

## Κεφάλαιο 3: ΗΛΙΑΚΑ - ΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

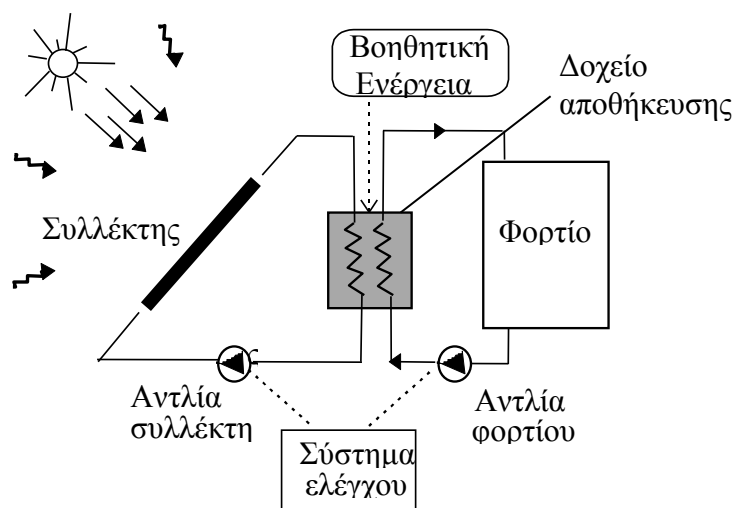
### 3.1 Τυπικό ηλιακό – θερμικό σύστημα

Ένα σύστημα που μετατρέπει ηλιακή ενέργεια σε θερμική ενέργεια ονομάζεται **ηλιακό – θερμικό σύστημα**. Πρόκειται για συστήματα που είναι πολύ διαδεδομένα (ιδιαίτερα στη χώρα μας) και βεβαίως αποτελούν μία τυπική εφαρμογή μεταφοράς θερμότητας που περιλαμβάνει και τους τρεις μηχανισμούς.

Η παραγόμενη θερμότητα αξιοποιείται σε πολλές εφαρμογές μεταξύ των οποίων

- παραγωγή ζεστού νερού (ZNX)
- οικιακή χρήση
- θέρμανση ( και υβριδικά), τηλεθέρμανση, κολυμβητήρια
- χημική βιομηχανία (π.χ. θέρμανση νερού διεργασιών)
- αγροτική βιομηχανία (π.χ. ξήρανση, θερμοκήπια)
- αφαλάτωση νερού
- παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος

Πολλά ηλιακά θερμικά συστήματα αποτελούνται από τον ηλιακό συλλέκτη, την δεξαμενή αποθήκευσης, το φορτίο κατανάλωσης, τους κυκλοφορητές, το σύστημα βοηθητικής ενέργειας, το σύστημα αυτοματισμού - ελέγχου και τις σωληνώσεις που συνδέουν τα επιμέρους τμήματα και συσκευές του συστήματος. Ένα τυπικό ηλιακό θερμικό σύστημα φαίνεται στο Σχήμα 3.1.1.



Σχήμα 3.1.1: Τυπικό ηλιακό θερμικό σύστημα

Η λειτουργία του συστήματος βασίζεται στις εξής σχετικά απλές βασικές αρχές:

- **ηλιακός συλλέκτης**: η προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια του φέροντος ή θερμοαπαγωγού ρευστού (συνήθως νερό)
- **φέρον ρευστό**: μεταφέρει την θερμική ενέργεια από τον συλλέκτη στον εναλλάκτη εντός της δεξαμενής αποθήκευσης

- **μονάδα αποθήκευσης:** αποθηκεύει τη θερμική ενέργεια
- **εναλλάκτης εντός δοχείου αποθήκευσης:** μεταφέρει την θερμική ενέργεια στο ρευστό χρήσης
- **κυκλοφορητές:** υποστηρίζουν την κίνηση των ρευστών
- **θερμικό φορτίο ζήτησης:** δηλώνει το φορτίο που πρέπει να εξυπηρετήσει το σύστημα
- **βοηθητικό σύστημα:** παρέχει συμπληρωματικά το αναγκαίο θερμικό φορτίο που απαιτείται
- **σύστημα σωληνώσεων και βανών:** υποστηρίζει την κίνηση των ρευστών
- **σύστημα αυτοματισμού και ελέγχου:** ρυθμίζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος

### 3.2 Θερμικά ισοζύγια

Διατυπώνονται τα θερμικά ισοζύγια στα πλέον βασικά τμήματα του συστήματος που είναι ο συλλέκτης, το δοχείο αποθήκευσης και το φορτίο κατανάλωσης.

#### Συλλέκτης

Η χρήσιμη ενέργεια  $\dot{Q}_u$  ενός ηλιακού συλλέκτη εξαρτάται από α) την ικανότητα του συλλέκτη να απορροφήσει το μεγαλύτερο δυνατόν κλάσμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και β) το μέγεθος των θερμικών απωλειών λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας προς το περιβάλλον και γράφεται, όπως θα δούμε στη μορφή

$$\dot{Q}_u(t) = A_{\text{σολ}} q_u(t) = (\tau\alpha)_{\text{eff}} q_S(t) A_{\text{σολ}} - \bar{U} A_{\text{πλ}} (\bar{T}_{\text{πλ}} - T_a) - \varepsilon_{\text{eff}} A_{\text{πλ}} \sigma (\bar{T}_{\text{πλ}}^4 - T_a^4)$$

Ο πρώτος όρος εντός της αγκύλης αντιπροσωπεύει το κλάσμα της ακτινοβολίας που απορροφάται από τον συλλέκτη σε σχέση με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία  $\dot{Q}_S = q_S A_{\text{σολ}}$ . Μία τυπική για τον συνολικό κλάσμα απορρόφησης είναι  $(\tau\alpha)_{\text{eff}} = 0.8$ . Ο δεύτερος όρος εντός της αγκύλης αντιπροσωπεύει τις συνολικές θερμικές απώλειες με αγωγή και συναγωγή ανάμεσα στη πλάκα απορρόφησης του συλλέκτη που βρίσκεται σε θερμοκρασία  $\bar{T}_{\text{πλ}}$  και το περιβάλλον που είναι σε θερμοκρασία  $T_a$ , ενώ  $\bar{U}$  είναι ο συνολικός μέσος συντελεστής θερμικών απωλειών. Τέλος, ο τρίτος όρος είναι οι θερμικές απώλειες λόγω υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπει η πλάκα απορρόφησης και συνήθως είναι μικρός σε σχέση με τον δεύτερο όρο, όταν η θερμοκρασία στη πλάκα απορρόφησης δεν είναι μεγαλύτερη των 100°C. Η ποσότητα  $\varepsilon_{\text{eff}} \leq 1$  δεν είναι ο συντελεστής εκπομπής  $\varepsilon$  της πλάκας απορρόφησης αλλά μία πιο σύνθετη ποσότητα περιλαμβάνει και το  $\varepsilon$ . Όσο βελτιώνεται ο σχεδιασμός του συλλέκτη τόσο μειώνεται το  $\varepsilon_{\text{eff}}$ . Για επίπεδους συλλέκτες  $A_{\text{σολ}} = A_{\text{πλ}}$ , ενώ για κυλινδρικούς  $A_{\text{σολ}} \neq A_{\text{πλ}}$  ( $A_{\text{πλ}}$  είναι το εμβαδό της πλάκας απορρόφησης, ενώ  $A_{\text{σολ}}$  το εμβαδόν όλων των ανοιγμάτων του συλλέκτη συμπεριλαμβανομένης της πλάκας απορρόφησης όπου προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία).

Ο συντελεστής απόδοσης του συλλέκτη είναι ο λόγος της χρήσιμης θερμικής ενέργειας  $Q_u$  ως προς την διαθέσιμη προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια  $q_S A_{\text{σολ}}$ , δηλαδή

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A_{\sigma\lambda} q_S} = (\tau\alpha)_{eff} - \frac{\bar{U}A_{\pi\lambda}(\bar{T}_{\pi\lambda} - T_a)}{q_S A_{\sigma\lambda}} - \frac{\varepsilon_{eff} A_{\pi\lambda} \sigma (\bar{T}_{\pi\lambda}^4 - T_a^4)}{q_S A_{\sigma\lambda}}$$

ή σε αδιάστατη μορφή

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A_{\sigma\lambda} q_S} = (\tau\alpha)_{eff} - \frac{b(\bar{\Theta}_{\pi\lambda} - \Theta_a) + a(\bar{\Theta}_{\pi\lambda}^4 - \Theta_a^4)}{\psi(t)}$$

όπου

$$a = \frac{\varepsilon_{eff} A_{\pi\lambda} \sigma \bar{T}_a^4}{q_{S,ref} A_{\sigma\lambda}}, \quad b = \frac{\bar{U}A_{\pi\lambda} \bar{T}_a}{q_{S,ref} A_{\sigma\lambda}}, \quad \bar{\Theta}_{\pi\lambda} = \frac{\bar{T}_{\pi\lambda}}{T_a}, \quad \Theta_a = \frac{T_a}{T_a}, \quad \psi(t) = \frac{q_S(t)}{q_{S,ref}}$$

Οι ποσότητες  $\bar{T}_a$  και  $q_{S,ref}$  είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία και η προσπίπτουσα ακτινοβολία αναφοράς όπως π.χ. η μέγιστη ακτινοβολία σε μία μέρα με καθαρό ουρανό. Επίσης, αν ο συλλέκτης λειτουργεί σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες ο όρος της ακτινοβολίας απαλείφεται και ο συντελεστής απόδοσης δίδεται από τη γραμμική σχέση

$$\eta = (\tau\alpha)_{eff} - \frac{b(\bar{\Theta}_{\pi\lambda} - \Theta_a)}{\psi(t)}$$

Γενικά, είναι επιθυμητό στο πλαίσιο σχεδιασμού και ελέγχου του συλλέκτη να δώσουμε τον συντελεστή απόδοσης σε σχέση με τη θερμοκρασία  $\Theta_{f,in} = T_{f,in} / \bar{T}_a$  του φέροντος ρευστού στον συλλέκτη. Αυτό επιτυγχάνεται ξαναγράφοντας την εξίσωση του συντελεστή απόδοσης στη μορφή

$$\eta = (\tau\alpha)_{eff} - \frac{b(\bar{\Theta}_{\pi\lambda} - \Theta_a)}{\psi(t)} = F_R \left[ (\tau\alpha)_{eff} - \frac{\bar{U}A_{\pi\lambda} (T_{f,in} - T_a)}{q_S A_{\sigma\lambda}} \right]$$

όπου

$$F_R = \frac{(\tau\alpha)_{eff} - \frac{\bar{U}A_{\pi\lambda} (\bar{T}_{\pi\lambda} - T_a)}{q_S A_{\sigma\lambda}}}{(\tau\alpha)_{eff} - \frac{\bar{U}A_{\pi\lambda} (T_{f,in} - T_a)}{q_S A_{\sigma\lambda}}} = \frac{(\tau\alpha)_{eff} - \frac{b(\bar{\Theta}_{\pi\lambda} - \Theta_a)}{\psi(t)}}{(\tau\alpha)_{eff} - \frac{b(\Theta_{f,in} - \Theta_a)}{\psi(t)}}$$

συνδέει η μέση θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης με την θερμοκρασία εισόδου του φέροντος ρευστού.

Ο συντελεστής  $F_R$  είναι το κλάσμα της πραγματικά ωφέλιμης ενέργειας ως προς τη θερμική ενέργεια του συλλέκτη αν η μέση θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης ήταν ίση με τη θερμοκρασία εισόδου του φέροντος ρευστού στον συλλέκτη.

Με βάση τα παραπάνω το χρήσιμο φορτίο του συλλέκτη γράφεται επίσης στη μορφή

$$\dot{Q}_u(t) = \eta A_{\text{σολ}} q_s(t) = \delta_C \dot{m} c (T_{f,\text{out}} - T_{f,\text{in}})$$

όπου  $\dot{m}$  είναι η μαζική παροχή του φέροντος ρευστού,  $T_{f,\text{out}}$  και  $T_{f,\text{in}}$  οι θερμοκρασίες εξόδου και εισόδου αντίστοιχα του φέροντος ρευστού,  $c$  η ειδική θερμοχωρητικότητα και  $\delta_C$  μία παράμετρος ελέγχου που παίρνει τιμές 1 και 0 ανάλογα εάν η αντλία του κυκλώματος του φέροντος ρευστού είναι ανοικτή (ON) ή κλειστή (OFF) αντίστοιχα.

Με βάση τις δύο τελευταίες εκφράσεις επιλύουμε για την θερμοκρασία εξόδου του φέροντος ρευστού από τον συλλέκτη και βρίσκουμε

$$T_{f,\text{out}} = T_{f,\text{in}} \left( 1 - \frac{F_R b}{\gamma} \right) + \frac{F_R \bar{T}_a}{\gamma} \left[ (\tau\alpha)_{\text{eff}} \psi(t) + b\Theta_a \right], \quad \text{όπου} \quad \gamma = \frac{\delta_C \dot{m} c \bar{T}_a}{A_{\text{σολ}} q_{s,\text{ref}}}$$

Η παράμετρος  $\gamma$  είναι ο λόγος της ικανότητας του φέροντος ρευστού να απάγει ενέργεια από τον συλλέκτη προς την ηλιακή θερμότητα αναφοράς και μεταβάλλεται από το μηδέν μέχρι πολύ μεγάλες τιμές.

Για  $\gamma \rightarrow \infty$  προκύπτει, όπως αναμένεται  $T_{f,\text{out}} = T_{f,\text{in}}$ .

Για  $\gamma \rightarrow 0$ , δηλαδή  $\dot{m}_c \rightarrow 0$  ( $\delta_C = 0$ ) δεν έχουμε ροή και τότε επιλύοντας την εξίσωση του συντελεστή απόδοσης για  $\eta = 0$  δίνει τη θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης για συνθήκες μηδενικής μαζικής παροχής (no-flow or stagnation temperature of plate):

$$T_{\text{stag}} = T_a + \frac{(\tau\alpha)_{\text{eff}} \psi(t)}{b} \bar{T}_a = T_a + \frac{(\tau\alpha)_{\text{eff}} q_s A_{\text{σολ}}}{\bar{U} A_{\pi\lambda}}$$

Ο δεύτερος όρος στη δεξιά πλευρά της εξίσωσης είναι ο λόγος της ηλιακής ενέργειας που απορροφάται προς τις απώλειες ανά βαθμό θερμοκρασίας πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

### Δοχείο αποθήκευσης

Στην απλούστερη περίπτωση θεωρούμε ότι η θερμοκρασία είναι ομοιόμορφη και ότι δεν έχουμε αλλαγή φάσης. Τότε το θερμικό φορτίο που αποθηκεύεται ανά μονάδα χρόνου ισούται με τη διαφορά ανάμεσα σε αυτό που έρχεται από τον συλλέκτη μέσω του φέροντος ρευστού και αυτού που πηγαίνει στην κατανάλωση μέσω του ρευστού χρήσης μείον τις απώλειες του αποθηκευτικού δοχείου. Επίσης, σχετίζεται με την αλλαγή της θερμοκρασίας του ρευστού εντός του δοχείου σύμφωνα με τη σχέση

$$\dot{Q}_{st}(t) = m_{st} c \frac{dT_{st}}{dt}$$

όπου  $\dot{Q}_{st}(t)$  η ισχύς του αποθηκευμένου θερμικού φορτίου,  $T_{st}$  η θερμοκρασία του ρευστού αποθήκευσης,  $m_{st}$  η μάζα του ρευστού αποθήκευσης και  $c$  η θερμοχωρητικότητα του (σημειώνεται ότι σε υγρά και στερεά  $c_p = c_v = c$ ). Στη παρούσα προσέγγιση η μοντελοποίηση αυτή είναι επαρκής αλλά βεβαίως μπορεί να χρησιμοποιηθούν περισσότερο σύνθετα και πιθανώς ακριβή μοντέλα.

