



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ  
ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

---

Διπλωματική Εργασία

Θεωρητική ανάλυση και βελτιστοποίηση ηλιακού  
θερμικού συστήματος με τη μέθοδο  $\varphi$ -f chart

Παντελίδης Γιώργος

---

Επιβλέπων Καθηγητής  
Ανδρέας Γ. Μπουντουβής

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



# Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	3
Περίληψη.....	4
Abstract.....	5
1. Η ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....	6
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....	6
1.1.1 Ο ΉΛΙΟΣ.....	6
1.1.2 Η ΗΛΙΑΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ.....	7
1.1.3 ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΤΗΣ ΓΗΣ.....	8
1.1.4 ΟΡΙΣΜΟΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	9
1.2 ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	11
1.2.1 ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΔΕΣΜΗΣ.....	11
1.2.2 Ο ΛΟΓΟΣ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΔΕΣΜΗΣ ΚΕΚΛΙΜΕΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΟΣ ΤΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....	15
1.2.3 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΕΚΤΟΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ.....	16
1.3 ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....	17
1.3.1 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΣΕ ΚΑΘΑΡΕΣ ΚΑΙ ΝΕΦΕΛΩΔΗΣ ΗΜΕΡΕΣ ΚΑΙ ΩΡΕΣ.....	17
1.3.2 ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΔΕΣΜΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΤΗΣ ΩΡΙΑΙΑΣ, ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΝΙΑΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	19
1.3.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΩΡΙΑΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΑΠΟ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	22
1.4 ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ.....	25
1.4.1 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ.....	25
1.4.2 ΙΣΟΤΡΟΠΙΚΟΣ ΟΥΡΑΝΟΣ.....	27
1.4.3 ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΚΟΣ ΟΥΡΑΝΟΣ.....	28
1.4.4 ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ.....	31
1.4.5 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΥΠΟΔΟΧΗΣ ΣΤΗΝ ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....	32
2. ΗΛΙΑΚΑ ΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	34
2.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΝΕΡΟΥ.....	34
2.2 Η ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ.....	35
2.3 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΑΠΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ.....	36
3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	37

3.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ f-chart .....	37
3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ .....	39
3.2.1 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ .....	40
3.2.2 ΩΡΙΑΙΑ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ .....	43
3.2.3 ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ .....	44
3.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ $\varphi$ -f chart .....	48
3.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ .....	52
4. ΑΝΑΛΥΣΗ- ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	54
1) Υπολογισμός της μέσης μηνιαίας ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια .....	54
2) Υπολογισμός της συνολικής ωριαίας ακτινοβολίας I και των συνιστώσεων της δέσμης I <sub>b</sub> και διάχυσης I <sub>d</sub> .....	61
3) Εκτίμηση της συνολικής ωριαίας ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια με το μοντέλο HDKR ...	66
4) Εκτίμηση της συνολικής ωριαίας ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια με το μοντέλο Perez ...	71
5) Υπολογισμός βέλτιστων καμπυλών με την μέθοδο $\varphi$ -f chart.....	81
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	93
6. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ .....	95
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	100

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Ανδρέα Μπουντουβή για την ανάθεση του παρόντος θέματος και την ευκαιρία που μου προσέφερε να εκπονήσω τη διπλωματική μου εργασία υπό την επίβλεψη του, καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές και την καθοδήγηση του. Ακόμα θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και το χρόνο που διέθεσε για το συγκεκριμένο θέμα. Η σύμπλευση μαζί του κατά τη διάρκεια των σπουδών μου ήταν ευχάριστη και καθοριστική.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον εξωτερικό συν-επιβλέποντα Δρ. Νίκο Στεφανάκη για όλες τις συμβουλές και τις γνώσεις που μου μετέφερε. Η προθυμία του να με βοηθήσει και να με καθοδηγήσει κατά τη συγγραφή της εργασίας συνέβαλε αποτελεσματικά στην επιτυχή ολοκλήρωση της στο βέλτιστο επίπεδο. Η αλληλεπίδραση που είχα μαζί του ήταν πολύτιμη.

Τέλος θα ευχαριστήσω τους γονείς μου και όλους όσους στάθηκαν στο πλευρό μου όλα αυτά τα χρόνια, για την στήριξη που μου παρείχαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου και κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετάται ο σχεδιασμός ηλιακού θερμικού συστήματος με τη μέθοδο  $\phi$ - $f$  chart. Στόχος είναι η θεωρητική ανάλυση και βελτιστοποίηση των συστημάτων αυτών. Η μέθοδος  $\phi$ - $f$  chart μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του ηλιακού κλάσματος σε θερμικές διεργασίες τροφοδοτούμενες από ηλιακή ενέργεια και αποτελεί έναν συνδυασμό της μεθόδου  $f$  chart και της μεθόδου της ημερήσιας χρησιμότητας. Για την επίτευξη του στόχου αυτού είναι απαραίτητη η κατανόηση και η ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο θερμικό σύστημα καθώς και η θεωρητική θεμελίωση των όρων και των μεταβλητών που επιδρούν στην απόδοση του συστήματος.

Για τον υπολογισμό του ηλιακού κλάσματος προηγήθηκε μία σειρά υπολογισμών και εκτιμήσεων. Στο πλαίσιο αυτό, η μέση μηνιαία ημερήσια ακτινοβολία και η ωριαία ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια υπολογίζονται και αναλύονται εποχικά ως προς τη βέλτιστη γωνία κλίσης των συλλεκτών του ηλιακού θερμικού συστήματος. Συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό της ωριαίας ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια χρησιμοποιούνται τα μοντέλα HDKR και Perez. Στη συνέχεια προβλέπονται τα ποσά της απόδοσης του θερμικού συστήματος και η εξάρτησή τους από την εποχή και τη γωνία τοποθέτησης του επιπέδου των συλλεκτών, ώστε να εξεταστεί αν ικανοποιούνται οι θερμικές απαιτήσεις του εκάστοτε συστήματος και για την εξαγωγή βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας.

## Abstract

In this thesis the method  $\phi$ -f chart for the design of solar thermal systems is studied. The goal is the theoretical analysis and optimization of these systems. The  $\phi$ -f chart method can be used to calculate the solar fraction in solar thermal processes and is a combination of the f chart method and the method of daily utilizability. To achieve this goal it is necessary to analyze and understand the solar radiation which is absorbed by the thermal system and the theoretical basis of terms and variables that affect the system performance.

In order to calculate the solar fraction, a series of calculations and estimations must be employed. The monthly average daily radiation and hourly radiation on a tilted surface are calculated and seasonally analyzed as to the optimum angle of inclination of the collectors of the solar thermal system. Specifically, the HDKR and Perez models are used for calculating the hourly radiation on a tilted surface. Subsequently, the amounts of efficiency of the heating system and their dependence on the season and the mounting angle of the plane of the panels are predicted so as to determine the extent at which the thermal requirements of each system are met and the optimal operating conditions.

# 1. Η ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

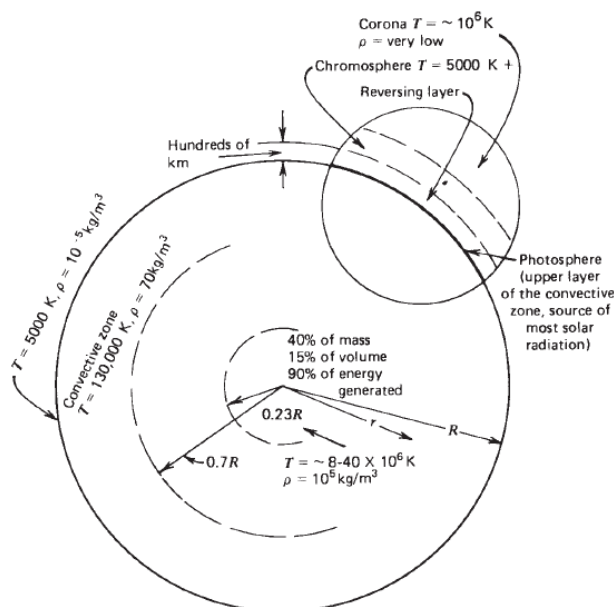
## 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

### 1.1.1 Ο ΉΛΙΟΣ

Ο Ήλιος είναι μια σφαίρα καυτής αέριας ύλης με διάμετρο  $1,39 \times 10^9$  m και είναι κατά μέσο όρο σε απόσταση  $1,5 \times 10^{11}$  m από την Γη. Όπως φαίνεται από τη Γη, ο Ήλιος ολοκληρώνει μια πλήρη περιστροφή γύρω από τον άξονα του ανά 4 εβδομάδες. Ωστόσο, δεν περιστρέφεται ως στερεό σώμα, δηλαδή ο ισημερινός του χρειάζεται περίπου 27 ημέρες ενώ οι περιοχές των πόλων του περίπου 30 ημέρες για κάθε περιστροφή.

Ο Ήλιος έχει ενεργή θερμοκρασία μέλανος σώματος 5777 K. Η θερμοκρασία στις κεντρικές εσωτερικές περιοχές εκτιμάται ότι είναι από  $8 \times 10^6$  μέχρι  $40 \times 10^6$  K και η πυκνότητα του σχεδόν 100 φορές μεγαλύτερη από αυτή του νερού. Ο Ήλιος είναι, σε ισχύ, ένας συνεχής αντιδραστήρας σύντηξης με τα συστατικά του αέρια ως «περιέχον δοχείο» το οποίο συγκρατείται από βαρυτικές δυνάμεις. Προτείνεται πως αρκετές αντιδράσεις σύντηξης τροφοδοτούν την ενέργεια που ακτινοβολείται από τον Ήλιο. Εκείνη που θεωρείται η πιο σημαντική, είναι μια διεργασία κατά την οποία υδρογόνο (δηλ. 4 πρωτόνια) συνενώνεται προς σχηματισμό ηλίου (δηλ. ένα πυρήνα ηλίου He). Η μάζα του ηλίου είναι μικρότερη από αυτή των τεσσάρων πρωτονίων, οπότε η μάζα αυτή κατά την αντίδραση μετατρέπεται σε ενέργεια.

Η ενέργεια που παράγεται στο εσωτερικό της ηλιακής σφαίρας σε θερμοκρασία πολλών εκατομμυρίων βαθμών ακτινοβολείται στο διάστημα. Μια αλληλουχία διεργασιών ακτινοβολίας και συναγωγής λαμβάνει χώρα με διαδοχική εκπομπή, απορρόφηση, και επανακτινοβολία. Η ακτινοβολία στον πυρήνα του Ήλιου βρίσκεται στο τμήμα X και Γ ακτινοβολίας του φάσματος με το μήκος κύματος να αυξάνεται όσο η θερμοκρασία μειώνεται, σε μεγαλύτερες ακτινικές αποστάσεις.



Εικόνα 1 : Η δομή του Ήλιου



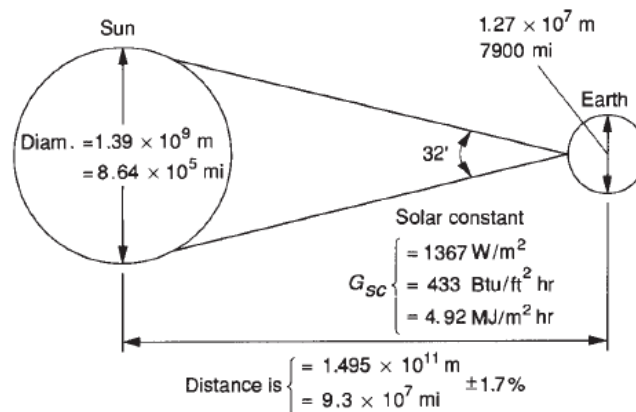
Μια σχηματική αναπαράσταση της δομής του Ήλιου φαίνεται στην *Εικόνα 1*. Εκτιμάται πως το 90% της ενέργειας παράγεται στην περιοχή από 0 ως 0,23 R (όπου R η ακτίνα του Ήλιου), η οποία περιέχει το 40% της μάζας του Ήλιου. Σε απόσταση 0,7R από το κέντρο, η θερμοκρασία πέφτει περίπου στους 130.000 K και η πυκνότητα στα 70 kg/m<sup>3</sup>, εδώ οι διεργασίες συναγωγής ξεκινούν να γίνονται σημαντικές και η ζώνη από 0,7 με 1,0 R είναι γνωστή ως ζώνη συναγωγής. Εντός αυτής της ζώνης η θερμοκρασία πέφτει στους 5.000K και η πυκνότητα στα 10<sup>-5</sup>kg/m<sup>3</sup>.

Το εξωτερικό στρώμα της ζώνης συναγωγής ονομάζεται φωτόσφαιρα. Το άκρο της φωτόσφαιρας είναι ευκρινές, αν και είναι χαμηλής πυκνότητας (σχεδόν 10<sup>-4</sup> φορές από αυτή του αέρα στην επιφάνεια της Γης). Είναι στην ουσία θολό, αφού τα αέρια από τα οποία αποτελείται είναι εντόνως ιονισμένα και ικανά να απορροφήσουν και να εκπέμψουν ένα συνεχές φάσμα ακτινοβολίας. Η φωτόσφαιρα είναι η πηγή του περισσότερου μέρους της Ηλιακής ακτινοβολίας.

Έξω από την φωτόσφαιρα, υπάρχει μια περισσότερο ή λιγότερο διαφανής ηλιακή ατμόσφαιρα, παρατηρήσιμη κατά την διάρκεια Ηλιακής έκλειψης ή από όργανα που αποκρύπτουν τον ηλιακό δίσκο. Πάνω από την φωτόσφαιρα υπάρχει ένα στρώμα από πιο κρύα αέρια, βάθους αρκετών εκατοντάδων χιλιομέτρων που αποκαλείται στρώμα αναστροφής. Έξω από αυτό υπάρχει ένα ακόμη στρώμα που λέγεται χρωμόσφαιρα, με βάθος περίπου 10.000 km. Αυτό είναι ένα στρώμα αερίων με θερμοκρασίες κάπως υψηλότερες από αυτές της φωτόσφαιρας και με μικρότερη πυκνότητα. Ακόμη πιο έξω βρίσκεται η κορώνα, μια έκταση με πολύ χαμηλή πυκνότητα και πολύ υψηλή θερμοκρασία(10<sup>6</sup>K)<sup>[1][2]</sup>.

### 1.1.2 Η ΗΛΙΑΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ

Η εκκεντρικότητα της τροχιάς της Γης είναι τέτοια ώστε η απόσταση ανάμεσα στον Ήλιο και την Γη να αλλάζει κατά 1.7%. Σε απόσταση μίας αστρονομικής μονάδας, δηλαδή 1,495 x 10<sup>11</sup> m (μέση απόσταση Ήλιου-Γης), ο Ήλιος υποτείνει ένα τόξο γωνίας 32°. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον Ήλιο και η χωρική σχέση του προς την Γη έχουν ως αποτέλεσμα μια σχεδόν σταθερή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα της Γης. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η γεωμετρία της σχέσης μεταξύ Ήλιου-Γης.



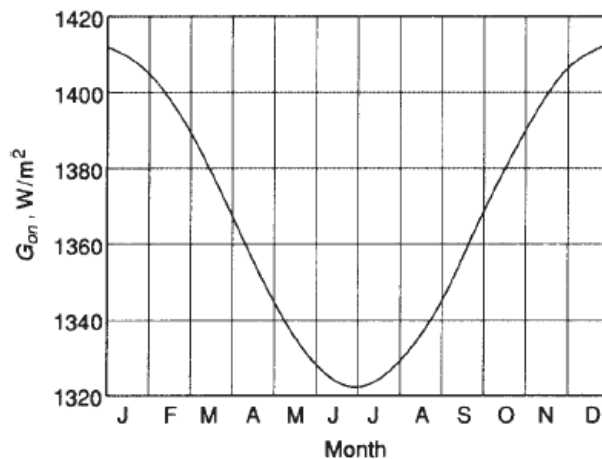
Εικόνα 2 : Σχέσεις Ήλιου – Γης

Η Ηλιακή σταθερά  $G_{sc}$ , είναι η ενέργεια από τον Ήλιο ανά μονάδα χρόνου ανά μονάδα επιφάνειας κάθετης στην διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας στη μέση απόσταση Ήλιου-Γης έξω από την ατμόσφαιρα. Στους υπολογισμούς θα χρησιμοποιηθεί η τιμή  $1367 \text{ W/m}^2$  [3][4][5].

### 1.1.3 ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΤΗΣ ΓΗΣ

Πρέπει να ληφθούν υπόψη δύο πηγές μεταβολών της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας. Η πρώτη είναι η μεταβολή στην ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον Ήλιο. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν αντικρουόμενες αναφορές ως προς τις περιοδικές μεταβολές της εγγενούς ηλιακής ακτινοβολίας. Έχει προταθεί πως υπάρχουν μικρές μεταβολές (μικρότερες του  $\pm 1,5\%$ ) με διαφορετικές περιοδικότητες και μεταβολή σχετική με την δραστηριότητα των ηλιακών κηλίδων. Αναφέρονται επίσης διακυμάνσεις της τάξης του  $0,2\%$  που συσχετίζονται με την εξέλιξη των ηλιακών κηλίδων. Άλλοι θεωρούν πως οι μετρήσεις αυτές είναι ασαφείς ή πως δεν είναι ενδεικτικές της τακτικής μεταβλητότητας. Μετρήσεις δορυφόρων για περιόδους αρκετών μηνών έδειξαν μεταβολές εντός των ορίων του  $\pm 0,2\%$  σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα με πολύ χαμηλή δραστηριότητα στις ηλιακές κηλίδες.<sup>[6]</sup>

Η μεταβολή της απόστασης Ήλιου-Γης, ωστόσο, έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή στη ροή της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας με εύρος  $\pm 3,3\%$ . Η εξάρτηση της εκτός ατμόσφαιρας ακτινοβολίας από την εποχή του έτους εμφανίζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3 : Διαφοροποίηση της εξω-ατμοσφαιρικής ακτινοβολίας με την εποχή του έτους

Μια απλή εξίσωση με επαρκή ακρίβεια για τους περισσότερους υπολογισμούς μηχανικής δίνεται από την εξίσωση :

$$G_{on} = G_{sc} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right)$$

[1.1.1]

$$\text{ή } G_{on} = G_{sc} (1,000110 + 0,034221 \cos B + 0,001280 \sin B + 0,000719 \cos 2B + 0,000077 \sin 2B)$$

όπου  $G_{on}$  η ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας που προσπίπτει στο επίπεδο κάθετο της ακτινοβολίας την ημέρα  $n$  του χρόνου και  $B = (n - 1) \frac{360}{365}$ .<sup>[3][7]</sup>

#### 1.1.4 ΟΡΙΣΜΟΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

- *Μάζα Αέρα  $m$  (Air Mass)*

Ο λόγος της μάζας της ατμόσφαιρας μέσω της οποίας η ακτινοβολία δέσμης περνά, προς την μάζα από την οποία θα περνούσε εάν ο Ήλιος βρισκόταν στο σημείο ζενίθ (κατακόρυφη θέση πάνω από το σημείο). Έτσι στο επίπεδο της επιφάνειας της θάλασσας  $m=1$  όταν ο Ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ και  $m=2$  για γωνία ζενίθ  $\theta_z=60^\circ$ . Για γωνίες ζενίθ από  $0^\circ$  ως  $70^\circ$  στην επιφάνεια της θάλασσας, με μικρή προσέγγιση:

$$m = 1/\cos\theta_z$$

Για μεγαλύτερες γωνίες ζενίθ, η επίδραση της καμπυλότητας της Γης γίνεται σημαντική και πρέπει να ληφθεί υπ' όψη.<sup>[1][8]</sup>

- *Ακτινοβολία Δέσμης (Beam Radiation)*

Η ηλιακή ακτινοβολία που λαμβάνεται από τον Ήλιο χωρίς να έχει διασκορπιστεί από την ατμόσφαιρα. (Αναφέρεται συνήθως και ως άμεση ηλιακή ακτινοβολία)

- *Ακτινοβολία Διάχυσης (Diffuse Radiation)*

Η ηλιακή ακτινοβολία που λαμβάνεται από τον Ήλιο αφού η κατεύθυνση της έχει αλλάξει από τον διασκορπισμό της ατμόσφαιρας.

(Αναφέρεται και ως ηλιακή ακτινοβολία ουρανού σε μετεωρολογική βιβλιογραφία)

- *Συνολική Ηλιακή Ακτινοβολία (Total Solar Radiation)*

Το άθροισμα της ακτινοβολίας δέσμης και διάχυσης σε επιφάνεια.

- *Ακτινοβολισμός  $W/m^2$  (Irradiance)*

Ο ρυθμός με τον οποίο η ακτινοβόλουμένη ενέργεια προσπίπτει σε μία επιφάνεια, ανά μονάδα εμβαδού. Για την ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται το σύμβολο  $G$  με κατάλληλους δείκτες για ακτινοβολία δέσμης (beam), διάχυσης (diffuse) ή φασματική (spectral).

- *Ακτινοβολία ή Ακτινοβόλος Έκθεση  $J/m^2$  (Irradiation)*

Η προσπίπτουσα ενέργεια ανά μονάδα εμβαδού επιφάνειας, που βρίσκεται από την ολοκλήρωση του ακτινοβολισμού σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα, συνήθως μία ώρα ή μία ημέρα.

- *Ηλιασμός -Ηλιοφάνεια (Insolation)*

Είναι ένας όρος που απευθύνεται συγκεκριμένα στην ακτινοβολία ηλιακής ενέργειας. Το σύμβολο  $H$  χρησιμοποιείται για την ημερήσια, το σύμβολο  $I$  χρησιμοποιείται για την ωριαία. Τα  $H, I$  μπορούν να αντιπροσωπεύσουν την ακτινοβολία δέσμης, διάχυσης ή και την συνολική και για κάθε προσανατολισμό.

Οι δείκτες στα σύμβολα  $G, H, I$  είναι ως εξής:

- αναφέρεται στην ακτινοβολία πάνω από την ατμόσφαιρα της Γης (extraterrestrial),

b και d αναφέρονται στις ακτινοβολίες δέσμης και διάχυσης αντίστοιχα,

T και n αναφέρονται σε ακτινοβολία σε κεκλιμένο (tilted) επίπεδο και σε επίπεδο κάθετο (normal) προς την κατεύθυνση της διάδοσης. Εάν απουσιάζουν οι δείκτες T,n τότε η ακτινοβολία είναι σε οριζόντιο επίπεδο.

- *Ηλιακή Ώρα (Solar Time)*

Χρόνος που βασίζεται στην εμφανή γωνιακή κίνηση του Ήλιου κατά μήκος του ουρανού, με Ηλιακή μεσημβρία την ώρα κατά την οποία ο Ήλιος διασχίζει τον μεσημβρινό του παρατηρητή.

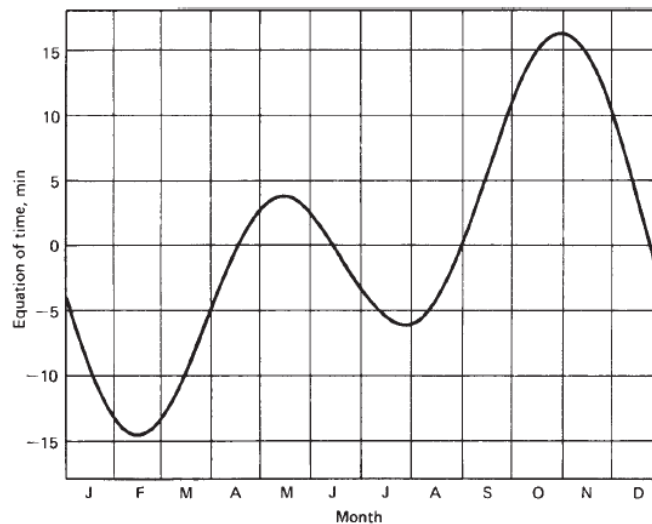
Η ηλιακή ώρα είναι ο χρόνος που χρησιμοποιείται σε όλες τις σχέσεις Ήλιου-γωνίας, και δεν συμπίπτει με την τοπική ώρα ρολογιού. Είναι αναγκαίο η πρότυπη ώρα να μετατραπεί σε ηλιακή ώρα εφαρμόζοντας δύο διορθώσεις. Αρχικά, υπάρχει μια σταθερή διόρθωση για την διαφορά γεωγραφικού μήκους ανάμεσα στον μεσημβρινό του παρατηρητή και τον μεσημβρινό στον οποίο είναι βασισμένη η τοπική ώρα. Ο Ήλιος χρειάζεται 4 λεπτά για να διασχίσει 1° γεωγραφικού μήκους. Η δεύτερη διόρθωση είναι από την εξίσωση της ώρας, που λαμβάνει υπόψη τις διαταραχές στον ρυθμό περιστροφής της Γης που επηρεάζουν τον χρόνο που ο Ήλιος διασχίζει τον μεσημβρινό του παρατηρητή. Η διαφορά σε λεπτά ανάμεσα στην ηλιακή ώρα και την πρότυπη είναι :

$$\text{Solar time} - \text{Standard time} = 4(L_{st} - L_{loc}) + E$$

[1.1.2]

Όπου  $L_{st}$  είναι ο πρότυπος μεσημβρινός της τοπικής ζώνης ώρας,  $L_{loc}$  το γεωγραφικό μήκος της περιοχής που αναζητείται και η παράμετρος  $E$  είναι η εξίσωση της ώρας (σε λεπτά) <sup>[3][7]</sup>

$$E = 229,2(0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B - 0,014615 \cos 2B - 0,01089 \sin 2B)$$

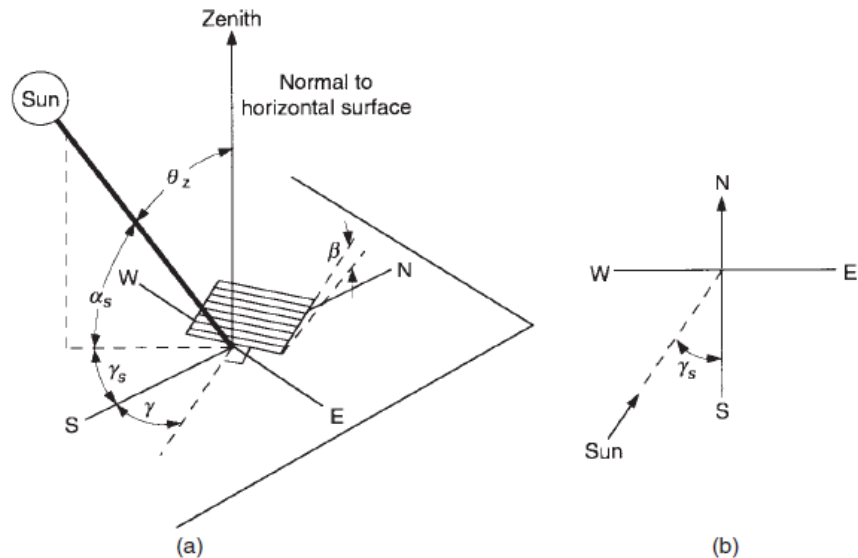


Εικόνα 4 : Η εξίσωση του χρόνου  $E$  σε λεπτά ως συνάρτηση της εποχής του χρόνου

## 1.2 ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

### 1.2.1 ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΔΕΣΜΗΣ

Η γεωμετρική σχέση ανάμεσα σε επίπεδο οποιουδήποτε συγκεκριμένου προσανατολισμού σε σχέση με τη Γη σε οποιαδήποτε στιγμή (είτε το επίπεδο είναι σταθερό είτε κινείται σε σχέση με την Γη) και την εισερχόμενη δέσμη ηλιακής ακτινοβολίας, που είναι η θέση του Ήλιου σε σχέση με αυτό το επίπεδο, μπορεί να περιγραφεί με όρους αρκετών γωνιών. Μερικές από τις γωνίες υποδεικνύονται στο παρακάτω σχήμα. Οι γωνίες και ένα σύνολο συνεπών συμβάσεων προσήμου είναι ως ακολούθως :



Εικόνα 5 : α) Γωνία ζενίθ, κλίση, γωνία αζιμουθίου επιφάνειας και ηλιακή αζιμουθιακή ακτινοβολία για κεκλιμένη επιφάνεια β) Ηλιακή αζιμουθιακή γωνία σε κάτοψη

Γεωγραφικό πλάτος  $\phi$  (Latitude), η γωνιακή τοποθεσία βόρεια ή νότια του ισημερινού, με  $-90^{\circ} \leq \phi \leq 90^{\circ}$ , θετική τιμή βόρεια.

