

Κάλυψη θερμικών αναγκών πισίνας από ηλιοθερμικά

Για την απαιτούμενη θερμική ισχύ συμβατικής εγκατάστασης για τη θέρμανση του συνολικού όγκου του νερού μιας πισίνας μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση (Περδίος 2007):

$$Q = 0.6FQ_{ss} + 1000V (t_{fin}-t_{init})/T \text{ (kcal/h)}$$

όπου F η επιφάνεια της πισίνας (m), Q_{ss} οι θερμικές απώλειες του νερού (kcal/h/m²), V ο όγκος του νερού (m³), t_{fin} και t_{init} είναι η αρχική και τελική θερμοκρασία του νερού (°C) και T ο χρόνος θέρμανσης που λαμβάνεται ως και 20 h.

Σε κλειστές πισίνες ισχύει $Q_{ss}=120$ kcal/h/m για θερμοκρασία νερού μεγαλύτερη από 23 °C, θερμοκρασία αέρα 26 °C, θερμοκρασία νερού συμπλήρωσης 13 °C, σχετική υγρασία 60% και ταχύτητα ανέμου 1 m/s.

Σε ανοικτές πισίνες ισχύει $Q_{ss}=335$ kcal/h/m για θερμοκρασία νερού μεγαλύτερη από 23 °C, θερμοκρασία αέρα 13 °C, θερμοκρασία νερού συμπλήρωσης 13 °C, σχετική υγρασία 60% και ταχύτητα ανέμου 1 m/s.

Για τη χρήση ηλιοθερμικών συστημάτων για τη θέρμανση πισίνων υπολογίζονται αρχικά τα μηνιαία θερμικά φορτία της πισίνας για σταθερή θερμοκρασία νερού σε κάθε μήνα ώστε να αθροιστούν και να συσχετιστούν με την αντίστοιχη μηνιαία ωφέλιμη ηλιακή ενέργεια του ηλιοθερμικού συστήματος.

Οι οδηγίες για το σχεδιασμό, εγκατάσταση και λειτουργία ηλιακών θερμικών συστημάτων για θέρμανση πισινών δίνονται στην τεχνική αναφορά ISO/TR 12596: 1995. Σύμφωνα με την οδηγία, για τον υπολογισμό των θερμικών αναγκών πισίνας, υπολογίζονται όλες οι θερμικές απώλειες αφαιρώντας τα θερμικά κέρδη από την εισερχόμενη ακτινοβολία. Οι θερμικές απώλειες είναι το άθροισμα των απωλειών εξαιτίας της εξάτμισης, της ακτινοβολίας και της συναγωγής. Για τον υπολογισμό των παραπάνω όρων είναι απαραίτητη η γνώση των περιβαλλοντικών συνθηκών της περιοχής της πισίνας όπως η θερμοκρασία του αέρα, η ταχύτητα ανέμου και η σχετική υγρασία. Οι απώλειες λόγω των χρηστών, αγωγής στο έδαφος και βροχής έχουν μικρότερη επίδραση.

Ο ρυθμός εξάτμισης από μια πισίνα ποικίλει ανάλογα με τη θερμοκρασία της πισίνας, τη θερμοκρασία του αέρα και την υγρασία, και την ταχύτητα του ανέμου στην επιφάνεια της πισίνας (εξωτερική). Οι εσωτερικές πισίνες δεν επηρεάζονται από το περιβάλλον, αλλά εξακολουθούν να χάνουν πολλή ενέργεια από την εξάτμιση. Απαιτούν ακόμα και αερισμό του χώρου για τον έλεγχο της εσωτερικής υγρασίας που προκαλείται από το μεγάλο ποσό της εξάτμισης. Ο αεριζόμενος αέρας πρέπει επίσης να είναι συνεχόμενος, πράγμα το οποίο βάζει επιπρόσθετο κόστος στην ενέργεια.