## Φορτίο

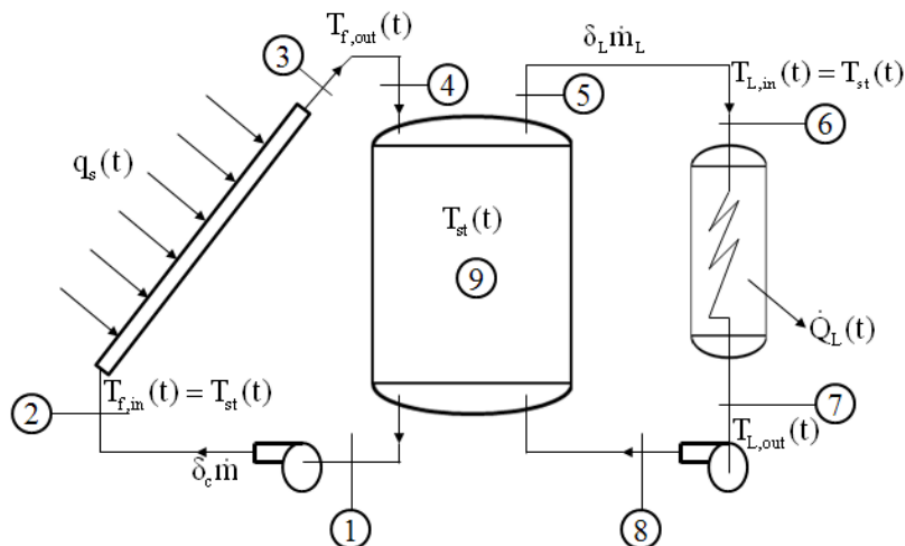
Το θερμικό φορτίο που πρέπει να εξυπηρετηθεί δίδεται από τη σχέση

$$\dot{Q}_L(t) = \delta_L \dot{m}_L c (T_{L,in} - T_{L,out})$$

όπου  $\dot{Q}_L(t)$  είναι το θερμικό φορτίο, που συνήθως δίδεται από τον χρήστη και αποτελεί μία από τις προδιαγραφές που πρέπει να λάβει υπόψη του ο μελετητής,  $\dot{m}_L$  η μαζική παροχή του ρευστού χρήσης (τις περισσότερες φορές είναι νερό) και  $c$  η θερμοχωρητικότητά του, ενώ  $T_{L,in}$  και  $T_{L,out}$  η θερμοκρασία εισόδου και επιστροφής του ρευστού χρήσης από το σύστημα κατανάλωσης. Τέλος, η παράμετρος  $\delta_L$  είναι 1 ή 0 αναλόγως εάν ο κυκλοφορητής είναι ON ή OFF. Για το απλό μοντέλο που εξετάζουμε θεωρούμε ότι  $T_{f,in} = T_{st} = T_{L,in}$ .

### 3.3 Μοντέλο λειτουργίας βασικού ηλιακού – θερμικού συστήματος

Παρουσιάζεται ένα απλό μοντέλο λειτουργίας και ελέγχου ενός απλού ηλιακού-θερμικού συστήματος (βλέπε Σχήμα 3.3.1).



Σχήμα 3.3.1: Απεικόνιση απλού ηλιακού – θερμικού συστήματος

Στη θέση 1 η θερμοκρασία του **φέροντος ρευστού** είναι ίση με τη θερμοκρασία του ρευστού εντός του αποθηκευτικού δοχείου και ίση με  $T_{st}(t)$ . Στη θέση 2 η θερμοκρασία του ρευστού είναι  $T_{f,in}(t)$  και στο παρόν απλό μοντέλο θεωρούμε ότι είναι ίση με  $T_{st}(t)$ , δηλαδή δεν έχουμε θερμικές απώλειες από τη θέση 1 στη θέση 2. Βρίσκουμε τη θερμοκρασία της πλάκας στη περίπτωση μηδενικής παροχής (εξίσωση 1). Στη θέση 3 η θερμοκρασία του ρευστού είναι  $T_{f,out}(t)$  και υπολογίζεται με βάση την εξίσωση (2). Στη θέση 4 η θερμοκρασία του ρευστού είναι  $T_{f,out}(t)$ , δηλαδή δεν έχουμε θερμικές απώλειες από τη θέση 3 στη θέση 4. Η παροχή από τη θέση 1 στη θέση 4 είναι  $\delta_C \dot{m}_C$  όπου  $\delta_C$  είναι μηδέν ή ένα αναλόγως εάν ο κυκλοφορητής είναι ON ή OFF και  $\dot{m}_\Sigma$  η παροχή μάζας του φέροντος ρευστού.

Στη θέση 5 η θερμοκρασία του **ρευστού χρήσης** είναι ίση με τη θερμοκρασία του ρευστού εντός του αποθηκευτικού δοχείου και ίση με  $T_{st}(t)$ . Στη θέση 6 η θερμοκρασία του ρευστού είναι  $T_{L,in}(t)$  και στο παρόν απλό μοντέλο θεωρούμε ότι είναι ίση με  $T_{st}(t)$ , δηλαδή δεν έχουμε θερμικές απώλειες από τη θέση 5 στη θέση 6. Στη θέση 7 η θερμοκρασία του ρευστού είναι  $T_{L,out}(t)$  και υπολογίζεται με βάση την εξίσωση (3). Στη θέση 8 η θερμοκρασία του ρευστού είναι  $T_{L,out}(t)$ , δηλαδή δεν έχουμε θερμικές απώλειες από τη θέση 7 στη θέση 8. Η παροχή από τη θέση 5 στη θέση 8 είναι  $\delta_L \dot{m}_L$  όπου  $\delta_L$  είναι μηδέν ή ένα αναλόγως εάν ο κυκλοφορητής είναι ON ή OFF και  $\dot{m}_L$  η παροχή μάζας του φέροντος ρευστού.

Τέλος, η θερμοκρασία στη θέση 9, δηλαδή εντός του αποθηκευτικού δοχείου είναι  $T_{st}(t)$  και υπολογίζεται με βάση τις εξισώσεις (4) και (5). Από την (5) βρίσκουμε το  $Q_u$  και στη συνέχεια από την (4) το  $\dot{Q}_{st}(t)$  και στη συνέχεια το  $T_{st}(t + \Delta t)$

$$T_{stag} = T_a + \frac{(\tau\alpha)_{eff} \psi(t)}{b} \bar{T}_a = T_a + \frac{(\tau\alpha)_{eff} A_{\sigma\lambda} q_s}{\bar{U}A_{\pi\lambda}} = T_a + \frac{S}{U} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} T_{f,out} &= T_{f,in} e^{-\frac{UWF'L}{\dot{m}c}} + \left( T_a + \frac{S}{U} \right) \left( 1 - e^{-\frac{UWF'L}{\dot{m}c}} \right) \\ &= T_{f,in} \left( 1 - \frac{F_R b}{\gamma} \right) + \frac{F_R \bar{T}_a}{\gamma} \left[ (\tau\alpha)_{eff} \psi(t) + b\Theta_a \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_L(t) = \delta_L \dot{m}_L c (T_{L,in} - T_{L,out}) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{st}(t) = m_{st} c \frac{dT_{st}}{dt} = \delta_C \dot{Q}_u - \delta_L \dot{Q}_L - U_{st} A_{st} (T_{st} - T_a) \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
Q_u &= A \left[ S - U (\bar{T}_{\pi\lambda} - T_a) \right] = F_R A \left[ S - U (T_{f,in} - T_a) \right] = \\
&= \dot{m}c (T_{f,out} - T_{f,in}) = A \left[ (\tau\alpha)_{eff} q_S - U (\bar{T}_{\pi\lambda} - T_a) \right]
\end{aligned} \tag{5}$$

Με βάση την παραπάνω περιγραφή μοντελοποιείται η χρονικά μεταβαλλόμενη λειτουργία του συστήματος. Βεβαίως θα πρέπει να γνωρίζουμε και να δώσουμε σαν δεδομένα τα στοιχεία του συλλέκτη, όπως τα μεγέθη  $A$ ,  $F_R$ ,  $U$ ,  $(\tau\alpha)_{eff}$ , κ.τ.λ., τις παροχές ροής και τις ιδιότητες του φέροντος ρευστού και του ρευστού χρήσης, τα χαρακτηριστικά του δοχείου αποθήκευσης  $m_{st}$ ,  $U_{st}$ ,  $A_{st}$ , κ.τ.λ., τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου  $T_a(t)$ , το θερμικό φορτίο χρήσης  $\dot{Q}_L$ , το ηλιακό φορτίο  $q_S(t)$ , κ.τ.λ. Στη συνέχεια προσδιορίζουμε τη θερμοκρασία  $T_{st}(t)$  για τη αρχική χρονική στιγμή και επιλύουμε για την θερμοκρασία  $T_{st}(t + \Delta t)$ , όπου  $\Delta t$  δηλώνει το χρονικό βήμα, από τη θέση 1 προς τη θέση 9 με βάση το Σχήμα 3.3.1 και τις εξισώσεις (1-5). Συμπληρωματικά θα χρειαστούμε για το σύστημα ελέγχου τη θερμοκρασία που θα έχει η πλάκα απορρόφησης για τη περίπτωση που η μαζική παροχή του φέροντος ρευστού είναι μηδέν και που προκύπτει από την εξίσωση (1).

Το σύστημα ελέγχου της λειτουργίας μπορεί να είναι το εξής:

- Εάν  $T_{stag}(t) - T_{f,in}(t) \geq 6$  και  $T_{f,out} - T_{f,in} \geq 2$  τότε  $\delta_\Sigma = 1$
- Εάν  $T_{f,out} - T_{f,in} < 2$  και  $T_{stag}(t) > T_{stag,max}$  τότε  $\delta_\Sigma = 0$
- Εάν  $\frac{\dot{Q}_L(t)}{\dot{m}_L c} = T_{L,in} - T_{L,out} = \Delta T_L < 2$  ή  $T_{st} < T_{st,min}$  τότε  $\delta_\Phi = 0$
- Εάν  $\frac{\dot{Q}_L(t)}{\dot{m}_L c} \geq 2$  τότε  $\delta_L = 1$

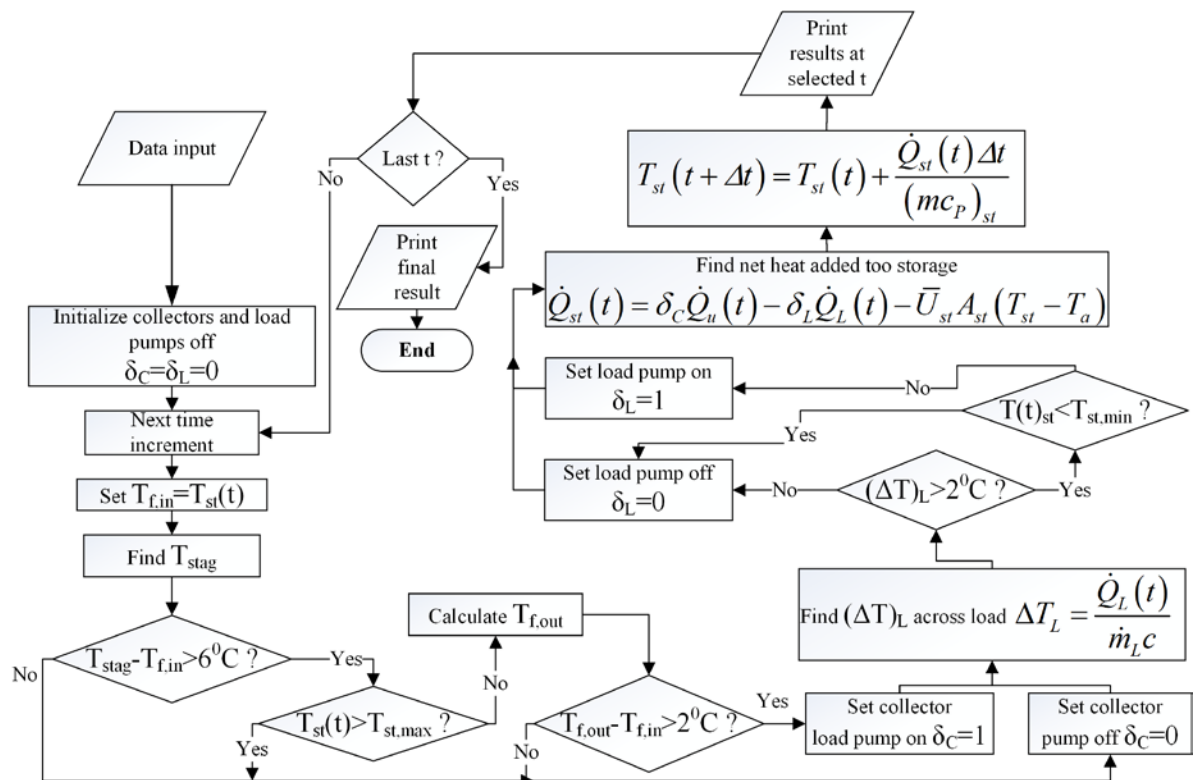
Τα παραπάνω περιλαμβάνονται στο λογικό διάγραμμα του Σχήματος 3.3.2 που μοντελοποιεί την λειτουργία και έλεγχο ενός απλού θερμικού – ηλιακού συστήματος.

Στη συνέχεια με βάση το διάγραμμα ροής είναι σχετικά εύκολο να γίνει ο προγραμματισμός σε κάποια γλώσσα όπως για παράδειγμα σε Fortran.

Με βάση το διάγραμμα ροής προγραμματίζεται η λειτουργία και ο έλεγχος του ηλιακού θερμικού συστήματος.

- Εισάγονται τα δεδομένα που περιλαμβάνουν την διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, τα χαρακτηριστικά του συλλέκτη και του δοχείου αποθήκευσης και βεβαίως τις απαιτήσεις του φορτίου.
- Το πρόγραμμα επιστρέφει τη θερμοκρασία του δοχείου αποθήκευσης, τη θερμοκρασία του φέροντος ρευστού στην έξοδο του συλλέκτη, το χρήσιμο φορτίο και το φορτίο αποθήκευσης, όπως και άλλα μεγέθη που είναι χρήσιμα στον έλεγχο του συστήματος.

- Τέλος, αλλάζοντας τα δεδομένα είναι εφικτή η βελτιστοποίηση του ηλιακού θερμικού συστήματος μέσω παραμετρικής ανάλυσης.



Σχήμα 3.3.2: Διάγραμμα ροής βασικού θερμικού – ηλιακού συστήματος

Σημειώνεται ότι το απλό μοντέλο που περιγράφεται δύναται να εφαρμοστεί μετά από σειρά στοχευμένων αλλαγών σε διάφορα ηλιακά θερμικά συστήματα, όπως

**Α) Οικιακά συστήματα ζεστού νερού χρήσης** (στη μοντελοποίηση του φορτίου πρέπει να εξασφαλίζεται συνεχή παροχή ζεστού νερού σε σταθερή θερμοκρασία με εγκατάσταση βάνια ανάμιξης με κρύο νερό)

**Β) Συστήματα υψηλών θερμοκρασιών** (στη μοντελοποίηση του συλλέκτη πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας ενώ σε συγκεντρωτικούς συλλέκτες λαμβάνεται υπόψη μόνο η απευθείας και όχι η διάχυτη ακτινοβολία)

**Γ) Ηλιακά θερμικά συστήματα παραγωγής έργου μέσω θερμικών μηχανών** (στη μοντελοποίηση πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η απόδοση του συλλέκτη μειώνεται όσο αυξάνει η θερμοκρασία, ενώ συμβαίνει το αντίθετο στην απόδοση των θερμικών μηχανών και να αναζητείται η βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας)



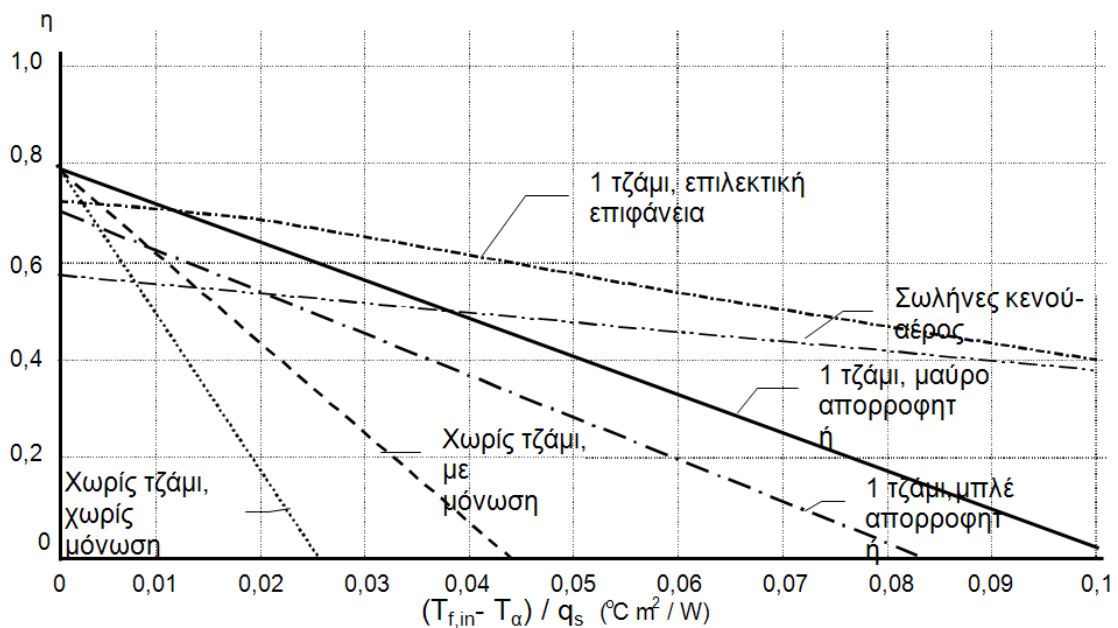
### 3.4 Απόδοση και έλεγχος προδιαγραφών επίπεδου συλλέκτη

Στο σημείο αυτό είναι χρήσιμο να γίνει μία σύντομη ανακεφαλαίωση των πλέον σημαντικών εκφράσεων που περιγράφουν ένα τυπικό ηλιακό – θερμικό σύστημα που περιλαμβάνει επίπεδο συλλέκτη ( $A_{\sigma\lambda} = A_{\pi\lambda} = A$ ), μονάδα αποθήκευσης και το σύστημα κατανάλωσης που πρέπει να εξυπηρετηθεί. Οι εκφράσεις που ορίζουν τα θερμικά φορτία, τις θερμοκρασίες και τους συντελεστές απόδοσης του εναλλάκτη και του συστήματος είναι συνοψίζονται στο Πίνακα 3.4.1.

