{\dot{m} c_p}\right) \quad (3.34)$$

Εάν το μήκος του συλλέκτη κατά τη διεύθυνση της ροής είναι  $L$ , τότε η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού  $T_{fo}$  υπολογίζεται από την παραπάνω εξίσωση για  $y=L$ , δηλαδή:

$$\frac{T_{fo} - T_a - \frac{S}{U_L}}{T_{fi} - T_a - \frac{S}{U_L}} = \exp\left(-\frac{U_L A_c F'}{\dot{m} c_p}\right) \quad (3.35)$$

όπου  $A_c = n W L$  η επιφάνεια του συλλέκτη.

## Εξίσωση συλλέκτη, παράγοντας θερμικής απολαβής και παράγοντας ροής

*Παράγοντας θερμικής απολαβής* του συλλέκτη,  $F_R$ , ονομάζεται ο λόγος της πραγματικής αποδιδόμενης θερμικής ισχύος ( $\dot{q}_u$ ) προς τη θερμική ισχύ που θα αποδιδόταν εάν ολόκληρη η απορροφητική επιφάνεια είχε τη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού ( $T_{fi}$ ).

$$F_R = \frac{\dot{q}_u}{A_c (S - U_L (T_{fi} - T_a))} = \frac{\dot{m} c_p (T_{fo} - T_{fi})}{A_c (S - U_L (T_{fi} - T_a))} \quad (3.36)$$

Το μέγεθος  $F_R$  είναι ισοδύναμο με την αποδοτικότητα ενός εναλλάκτη θερμότητας η οποία ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικά μεταφερόμενης θερμότητας προς τη μέγιστη δυνατή. Στην περίπτωση του συλλέκτη, η μέγιστη δυνατή θερμική ισχύς μπορεί να αποδοθεί όταν ολόκληρη η απορροφητική επιφάνεια έχει τη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού ( $F_R = 1$ ). Από την εξίσωση ορισμού του  $F_R$  προκύπτει η *εξίσωση του επίπεδου συλλέκτη* η οποία δίνει την πραγματικά αποδιδόμενη θερμική ισχύ:

$$\dot{q}_u = A_c F_R (S - U_L (T_{fi} - T_a)) \quad (3.37)$$

Η παραπάνω εξίσωση η οποία ισχύει για τα περισσότερα είδη επίπεδων συλλεκτών είναι πολύ χρήσιμη επειδή περιέχει τη γνωστή θερμοκρασία εισόδου του ρευστού  $T_{fi}$ . Η εξίσωση (3.36) με κατάλληλο μετασχηματισμό γίνεται:

$$F_R = \frac{\dot{m} c_p}{A_c U_L} \cdot \left(1 - \frac{T_{fo} - T_a - \frac{S}{U_L}}{T_{fi} - T_a - \frac{S}{U_L}}\right) \quad (3.38)$$

ενώ με τη βοήθεια της εξίσωσης (3.34), προκύπτει η έκφραση του *παράγοντα θερμικής απολαβής* του συλλέκτη:

$$F_R = \frac{\dot{m} c_p}{A_c U_L} \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{U_L A_c F'}{\dot{m} c_p}\right) \right) \quad (3.39)$$

Ο παράγοντας ροής του συλλέκτη ( $F''$ ) ορίζεται ως:

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m} c_p}{F' A_c U_L} \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{U_L A_c F'}{\dot{m} c_p}\right) \right) \quad (3.40)$$

και όπως φαίνεται από την παραπάνω εξίσωση, είναι συνάρτηση μιας μόνο μεταβλητής, δηλαδή της αδιάστατης ανηγμένης παροχής.

## Μέση θερμοκρασία ρευστού και μέση θερμοκρασία απορροφητικής επιφάνειας

Για την εκτίμηση του συντελεστή συναγωγής ρευστού-εσωτερικής επιφάνειας σωλήνα ( $h_{fi}$ ) και των ιδιοτήτων του ρευστού απαιτείται η γνώση της μέσης θερμοκρασίας του ρευστού  $T_{fm}$ :

$$T_{fm} = \int_0^L T_f dy \quad (3.41)$$

όπου  $L$  το μήκος του σωλήνα. Με αντικατάσταση της θερμοκρασίας του ρευστού ( $T_f$ ) από την εξίσωση (3.29) και με ολοκλήρωση προκύπτει:

$$T_{fm} = T_{fi} + \frac{\dot{q}_u}{A_c U_L F_R} \cdot (1 - F'') \quad (3.42)$$

Η μέση θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης ( $T_{pm}$ ) απαιτείται για τον υπολογισμό του συντελεστή συνολικών θερμικών απωλειών του συλλέκτη,  $U_L$ . Με απαλοιφή της  $T_o$  μεταξύ της εξίσωσης (3.1) και της εξίσωσης (3.36) προκύπτει:

$$T_{fm} = T_{fi} + \frac{\dot{q}_u}{A_c U_L F_R} (1 - F_R) \quad (3.43)$$

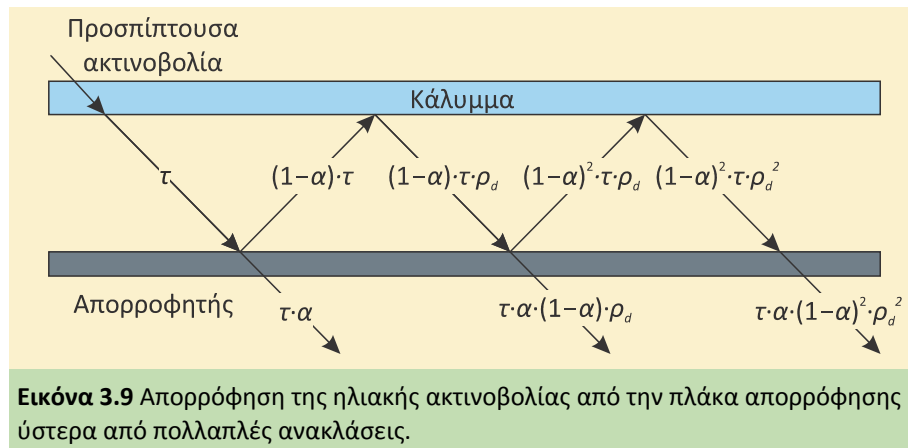
Η παραπάνω εξίσωση δεν παρέχει άμεσα την τιμή της μέσης θερμοκρασίας της πλάκας απορρόφησης ( $T_{pm}$ ) επειδή περιέχει το συντελεστή  $U_L$  ο οποίος είναι συνάρτηση της  $T_{pm}$ . Για το λόγο αυτό, απαιτείται μια επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού.

## Γινόμενο διαπερατότητας καλύμματος με απορροφητικότητα επιφάνειας απορρόφησης

Έστω  $\tau$  η διαπερατότητα του καλύμματος και  $\alpha$  η απορροφητικότητα της πλάκας απορρόφησης του συλλέκτη για τυχαία τιμή της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.9, ποσοστό  $\tau$  της προσπίπτουσας ακτινοβολίας διέρχεται από το κάλυμμα και φτάνει στην πλάκα απορρόφησης όπου απορροφάται ποσοστό ενέργειας  $\tau \cdot \alpha$  ενώ η υπόλοιπη  $\tau(1-\alpha)$  ανακλάται με τη μορφή διάχυτης ακτινοβολίας προς το κάλυμμα. Από αυτή,  $\tau(1-\alpha) \rho_d$  ανακλάται πίσω στον απορροφητήρα και εκεί απορροφάται

ποσοστό  $\tau \alpha (1 - \alpha) \rho_d$ . Το μέγεθος  $\rho_d$  είναι η ανακλαστικότητα της οπίσθιας επιφάνειας του καλύμματος στη διάχυτη ακτινοβολία. Η πολλαπλή ανάκλαση και απορρόφηση συνεχίζεται, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.9 έτσι ώστε το κλάσμα  $(\tau\alpha)$  της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο κάλυμμα που απορροφά η πλάκα απορρόφησης είναι:

$$(\tau\alpha) = \sum_{n=0}^{\infty} ((1 - \alpha) \rho_d)^n = \frac{\tau \cdot \alpha}{1 - (1 - \alpha) \rho_d} \quad (3.44)$$



**Εικόνα 3.9** Απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από την πλάκα απορρόφησης ύστερα από πολλαπλές ανακλάσεις.