Απόκλιση  $\delta$  (Declination), η γωνιακή θέση του Ήλιου κατά την ηλιακή μεσημβρία (όταν ο Ήλιος βρίσκεται στον τοπικό μεσημβρινό) με εκτίμηση προς το επίπεδο του ισημερινού, με  $-23,45 \leq \delta \leq 23,45$ , θετική τιμή βόρεια.

Κλίση  $\beta$  (Slope), η γωνία ανάμεσα στο επίπεδο της εν λόγω επιφάνειας και της οριζοντίου, με  $0 \leq \beta \leq 180^{\circ}$  ( $\beta > 90^{\circ}$  σημαίνει ότι η επιφάνεια «κοιτάζει» προς τα κάτω).

Γωνία αζιμουθίου επιφάνειας  $\gamma$  (Surface azimuth angle), η απόκλιση της προβολής της κάθετης σε οριζόντιο επίπεδο προς την επιφάνεια από τον τοπικό μεσημβρινό, με μηδενική τιμή στον νότο, αρνητική ανατολικά και θετική δυτικά, με  $-180^{\circ} \leq \gamma \leq 180^{\circ}$ .

Ωριαία γωνία  $\omega$  (Hour angle), η γωνιακή μετατόπιση του Ήλιου ανατολικά ή δυτικά από τον τοπικό μεσημβρινό εξαιτίας της περιστροφής της Γης προς τον άξονα της κατά  $15^{\circ}$  ανά ώρα, με αρνητική τιμή για το πρωί και θετική για το απόγευμα.

Γωνία πρόσπτωσης  $\vartheta$  (Angle of incidence), η γωνία ανάμεσα στην ακτινοβολία δέσμης σε μια επιφάνεια και την κάθετη σε αυτή την επιφάνεια.

Ορίζονται οι επιπλέον γωνίες που περιγράφουν την θέση του Ηλίου στον ουρανό :

Γωνία ζενίθ  $\vartheta_z$  (Zenith angle), η γωνία ανάμεσα στην κάθετη και την ευθεία προς τον Ήλιο, δηλαδή, η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας δέσμης σε οριζόντια επιφάνεια.

Γωνία ηλιακού υψομέτρου  $\alpha_s$  (Solar altitude angle), η γωνία ανάμεσα στην οριζόντια και την ευθεία προς τον Ήλιο, που είναι το συμπλήρωμα της γωνίας ζενίθ.

Ηλιακή αζιμουθιακή γωνία  $\gamma_s$  (Solar azimuth angle), η γωνιακή μετατόπιση από τον νότο της προβολής της ακτινοβολίας δέσμης σε οριζόντιο επίπεδο. Μετατόπιση προς ανατολικά είναι αρνητικές και δυτικά θετικές. <sup>[9]</sup>

Η απόκλιση  $\delta$  μπορεί να βρεθεί από την προσεγγιστική εξίσωση <sup>[10]</sup>:

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right)$$

[1.2.1]

με  $n$  την μέση μέρα του μήνα όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα <sup>[11]</sup>

Month	$n$ for $i$ th Day of Month	For Average Day of Month		
		Date	$n$	$\delta$
January	$i$	17	17	-20.9
February	$31 + i$	16	47	-13.0
March	$59 + i$	16	75	-2.4
April	$90 + i$	15	105	9.4
May	$120 + i$	15	135	18.8
June	$151 + i$	11	162	23.1
July	$181 + i$	17	198	21.2
August	$212 + i$	16	228	13.5
September	$243 + i$	15	258	2.2
October	$273 + i$	15	288	-9.6
November	$304 + i$	14	318	-18.9
December	$334 + i$	10	344	-23.0

Πίνακας 1 : Προτεινόμενες μέσες ημέρες του μήνα και τιμές του  $n$  ανά μήνα <sup>[11]</sup>

Η μεταβολή στην απόσταση Ήλιου-Γης, η εξίσωση της ώρας  $E$  και η απόκλιση  $\delta$  είναι όλες συνεχώς μεταβαλλόμενες συναρτήσεις της εποχής του έτους. Για υπολογιστικούς σκοπούς είναι σύνηθες η εποχή του χρόνου να εκφράζεται από τον όρο  $n$ , την ημέρα του έτους, δηλαδή έναν ακέραιο μεταξύ του 1 και 365. Σημειώνεται πως η μέγιστη τιμή της αλλαγής της απόκλισης  $\delta$  είναι περίπου  $0,4^\circ$  ανά ημέρα.

Υπάρχει ένα σύνολο χρήσιμων σχέσεων ανάμεσα στις παραπάνω γωνίες. Οι εξισώσεις που συσχετίζουν την γωνία πρόσπτωσης της δέσμης ακτινοβολίας σε μία επιφάνεια,  $\theta$ , με τις υπόλοιπες γωνίες είναι οι εξής :

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega$$

[1.2.2]

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma)$$

[1.2.3]

Η γωνία  $\theta$  μπορεί να ξεπερνά τις  $90^\circ$ , το οποίο σημαίνει ότι ο Ήλιος βρίσκεται πίσω από την επιφάνεια. Ακόμη, όταν χρησιμοποιείται η εξίσωση [1.2.2], είναι αναγκαίο να επιβεβαιωθεί πως η Γη δεν κρύβει τον Ήλιο (δηλαδή η ωριαία γωνία να είναι ανάμεσα στην ανατολή και τη δύση του Ήλιου).

Υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις για τις οποίες η εξίσωση [1.2.2] απλοποιείται. Για σταθερές επιφάνειες, κεκλιμένες προς τον νότο ή τον βορρά, δηλαδή, με γωνία αζιμουθίου επιφάνειας  $\gamma$   $0$  ή  $180^\circ$  (μια πολύ συνηθισμένη κατάσταση για σταθερούς επίπεδους συλλέκτες), ο τελευταίος όρος αποσύρεται.

Για κάθετες επιφάνειες με  $\beta=90^\circ$  η εξίσωση γίνεται :

$$\cos \theta = -\sin \delta \cos \varphi \cos \gamma + \cos \delta \sin \varphi \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \gamma \sin \omega$$

[1.2.4]

Για οριζόντιες επιφάνειες, η γωνία πρόσπτωσης είναι η γωνία ζενίθ του Ήλιου,  $\theta_z$ . Η τιμή της πρέπει να είναι μεταξύ  $0^\circ$  και  $90^\circ$  όταν ο Ήλιος είναι πάνω από τον ορίζοντα. Για την περίπτωση αυτή,  $\beta=0$  και η εξίσωση [1.2.2] γίνεται :

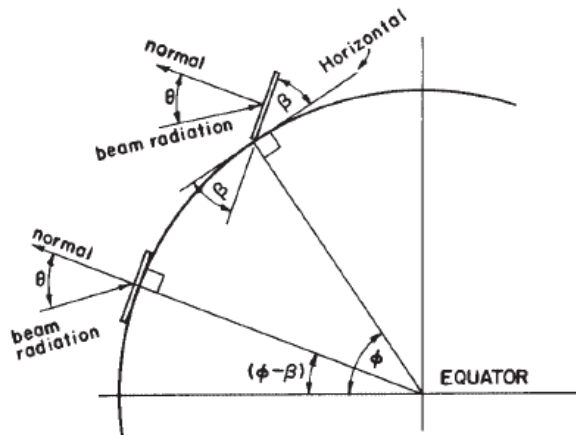
$$\cos \theta_z = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta$$

[1.2.5]

Χρήσιμες σχέσεις για τη γωνία πρόσπτωσης επιφανειών κεκλιμένων προς το βορρά ή το νότο μπορούν να εξαχθούν από το δεδομένο πως οι επιφάνειες με κλίση  $\beta$  προς το βορρά ή το νότο έχουν την ίδια γωνιακή σχέση προς την ακτινοβολία δέσμης όπως μια οριζόντια επιφάνεια σε ένα τεχνητό γεωγραφικό πλάτος ( $\phi-\beta$ ). Αυτό φαίνεται στην παρακάτω εικόνα ενώ τροποποιώντας την σχέση [1.2.5] προκύπτει :

$$\cos \theta = \cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta$$

[1.2.6]



Εικόνα 6 : Τμήμα της Γης που δείχνει τις γωνίες  $\beta$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$  και  $\varphi-\beta$  για επιφάνεια με προσανατολισμένη προς το νότο

Για το νότιο ημισφαίριο η εξίσωση τροποποιείται αντικαθιστώντας το  $(\phi-\beta)$  με  $(\phi+\beta)$ .

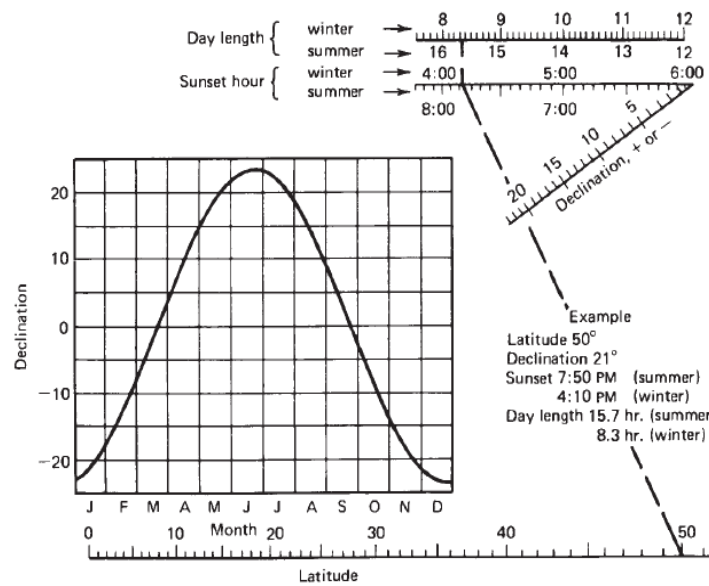
Για την ειδική περίπτωση της ηλιακής μεσημβρίας, για την κεκλιμένη επιφάνεια που κοιτάει στο νότο, από το βόρειο ημισφαίριο, ισχύει  $\theta_{noon} = |\phi-\delta|$ . Για το νότιο ημισφαίριο είναι  $\theta_{noon} = |\phi+\delta|$ .

Όταν  $\beta=0$  η γωνία πρόσπτωσης είναι η γωνία ζενίθ, που για το βόρειο ημισφαίριο είναι  $\theta_{z,noon} = |\phi-\delta|$ , ενώ για το νότιο  $\theta_{z,noon} = |\phi+\delta|$ .

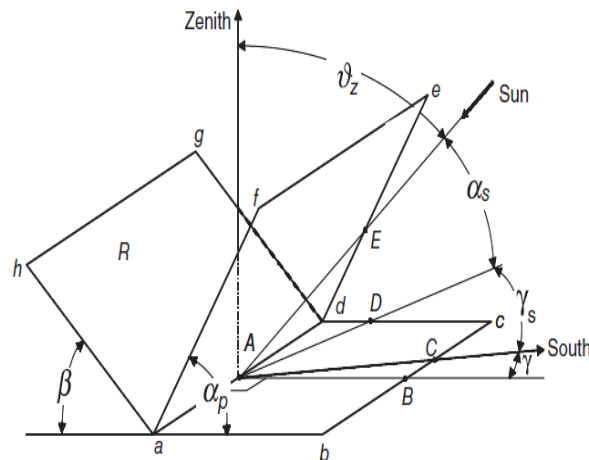
Επίσης, η εξίσωση [1.2.5] μπορεί να λυθεί ως προς την ωριαία γωνία δύσης ηλίου  $\omega_s$  (sunset hour angle) όταν  $\theta_z=90^\circ$  :

$$\cos \omega_s = -\frac{\sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta} = -\tan \varphi \tan \delta$$

[1.2.7]



Εικόνα 7 : Νομόγραμμα για τον προσδιορισμό της ώρας δύσης του ηλίου και της διάρκειας της ημέρας<sup>[12]</sup>



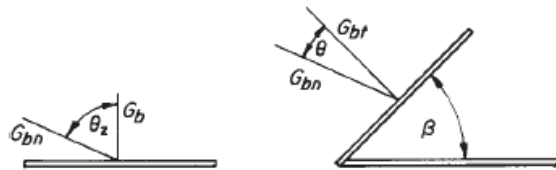
Εικόνα 8 : Οι γωνίες  $\beta, \theta_z, \alpha_s, \gamma_s, \gamma$  της επιφάνειας  $R$



### 1.2.2 Ο ΛΟΓΟΣ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΔΕΣΜΗΣ ΚΕΚΛΙΜΕΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΡΟΣ ΤΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Κατά το σχεδιασμό ηλιακών συστημάτων και διεργασιών, είναι συχνά απαραίτητο να υπολογιστεί η ωριαία ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια ενός συλλέκτη από μετρήσεις ή εκτιμήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια. Τα ευρέως διαθέσιμα δεδομένα είναι η συνολική ακτινοβολία για ώρες ή ημέρες στην οριζόντια επιφάνεια, ενώ υπάρχει η ανάγκη για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας δέσμης και της διάχυσης στο επίπεδο του συλλέκτη.

Ο γεωμετρικός παράγοντας  $R_b$ , ο λόγος της ακτινοβολίας δέσμης σε κεκλιμένη επιφάνεια προς αυτή σε οριζόντια επιφάνεια οποιαδήποτε στιγμή, μπορεί να υπολογισθεί με κατάλληλη χρήση της εξίσωσης [1.2.2]. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας δέσμης σε οριζόντια και κεκλιμένη επιφάνεια.



Εικόνα 9 : Ακτινοβολία δέσμης σε οριζόντιες και κεκλιμένες επιφάνειες

Ο λόγος  $G_{b,T}/G_b$  δίνεται από την εξίσωση :

$$R_b = \frac{G_{b,T}}{G_b} = \frac{G_{b,n} \cos \theta}{G_{b,n} \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad [1.2.8]$$

και τα  $\cos \theta$ ,  $\cos \theta_z$  καθορίζονται από την εξίσωση [1.2.2] (ή από εξισώσεις που προέρχονται από αυτή)

Η βέλτιστη αζιμουθιακή γωνία για επίπεδους συλλέκτες είναι συνήθως  $0^\circ$  στο βόρειο ημισφαίριο (και  $180^\circ$  στο νότιο). Έτσι, είναι συνηθισμένη η περίπτωση να ισχύει  $\gamma=0^\circ$  (ή  $180^\circ$ ). Τότε, οι εξισώσεις [1.2.5] και [1.2.6] μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστεί το  $\cos \theta_z$  και το  $\cos \theta$ , αντίστοιχα, οδηγώντας για το βόρειο ημισφαίριο και για  $\gamma=0$ , στην σχέση <sup>[14]</sup>:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta} \quad [1.2.9]$$

Για το νότιο ημισφαίριο και για  $\gamma=180^\circ$  ισχύει ομοίως η εξίσωση αλλάζοντας όμως το  $(\varphi - \beta)$  με  $(\varphi + \beta)$ .

Μια ειδική περίπτωση είναι το  $R_{b,moon}$ , ο λόγος για τις επιφάνειες που κοιτούν προς τον νότο κατά την ηλιακή μεσημβρία, για το βόρειο ημισφαίριο <sup>[13]</sup>:

$$R_{b,moon} = \frac{\cos |\varphi - \delta - \beta|}{\cos |\varphi - \delta|} \quad [1.2.10]$$

Και αντίστοιχα για το νότιο ημισφαίριο

$$R_{b,moon} = \frac{\cos | -\varphi + \delta - \beta |}{\cos | -\varphi + \delta |}$$

### 1.2.3 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΕΚΤΟΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

Οι υπολογισμοί της ακτινοβολίας απλοποιούνται όταν χρησιμοποιούνται κανονικοποιημένα επίπεδα ακτινοβολίας, δηλαδή, ο λόγος του επιπέδου ακτινοβολίας προς τη θεωρητικά δυνατή ακτινοβολία που θα ήταν διαθέσιμη εάν δεν υπήρχε ατμόσφαιρα. Γι' αυτούς τους υπολογισμούς, οι οποίοι αναλύονται σε παρακάτω κεφάλαια (1.3.1, 1.4.3), χρειαζόμαστε μια μέθοδο υπολογισμού της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας.

Σε οποιοδήποτε χρονικό σημείο, η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο έξω από την ατμόσφαιρα είναι η κάθετα προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία όπως δίνεται από την εξίσωση [1.1.1] διαιρούμενη με το  $R_b$  [15]:

$$G_o = G_{sc} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \cos \theta_z \quad [1.2.11]$$

όπου  $G_{sc}$  είναι η ηλιακή σταθερά και  $n$  είναι η ημέρα του έτους. Συνδυάζοντας την εξίσωση [1.2.5] και την [1.2.11] δίνεται το  $G_o$  για οριζόντια επιφάνεια για κάθε ώρα μεταξύ ανατολής και δύσης του Ηλίου :

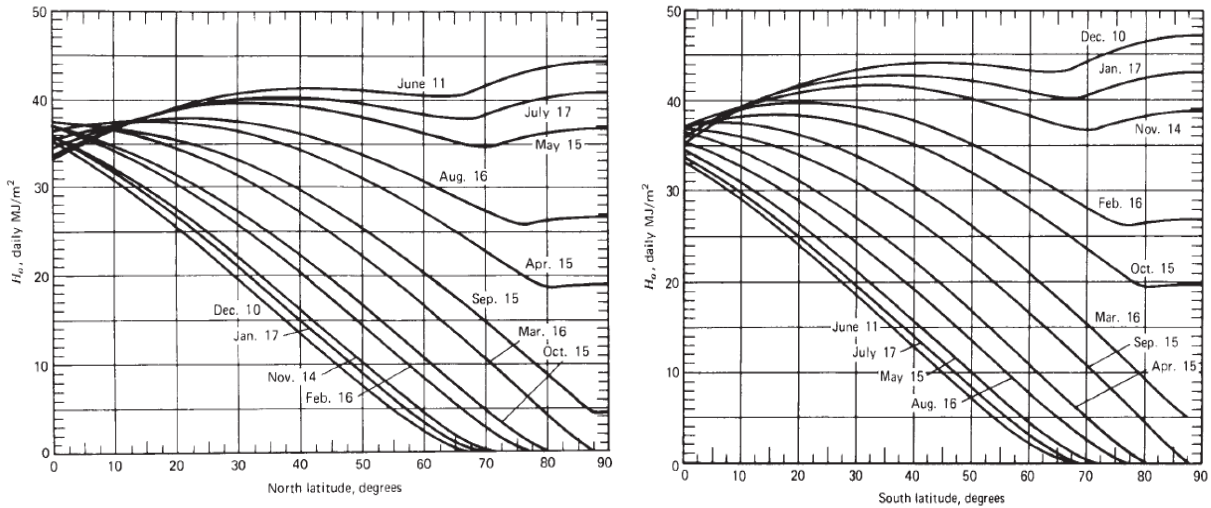
$$G_o = G_{sc} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \times (\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta) \quad [1.2.12]$$

Είναι συχνά αναγκαίο για τον υπολογισμό της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας να έχουμε την συνολική ημερήσια ακτινοβολία εκτός της ατμόσφαιρας σε οριζόντια επιφάνεια,  $H_o$ . Αυτό επιτυγχάνεται ολοκληρώνοντας την εξίσωση [1.2.12] κατά το χρονικό διάστημα από την ανατολή ως τη δύση του Ηλίου. Αν η  $G_{sc}$  είναι σε Watt ανά τετραγωνικό μέτρο ( $\frac{W}{m^2}$ ) τότε είναι :

$$H_o = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \times \left( \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \varphi \sin \delta \right) \quad [1.2.13]$$

όπου  $\omega_s$  είναι η ωριαία γωνία δύσης του Ηλίου σε μοίρες από την εξίσωση [1.2.7].

Η μηνιαία μέση ημερήσια ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα  $\bar{H}_o$  είναι μια χρήσιμη ποσότητα. Για γεωγραφικά πλάτη στο εύρος +60 ως -60 μπορεί να υπολογιστεί με την παραπάνω εξίσωση [1.2.13] χρησιμοποιώντας το  $n$  και το  $\delta$  για τη μέση ημέρα του μήνα από τον Πίνακα 1. Η μέση ακτινοβολία  $H_o$  απεικονίζεται ως συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους  $\varphi$  για το βόρειο και νότιο ημισφαίριο στα παρακάτω δύο διαγράμματα. Οι καμπύλες αντιπροσωπεύουν τις ημερομηνίες που δίνουν τη μέση ακτινοβολία του μήνα και επομένως μας δείχνουν το  $\bar{H}_o$ . Οι τιμές του  $H_o$  για οποιαδήποτε ημέρα μπορούν να εκτιμηθούν με παρεμβολή.



Εικόνα 10 : Ημερήσια ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας σε οριζόντια επιφάνεια για το βόρειο και το νότιο ημισφαίριο. Οι καμπύλες αντιπροσωπεύουν τις μέσες ημέρες του μήνα  $n$ , του πίνακα 1

Είναι επίσης ενδιαφέρον να υπολογιστεί η ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας σε οριζόντια επιφάνεια για περίοδο μίας ώρας. Ολοκληρώνοντας την εξίσωση [1.2.12] για περίοδο ανάμεσα στις ωριαίες γωνίες  $\omega_1$  και  $\omega_2$  που ορίζουν μία ώρα (με το  $\omega_2$  ως τη μεγάλη τιμή) [15]:

$$I_o = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365}\right) \times \left[\cos \varphi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \varphi \sin \delta\right] \quad [1.2.14]$$

## 1.3 ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

### 1.3.1 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΣΕ ΚΑΘΑΡΕΣ ΚΑΙ ΝΕΦΕΛΩΔΗΣ ΗΜΕΡΕΣ ΚΑΙ ΩΡΕΣ

Η συχνότητα εμφάνισης περιόδων με διάφορα επίπεδα ακτινοβολίας, για παράδειγμα, καλών και κακών ημερών, είναι ενδιαφέρουσα σε δύο πλαίσια. Πρώτον, η πληροφορία στη συχνότητα κατανομής είναι η σχέση μεταξύ δύο ειδών συσχετίσεων, αυτή του ημερήσιου κλάσματος της διάχυσης προς την ημερήσια ακτινοβολία και αυτή του μέσου μηνιαίου κλάσματος της διάχυσης προς τη μέση μηνιαία ακτινοβολία. Δεύτερον, στο κεφάλαιο (3.2) αναπτύσσεται η έννοια της χρησιμότητας, η οποία εξαρτάται από αυτές της κατανομές συχνοτήτων.