Πίνακας 3.4.1: Βασικές εξισώσεις ηλιακού – θερμικού συστήματος

$S = (\tau\alpha)_{eff} q_s$			
$Q_u = q_u A = A [S - U(\bar{T}_{\pi\lambda} - T_a)] = F_R A [S - U(T_{f,in} - T_a)] = F' A [S - U(T_f - T_a)] = \dot{m}c(T_{f,out} - T_{f,in})$			
$\dot{Q}_L(t) = \delta_L \dot{m}_L c(T_{L,in} - T_{L,out})$			
$\dot{Q}_{st}(t) = m_{st} c \frac{dT_{st}}{dt} = \delta_C \dot{Q}_u - \delta_L \dot{Q}_L - U_{st} A_{st} (T_{st} - T_a)$			
$F_R = \frac{(\tau\alpha)_{eff} \frac{U(\bar{T}_{\pi\lambda} - T_a)}{q_s}}{(\tau\alpha)_{eff} \frac{U(T_{f,in} - T_a)}{q_s}} = \frac{(\tau\alpha)_{eff} \frac{b(\bar{\Theta}_{\pi\lambda} - \Theta_a)}{\psi}}{(\tau\alpha)_{eff} \frac{b(\Theta_{f,in} - \Theta_a)}{\psi}}$	$\Theta = \frac{T}{T_a}$	$\psi = \frac{q_s}{q_{s,ref}}$	$b = \frac{U\bar{T}_a}{q_{s,ref}}$
$F' = \frac{(\tau\alpha)_{eff} \frac{U(\bar{T}_{\pi\lambda} - T_a)}{q_s}}{(\tau\alpha)_{eff} \frac{U(T_f - T_a)}{q_s}}$			
$T_{f,out} = T_{f,in} \left(1 - \frac{F_R b}{\gamma}\right) + \frac{F_R \bar{T}_a}{\gamma} [(\tau\alpha)_{eff} \psi(t) + b\Theta_a] = T_{f,in} e^{-\frac{UAF'}{\dot{m}c}} + \left(T_a + \frac{S}{U}\right) \left(1 - e^{-\frac{UAF'}{\dot{m}c}}\right)$			
$\bar{T}_f = T_{f,in} + \frac{Q_u}{AU} \frac{1}{F_R} \left(1 - \frac{F_R}{F'}\right)$			
$\bar{T}_{\pi\lambda} = T_{f,in} + \frac{Q_u}{AU} \frac{(1 - F_R)}{F_R}$			
$T_{stag} = T_a + \frac{(\tau\alpha)_{eff} \psi(t)}{b} \bar{T}_a = T_a + \frac{(\tau\alpha)_{eff} q_s}{U} = T_a + \frac{S}{U}$			
$\eta = \frac{Q_u}{Aq_s} = (\tau\alpha)_{eff} \frac{U(\bar{T}_{\pi\lambda} - T_a)}{q_s} = (\tau\alpha)_{eff} \frac{b(\bar{\Theta}_{\pi\lambda} - \Theta_a)}{\psi} =$ $= F_R \left[ (\tau\alpha)_{eff} \frac{U(T_{f,in} - T_a)}{q_s} \right] = F_R \left[ (\tau\alpha)_{eff} \frac{b(\Theta_{f,in} - \Theta_a)}{\psi} \right] = F' \left[ (\tau\alpha)_{eff} \frac{U(T_f - T_a)}{q_s} \right]$			

Γραφική απεικόνιση του συντελεστή απόδοσης  $\eta$  ως προς τις ποσότητες  $U(T_{f,in} - T_a)/q_s$  ή εναλλακτικά ως προς την αντίστοιχη ποσότητα  $b(\Theta_{f,in} - \Theta_a)/\psi$  για διάφορα συστήματα δίδονται στο Σχήμα 3.4.1. Όπως φαίνεται το  $\eta$  μειώνεται γραμμικά καθώς η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στις θερμοκρασίες εισόδου του φέροντος ρευστού και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος μειώνεται. Είναι προφανές ότι όταν η διαφορά θερμοκρασιών μηδενίζεται τότε  $\eta = F_R(\tau\alpha)_{eff}$ , ενώ όταν  $\eta = 0$  τότε  $(T_{f,in} - T_a)/q_s = (\tau\alpha)_{eff}/U$  ή  $(\Theta_{f,in} - \Theta_a)/\psi = (\tau\alpha)_{eff}/b$ . Επίσης, η κλίση της ευθείας είναι  $-F_R U$  ή  $-F_R b$ . Επομένως, εάν είναι γνωστές οι ποσότητες  $[(\tau\alpha)_{eff}, U, F_R]$  ο συντελεστής απόδοσης του συστήματος προσδιορίζεται. Τα μεγέθη αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά στον σχεδιασμό του συλλέκτη και υπολογίζονται με βάση τη λεπτομερή διαδικασία που περιγράφεται στη Παράγραφο 3.3.



Σχήμα 3.4.1: Βαθμός απόδοσης ηλιακού-θερμικού συστήματος

Οι ποσότητες  $[(\tau\alpha)_{eff}, U, F_R]$  μπορούν να βρεθούν και πειραματικά με μετρήσεις κάνοντας τους εξής τρεις βασικούς εργαστηριακούς ελέγχους:

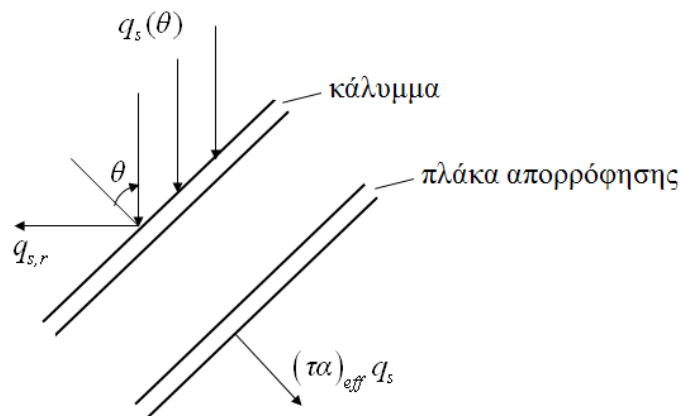
### Έλεγχος διαπερατότητας-απορροφητικότητας συλλέκτη

Έστω ηλιακή ακτινοβολία  $q_s$  προσπίπτει στο κάλυμμα συλλέκτη με γωνία  $\theta$  (Σχήμα 3.4.2). Εάν  $\rho_{καλ}$  είναι η ικανότητα ανάκλασης του καλύμματος και  $q_{s,r}(\theta)$  η ανακλώμενη ακτινοβολία τότε

$$q_s(\theta) = \rho_{καλ} q_s(\theta) + \alpha_{σολ} q_s(\theta) \quad \text{ή} \quad \alpha_{σολ} = 1 = \frac{q_{s,r}(\theta)}{q_s(\theta)}$$

όπου  $\alpha_{σολ}$  είναι η ικανότητα (συντελεστής) απορροφητικότητας όλου του συλλέκτη. Εάν υποθέσουμε ότι  $\alpha_{σολ} \approx (\tau\alpha)_{eff}$  τότε αφού μετρήσουμε με πυρανόμετρο τις ποσότητες  $q_s(\theta)$

και  $q_{s,r}(\theta)$  εκτιμούμε τη ποσότητα  $(\tau\alpha)_{eff}$ . Η διαδικασία αυτή οδηγεί τις περισσότερες φορές σε καλά αποτελέσματα.



Σχήμα 3.4.2: Ακτινοβολίες σχετικές με τον έλεγχο διαπερατότητας-απορροφητικότητας συλλέκτη

### Έλεγχος μηδενικών θερμικών απωλειών

Η λειτουργία του συστήματος ρυθμίζεται στο εργαστήριο ώστε  $T_{f,in} = T_a$ . Τότε οι θερμικές απώλειες μηδενίζονται και από τις εκφράσεις του χρήσιμου θερμικού φορτίου προκύπτει ότι

$$\frac{Q_u}{A} = F_R (\tau\alpha)_{eff} q_s = \dot{m}c (T_{f,out} - T_a)$$

Επομένως αφού μετρήσουμε τις ποσότητες  $q_s$ ,  $\dot{m}$ ,  $T_{f,out}$  και  $T_a$  και έχοντας ήδη υπολογίσει από τον προηγούμενο έλεγχο τη ποσότητα  $(\tau\alpha)_{eff}$  βρίσκουμε το συντελεστή  $F_R$ .

### Έλεγχος μηδενικής ηλιακής ακτινοβολίας

Για το έλεγχο αυτό πρέπει το  $q_s = 0$  και επομένως πραγματοποιείται τη νύχτα ή αφού καλύψουμε με τον συλλέκτη. Τότε, από τις εκφράσεις του χρήσιμου θερμικού φορτίου προκύπτει ότι

$$\frac{Q_u}{A} = -F_R U (T_{f,in} - T_a) = \dot{m}c (T_{f,out} - T_{f,in})$$

Επομένως αφού μετρήσουμε τις ποσότητες  $\dot{m}$ ,  $T_{f,out}$ ,  $T_{f,in}$  και  $T_a$  βρίσκουμε το γινόμενο  $F_R U$  και αφού το  $F_R$  είναι γνωστό από τον προηγούμενο έλεγχο καταλήγουμε στο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $U$ .

Έχει πιστοποιηθεί ότι τα αποτελέσματα των τριών βασικών ελέγχων είναι σε καλή συμφωνία με τα αντίστοιχα που προκύπτουν εφαρμόζοντας τον λεπτομερή

θερμορυστοδυναμικό σχεδιασμό του συλλέκτη και επομένως θεωρούνται αξιόπιστες διαδικασίες για τον εργαστηριακό έλεγχο προδιαγραφών συλλεκτών.

Παράδειγμα 3.4.1: Έστω επίπεδος συλλέκτης έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

$$(\tau\alpha)_{eff} = 0.88, F_R = 0.95, \bar{T}_a = 293 \text{ K}, \varepsilon_{eff} = 0.2, \bar{U} = 2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}), q_{S,ref} = 800 \text{ W}/\text{m}^2$$

$$\text{Φέρον ρευστό: } \dot{m} = 0.30 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{min}) \quad c_p = 4.2 \text{ KJ}/(\text{kg}^\circ\text{C}),$$

Σε μία χρονική στιγμή στη διάρκεια της ημέρας όπου  $T_a = 30^\circ\text{C}$ ,  $q_S = 800 \text{ W}/\text{m}^2$ ,  $T_{f,in} = 80^\circ\text{C}$  να υπολογισθούν α) το ωφέλιμο θερμικό φορτίο και ο συντελεστής απόδοσης με και χωρίς τις απώλειες ακτινοβολίας και β) οι θερμοκρασίες  $T_{f,out}$  και  $T_{stag}$ .

α) Θεωρούμε ότι  $\bar{U} = 2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (θερμικών απωλειών) μόνο με αγωγή και συναγωγή (δεν περιλαμβάνει απώλειες λόγω ακτινοβολίας).

Η θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης προκύπτει από την έκφραση του  $F_R$ :

$$F_R = \frac{(\tau\alpha)_{eff} - \frac{\bar{U}(\bar{T}_{\pi\lambda} - T_a)}{q_s}}{(\tau\alpha)_{eff} - \frac{\bar{U}(T_{f,in} - T_a)}{q_s}} \Rightarrow \bar{T}_{\pi\lambda} = 368.1 \text{ K} = 95.1^\circ\text{C}$$

Άρα το ωφέλιμο φορτίο είναι:

$$q_u = S - \bar{U}(\bar{T}_{\pi\lambda} - \bar{T}_a) = (\tau\alpha)_{eff} q_s - \bar{U}(\bar{T}_{\pi\lambda} - T_a) - \varepsilon_{eff} \sigma (\bar{T}_{\pi\lambda}^4 - T_a^4) = 461.2 \text{ W}/\text{m}^2$$

$$\text{Βαθμός απόδοσης: } \eta = \frac{q_u}{q_s} = \frac{461.2}{800} = 0.57$$

$$\text{Οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας είναι } q_{rad} = \varepsilon_{eff} \sigma (\bar{T}_{\pi\lambda}^4 - T_a^4) = 110.7 \text{ W}/\text{m}^2$$

Το ωφέλιμο θερμικό φορτίο χωρίς απώλειες ακτινοβολίας είναι:

$$q = q_u + q_{rad} = 573 \text{ W}/\text{m}^2 \Rightarrow \eta = 0.72$$

$$\beta) T_{stag} = T_a + \frac{(\tau\alpha)_{eff} q_s}{\bar{U}} = 303 + \frac{0.88 \times 800}{2} = 303 + 352 \Rightarrow T_{stag} = 655 \text{ K} = 382^\circ\text{C}.$$

$$b = \frac{T_a \bar{U}}{q_{S,ref}} = 0.73 \quad \theta_a = \frac{T_a}{\bar{T}_a} = 1.034 \quad \gamma = \frac{\dot{m} c_p \bar{T}_a}{q_{S,ref}} \Rightarrow \gamma = 7.69$$

$$T_{f,out} = T_{f,in} \left( 1 - \frac{F_R b}{\gamma} \right) + \frac{F_R \bar{T}_a}{\gamma} \left( (\tau\alpha)_{eff} + b \theta_a \right) \Rightarrow T_{f,out} = 380 \text{ K} = 107^\circ\text{C}$$

Παράδειγμα 3.4.2: Έστω επίπεδος συλλέκτης με  $F_R = 0.9$ ,  $(\tau\alpha)_{eff} = 0.88$ ,  $\bar{U} = 8.1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Τοποθετούμε ένα ειδικό υλικό από κηρήθρα ανάμεσα στο κάλυμμα και την πλάκα απορρόφησης και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αλλάξουν τα χαρακτηριστικά του συλλέκτη.

Οι νέες τιμές είναι:  $F_R = 0.9$ ,  $(\tau\alpha)_{eff} = 0.85$ ,  $\bar{U} = 7.2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

i. Εξηγήστε γιατί με τη προσθήκη του υλικού οι τιμές των  $F_R$ ,  $(\tau\alpha)_{eff}$  και  $\bar{U}$  μεταβάλλονται με το συγκεκριμένο τρόπο.