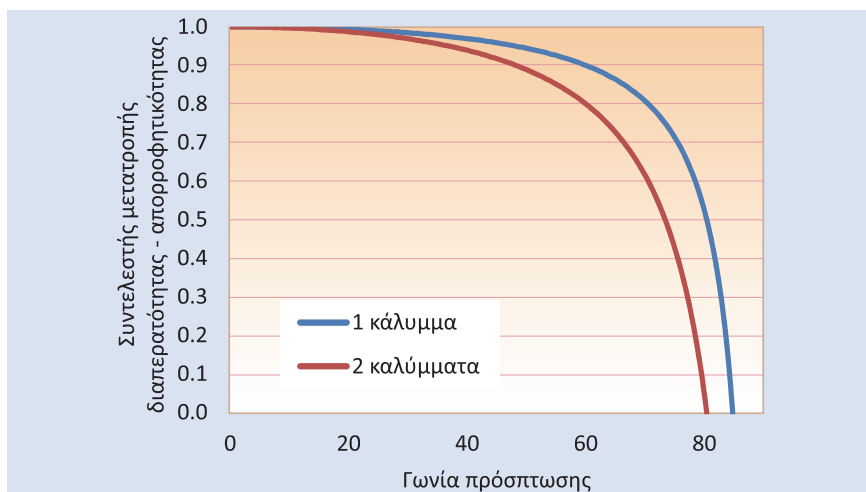
Για πρακτικές εφαρμογές λαμβάνεται  $(\tau\alpha) = 1.01 \cdot \tau \cdot \alpha$ . Χρήση του γινομένου διαπερατότητας-απορροφητικότητας, γίνεται κατά τον υπολογισμό της απορροφούμενης ενέργειας, που εμφανίζεται στην εξίσωση του συλλέκτη (3.1). Το γινόμενο διαπερατότητας-απορροφητικότητας έχει άλλη τιμή ανάλογα με την προέλευση της ακτινοβολίας. Η άμεση ακτινοβολία έχει τιμή  $(\tau\alpha)_b$ , η διάχυτη έχει τιμή  $(\tau\alpha)_d$  και η διάχυτη από αντανάκλαση έχει τιμή  $(\tau\alpha)_g$ . Για την απλοποίηση των πράξεων και επειδή συνήθως δίνεται η ολική τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας, ορίζεται το μέσο γινόμενο  $(\tau\alpha)_m$  για ακτινοβολία ωριαία ή ημερήσια. Άρα η τιμή της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας είναι:

$$S = (\tau\alpha)_m I_T \quad (3.45)$$

Όταν ενδιαφέρει η στιγμιαία απορρόφηση, το γινόμενο διαπερατότητας - απορροφητικότητας μπορεί να υπολογιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια. Η τιμή του γινομένου για συγκεκριμένο κάλυμμα εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης ( $\theta$ ) των ακτινών στο επίπεδο του συλλέκτη. Ο λόγος του γινομένου διαπερατότητας-απορροφητικότητας για μια τυχαία γωνία προς το γινόμενο της κάθετης πρόσπτωσης  $(\tau\alpha)_n$  μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης σύμφωνα με την εξίσωση:

$$K_\theta = \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} = 1 - b_o \left( \frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (3.46)$$

όπου  $K_\theta$  ο συντελεστής μετατροπής του γινομένου διαπερατότητας-απορροφητικότητας και  $b_o$  ένας αδιάστατος συντελεστής που σχετίζεται με τον τύπο του καλύμματος (Εικόνα 3.10).



**Εικόνα 3.10** Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας - απορροφητικότητας ως προς τη γωνία πρόσπτωσης για συλλέκτη με ένα ή δύο γυάλινα καλύμματα.

## Βαθμός απόδοσης συλλέκτη

Η στιγμιαία απορρόφηση του συλλέκτη μπορεί να γραφεί ως:

$$S = (\tau\alpha) G_T \quad (3.47)$$

όπου  $(\tau\alpha)$  είναι το γινόμενο διαπερατότητας-απορροφητικότητας, ενώ  $G_T$  είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ( $W/m^2$ ). Αντικαθιστώντας την απορροφούμενη ακτινοβολία  $S$  από την εξίσωση (3.47) στην εξίσωση του επίπεδου συλλέκτη (3.1) τότε:

$$\dot{q}_u = A_c F_R (G_T (\tau\alpha) - U_L (T_{fi} - T_a)) \quad (3.48)$$

Ως *στιγμιαίος βαθμός απόδοσης του συλλέκτη*  $\eta_i$  ορίζεται ο λόγος της αποδιδόμενης ισχύος  $\dot{q}_u$  προς την αντίστοιχη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ( $A_c G_T$ ). Έτσι προκύπτει τελικά ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης.