Ο μέσος μηνιαίος δείκτης καθαρότητας  $\bar{K}_T$  είναι ο λόγος της μέσης μηνιαίας ημερήσιας ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια προς τη μέση μηνιαία ημερήσια ακτινοβολία εκτός της ατμόσφαιρας. Σε μορφή εξίσωσης [16]:

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o}$$

[1.3.1]

Μπορούμε επίσης να ορίσουμε τον ημερήσιο δείκτη καθαρότητας ως τον λόγο της ακτινοβολίας μιας συγκεκριμένης ημέρας προς την έξω-ατμοσφαιρική ακτινοβολία για την ημέρα αυτή :

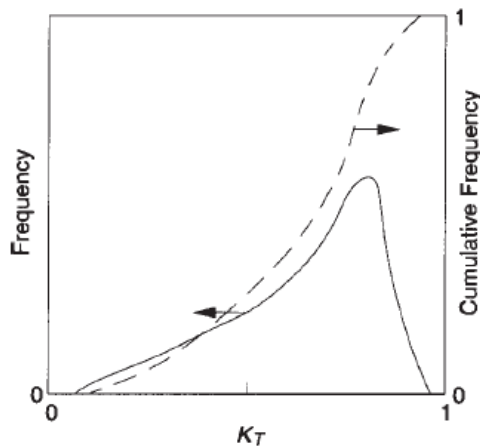
$$K_T = \frac{H}{H_o} \quad [1.3.2]$$

Επομένως ο ωριαίος δείκτης καθαρότητας θα ορισθεί ως :

$$k_T = \frac{I}{I_o} \quad [1.3.3]$$

Τα στοιχεία  $\bar{H}$ ,  $H$  και  $I$  λαμβάνονται από μετρήσεις της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια, δηλαδή, τις διαθέσιμες μετρήσεις πυρανόμετρων. Οι τιμές των  $\bar{H}_o$ ,  $H_o$  και  $I_o$  μπορούν να υπολογιστούν από τις μεθόδους του κεφαλαίου [1.2.3].

Αν για τοποθεσίες με συγκεκριμένη τιμή του  $\bar{K}_T$  απεικονιστεί η συχνότητα εμφάνισης ημερών για ποίκιλες τιμές  $K_T$ , η κατανομή που προκύπτει έχει τη μορφή της συνεχούς καμπύλης του παρακάτω σχήματος.



Εικόνα 11 : Παράδειγμα της συχνότητας ύπαρξης ημερών με διαφορετικούς δείκτες καθαρότητας (καμπύλη) και αθροιστική συχνότητα εμφάνισης αυτών των ημερών (διακεκομμένες)<sup>[17]</sup>

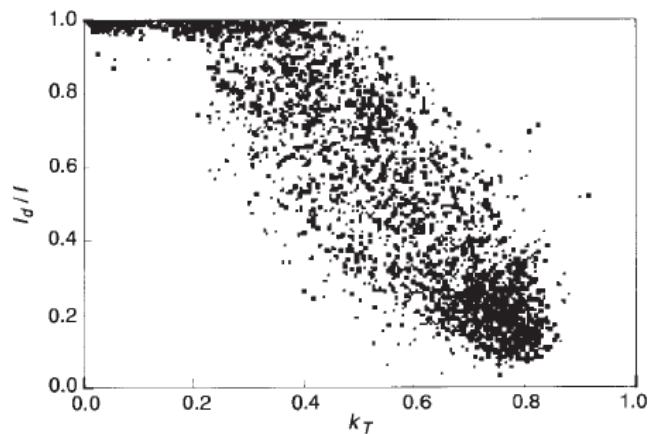
Η μορφή της καμπύλης εξαρτάται από τον μέσο δείκτη καθαρότητας  $\bar{K}_T$ . Για ενδιάμεσες τιμές του  $\bar{K}_T$ , οι μέρες με πολύ χαμηλό ή πολύ υψηλό  $K_T$  εμφανίζονται σχετικά σπάνια, και οι περισσότερες από τις ημέρες έχουν δείκτη  $K_T$  ενδιάμεσα μεταξύ των ακραίων τιμών. Εάν το  $\bar{K}_T$  είναι υψηλό, η κατανομή θα πρέπει να κλίνει προς τις υψηλές τιμές  $K_T$ , και αν είναι χαμηλό η καμπύλη να κλίνει προς τις χαμηλές τιμές του  $K_T$ .

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για να κατασκευαστεί η καμπύλη κατανομής συχνότητας του παραπάνω σχήματος μπορούν επίσης να απεικονιστούν ως αθροιστική κατανομή, δηλαδή ως το κλάσμα των ημερών που έχουν τιμή μικρότερη του  $K_T$  (λιγότερο καθαρές), προς το  $K_T$ . Αυτό φαίνεται στη διακεκομμένη γραμμή της Εικόνας 11<sup>[16]</sup>.

### 1.3.2 ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΔΕΣΜΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΤΗΣ ΩΡΙΑΙΑΣ, ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΝΙΑΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Σε αυτήν την ενότητα αξιολογούνται μέθοδοι για την εκτίμηση των κλασμάτων της συνολικής οριζόντιας ακτινοβολίας. Μια ευρύτερη βάση δεδομένων και βελτίωση της κατανόησης των δεδομένων θα μπορούσαν να καταλήξουν σε βελτιωμένες μεθόδους. Οι προτεινόμενες συσχετίσεις βρίσκονται σε ουσιαστική συμφωνία με άλλες συσχετίσεις και το σύνολο είναι αμοιβαία συνοχικό.

Ο διαχωρισμός της συνολικής ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια στις συνιστώσες διάχυσης και δέσμης παρουσιάζει ενδιαφέρον για δύο λόγους. Πρώτον, οι μέθοδοι για τον υπολογισμό της συνολικής ακτινοβολίας σε επιφάνεια διαφορετικού προσανατολισμού από δεδομένα οριζόντιας επιφάνειας απαιτούν ξεχωριστή διαχείριση της ακτινοβολίας δέσμης και διάχυσης. Δεύτερον, οι εκτιμήσεις για επιδόσεις μακράς περιόδου σε συγκεντρωτικούς συλλέκτες θα πρέπει να βασιστούν σε εκτιμήσεις διαθεσιμότητας ακτινοβολίας δέσμης. Οι παρούσες μέθοδοι για την εκτίμηση της κατανομής βασίζονται σε μελέτες διαθέσιμων δεδομένων μετρήσεων, που είναι επαρκείς για τον πρώτο σκοπό αλλά λιγότερο επαρκείς για τον δεύτερο.



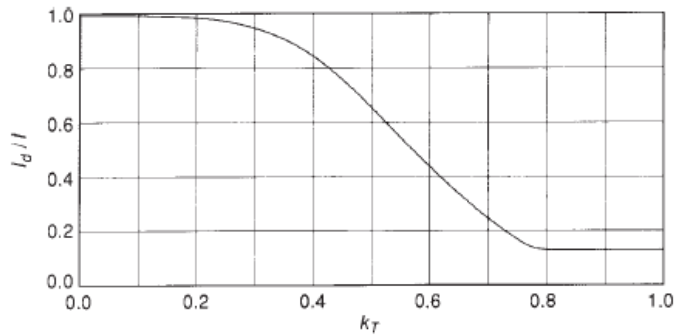
Εικόνα 12 : Δείγμα δεδομένων του κλάσματος διάχυσης προς τον δείκτη καθαρότητας<sup>[18]</sup>

#### A) Ωριαία

Η συνηθισμένη προσέγγιση είναι η συσχέτιση του  $I_d/I$ , δηλαδή του κλάσματος της ωριαίας ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο που αντιστοιχεί στη διάχυση, με το  $k_T$ , τον ωριαίο δείκτη καθαρότητας. Στην Εικόνα 12 φαίνεται το διάγραμμα του κλάσματος  $I_d/I$  προς το  $k_T$  για μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Με σκοπό να αποκτηθούν οι συσχετίσεις του  $I_d/I$  προς  $k_T$ , χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από διαγράμματα πολλών τοποθεσιών όμοια με το παραπάνω και διαχωρίστηκαν σε περιοχές τιμών του  $k_T$ , και στα δεδομένα κάθε περιοχής τιμών υπολογίστηκε ο μέσος όρος ώστε να βρεθεί ένα σημείο σε κάθε διάγραμμα. Το σύνολο των σημείων αυτών είναι η βάση αυτών των συσχετίσεων. Σε κάθε μια από αυτές τις περιοχές τιμών υπάρχει κατανομή σημείων, δηλαδή, τιμή  $k_T$  ίση με 0,5 μπορεί να οφείλεται σε ουρανό με ένα λεπτό στρώμα σύννεφων και να έχει ως αποτέλεσμα μεγάλο κλάσμα διάχυσης, ή σε καθαρό ουρανό για ένα διάστημα της ώρας και βαριά συννεφιασμένο το υπόλοιπο διάστημα της ώρας οδηγώντας σε χαμηλό κλάσμα διάχυσης. Έτσι η

συσχέτιση μπορεί να μην είναι επαρκώς αντιπροσωπευτική για μια συγκεκριμένη ώρα, αλλά σε μεγάλο πλήθος ωρών αντιπροσωπεύει επαρκώς το κλάσμα διάχυσης.

Η συσχέτιση του ωριαίου κλάσματος διάχυσης προς τον ωριαίο δείκτη καθαρότητας απεικονίζεται στο διάγραμμα της Εικόνας 13 :



Εικόνα 13 : Ο λόγος  $I_d/I$  ως συνάρτηση του ωριαίου δείκτη καθαρότητας  $k_T$ <sup>[20]</sup>

Η συσχέτιση σε μορφή εξίσωσης είναι <sup>[19][20][21]</sup>:

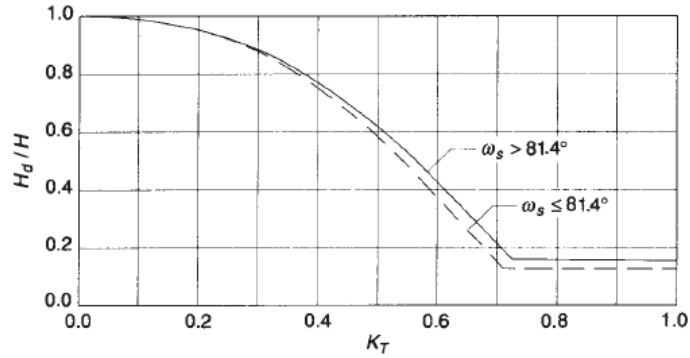
$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,0 - 0,09k_T, & k_T \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604k_T + 4,388k_T^2, & 0,22 \leq k_T \leq 0,80 \\ 0,165, & k_T > 0,8 \end{cases}$$

[1.3.4]

Γενικότερα, για τις τιμές του  $k_T$  μεγαλύτερες του 0,8 υπάρχουν πολύ λίγα δεδομένα. Κάποια από τα δεδομένα που είναι διαθέσιμα δείχνουν αυξανόμενο κλάσμα διάχυσης καθώς το  $k_T$  μεγαλώνει πάνω από το 0,8. Αυτή η φαινομενική αύξηση στο κλάσμα διάχυσης οφείλεται πιθανώς σε αντανάκλαση της ακτινοβολίας από τα σύννεφα, όταν υπάρχουν σύννεφα κοντά στη διαδρομή της ακτινοβολίας από τον Ήλιο προς τον παρατηρητή. Σε αυτή την περιοχή του  $k_T$  προτείνεται η τιμή 0,165 για το κλάσμα διάχυσης.

## Β) Ημερήσια

Μελέτες για τα διαθέσιμα δεδομένα ημερήσιας ακτινοβολίας έδειξαν ότι το μέσο κλάσμα  $H_d/H$ , είναι συνάρτηση του  $K_T$ , του ημερήσιου δείκτη καθαρότητας. Η συσχέτιση (βασισμένη στην ίδια μέθοδο με την ωριαία) φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Μπορούμε να διακρίνουμε μια εποχική εξάρτηση: την άνοιξη, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο οι τιμές είναι οι ίδιες, ενώ οι τιμές για το χειμώνα δείχνουν κάπως χαμηλότερο κλάσμα διάχυσης για μεγάλα  $K_T$ .



Εικόνα 14 : Προτεινόμενη συσχέτιση του ημερήσιου κλάσματος διάχυσης με το  $K_T$ <sup>[20]</sup>

Η εποχή καθορίζεται από την ωριαία γωνία δύσης του Ηλίου  $\omega_s$ . Οι εξισώσεις που αντιπροσωπεύουν το σύνολο των συσχετισμών είναι <sup>[16][20]</sup>:

Για  $\omega_s \leq 81,4^\circ$  :

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 1,0 - 0,2727K_T + 2,4495K_T^2 - 11,9514K_T^3 + 9,3879K_T^4, & K_T < 0,715 \\ 0,143, & K_T \geq 0,715 \end{cases}$$

Για  $\omega_s > 81,4^\circ$  :

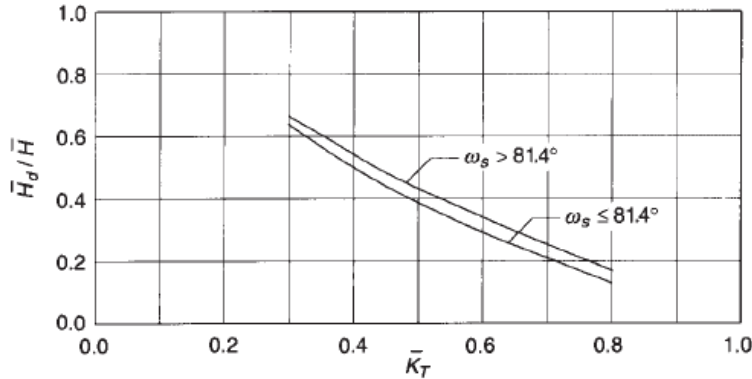
$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 1,0 + 0,2832K_T - 2,5557K_T^2 + 0,8448K_T^3, & K_T < 0,722 \\ 0,175, & K_T \geq 0,722 \end{cases}$$

[1.3.5]

### Γ) Μηνιαία

Έχουν εξαχθεί παρόμοια διαγράμματα με τα παραπάνω των Εικόνων 13&14, για να δείξουν την κατανομή της μέσης μηνιαίας ημερήσιας ακτινοβολίας στις συνιστώσες της δέσμης και της διάχυσης. Σε αυτή την περίπτωση, το μηνιαίο κλάσμα διάχυσης  $\bar{H}_d/\bar{H}$  σχεδιάζεται στο διάγραμμα ως συνάρτηση του μέσου μηνιαίου δείκτη καθαρότητας  $\bar{K}_T$  ( $= \bar{H}/\bar{H}_0$ ). Τα δεδομένα γι' αυτά τα διαγράμματα μπορούν να ληφθούν από τα ημερήσια με οποιονδήποτε από τους δύο ακόλουθους τρόπους. Πρώτον, τα μηνιαία δεδομένα μπορούν να σχεδιαστούν στο διάγραμμα αθροίζοντας τα δεδομένα ημερήσιας ακτινοβολίας διάχυσης και της συνολικής. Δεύτερον, μια γενικευμένη καμπύλη  $H_d/H$  προς  $K_T$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί με γνώση της κατανομής των καθαρών και συννεφιασμένων ημερών προς ανάπτυξη των μέσων μηνιαίων σχέσεων.

Αναπτύχθηκαν, λοιπόν, συσχετίσεις των μέσων μηνιαίων κλασμάτων διάχυσης από τις συσχετίσεις της ημερήσιας διάχυσης (Εικόνα 14). Για τις ημερήσιες συσχετίσεις, όπως αναφέρθηκε, υπάρχει εποχική εξάρτηση, η καμπύλη του χειμώνα βρίσκεται χαμηλότερα των άλλων, υποδεικνύοντας χαμηλότερη υγρασία και σκόνη στον χειμερινό ουρανό με αποτέλεσμα χαμηλότερα κλάσματα διάχυσης. Η εξάρτηση του  $\bar{H}_d/\bar{H}$  από το  $\bar{K}_T$  φαίνεται στην Εικόνα 15. Η μία καμπύλη αντιπροσωπεύει το χειμώνα και η άλλη τις υπόλοιπες εποχές.



Εικόνα 15 : Προτεινόμενη συσχέτιση του  $\bar{H}_d/\bar{H}$  προς το  $\bar{K}_T$  και το  $\omega_s$ <sup>[20]</sup>

Σε μορφή εξισώσεων <sup>[16][20]</sup>:

Για  $\omega_s \leq 81,4^\circ$  και  $0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8$

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,391 - 3,560\bar{K}_T + 4,189\bar{K}_T^2 - 2,137\bar{K}_T^3$$

Για  $\omega_s > 81,4^\circ$  και  $0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8$

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,311 - 3,022\bar{K}_T + 3,427\bar{K}_T^2 - 1,821\bar{K}_T^3$$

[1.3.6]

### 1.3.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΩΡΙΑΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΑΠΟ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Όταν πρόκειται να γίνουν υπολογισμοί της ωριαίας απόδοσης για ένα σύστημα, είναι ίσως απαραίτητο να ξεκινήσουμε από τα ημερήσια δεδομένα και να εκτιμήσουμε τις ωριαίες τιμές από τους αριθμούς των ημερησίων. Όπως και η εκτίμηση της διάχυσης από τη συνολική ακτινοβολία, δεν είναι ακριβής. Για παράδειγμα, οι τιμές της συνολικής ημερήσιας ακτινοβολίας στο μέσο εύρος ανάμεσα στις τιμές μιας καθαρής ημέρας και μια πλήρως συννεφιασμένης μπορούν να προκύψουν από διάφορες περιστάσεις, όπως διακεκομμένη «βαριά» συννεφιά, συνεχή ελαφρά σύννεφα, ή και «βαριά» νέφωση για ένα μέρος της ημέρας. Αυτές οι περιστάσεις δεν υπάρχει τρόπος να προσδιοριστούν από τα ημερήσια σύνολα. Ωστόσο, οι μέθοδοι που παρουσιάζονται εδώ λειτουργούν καλύτερα για καθαρές ημέρες, και αυτές είναι οι μέρες που οι ηλιακές διεργασίες αποδίδουν καλύτερα. Επίσης, αυτές οι μέθοδοι τείνουν να αποδίδουν συντηρητικές εκτιμήσεις για διεργασίες μακράς περιόδου.

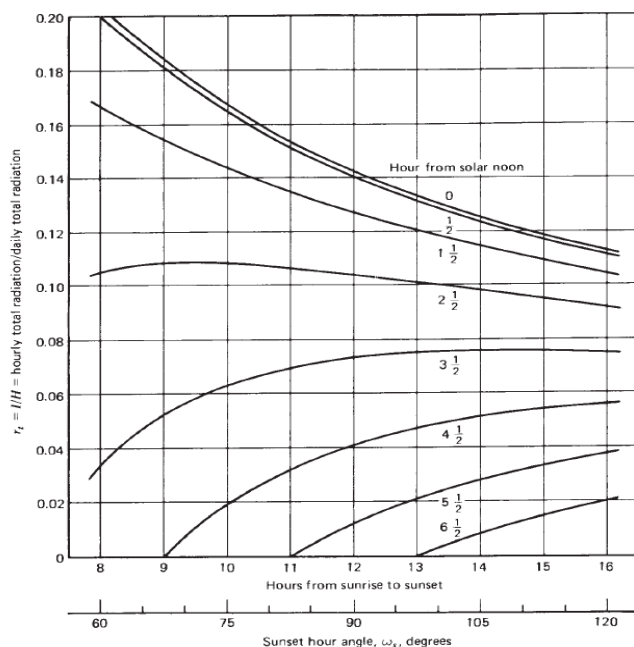
Στατιστικές μελέτες της χρονικής κατανομής της συνολικής ακτινοβολίας σε οριζόντιες επιφάνειες κατά τη διάρκεια της ημέρας, χρησιμοποιώντας τα μέσα μηνιαία στοιχεία για έναν αριθμό γεωγραφικών θέσεων, οδήγησαν σε γενικευμένα διαγράμματα του  $r_t$ , του λόγου της συνολικής ωριαίας προς την συνολική ημερήσια ακτινοβολία, ως συνάρτηση της διάρκειας της ημέρας και της εν λόγω ώρας <sup>[12][16][17]</sup>.



$$r_t = I/H$$

[1.3.7]

Ένα τέτοιο διάγραμμα είναι αυτό της Εικόνας 16. Οι ώρες ορίζονται από την στιγμή του μέσου της κάθε ώρας, και οι μέρες υποθέτουμε πως είναι συμμετρικές ως προς την ηλιακή μεσημβρία.



Εικόνα 16 : Σχέση ανάμεσα στην ωριαία και την ημερήσια συνολική ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια ως συνάρτηση της διάρκειας της ημέρας<sup>[16]</sup>

Επίσης φαίνεται και μια καμπύλη επικεντρωμένη στη στιγμή της μεσημβρίας. Η διάρκεια της ημέρας μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση  $N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta)$  ή από την Εικόνα 7 στο κεφάλαιο 1.2.1. Έτσι, γνωρίζοντας τη διάρκεια της ημέρας (συναρτήσε του γεωγραφικού πλάτους  $\varphi$  και της απόκλισης  $\delta$ ) και τη συνολική ημερήσια ακτινοβολία, μπορεί να εκτιμηθεί η συνολική ωριαία ακτινοβολία για τις συμμετρικές ημέρες.

Οι καμπύλες του διαγράμματος προσεγγίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις<sup>[22]</sup>:

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s}$$

[1.3.8]

όπου οι σταθερές  $a$  και  $b$  δίνονται ως :

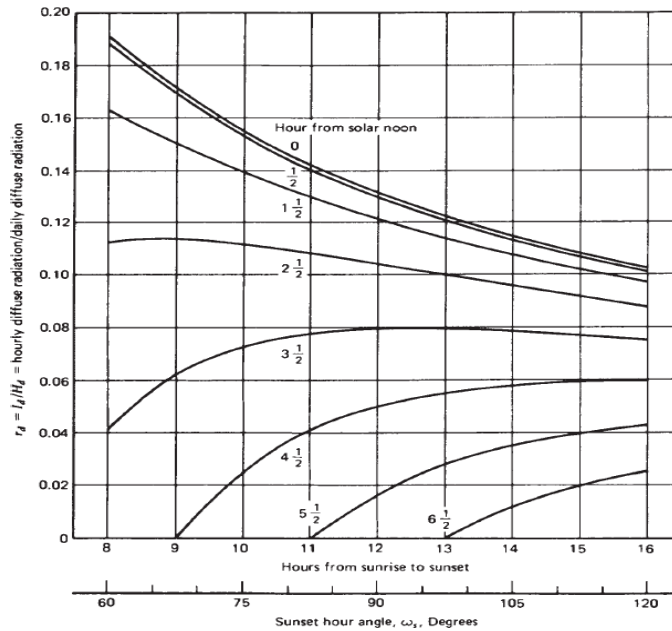
$$a = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60^\circ) \text{ και } b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 60^\circ)$$

[1.3.9]

Στο διάγραμμα που ακολουθεί εμφανίζεται ένα συσχετισμένο σύνολο καμπυλών για τον  $r_d$ , το λόγο της ωριαίας διάχυσης προς την ημερήσια ακτινοβολία διάχυσης, ως συνάρτηση της ώρας και της διάρκειας της ημέρας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με το διάγραμμα της Εικόνας 16 προς εκτίμηση της μέσης ωριαίας ακτινοβολίας διάχυσης εφόσον είναι γνωστή η συνολική μέση ημερήσια ακτινοβολία:

$$r_d = I_d / H_d$$

[1.3.10]



Εικόνα 17 : Σχέση ανάμεσα στην ωριαία και ημερήσια ακτινοβολία διάχυσης σε οριζόντια επιφάνεια ως συνάρτηση της διάρκειας της ημέρας<sup>[16]</sup>

Οι καμπύλες αυτές βασίζονται στην υπόθεση πως το κλάσμα  $I_d/H_d$  είναι το ίδιο με το  $I_o/H_o$  και προσεγγίζονται από την εξίσωση<sup>[16]</sup>:

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s}$$

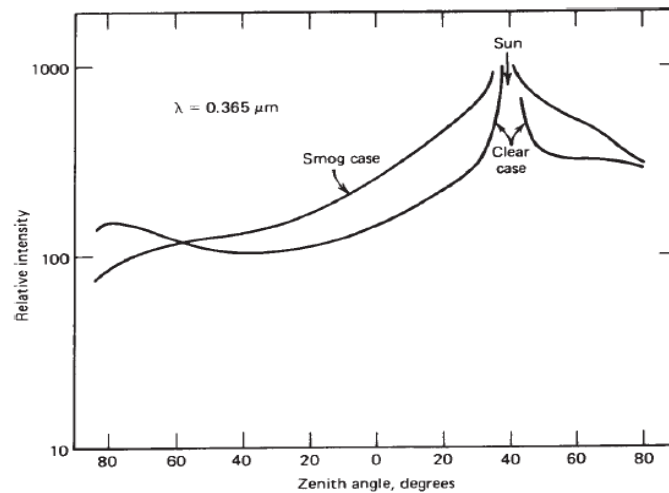
[1.3.11]

Στις παραπάνω εξισώσεις το  $\omega$  είναι η ωριαία γωνία σε μοίρες για την εν λόγω ώρα (δηλαδή το μέσο της ώρας για την οποία γίνονται οι υπολογισμοί) και  $\omega_s$  είναι η ωριαία γωνία δύσης του ηλίου.