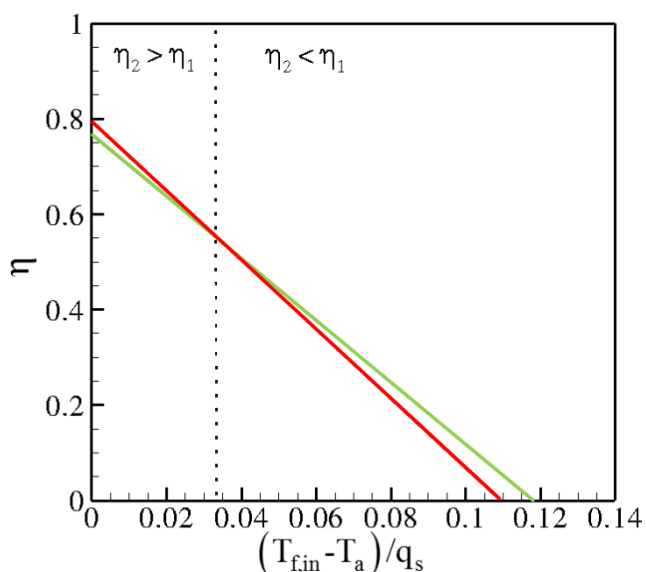
- Με την προσθήκη υλικού το  $(\tau\alpha)_{eff}$  μειώνεται επειδή μειώνεται το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από τον συλλέκτη.
- Με τη προσθήκη υλικού παρατηρείται μείωση των απωλειών λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας και επομένως μειώνεται ο συντελεστής  $\bar{U}$ .
- Το  $F_R$  ορίζεται ως το ενεργειακό όφελος προς το αντίστοιχο ενεργειακό όφελος όταν  $\bar{T}_{\pi\lambda} = T_{f,in}$  και δεν μεταβάλλεται από την εισαγωγή υλικού.

ii. Γιατί με τη προσθήκη του υλικού ο συντελεστής απόδοσης του συλλέκτη αυξάνεται για κάποιες τιμές του  $(T_{f,in} - T_a)/q_s$  και μειώνεται σε άλλες και ποιες είναι οι συγκεκριμένες τιμές?

$$\text{Βαθμός απόδοσης: } \eta = F_R \left[ (\tau\alpha)_{eff} - \frac{U(T_{f,in} - T_a)}{q_s} \right]$$

**Χωρίς προσθήκη υλικού ( $\eta_2$  - κόκκινη γραμμή):**  $F_R (\tau\alpha)_{eff} = 0.792$ ,  $\frac{U}{F_R} = 0.109$

**Με προσθήκη υλικού ( $\eta_1$  - μπλε γραμμή):**  $F_R (\tau\alpha)_{eff} = 0.765$ ,  $\frac{U}{F_R} = 0.118$



Για να ισχύει  $\eta_2 > \eta_1 \Rightarrow$

$$F_R \left[ (\tau\alpha)'_{eff} - \frac{\bar{U}'(T_{f,in} - T_a)}{q_s} \right] > F_R \left[ (\tau\alpha)''_{eff} - \frac{\bar{U}''(T_{f,in} - T_a)}{q_s} \right] \Rightarrow \frac{(T_{f,in} - T_a)}{q_s} < 0.0333$$

- Παρατηρούμε ότι με τη προσθήκη υλικού, καθώς τα  $(\tau\alpha)_{eff}$  και  $\bar{U}$  μειώνονται, ο συντελεστής απόδοσης  $\eta$  μειώνεται σε μικρές θερμοκρασιακές διαφορές  $T_{f,in} - T_a$  και αυξάνει σε μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές  $T_{f,in} - T_a$ .
- Επομένως σε μικρά  $T_{f,in} - T_a$  η μείωση του  $(\tau\alpha)_{eff}$  είναι σημαντικότερη από τη μείωση (βελτίωση) του  $\bar{U}$ , ενώ σε μεγάλα  $T_{f,in} - T_a$  το  $\bar{U}$  είναι πιο σημαντικό από το  $(\tau\alpha)_{eff}$ .

iii. Για  $T_{f,in} = 60^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 26^\circ\text{C}$ ,  $q_s = 850 \text{ W/m}^2$  και εάν το κόστος ανά μονάδα επιφάνειας είναι το ίδιο, ποιος από τους δύο συλλέκτες είναι ο πλέον αποδοτικός?

$$\eta_1 = F_R \left[ (\tau\alpha)'_{eff} - \frac{\bar{U}'(T_{f,in} - T_a)}{q_s} \right] = 0.9 \left[ 0.88 - \frac{8.1(60 - 26)}{850} \right] = 0.5004$$

$$\eta_2 = F_R \left[ (\tau\alpha)''_{eff} - \frac{\bar{U}''(T_{f,in} - T_a)}{q_s} \right] = 0.9 \left[ 0.85 - \frac{7.2(60 - 26)}{850} \right] = 0.5058$$

Ο δεύτερος συλλέκτης με προσθήκη υλικού έχει καλύτερη απόδοση και αφού το κόστος είναι το ίδιο αποτελεί καλύτερη επιλογή.

### 3.5 Μέθοδος καμπύλων - $f$

Για τον σχεδιασμό ηλιακών θερμικών συστημάτων έχουν αναπτυχθεί διάφορα πακέτα λογισμικού αλλά μόνο μερικά από αυτά εξειδικεύονται στην βελτιστοποίηση του σχεδιασμού λαμβάνοντας υπόψη το βαθμό απόδοσης και οικονομικούς παράγοντες. Το πλέον γνωστό και ευρέως διαδεδομένο λογισμικό είναι το TRNSYS που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Wisconsin (ΗΠΑ).

Αντιλαμβανόμενοι την ανάγκη για σχετικά ακριβείς υπολογισμούς, χωρίς τη χρήση λογισμικών πακέτων, ερευνητές του Πανεπιστημίου του Wisconsin, μετά από πολλές εφαρμογές του προγράμματος TRNSYS, απέδειξαν ότι για συστήματα ζεστού νερού χρήσης ή/και θέρμανση χώρων, το κλάσμα του ολικού θερμικού φορτίου που θα καλυφθεί από την ηλιακή ενέργεια εξαρτάται από τις παραμέτρους  $X$  και  $Y$  που παρουσιάζονται παρακάτω.

Η μέθοδος είναι γνωστή ως η μέθοδος των **καμπυλών- $f$**  ( $f$ -chart method: monthly solar fraction calculation procedure). που χρησιμοποιείται ευρέως για την εμπειρική εκτίμηση του μεγέθους ενός ηλιακού-θερμικού συστήματος. Παρόμοιες μέθοδοι που βοηθούν στον σχεδιασμό χωρίς να είναι αναγκαίο να εφαρμοστούν οι λεπτομερείς υπολογισμοί είναι ιδιαίτερα δημοφιλείς για λόγους ευκολίας αλλά όχι απαραίτητα ακριβείς. Η μέθοδος “ $f$ -chart” είναι από τις πλέον διαδεδομένες και **βασίζεται στον υπολογισμό του κλάσματος του φορτίου (συμβολίζεται με  $f$ ) που καλύπτεται από τη ηλιακή ενέργεια**. Έχει επίσης ενσωματωθεί στο εθνικό και ευρωπαϊκό πρότυπο.

Αρχικά υπολογίζονται τα μεγέθη  $X$  και  $Y$  που εκφράζουν το ποσό των ενεργειακών απωλειών και το ποσό της ενέργειας που μπορεί να αξιοποιήσει ο ηλιακός συλλέκτης αντίστοιχα ως προς το συνολικό θερμικό φορτίο  $Q_L$  του μήνα. Οι λεπτομερείς εκφράσεις των  $X$  και  $Y$  είναι:

$$X = \frac{A}{Q_L} F_R \bar{U} (T_{ref} - \bar{T}_a) \frac{F'_R}{F_R} N_{hr} K_1 K_2 K_3 = \frac{\text{θερμικές}_\text{-απώλειες}_\text{-συλλέκτη}}{\text{συνολικό}_\text{-θερμικό}_\text{-φορτίο}}$$

$$Y = \frac{A F_R (\tau\alpha)_{eff} S}{Q_L} \frac{F'_R}{F_R} K_4 = \frac{\text{απορρόφούμενη}_\text{-ενέργεια}_\text{-από}_\text{-συλλέκτη}}{\text{συνολικό}_\text{-θερμικό}_\text{-φορτίο}}$$

$A$  (m<sup>2</sup>): επιφάνεια συλλέκτη (~1 m<sup>2</sup> για κάθε άτομο)

$S$  (kWh/m<sup>2</sup>/month): προσπίπτουσα ακτινοβολία στον συλλέκτη εντός ενός μηνός

$Q_L$  (kWh/month): μηνιαίο φορτίο

$F_R$ ,  $\bar{U}$  (kW/m<sup>2</sup>°C),  $(\tau\alpha)_{eff}$ : χαρακτηριστικά μεγέθη του συλλέκτη

$F'_R / F_R$ : διορθωτικός συντελεστής

$T_{ref} = 100^\circ\text{C}$ : θερμοκρασίας αναφοράς που ορίζεται αυθαίρετα

$\bar{T}_a$  (°C): μέση μηνιαία θερμοκρασία 24ώρου

$N_{hr}$  (hr): συνολικός αριθμός ωρών για τον συγκεκριμένο μήνα

$K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$ : συντελεστές που έχουν διορθωτικό χαρακτήρα ανάλογα με το συγκεκριμένο σύστημα

Συντελεστής  **$K_1$**  (air collector capacitance factor):

$$\text{Νερό: } K_1 = 1 \quad \text{Αέρας: } K_1 = 0.51 \left( C_{σνλ} / A_{σνλ} \right),$$

$$\text{όπου } C_{σνλ} = mc \text{ [kW/}^\circ\text{C]} \text{ του κυκλώματος του συλλέκτη, } C_{σνλ} / A_{σνλ} \text{ σε kW/(m}^2\text{ }^\circ\text{C)}$$

Συντελεστής  **$K_2$**  (storage capacitance factor for liquid and air heating systems):

$$\text{Νερό: } K_2 = 4.19 \left[ (m_{st} c_{st}) / A_{σνλ} \right]^{-0.25} \quad \text{Αέρας: } K_2 = 5.51 \left[ (m_{st} c_{st}) / A_{σνλ} \right]^{-0.3}$$

$$\text{όπου } (m_{st} c_{st}) \text{ [kJ/}^\circ\text{C]} \text{ το γινόμενο αποθηκευμένης μάζας επί ειδική θερμοχωρητικότητα}$$

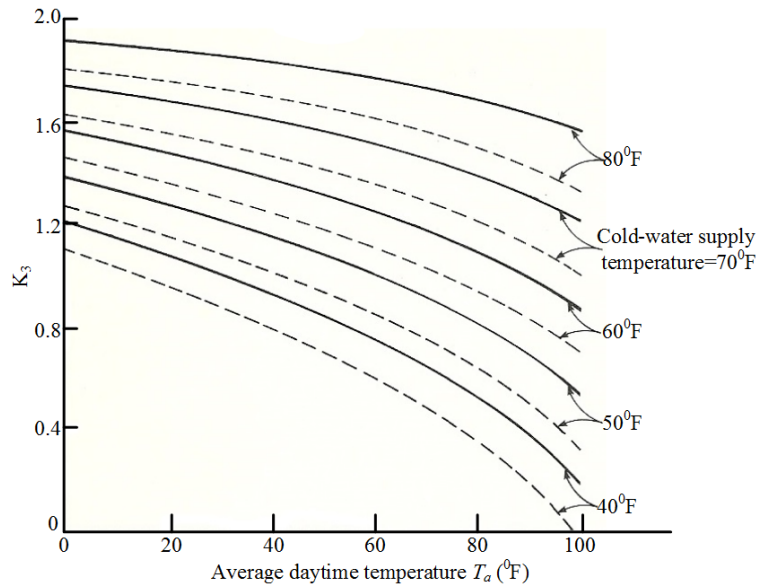
Συντελεστής  **$K_4$**  (load heat exchanger factor for liquid heating systems):

$$\text{Αέρας: } K_4 = 1 \quad \text{Νερό: } K_4 = 1.05 - 0.088 \left[ \varepsilon_L C_{\min} / (UA)_{bldg} \right]^{-0.78},$$

όπου  $\varepsilon_L$  ο συντελεστής απόδοσης του εναλλάκτη φορτίου,  $(UA)_{bldg}$  [kW/°C] ο ρυθμός θερμικών απωλειών ανά °C και  $C_{\min} = [\dot{m}_L c_L]_{\min}$  [kW/°C] (ελάχιστη θερμική χωρητικότητα εναλλάκτη φορτίου).

Συντελεστής  $K_3$  (hot water factor for hot water systems):

λαμβάνει υπόψη τις θερμοκρασίες του νερού  $T_{\text{δίκτυου}}$  από το δίκτυο και προς τη ζήτηση  $T_{L,in}$  σε σχέση με τη μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος  $\bar{T}_a$  σύμφωνα με το Σχήμα 1.5.



Σχήμα 3.5.1: Συντελεστής ζεστού νερού  $K_3$  (solid line:  $T_{L,in} = 140^\circ\text{F}$ , dashed line:  $T_{L,in} = 120^\circ\text{F}$ )

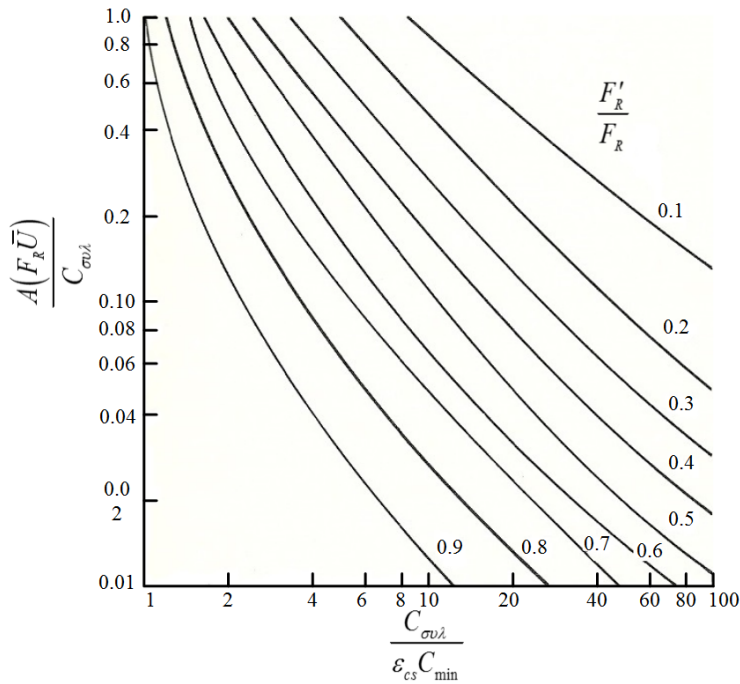
Για συστήματα **αποκλειστικά ZNX**, χωρίς ηλιακή θέρμανση, η παράμετρος  $X$  διορθώνεται ως εξής:

$$X_{ZNX} = X \frac{(11.6 + 1.18T_{L,in} + 3.86T_{\text{δίκτυου}} - 2.32\bar{T}_a)}{(T_{ref} - \bar{T}_a)} \quad (\text{οι θερμοκρασίες σε } ^\circ\text{C})$$

Τέλος ο λόγος  $F'_R / F_R$  υπολογίζεται από το Σχήμα 3.5.2 ή εναλλακτικά με βάση την μεθοδολογία που παρουσιάζεται στη παράγραφο 3.6. Στο Σχήμα 3.5.2,  $\varepsilon_{CS}$  είναι ο συντελεστής απόδοσης του εναλλάκτη στο κύκλωμα του συλλέκτη,  $C_{σολ} = \dot{m}c$  είναι η θερμική χωρητικότητα συλλέκτη και  $C_{\min}$ : ελάχιστη θερμική χωρητικότητα των κυκλωμάτων συλλέκτη ή δοχείου αποθήκευσης.

Στις σχέσεις των μεγεθών  $X$  και  $Y$  οι περισσότερες ποσότητες έχουν πλέον ορισθεί. Επίσης, η θερμοκρασία αναφοράς ορίζεται σε  $T_{ref} = 100^\circ\text{C}$ , η χρονική περίοδος  $N_{hr}$  είναι οι ώρες κάθε μήνα και οι συντελεστές  $K$  έχουν διορθωτικό χαρακτήρα ανάλογα με το συγκεκριμένο σύστημα.





