

4. Ηλιακή Ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

Πέτρος Αξαόπουλος ΤΕΙ Αθηνών, Ελλάς

Μαθησιακά αποτελέσματα

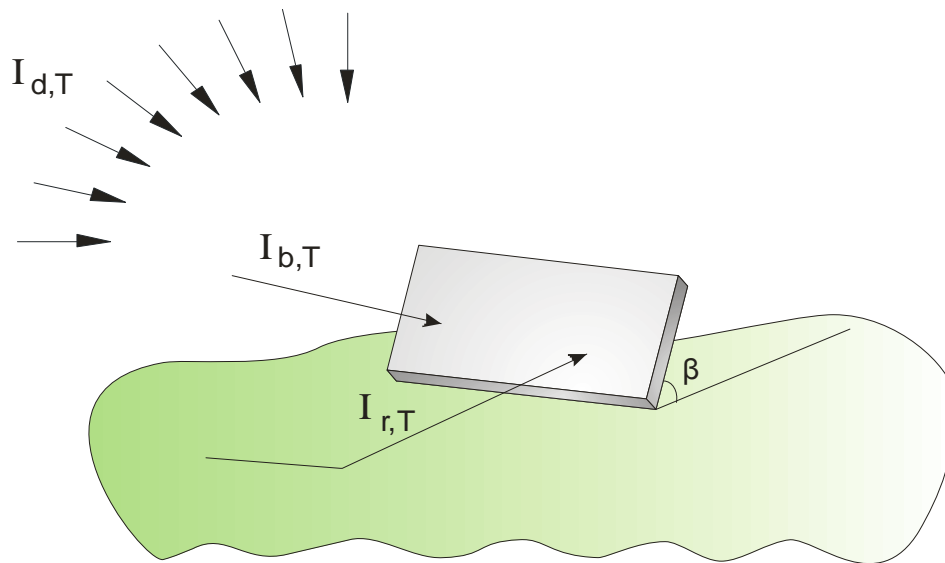
Μετά την ανάγνωση του παρόντος κεφαλαίου, ο αναγνώστης θα μπορεί να :

- Προσδιορίσει την άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο
- Καταλάβει την έννοια του δείκτη αιθριότητας
- Υπολογίσει την ωριαία και μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία σε επίπεδο διαφόρων προσανατολισμών και κλίσεων
- Εξηγήσει πως ο προσανατολισμός και η κλίση ενός επιπέδου, επηρεάζουν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία
- Κατανοήσει πως η επιλογή του προσανατολισμού και της κλίσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου επηρεάζουν τις αποδόσεις του
- Προσδιορίσει την βέλτιστη κλίση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, λαμβάνοντας υπόψη το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, την σχεδιαζόμενη εφαρμογή και την χρονική περίοδο που το φωτοβολταϊκό σύστημα θα χρησιμοποιηθεί

Η γνώση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται ένα κεκλιμένο επίπεδο είναι απαραίτητη στις περισσότερες εφαρμογές και μελέτες των ηλιακών συστημάτων. Επειδή όμως στους περισσότερους μετεωρολογικούς σταθμούς είναι διαθέσιμη συνήθως η ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο, θα πρέπει να δοθεί μέθοδος υπολογισμού της ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο σε ωριαία ή μηνιαία βάση. Στα παρακάτω κεφάλαια δίνεται η μεθοδολογία για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο σε ωριαία και μηνιαία βάση.

4.1 Ωριαία ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

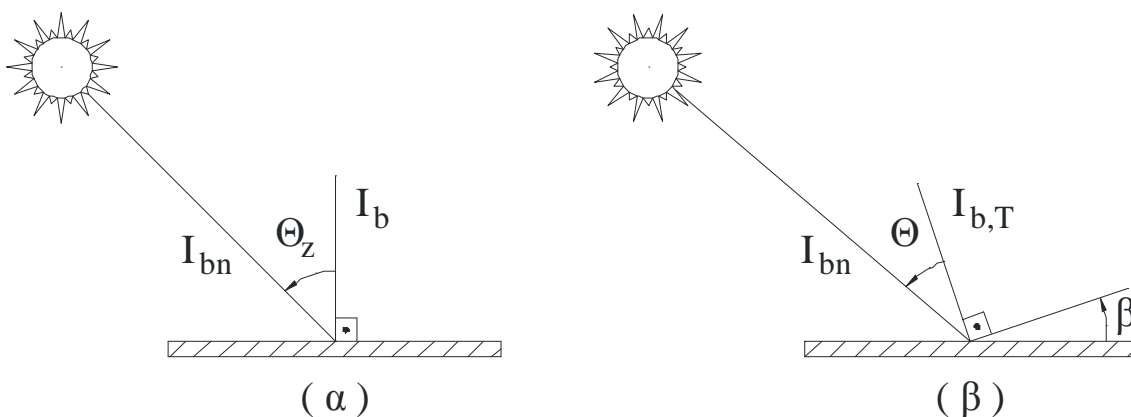
Η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ένα κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια του εδάφους αποτελείται από τρεις συνιστώσες : την άμεση που προέρχεται από τον ηλιακό δίσκο, τη διάχυτη που προέρχεται από τον ουράνιο θόλο και την ανακλώμενη που προέρχεται από το έδαφος της γύρω περιοχής (σχ. 4.1).



Σχήμα 4.1 Άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο.

Η άμεση ακτινοβολία που θα δεχθεί το επίπεδο εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων. Η διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία που δέχεται το κεκλιμένο επίπεδο δεν εξαρτώνται από τον προσανατολισμό του επιπέδου και ούτε προέρχονται απ' όλο τον ουράνιο θόλο ή το έδαφος της γύρω περιοχής. Έτσι η διάχυτη ακτινοβολία που δέχεται το κεκλιμένο επίπεδο θα προέρχεται μόνο από το τμήμα του ουρανού που " βλέπει " το επίπεδο.