## 1.4 ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ

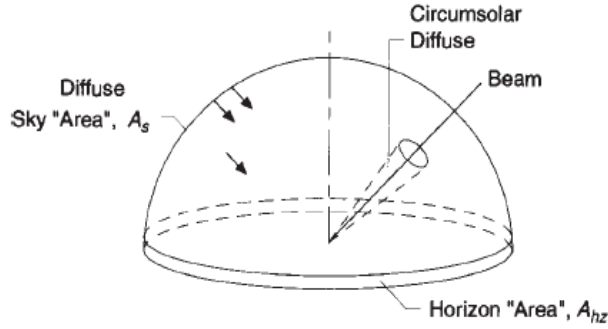
### 1.4.1 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

Στρεφόμαστε, λοιπόν, στο γενικότερο πρόβλημα του υπολογισμού της ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφάνειες όταν είναι γνωστή μόνο η συνολική ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια. Για αυτούς του υπολογισμούς χρειαζόμαστε τις κατευθύνσεις από τις οποίες οι συνιστώσες της δέσμης και διάχυσης φτάνουν στην εν λόγω επιφάνεια. Στο κεφάλαιο [1.2.1] αντιμετωπίστηκε το πρόβλημα της κατεύθυνσης της ακτινοβολίας δέσμης. Η κατεύθυνση από την οποία λαμβάνεται η ακτινοβολία διάχυσης, δηλαδή, η κατανομή της πάνω από τον θόλο του ουρανού, είναι συνάρτηση των συνθηκών νέφωσης και ατμοσφαιρικής διαύγειας, που είναι ιδιαίτερα ευμετάβλητες. Στην Εικόνα 18, παρουσιάζονται τα προφίλ της ακτινοβολίας διάχυσης κατά μήκος του ουρανού συναρτήσει της γωνιακής ανύψωσης από τον ορίζοντα σε επίπεδο που περιλαμβάνει τον Ήλιο. Τα δεδομένα που παρουσιάζονται είναι για καθαρό ουρανό και για συνθήκες νέφους.



Εικόνα 18 : Σχετική ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (για  $\lambda=0,365\mu\text{m}$ ) συναρτήσει της γωνίας ανύψωσης του κυρίου επιπέδου που περιέχει τον ήλιο, για το Los Angeles, για καθαρό ουρανό και για νεφελώδες<sup>[15]</sup>

Τα δεδομένα για καθαρό ουρανό όπως αυτά του παραπάνω διαγράμματος εισηγούνται ένα μοντέλο ακτινοβολίας διάχυσης που αποτελείται από τρία μέρη. Το πρώτο είναι το ισοτροπικό κομμάτι, που λαμβάνεται ομοιόμορφα από ολόκληρο τον θόλο του ουρανού. Το δεύτερο είναι η περιφερειακή διάχυση (circumsolar diffuse), που προκύπτει από την εμπρόσθια σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας και είναι συγκεντρωμένη στο τμήμα του ουρανού που περικυκλώνει τον Ήλιο. Το τρίτο, που αναφέρεται ως λάμψη του ορίζοντα (horizon brightening), είναι συγκεντρωμένο κοντά στον ορίζοντα και είναι πιο έντονο σε καθαρό ουρανό. Στην Εικόνα 19 φαίνονται τα τρία αυτά μέρη της ακτινοβολίας διάχυσης<sup>[8][15][23]</sup>.



Εικόνα 19 : Σχηματική κατανομή της ακτινοβολίας διάχυσης πάνω από τον θόλο του ουρανού, όπου φαίνονται οι συνιστώσες της περιφερειακής διάχυσης και λάμψης ορίζοντα<sup>[24]</sup>

Η γωνιακή κατανομή της διάχυσης είναι σε κάποιο βαθμό συνάρτηση της ανάκλασης  $\rho_g$  (albedo) του εδάφους. Υψηλή ανάκλαση (όπως αυτή του χιονιού με  $\rho_g \approx 0,7$ ) έχει ως αποτέλεσμα ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας πίσω προς τον ουρανό, η οποία με τη σειρά της μπορεί να διασκορπιστεί προς όφελος της συνιστώσας λάμψης του ορίζοντα.

Είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε ή να μπορούμε να εκτιμήσουμε την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε κεκλιμένες επιφάνειες όπως οι ηλιακοί συλλέκτες, παράθυρα, ή άλλους δέκτες παθητικών συστημάτων. Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία είναι το άθροισμα ενός συνόλου ροών ακτινοβολίας συμπεριλαμβανομένων της ακτινοβολίας δέσμης, τα τρία μέρη της ακτινοβολίας διάχυσης από τον ουρανό, και της ακτινοβολίας που ανακλάται από διάφορες επιφάνειες που «βλέπει» η κεκλιμένη επιφάνεια. Η συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία σε αυτή την επιφάνεια θα είναι <sup>[15][23]</sup>:

$$I_T = I_{T,b} + I_{T,d,iso} + I_{T,d,cs} + I_{T,d,hz} + I_{T,refl} \quad [1.4.1]$$

όπου οι δείκτες *iso*, *cs*, *hz*, *refl* αναφέρονται αντίστοιχα στις εξής ροές ακτινοβολίας : ιστροπική, περιφερειακή, ορίζοντα και ανάκλασης.

Για μια επιφάνεια (συλλέκτη) με εμβαδόν  $A_c$ , η συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία μπορεί να εκφραστεί σε όρους της ακτινοβολίας δέσμης και διάχυσης στην οριζόντια επιφάνεια και η συνολική ακτινοβολία σε επιφάνειες που ανακλούν προς την κεκλιμένη επιφάνεια.

Επομένως οι όροι της εξίσωσης [1.4.1] γίνονται :

$$A_c I_T = I_b R_b A_c + I_{d,iso} A_s F_{s-c} + I_{d,cs} R_b A_c + I_{d,hz} A_{hz} F_{hz-c} + \sum_i I_i \rho_i A_i F_{i-c} \quad [1.4.2]$$

Ο δεύτερος όρος είναι η συνεισφορά της δέσμης, ο δεύτερος είναι ο όρος της ιστροπικής διάχυσης που συμπεριλαμβάνει το γινόμενο της έκτασης του ουρανού  $A_s$  (απροσδιόριστο εμβαδόν) και τον παράγοντα όψης ακτινοβολίας από τον ουρανό προς τον συλλέκτη  $F_{s-c}$ . Ο τρίτος όρος είναι της περιφερειακής διάχυσης, ο οποίος αντιμετωπίζεται ως προερχόμενος από την ίδια διεύθυνση όπως η δέσμη. Ο τέταρτος είναι η συνεισφορά της διάχυσης από τον ορίζοντα, από μία ζώνη με απροσδιόριστο επίσης εμβαδόν. Ο πέμπτος όρος είναι το σύνολο των ροών προερχόμενων από τα κτήρια, χωράφια,

και ούτω καθεξής, στα οποία η κεκλιμένη επιφάνεια είναι εκτεθειμένη. Το σύμβολο  $i$  αναφέρεται σε κάθε μια από τις ανακλώμενες ροές :  $I_i$  είναι η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην  $i$  επιφάνεια,  $\rho_i$  είναι η ανάκλαση διάχυσης αυτής της επιφάνειας, και  $F_{i-c}$  είναι ο παράγοντας όψης από την  $i$  επιφάνεια προς την κεκλιμένη επιφάνεια. Υποθέτουμε πως οι ανακλαστικές επιφάνειες είναι ανακλαστές διάχυσης (οι κατοπτρικοί ανακλαστές απαιτούν διαφορετική προσέγγιση).

Σε γενικές γραμμές, δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός του όρου της ανακλώμενης ενέργειας λεπτομερώς, δηλαδή της μεταβαλλόμενης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στα κτήρια, τα δέντρα κτλ., και η μεταβαλλόμενη ανάκλασή τους. Η συνήθης πρακτική που ακολουθείται είναι να θεωρηθεί πως υπάρχει μία επιφάνεια, οριζόντια, που αντανακλά διάχυτα το έδαφος, μεγάλη σε έκταση, συμβάλλοντας στον όρο αυτό. Σε αυτή την περίπτωση, το  $I_i$  είναι απλώς  $I$  και το  $\rho_i$  γίνεται  $\rho_g$ , μια σύνθετη ανάκλαση εδάφους.

Η προηγούμενη εξίσωση [1.4.2] μπορεί να ξαναγραφεί σε χρηστική μορφή εναλλάσσοντας τα εμβαδά και τους παράγοντες όψης (δεδομένου ότι η σχέση αμοιβαιότητας του παράγοντα όψης απαιτεί ότι, για παράδειγμα,  $A_s F_{s-c} = A_c F_{c-s}$ ). Με αυτό τον τρόπο εξαλείφονται τα εμβαδά  $A_s$  και  $A_{hz}$ . Το εμβαδό  $A_c$  εμφανίζεται σε κάθε όρο στην εξίσωση οπότε και απλοποιείται. Το αποτέλεσμα είναι μια εξίσωση που δίνει την  $I_T$  σε όρους παραμέτρων που μπορούν να προσδιοριστούν είτε θεωρητικά είτε εμπειρικά:

$$I_T = I_b R_b + I_{d,iso} F_{c-s} + I_{d,cs} R_b + I_{d,hz} F_{c-hz} + I \rho_g F_{c-g} \quad [1.4.3]$$

Η εξίσωση αυτή είναι η βάση των μεθόδων υπολογισμού της  $I_T$ .

Όταν η  $I_T$  έχει προσδιοριστεί, ο λόγος της συνολικής ακτινοβολίας στην κεκλιμένη επιφάνεια προς αυτή της οριζόντιας επιφάνειας μπορεί να προσδιοριστεί. Εξ ορισμού :

$$R = \frac{\text{total radiation on tilted surface}}{\text{total radiation on horizontal surface}} = \frac{I_T}{I} \quad [1.4.4]$$

Έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα, με διαφορετικές πολυπλοκότητες, ως βάση για τον υπολογισμό της  $I_T$ . Οι διαφορές βρίσκονται κυρίως στον τρόπο που αντιμετωπίζονται οι όροι της διάχυσης. Οι προτεινόμενες μέθοδοι παρουσιάζονται στην συνέχεια.

## 1.4.2 ΙΣΟΤΡΟΠΙΚΟΣ ΟΥΡΑΝΟΣ

Μπορούμε να υποθέσουμε ότι ο συνδυασμός της ακτινοβολίας διάχυσης και της ανάκλασης εδάφους είναι ισοτροπικός. Με αυτή την υπόθεση, το άθροισμα της διάχυσης από τον ουρανό και η ακτινοβολία ανάκλασης εδάφους σε μια κεκλιμένη επιφάνεια είναι η ίδια ανεξάρτητα από τον προσανατολισμό, και η συνολική ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια είναι το άθροισμα της συνεισφοράς της δέσμης υπολογισμένη ως  $I_b R_b$  και της διάχυσης σε οριζόντια επιφάνεια  $I_d$ . Αυτό αντιπροσωπεύει μια βελτίωση σε σχέση με την παραδοχή ότι όλες οι μορφές ακτινοβολίας μπορούν να διαχειριστούν ως ακτινοβολία δέσμης, αν και υπάρχουν διαθέσιμες καλύτερες μέθοδοι.

Μια βελτίωση σε αυτό το μοντέλο, αποτελεί το μοντέλο ισοτροπικής διάχυσης. Η ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια θεωρείται ότι συμπεριλαμβάνει τρεις συνιστώσες : τη δέσμη, την ισοτροπική

διάχυση και την ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται διάχυτα από το έδαφος. Ο τρίτος και τέταρτος όρος της εξίσωσης [1.4.3] λαμβάνονται ως μηδενικοί καθώς ολόκληρη η ακτινοβολία διάχυσης υποτίθεται πως είναι ιστροπική. Μια επιφάνεια κεκλιμένη σε κλίση  $\beta$  από την οριζόντια, έχει παράγοντα όψης προς τον ουρανό  $F_{c-s} = (1 + \cos \beta)/2$ . (Εάν η ακτινοβολία διάχυσης είναι ιστροπική, αυτό είναι επίσης το  $R_d$ , ο λόγος της διάχυσης σε κεκλιμένη προς την οριζόντια επιφάνεια.) Η κεκλιμένη επιφάνεια έχει παράγοντα όψης προς το έδαφος  $F_{c-g} = (1 - \cos \beta)/2$ , και εάν τα περιβάλλοντα αντικείμενα έχουν ανάκλαση διάχυσης  $\rho_g$  για την συνολική ηλιακή ακτινοβολία, η ανακλώμενη ακτινοβολία από αυτά θα είναι  $I\rho_g(1 - \cos \beta)/2$ . Έτσι η εξίσωση [1.4.3] τροποποιείται για να δώσει τη συνολική ηλιακή ενέργεια σε κεκλιμένη επιφάνεια για μία ώρα, ως το άθροισμα τριών όρων [25]:

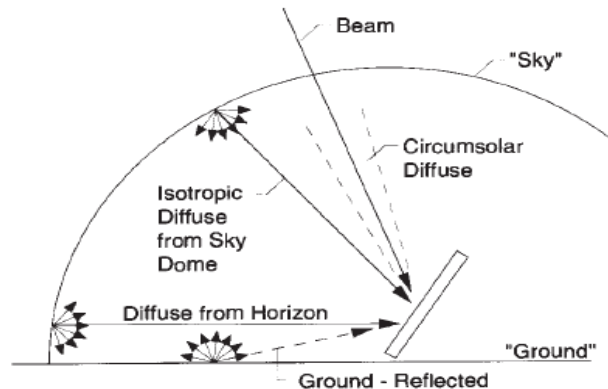
$$I_T = I_b R_b + I_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I\rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad [1.4.5]$$

και εξ ορισμού του  $R$  :

$$R = \frac{I_T}{I} = \frac{I_b}{I} R_b + \frac{I_d}{I} \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad [1.4.6]$$

### 1.4.3 ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΚΟΣ ΟΥΡΑΝΟΣ

Το μοντέλο της ιστροπικής διάχυσης (εξίσωση [1.4.5]) είναι ευνόητο, συντηρητικό (τείνει να υποτιμήσει την  $I_T$ ), και διευκολύνει τον υπολογισμό της ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφάνειες. Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί βελτιωμένα μοντέλα τα οποία λαμβάνουν υπόψη τη συνιστώσα της περιφερειακής διάχυσης και/ή της λάμψης του ορίζοντα σε κεκλιμένη επιφάνεια που εμφανίζονται σχηματικά στην Εικόνα 20.



Εικόνα 20 : Ακτινοβολία δέσμης, διάχυσης και ανάκλασης εδάφους σε κεκλιμένη επιφάνεια

#### A) Μοντέλο HDKR\_(Hay & Davies, Klucher, Reindl)

Το μοντέλο των Hay&Davies<sup>[29]</sup> βασίζεται στη παραδοχή πως η συνολική η διάχυση έχει δύο μέρη, αυτό της ιστροπικής και αυτό της περιφερειακής διάχυσης. Έτσι χρησιμοποιούνται όλοι οι όροι εκτός του τέταρτου της εξίσωσης [1.4.3]. Η ακτινοβολία διάχυσης σε έναν κεκλιμένο συλλέκτη μπορεί να γραφεί ως :

$$I_{d,T} = I_{T,d,iso} + I_{T,d,cs} = I_d \left[ (1 - A_i) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + A_i R_b \right] \quad [1.4.8]$$

όπου  $A_i$  είναι ο δείκτης ανισοτροπίας ο οποίος είναι συνάρτηση της διαπερατότητας της ατμόσφαιρας για την ακτινοβολία δέσμης, δηλαδή <sup>[29]</sup>

$$A_i = \frac{I_{bn}}{I_{on}} = \frac{I_b}{I_o} \quad [1.4.9]$$

Ο δείκτης ανισοτροπίας καθορίζει ένα κομμάτι της οριζόντιας διάχυσης την οποία θα αντιμετωπίσουμε ως εμπρόσθια σκεδασμένη (θεωρείται ότι είναι προσπίπτουσα στην ίδια γωνία όπως η ακτινοβολία δέσμης). Υπό καθαρές συνθήκες, ο δείκτης  $A_i$  θα είναι υψηλός, και το μεγαλύτερο μέρος της διάχυσης λαμβάνεται ως εμπρόσθια σκεδασμένο. Όταν όμως δεν υπάρχει δέσμη ακτίνας, ο  $A_i$  θα είναι μηδενικός, η υπολογισμένη διάχυση θα είναι εξ ολοκλήρου ισοτροπική και το μοντέλο γίνεται το ίδιο με αυτό της εξίσωσης [1.4.5]<sup>[26]</sup>.

Η συνολική ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια θα είναι τότε :

$$I_T = (I_b + I_d A_i) R_b + I_d (1 - A_i) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad [1.4.10]$$

Το μοντέλο Hay&Davies για τον υπολογισμό της  $I_T$  δεν είναι περισσότερο πολύπλοκο από το ισοτροπικό μοντέλο και οδηγεί σε λίγο υψηλότερες εκτιμήσεις της ακτινοβολίας στην κεκλιμένη επιφάνεια. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτό το μοντέλο είναι μια βελτίωση ως προς το ισοτροπικό μοντέλο. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει για τον όρο της λάμψης ορίζοντα. Για να ληφθεί υπόψη η συνιστώσα λάμψης ορίζοντα σε καθαρές ημέρες θα πρέπει να εφαρμοστεί ο συντελεστής διόρθωσης  $1 + \sin^3 (\beta/2)$  στην ισοτροπική διάχυση<sup>[19][27]</sup>. Ο Klucher<sup>[28]</sup> τροποποίησε αυτό τον συντελεστή διόρθωσης με έναν διαμορφωτικό παράγοντα  $f$  έτσι ώστε να έχει την μορφή  $1 + f \sin^3 (\beta/2)$  για να μετράει και την συννεφιά. Με

$$f = \sqrt{I_b/I} \quad [1.4.11]$$

Ο Reindl<sup>[26]</sup> τροποποίησε επίσης το μοντέλο των Hay&Davies με μία προσθήκη ενός όρου όπως του Klucher. Η διάχυση στην κεκλιμένη επιφάνεια γίνεται :

$$I_{d,T} = I_d \left\{ (1 - A_i) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[ 1 + f \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right] + A_i R_b \right\} \quad [1.4.12]$$

Όταν προστίθενται οι όροι της δέσμης και της ανάκλασης εδάφους προκύπτει το τελικό μοντέλο HDKR. Η συνολική ακτινοβολία στην κεκλιμένη επιφάνεια είναι τότε <sup>[26][28][29]</sup>:

$$I_T = (I_b + I_d A_i) R_b + I_d (1 - A_i) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[ 1 + f \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right] + I \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad [1.4.13]$$

## B) Μοντέλο PEREZ

Το μοντέλο του Perez<sup>[30]</sup> βασίζεται σε περισσότερες από μία αναλύσεις για τις τρεις συνιστώσες της διάχυσης. Συγκεκριμένα, η διάχυση στην κεκλιμένη επιφάνεια δίνεται από τη σχέση :

$$I_{d,T} = I_d \left[ (1 - F_1) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin \beta \right] \quad [1.4.14]$$

όπου τα  $F_1, F_2$  είναι οι συντελεστές της περιφερειακής συνιστώσας και της συνιστώσας λάμψης οριζοντα της διάχυσης αντίστοιχα, τα  $a, b$  είναι οι όροι που αντιπροσωπεύουν τις γωνίες πρόσπτωσης του κώνου της περιφερειακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένες και οριζόντιες επιφάνειες. Η περιφερειακή ακτινοβολία διάχυσης θεωρείται πως προέρχεται από μια σημειακή πηγή στον Ήλιο. Οι όροι αυτοί δίνονται ως εξής :

$$a = \max(0, \cos \theta) \quad [1.4.15]$$

$$b = \max(\cos 85^\circ, \cos \theta_z)$$

Με αυτούς τους ορισμούς, ο λόγος  $a/b$  γίνεται  $R_b$  για τις περισσότερες ώρες όταν οι συλλέκτες έχουν χρήσιμες αποδόσεις.

Οι συντελεστές λάμψης  $F_1, F_2$  είναι συναρτήσεις τριών παραμέτρων που περιγράφουν τις συνθήκες στον ουρανό, της γωνίας ζενίθ  $\theta_z$ , της καθαρότητας  $\varepsilon$ , και της λάμψης  $\Delta$ , όπου το  $\varepsilon$  είναι συνάρτηση της ωριαίας ακτινοβολίας διάχυσης  $I_d$  και της κάθετα προσπίπτουσας ακτινοβολίας δέσμης  $I_{b,n}$ . Η παράμετρος καθαρότητας  $\varepsilon$  δίνεται από την σχέση :

$$\varepsilon = \frac{\frac{I_d + I_{b,n}}{I_d} + 5,535 \times 10^{-6} \theta_z^3}{1 + 5,535 \times 10^{-6} \theta_z^3} \quad [1.4.16]$$

όπου το  $\theta_z$  είναι σε μοίρες και η παράμετρος λάμψης  $\Delta$  είναι :

$$\Delta = m \frac{I_d}{I_{on}} \quad [1.4.17]$$

το  $m$  είναι η μάζα αέρα (ενότητα 1.1.4) και το  $I_{on}$  είναι η κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας (εξίσωση [1.1.1]) γραμμένη σε όρους  $I$ . Έτσι όλες αυτές οι παράμετροι υπολογίζονται από δεδομένα της διάχυσης και της συνολικής ακτινοβολίας (όπως τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του  $I_T$ ).

Οι συντελεστές λάμψης  $F_1$  και  $F_2$  εξαρτώνται από στατιστικά υπολογιζόμενους συντελεστές για περιοχές τιμών της παραμέτρου  $\varepsilon$ . Μια προτεινόμενη σειρά αυτών εμφανίζεται στον πίνακα που ακολουθεί. Οι εξισώσεις για τον υπολογισμό των  $F_1$  και  $F_2$  είναι :

$$F_1 = \max \left[ 0, \left( f_{11} + f_{12} \Delta + \frac{\pi \theta_z}{180} f_{13} \right) \right] \quad [1.4.18]$$



$$F_2 = (f_{21} + f_{22}\Delta + \frac{\pi\theta_z}{180}f_{23})$$

Range of $\varepsilon$	$f_{11}$	$f_{12}$	$f_{13}$	$f_{21}$	$f_{22}$	$f_{23}$
1.000–1.065	–0.008	0.588	–0.062	–0.060	0.072	–0.022
1.065–1.230	0.130	0.683	–0.151	–0.019	0.066	–0.029
1.230–1.500	0.330	0.487	–0.221	0.055	–0.064	–0.026
1.500–1.950	0.568	0.187	–0.295	0.109	–0.152	0.014
1.950–2.800	0.873	–0.392	–0.362	0.226	–0.462	0.001
2.800–4.500	1.132	–1.237	–0.412	0.288	–0.823	0.056
4.500–6.200	1.060	–1.600	–0.359	0.264	–1.127	0.131
6.200– $\infty$	0.678	–0.327	–0.250	0.156	–1.377	0.251

Πίνακας 2 : Συντελεστές λάμψης για το μοντέλο ανισοτροπικού ουρανού του Perez<sup>[30]</sup>

Αυτό το σύνολο εξισώσεων επιτρέπει τον υπολογισμό των τριών συνιστώσων της διάχυσης στην κεκλιμένη επιφάνεια. Απομένει να προστεθεί η συνεισφορά των όρων της δέσμης και ανάκλασης εδάφους. Η συνολική ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια περιλαμβάνει πέντε όρους : τη δέσμη, την ισοτροπική διάχυση, την περιφερειακή διάχυση, τη διάχυση από τον ορίζοντα, και την ανάκλαση εδάφους. Δηλαδή<sup>[30]</sup>:

$$I_T = I_b R_b + I_d (1 - F_1) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_d F_1 \frac{a}{b} + I_d F_2 \sin \beta + I \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

[1.4.19]

Από μια αδρή θεωρητική σύγκριση των μοντέλων που παρουσιάστηκαν διαπιστώνεται ότι το ισοτροπικό μοντέλο που είναι και το απλούστερο, δίνει τις πιο συντηρητικές εκτιμήσεις ακτινοβολίας στην κεκλιμένη επιφάνεια και χρησιμοποιείται ευρέως. Το μοντέλο των HDKR είναι σχεδόν όσο απλό είναι και το ισοτροπικό και παράγει αποτελέσματα που είναι πλησιέστερα στις τιμές που έχουν μετρηθεί. Το μοντέλο αυτό λοιπόν προτείνεται για επιφάνειες με κλίση προς τον ισημερινό. Το μοντέλο του Perez είναι πιο σύνθετο ως προς την χρήση του και γενικά προβλέπει λίγο μεγαλύτερη συνολική ακτινοβολία στην κεκλιμένη επιφάνεια, είναι επομένως η λιγότερο συντηρητική μέθοδος από τις τρεις. Για τις επιφάνειες με γωνία αζιμουθίου επιφάνειας  $\gamma$  μακριά από 0° για το βόρειο ημισφαίριο και μακριά από 180° για το νότιο αντίστοιχα, προτείνεται το μοντέλο Perez.

#### 1.4.4 ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

Στην ενότητα του ισοτροπικού ουρανού [1.4.2] παρουσιάστηκε ο υπολογισμός της συνολικής ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια από μετρήσεις σε οριζόντια επιφάνεια. Σε διαδικασίες σχεδιασμού διεργασιών ηλιακής μηχανικής χρειάζεται επίσης, η μέση μηνιαία ημερήσια ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια. Η διαδικασία που ακολουθείται για τον υπολογισμό της  $\bar{H}_T$  είναι παράλληλη με αυτή για τον υπολογισμό της  $I_T$ . Προκύπτει αθροίζοντας την συνεισφορά της ακτινοβολίας δέσμης, τις συνιστώσες της ακτινοβολίας διάχυσης και της ακτινοβολίας που ανακλάται από το έδαφος. Το

επίπεδο της ανάπτυξης αυτών των μεθόδων υπολογισμού για την  $\bar{H}_T$  δεν είναι τόσο ικανοποιητικό όσο για την  $I_T$ .