Σχήμα 3.5.2: Διορθωτικός λόγος  $F'_R / F_R$  συλλέκτη

Στη συνέχεια το ποσοστό  $f$  του φορτίου που καλύπτεται από τη ηλιακή ενέργεια βρίσκεται από τα διαγράμματα  $f$  που έχουν εκπονηθεί το Πανεπιστήμιο του Wisconsin εφαρμόζοντας για μεγάλο αριθμό συστημάτων τον λεπτομερή θερμοδυναμικό σχεδιασμό με βάση το λογισμικό TRANSYS. Τυπικά διαγράμματα  $f$  φαίνονται στα Σχήματα 3.5.3 και 3.5.4. Γενικά, είναι καλό το  $f$  να παίρνει τιμές όχι κοντά στο 1 και 0. Εάν είναι κοντά στο 0 τότε το συγκεκριμένο ηλιακό-θερμικό σύστημα δεν καλύπτει το απαιτούμενο θερμικό φορτίο, ενώ εάν είναι κοντά στο 1 το θερμικό φορτίο υπερκαλύπτεται και το συγκεκριμένο ηλιακό-θερμικό σύστημα θα έχει υψηλό κόστος εγκατάστασης και καλό είναι για οικονομικούς λόγους να μειωθεί το μέγεθος του συστήματος (π.χ. η επιφάνεια των συλλεκτών).

Τα  $X$ ,  $Y$  παίρνουν τιμές μεταξύ των διαστημάτων  $0 < X < 18$  και  $0 < Y < 3$ . Εναλλακτικά των καμπύλων-  $f$  εφαρμόζονται οι εξής εκφράσεις:

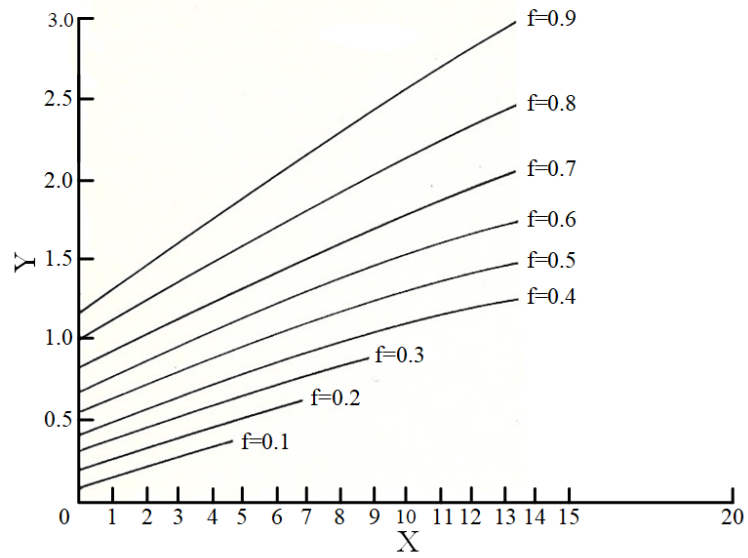
$$\text{Νερό: } f = 1.029Y - 0.065X - 0.245Y^2 + 0.0018X^2 + 0.0215Y^3$$

$$\text{Αέρας: } f = 1.040Y - 0.065X - 0.159Y^2 + 0.00187X^2 - 0.0095Y^3$$

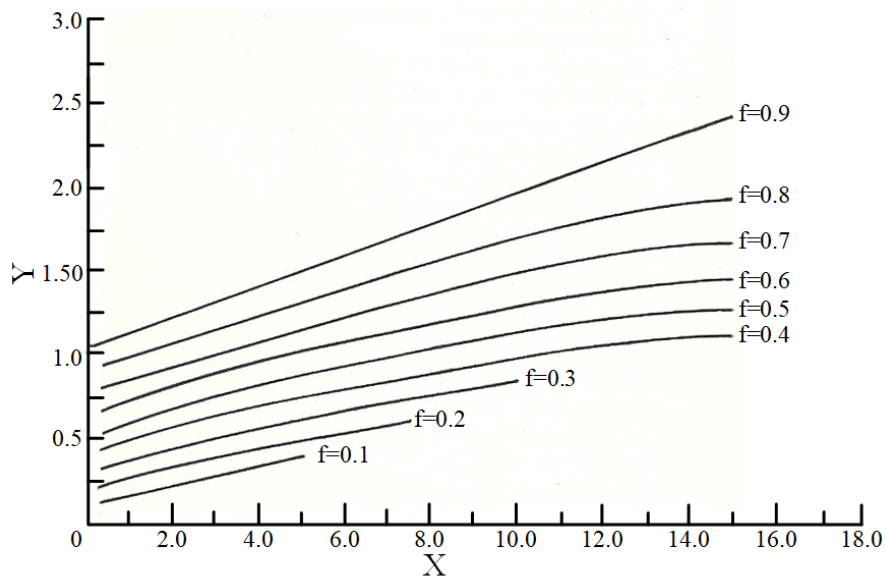
Επίσης, ισχύουν οι παρακάτω ορισμοί:

**Μέση μηνιαία ωφέλιμη ενέργεια:**  $f \times Q_L$

$$\text{Μέση ετήσια κάλυψη: } F = \frac{\sum_{i=1}^{12} f_i Q_{L,i}}{\sum_{i=1}^{12} Q_{L,i}} = \frac{\text{άθροισμα τιμών μέσης μηνιαίας ωφέλιμης ενέργειας}}{\text{μέσο ετήσιο φορτίο}}$$



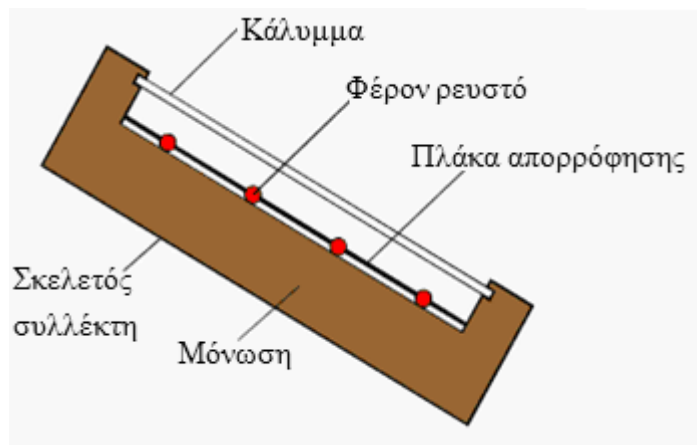
Σχήμα 3.5.3: Οι καμπύλες  $f$  σε συνάρτηση με τις παραμέτρους  $X$  και  $Y$  για σύστημα ηλιακής θέρμανσης με **υγρό**.



Σχήμα 3.5.4: Οι καμπύλες  $f$  σε συνάρτηση με τις παραμέτρους  $X$  και  $Y$  για σύστημα ηλιακής θέρμανσης με **αέρα**.

### 3.6 Σχεδιασμός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη

Οι επίπεδοι συλλέκτες είναι οι πλέον συνηθισμένοι και χρησιμοποιούνται ευρέως για την θέρμανση νερού χρήσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6.1 αποτελούνται από τα εξής τμήματα: κάλυμμα, πλάκα απορρόφησης (τις περισσότερες φορές από αλουμίνιο), σωλήνες νερού (συνήθως από χαλκό), όπου διέρχεται το θερμοαπαγωγό (φέρον) ρευστό, μόνωση (στη πίσω πλευρά της πλάκας απορρόφησης) και το σκελετό (ή πλαίσιο) συγκράτησης. Επίσης θεωρούμε  $A = A_{\text{συλ}} = A_{\text{πλ}}$



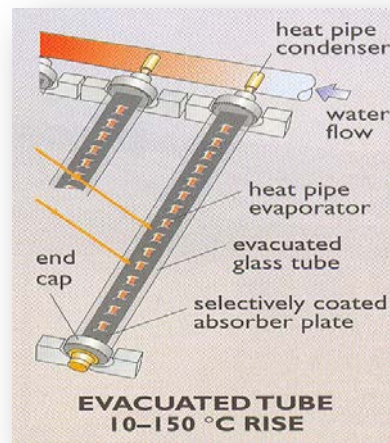
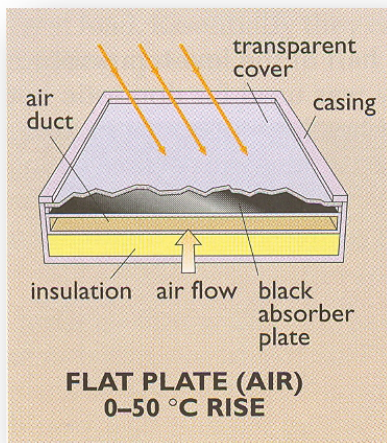
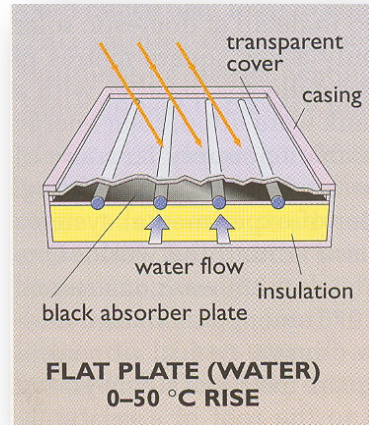
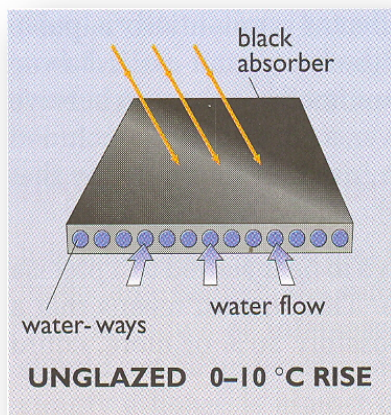
Σχήμα 3.6.1: Κύρια τμήματα επίπεδου ηλιακού συλλέκτη

Η ηλιακή ακτινοβολία διέρχεται από το κάλυμμα και απορροφάται από την πλάκα απορρόφησης αυξάνοντας τη θερμοκρασία της. Η πλάκα απορρόφησης εκπέμπει ακτινοβολία στην υπέρυθη περιοχή η οποία δεν πρέπει να διαπεράσει στο κάλυμμα αλλά αντίθετα να παγιδευτεί εντός του συλλέκτη. Το θερμικό φορτίο μεταφέρεται με αγωγή και συναγωγή από τη πλάκα απορρόφησης στους σωλήνες και στο φέρον ρευστό και μέσω του ρευστού στο δοχείο αποθήκευσης όπου θερμαίνεται το ρευστό χρήσης.

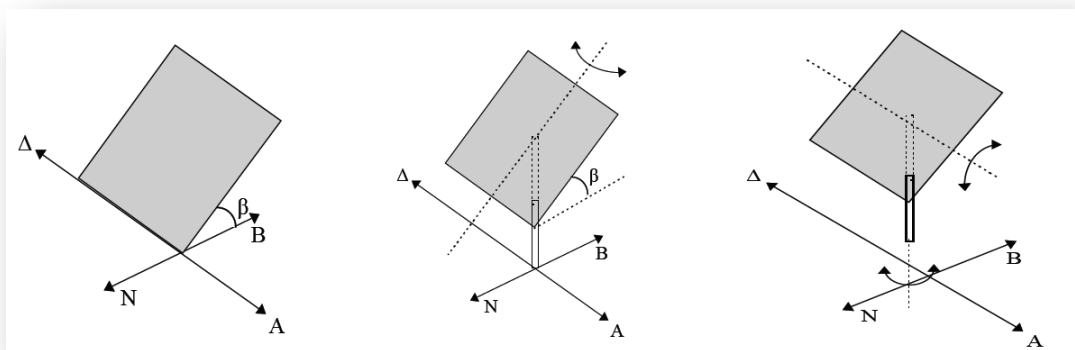
Επομένως, για την αποτελεσματική λειτουργία του συλλέκτη θα πρέπει

- α) το κάλυμμα να είναι διαφανές στην ηλιακή ακτινοβολία και αδιαφανές σε ακτινοβολία με μήκος κύματος  $\lambda > 3 \mu\text{m}$ ,
- β) η πλάκα απορρόφησης να έχει μεγάλη απορροφητικότητα και πολύ μικρή ικανότητα διαπερατότητας και ανάκλασης,
- γ) ο σχεδιασμός να είναι λεπτομερής για ελαχιστοποίηση θερμικών απωλειών,
- γ) οι σωλήνες νερού να έχουν καλή θερμική αγωγιμότητα και
- δ) η μεταφορά θερμικής ενέργειας στο φέρον ρευστό να είναι η μέγιστη δυνατή.

Συνοπτικά είναι επιθυμητό  $(\tau\alpha)_{\text{eff}}$  και  $F_R$  να είναι κοντά στο 1 και  $\bar{U}$  όσο πιο μικρό γίνεται, λαμβάνοντας υπόψη και το οικονομικό κόστος. Οι επίπεδοι συλλέκτες παρέχουν το φέρον ρευστό σε χαμηλές και μέσες θερμοκρασίες θερμοκρασιών  $40 \div 150 \text{ }^\circ\text{C}$ , ανάλογα τον τύπο του επίπεδου συλλέκτη (π.χ. επίπεδος με μονό ή διπλό τζάμι, επίπεδος χωρίς τζάμι, συλλέκτης κενού) αξιοποιώντας την άμεση και διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία. Συναντώνται σε πολλές εφαρμογές όπως θέρμανση νερού χρήσης (ZNX), θέρμανση και ψύξη χώρων, ξήρανση προϊόντων, διαδικασίες απόσταξης, γεωργικές εφαρμογές, αφαλάτωση, κ.τ.λ. Στο Σχήμα 3.6.2 φαίνονται διάφοροι τύποι επίπεδων ηλιακών συλλεκτών.

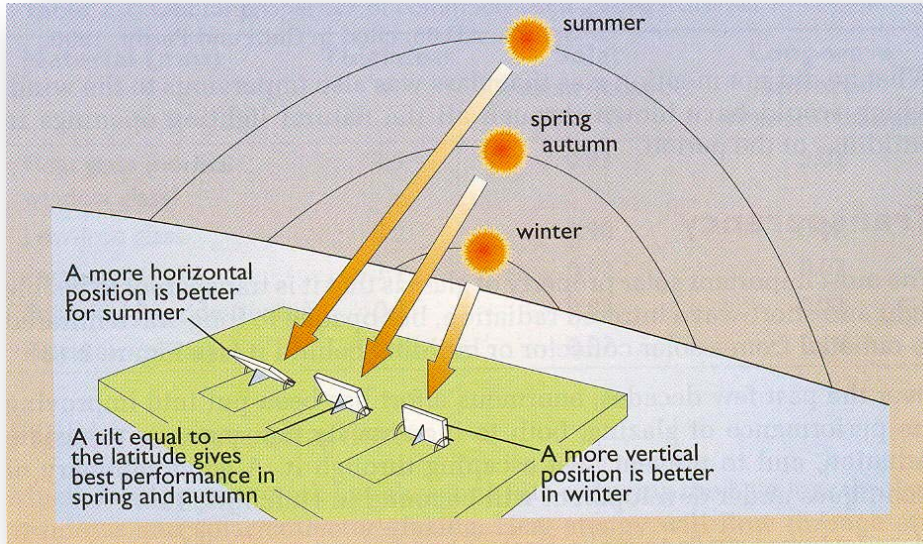


Σχήμα 3.6.2: Τύποι επίπεδων ηλιακών συλλεκτών και καταλληλότητα σε διάφορες θερμοκρασίες.



Σχήμα 3.6.3: Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες με νότιο προσανατολισμό και σταθερή κλίση (αριστερά),  $\beta$ ) έναν άξονα ελευθερίας (αζιμούθιο) και σταθερή κλίση (κέντρο) και  $\gamma$ ) δυο άξονες ελευθερίας (αζιμούθιο, ηλιακό ύψος) (δεξιά).

Ο βέλτιστος προσανατολισμός του επίπεδου συλλέκτη είναι ο νότιος ( $\gamma = 0$ ), ενώ απόκλιση κατά  $20^\circ$ - $30^\circ$  από τον νότιο προσανατολισμό έχει μικρή επίδραση στην ετήσια συλλεγόμενη ενέργεια. Επίσης η βέλτιστη κλίση για ετήσια χρήση είναι  $\beta = \varphi \pm 5^\circ$ , ενώ για χειμερινή και θερινή χρήση είναι  $\beta = \varphi + 15^\circ$  και  $\beta = \varphi - 15^\circ$  αντίστοιχα (Σχήμα 3.6.4).