Έπειτα απ' αυτά για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη για κάθε μία από τις συνιστώσες και ένας διορθωτικός συντελεστής [1].



Σχήμα 4.2 Προσδιορισμός διορθωτικών συντελεστών για την άμεση και τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία.

Ο διορθωτικός συντελεστής για την άμεση ηλιακή ακτινοβολία (R_b), είναι ο λόγος της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο ($I_{b,T}$), προς αυτήν στο οριζόντιο επίπεδο (I_b).

Αν θεωρήσουμε το σχήμα 4.2 με απλή τριγωνομετρία έχουμε :

$$R_b = \frac{I_{b,T}}{I_b} = \frac{I_{b,n} \sigma \nu \theta}{I_{b,n} \sigma \nu \theta_z} = \frac{\sigma \nu \theta}{\sigma \nu \theta_z} \quad (4.1)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση αυτή το $\sigma \nu \theta_z$ με την εξίσωση 3.5, προκύπτει η παρακάτω σχέση :

$$R_b = \frac{\sigma \nu \theta}{\sigma \nu \phi \sigma \nu \delta \sigma \nu \omega + \eta \mu \phi \eta \mu \delta} \quad (4.2)$$

Απ' την εξίσωση αυτή γίνεται φανερό ότι για ένα συγκεκριμένο τόπο η τιμή του R_b μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της ημέρας και του έτους.

Ο υπολογισμός της συνιστώσας για την διάχυτη ακτινοβολία βασίζεται στην υπόθεση ότι η διάχυτη είναι ιστροπική, δηλαδή είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη απ' τον ουράνιο θόλο. Ο διορθωτικός συντελεστής για την διάχυτη ακτινοβολία (R_d) είναι ο λόγος της διάχυτης ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο ($I_{d,T}$) προς αυτήν στο οριζόντιο (I_d). Από ολόκληρη την διάχυτη ακτινοβολία που προέρχεται απ' τον ουράνιο θόλο, ένα μόνο ποσοστό δέχεται το κεκλιμένο επίπεδο. Το ποσοστό αυτό είναι ο λόγος του τμήματος του ουράνιου θόλου που "βλέπει" το κεκλιμένο, προς ολόκληρη την ημισφαιρική επιφάνεια του ουράνιου θόλου. Για ένα κεκλιμένο επίπεδο που δεν δέχεται σκίαση, με κλίση β στην επιφάνεια της γής, ο διορθωτικός αυτός συντελεστής είναι :

$$R_d = \frac{I_{d,T}}{I_d} = \frac{1 + \sigma \nu \beta}{2} \quad (4.3)$$

Ο διορθωτικός συντελεστής για την ανακλώμενη ακτινοβολία (R_r), είναι ο λόγος της ανακλώμενης ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο ($I_{r,T}$), προς αυτήν στο οριζόντιο (I_r). Η ανακλώμενη όμως στο οριζόντιο επίπεδο είναι το γινόμενο του συντελεστή ανάκλασης ρ του εδάφους της γύρω περιοχής, επί την ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο I . Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση έτσι και εδώ, αν υποθέσουμε ότι η ανακλώμενη είναι ιστροπική, τότε για ένα κεκλιμένο επίπεδο με κλίση β στην επιφάνεια της γής ο διορθωτικός συντελεστής είναι :

$$R_r = \frac{I_{r,T}}{I\rho} = \frac{1 - \sigma \nu \beta}{2} \quad (4.4)$$

Έπειτα από τα παραπάνω η ολική ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο I_T , είναι :

$$I_T = I_b R_b + I_d R_d + I\rho R_r \quad (4.5)$$

Αν ληφθούν υπ' όψη οι εξισώσεις 4.1, 4.3 και 4.4, τότε η εξίσωση 4.5 γράφεται :

$$I_T = I_b \frac{\sigma \nu \theta}{\sigma \nu \theta_z} + I_d \frac{1 + \sigma \nu \beta}{2} + I\rho \frac{1 - \sigma \nu \beta}{2} \quad (4.6)$$

Η εξίσωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ωριαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σ' ένα κεκλιμένο επίπεδο με κλίση β , εφόσον θεωρηθούν ότι οι γωνίες θ και θ_z , αντιστοιχούν στο μέσον της αναφερόμενης ώρας. Ο συντελεστής ανάκλασης ρ λαμβάνεται συνήθως 0.2 αλλά όταν η γύρω περιοχή είναι καλυμμένη με χιόνι ο συντελεστής αυτός μπορεί να είναι πολύ υψηλός. Διάφορες τιμές του ρ δίνονται στον πίνακα 4.1

Πίνακας 4.1 Συντελεστής ανάκλασης για διάφορα είδη επιφανειών

Είδος επιφάνειας	Συντελεστής ανάκλασης
Φρέσκο χιόνι	0.87
Ξηρή άμμος	0.18
Υγρή άμμος	0.09
Δάσος κωνοφόρων	0.05
Τσιμέντο νέο	0.33
Τσιμέντο παλιό	0.23

Αν ληφθεί υπ' όψη η εξίσωση 4.1 και διαιρεθούν και τα δυο μέλη της εξισώσεως 4.6 δια I , προκύπτει η παρακάτω σχέση :

$$\frac{I_T}{I} = \left(1 - \frac{I_d}{I}\right) R_b + \frac{I_d}{I} \left(\frac{1 + \sigma \nu \beta}{2}\right) + \rho \frac{1 - \sigma \nu \beta}{2} \quad (4.7)$$

Ο λόγος I_d/I δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις ανάλογα με την τιμή του ωριαίου δείκτη αιθριότητας K [2].