Σ' αυτή τη μέθοδο, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως, υποτίθεται ότι πως οι ακτινοβολίες διάχυσης και ανάκλασης εδάφους είναι ιστροπικές. Συνεπώς, με τρόπο ανάλογο της εξίσωσης [1.4.5], η μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία σε μία ασκίαστη κεκλιμένη επιφάνεια εκφράζεται ως <sup>[11][31]</sup>:

$$\bar{H}_T = \bar{H}_b \bar{R}_b + \bar{H}_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \bar{H} \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad [1.4.20]$$

$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} = \left( 1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \right) \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad [1.4.21]$$

όπου το κλάσμα  $\bar{H}_d/\bar{H}$  είναι συνάρτηση του  $\bar{K}_T$  (εξίσωση [1.3.6])

Ο λόγος της μέσης ημερήσιας ακτινοβολίας δέσμης κεκλιμένης επιφάνειας προς αυτή σε οριζόντια επιφάνεια για τον κάθε μήνα είναι ίση με  $\bar{R}_b$ , δηλαδή ίση με  $\bar{H}_{bT}/\bar{H}_b$ . Είναι συνάρτηση της διαπερατότητας της ατμόσφαιρας, αλλά η εκτίμηση του προτείνεται να γίνει με βάση τη τιμή που θα είχε εάν δεν υπήρχε ατμόσφαιρα. Για επιφάνειες κεκλιμένες προς τον ισημερινό (δηλαδή με  $\gamma=0^\circ$ ) στο βόρειο ημισφαίριο <sup>[25]</sup>:

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + \frac{\pi}{180} \omega'_s \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega'_s + \frac{\pi}{180} \sin \varphi \sin \delta} \quad [1.4.22]$$

όπου η γωνία  $\omega'_s$  είναι η ωριαία γωνία δύσης του ηλίου για την κεκλιμένη επιφάνεια την μέση ημέρα του μήνα και δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$\omega'_s = \min \left[ \begin{array}{l} \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \\ \cos^{-1}(-\tan(\varphi - \beta) \tan \delta) \end{array} \right] \quad [1.4.23]$$

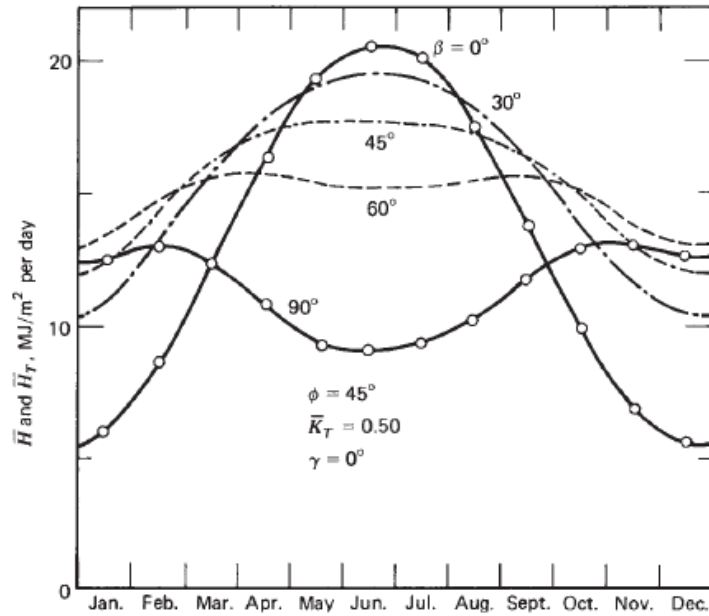
Το min επιλέγει τη μικρότερη των δύο τιμών εντός της αγκύλης.

Αντίστοιχα για το νότιο ημισφαίριο ισχύουν οι ίδιες σχέσεις με τη διαφορά ότι υπεισέρχεται γωνία  $(\varphi+\beta)$  αντί για γωνία  $(\varphi-\beta)$  <sup>[31]</sup>.

#### 1.4.5 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΥΠΟΔΟΧΗΣ ΣΤΗΝ ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Οι μέθοδοι που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους για την εκτίμηση της μέσης ακτινοβολίας σε επιφάνειες ποικίλων προσανατολισμών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιδειχθούν οι επιδράσεις της κλίσης και της αζιμουθίου γωνίας στη συνολική ενέργεια που λαμβάνεται σε μία επιφάνεια σε μηνιαία, εποχική ή ετήσια βάση.

Οι επιδράσεις αυτές για επιφάνεια υποδοχής στη μέση μηνιαία ημερήσια ακτινοβολία  $\bar{H}_T$  (σύμφωνα με τις μεθόδους της ενότητας [1.4.4]) απεικονίζονται στην Εικόνα 21 για τιμές  $\phi=45^\circ$ ,  $\gamma=0^\circ$ ,  $\rho_g=0,2$ . Εδώ, η  $\bar{H}_T$  είναι συνάρτηση του  $\bar{H}_d/\bar{H}$  που με τη σειρά του εξαρτάται από τον δείκτη καθαρότητας  $\bar{K}_T$  τον οποίο θεωρούμε 0,5 για το συγκεκριμένο διάγραμμα. Μπορούμε να διακρίνουμε τις διαφορές στην τιμή της  $\bar{H}_T$  (και της  $\bar{H}$ ) κατά την διάρκεια του έτους όπως και τις αλλαγές στην ενέργεια που λαμβάνεται από τις επιφάνειες με την αλλαγή της γωνίας κλίσης  $\beta$ .



Εικόνα 21 : Η διαφοροποίηση στην εκτιμημένη μέση ημερήσια ακτινοβολία σε επιφάνειες διάφορων κλίσεων συναρτήσει της εποχής του χρόνου, για γεωγραφικό πλάτος  $\phi=45^\circ$ , δείκτη καθαρότητας  $\bar{K}_T=0,5$ , αξιμουθιακή γωνία επιφάνειας  $\gamma=0^\circ$  και ανάκλαση εδάφους  $\rho_g=0,2$ <sup>[12]</sup>

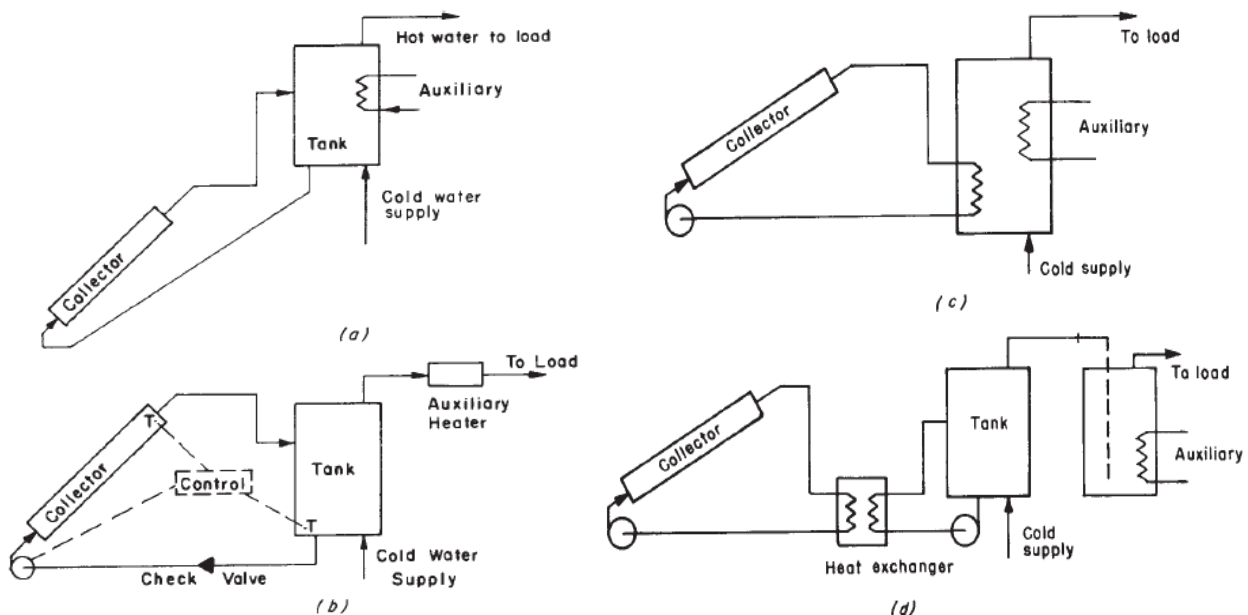
## 2. ΗΛΙΑΚΑ ΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

### 2.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΝΕΡΟΥ

Τα βασικά στοιχεία των ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού μπορούν να διαταχθούν σε αρκετές διαμορφώσεις. Οι πιο κοινές από αυτές φαίνονται στην Εικόνα 22. Η βοηθητική (auxiliary) πηγή ενέργειας προστίθεται με τρεις διαφορετικούς τρόπους οι οποίες εναλλάσσονται ανάμεσα στις τέσσερις μεθόδους μεταφοράς θερμότητας από τον συλλέκτη στη δεξαμενή.

Ένας παθητικός θερμαντήρας νερού (που ονομάζεται επίσης φυσικής κυκλοφορίας ή θερμοσυσσωρευτής) φαίνεται στην Εικόνα 22 (α). Η δεξαμενή είναι τοποθετημένη πάνω από τον συλλέκτη και το νερό κυκλοφορεί με φυσική συναγωγή οποτεδήποτε η ηλιακή ενέργεια στον συλλέκτη προσθέτει ενέργεια στο νερό που βρίσκεται στο σκέλος του συλλέκτη προκαλώντας μια διαφορά πυκνότητας. Η βοηθητική ενέργεια όπως φαίνεται, προστίθεται στο νερό της δεξαμενής κοντά στην κορυφή για να διατηρηθεί η παροχή ζεστού νερού. Μερικές φορές ο συλλέκτης συνδυάζεται με μια οριζόντια κυλινδρική δεξαμενή αποθήκευσης.

Στην Εικόνα 22 (b) φαίνεται ένα παράδειγμα συστήματος εξαναγκασμένης κυκλοφορίας. Είναι απαραίτητη η ύπαρξη αντλίας, που συνήθως ελέγχεται από ένα διαφορικό θερμοστάτη που ενεργοποιεί την αντλία όταν η θερμοκρασία στον πάνω μέρος είναι μεγαλύτερη (με ένα επαρκές περιθώριο για την εξασφάλιση της σταθερότητας) από τη θερμοκρασία στον πυθμένα της δεξαμενής. Χρειάζεται επίσης μια βαλβίδα ελέγχου για την εμπόδιση αντίστροφης κυκλοφορίας και επακόλουθες νυχτερινές απώλειες θερμότητας από τον συλλέκτη. Η βοηθητική ενέργεια τοποθετείται στο νερό του αγωγού που φεύγει από την δεξαμενή προς το φορτίο.



Εικόνα 22 : Απεικόνιση συνηθισμένων διαμορφώσεων θερμαντήρων νερού. (α) Σύστημα φυσικής κυκλοφορίας (b) Εξαναγκασμένη κυκλοφορία μιας δεξαμενής (c) Σύστημα με αντιψυκτικό βρόχο και εσωτερικό εναλλάκτη θερμότητας (d) Σύστημα με αντιψυκτικό βρόχο και εξωτερικό εναλλάκτη θερμότητας. Το βοηθητικό ρεύμα προστίθεται στη δεξαμενή, σε γραμμή θέρμανσης, ή σε δεύτερη δεξαμενή, οποιαδήποτε από τις μεθόδους αυτές μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με οποιαδήποτε διάταξη συλλέκτη-δεξαμενής.

Σε κλίματα που υπάρχουν ψυχρές θερμοκρασίες, οι σχεδιασμοί (α) και (β) θα πρέπει να τροποποιηθούν. Στον σχεδιασμό (α) μπορεί να συμπεριληφθεί ένας εναλλάκτης θερμότητας στην δεξαμενή και ο σχεδιασμός (β) μερικές φορές εφοδιάζεται με μια δεξαμενή αποστράγγισης που λαμβάνει το σύνολο του νερού του συλλέκτη και των σωληνώσεων όταν η αντλία δεν λειτουργεί. Παραδείγματα συστημάτων που χρησιμοποιούν αντιψυκτικά υγρά στον συλλέκτη φαίνονται στην Εικόνα 22 (c) και (d). Οι εναλλάκτες θερμότητας του συλλέκτη μπορούν να είναι είτε εσωτερικοί είτε εξωτερικοί της δεξαμενής. Σε μια τροποποίηση του σχεδιασμού (c) ο εναλλάκτης θερμότητας σχηματίζει ένα “πεζούλι” γύρω από την δεξαμενή. Στον σχεδιασμό (c), η βοηθητική ενέργεια προστίθεται στο νερό της δεξαμενής αποθήκευσης μέσω εναλλάκτη θερμότητας εντός της δεξαμενής.. Η παροχή βοηθητικής ενέργειας μπορεί επίσης να προέρχεται από θερμοσίφωνα ηλεκτρικού, πετρελαίου ή αερίου με δική του χωρητικότητα αποθήκευσης, όπως φαίνεται στον σχεδιασμό δύο δεξαμενών στη διάταξη (d). Οποιοσδήποτε από αυτούς τους σχεδιασμούς μπορεί να εφοδιαστεί με βαλβίδες επαναφοράς που αναμιγνύουν την παροχή κρύου νερού με το θερμό νερό ώστε να μπει ένα ανώτατο όριο στην θερμοκρασία του θερμού νερού που κατευθύνεται προς το σύστημα διανομής<sup>[32][33][34]</sup>.

## 2.2 Η ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Οι προσομοιώσεις είναι αριθμητικά πειράματα και μπορούν να δώσουν τον ίδιο τύπο πληροφοριών θερμικής επίδοσης όπως τα φυσικά πειράματα. Είναι ωστόσο, σχετικά γρήγορες και φθηνές και μπορούν να παράγουν πληροφορίες για την επίδραση των αλλαγών στις μεταβλητές σχεδιασμού στην απόδοση χρησιμοποιώντας τα ίδια φορτία και καιρικές συνθήκες. Αυτές οι μεταβλητές σχεδιασμού μπορούν να περιλαμβάνουν στοιχεία της επιφάνειας απορρόφησης, το εμβαδό του συλλέκτη κ.α. Με τη χρήση δεδομένων κόστους και κατάλληλη οικονομική ανάλυση, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βρεθούν συστήματα μικρότερου κόστους.

Οι προσομοιώσεις είναι κατάλληλες για παραμετρικές μελέτες και έτσι προσφέρουν στον σχεδιαστή διεργασιών την ικανότητα να εξετάσει τις επιδράσεις των μεταβλητών σχεδιασμού σε μακροχρόνιες επιδόσεις του συστήματος. Προσφέρουν επίσης την ευκαιρία να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις της διαμόρφωσης του συστήματος και εναλλακτικών σχεδίων συστημάτων. Έχουν το πλεονέκτημα ότι τα καιρικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται επιτρέπουν να γίνονται παραμετρικές και διαμορφωτικές μελέτες χωρίς την αβεβαιότητα της αλλαγής του καιρού. Με τον ίδιο τρόπο, ένα σύστημα μπορεί να εξεταστεί μέσω προσομοιώσεων σε ένα ευρύ φάσμα καιρικών συνθηκών για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων του καιρού στον σχεδιασμό.

Όλες οι φυσικές παράμετροι των συλλεκτών, των δεξαμενών αποθήκευσης και των λοιπών υποσυστημάτων είναι οι μεταβλητές που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό των ηλιακών διεργασιών. Ο αριθμός των παραμέτρων που πρέπει να εξεταστούν μπορεί να είναι αρκετά μικρός καθώς η επίδραση τους στις διεργασίες είναι μικρή για τις περισσότερες από αυτές. Για παράδειγμα, για την ηλιακή θέρμανση ενός κτιρίου, η βασική μεταβλητή σχεδιασμού του συστήματος είναι το εμβαδό του συλλέκτη, με τη χωρητικότητα αποθήκευσης και άλλες μεταβλητές σχεδιασμού να είναι δευτερεύουσας σημασίας. Οι προσομοιώσεις μπορούν να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τις επιδράσεις του εμβαδού του συλλέκτη (ή άλλων μεταβλητών) οι οποίες είναι ιδιαίτερα δύσκολο να προκύψουν με άλλα μέσα<sup>[35][36]</sup>.

## 2.3 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΑΠΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

Παραλληλισμοί ανάμεσα στα αριθμητικά πειράματα (προσομοιώσεις) και στα φυσικά πειράματα είναι υπαρκτοί. Ουσιαστικά μπορεί να υπολογιστεί όποιο μέγεθος είναι δυνατόν να μετρηθεί. Στην πράξη, μπορεί να είναι ευκολότερο να υπολογιστούν παρά να μετρηθούν κάποιες μεταβλητές. Μπορούν να εκτελεστούν προσομοιώσεις για να εκτεθούν συστήματα σε ακραίες καιρικές συνθήκες, φορτία και άλλους παράγοντες. Οι προσομοιώσεις μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να εξεταστούν τα σφάλματα ενός συστήματος (π.χ. βλάβη σε μια αντλία κυκλοφορίας) και για να διαπιστωθεί ποιες θα είναι οι συνέπειες της βλάβης.

Υπάρχουν δύο βασικά είδη δεδομένων που μπορούν να ληφθούν από τις προσομοιώσεις. Πρώτα, μπορεί να προσδιοριστεί η ολοκληρωμένη απόδοση για παρατεταμένες περιόδους. Αυτό συνήθως είναι χρήσιμο για ένα έτος που αντιπροσωπεύει το μακροχρόνιο μέσο όρο του κλίματος στο οποίο η προτεινόμενη διεργασία θα λειτουργεί. Το έτος είναι η χρονική βάση των περισσότερων οικονομικών μελετών, μπορεί όμως να χρειαστούν πληροφορίες για περιόδους μερικών ημερών ως αρκετών ετών. Τα δεδομένα αυτά λαμβάνονται εύκολα ολοκληρώνοντας τις επιθυμητές ποσότητες (έξοδος συλλέκτη, απώλειες δεξαμενής, μεταφορά θερμότητας κατά μήκος ενός εναλλάκτη, το ποσό της βοηθητικής ενέργειας που χρειάζεται και άλλα) για την κατάλληλη χρονική περίοδο.

Δεύτερον, πληροφορίες σχετικά με τη δυναμική της διεργασίας. Η επιλογή των κατασκευαστικών υλικών μπορεί να επηρεαστεί από τις διακυμάνσεις των συνθηκών λειτουργίας. Η πίεση στα συστήματα κυκλοφορίας του λειτουργικού ρευστού καθορίζεται από θερμοκρασίες στα διάφορα εξαρτήματα. Για παράδειγμα, οι θερμοκρασίες στις εξόδους του συλλέκτη μπορεί να είναι αρκετά πάνω από το σημείο βρασμού του υγρού μέσου και μπορεί να χρειαστούν βαλβίδες εκτόνωσης στις εξόδους του συλλέκτη όπως και στις δεξαμενές.

Επιπλέον, είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι χρόνοι κατά τους οποίους απαιτείται βοηθητική ενέργεια και η σχέση αυτών των χρόνων με τις καιρικές συνθήκες, όπως επίσης είναι δυνατόν να εκτιμηθούν οι απώλειες της μονάδας αποθήκευσης. Γενικότερα, κάθε μεταβλητή που εμφανίζεται στο σύνολο των εξισώσεων του συστήματος μπορεί να διερευνηθεί<sup>[35][37]</sup>.

### 3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Οι μέθοδοι σχεδιασμού των ηλιακών θερμικών διεργασιών μπορούν να ενταχθούν σε τρεις γενικές κατηγορίες :

Η πρώτη κατηγορία έχει εφαρμογή σε συστήματα στα οποία η θερμοκρασία λειτουργίας του συλλέκτη είναι γνωστή ή μπορεί να εκτιμηθεί και για την οποία μπορούν να διαπιστωθούν τα κρίσιμα επίπεδα ακτινοβολίας. Η κυριότερη από αυτές, η μέθοδος χρησιμότητας (utilizability)<sup>[43][44][45][46]</sup>, βασίζεται σε αναλύσεις ωριαίων δεδομένων του καιρού για να βρεθεί το κλάσμα της συνολικής μηνιαίας ακτινοβολίας που ξεπερνά το κρίσιμο επίπεδο.

Η δεύτερη κατηγορία των μεθόδων σχεδιασμού περιλαμβάνει αυτές που είναι συσχετίσεις αποτελεσμάτων ενός μεγάλου αριθμού λεπτομερών προσομοιώσεων. Μια από αυτές είναι η μέθοδος f-chart<sup>[38][40]</sup>. Αποτελέσματα από αρκετές προσομοιώσεις συσχετίζονται σε όρους εύκολα υπολογίσιμων αδιάστατων μεταβλητών. Τα αποτελέσματα της μεθόδου f-chart χρησιμεύουν και ως βάση για περαιτέρω συσχετίσεις.

Η τρίτη κατηγορία βασίζεται σε συντομότερες προσομοιώσεις<sup>[49]</sup>. Σε αυτές τις μεθόδους οι προσομοιώσεις γίνονται χρησιμοποιώντας αντιπροσωπευτικές ημέρες από τα μετεωρολογικά δεδομένα και τα αποτελέσματα σχετίζονται με πιο μακροπρόθεσμες επιδόσεις.

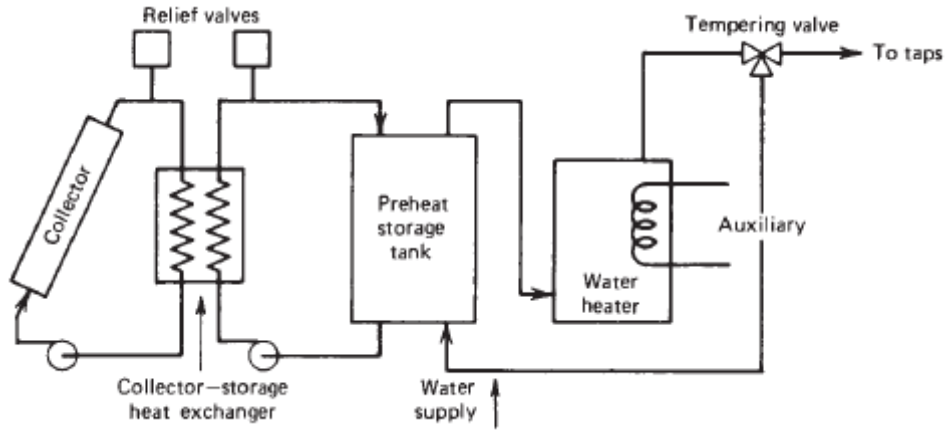
Τα τελευταία χρόνια ετήσιες προσομοιώσεις έχουν κυριαρχήσει των μεθόδων πρακτικού σχεδιασμού, ως αποτέλεσμα της συνεχώς αυξανόμενης ισχύος των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Ωστόσο, οι μέθοδοι σχεδιασμού είναι ακόμα πολύ γρηγορότερες και επομένως χρήσιμες για προκαταρκτικές μελέτες.

#### 3.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ f-chart

Η μέθοδος f-chart<sup>[38][40]</sup> παρέχει ένα μέσο για την εκτίμηση του κλάσματος του συνολικού θερμικού φορτίου που θα τροφοδοτηθεί μέσω της ηλιακής ενέργειας σε ένα συγκεκριμένο ηλιακό θερμικό σύστημα. Η βασική μεταβλητή σχεδιασμού είναι το εμβαδό του συλλέκτη, δευτερεύουσες μεταβλητές είναι ο τύπος του συλλέκτη, η χωρητικότητα αποθήκευσης, οι ρυθμοί ροής των ρευστών, το μέγεθος των εναλλακτών θερμότητας του φορτίου και του συλλέκτη. Η μέθοδος είναι μία συσχέτιση των αποτελεσμάτων από πολλές εκατοντάδες προσομοιώσεις θερμικής απόδοσης σε ηλιακά θερμικά συστήματα. Οι συνθήκες των προσομοιώσεων αυτών, έχουν υποστεί μεταβολές σε κατάλληλες περιοχές τιμών των παραμέτρων για πρακτικούς σχεδιασμούς συστημάτων. Οι συσχετίσεις που προκύπτουν δίνουν το  $f$ , το κλάσμα του μηνιαίου θερμικού φορτίου που παρέχεται από την ηλιακή ενέργεια, ως συνάρτηση δύο αδιάστατων μεταβλητών. Η μία σχετίζεται με τον λόγο των απωλειών του συλλέκτη προς τα θερμικά φορτία, και η άλλη σχετίζεται με τον λόγο της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται προς τα θερμικά φορτία.

Η τυπική διαμόρφωση ενός οικιακού ηλιακού συστήματος θέρμανσης νερού παρουσιάζεται στην Εικόνα 23. Ο συλλέκτης μπορεί να θερμαίνει είτε αέριο είτε υγρό. Η ηλιακή ενέργεια μεταφέρεται μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας σε μια οικιακή δεξαμενή προθέρμανσης ζεστού νερού, που εφοδιάζει ηλιακά θερμασμένο νερό σε ένα συμβατικό θερμοσίφωνα ή σε ένα θερμαντήρα μικρής χωρητικότητας σε σειρά όπου το νερό θερμαίνεται περαιτέρω στην επιθυμητή θερμοκρασία εάν είναι απαραίτητο. Συνήθως υπάρχει και μια βαλβίδα επαναφοράς για να διατηρήσει το νερό της βρύσης

χαμηλότερα από κάποια μέγιστη θερμοκρασία. Αυτές οι αλλαγές στη διαμόρφωση του συστήματος δεν έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην απόδοση του <sup>[39][40]</sup>.