Θερμικές απώλειες λόγω εξάτμισης

Οι θερμικές απώλειες για ανοικτή πισίνα δίνονται από τη σχέση:

$$q_e = (5.64 + 5.96v_{0.3})(P_w - P_a)$$

όπου q_e οι θερμικές απώλειες λόγω εξάτμισης ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{ημέρα}$), P_w η πίεση υδρατμών κορεσμού σε θερμοκρασία νερού t_w (kPa), P_a η μερική πίεση υδρατμών του αέρα (kPa) και $v_{0.3}$ η ταχύτητα ανέμου σε ύψος 0.3 μ πάνω από την πισίνα (m/s). Η τελευταία μπορεί να αναχθεί ως ποσοστό μετρήσεων ταχύτητας ανέμου στα 10 μ (συνήθως 30%).

Για κλειστές πισίνες, η ταχύτητα ανέμου είναι αρκετά μικρότερη των ανοικτών εφαρμογών (0.02-0.05 m/s) ενώ η μερική πίεση υδρατμών του αέρα αντικαθίσταται από τη μερική πίεση των υδρατμών στον κλειστό χώρο. Η μερική πίεση των υδρατμών του αέρα υπολογίζεται από τη σχετική υγρασία RH μέσω της σχέσης:

$$P_a = (P_s \times RH)/100$$

όπου P_s είναι η πίεση υδρατμών κορεσμού σε θερμοκρασία αέρα t_a (kPa) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_s = 100(0.004516 + 0.0007t_w - 2.649 \times 10^{-6}t_w^2 + 6.944 \times 10^{-7}t_w^3)$$

Η παρουσία κολυμβητών στην πισίνα αυξάνει τις απώλειες θερμότητας λόγω εξάτμισης σημαντικά (π.χ. με 20-25 άτομα ανά 100 m^2 , οι απώλειες αυξάνονται από 70-100% σε σχέση με τυπική πισίνα).

Απώλειες λόγω ακτινοβολίας

Οι απώλειες υπολογίζονται από τη σχέση:

$$q_r = 10^{-6} \times 24 \times 3600 \varepsilon_w \sigma (T_w^4 - T_s^4) = 0.0864 \varepsilon_w h_T (T_w - T_s)$$

όπου q_r οι θερμικές απώλειες λόγω ακτινοβολίας ($\text{MJ/m}^2/\text{ημέρα}$), ε_w η ικανότητα εκπομπής του νερού (0.95), T_w η θερμοκρασία του νερού (K), T_s η θερμοκρασία του ουρανού (K) και h_T ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας ($\text{W/m}^2 \text{ K}$), ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$h_T = \sigma (T_w^2 + T_s^2) (T_w + T_s) = 0.268 \times 10^{-7} (T_w + T_s)^3 / 8$$

Για κλειστή πισίνα, ως θερμοκρασία ουρανού θεωρείται η θερμοκρασία του κελύφους της κλειστής πισίνας ενώ για ανοικτή πισίνα ισχύει:

$$T_s = T_a (\varepsilon_s)^{0.25}$$

όπου η ικανότητα εκπομπής ε_s είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας του σημείου δρόσου t_{dp} και υπολογίζεται ως:

$$\varepsilon_s = 0.711 + 0.56 \times 10^{-2} \times t_{dp} + 0.73 \times 10^{-4} \times t_{dp}^2$$

Θερμικές απώλειες συναγωγής

Υπολογίζονται από τη σχέση:

$$q_c = 10^{-6} \times 24 \times 3600 \times (3.1 + 4.1v)(t_w - t_a) = 0.0864(3.1 + 4.1v)(t_w - t_a)$$

όπου q_c οι θερμικές απώλειες λόγω συναγωγής ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{ημέρα}$), v η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 0.3m από την επιφάνεια της πισίνας και t_w και t_a οι θερμοκρασίες του νερού και του αέρα αντίστοιχα σε $^{\circ}\text{C}$.

Απώλειες λόγω νερού συμπλήρωσης

Εάν η θερμοκρασία του νερού συμπλήρωσης είναι διαφορετική από τη θερμοκρασία λειτουργίας της πισίνας, οι απώλειες θερμότητας θα είναι:

$$q_{aw} = m_{evp} c_p (t_{aw} - t_w)$$

όπου q_{aw} οι απώλειες θερμότητας του νερού συμπλήρωσης ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{ημέρα}$), m_{evp} ο ρυθμός απωλειών νερού ανά ημέρα ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{ημέρα}$) c_p η ειδική θερμότητα του νερού ($\text{J}/\text{kg}/^{\circ}\text{C}$) και t_{aw} η θερμοκρασία του προστιθέμενου νερού. Ο ρυθμός απωλειών μάζας $m_{evp} = q_c / h_{fg}$ όπου h_{fg} η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού (MJ/kg).