Σχήμα 3.6.4: Κλίση επίπεδου συλλέκτη

Ο βασικός σκοπός στον σχεδιασμό του επίπεδου συλλέκτη είναι να υπολογίσουμε το κλάσμα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο συλλέκτη που τελικά μεταφέρεται με τη μορφή θερμότητας στο ρευστό. Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει α) τον οπτικό και β) τον θερμικό σχεδιασμό:

### 3.6.1 Οπτικός σχεδιασμός

Αρχικά εξετάζεται η επιφάνεια του καλύμματος και υπολογίζεται το κλάσμα της ακτινοβολίας που διέρχεται μέσω του καλύμματος. Αποδεικνύεται ότι όταν ακτινοβολία διέρχεται από ένα υλικό σε ένα άλλο η ικανότητα αντανάκλασης της διεπιφάνειας δίδεται από τη σχέση

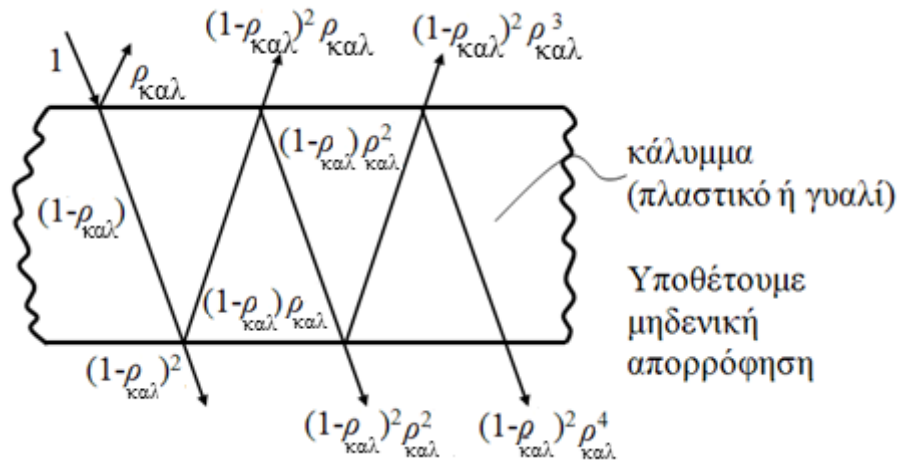
$$\rho = \frac{1}{2} \left( \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \right)$$

όπου  $\theta_1$  και  $\theta_2$  οι γωνίες πρόσπτωσης και σκέδασης. Επίσης, εάν  $n_1$  και  $n_2$  είναι οι δείκτες διαθλάσεως των δύο μέσων ισχύει ότι (νόμος του Snell)

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$$

Για ένα κάλυμμα με ικανότητα αντανάκλασης  $\rho_{\text{καλ}}$  και έστω αρχικά με μηδενική ικανότητα απορρόφησης, το κλάσμα της ακτινοβολίας που διαπερνά σε σχέση με την προσπίπτουσα είναι (βλέπε Σχήμα 3.6.2)

$$\tau_r = (1 - \rho_{\text{καλ}})^2 + (1 - \rho_{\text{καλ}})^2 \rho_{\text{καλ}}^2 + (1 - \rho_{\text{καλ}})^2 \rho_{\text{καλ}}^4 + \dots = (1 - \rho_{\text{καλ}})^2 \sum_{m=0}^{\infty} \rho_{\text{καλ}}^{2m} = \frac{(1 - \rho_{\text{καλ}})^2}{1 - \rho_{\text{καλ}}^2} = \frac{1 - \rho_{\text{καλ}}}{1 + \rho_{\text{καλ}}}$$



Σχήμα 3.6.2: Ακτινοβολία διαμέσου του καλύμματος

Αντίστοιχα, στη περίπτωση που ο συλλέκτης έχει περισσότερα από ένα κάλυμμα και συγκεκριμένα  $N$  καλύμματα τότε

$$\tau_{r,N} = \frac{1 - \rho_{\text{καλ}}}{1 + (2N - 1)\rho_{\text{καλ}}}$$

Στη πράξη ένα τμήμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας απορροφάται από το κάλυμμα και το υπόλοιπο το διαπερνά σύμφωνα με τη γενική σχέση  $I = I_0 e^{-KL}$ , όπου  $I$  και  $I_0$  η ένταση ακτινοβολίας που διαπερνά και προσπίπτει αντίστοιχα, ενώ  $\tau_a = e^{-KL}$  ο συντελεστής διαπερατότητας λόγω απορρόφησης τμήματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με το  $K$  να εξαρτάται από το υλικό του καλύμματος και το  $L$  να συμβολίζει το συνολικό μήκος της διαδρομής της ακτινοβολίας εντός του καλύμματος. Για τα καλύμματα ηλιακών συλλεκτών το  $\tau_a$  είναι κοντά στη μονάδα.

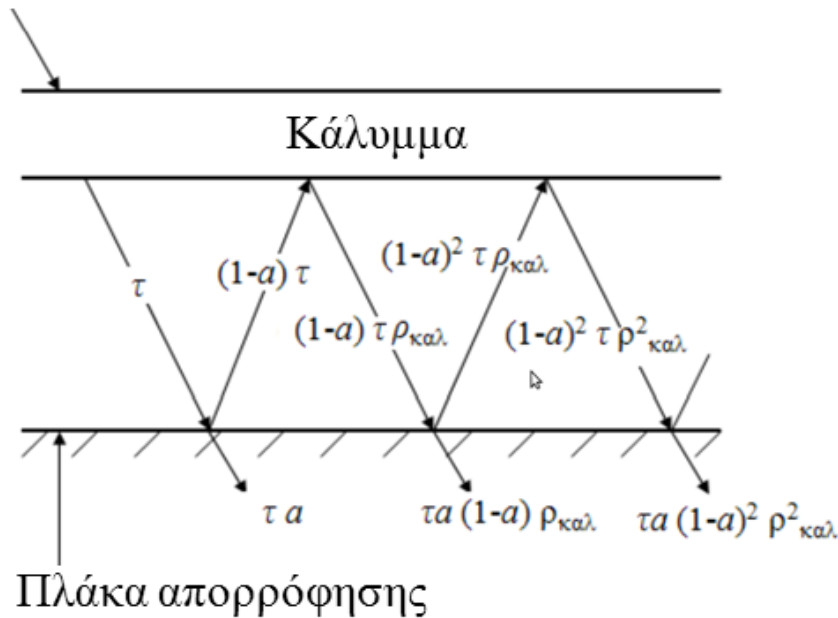
Το τελικό κλάσμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που θα διαπεράσει το κάλυμμα και δηλώνει τη συνολική ικανότητα διαπερατότητας  $\tau$  του καλύμματος είναι

$$\tau = \tau_r \tau_a$$

Στη συνέχεια θα πρέπει να υπολογίσουμε το κλάσμα της ακτινοβολίας που τελικά απορροφάται από την πλάκα απορρόφησης και αυτό επιτυγχάνεται εξετάζοντας το σύστημα κάλυμμα- πλάκα απορρόφησης. Με βάση το Σχήμα 3.6.3, όπου  $\alpha$  είναι η ικανότητα απορρόφησης της πλάκας απορρόφησης, ενώ  $1 - \alpha$  είναι η ικανότητα αντανάκλασης της πλάκας απορρόφησης, το κλάσμα της ακτινοβολίας που τελικά απορροφάται είναι

$$(\tau\alpha)_{eff} = \tau\alpha + \tau\alpha(1-\alpha)\rho_{καλ} + \tau\alpha(1-\alpha)^2\rho_{καλ}^2 + \dots = \tau\alpha \sum_{m=0}^{\infty} [(1-\alpha)\rho_{καλ}]^m \Rightarrow$$

$$(\tau\alpha)_{eff} = \tau\alpha \sum_{m=0}^{\infty} [(1-\alpha)\rho_{καλ}]^m = \frac{\tau\alpha}{1-(1-\alpha)\rho_{καλ}}$$



Σχήμα 3.6.3: Ακτινοβολία στο κάλυμμα- πλάκα απορρόφησης

Σημειώνεται ότι η ποσότητα  $(\tau\alpha)_{eff}$  είναι μεγαλύτερη από το γινόμενο  $\tau \times \alpha$  και η τιμή της εξαρτάται από τα υλικά του καλύμματος και της πλάκας απορρόφησης, τη γεωμετρία, τον αριθμό των καλυμμάτων και τη γωνία της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Τελικά η ποσότητα ακτινοβολίας που απορροφάται από τη πλάκα απορρόφησης και διατίθεται για μετατροπή σε θερμική ενέργεια είναι

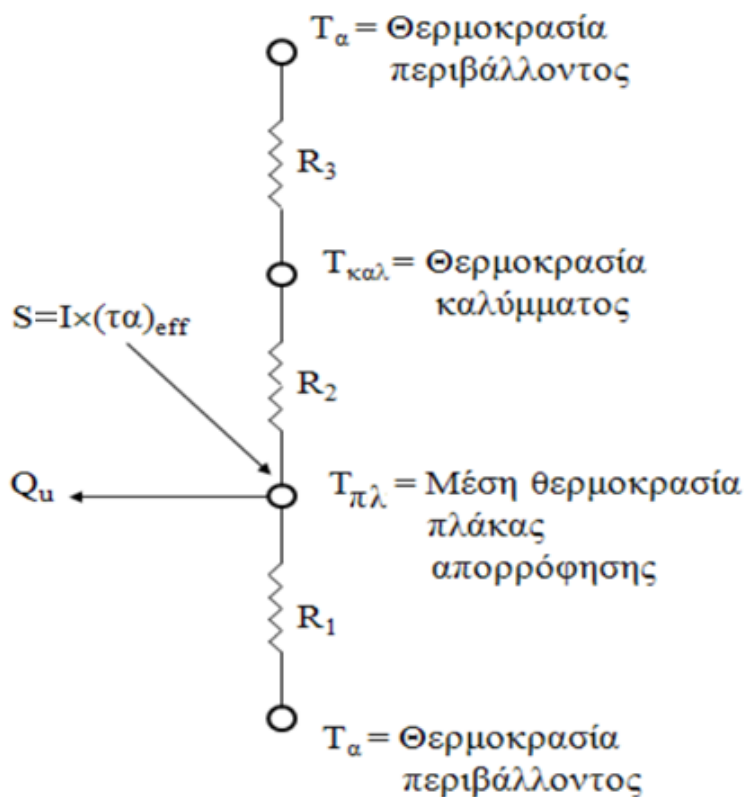
$$S = I \times (\tau\alpha)_{eff} = I \times \frac{\tau_{καλ} \alpha_{πλ}}{1 - (1 - \alpha_{πλ}) \rho_{καλ}}, \quad I = \dot{q}_S \cos \theta$$

όπου  $q_S$  η ένταση της κάθετα προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Συνεχίζουμε με τον θερμικό σχεδιασμό όπου θα υπολογίσουμε τις θερμικές απώλειες του συλλέκτη και τελικά το χρήσιμο θερμικό φορτίο.

### 3.6.2 Θερμικός σχεδιασμός (υπολογισμός $U$ και άλλων ποσοτήτων)

Το Σχήμα 3.6.4 αναπαριστά τις θερμικές αντιστάσεις στα διάφορα τμήματα του συλλέκτη. Οι θερμοκρασίες  $T_{καλ}$  και  $T_{πλ}$  αντιπροσωπεύουν τις θερμοκρασίες του καλύμματος και της πλάκας απορρόφησης αντίστοιχα, ενώ  $T_a$  και  $T_{sky}$  είναι η θερμοκρασία του

περιβάλλοντος και ουρανού αντίστοιχα. Οι ποσότητες  $R_1$ ,  $R_2$  και  $R_3$  είναι οι θερμικές αντιστάσεις διαμέσου της μόνωσης στη πίσω πλευρά του συλλέκτη, ανάμεσα στη πλάκα απορρόφησης και στο κάλυμμα και ανάμεσα στο κάλυμμα και τον περιβάλλοντα χώρο.



Σχήμα 3.6.4: Διάγραμμα θερμικών αντιστάσεων

Ξεκινούμε από τη **κάτω πλευρά του συλλέκτη** όπου αγνοώντας απώλειες λόγω συναγωγής και θεωρώντας ότι ο συλλέκτης είναι τέλεια μονωμένος από τη πίσω πλευρά γράφουμε  $R_1 = L / k$ . Στη σχέση αυτή  $L$  είναι το πάχος της μόνωσης και  $k$  ο συντελεστής θερμικής αγωγής της μόνωσης. Επομένως ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι

$$U_1 = 1 / R_1$$

Συνεχίζουμε με τη **πάνω πλευρά του συλλέκτη** όπου έχουμε απώλειες λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας ανάμεσα

- i) στη πλάκα απορρόφησης και το κάλυμμα και
- ii) στο κάλυμμα και ατμόσφαιρα.

i) Η θερμική αντίσταση ανάμεσα στη **πλάκα απορρόφησης και το κάλυμμα** γράφεται στη μορφή

$$R_2 = \frac{1}{h_c + h_{r2}}$$

όπου

$$h_c = \left[ 0.06 - 0.017 \left( \frac{s}{90} \right) \right] k \left[ \frac{g \Delta T}{T V^2} \right]^{1/3} \quad \Delta T = T_{\pi\lambda} - T_{καλ} \quad \text{και}$$



$$h_{r2} = \frac{\sigma(T_{\pi\lambda} + T_{\kappa\alpha\lambda})(T_{\pi\lambda}^2 + T_{\kappa\alpha\lambda}^2)}{\frac{1}{\varepsilon_{\pi\lambda}} + \frac{1}{\varepsilon_{\kappa\alpha\lambda}} - 1}$$

Στις παραπάνω σχέσεις  $h_c$  είναι ο συντελεστής φυσικής συναγωγής και  $h_{r2}$  ο γραμμικοποιημένος συντελεστής ακτινοβολίας. Επιπλέον,  $k$  ο συντελεστής θερμικής αγωγής του αέρα και  $V$  το κινηματικό ιξώδες στη μέση θερμοκρασία  $T = (T_{\pi\lambda} + T_{\kappa\alpha\lambda})/2$ , ενώ  $S$  η κλίση των δύο παράλληλων πλακών (κάλυμμα και πλάκα απορρόφησης) ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Επίσης,  $\varepsilon_{\pi\lambda}$  και  $\varepsilon_{\kappa\alpha\lambda}$  οι ικανότητες εκπομπής της πλάκας απορρόφησης και του καλύμματος αντίστοιχα.

ii) Η θερμική αντίσταση **ανάμεσα στο κάλυμμα και το περιβάλλον** είναι

$$R_3 = \frac{1}{h_\alpha + h_{r3}} \quad \text{όπου} \quad h_\alpha = 2.8 + 3.0u \quad \text{και}$$

$$h_{r3} = \varepsilon_{\kappa\alpha\lambda} \sigma (T_{\kappa\alpha\lambda} + T_{sky})(T_{sky}^2 + T_{\kappa\alpha\lambda}^2) \frac{T_{\kappa\alpha\lambda} - T_{sky}}{T_{\kappa\alpha\lambda} - T_a}$$

Στις παραπάνω σχέσεις  $h_\alpha$  ο συντελεστής συναγωγής με  $u$  να αντιπροσωπεύει την ταχύτητα του ανέμου και  $h_{r3}$  ο γραμμικοποιημένος συντελεστής ακτινοβολίας. Επομένως ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο πάνω τμήμα του συλλέκτη είναι

$$U_{2,3} = \frac{1}{R_2 + R_3}$$

Τα θερμικά ισοζύγια ανάμεσα σε πλάκα απορρόφησης – κάλυμμα και κάλυμμα - περιβάλλον γράφεται στη μορφή

$$\frac{T_{\pi\lambda} - T_{\kappa\alpha\lambda}}{R_2} = \frac{T_{\kappa\alpha\lambda} - T_{sky}}{R_3} = \frac{T_{\pi\lambda} - T_{sky}}{R_2 + R_3}$$