$$I_d/I = 1 - 0.09K \quad \text{για } K \leq 0.22 \text{ (α)}$$

$$I_d/I = 0.9511 - 0.1604K + 4.388K^2 - 16.638K^3 + 12.336K^4 \quad \text{για } 0.22 < K < 0.8 \text{ (β)}$$

$$I_d/I = 0.165 \quad \text{για } K > 0.8 \text{ (γ)} \quad (4.8)$$

Ωριαίος δείκτης αιθριότητας (K) καλείται ο λόγος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο (I) προς την εκτός γήινης ατμόσφαιρας ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (I_o). Ο δείκτης αυτός μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ένα μέτρο της σχετικής διαπερατότητας της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία.

$$K = \frac{I}{I_o} \quad (4.9)$$

Ο υπολογισμός της εκτός γήινης ατμόσφαιρας ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο (I_o) μπορεί να γίνει προσεγγιστικά από την παρακάτω σχέση με την προϋπόθεση ότι η ζενιθία γωνία θ_z , έχει θεωρηθεί στο μέσο της αντίστοιχης ώρας.

$$I_o = G_{on} \sigma \nu \theta_z \quad (4.10)$$

Για να υπολογισθεί η I_o για χρονικό διάστημα από ω_1 μέχρι ω_2 θα πρέπει να ολοκληρωθεί η αμέσως προηγούμενη σχέση [2].

$$I_{o(\omega_1-\omega_2)} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} G_{on} \sigma \nu \theta_z d\omega = \frac{12 \cdot 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0.033 \sigma \nu \frac{360 \cdot n}{365} \right) \cdot \left[\sigma \nu \phi \sigma \nu \delta (\eta \mu \omega_2 - \eta \mu \omega_1) + \frac{\pi (\omega_2 - \omega_1)}{180} \eta \mu \phi \eta \mu \delta \right] \quad (4.11)$$

Παράδειγμα 4.1

Να υπολογισθεί η ωριαία ολική ηλιακή ακτινοβολία καθώς και η άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη, που θα δεχθεί ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο με κλίση 35° , νότιου προσανατολισμού στη περιοχή των Ιωαννίνων ($\phi = 39^\circ 42'$) για το χρονικό διάστημα από 10^{00} - 11^{00} ηλιακού χρόνου, στις 3 Απριλίου. Η ωριαία ολική ηλιακή ενέργεια στο οριζόντιο επίπεδο να θεωρηθεί ότι είναι 520 Wh/m^2 και ότι η διάχυτη είναι ισοτροπική και ο συντελεστής ανάκλασης $\rho = 0.2$.

Λύση

Η ηλιακή απόκλιση για την ημέρα αυτή ($n = 93$) υπολογίζεται από τη σχέση 3.2 :

$$\delta = 23.45 \cdot \eta\mu\left(360 \frac{284+93}{365}\right) = 4.81^\circ$$

Η ωριαία γωνία του ήλιου (ω) μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτική, αν υπολογισθεί για το μεσοδιάστημα της ώρας αυτής. Άρα $\omega = -22.5^\circ$. Με γνωστές τις τιμές των δ , ω και ϕ μπορεί να υπολογισθεί τώρα από την εξίσωση 3.5 η ζενιθία γωνία του ήλιου :

$$\sigma\upsilon\nu\theta_z = \eta\mu 4.81 \cdot \eta\mu 39.7 + \sigma\upsilon\nu 4.81 \cdot \sigma\upsilon\nu 39.7 \cdot \sigma\upsilon\nu(-22.5) = 40.37^\circ$$

Από την σχέση 2.5 υπολογίζεται η εκτός γήινης ατμόσφαιρας ηλιακή ακτινοβολία και στη συνέχεια υπολογίζεται η εκτός γήινης ατμόσφαιρας ωριαία ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (I_o). Οπότε :

$$I_o = 1365.6 \cdot \sigma\upsilon\nu 40.37 = 1040.45 \text{ kWh/m}^2$$

Εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι η I_o θα μπορούσε να υπολογισθεί και από την σχέση 4.11 για χρονικό διάστημα μίας ώρας από $\omega_1(10^\circ)$ μέχρι $\omega_2(11^\circ)$. Για λόγους σύγκρισης έγινε αυτός ο υπολογισμός και βρέθηκε $I_o = 1037.71 \text{ kWh/m}^2$.

Υποθέτοντας τώρα ότι η ακτινοβολία αυτή είναι σταθερή για το ζητούμενο χρονικό διάστημα της μίας ώρας και χρησιμοποιώντας τη σχέση 4.9 υπολογίζεται ο K .

$$K = \frac{520}{1040.46} = 0.5$$

Αντικαθιστώντας την τιμή του K στην εξίσωση 4.8(β) υπολογίζεται ο λόγος $I_d/I = 0.66$. Οπότε :

$$I_d = 0.66 \cdot 520 = 343.2 \text{ Wh/m}^2$$
$$I_b = 0.34 \cdot 520 = 176.8 \text{ Wh/m}^2$$

Τώρα απαιτείται να υπολογισθεί η γωνία πρόσπτωσης θ . Γνωστής της ζενιθίας γωνίας του ήλιου, το ύψος του ήλιου θα είναι σύμφωνα με τη σχέση 3.1:

$$h = 90 - 40.37 = 49.63^\circ$$

Το αζιμούθιο του ήλιου (α), υπολογίζεται από την εξίσωση 3.14 :

$$\eta\mu\alpha = \frac{\sigma\upsilon\nu 4.81 \cdot \eta\mu(-22.5)}{\sigma\upsilon\nu 49.63} = -36.07^\circ$$

Δεδομένου ότι το $\gamma = 0$ η εξίσωση 3.16 δίνει :

$$\sigma_{\nu\theta} = \sigma_{\nu 35} \cdot \sigma_{\nu 40.37} + \eta_{\mu 35} \cdot \eta_{\mu 40.37} \cdot \sigma_{\nu(-36.07)} = 22.42^0$$

Όταν αντικατασταθούν όλα τα γνωστά πλέον μεγέθη στην εξίσωση 4.6, υπολογίζεται η I_T :

$$I_T = 176.8 \frac{\sigma_{\nu 22.42}}{\sigma_{\nu 40.37}} + 343.2 \frac{1 + \sigma_{\nu 35}}{2} + 520 \cdot 0.2 \frac{1 - \sigma_{\nu 35}}{2}$$

$$I_T = 214.52 + 312.17 + 9.4 = 536.1 \text{ Wh/m}^2$$

Επομένως η ολική ηλιακή ακτινοβολία στην κεκλιμένη επιφάνεια του φωτοβολταϊκού είναι 536.1 Wh/m^2 ενώ η άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη είναι αντίστοιχα 214.52 Wh/m^2 , 312.17 Wh/m^2 και 9.4 Wh/m^2 .