Εικόνα 23 : Τυπική διαμόρφωση συστήματος για θέρμανση νερού μόνο. Ο συλλέκτης μπορεί να θερμαίνει αέρα ή νερό

Λεπτομερείς προσομοιώσεις αυτών των συστημάτων έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη συσχετίσεων ανάμεσα σε αδιάστατες μεταβλητές και το  $f$ . Οι δύο αδιάστατες μεταβλητές ορίζονται ως <sup>[40][41][42]</sup>.

$$X = \frac{A_c F'_R U_L (T_{ref} - \bar{T}_a) \Delta t}{L} \quad [3.1.1]$$

$$Y = \frac{A_c F'_R (\bar{\tau} \alpha) \bar{H}_T N}{L} \quad [3.1.2]$$

όπου  $A_c$  η επιφάνεια του συλλέκτη

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

$U_L$  ο συντελεστής συνολικής απώλειας του συλλέκτη ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

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

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

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

$L$  συνολικό μηνιαίο φορτίο θέρμανσης για θέρμανση χώρου και ζεστό νερό (J)

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

$N$  αριθμός ημερών του μήνα



$(\overline{\tau\alpha})$  γινόμενο μέσης μηνιαίας εκπομπής-απορρόφησης που εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά του συλλέκτη

Οι εξισώσεις [3.1.1] [3.1.2] μπορούν να γραφούν και σε διαφορετική μορφή :

$$X = F_R U_L \times \frac{F'_R}{F_R} \times (T_{ref} - \overline{T}_a) \times \Delta t \times \frac{A_c}{L} \quad [3.1.3]$$

$$Y = F_R (\tau\alpha)_n \times \frac{F'_R}{F_R} \times \frac{(\overline{\tau\alpha})}{(\tau\alpha)_n} \times \overline{H}_T N \times \frac{A_c}{L} \quad [3.1.4]$$

όπου τα  $F_R U_L$  και  $F_R (\tau\alpha)_n$  λαμβάνονται από αποτελέσματα δοκιμών για συγκεκριμένους τύπους συλλέκτη και εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά (γεωμετρικά, κατασκευαστικά κ.α.) του.

$F_R$  είναι ο παράγοντας απομάκρυνσης θερμότητας και αντιπροσωπεύει τον λόγο του πραγματικού χρήσιμου οφέλους ενέργειας που θα υπήρχε αν η επιφάνεια απορρόφησης του συλλέκτη βρισκόταν στην τοπική θερμοκρασία δηλαδή  $F_R = \frac{\text{Πραγματική παραγωγή}}{\text{Παραγωγή για θερμοκρασία συλλέκτη=θερμοκρασία εισόδου ρευστού}}$

Ο λόγος  $F'_R/F_R$  διορθώνει διάφορες μεταβολές θερμοκρασίας ανάμεσα στο συλλέκτη και την δεξαμενή αποθήκευσης και όπως ο λόγος  $(\overline{\tau\alpha})/(\tau\alpha)_n$  μπορούν να εκτιμηθούν μέσω συγκεκριμένων μεθόδων και εξαρτώνται επίσης από τον τύπο του συλλέκτη που χρησιμοποιείται.

Η μέση θερμοκρασία αέρα  $\overline{T}_a$  λαμβάνεται από μετεωρολογικά αρχεία για τον μήνα και την τοποθεσία που είναι επιθυμητή.

$\overline{H}_T$  είναι η μέση μηνιαία ημερήσια ακτινοβολία στην επιφάνεια του συλλέκτη και υπολογίζεται από τις μεθόδους που αναφέρθηκαν στα κεφάλαια 1.3 και 1.4.

$A_c$  είναι η επιφάνεια του συλλέκτη.<sup>[38][40]</sup>

Έτσι όλοι οι όροι των παραπάνω δύο εξισώσεων είναι άμεσα προσδιορίσιμοι από διαθέσιμες πληροφορίες.

## 3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ

Ο σχεδιασμός των ενεργών ηλιακών συστημάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί με λεπτομερείς υπολογιστικές προσομοιώσεις. Οι προσομοιώσεις είναι δαπανηρές από πλευράς υπολογιστικών απαιτήσεων, όμως η διαδικασία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στην τελική ανάλυση για όλα τα μεγάλα συστήματα. Προκαταρκτικοί σχεδιασμοί όπως και σχεδιασμοί για μικρά συστήματα απαιτούν φθηνές μεθόδους για την πρόβλεψη μακροχρόνιας επίδοσης, οι μέθοδοι που παρουσιάζονται ανήκουν σε αυτή την κατηγορία.

Η πρώτη μέθοδος χρησιμότητας είναι η μέση μηνιαία ωριαία χρησιμότητα για συλλέκτες επίπεδης πλάκας (μέθοδος  $\varphi$ ). Παρουσιάζονται επίσης, η μέθοδος του  $\overline{\varphi}$  και έπειτα η συνδυαστική ημερήσια χρησιμότητα με την f-chart που υπολογίζει για πεπερασμένη χωρητικότητα αποθήκευσης ( $\overline{\varphi}$ , f chart).

Οι μέθοδοι σχεδιασμού είναι διαθέσιμες για πολλά ηλιακά θερμικά συστήματα, όχι όμως για όλα. Όλες οι μέθοδοι χρησιμότητας απαιτούν γνώση της θερμοκρασίας εισόδου ρευστού του συλλέκτη, που συνήθως είναι γνωστή. Η μέθοδος  $\bar{\varphi}$ , f chart επιτρέπει στην θερμοκρασία εισόδου του συλλέκτη να διαφέρει από την θερμοκρασία της δεξαμενής αποθήκευσης, απαιτεί όμως το φορτίο να είναι κλειστός βρόχος με το ρευστό που επιστρέφει στην δεξαμενή να έχει ίση ή μεγαλύτερη τιμή μιας ελάχιστης θερμοκρασίας. Ακόμη, οποιαδήποτε συσκευή βρίσκεται ανάμεσα στο ηλιακό σύστημα και το φορτίο θα πρέπει να έχει απόδοση μετατροπής που να είναι ανεξάρτητη του επιπέδου της θερμοκρασίας στο οποίο η ενέργεια μεταφέρεται (όσο είναι μεγαλύτερη της ελάχιστης θερμοκρασίας).

### 3.2.1 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ

Εάν η ακτινοβολία είναι χρήσιμη μόνο πάνω από μια κρίσιμη τιμή ή όριο έντασης, τότε μπορούμε να ορίσουμε ένα στατιστικό μέγεθος της ακτινοβολίας που ονομάζουμε χρησιμότητα, ως το κλάσμα της συνολικής ακτινοβολίας που λαμβάνεται με ένταση μεγαλύτερη του κρίσιμου επιπέδου. Μπορούμε τότε να πολλαπλασιάσουμε τη μέση ακτινοβολία για μία χρονική περίοδο με αυτό το κλάσμα για να βρούμε την συνολική χρησιμοποιήσιμη ενέργεια.

Το ισοζύγιο ενέργειας του συλλέκτη, επί της ουσίας λέει πως το χρήσιμο όφελος σε οποιαδήποτε στιγμή είναι η διαφορά ανάμεσα στην ηλιακή ενέργεια που απορροφάται και τις θερμικές απώλειες από τον συλλέκτη. Οι απώλειες εξαρτώνται από τη διαφορά στην θερμοκρασία ανάμεσα στην πλάκα του συλλέκτη και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, καθώς και από ένα παράγοντα απώλειας θερμότητας. Για συγκεκριμένη τιμή του παράγοντα αυτού, μια θερμοκρασία συλλέκτη και μια θερμοκρασία περιβάλλοντος, υπάρχει μια τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που είναι η ακριβώς απαιτούμενη ώστε η ακτινοβολία που απορροφάται να είναι ίση με τις απώλειες. Αυτή η τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι το κρίσιμο επίπεδο ακτινοβολίας  $I_{Tc}$ , για τον συγκεκριμένο συλλέκτη που λειτουργεί υπό αυτές τις συνθήκες.

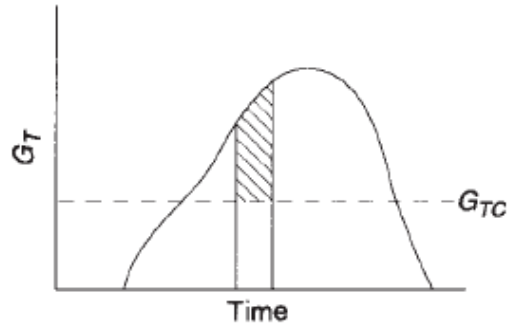
Αν η προσπίπτουσα ακτινοβολία στην κεκλιμένη επιφάνεια του συλλέκτη  $I_T$ , είναι ίση με την  $I_{Tc}$ , ολόκληρη η απορροφημένη ενέργεια θα χαθεί και δεν θα προκύπτει χρησιμότητα. Αν όμως η προσπίπτουσα ακτινοβολία υπερβαίνει την  $I_{Tc}$  θα υπάρχει χρησιμότητα και ο συλλέκτης θα πρέπει να λειτουργεί. Εάν  $I_T < I_{Tc}$ , δεν είναι δυνατή η ύπαρξη χρησιμότητας και ο συλλέκτης δεν θα πρέπει να λειτουργεί. Έτσι, η χρησιμοποιήσιμη ενέργεια για οποιαδήποτε ώρα είναι  $(I_T - I_{Tc})^+$ , όπου ο εκθέτης + υποδηλώνει ότι η χρησιμοποιήσιμη ενέργεια μπορεί να είναι θετική ή μηδενική αλλά όχι αρνητική.

Το κλάσμα για την συνολική ενέργεια μίας ώρας που υπερβαίνει το κρίσιμο επίπεδο είναι η χρησιμότητα γι' αυτή την συγκεκριμένη ώρα :

$$\varphi_h = \frac{(I_T - I_{Tc})^+}{I_T}$$

[3.2.1]

με  $0 < \varphi_h < 1$ . Η ωριαία χρησιμότητα είναι ο λόγος της σκιασμένης περιοχής προς τη συνολική περιοχή κάτω από την καμπύλη ακτινοβολίας για την συγκεκριμένη ώρα, όπως φαίνεται παρακάτω στην Εικόνα 24<sup>[43][44]</sup>.



Εικόνα 24 :  $G_T$  (η ακτινοβολούμενη ενέργεια που προσπίπτει σε μία κεκλιμένη επιφάνεια) προς ώρες μίας ημέρας. Για την ώρα που φαίνεται, η  $I_T$  είναι η περιοχή κάτω από την καμπύλη  $G_T$ , το  $I_{Tc}$  είναι η περιοχή κάτω από την καμπύλη σταθερού επιπέδου κρίσιμης ακτινοβολίας.

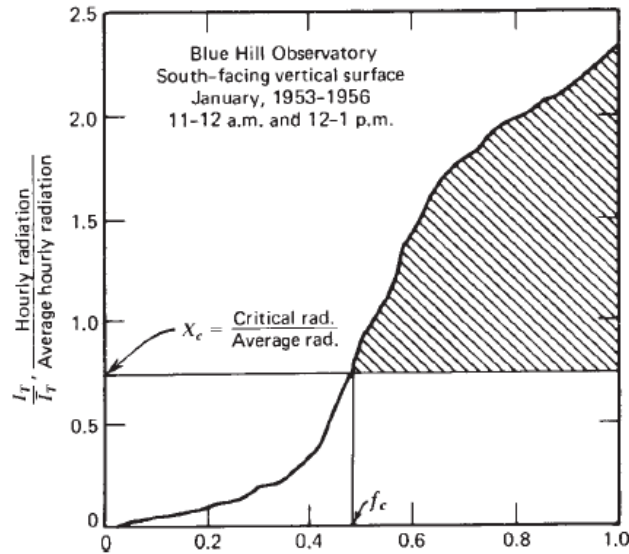
Η χρησιμότητα για μία και μόνο ώρα δεν είναι ουσιαστική. Ωστόσο, η χρησιμότητα για μια συγκεκριμένη ώρα στο διάστημα ενός μήνα με  $N$  ημέρες (π.χ. 10 με 11π.μ. για τον Μάρτιο) στον οποίο η μέση ακτινοβολία μίας ώρας είναι σημαντική δίνεται από την σχέση :

$$\varphi = \frac{1}{N} \sum_1^N \frac{(I_T - I_{Tc})^+}{I_T}$$

[3.2.2]

Η χρησιμοποιήσιμη ενέργεια του μήνα για αυτή την ώρα είναι το γινόμενο  $N\bar{I}_T\varphi$ . Ο υπολογισμός μπορεί να γίνει για μεμονωμένες ώρες του μήνα και το αποτέλεσμα αθροίζεται για να πάρουμε την χρησιμοποιήσιμη ενέργεια του μήνα. Αν η εφαρμογή είναι τέτοια ώστε οι συνθήκες του επιπέδου της κρίσιμης ακτινοβολίας και της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι συμμετρικές κατά την ηλιακή μεσημβρία, οι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν για ζεύγη ωρών (π.χ. 10 με 11 και 1 με 2 ή 9 με 10 και 2 με 3) και το ποσό των υπολογισμών υποδιπλασιάζεται.

Με διαθέσιμες τις τιμές των δεδομένων για την μέση ωριαία ακτινοβολία ανά μήνα και ένα κρίσιμο επίπεδο ακτινοβολίας, το επόμενο βήμα είναι ο προσδιορισμός του  $\varphi$ . Αυτό γίνεται με την επεξεργασία των ωριαίων δεδομένων της ακτινοβολίας  $I_T$  ως εξής : Για μια συγκεκριμένη τοποθεσία, ώρα, μήνα και προσανατολισμό συλλέκτη, σχεδιάζεται μια καμπύλη αθροιστικής κατανομής του  $I_T/\bar{I}_T$ . Αυτό μας δίνει μια εικόνα της συχνότητας εμφάνισης καθαρών, μερικώς συννεφιασμένων, ή νεφελωδών ημερών γι' αυτή την ώρα μέσα στο μήνα. Ένα παράδειγμα τέτοιας καμπύλης φαίνεται στην Εικόνα 25<sup>[25][43][44]</sup>.



Εικόνα 25 : Καμπύλη αθροιστικής κατανομής για ωριαία ακτινοβολία σε μια κάθετη επιφάνεια προσανατολισμένη προς τον νότο για συγκεκριμένη τοποθεσία<sup>[25]</sup>

Μια αδιάστατη κρίσιμη ακτινοβολία ορίζεται ως :

$$X_c = \frac{I_{Tc}}{\bar{I}_T}$$

[3.2.3]

Στο παράδειγμα της Εικόνας 25 το  $X_c$  είναι η οριζόντια γραμμή με τιμή 0,75 και  $f_c=0,49$ . Η σκιασμένη περιοχή αντιπροσωπεύει τη μηνιαία χρησιμότητα, δηλαδή το κλάσμα της μηνιαίας ενέργειας για το ζεύγος ωρών που ξεπερνούν το κρίσιμο επίπεδο. Ολοκληρώνοντας την ωριαία χρησιμότητα ως προς όλες τις τιμές του  $f_c$  υπολογίζεται το  $\varphi$  για αυτό το επίπεδο κρίσιμης ακτινοβολίας :

$$\varphi = \int_{f_c}^1 \varphi_h df$$

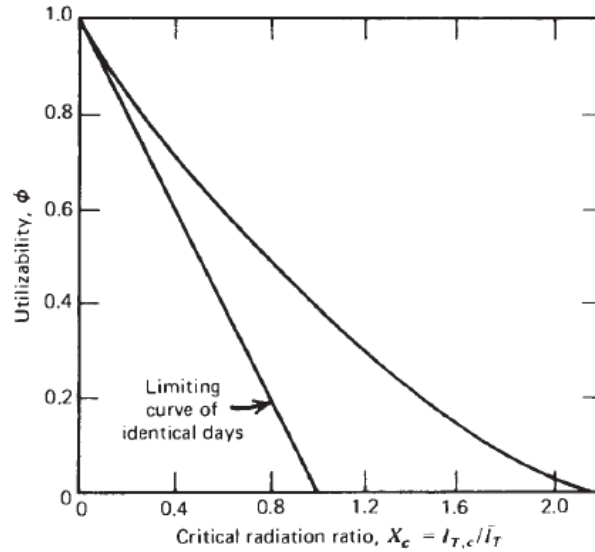
[3.2.4]

Καθώς το επίπεδο κρίσιμης ακτινοβολίας μεταβάλλεται, μεταβάλλεται και το  $\varphi_c$  και οι γραφικές ολοκληρώσεις της καμπύλης δίνουν την χρησιμότητα  $\varphi$  ως συνάρτηση του λόγου κρίσιμης ακτινοβολίας  $X_c$ . Ένα παράδειγμα προερχόμενο από την καμπύλη της Εικόνας 25 παρουσιάζεται στο διάγραμμα της Εικόνας 26 παρακάτω<sup>[43][44]</sup>.

Έχει επίσης δειχθεί<sup>[25][43]</sup> πως σε συγκεκριμένη τοποθεσία για περίοδο ενός μηνός, το  $\varphi$  είναι ουσιαστικά το ίδιο για όλες τις ώρες. Έτσι, παρότι η καμπύλη της Εικόνας 26 προέρχεται από συγκεκριμένο ζεύγος ωρών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλα τα υπόλοιπα ζεύγη.

Η αριστερή καμπύλη θα είχε προκύψει από μια καμπύλη αθροιστικής κατανομής που είναι οριζόντια γραμμή με τιμή τεταγμένης 1,0 στο παραπάνω διάγραμμα. Με άλλα λόγια, κάθε ημέρα του μήνα είναι σαν την μέση ημέρα. Η διαφορά ανάμεσα την πραγματική καμπύλη χρησιμότητας  $\varphi$  και την αριστερή

(περιοριστική καμπύλη για ιδανικές ημέρες) αντιπροσωπεύει το σφάλμα στην χρησιμοποιήσιμη ενέργεια που θα εμφανιζόταν από την χρήση της μέσης ημέρας για την εκτίμηση ολόκληρου του μήνα.



Εικόνα 26 : Καμπύλη χρησιμότητας  $\phi$  εξαγόμενη από το παράδειγμα της Εικόνας 25<sup>[25]</sup>

### 3.2.2 ΩΡΙΑΙΑ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ

Η χρησιμότητα με άλλα λόγια είναι το κλάσμα που χρησιμοποιείται από ένα συλλέκτη με  $F_R(\tau\alpha) = 1$  και λειτουργεί σε σταθερή διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εισόδου και περιβάλλοντος. Παρότι αυτός ο συλλέκτης δεν έχει οπτικές απώλειες και έχει μοναδιαίο παράγοντα απομάκρυνσης θερμότητας, η χρησιμότητα είναι πάντοτε μικρότερη της μονάδας αφού ο συλλέκτης έχει απώλειες θερμότητας. Εάν υπάρχει εναλλάκτης θερμότητας το  $F'_R$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί για το  $F_R$ .

Μια αναλυτική έκφραση για τη χρησιμότητα σε όρους προσπίπτουσας ωριαίας ακτινοβολίας στην πλάκα του συλλέκτη μπορεί να γραφεί ως :

$$Q_u = A_c F_R [I_T(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)]^+ \quad [3.2.5]$$

Το επίπεδο ακτινοβολίας θα πρέπει να ξεπερνά μια κρίσιμη τιμή προτού παραχθεί χρήσιμη απόδοση. Αυτό το κρίσιμο επίπεδο μπορεί να υπολογιστεί θέτοντας το  $Q_u$  ίσο με το μηδέν. Οπότε :

$$I_{T_c} = \frac{F_R U_L (T_i - T_a)}{F_R(\tau\alpha)} \quad [3.2.6]$$

Η χρήσιμη απόδοση του συλλέκτη μπορεί να εκφραστεί σε όρους του κρίσιμου επιπέδου ακτινοβολίας ως εξής :

$$Q_u = A_c F_R(\tau\alpha) (I_T - I_{T_c})^+ \quad [3.2.7]$$

Αν το επίπεδο κρίσιμης ακτινοβολίας είναι σταθερό για μια συγκεκριμένη ώρα (π.χ. 10 με 11π.μ.) για έναν μήνα (με N ημέρες), τότε η μέση μηνιαία ωριαία απόδοση του συλλέκτη για αυτή την ώρα θα δίνεται από την σχέση :

$$\bar{Q}_u = \frac{A_c F_R (\tau\alpha)}{N} \sum_N (I_T - I_{T_c})^+ \quad [3.2.8]$$

Η μέση μηνιαία ακτινοβολία για την ώρα αυτή είναι  $\bar{I}_T$ , οπότε η μέση χρήσιμη απόδοση μπορεί να εκφραστεί ως :

$$\bar{Q}_u = A_c F_R (\tau\alpha) \bar{I}_T \varphi \quad [3.2.9]$$

όπου η χρησιμότητα  $\varphi$  βρίσκεται από την εξίσωση [3.2.2]

Απο τις εξισώσεις [3.2.3] και [3.2.6] η αδιάστατη  $X_c$  γράφεται ως εξής :

$$X_c = \frac{I_{T_c}}{\bar{I}_T} = \frac{F_R U_L (T_i - T_a)}{F_R (\tau\alpha)_n \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} \bar{I}_T} \quad [3.2.10]$$

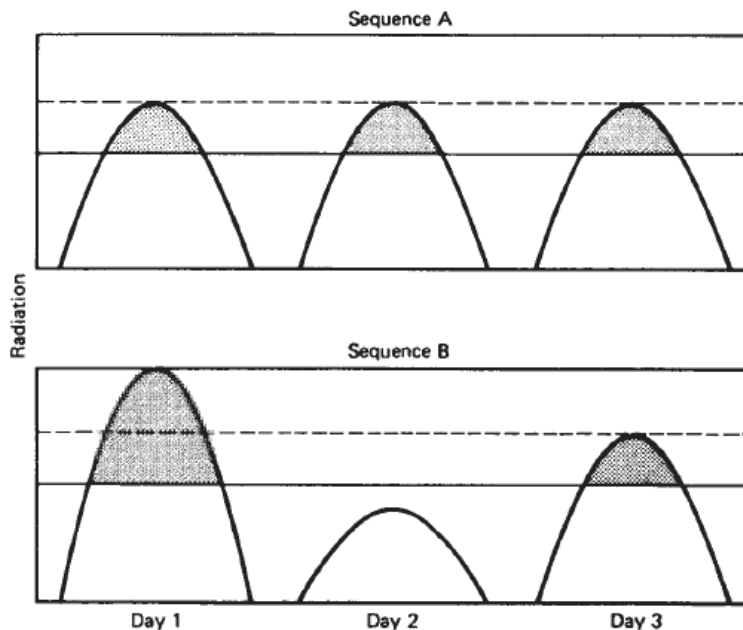
όπου το κλάσμα  $(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$  προσδιορίζεται για τη μέση ημέρα του μήνα και την κατάλληλη ωριαία γωνία. Με το  $\varphi$  προσδιορισμένο, η χρησιμοποιήσιμη ενέργεια είναι  $\varphi \bar{I}_T$  <sup>[25][43]</sup>.

### 3.2.3 ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ

Οι υπολογισμοί με τη χρήση των καμπυλών  $\varphi$  οδήγησαν στην εισαγωγή της έννοιας της μέσης μηνιαίας ημερήσιας χρησιμότητας  $\bar{\varphi}$ . Αυτή η ημερήσια χρησιμότητα ορίζεται ως το άθροισμα για ένα μήνα (όλων των ωρών και ημερών) της ακτινοβολίας σε μια κεκλιμένη επιφάνεια που ξεπερνά το κρίσιμο επίπεδο διαιρούμενη με τη μηνιαία ακτινοβολία :

$$\bar{\varphi} = \frac{\sum_{days} \sum_{hours} (I_T - I_{T_c})^+}{\bar{H}_T N} \quad [3.2.11]$$

όπου το κρίσιμο επίπεδο είναι παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται στην έννοια της χρησιμότητας  $\varphi$  (Το κρίσιμο επίπεδο για την  $\bar{\varphi}$  βασίζεται στη μέση μηνιαία «οπτική αποδοτικότητα» και θερμοκρασία αντί για τιμές συγκεκριμένων ωρών). Η μηνιαία χρησιμοποιήσιμη ενέργεια θα είναι τότε το γινόμενο  $\bar{H}_T N \bar{\varphi}$ . Η έννοια της ημερήσιας χρησιμότητας φαίνεται σχηματικά στην Εικόνα 27. Λαμβάνοντας υπόψη κάθε μία από τις δύο αλληλουχίες ημερών, το  $\bar{\varphi}$  είναι ο λόγος του αθροίσματος των σκιασμένων περιοχών προς το σύνολο των περιοχών που βρίσκονται κάτω από τις καμπύλες<sup>[45]</sup>.



Εικόνα 27 : Δύο αλληλουχίες ημερών με την ίδια μέση ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη<sup>[45]</sup>

Η τιμή της  $\bar{\varphi}$  για ένα μήνα εξαρτάται από την κατανομή των ωριαίων τιμών ακτινοβολίας γι' αυτό τον μήνα. Αν υποθεθεί πως όλες οι ημέρες είναι συμμετρικές ως προς την ηλιακή μεσημβρία και πως οι ωριαίες κατανομές είναι όπως αυτές των Εικόνων 16 και 17, τότε η  $\bar{\varphi}$  εξαρτάται από την κατανομή της συνολικής ημερήσιας ακτινοβολίας, δηλαδή από τη σχετική συχνότητα εμφάνισης τιμών χαμηλότερων του μέσου, τιμών μεγαλύτερων του μέσου και την τιμή του μέσου για την ημερήσια ακτινοβολία (έχει αποδειχθεί ότι αποκλίσεις από τη συμμετρία ανάμεσα σε ημέρες οδηγούν σε αυξήσεις της  $\bar{\varphi}$ , οπότε ο υπολογισμός της από αυτές τις συσχετίσεις θεωρείται συντηρητικός), όπως φαίνεται στην Εικόνα 27. Οι ημέρες στην πρώτη αλληλουχία είναι όλες μέσες ημέρες, για το κατώτατο κρίσιμο επίπεδο ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην συνεχόμενη οριζόντια γραμμή, οι σκιασμένες περιοχές δίνουν την χρησιμοποιήσιμη ενέργεια, ενώ για το άνω κρίσιμο επίπεδο που αντιστοιχεί στην οριζόντια διακεκομμένη γραμμή δεν υπάρχει χρησιμοποιήσιμη ενέργεια. Η δεύτερη αλληλουχία δείχνει τρεις μέρες με διαφοροποιημένη ακτινοβολία με την ίδια όμως μέση τιμή όπως πριν. Η χρησιμοποιήσιμη ενέργεια για το κατώτατο κρίσιμο επίπεδο είναι σχεδόν η ίδια όπως στο πρώτο σχήμα, όμως υπάρχει χρησιμοποιήσιμη ενέργεια πάνω από το άνω κρίσιμο επίπεδο για το σύνολο των ανομοιομορφων ημερών και καθόλου για το ομοιομορφο σύνολο της πρώτης αλληλουχίας. Έτσι, η επίδραση της αυξημένης διαφοροποίησης των ημερών είναι η αύξηση της  $\bar{\varphi}$ , συγκεκριμένα στα άνω κρίσιμα επίπεδα ακτινοβολίας<sup>[45]</sup>.