και οδηγεί στον υπολογισμό της μέσης θερμοκρασίας του καλύμματος σε σχέση με τη μέση θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης και των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας:

$$(T_{\pi\lambda} - T_{\kappa\alpha\lambda})(h_c + h_{r2}) = (T_{\pi\lambda} - T_a)U_{2,3} \Rightarrow T_{\kappa\alpha\lambda} = T_{\pi\lambda} - \frac{(T_{\pi\lambda} - T_a)U_{2,3}}{h_c + h_{r2}}$$

Ο υπολογισμός αφού εμπλέκει τους συντελεστές μεταφοράς που εξαρτώνται από τις εν λόγω θερμοκρασίες απαιτεί μία επαναληπτική διαδικασία. Ο συνολικός συντελεστής απώλειας θερμότητας που είναι και ένας από τους βασικούς στόχους της θερμικής ανάλυσης είναι

$$U = U_1 + U_{2,3}$$

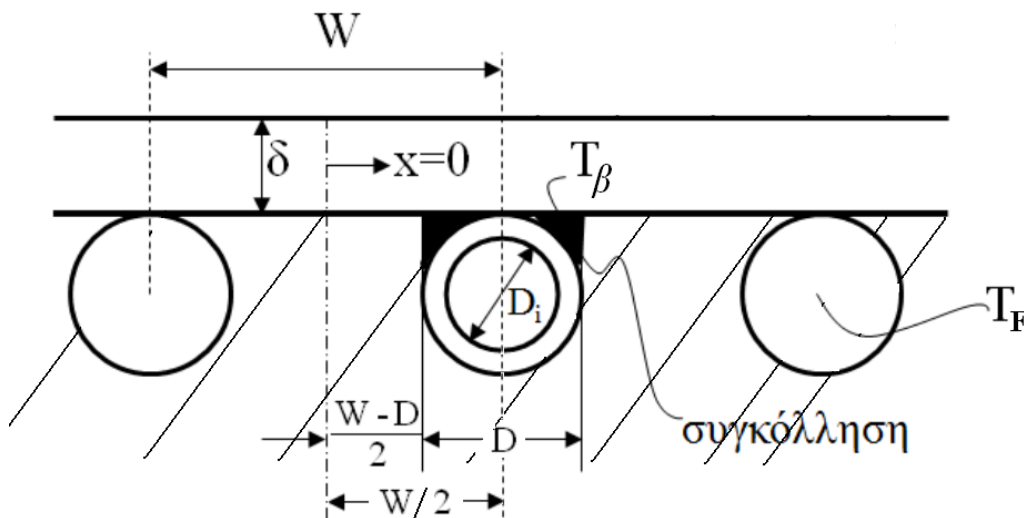
Η μεθοδολογία επίλυσης απαιτεί επαναληπτική διαδικασία. Συνήθως υποθέτουμε τη θερμοκρασία  $T_{καλ}$  γνωρίζοντας από μετρήσεις τη θερμοκρασία  $T_{πλ}$  και βρίσκουμε τους συντελεστές  $h_α$ ,  $h_c$ ,  $h_{r2}$ ,  $h_{r3}$  και στη συνέχεια εξετάζουμε αν ικανοποιείται το παραπάνω ισοζύγιο. Αν δεν ικανοποιείται αναθεωρούμε τη θερμοκρασία  $T_{καλ}$  και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία ώσπου να συγκλίνει.

Προχωρούμε στον υπολογισμό της **μεταφοράς θερμότητας στο θερμοαπαγωγό (φέρων) ρευστό**. Αρχικά θα υπολογίσουμε τη κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος της πλάκας απορρόφησης  $T_{πλ} = T_{πλ}(x)$ . Θεωρώντας ότι το σύστημα πλάκα απορρόφησης-αγωγοί μπορεί να αντιμετωπιστεί ως μία σειρά από αγωγούς πάνω σε πλάκα με επαναλαμβανόμενα χαρακτηριστικά, στο Σχήμα 3.6.5 δίδεται μία γραφική απεικόνιση ενός τμήματος της πλάκας απορρόφησης με έναν συγκολλημένο αγωγό.

Το θερμικό ισοζύγιο σε διαφορικό όγκο ( $\delta \times dx$ ) κατά μήκος του πτερυγίου γράφεται στη μορφή

$$\delta k \frac{d^2 T_{πλ}}{dx^2} + S = U [T_{πλ}(x) - T_a]$$

με οριακές συνθήκες  $\left. \frac{dT_{πλ}}{dx} \right|_{x=0} = 0$  και  $T_{πλ}|_{x=(W-D)/2} = T_\beta$



Σχήμα 3.6.5: Σύστημα πλάκα απορρόφησης-αγωγοί

Το πρόβλημα επιλύεται αναλυτικά και προκύπτει ότι

$$\frac{T_{πλ}(x) - T_a - \frac{S}{U}}{T_\beta - T_a - \frac{S}{U}} = \frac{\cosh(\lambda x)}{\cosh(\lambda H)}, \quad \text{όπου} \quad H = \frac{W-D}{2} \quad \lambda^2 = \frac{U}{k\delta}$$

Η θερμότητα που άγεται στη βάση του αγωγού και από τις δύο πλευρές είναι

$$q_u = -2k\delta \left. \frac{dT_{\pi\lambda}}{dx} \right|_{x=H} = \frac{2k\delta\lambda}{U} [S - U(T_\beta - T_a)] \tanh(\lambda H) \Rightarrow$$

$$q_u = \frac{2}{\lambda} [S - U(T_\beta - T_a)] \tanh(\lambda H)$$

ή

$$q_u = 2HF [S - U(T_\beta - T_a)] \quad \text{όπου} \quad F = \frac{\tanh(\lambda H)}{\lambda H}$$

Το ποσό αυτό προσαυξάνεται με το αντίστοιχο ποσό θερμότητας λόγω άμεσης ακτινοβολίας του αγωγού και το συνολικό ποσό είναι

$$q_u = (2HF + D) [S - U(T_\beta - T_a)]$$

Η θερμότητα αυτή μεταφέρεται με αγωγή και συναγωγή στο θερμοαπαγωγό ρευστό μέσης θερμοκρασίας  $T_{f,in} < T_f < T_{f,out}$ , όπου  $T_{f,in}$  και  $T_{f,out}$  οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του νερού. Επομένως γράφεται στη μορφή

$$q_u = \frac{T_\beta - T_f}{\frac{1}{h_{tube}\pi D_i} + \frac{1}{C_\beta}}$$

όπου  $h_{c,tube}$  ο συντελεστής συναγωγής ανάμεσα στον αγωγό και το ρευστό και

$$C_\beta = k_\beta b / \zeta$$

ο συντελεστής αγωγής για μέσου της συγκόλλησης με  $b$  και  $\zeta$  να συμβολίζουν το πλάτος και το πάχος της συγκόλλησης και  $k_\beta$  τον αντίστοιχο συντελεστή θερμικής αγωγής.

Συνδυάζοντας τις δύο εκφράσεις για το  $q_u$  έχουμε

$$q_u = \frac{S - U(T_\beta - T_a)}{2HF + D} = \frac{T_\beta - T_f}{\frac{1}{h_{tube}\pi D_i} + \frac{1}{C_\beta}} \Rightarrow q_u = \frac{S - U(T_\beta - T_a) + T_\beta - T_f}{\frac{1}{2HF + D} + \frac{1}{h_{tube}\pi D_i} + \frac{1}{C_\beta}}$$

Στη συνέχεια απαλείφουμε τη θερμοκρασία  $T_\beta$  και βρίσκουμε

$$q_u = WF' [S - U(T_f - T_a)]$$

όπου

$$F' = \frac{\frac{1}{U}}{W \left[ \frac{1}{U [D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_\beta} + \frac{1}{h_{tube} \pi D_i} \right]} = \frac{\frac{1}{U}}{\frac{1}{U_0}} = \frac{U_0}{U} < 1$$

Ο αριθμητής εκφράζει την θερμική αντίσταση ανάμεσα στη πλάκα απορρόφησης  $T_\beta$  και το περιβάλλον  $T_a$ , ενώ ο παρανομαστής την θερμική αντίσταση ανάμεσα στο ρευστό  $T_f$  και το περιβάλλον  $T_a$ .

Το  $F'$  μπορεί επίσης να ερμηνευτεί σαν το κλάσμα του χρήσιμου θερμικού φορτίου προς το θερμικό φορτίο που θα είχε ο συλλέκτης εάν η επιφάνεια απορρόφησης είχε θερμοκρασία ίση με τη μέση θερμοκρασία  $T_f$  του θερμοαπαγωγού ρευστού. Η ποσότητα αυτή είναι σταθερή για κάθε συλλέκτη για συγκεκριμένη παροχή.

Τέλος, επιλύουμε για τη κατανομή της θερμοκρασίας του θερμοαπαγωγού ρευστού  $T_f = T_f(y)$ . Εφαρμόζοντας το θερμικό ισοζύγιο σε έναν όγκο ελέγχου του ρευστού γράφουμε

$$\dot{m}c \frac{dT_f}{dy} = q_u = WF' \left[ S - U(T_f - T_a) \right] \text{ με αρχική συνθήκη: } y = 0 \rightarrow T_f = T_{f,in}.$$

Το πρόβλημα επιλύεται αναλυτικά και προκύπτει ότι

$$\frac{T_f(y) - T_a - \frac{S}{U}}{T_{f,in} - T_a - \frac{S}{U}} = e^{\frac{UWF'}{\dot{m}c}y} \Rightarrow$$

$$T_f(y) = \left( T_a + \frac{S}{U} \right) + \left( T_{f,in} - T_a - \frac{S}{U} \right) e^{\frac{UWF'}{\dot{m}c}y} = T_{f,in} e^{\frac{UWF'}{\dot{m}c_p}y} + \left( T_a + \frac{S}{U} \right) \left( 1 - e^{\frac{UWF'}{\dot{m}c}y} \right)$$

Επομένως, η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από τον συλλέκτη είναι

$$T_{f,out} = T_{f,in} e^{\frac{UWF'}{\dot{m}c}L} + \left( T_a + \frac{S}{U} \right) \left( 1 - e^{\frac{UWF'}{\dot{m}c}L} \right)$$

Με βάση τα παραπάνω ορίζεται ο συντελεστής απομάκρυνσης θερμότητας:

$$F_R = \frac{\dot{m}c(T_{f,out} - T_{f,in})}{A \left[ q_s(\tau\alpha)_{eff} - U(T_{f,in} - T_a) \right]} = G \frac{c(T_{f,out} - T_{f,in})}{S - U(T_{f,in} - T_a)}$$

ή

$$F_R = \frac{Gc}{U} \left( 1 - \exp \left[ -\frac{UF'}{Gc} \right] \right), \quad \text{όπου } G = \frac{\dot{m}}{WL} = \frac{\dot{m}}{A}$$

Το  $F_R$  μπορεί να ερμηνευτεί σαν το κλάσμα του χρήσιμου θερμικού φορτίου προς το θερμικό φορτίο που θα είχε ο συλλέκτης εάν η επιφάνεια απορρόφησης είχε θερμοκρασία ίση με τη θερμοκρασία εισόδου  $T_{f,in}$  του θερμοαπαγωγού ρευστού.

Είναι βολικό να ορίσουμε την ποσότητα (flow factor)

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m}c_p}{AUF'} \left( 1 - \exp \left[ -\frac{AUF'}{\dot{m}c_p} \right] \right)$$

που εξαρτάται **μόνο** από την αδιάστατη ποσότητα  $\frac{\dot{m}c_p}{AUF'}$ .

Ολοκληρώνουμε την έκφραση για την κατανομή θερμοκρασίας του ρευστού  $T_f(y)$  κατά μήκος του αγωγού και βρίσκουμε τη μέση θερμοκρασία του θερμοαπαγωγού ρευστού:

$$\bar{T}_f = T_{f,in} + \frac{Q_u / A}{UF_R} \left( 1 - \frac{F_R}{F'} \right)$$

Υπενθυμίζεται ότι  $S = q_s \times (\tau\alpha)_{eff}$ , ότι ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη είναι

$$\eta = \frac{Q_u}{Aq_s} = (\tau\alpha)_{eff} - \frac{U(\bar{T}_{\pi\lambda} - T_a)}{q_s} = F_R \left[ (\tau\alpha)_{eff} - \frac{U(T_{f,in} - T_a)}{q_s} \right]$$

και

$$Q_u = q_u A = A \left[ S - U(\bar{T}_{\pi\lambda} - T_a) \right] = F_R A \left[ S - U(T_{f,in} - T_a) \right]$$

Επομένως βρίσκουμε και τη μέση θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης του συλλέκτη

$$\bar{T}_{\pi\lambda} = T_{f,in} + \frac{Q_u / A (1 - F_R)}{U F_R}$$

Επίσης στη περίπτωση μηδενικής παροχής ( $\eta = 0$ ):  $\bar{T}_{stag} = T_a + \frac{q_s (\tau\alpha)_{eff}}{U}$

**Βασικές εξισώσεις ηλιακού θερμικού συστήματος με επίπεδο συλλέκτη**

$S = (\tau\alpha)_{eff} I$
$Q_u = q_u A = A [S - U(\bar{T}_{\pi\lambda} - T_a)] = F_R A [S - U(T_{f,in} - T_a)] = F' A [S - U(T_f - T_a)] = \dot{m} c (T_{f,out} - T_{f,in})$
$\dot{Q}_L(t) = \delta_L \dot{m}_L c (T_{L,in} - T_{L,out})$
$\dot{Q}_{st}(t) = m_{st} c \frac{dT_{st}}{dt} = \delta_C \dot{Q}_u - \delta_L \dot{Q}_L - U_{st} A_{st} (T_{st} - T_a)$
$F_R = \frac{(\tau\alpha)_{eff} - \frac{U(\bar{T}_{\pi\lambda} - T_a)}{q_s}}{(\tau\alpha)_{eff} - \frac{U(T_{f,in} - T_a)}{q_s}} = \frac{(\tau\alpha)_{eff} - \frac{b(\bar{\Theta}_{\pi\lambda} - \Theta_a)}{\psi}}{(\tau\alpha)_{eff} - \frac{b(\Theta_{f,in} - \Theta_a)}{\psi}} \quad \Theta = \frac{T}{\bar{T}_a} \quad \psi = \frac{q_s}{q_{s,ref}} \quad b = \frac{U\bar{T}_a}{q_{s,ref}}$
$F' = \frac{(\tau\alpha)_{eff} - \frac{U(\bar{T}_{\pi\lambda} - T_a)}{q_s}}{(\tau\alpha)_{eff} - \frac{U(T_f - T_a)}{q_s}}$
$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m} c_p}{A U F'} \left[ 1 - \exp \left[ -\frac{A U F'}{\dot{m} c_p} \right] \right]$
$T_f(y) = \left( T_a + \frac{S}{U} \right) + \left( T_{f,in} - T_a - \frac{S}{U} \right) e^{-\frac{U W F'}{\dot{m} c_p} y} = T_{f,in} e^{-\frac{U W F'}{\dot{m} c_p} y} + \left( T_a + \frac{S}{U} \right) \left( 1 - e^{-\frac{U W F'}{\dot{m} c_p} y} \right)$
$T_{f,out} = T_{f,in} \left( 1 - \frac{F_R b}{\gamma} \right) + \frac{F_R \bar{T}_a}{\gamma} [(\tau\alpha)_{eff} \psi(t) + b \Theta_a] = T_{f,in} e^{-\frac{U A F'}{\dot{m} c}} + \left( T_a + \frac{S}{U} \right) \left( 1 - e^{-\frac{U A F'}{\dot{m} c}} \right)$
$\bar{T}_f = T_{f,in} + \frac{Q_u}{A U F_R} \left( 1 - \frac{F_R}{F'} \right)$
$T_{\pi\lambda}(x) = \left( T_a + \frac{S}{U} \right) + \left( T_{\beta} - T_a - \frac{S}{U} \right) \frac{\cosh(\lambda x)}{\cosh(\lambda H)} \quad H = \frac{W - D}{2} \quad \lambda^2 = \frac{U}{k \delta}$
$\bar{T}_{\pi\lambda} = T_{f,in} + \frac{Q_u (1 - F_R)}{A U F_R}$
$T_{stag} = T_a + \frac{(\tau\alpha)_{eff} \psi(t)}{b} \bar{T}_a = T_a + \frac{(\tau\alpha)_{eff} q_s}{U} = T_a + \frac{S}{U}$
$\eta = \frac{Q_u}{A q_s} = (\tau\alpha)_{eff} - \frac{U(\bar{T}_{\pi\lambda} - T_a)}{q_s} = (\tau\alpha)_{eff} - \frac{b(\bar{\Theta}_{\pi\lambda} - \Theta_a)}{\psi} =$
$= F_R \left[ (\tau\alpha)_{eff} - \frac{U(T_{f,in} - T_a)}{q_s} \right] = F_R \left[ (\tau\alpha)_{eff} - \frac{b(\Theta_{f,in} - \Theta_a)}{\psi} \right] = F' \left[ (\tau\alpha)_{eff} - \frac{U(T_f - T_a)}{q_s} \right]$