$$\eta_i = \frac{\dot{q}_u}{A_c G_T} = F_R (\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_{fi} - T_a)}{G_T} \quad (3.49)$$

ενώ μπορεί να εκφραστεί και ως συνάρτηση των θερμοκρασιών εισόδου  $T_{fi}$  και εξόδου  $T_{fo}$  του ρευστού:

$$\eta_i = \frac{\dot{m} c_p (T_{fo} - T_{fi})}{A_c G_T} \quad (3.50)$$

Όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.39), ο παράγοντας θερμικής απολαβής ( $F_R$ ) του συλλέκτη είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας λόγω εξάρτησης από τον συντελεστή θερμικών απωλειών  $U_L$ . Επομένως, μπορεί να θεωρηθεί κατά προσέγγιση σταθερός για δεδομένο τύπο συλλέκτη και παροχή ρευστού. Επίσης και η τιμή του  $U_L$  είναι χαρακτηριστική του μεγέθους των θερμικών απωλειών για δεδομένο τύπο συλλέκτη. Τέλος, το μέγεθος  $(\tau\alpha)$  είναι ανεξάρτητο της



### Εφαρμογή 3.1

θερμοκρασίας αλλά εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Επειδή όμως το  $(\tau\alpha)$  είναι περίπου σταθερό για γωνίες πρόσπτωσης μικρότερες των  $50^\circ$  λαμβάνεται η τιμή της καθέτου πρόσπτωσης  $(\tau\alpha)_n$  ως χαρακτηριστικό των οπτικών ιδιοτήτων του συλλέκτη.

Σύμφωνα με τα παραπάνω οι δύο παράμετροι  $F_R U_L$  και  $F_R(\tau\alpha)_n$  που εμφανίζονται στην εξίσωση του βαθμού απόδοσης (Εξίσωση (3.49)), είναι σταθερά χαρακτηριστικά της απόδοσης  $\eta_i$  που αποτελεί γραμμική συνάρτηση της μεταβλητής  $(T_{fi} - T_o) / G_T$ . Οι τιμές των παραμέτρων  $F_R U_L$  και  $F_R(\tau\alpha)_n$  προσδιορίζονται πειραματικά και είναι ενδεικτικές για κάθε συλλέκτη.

### 3.3 Βιβλιογραφία

- Chen J., "Physics of solar energy", John Wiley & Sons, 2011.
- Duffie J., Beckman W., "Solar Engineering of Thermal Processes", 3rd Ed., Wiley & Sons, 2006.
- Eicker, U., "Solar Technologies for Buildings", John Wiley & Sons, 2003.
- Gettings M., "The National Energy Audit (NEAT) Engineering Manual", Version 7, Oak Ridge National Laboratory, 2003.
- Hodge B. K., "Alternative Energy Systems and Applications", Wiley & Sons, 2010.
- Kalogirou S., "Solar Energy Engineering: Processes and System", Elsevier/Academic Press, 2009.
- Pohl J., "Building Science: Concepts and Application", Wiley-Blackwell, 2011.
- Ramlow B., Nusz B., "Solar water heating: A comprehensive guide to solar water and space heating systems", New Society Publishers, 2010.
- Αντωνόπουλος Κ., "Θερμικά - Ηλιακά Συστήματα", 2001.
- Βαζαΐος Ε., "Εφαρμογές της Ηλιακής Ενέργειας - Υπολογισμός και Σχεδίαση Συστημάτων", 1990.
- ΚΑΠΕ, "Οδηγός Ηλιακού Κλιματισμού", ΚΑΠΕ, 2004.
- ΚΕΝΑΚ, "Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας 20701-1", Έκδοση Α'/2010, ΤΕΕ, 2010.
- ΚΕΝΑΚ, "Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας 20701-2", Έκδοση Β'/2010, ΤΕΕ, 2010.
- ΚΕΝΑΚ, "Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας 20701-3", Έκδοση Α'/2010, ΤΕΕ, 2012.
- Μοσχάτος Α., "Ηλιακή Ενέργεια - Συνιστώσες της Ηλιακής Θερμικής Διαδικασίας", Εκδόσεις ΤΕΕ, 1992.