Θερμικά κέρδη λόγω ηλιακής ακτινοβολίας

Υπολογίζονται ως:

$$q_s = \alpha H_s$$

q_s τα θερμικά κέρδη από την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας (MJ/m²/ημέρα), α ο συντελεστής απορρόφησης του νερού (0.85 για ανοιχτόχρωμες πισίνες και 0.95 για σκουρόχρωμες απώλειες και H_s η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο ((MJ/m²/ημέρα).

Οι συνολικές θερμικές ανάγκες υπολογίζονται από το ενεργειακό ισοζύγιο ως:

$$q_{ss} = q_e + q_r + q_c + q_{aw} - q_s$$

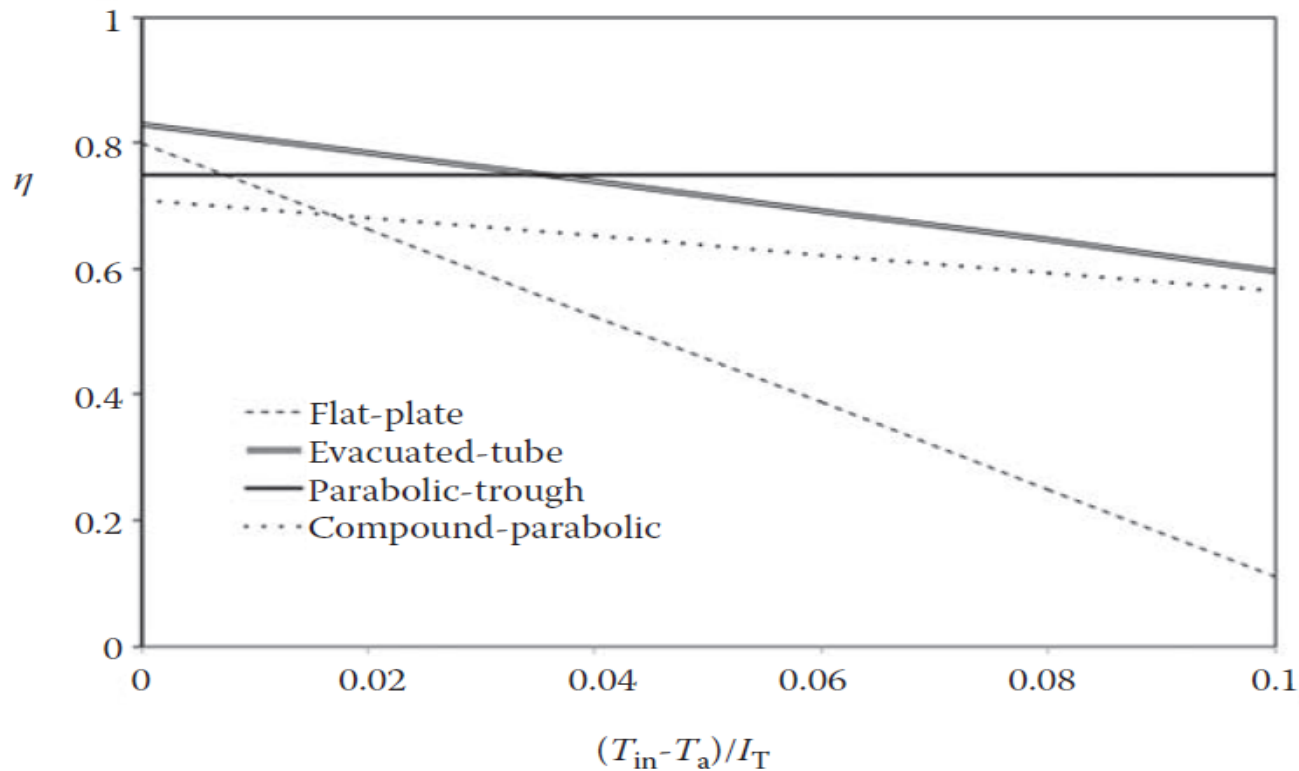
π.χ. με εφαρμογή των παραπάνω σχέσεων για 500 m² με θερμοκρασία νερού 25 °C, θερμοκρασία αέρα 17°C, σχετική υγρασία 60% και θερμοκρασία προστιθέμενου νερού 22 °C σε περιοχή με προσπίπτουσα ακτινοβολία 20.2 MJ/m²/ημέρα, υπολογίζονται οι θερμικές ανάγκες ως 9.53 GJ/ημέρα ή 2.65 MWh/ημέρα. Οι σχέσεις εφαρμόζονται ανάλογα για τυπική ημέρα κάθε μήνα που λειτουργεί η πισίνα. Τυπικές τιμές κατανάλωσης ενέργειας σε εγκαταστάσεις υγρού στίβου είναι 500-800 kWh/m² (Energy Consumption Guide 51,"Energy efficiency in Swimming Pools).