4.2 Μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

Η ίδια διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια I_T , μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ημερήσιας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο H_T . Επειδή στην εξίσωση 4.6 ο δεύτερος και τρίτος όρος είναι ανεξάρτητοι απ' την γωνία πρόσπτωσης, η εξίσωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο H_T , αρκεί στον πρώτο όρο να χρησιμοποιηθεί ένας διορθωτικός συντελεστής R_b , οι ακτινοβολίες να θεωρηθούν ημερήσιες και, η διάχυτη και ολική ανακλώμενη ότι είναι ισοτροπικές. Έτσι η εξίσωση θα γίνει :

$$H_T = H_b R_b + R_d \left(\frac{1 + \sigma_{\nu\beta}}{2} \right) + H \rho \left(\frac{1 - \sigma_{\nu\beta}}{2} \right) \quad (4.12)$$

Ο συντελεστής R_b είναι ο λόγος της ημερήσιας άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο $H_{b,T}$ προς αυτήν στο οριζόντιο H_b . Για το βόρειο ημισφαίριο και για επιφάνειες νότιου προσανατολισμού ($\gamma = 0$) ο συντελεστής αυτός μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση 4.2 με ολοκλήρωση, από την ωριαία γωνία ανατολής ω_{sr} μέχρι την ωριαία γωνία δύσης ω_{ss} του ήλιου για το κεκλιμένο επίπεδο και από την ωριαία γωνία ανατολής ω_{sr} μέχρι την ωριαία γωνία δύσης ω_{ss} του ήλιου για το οριζόντιο επίπεδο :

$$R_b = \frac{\int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}} \sigma \nu \theta d\omega}{\int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}} \sigma \nu \theta_Z d\omega} \quad (4.13)$$

Δεδομένου ότι $\omega_{sr}' = -\omega_{ss}'$ και $\omega_{sr} = -\omega_{ss}$ οι γωνίες αυτές μπορούν να έχουν ενιαίο συμβολισμό ω_s' και ω_s , οπότε προκύπτει [3] :

$$R_b = \frac{\sigma \nu (\phi - \beta) \sigma \nu \delta \eta \omega_s' + (\pi/180) \omega_s' \eta \mu (\phi - \beta) \eta \mu \delta}{\sigma \nu \phi \sigma \nu \delta \eta \omega_s + (\pi/180) \omega_s \eta \mu \phi \eta \mu \delta} \quad (4.14)$$

όπου : ω_s' είναι η ωριαία γωνία της δύσης του ηλίου για κεκλιμένη επιφάνεια και έχει την μικρότερη τιμή απ' τις τιμές που παίρνουν τα δύο μεγέθη που βρίσκονται μέσα στην αγκύλη της παρακάτω εξίσωσης.

$$\omega_s' = \min \left\{ \omega_s, \arcsin \left(-\varepsilon \phi (\phi - \beta) \varepsilon \phi \delta \right) \right\} \quad (4.15)$$

Για τις ηλιακές εφαρμογές, σε αρκετές περιπτώσεις, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της μηνιαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο. Στις περιπτώσεις αυτές μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία εξίσωση παρόμοια με την 4.12, αρκεί βέβαια ο συντελεστής R_b , να υπολογισθεί για την χαρακτηριστική ημέρα του αντίστοιχου μήνα. Έτσι η μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο μπορεί να δοθεί από την παρακάτω σχέση :

$$\bar{H}_T = \bar{H}_b \bar{R}_b + \bar{H}_d \left(\frac{1 + \sigma \nu \beta}{2} \right) + \rho \bar{H} \left(\frac{1 - \sigma \nu \beta}{2} \right) \quad (4.16)$$

Αν ορισθεί ο συντελεστής \bar{R} ότι είναι ο λόγος της μέσης ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο \bar{H}_T προς αυτήν στο οριζόντιο \bar{H} τότε :

$$\bar{H}_T = \bar{H} \bar{R} \quad (4.17)$$

Απ' την σχέση αυτή είναι πολύ απλό να υπολογισθεί η μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο για μία περιοχή, αρκεί να είναι γνωστές οι τιμές των \bar{H} και \bar{R} για τον αντίστοιχο μήνα.

Σε πίνακες δίνονται για αρκετές πόλεις οι μηνιαίες τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο καθώς και οι μηνιαίες τιμές του \bar{R} για διάφορες γωνίες κλίσης.

Παρόμοια με την σχέση 4.7, η εξίσωση 4.16 μπορεί να μετασχηματισθεί στην παρακάτω σχέση :

$$\frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} = \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \left(\frac{1 + \sigma \nu \beta}{2}\right) + \rho \left(\frac{1 - \sigma \nu \beta}{2}\right) \quad (4.18)$$

Διάφορες σχέσεις για το λόγο $\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}$ έχουν προταθεί από αρκετούς ερευνητές [4-9]. Κατά τους Liu and Jordan [9], ο λόγος αυτός υπολογίζεται απ' την παρακάτω σχέση :

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.390 - 4.027\bar{K} + 5.531\bar{K}^2 - 3.108\bar{K}^3 \quad (4.19)$$

Ο δείκτης αιθριότητας \bar{K} στη σχέση αυτή είναι ο λόγος της μέσης ημερήσιας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο για κάθε μήνα (\bar{H}) προς την εκτός γήινης ατμόσφαιρας μέση ημερήσια ακτινοβολία (\bar{H}_o), για κάθε μήνα.