Παράδειγμα 3.6.1: Υπολογισμός συντελεστή θερμικών απωλειών  $U_{2,3}$  για συλλέκτη με μονό κάλυμμα και τα εξής χαρακτηριστικά:

Απόσταση ανάμεσα σε πλάκα απορρόφησης και κάλυμμα:  $L = 25\text{mm}$

$$\varepsilon_{\kappa\alpha\lambda} = 0.88 \quad \varepsilon_{\pi\lambda} = 0.95, \quad T_a = T_{\text{sky}} = 10^\circ\text{C}, \quad T_{\pi\lambda} = 100^\circ\text{C}, \quad h_\alpha = 10 \text{ W/m}^2\text{C}, \quad \beta = 45^\circ$$

Έστω  $T_{\kappa\alpha\lambda} = 35^\circ\text{C}$ , μέση θερμοκρασία αέρα  $67.5^\circ\text{C}=340.5\text{K}$ :

$$\nu = 1.96 \times 10^{-5} \frac{1}{2} \text{ m}^2/\text{s}, \quad k = 0.0293 \text{ W/m C}, \quad \text{Pr}=0.7$$

$$h_{r2} = \frac{\sigma(T_{\pi\lambda} + T_{\kappa\alpha\lambda})(T_{\pi\lambda}^2 + T_{\kappa\alpha\lambda}^2)}{\frac{1}{\varepsilon_{\pi\lambda}} + \frac{1}{\varepsilon_{\kappa\alpha\lambda}} - 1} = 7.60 \text{ W/m}^2\text{C}$$

$$h_{r3} = \varepsilon_{\kappa\alpha\lambda} \sigma (T_{\kappa\alpha\lambda} + T_{\text{sky}})(T_{\text{sky}}^2 + T_{\kappa\alpha\lambda}^2) \frac{T_{\kappa\alpha\lambda} - T_{\text{sky}}}{T_{\kappa\alpha\lambda} - T_a} = 5.16 \text{ W/m}^2\text{C}$$

$$\text{Raleigh number: } Ra = \frac{9.81(100 - 35) \times 0.025^3 \times 0.7}{340.5(1.96 \times 10^{-5})^2} = 5.33 \times 10^4$$

$$Nu = 1 + 1.44 \left[ 1 - \frac{1708(\sin 1.8\beta)^{1.6}}{Ra \cos \beta} \right] \left[ 1 - \frac{1708}{Ra \cos \beta} \right]^+ + \left[ \left( \frac{Ra \cos \beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ = 3.19$$

$$h_c = Nu \frac{k}{L} = 3.19 \frac{0.0293}{0.025} = 3.73 \text{ W/m}^2\text{C}$$

$$R_2 = \frac{1}{h_c + h_{r2}} \quad R_3 = \frac{1}{h_\alpha + h_{r3}}$$

$$U_{2,3} = \frac{1}{R_2 + R_3} = (R_2 + R_3)^{-1} = \left( \frac{1}{3.73 + 7.60} + \frac{1}{5.16 + 10} \right)^{-1} = 6.49 \text{ W/m}^2\text{C}$$

$$T_{\kappa\alpha\lambda} = T_{\pi\lambda} - \frac{(T_{\pi\lambda} - T_a)U_{2,3}}{h_c + h_{r2}} = 100 - \frac{6.49 \times 90}{3.73 + 7.60} = 48.5 \text{ C}$$

Η προκύπτουσα θερμοκρασία  $48.5 \text{ C}$  διαφέρει αρκετά από την θερμοκρασία  $35\text{C}$  που υποθέσαμε αρχικά και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για  $T_{\kappa\alpha\lambda} = 48.5^\circ\text{C}$ .

Οι νέες τιμές των συντελεστών μεταφοράς είναι:

$$h_{r2} = 8.03 \text{ W/m}^2\text{C} \quad h_{r3} = 5.53 \text{ W/m}^2\text{C} \quad h_c = 3.52 \text{ W/m}^2\text{C}$$

Ο συντελεστής απωλειών είναι  $U_{2,3} = 6.62 \text{ W/m}^2\text{C}$  και  $T_{\text{καλ}} = 48.4^\circ\text{C}$

Επομένως δεν απαιτείται 2<sup>η</sup> επανάληψη.

Ο συντελεστής απωλειών από τη κάτω πλευρά του συλλέκτη για μόνωση  $k = 0.045 \text{ W/m C}$  πάχους  $L_b = 25 \text{ mm}$  είναι  $U_1 = 1/R_1 = k/L = 0.045/0.05 = 0.9 \text{ W/m}^2\text{C}$ .

Επομένως  $U = U_1 + U_{2,3} = 7.52 \text{ W/m}^2\text{C}$  με  $U_1 \ll U_{2,3}$

Παράδειγμα 3.6.2: Υπολογισμός συντελεστή  $F'$  για συλλέκτη με εξής χαρακτηριστικά:

$$U = 8 \text{ W/m}^2\text{C}$$

Απόσταση ανάμεσα σε σωλήνες:  $W = 150\text{mm}$ ,  $D_i = 10\text{mm}$ ,  $\delta = 0.5\text{mm}$ ,

Θερμική αγωγιμότητα πλάκας (χαλκός):  $k = 385\text{W/m C}$

Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας εντός των σωλήνων:  $h_{\text{tube}} = 300\text{W/m}^2\text{C}$

Θερμική αντίσταση συγκολλήσεων:  $1/C_\beta = 0$

$$\lambda = \sqrt{U/k\delta} = 6.45 \quad F = \frac{\tanh(\lambda(W-D)/2)}{\lambda(W-D)/2} = \frac{\tanh(6.45(0.15-0.01)/2)}{6.45(0.15-0.01)/2} = 0.937$$

$$F' = \frac{\frac{1}{8}}{0.15 \left[ \frac{1}{8[0.01+(0.15-0.01)0.937]} + \frac{1}{300\pi \times 0.01} \right]} = \frac{\frac{1}{U}}{\frac{1}{U_0}} = \frac{6.73}{8} = 0.84 < 1$$

Παράδειγμα 3.6.3: Υπολογισμός συντελεστή  $F_R$  για συλλέκτη με τα χαρακτηριστικά του προηγούμενου παραδείγματος με  $U = 8 \text{ W/m}^2\text{C}$  και  $F' = 0.84$ . Επίσης η παροχή του συλλέκτη επιφάνειας  $1 \times 2\text{m}$  είναι  $\dot{m} = 0.03 \text{ kr/s}$  και η θερμοκρασία  $T_{f,in} = 40 \text{ C}$  είναι σταθερή.

$$\frac{\dot{m}c_p}{AUF'} = \frac{0.03 \times 4190}{2 \times 8 \times 0.84} = 9.35 \rightarrow F'' = \frac{\dot{m}c_p}{AUF'} \left( 1 - \exp \left[ -\frac{AUF'}{\dot{m}c_p} \right] \right) = 0.948 \rightarrow F_R = F'F'' = 0.797$$

Εάν τη χρονική περίοδο **10-11π.μ.**,  $T_a = 2 \text{ C}$  και  $S = 3.29 \text{ MJ/m}^2$  τότε

$$U(T_{f,in} - T_a) = 8(40 - 2)3600 = 1.09 \text{ MJ/m}^2 \quad \text{και} \quad q_u = 0.797(3.29 - 1.09) \times 10^6 = 1.76 \text{ MJ/m}^2$$

$$\text{Διαφορά θερμοκρασίας για χρονική περίοδο } \mathbf{10-11\pi.μ.}: (T_{f,out} - T_{f,in}) = \frac{(q_u/3600)A}{\dot{m}c} = 7.8 \text{ C}$$



Σημείωση: Εάν μειωθεί η παροχή αυξάνει αλλά όχι αναλογικά απαραίτητα η διαφορά θερμοκρασίας επειδή παράλληλα μειώνεται το χρήσιμο θερμικό φορτίο.

Για παράδειγμα εάν η παροχή  $\dot{m}$  μειωθεί στο μισό και έστω ότι ο συντελεστής  $F'$  παραμένει σταθερός τότε:

$$F'' = 0.9 \rightarrow F_R = 0.718 \rightarrow q_u = 1.58 \rightarrow T_{f,out} - T_{f,in} = 14 \text{ C}$$

που είναι λιγότερο από το διπλάσιο της αρχικής θερμοκρασιακής διαφοράς (επίσης θα μειωθεί η απόδοση  $\eta$  αφού αυξάνει η θερμοκρασιακή διαφορά).

Εύρεση μέσων θερμοκρασιών φέροντος ρευστού στον συλλέκτη, πλάκας απορρόφησης και πλάκας απορρόφησης με μηδενική παροχή:

- $$\bar{T}_f = T_{f,in} + \frac{Q_u / A}{UF_R} \left( 1 - \frac{F_R}{F'} \right) = 40 + \frac{1.76 \times 10^6 / 3600}{8 \times 0.797} (1 - 0.948) = 44 \text{ C}$$
- $$\bar{T}_{\pi\lambda} = T_{f,in} + \frac{Q_u / A (1 - F_R)}{U F_R} = 40 + \frac{1.76 \times 10^6 / 3600}{8 \times 0.797} (1 - 0.797) = 46 \text{ C}$$
- $$\bar{T}_{stag} = T_a + \frac{q_s (\tau\alpha)_{eff}}{U} = T_a + \frac{S}{U} = 2 + \frac{3.29 \times 10^6 / 3600}{8} = 116 \text{ C}$$

### 3.7 Σχεδιασμός συγκεντρωτικών συλλεκτών

.....

#### 3.7.1 Οπτικός σχεδιασμός

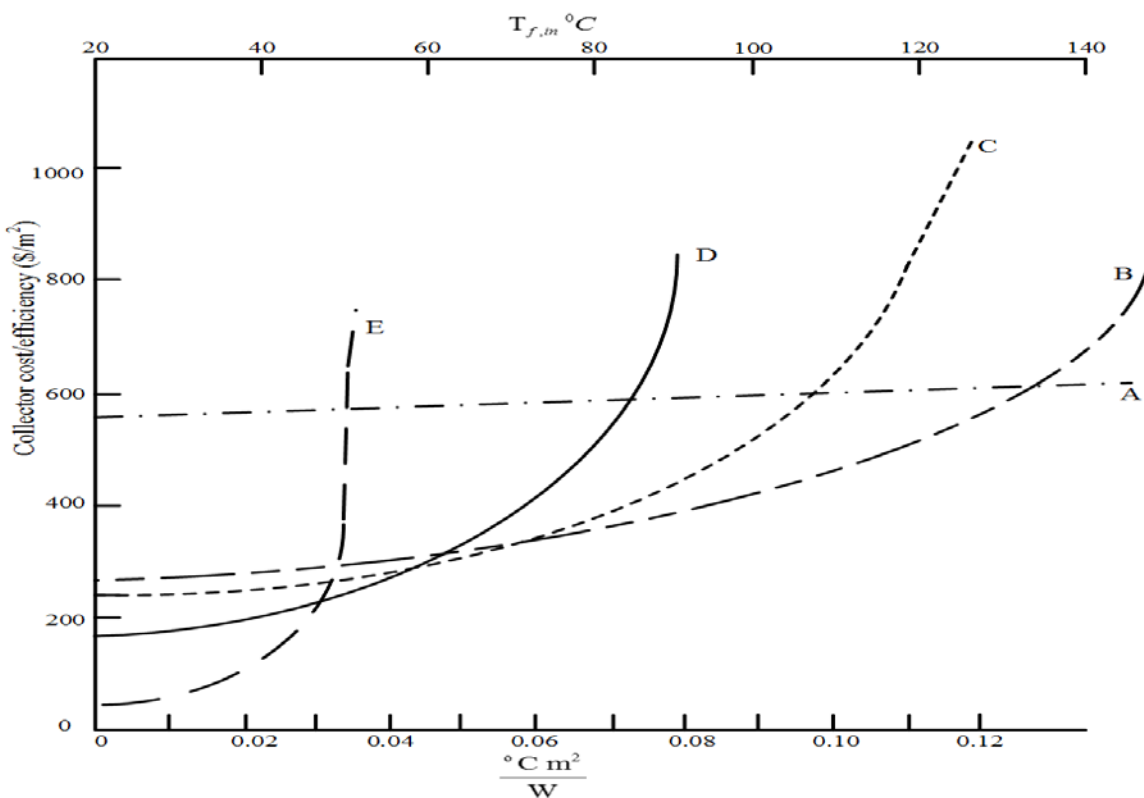
.....

#### 3.7.2 Θερμικός σχεδιασμός

.....

### 3.8 Επιλογή συλλέκτη

- Οι κατασκευαστές και προμηθευτές ηλιακών συλλεκτών θα πρέπει διαθέτουν τη καμπύλη απόδοσης του συλλέκτη και το κόστος αγοράς /εγκατάστασης ανά μονάδα επιφάνειας ανακλαστήρα.
- Άλλοι παράγοντες όπως η διάρκεια ζωής και το κόστος συντήρησης είναι σημαντικοί αλλά δεν υπάρχουν αξιόπιστα δεδομένα και είναι δύσκολο να συνεκτιμηθούν.
- Είναι προφανές ότι ο πιο οικονομικός συλλέκτης δεν είναι απαραίτητα και η καλύτερη επιλογή εάν ένας λίγο πιο ακριβός συλλέκτης έχει σημαντικά καλύτερο βαθμό απόδοσης όπως και το αντίθετο, δηλαδή ότι ένας συλλέκτης με πολύ καλό βαθμό απόδοσης θα πρέπει να επιλεγεί αντί ενός άλλου με λίγο μικρότερο βαθμό απόδοσης αλλά με πολύ χαμηλότερο κόστος.
- Στο πλαίσιο αυτό υπάρχουν δεδομένα υπό μορφή γραφημάτων που παρουσιάζουν το **κόστος ανά μονάδα ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας συλλέκτη** ως προς τη γνωστή ποσότητα απόδοσης  $(T_{f,in} - T_a) / q_s$  για διάφορους τύπους συλλεκτών.



Σχήμα 3.8.1: Κόστος ανά επιφάνεια συλλέκτη διαιρεμένο με τον συντελεστή απόδοσης  $\eta$  ως προς τη γνωστή ποσότητα απόδοσης  $(T_{f,in} - T_a) / q_s$ , όπου:

- (Α) συλλέκτης κενού
- (Β) συλλέκτης με επιλεκτική επιφάνεια και ένα κάλυμμα
- (Γ) συλλέκτης χωρίς επιλεκτική επιφάνεια, δύο καλύμματα
- (Δ) συλλέκτης χωρίς επιλεκτική επιφάνεια, ένα κάλυμμα
- (Ε): συλλέκτης χωρίς επιλεκτική επιφάνεια και κάλυμμα

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα είναι σχετικά εύκολο, για γνωστές τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της θερμοκρασίας λειτουργίας, να επιλεγεί ο συλλέκτης με το χαμηλότερο κόστος ανά μονάδα ενέργειας.

Παράδειγμα 3.8.1:

$$\text{Για } q_s = 900 \text{ W/m}^2\text{C}, T_a = 30^\circ\text{C}, T_{f,in} = 90^\circ\text{C} \rightarrow (T_{f,in} - T_a) / q_s = 0.067 \text{ m}^2\text{C/W}$$

Στη συνέχεια με βάση το διάγραμμα φαίνεται ότι η καλύτερη επιλογή είναι ο συλλέκτης με επιλεκτική επιφάνεια και ένα κάλυμμα με κόστος 330ευρώ ανά μονάδα επιφάνειας και ενέργειας, ενώ η δεύτερη καλύτερη είναι ο συλλέκτης χωρίς επιλεκτική επιφάνεια και δύο καλύμματα με κόστος 370ευρώ ανά μονάδα επιφάνειας και ενέργειας.