Οι ηλιακοί συλλέκτες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των θερμικών αναγκών των πισινών είναι πλαστικοί συλλέκτες χωρίς κάλυμμα με χαμηλή ετήσια απόδοση (300 kWh/m^2) αλλά και χαμηλό κόστος που είναι κατάλληλοι για εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών, οι επίπεδοι συλλέκτες με γυάλινο κάλυμμα με μεσαία ετήσια απόδοση ($600\text{-}700 \text{ kWh/m}^2$) κατάλληλες για τις περισσότερες εφαρμογές και οι συλλέκτες κενού αέρος με υψηλή ετήσια απόδοση ($>850 \text{ kWh/m}^2$) αλλά και κόστος. Η ανάλυση στη συνέχεια περιορίζεται στη 2^η κατηγορία συλλεκτών.

Η απόδοση του ηλιακού συλλέκτη δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = F_R(\tau\alpha)_{\text{eff}} - F_R U_L * (T_{\text{in}} - T_a) / I_T$$

όπου F_R συντελεστής που σχετίζει την πραγματική λειτουργία του συλλέκτη σε σχέση με κατάσταση αναφοράς, $(\tau\alpha)$ η οπτική απόδοση του συλλέκτη που δίνεται από τον κατασκευαστή, U_L ο συνολικός συντελεστής απωλειών θερμότητας του συλλέκτη ($\text{W/m}^2/^\circ\text{C}$), T_{in} και T_a οι θερμοκρασίες του ρευστού του συλλέκτη και του αέρα αντίστοιχα, και I_T η προσπίπτουσα ακτινοβολία (W/m^2). Οι παράμετροι F_R , U_L και $(\tau\alpha)$ είναι χαρακτηριστικές για κάθε συλλέκτη και προσδιορίζονται με εφαρμογή πιστοποιημένων μεθόδων όπως οι ASHRAE 93 (2003), ISO 9806-1 (1994), and EN12975-2 (2001). Η απόδοση του συλλέκτη εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ρευστού και του αέρα και μειώνεται σημαντικά όσο αυξάνει η διαφορά.



Για τη διαστασιολόγηση του ηλιοθερμικού συστήματος έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι όπως των διαγραμμάτων-f, της χρησιμότητας Φ , του συνδυασμού $\bar{\Phi}$, f-διαγραμμάτων καθώς και μοντέλων προσομοίωσης. Η μέθοδος των διαγραμμάτων-f που αναπτύχθηκε από τους Klein et al. (1976, 1977) και Beckman et al. (1977), εκτιμά το κλάσμα του συνολικού θερμικού φορτίου που μπορεί να τροφοδοτήσει το ηλιοθερμικό σύστημα προσδιορίζοντας το εμβαδό του συλλέκτη ως βασική μεταβλητή και δευτερευόντως τη χωρητικότητα αποθήκευσης, τον τύπο του συλλέκτη, το μέγεθος των εναλλακτών θερμότητας του φορτίου και του συλλέκτη και τους ρυθμούς ροής των ρευστών.