$$\bar{K} = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} \quad (4.20)$$

Η εκτός γήινης ατμόσφαιρας μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία \bar{H}_o μπορεί να υπολογισθεί με ολοκλήρωση της G_o στο χρονικό διάστημα από την ωριαία γωνία ανατολής (ω_{sr}) μέχρι την ωριαία γωνία της δύσης του ήλιου (ω_{ss}).

$$\bar{H}_o = \int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}} G_{on} \sigma \nu \theta_Z d\omega \quad (4.21)$$

Αν η ηλιακή σταθερά είναι σε W/m^2 και ληφθούν υπ' όψη οι εξισώσεις 2.5 και 3.5 τότε η \bar{H}_o θα προκύψει σε J/m^2 από την παρακάτω σχέση :

$$\bar{H}_o = \frac{24 \cdot 3600 \cdot G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0.033 \sigma \nu \frac{360n}{365}\right) \left(\sigma \nu \phi \sigma \nu \delta \eta \mu \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \eta \mu \phi \eta \mu \delta\right) \quad (4.22)$$

Η εκτός γήϊνης ατμόσφαιρας ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία \bar{H}_o μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση 4.22 για γεωγραφικά πλάτη που κυμαίνονται από -60° μέχρι 60° .

Παράδειγμα 4.2

Να υπολογισθεί η μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία που θα δεχθεί ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο νότιου προσανατολισμού, με κλίση 40° , στη περιοχή της Νάξου ($\phi = 37^\circ 06'$). Η διάχυτη ακτινοβολία να θεωρηθεί ισοτροπική και ο συντελεστής ανάκλασης της γύρω περιοχής 0.2. Οι τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο για κάθε μήνα φαίνονται στον πίνακα 4.2.

Λύση

Αρχικά θα υπολογισθεί αναλυτικά η μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στην κεκλιμένη επιφάνεια (\bar{H}_T) για τον Ιανουάριο και στη συνέχεια με παρόμοιο τρόπο μπορούν να υπολογισθούν οι αντίστοιχες τιμές της \bar{H}_T για τους άλλους μήνες. Υπολογίζεται η ηλιακή απόκλιση δ για τον Ιανουάριο, θεωρώντας την χαρακτηριστική του ημέρα από τον πίνακα 3.1. Έτσι για $n = 17$ η εξίσωση 3.2 δίνει :

$$\delta = 23.45 \cdot \eta\mu\left(360 \frac{284+17}{365}\right) = -20.92^\circ$$

Η ωριαία γωνία δύσης του ηλίου ω_s από την εξίσωση 3.10 είναι :

$$\omega_s = \tau\omicron\xi\sigma\upsilon\nu(-\epsilon\phi 37.1 \cdot \epsilon\phi(-20.92)) = 73.2^\circ$$

Με γνωστές τις τιμές δ και ω_s καθορίζεται η εκτός γήϊνης ατμόσφαιρας μέση μηνιαία ακτινοβολία \bar{H}_o από τη σχέση 4.22 οπότε :

$$\bar{H}_o = 146.31 \text{ kWh/m}^2$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο δείκτης αιθριότητας \bar{K} από την εξίσωση 4.20

$$\bar{K} = \frac{51}{146.31} = 0.35$$

Με γνωστή την τιμή του \bar{K} υπολογίζεται ο λόγος $\frac{\bar{H}_d}{H}$ από την εξίσωση 4.19

$$\frac{\bar{H}_d}{H} = 1.446 - 2.965 \cdot 0.35 + 1.727 \cdot (0.35)^2 = 0.62$$

Η ωριαία γωνία δύσης του ήλιου ω'_s σε κεκλιμένο επίπεδο δίνεται από τη σχέση 4.15 και είναι :

$$\omega'_s = \min\{73.2, \text{τοξσυν}(-\varepsilon\phi(37.1-40)) \cdot \varepsilon\phi(-20.92)\} = \min(73.2^0, 91.1^0)$$

Οπότε ο συντελεστής \bar{R}_b υπολογίζεται από τη σχέση 3.14 και είναι :

$$\bar{R}_b = \frac{\text{συν}(37.1-40) \cdot \text{συν}(-20.92) \cdot \eta\mu 73.2 + (3.14/180) \cdot 73.2 \cdot \eta\mu(37.1-40) \cdot \eta\mu(-20.92)}{\text{συν}37.1 \cdot \text{συν}(-20.92) \cdot \eta\mu 73.2 + (3.14/180) \cdot 73.2 \cdot \eta\mu 37.1 \cdot \eta\mu(-20.92)} = 2.09$$

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω τιμές, η εξίσωση 4.18 δίνει την μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία \bar{H}_T για τον Ιανουάριο.

$$\bar{H}_T = 69.36 \text{ kWh/m}^2$$

Τα αποτελέσματα για όλους τους μήνες παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2