Η μηνιαία κατανομή της συνολικής ημερήσιας ακτινοβολίας είναι αποκλειστικά συνάρτηση του  $\bar{K}_T$  και έτσι η επίδραση της κατανομής της ημερήσιας ακτινοβολίας σχετίζεται με μόνο μία μεταβλητή, την  $\bar{K}_T$ .

Έχουν αναπτυχθεί συσχετίσεις για την  $\bar{\varphi}$  ως συνάρτηση του  $\bar{K}_T$ , καθώς και δύο μεταβλητές, ο γεωμετρικός παράγοντας  $\bar{R}/R_n$  και το αδιάστατο κρίσιμο επίπεδο ακτινοβολίας  $\bar{X}_c$ . Το σύμβολο  $\bar{R}$  είναι ο μηνιαίος λόγος της ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια προς την ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια  $\bar{H}_T/\bar{H}$ , και δίνεται από την εξίσωση [1.4.20], ο  $R_n$  είναι ο αντίστοιχος λόγος ακτινοβολίας

κεκλιμένης προς οριζόντιας επιφάνειας για μία μέση ημέρα του μήνα για την ώρα που περιέχει την ηλιακή μεσημβρία. Η εξίσωση [1.4.6] μπορεί να γραφεί για την ώρα της ηλιακής μεσημβρίας ως <sup>[45]</sup>:

$$R_n = \left(\frac{I_T}{I}\right)_n = \left(1 - \frac{r_{d,n}H_d}{r_{t,n}H}\right)R_{b,n} + \left(\frac{r_{d,n}H_d}{r_{t,n}H}\right)\left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + \rho_g\left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \quad [3.2.12]$$

Τα  $r_{d,n}$  και  $r_{t,n}$  μπορούν να υπολογιστούν από τις εξισώσεις [1.3.8] [1.3.9] [1.3.11] ή από τα διαγράμματα των Εικόνων 16 και 17.

Αξίζει να σημειωθεί πως ο λόγος  $R_n$  υπολογίζεται για μια ημέρα που έχει συνολική ημερήσια ακτινοβολία ίση με τη συνολική μέση μηνιαία, δηλαδή μια ημέρα που θα έχει  $H = \bar{H}$  (ο  $R_n$  δεν είναι η μέση μηνιαία τιμή του  $R$  κατά την μεσημβρία)

Το μέσο μηνιαίο κρίσιμο επίπεδο ακτινοβολίας  $\bar{X}_c$ , ορίζεται ως ο λόγος του κρίσιμου επιπέδου ακτινοβολίας προς το επίπεδο της ακτινοβολίας κατά τη μεσημβρία για μια ημέρα του μήνα που έχει ακτινοβολία ίση με αυτή της μέσης μηνιαίας. Σε μορφή εξίσωσης <sup>[45]</sup>:

$$\bar{X}_c = \frac{I_{Tc}}{r_{t,n}R_n\bar{H}} \quad [3.2.13]$$

Η μέση μηνιαία χρησιμότητα  $\bar{\varphi}$  ως συνάρτηση του  $\bar{X}_c$  για διάφορες τιμές του λόγου  $\bar{R}/R_n$  ορίστηκε με την εξής διαδικασία: Για δεδομένη τιμή του  $\bar{K}_T$ , καθιερώθηκε ένα σύνολο ημερών που έχουν ορθή μακροχρόνια μέση κατανομή τιμών του  $K_T$ . Η ακτινοβολία για κάθε ημέρα σε αλληλουχία διαιρέθηκε σε ώρες χρησιμοποιώντας τις συσχετίσεις της ενότητας [1.3.3]. Αυτές οι ωριαίες τιμές της ακτινοβολίας δέσμης και διάχυσης χρησιμοποιήθηκαν για να βρεθεί η συνολική ωριαία ακτινοβολία σε μια κεκλιμένη επιφάνεια  $I_T$ . Έπειτα, αφαιρέθηκαν τα κρίσιμα επίπεδα ακτινοβολίας από αυτές τις τιμές της  $I_T$  και αθροίστηκαν σύμφωνα με την εξίσωση [3.2.11] για να βρεθούν οι τιμές της  $\bar{\varphi}$ .

Οι καμπύλες  $\bar{\varphi}$  που υπολογίστηκαν με αυτό τον τρόπο φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν για τιμές  $\bar{K}_T$  από 0,3 μέχρι 0,7 και αντιπροσωπεύονται από την εξίσωση <sup>[45]</sup>:

$$\bar{\varphi} = \exp\left\{\left[a + b\left(\frac{R_n}{R}\right)\right]\left[\bar{X}_c + c\bar{X}_c^2\right]\right\} \quad [3.2.14]$$

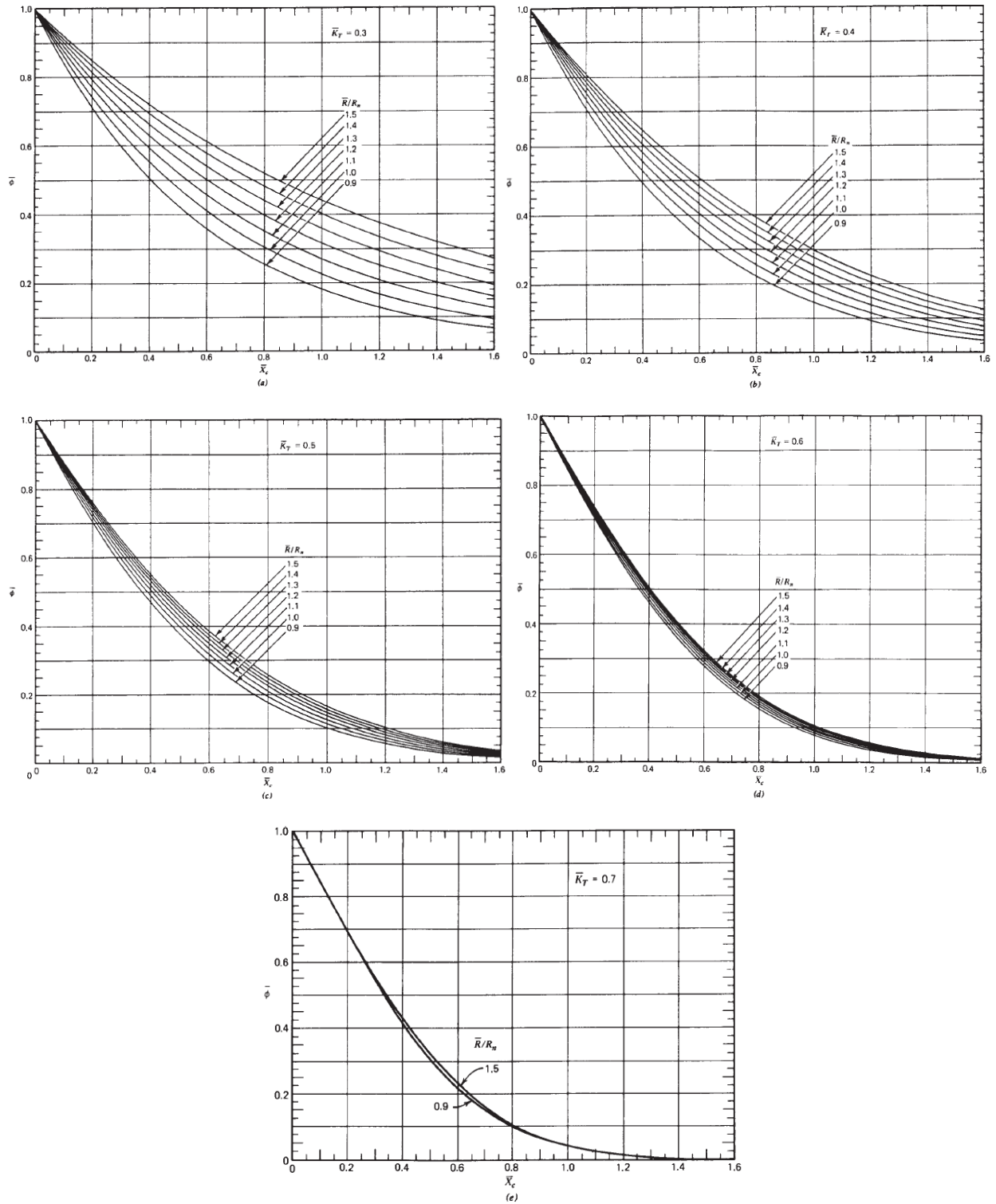
με

$$a = 2,943 - 9,271\bar{K}_T + 4,031\bar{K}_T^2 \quad [3.2.15]$$

$$b = -4,345 + 8,853\bar{K}_T - 3,602\bar{K}_T^2$$

$$c = -0,170 - 0,306\bar{K}_T + 2,936\bar{K}_T^2$$





Εικόνα 28 : Η μέση μηνιαία χρησιμότητα ως συνάρτηση του  $\bar{X}_c$ , και του  $\bar{R}/R_n$  για τιμές  $\bar{K}_T$  από 0,3 ως 0,7.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η χρήση των καμπυλών  $\varphi$  περιλαμβάνει υπολογισμούς για κάθε ώρα ή ζεύγος ωρών. Αυτό σημαίνει ότι για τα περισσότερα από τα κοινά προβλήματα χρειάζονται τέσσερις με οχτώ υπολογισμοί ανά μήνα. Έτσι, προκύπτει απλοποίηση των υπολογισμών για τα συστήματα αυτά, για τα οποία μπορεί να οριστεί ένα μόνο κρίσιμο επίπεδο ακτινοβολίας για όλες της ώρες ενός μήνα.

Το κρίσιμο επίπεδο  $I_{T_c}$  είναι παρόμοιο με αυτό της εξίσωσης [3.2.6] με τη διαφορά ότι η μέση μηνιαία εκπομπή-απορρόφηση ( $\overline{\tau\alpha}$ ) θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί αντί της  $(\tau\alpha)$  (το κλάσμα  $(\overline{\tau\alpha})/(\tau\alpha)_n$  είναι εύκολα υπολογίσιμο), και οι θερμοκρασίες  $T_i$  και  $T_a$  είναι αντιπροσωπευτικές της εισόδου και της ημερήσιας του περιβάλλοντος για τον κάθε μήνα [22][45][46]:

$$I_{T_c} = \frac{F_R U_L (T_i - \overline{T}_a)}{F_R (\tau\alpha)_n \frac{(\overline{\tau\alpha})}{(\tau\alpha)_n}} \quad [3.2.16]$$

Το μέσο μηνιαίο ημερήσιο όφελος χρήσιμης ενέργειας θα δίνεται τότε από την σχέση :

$$\sum Q_u = A_c F_R (\overline{\tau\alpha}) \overline{H}_T \overline{\varphi} \quad [3.2.17]$$

Η εξίσωση [3.2.13] μπορεί να γραφεί για την ώρα μεσημβρίας ως :

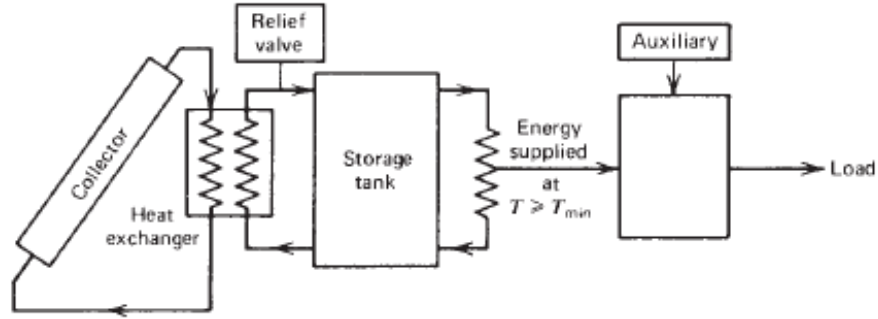
$$\overline{X}_c = \frac{I_{T_c}}{r_{t,n} R_n \overline{H}} = \frac{F_R U_L (T_i - \overline{T}_a)}{r_{t,n} R_n \overline{K}_T \overline{H}_o} \quad [3.2.18]$$

Με την εξίσωση [3.2.14] ή τα διαγράμματα της Εικόνας 28 μπορεί λοιπόν να υπολογιστεί το  $\overline{\varphi}$ .

### 3.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ $\overline{\varphi}$ -f chart

Η έννοια του σχεδιασμού χρησιμότητας είναι ωφέλιμη οποτεδήποτε ο συλλέκτης λειτουργεί σε γνωστό κρίσιμο επίπεδο ακτινοβολίας κατά την διάρκεια ενός μήνα. Σε μία πιο τυπική περίπτωση, ο συλλέκτης είναι συνδεδεμένος με μια δεξαμενή έτσι ώστε η μηνιαία αλληλουχία του καιρού και η χρονική κατανομή του φορτίου έχει ως αποτέλεσμα μια διακύμανση στη θερμοκρασία της δεξαμενής αποθήκευσης και συνεπώς ένα μεταβλητό επίπεδο κρίσιμης ακτινοβολίας. Η μέθοδος f-chart αναπτύχθηκε με σκοπό να ξεπεράσει τον περιορισμό του σταθερού κρίσιμου επιπέδου, όμως περιορίζεται σε συστήματα που μεταφέρουν ενέργεια σε ένα φορτίο κοντά στους 20°C. Η μέθοδος που παρουσιάζεται εδώ δεν έχει αυτό τον περιορισμό.

Η έννοια της  $\overline{\varphi}$  συνδυάζεται με την ιδέα της f-chart ώστε να παραχθεί μια μέθοδος σχεδιασμού για ηλιακά συστήματα κλειστού βρόχου όπως αυτό της Εικόνας 29. Σε αυτά τα συστήματα η ενέργεια που τροφοδοτείται προς το φορτίο θα πρέπει να ξεπερνά μια καθορισμένη ελάχιστη χρήσιμη θερμοκρασία, και θα πρέπει να χρησιμοποιείται με σταθερό συντελεστή απόδοσης (ή θερμικής αποδοτικότητας), έτσι ώστε το φορτίο στο ηλιακό σύστημα να μπορεί να υπολογιστεί. Αν για παράδειγμα, το φορτίο είναι μια θερμική μηχανή που αποδίδει καλύτερα όσο η θερμοκρασία αυξάνεται, τότε το θερμικό φορτίο στο ηλιακό σύστημα δεν μπορεί να υπολογιστεί μέσω γνώσης της ισχύος της θερμικής μηχανής.



Εικόνα 29 : Ηλιακό σύστημα ενέργειας κλειστού βρόχου.

Η δεξαμενή αποθήκευσης θεωρείται πως είναι συμπιεσμένη έτσι ώστε να μην υπάρχει ενεργειακή απόρριψη. Η θερμοκρασία επιστροφής από το φορτίο είναι πάντοτε μεγαλύτερη ή ίση της  $T_{min}$ . Ένα ξεχωριστό βοηθητικό σύστημα βρίσκεται παράλληλα με το ηλιακό και καλύπτει τυχόν ενεργειακά ελλείμματα που προκύπτουν από το ηλιακό σύστημα.

Η μέγιστη μέση μηνιαία ημερήσια ενέργεια που μπορεί να μεταφερθεί από ένα τέτοιο σύστημα δίνεται από την εξίσωση :

$$\sum Q_u = A_c F_R (\bar{\tau}\bar{\alpha}) \bar{H}_T \bar{\varphi}_{max} \quad [3.3.1]$$

η οποία διαφοροποιείται από την [3.2.17] λόγω του όρου  $\bar{\varphi}_{max}$ . Η μέγιστη ημερήσια χρησιμότητα υπολογίζεται από τον λόγο του ελάχιστου μέσου επιπέδου κρίσιμης ακτινοβολίας :

$$\bar{X}_{c,min} = \frac{F_R U_L (T_{min} - \bar{T}_a) / F_R (\bar{\tau}\bar{\alpha})}{r_{t,n} R_n \bar{K}_T \bar{H}_o} \quad [3.3.2]$$

Για συγκεκριμένο λόγο όγκου αποθήκευσης-εμβαδού συλλέκτη, έγινε συσχέτιση των αποτελεσμάτων πολλών λεπτομερών προσομοιώσεων του συστήματος της Εικόνας 29 με δύο αδιάστατες μεταβλητές. Αυτές οι μεταβλητές είναι παρόμοιες, αλλά όχι ίδιες με αυτές της μεθόδου f-chart. Η τεταγμένη της f-chart εδώ αντικαθίσταται από το γινόμενο  $\varphi_{max} Y$  [47]:

$$\bar{\varphi}_{max} Y = \bar{\varphi}_{max} \frac{A_c F_R (\tau\alpha) \bar{H}_T N}{L} \quad [3.3.3]$$

και η τετμημένη της f-chart αντικαθίσταται από μια τροποποιημένη μεταβλητή  $X'$  :

$$X' = \frac{A_c F_R U_L (100) \Delta t}{L} \quad [3.3.4]$$

Η αλλαγή στο  $X'$  είναι ότι το  $(100 - \bar{T}_a)$  έχει αντικατασταθεί από μία εμπειρική σταθερά (100).

Στην Εικόνα 30 φαίνονται τα διαγράμματα  $\bar{\varphi}$ - $f$  για τέσσερις διαφορετικούς λόγους όγκου αποθήκευσης-εμβαδού συλλέκτη. Η πληροφορία σε αυτά τα διαγράμματα μπορεί να αναπαρασταθεί αναλυτικά από την εξίσωση :

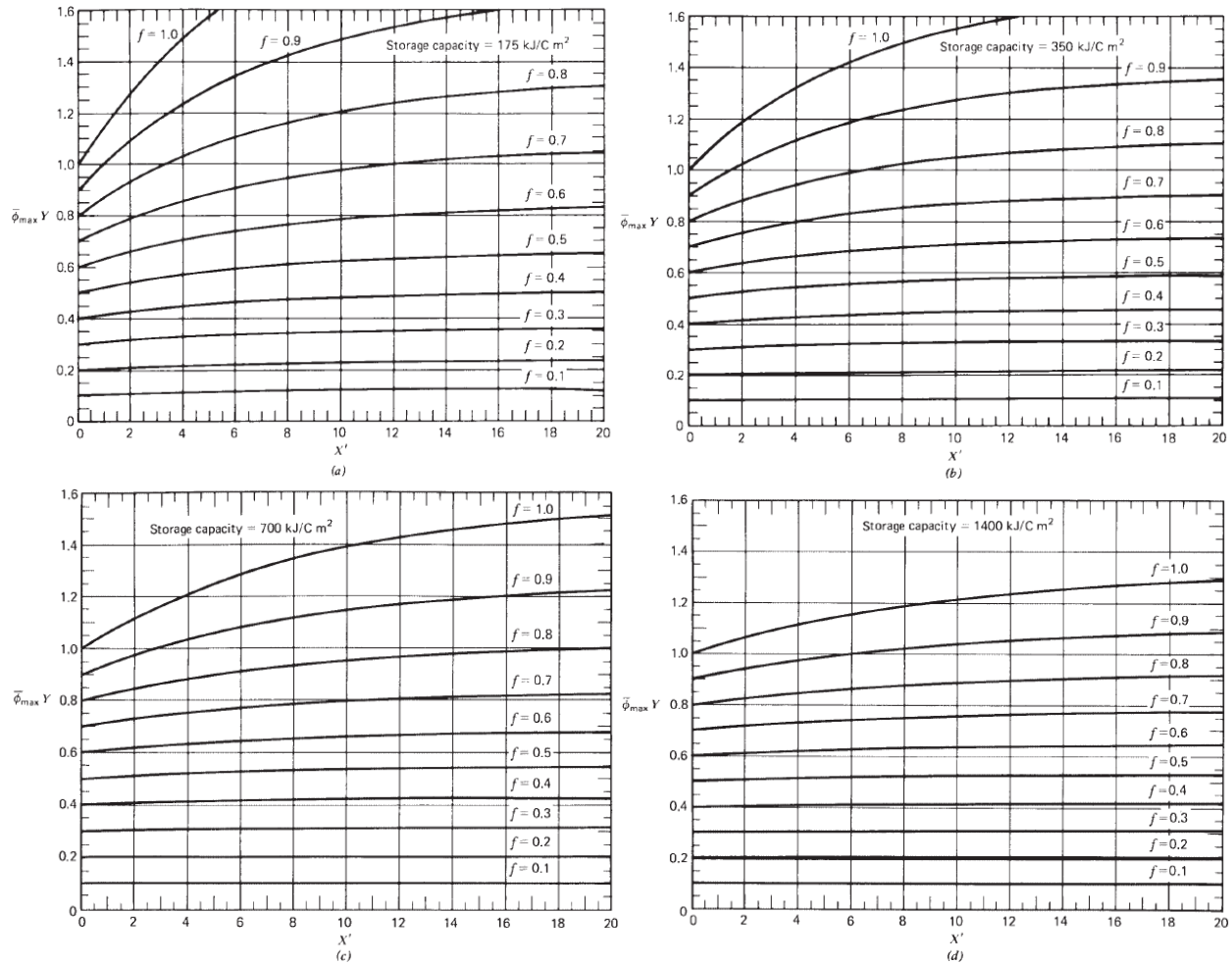
$$f = \bar{\varphi}_{max} Y - 0,015[\exp(3,85f) - 1][1 - \exp(-0,15X')]R_s^{0,76} \quad [3.3.5]$$

όπου  $R_s$  είναι ο λόγος της πρότυπης χωρητικότητας θερμικής αποθήκευσης ανά μονάδα εμβαδού συλλέκτη  $350 \text{ kJ/m}^2\text{C}$  προς την πραγματική χωρητικότητα αποθήκευσης. Δηλαδή

$$R_s = \frac{350}{M c_p / A_c} \quad [3.3.6]$$

και το  $M$  είναι η πραγματική μάζα του χώρου αποθήκευσης σε kg.

Ο υπολογισμός του  $f$  από την εξίσωση [3.3.5] απαιτεί χρήση της επαναληπτικής μεθόδου Newton<sup>[47]</sup>.



Εικόνα 30 : Τα διαγράμματα  $\bar{\varphi}$ - $f$  για διάφορους λόγους χωρητικότητας αποθήκευσης-εμβαδού συλλέκτη

Τα διαγράμματα  $\bar{\varphi}$ - $f$  χρησιμοποιούνται με τον ίδιο τρόπο όπως τα διαγράμματα  $f$ . Οι τιμές των  $\bar{\varphi}_{\max}$   $Y$  και  $X'$  υπολογίζονται από μακροχρόνια δεδομένα ακτινοβολίας και πρότυπα φορτίου για την εν λόγω τοποθεσία. Η τιμή του  $f$  τότε καθορίζεται από την εξίσωση [3.3.5].

Το γινόμενο  $fL$  είναι η μέση μηνιαία συνεισφορά στην κάλυψη του φορτίου. Οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται για κάθε μήνα, μέσω αυτού μπορεί επίσης να υπολογιστεί το ετήσιο κλάσμα  $\bar{F}$  το οποίο είναι το άθροισμα των τιμών του  $fL$  για όλους τους μήνες (ετήσια απορρόφηση ενέργειας από τον ήλιο) προς το άθροισμα των φορτίων (ετήσιο φορτίο).

Ο υπολογισμός των μηνιαίων φορτίων  $L$  γίνεται ως εξής : Η συνολική μηνιαία ζήτηση σε θερμότητα  $L_{tot}$  είναι το άθροισμα της μηνιαίας απαίτησης θερμότητας χρήστη και των απωλειών της δεξαμενής αποθήκευσης <sup>[48]</sup>.

$$L_{tot} = L + Q_s \quad [3.3.7]$$

και οι απώλειες της δεξαμενής αποθήκευσης για τον μήνα αυτόν θα είναι :

$$Q_{st} = (UA)_s (\bar{T}_s - \bar{T}_a) \Delta t \quad [3.3.8]$$

Ο όρος  $(UA)_s$  ορίζεται ως ο συνολικός συντελεστής απώλειας- προϊόν εμβαδού της δεξαμενής αποθήκευσης (W/K),

$\bar{T}_s$  είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία της δεξαμενής τα οποία είναι σταθερά για κάθε μήνα και  $T_a$  τη θερμοκρασία περιβάλλοντος της δεξαμενής.