Το κλάσμα f του μηνιαίου θερμικού φορτίου που τροφοδοτείται από την ηλιακή ενέργεια ($f=Q_s/L$ όπου Q_s η ωφέλιμη θερμική ενέργεια του συλλέκτη και L το συνολικό θερμικό φορτίο που τροφοδοτεί το ηλιοθερμικό σύστημα) δίνεται ως συνάρτηση δύο αδιάστατων μεταβλητών X και Y :

$$X = F_R U_L \frac{F'_R}{F_R} (T_{ref} - \bar{T}_a) \Delta t \frac{A_c}{L}$$

$$Y = F_R (\tau\alpha)_n \frac{F'_R}{F_R} \left(\left[\frac{(\overline{\tau\alpha})}{(\tau\alpha)_n} \right] \bar{H}_t N \frac{A_c}{L} \right)$$

όπου A_c η επιφάνεια του συλλέκτη,

L συνολικό μηνιαίο φορτίο θέρμανσης (MJ)

N αριθμός ημερών του μήνα,

F'_R ο παράγοντας αποδοτικότητας του εναλλάκτη θερμότητας του συλλέκτη,

U_L ο συντελεστής συνολικών θερμικών απωλειών του συλλέκτη ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$),

$\Delta t = N \times 24 \times 3600$ ο αριθμός των δευτερολέπτων σε ένα μήνα

$\overline{\tau\alpha}$ η μέση μηνιαία οπτική απόδοση του συλλέκτη (απορροφούμενη προς προσπίπτουσα ακτινοβολία),

$\bar{T}_a$ μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος ($^\circ C$)

T_{ref} θερμοκρασία αναφοράς ($100 \text{ } ^\circ C$),

$\bar{H}_T$ μέση μηνιαία ημερήσια ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια συλλέκτη ανά μονάδα εμβαδού (MJ/m^2)

Οι συντελεστές $F_R U_L$ και $F_R (\tau \alpha)_n$ είναι χαρακτηριστικές του συλλέκτη και δίνονται από τον κατασκευαστή ενώ ο λόγος $\frac{F'_R}{F_R}$ είναι διορθωτικός παράγοντας της λειτουργίας του συλλέκτη (τυπική τιμή 0.98) καθώς χρησιμοποιείται εναλλάκτης θερμότητας ανάμεσα στον συλλέκτη και στο δοχείο αποθήκευσης που οδηγεί τον συλλέκτη σε λειτουργία υψηλότερης θερμοκρασίας από την αντίστοιχη συστήματος χωρίς τον εναλλάκτη.

Τυπικές τιμές του λόγου $(\overline{\tau \alpha})/(\tau \alpha)_n$ είναι 0.94-0.96. Οι όροι των παραμέτρων X και Y μπορούν να προσδιοριστούν από τα χαρακτηριστικά του συλλέκτη και την περιοχή λειτουργίας ενώ έχουν και φυσική σημασία καθώς η παράμετρος X εκφράζει τις συνολικές θερμικές απώλειες προς το φορτίο ή τις ανάγκες ενώ η Y το λόγο της συνολικά απορροφούμενης ηλιακής ενέργειας ως προς το φορτίο ή τις ανάγκες.

Για παράδειγμα, εάν η μέση ημερήσια ακτινοβολία είναι 12.5 MJ/m², η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος 10.1 °C, η επιφάνεια του συλλέκτη 35 m² με συντελεστή $F_R (\tau \alpha)_n = 0.78$ και $F_R U_L = 5.56$ W/m² °C, οι θερμικές ανάγκες 35.2 GJ, ο λόγος $\frac{F'_R}{F_R} = 0.98$ και ο λόγος $(\overline{\tau \alpha})/(\tau \alpha)_n = 0.96$ για όλους τους μήνες, υπολογίζονται οι παράμετροι X=1.30 και Y=0.28.

Η εκτίμηση του παράγοντα f με βάση τις παραμέτρους X και Y γίνεται μέσω της εξίσωσης:

$$f=1.029Y-0.065X-0.245Y^2+0.0018X^2+0.0215Y^3$$

Για την διαστασιολόγηση του συστήματος υπολογίζεται το κλάσμα f για κάθε μήνα με βάση την προσπίπτουσα ακτινοβολία, τις θερμοκρασίες περιβάλλοντος και τις θερμικές ανάγκες ενώ μπορεί να μεταβάλλεται η επιφάνεια του συλλέκτη, ώστε αθροίζοντας στο έτος να επιλεγεί η επιφάνεια που παρουσιάζει τη μέγιστη εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας με μεγιστοποίηση του παράγοντα f

$$f = \frac{\sum_i f_i L_i}{\sum_i L_i}$$