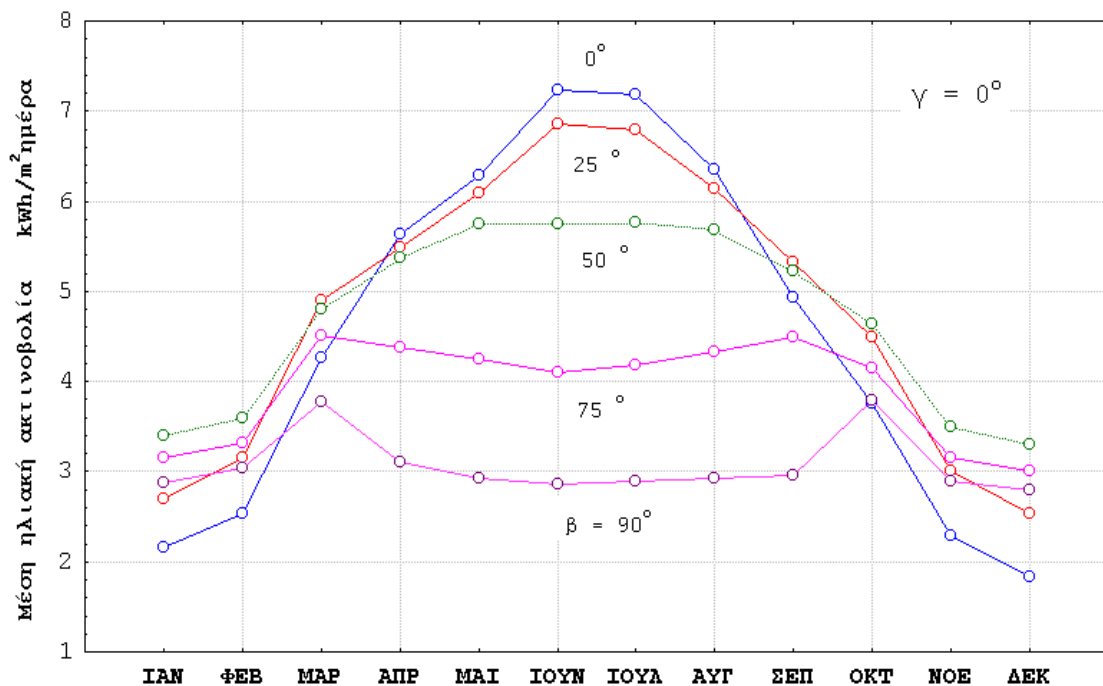
Πίνακας 4.2

Μήνας	H kWh/m ²	H _o kWh/m ²	H _d /H	R _b	H _T kWh/m ²
Ιαν.	51	146.31	0.62	2.09	69.36
Φεβ.	67.4	172.48	0.55	1.68	84.92
Μαρτ.	111	247.38	0.46	1.32	126.54
Απρ.	149	294.60	0.38	1.02	147.51
Μάϊος	193	343.48	0.32	0.84	169.84
Ιούν.	205	347.10	0.29	0.77	170.15
Ιούλ.	212	350.30	0.28	0.80	180.20
Αυγ.	194	318.68	0.28	0.94	184.30
Σεπτ.	161	258.90	0.27	1.19	181.93
Οκτ.	111	207.08	0.35	1.55	148.74
Νοε.	75	151.50	0.40	1.97	116.25
Δεκ.	52	134.54	0.55	2.22	78.00

4.3 Ηλιακή ακτινοβολία σε διαφορετικές κλίσεις και προσανατολισμούς

Η ηλιακή ακτινοβολία που θα δεχθεί μία επιφάνεια, εξαρτάται, εκτός των άλλων, από την κλίση και τον προσανατολισμό της. Για μια επιφάνεια σε ένα συγκεκριμένο τόπο η αύξηση της κλίσης της έχει σαν αποτέλεσμα να δέχεται περισσότερη ακτινοβολία τον χειμώνα από το καλοκαίρι. Έτσι για ηλιακές εφαρμογές που απαιτείται να γίνει χρήση της ενέργειας από τους ηλιακούς συλλέκτες το χειμώνα, η κλίση τους πρέπει να είναι μεγάλη ενώ όταν οι συλλέκτες χρησιμοποιούνται το καλοκαίρι η κλίση τους θα πρέπει να είναι μικρή.

Ένας εμπειρικός κανόνας που ισχύει για την κλίση των συλλεκτών είναι ότι θα πρέπει η κλίση αυτή για το χειμώνα να είναι από 10° μέχρι 15° μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, ενώ για το καλοκαίρι από 10° μέχρι 15° μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου και, για όλο το χρόνο ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου.



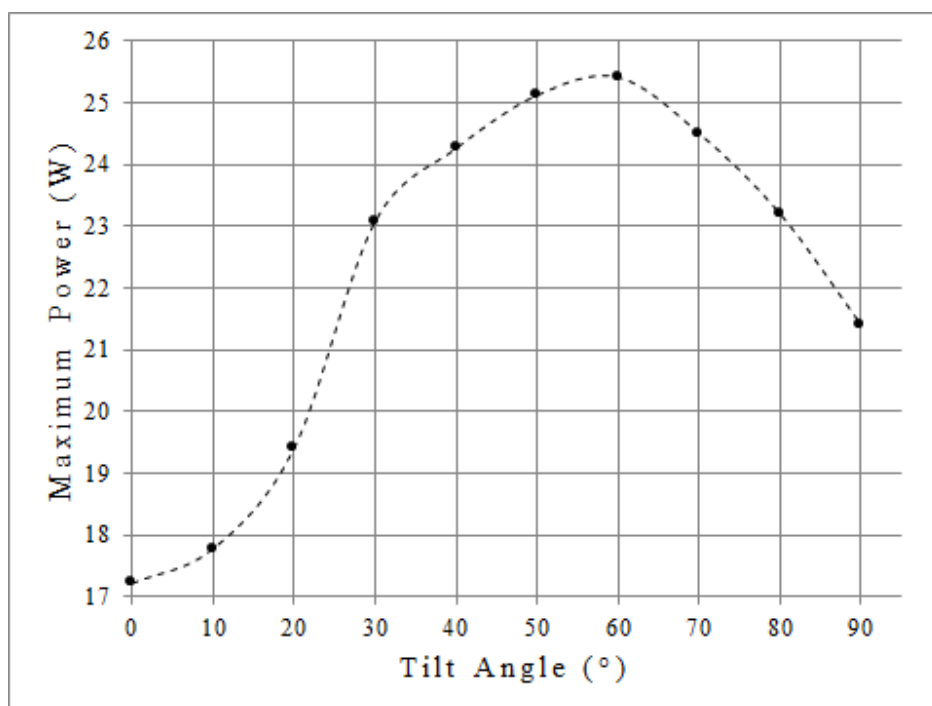
Σχήμα 4.3 Επίδραση της κλίσης στην μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα, που δέχεται επιφάνεια νότιου προσανατολισμού ($\gamma = 0$) για $\phi = 38^\circ$.

Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα, που θα δεχθεί μία επιφάνεια νότιου προσανατολισμού για διάφορες γωνίες κλίσεις [10]. Οι τιμές αυτές αναφέρονται για βόρειο γεωγραφικό πλάτος 38° , $\rho = 0.2$ και είναι προσεγγιστικές. Παρ' όλα αυτά όμως δίνουν μία πλήρη εικόνα της επίδρασης που έχει η κλίση στην

ηλιακή ακτινοβολία που θα δεχθεί η επιφάνεια. Απ' το σχήμα αυτό επιβεβαιώνεται ο εμπειρικός κανόνας που αναφέρθηκε προηγουμένως.

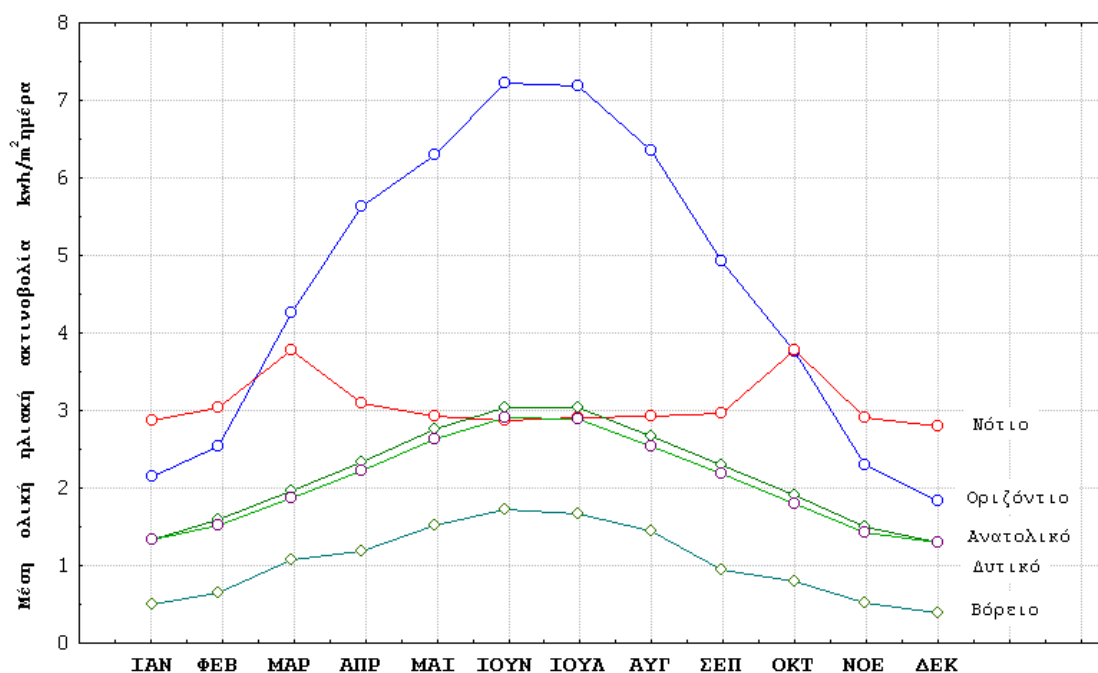
Είναι γνωστό ότι η ηλεκτρική ισχύς εξόδου ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου (φ/β) εξαρτάται κυρίως από τη ηλιακή ακτινοβολία που θα δεχθεί στην επιφάνειά του, ενώ η ακτινοβολία αυτή επηρεάζεται σημαντικά από την κλίση του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Δεδομένου ότι η θέση του ήλιου στον ουράνιο θόλο μεταβάλλεται στην διάρκεια της ημέρας και ακολουθεί διαφορετική τροχιά για κάθε ημέρα του έτους, ο προσδιορισμός της βέλτιστης κλίσης για την τοποθέτηση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, είναι σημαντικός για την βέλτιστη λειτουργία του.

Προκειμένου να παρουσιασθεί η επίδραση της κλίσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου στην ηλεκτρική ισχύ εξόδου του, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις σε μια χρονική στιγμή, ένα πρωινό στην περιοχή των Αθηνών [11]. Η ισχύς αιχμής του φ/β πλαισίου είναι $55 W_p$, ο προσανατολισμός του νότιος και η κλίση του μεταβαλλόταν από $0^\circ - 90^\circ$ με βήμα 10° . Τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα 4.4. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα αυτό η βέλτιστη κλίση παρουσιάζεται γύρω στις 60° και η ηλεκτρική ισχύς εξόδου ελαττώνεται σημαντικά μετά την βέλτιστη κλίση. Στο συγκεκριμένο πείραμα η βέλτιστη κλίση είναι μεγάλη δεδομένου ότι είναι πρωϊ (10:34) και το ύψος του ήλιου είναι χαμηλό.



Σχήμα 4.4 Πειραματικά αποτελέσματα της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος εξόδου ενός φ/β για διαφορετικές γωνίες κλίσης στην περιοχή των Αθηνών ($\phi=38^\circ N$)

Ένα άλλο μέγεθος από το οποίο εξαρτάται η ηλιακή ακτινοβολία που θα δεχθεί μία επιφάνεια, είναι ο προσανατολισμός της. Θεωρώντας ότι η ηλιακή ακτινοβολία είναι συμμετρική ως προς το ηλιακό μεσημέρι, τότε ο καλύτερος προσανατολισμός για ένα φ/β πλαίσιο είναι ο νότιος ($\gamma = 0$). Αποκλίσεις κατά 10° μέχρι 20° ανατολικά ή δυτικά του νότου έχουν μικρή επίδραση στην ετήσια συλλεγόμενη ηλιακή ενέργεια. Ο προσανατολισμός σ' ένα φ/β πλαίσιο θα έχει επίδραση και στο χρόνο που θα δεχθεί την ηλιακή ακτινοβολία. Έτσι, ένα φ/β πλαίσιο τοποθετημένο νοτιοανατολικά, θα δεχθεί το μεγαλύτερο ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας τις πρωινές ώρες.



Σχήμα 4.5 Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα, που δέχεται οριζόντια επιφάνεια και τέσσερις κάθετες επιφάνειες διαφορετικού προσανατολισμού για $\phi = 38^\circ$.

Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζεται η μέση ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα, που δέχεται οριζόντια επιφάνεια και τέσσερις κάθετες επιφάνειες, με προσανατολισμό νότιο, ανατολικό, βόρειο και δυτικό για την περιοχή των Αθηνών [10]. Ένα χαρακτηριστικό που παρουσιάζει το σχήμα αυτό είναι ότι όλες οι καμπύλες εκτός εκείνης της νότιας επιφάνειας έχουν ένα μέγιστο που αντιστοιχεί στο θερινό ηλιοστάσιο, ενώ της νότιας έχει δυο μέγιστα που αντιστοιχούν στην εαρινή και την φθινοπωρινή ισημερία. Επίσης από το διάγραμμα παρατηρείται ότι τους χειμερινούς μήνες η νότια επιφάνεια θα δεχθεί τα μεγαλύτερα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες η οριζόντια επιφάνεια υπερτερεί όλων.

Οι μεγάλες τιμές του ύψους του ήλιου κατά την θερινή περίοδο δικαιολογούν τη μορφή της καμπύλης που αναφέρεται στην οριζόντια επιφάνεια ενώ ο συνδυασμός του μικρού ύψους του ήλιου με την μεγάλη διάρκεια του ημερήσιου τόξου του, δίνουν τα δύο

μέγιστα στις ισημερίες. Επίσης το πολύ μικρό ύψος του ήλιου σε συνδυασμό με το μικρό ημερήσιο τόξο του, έχουν σαν αποτέλεσμα η νότια επιφάνεια να υπερτερεί έναντι όλων των άλλων κατά την χειμερινή περίοδο. Τέλος, η βόρεια κάθετη επιφάνεια θα δεχθεί μικρά ποσά ηλιακής ακτινοβολίας το καλοκαίρι, κοντά στην ανατολή και στη δύση του ήλιου, λόγω του μεγάλου ημερήσιου τόξου του ήλιου και του μικρού ύψους του τις ώρες αυτές.

Ο εμπειρικός κανόνας που αναφέρθηκε παραπάνω για την κλίση των ηλιακών συλλεκτών, δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα όταν εφαρμοσθεί σε μικρές ηλιακές εγκαταστάσεις. Στην περίπτωση όμως μεγάλων ηλιακών εγκαταστάσεων ακόμα και μία μικρή μεταβολή στην κλίση αντιστοιχεί σε μεγάλα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης στα φωτοβολταϊκά συστήματα που το κόστος των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι υψηλό, θα πρέπει να μελετηθεί η βέλτιστη κλίση τους για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Έτσι αν τα φ/β πλαίσια χρησιμοποιηθούν για διασυνδεδεμένο σύστημα, τότε θα πρέπει η βέλτιστη κλίση τους να είναι η βέλτιστη για ολόκληρο το έτος. Η βέλτιστη κλίση των φ/β πλαισίων είναι συνήθως η ίδια με το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας που θα τοποθετηθούν. Όμως, στην περίπτωση αυτόνομου φ/β συστήματος που χρησιμοποιεί μπαταρίες για αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας, το κριτήριο μπορεί να μην είναι η ολική ηλιακή ακτινοβολία που θα δεχθεί το φ/β, αλλά η ημερήσια ακτινοβολία τον μήνα με την μικρότερη ηλιακή ακτινοβολία, προκειμένου να ελαττωθεί η αποθηκευτική ικανότητα του συστήματος. Έτσι, για ένα αυτόνομο σύστημα που θα χρησιμοποιηθεί το χειμώνα στο βόρειο ημισφαίριο, ο Δεκέμβριος π.χ. θεωρείται ότι είναι ο μήνας με την μικρότερη ηλιακή ακτινοβολία, οπότε η κλίση του φ/β πλαισίου θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος. Γενικά, η βέλτιστη κλίση των φ/β πλαισίων θα πρέπει να καθορίζεται από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου που πρόκειται να τοποθετηθούν, τις ανάγκες που πρόκειται να καλύψουν και την χρονική περίοδο που θα χρησιμοποιηθούν.

Αναφορές

- [1] Agami Reddy T. 1987. The design and sizing of active solar thermal systems, Clarendon press Oxford.
- [2] Duffie, J. A. and W. A. Beckman 2006. "Solar Engineering of thermal Processes" John Wiley & Sons, Inc.
- [3] Klein S. A. 1977. "Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces" Solar Energy Vol. 19, 325-329.
- [4] Collares-Pereira M. and A. Rabl 1979. "The average distribution of solar radiation-correlation between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values". Solar Energy 22, 155 -164.
- [5] Erbs D, Klein SA, Duffie J A. 1982. "Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation". Sol Energy 28(4): 293-302.
- [6] Ruth D. W. and R. E. Chant 1976. The relationship of diffuse radiation to total radiation in Canada. Solar Energy 18, 153 154.
- [7] Choudhury N. K. D.1963. "Solar radiation at New Delhi". Solar Energy 7, 44 -52.
- [8] Tuller S. E. 1976. "The relationship between diffuse, total, and extraterrestrial solar radiation". Solar Energy 18, 259 -263.
- [9] Liu B.Y. H. and R.C. Jordan 1960. "The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse, and total solar radiation" Solar Energy 4(3), 1-19.
- [10] Axaopoulos P. J 1995. "Renewable energy sources" in Greek. Course notes.
- [11] Axaopoulos P. J and Emmanouil D. Fylladitakis 2014. "Photovoltaic engineering e-learning applications developed for remote laboratory experimentation systems" Int Journal Energy Environ Eng 5:78.