Η απαιτούμενη θερμότητα δίνεται από τη σχέση <sup>[51]</sup>:

$$L = L_{req} \Delta t_h \quad [3.3.9]$$

Με  $\Delta t_h = N \times hours \times 3600$

$$\text{όπου } hours = \frac{\text{ώρες ανα ημέρα} \times \text{εργάσιμες ημέρες του έτους}}{\text{ημέρες του έτους}} = \frac{8 \times 250}{365}$$

Το συνολικό φορτίο του ηλιακού συστήματος είναι το χρήσιμο φορτίο επαυξημένο με την ενέργεια που απαιτείται για να την κάλυψη των απωλειών θερμότητας. Αν οι απώλειες της δεξαμενής είναι τέτοιες ώστε η θερμοκρασία της δεξαμενής σπανίως να πέφτει κάτω από την ελάχιστη, το ηλιακό σύστημα δεν μπορεί να διακρίνει την ενέργεια που αποσύρθηκε προς τροφοδότηση του φορτίου και το ποσό των απωλειών της δεξαμενής. Σε μορφή εξίσωσης, το κλάσμα του συνολικού φορτίου που τροφοδοτείται ηλιακά (συμπεριλαμβανομένων των απωλειών της δεξαμενής) είναι :

$$f_{total} = \frac{L_s + Q_{st}}{L_0 + Q_{st}} \quad [3.3.10]$$

Η συνήθης ερμηνεία για το κλάσμα του φορτίου που τροφοδοτείται μέσω της ηλιακής ενέργειας είναι ο λόγος  $L_s/L_0$ , δηλαδή η ηλιακή ενέργεια που παρέχεται στο φορτίο  $L_s$  προς το χρήσιμο φορτίο  $L_0$ .

Οι απώλειες θερμότητας δεν μπορούν να υπολογιστούν επακριβώς, όμως μπορούν να προσδιοριστούν δύο οριακές τιμές οι οποίες θα πρέπει να εμπεριέχουν τις πραγματικές απώλειες. Για χαμηλή εκτίμηση των απωλειών της δεξαμενής θα πρέπει να υποτεθεί ότι η δεξαμενή παραμένει σε θερμοκρασία  $T_{\min}$  όλο το μήνα. Το άνω όριο για τις απώλειες αυτές προκύπτει από την υπόθεση ότι η μέση θερμοκρασία της δεξαμενής είναι η ίδια με την μέση μηνιαία θερμοκρασία εισόδου του συλλέκτη  $\bar{T}_i$ . Η πραγματική μέση θερμοκρασία της δεξαμενής θα είναι χαμηλότερη από αυτή την τιμή καθώς ο συλλέκτης δεν λειτουργεί για 24 ώρες ανά ημέρα. Μια εκτίμηση της  $\bar{T}_i$  μπορεί να γίνει μέσω των διαγραμμάτων της  $\bar{\varphi}$ .

Τέλος το ετήσιο θερμικό φορτίο που τροφοδοτείται από το ηλιακό σύστημα  $F$  είναι το άθροισμα των μηνιαίων συνεισφορών ηλιακής ενέργειας προς το συνολικό ετήσιο φορτίο. Το κλάσμα αυτό παρουσιάζει την ενεργειακή απόδοση του θερμικού συστήματος ως προς το φορτίο που απαιτεί η διεργασία για χρονική περίοδο ενός έτους. Σε μορφή εξίσωσης <sup>[50]</sup>:

$$F = \frac{\sum f \times L}{\sum L}$$

[3.3.11]

### 3.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

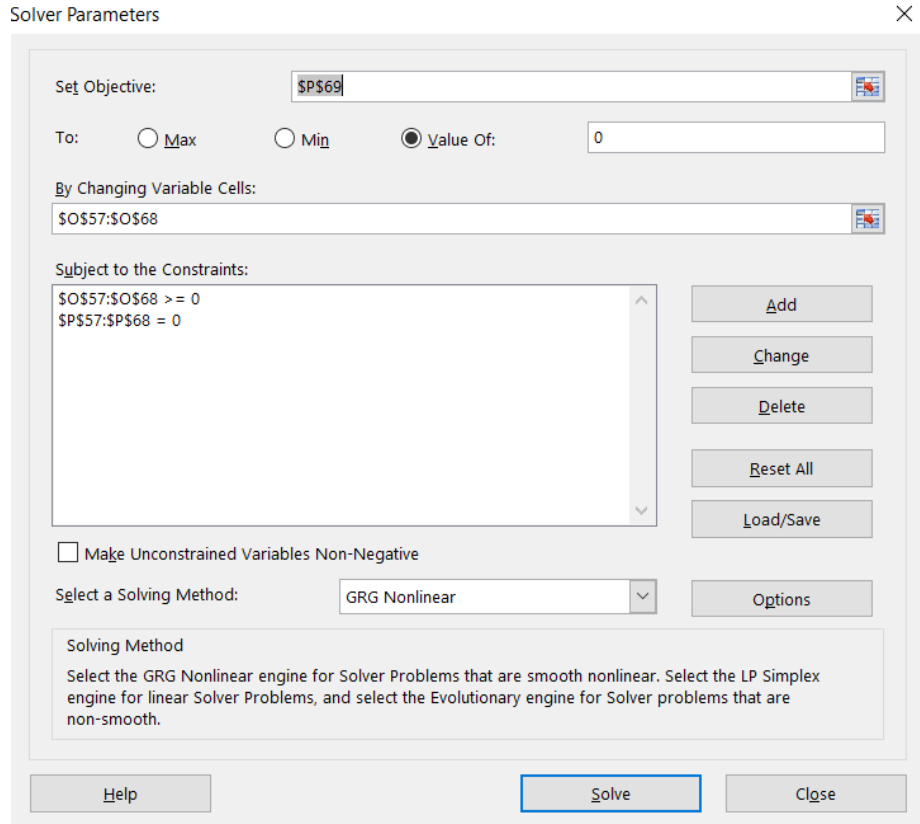
Στην παρούσα εργασία όλες οι εξισώσεις θα καταγραφούν κατάλληλα στο πρόγραμμα υπολογιστικών φύλλων Excel. Για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης θα χρησιμοποιηθεί ο επιλυτής (Solver) αποτελεί ένα πρόσθετο εργαλείο (add-in) του excel.

Με τον επιλυτή μπορεί να βρεθεί η λύση (μέγιστη ή ελάχιστη) σε ένα κελί που έχει τοποθετηθεί η συνάρτηση και για την οποία έχουν τεθεί κάποιοι περιορισμοί. Συνεργάζεται με ομάδες άλλων κελιών που είναι οι μεταβλητές απόφασης, οι οποίες συμμετέχουν στον υπολογισμό.

Το είδος της λύσης που προκύπτει και ο χρόνος που απαιτείται για την εύρεσή της, εξαρτάται κυρίως από τρία χαρακτηριστικά του προβλήματος:

- 1) Το μέγεθος του προβλήματος (ο συνολικός αριθμός των τύπων, ο αριθμός των μεταβλητών απόφασης και των περιορισμών).
- 2) Οι μαθηματικές σχέσεις (γραμμικές και μη γραμμικές) μεταξύ του στόχου, των περιορισμών και των μεταβλητών απόφασης.
- 3) Η χρήση ακέραιων περιορισμένων μεταβλητών.

Μια τυπική απεικόνιση του επιλυτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 31: Απεικόνιση του επιλυτή (Solver)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 31 υπάρχουν τρία τμήματα ρύθμισης των παραμέτρων. Στο πρώτο τμήμα ρυθμίζεται το κελί ή τα κελιά που θέτει ο χρήστης ως στόχο. Ταυτόχρονα ο χρήστης καθορίζει το είδος της βελτιστοποίησης (μεγιστοποίηση, ελαχιστοποίηση ή μηδενισμός) καθώς και τα κελιά αλλαγής των μεταβλητών. Στο δεύτερο τμήμα θέτουμε τους περιορισμούς όπως η μεταβλητή  $A \geq 0$ ,  $B < A$  ή και κάποια δυαδική και ακέραια μεταβλητή. Στο τρίτο τμήμα επιλέγεται η μέθοδος επίλυσης. Υπάρχει η nonlinear GRG μέθοδος που είναι για ομαλά μη γραμμικά προβλήματα επίλυσης, η μέθοδος LP Simplex για γραμμικά προβλήματα και η μέθοδος Evolutionary για την επίλυση μη ομαλών προβλημάτων. Για την επίλυση των προβλημάτων της εργασίας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος GRG nonlinear.

Για τη διερεύνηση των βέλτιστων γωνιών  $\beta$  ακολουθήθηκε η παραπάνω προσέγγιση και υπολογίστηκαν οι τιμές της επιθυμητής συνάρτησης [3.3.5] με βήμα αύξησης της γωνίας  $5^\circ$  οπότε και προσδιορίστηκαν οι βέλτιστες γωνίες μέσω της γραφικής απεικόνισης.

## 4. ΑΝΑΛΥΣΗ- ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 1) Υπολογισμός της μέσης μηνιαίας ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια

Η πρώτη παράμετρος που θα υπολογιστεί είναι η μέση μηνιαία ημερήσια ακτινοβολία για κεκλιμένη επιφάνεια, που όπως είναι προφανές εξαρτάται από τη μεταβλητή σχεδιασμού  $\beta$  και δίνεται από την εξίσωση [1.4.20] :

$$\bar{H}_T = \bar{H}_b \bar{R}_b + \bar{H}_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \bar{H}_\rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

Για τους υπολογισμούς που θα γίνουν θα θεωρήσουμε την γωνία αζιμουθίου επιφάνειας  $\gamma=0$ , δηλαδή ότι οι επιφάνειες είναι προσανατολισμένες προς το νότο (είναι η πιο συνηθισμένη διάταξη συλλεκτών και απαλορίζοντας τον όρο αυτό απλοποιούνται σημαντικά οι υπολογισμοί), και τον συντελεστή ανάκλασης εδάφους  $\rho_g=0,17$ .

Η τιμή της ηλιακής σταθεράς όπως δίνεται από τα βιβλιογραφικά δεδομένα θα είναι  $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$  και το γεωγραφικό πλάτος για την τοποθεσία της Αθήνας είναι περίπου  $\varphi \cong 38^\circ = 0,663 \text{ rad}$

Αρχικά θα να υπολογιστεί η γωνιακή απόκλιση  $\delta$  για την μέση ημέρα του κάθε μήνα. Η γωνιακή απόκλιση έχει συγκεκριμένη τιμή για κάθε μέρα ενός έτους και συμπεριλαμβάνεται σε αρκετές από τις εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν για τις εκτιμήσεις που πρόκειται να γίνουν. Από τον Πίνακα 1 της ενότητας 1.2.1 λαμβάνονται οι τιμές του  $n$ , δηλαδή ο αριθμός που αντιστοιχεί στη μέση ημέρα για κάθε μήνα και χρησιμοποιώντας την εξίσωση [1.2.1] υπολογίζεται η τιμή του  $\delta$  για κάθε μήνα σε μοίρες και σε rad :

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right)$$

Month	Mean day (n)	Avg $\delta$ (deg)	Avg $\delta$ (rad)	$\sin\delta$	$\cos\delta$
January	17	-20.9170	-0.3651	-0.3570	0.9341
February	47	-12.9546	-0.2261	-0.2242	0.9745
March	75	-2.4177	-0.0422	-0.0422	0.9991
April	105	9.4149	0.1643	0.1636	0.9865
May	135	18.7919	0.3280	0.3221	0.9467
June	162	23.0859	0.4029	0.3921	0.9199
July	198	21.1837	0.3697	0.3614	0.9324
August	228	13.4550	0.2348	0.2327	0.9726
September	258	2.2169	0.0387	0.0387	0.9993
October	288	-9.5994	-0.1675	-0.1668	0.9860
November	318	-18.9120	-0.3301	-0.3241	0.9460
December	344	-23.0496	-0.4023	-0.3915	0.9202

Πίνακας 1.1 : Η μηνιαία μεταβολή της γωνιακής απόκλισης



Οι τιμές της γωνιακής απόκλισης, ταυτίζονται, όπως είναι αναμενόμενο με αυτές του Πίνακα 1 της ενότητας 1.2.1 και ισχύει ο περιορισμός  $-23,45^\circ < \delta < 23,45^\circ$ , υπολογίστηκαν επίσης οι τιμές των  $\sin$  και  $\cos$  που είναι απαραίτητες για του υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν.

Αφού οι τιμές των  $\varphi$  και  $\delta$  είναι πλέον γνωστές, η ωριαία γωνία δύσης του ηλίου  $\omega_s$  υπολογίζεται εύκολα από την εξίσωση [1.2.7] που ισχύει για  $\theta_z=90^\circ$  (δηλαδή για την ώρα που ο ήλιος δύει) :

$$\cos \omega_s = - \frac{\sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta} = - \tan \varphi \tan \delta$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(- \tan \varphi \tan \delta)$$

Υπολογίζονται και εδώ οι τιμές  $\sin$  και  $\cos$  που είναι απαραίτητες

Month	$\omega_s$ (deg)	$\omega_s$ (rad)	$\cos(\omega_s)$	$\sin(\omega_s)$
January	72.6259	1.2676	0.2986	0.9544
February	79.6464	1.3901	0.1797	0.9837
March	88.1096	1.5378	0.0330	0.9995
April	97.4436	1.7007	-0.1295	0.9916
May	105.4174	1.8399	-0.2658	0.9640
June	109.4522	1.9103	-0.3330	0.9429
July	107.6250	1.8784	-0.3028	0.9531
August	100.7731	1.7588	-0.1869	0.9824
September	91.7332	1.6010	-0.0302	0.9995
October	82.4070	1.4383	0.1321	0.9912
November	74.4740	1.2998	0.2677	0.9635
December	70.5834	1.2319	0.3324	0.9431

Πίνακας 1.2 : Η μηνιαία μεταβολή της ωριαίας γωνίας δύσης του ηλίου

Μπορεί τώρα να υπολογιστεί το ποσό της ημερήσιας ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα για μία οριζόντια επιφάνεια  $H_o$  από την εξίσωση [1.2.13] (που ισχύει για  $-60^\circ < \varphi < 60^\circ$ ) για τη μέση ημέρα του κάθε μήνα:

$$H_o = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365}\right) \times \left(\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \varphi \sin \delta\right)$$

Month	Ho (J/m <sup>2</sup> )	Ho (daily kJ/m <sup>2</sup> )	Ho (daily kWh/m <sup>2</sup> )
January	16439630.51	16439.6305	4.567
February	21670920.74	21670.9207	6.020
March	28337271.86	28337.2719	7.871
April	35145323.51	35145.3235	9.763
May	39835390.26	39835.3903	11.065
June	41702160.61	41702.1606	11.584
July	40699693.8	40699.6938	11.305
August	36893419.82	36893.4198	10.248
September	30749002.83	30749.0028	8.541
October	23590612.71	23590.6127	6.553
November	17645270.03	17645.2700	4.901
December	14994968.53	14994.9685	4.165

Πίνακας 1.3 : Η ημερήσια ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας σε J/m<sup>2</sup>, kJ/m<sup>2</sup> και kWh/m<sup>2</sup>

Ο παραπάνω τύπος δίνει αποτέλεσμα σε J/m<sup>2</sup> όμως είναι χρήσιμη η μετατροπή σε kWh/m<sup>2</sup>. Έτσι αρχικά η μετατροπή σε kJ γίνεται πολλαπλασιάζοντας τις τιμές με 10<sup>-3</sup> και για την μετατροπή από kJ σε kWh διαιρώντας με 3600 αφού 1kWh=3600kJ.

Οι τιμές της μέσης μηνιαίας ημερήσιας ακτινοβολίας  $\bar{H}$  λαμβάνονται από διαθέσιμες μετρήσεις της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια. Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας για τα δεδομένα αυτά την εξίσωση [1.3.1] βρίσκουμε τις τιμές του μέσου μηνιαίου δείκτη καθαρότητας  $\bar{K}_T$  :

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{H_o}$$

Έπειτα, μέσω των τιμών του μέσου μηνιαίου δείκτη καθαρότητας, θα γίνει ο υπολογισμός του μηνιαίου κλάσματος διάχυσης  $\bar{H}_d/\bar{H}$  που εξαρτάται μόνο από μία μεταβλητή, την  $\bar{K}_T$ . Όπως έχει αναφερθεί και φαίνεται από την Εικόνα 15 για το κλάσμα αυτό έχουν γίνει δύο συσχετίσεις. Μία για την χειμερινή εποχή, δηλαδή για  $\omega_s \leq 81,4^\circ$ , και μία για τις υπόλοιπες εποχές για  $\omega_s > 81,4^\circ$ . Από τους υπολογισμούς που έγιναν για την ωριαία γωνία δύσης του ηλίου  $\omega_s$  βλέπουμε ότι η πρώτη περίπτωση ισχύει για τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Ιανουάριο και Φεβρουάριο. Επίσης, σύμφωνα με τον ορισμό των συσχετίσεων ισχύει και ο περιορισμός  $0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8$  για τον δείκτη καθαρότητας ο οποίος επαληθεύεται για τις τιμές που υπολογίστηκαν. Οπότε σύμφωνα με τις εξισώσεις [1.3.6] :

Για  $\omega_s \leq 81,4^\circ$  και  $0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8$

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,391 - 3,560\bar{K}_T + 4,189\bar{K}_T^2 - 2,137\bar{K}_T^3$$

Για  $\omega_s > 81,4^\circ$  και  $0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8$

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,311 - 3,022\bar{K}_T + 3,427\bar{K}_T^2 - 1,821\bar{K}_T^3$$

Month	$\underline{H}$ (daily kWh/m <sup>2</sup> )	$\underline{Kt}$	$\underline{Hd}/\underline{H}$
January	2.03	0.445	0.44852
February	2.55	0.424	0.47220
March	3.8	0.483	0.44591
April	4.98	0.510	0.41948
May	6.3	0.569	0.36524
June	6.9	0.596	0.34200
July	7.17	0.634	0.30831
August	6.54	0.638	0.30486
September	4.92	0.576	0.35931
October	3.52	0.537	0.39429
November	2.28	0.465	0.42633
December	1.8	0.432	0.46239

Πίνακας 1.4 : Τα μηνιαία ποσά της μέσης μηνιαίας ημερήσιας ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια σε kWh/m<sup>2</sup>, του δείκτη καθαρότητας και του μέσου μηνιαίου κλάσματος διάχυσης

Εάν τώρα το κλάσμα διάχυσης  $\bar{H}_d/\bar{H}$  πολλαπλασιαστεί με τη γνωστή από τα διαθέσιμα δεδομένα μέση μηνιαία ακτινοβολία  $\bar{H}$  προκύπτουν οι τιμές της συνιστώσας της διάχυσης  $\bar{H}_d$ . Έπειτα, γνωρίζοντας τις τιμές της συνιστώσας της διάχυσης υπολογίζεται και η συνιστώσα της ακτινοβολίας δέσμης αφού ισχύει ότι :

$$\bar{H} = \bar{H}_b + \bar{H}_d$$

Month	$\underline{H}_b$	$\underline{H}_d$
January	1.1195	0.9105
February	1.3459	1.2041
March	2.1055	1.6945
April	2.8910	2.0890
May	3.9990	2.3010
June	4.5402	2.3598
July	4.9594	2.2106
August	4.5462	1.9938
September	3.1522	1.7678
October	2.1321	1.3879
November	1.3080	0.9720
December	0.9677	0.8323

Πίνακας 1.5 : Οι συνιστώσες δέσμης και διάχυσης της μέσης μηνιαίας ημερήσιας ακτινοβολίας σε kWh/m<sup>2</sup>

Παρατηρούμε πως οι τιμές για συνιστώσα της ακτινοβολίας δέσμης είναι πάντοτε μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της συνιστώσας διάχυσης, και αυτό ενισχύεται ποσοστιαία κοντά στην καλοκαιρινή εποχή.

Ο λόγος της μέσης ημερήσιας ακτινοβολίας δέσμης σε κεκλιμένη επιφάνεια προς αυτή σε οριζόντια επιφάνεια για κάθε μήνα,  $\bar{R}_b$ , είναι απαραίτητο να υπολογιστεί για να εξαχθούν οι τιμές της μέσης μηνιαίας ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια  $\bar{H}_T$ . Δίνεται από την εξίσωση [1.4.22] :

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + \frac{\pi}{180} \omega'_s \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega'_s + \frac{\pi}{180} \sin \varphi \sin \delta}$$

στην οποία το  $\omega'_s$ , είναι η ωριαία γωνία δύσης του ηλίου για την κεκλιμένη επιφάνεια την μέση ημέρα του μήνα και μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση [1.4.23]:

$$\omega'_s = \min \left[ \begin{array}{l} \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \\ \cos^{-1}(-\tan(\varphi - \beta) \tan \delta) \end{array} \right]$$

Όπως φαίνεται από τις εξισώσεις ο λόγος  $\bar{R}_b$ , λόγω της εξάρτησης του από την γωνία της κλίσης της επιφάνειας, θα μεταβάλλεται αναλόγως με την αλλαγή αυτής της γωνίας οπότε θα είναι χρήσιμο να αναλυθούν οι εποχικές διαφορές συναρτήσει αυτής.

Έτσι, στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι χαρακτηριστικές τιμές του  $\bar{R}_b$  για γωνίες κλίσης της επιφάνειας 0, 15, 30, 45, 60, 75 και 90 μοιρών κατά σειρά. Είναι προφανές ότι όταν  $\beta=0$  ο λόγος θα είναι 1.

$\bar{R}_b$

Month // $\beta$	0	15	30	45	60	90
January	1	1.519	1.934	2.218	2.350	2.136
February	1	1.350	1.608	1.756	1.784	1.483
March	1	1.197	1.312	1.337	1.272	0.892
April	1	1.073	1.075	1.006	0.871	0.444
May	1	0.995	0.931	0.811	0.643	0.222
June	1	0.962	0.872	0.733	0.555	0.146
July	1	0.976	0.898	0.767	0.592	0.178
August	1	1.038	1.010	0.917	0.765	0.337
September	1	1.144	1.209	1.193	1.095	0.688
October	1	1.295	1.501	1.605	1.600	1.270
November	1	1.470	1.839	2.083	2.186	1.946
December	1	1.578	2.048	2.378	2.547	2.363

Πίνακας 1.6 : Οι τιμές του μέσου λόγου ακτινοβολίας δέσμης σε κεκλιμένη προς οριζόντια επιφάνειας συναρτήσει της κλίσης  $\beta$  για γωνίες 0, 15, 30, 45, 60 και 90 μοίρες

Με τα δεδομένα και τις τιμές που έχουν ήδη υπολογιστεί είναι εφικτή η εκτίμηση του αρχικού στόχου, της μέσης μηνιαίας ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια  $\bar{H}_T$ . Όμως, επειδή είναι άμεσα εξαρτημένη από την κλίση  $\beta$ , είναι χρήσιμο να προσδιοριστεί η γωνία στην οποία αποδίδει καλύτερα το σύστημα

για κάθε μήνα. Η μεγιστοποίηση της  $\bar{H}_T$  για μεταβαλλόμενες τιμές  $\beta$  θα πραγματοποιηθεί με το εργαλείο SolverTable, ένα πρόσθετο (add-in) του Excel. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να λύσουμε βέλτιστα την εξίσωση της  $\bar{H}_T$  που θα αναλυθεί για διάφορες τιμές της κλίσης  $\beta$  και θα ελεγχθεί ποιες από αυτές τις βέλτιστες λύσεις είναι οι μεγαλύτερες για κάθε μήνα. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η μεταβολή των βέλτιστων τιμών της  $\bar{H}_T$  όταν η κλίση της επιφάνειας αλλάζει ανά 5 μοίρες. Με πράσινο χρώμα επισημαίνονται οι γωνίες που δίνουν τη μέγιστη μέση μηνιαία ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια για κάθε μήνα και αντιστοιχεί σε μία από τις γωνίες που εξετάζονται.

### $\bar{H}_T$

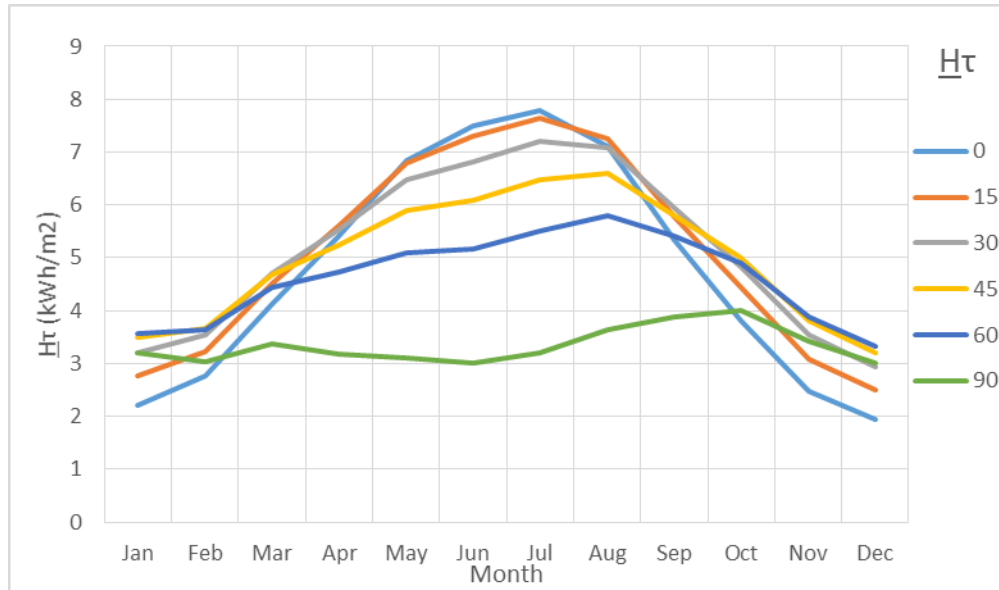
$\beta$ // Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0	2.203	2.767	4.123	5.403	6.836	7.487	7.779	7.096	5.338	3.819	2.474	1.953
5	2.406	2.934	4.277	5.493	6.851	7.453	7.768	7.184	5.513	4.046	2.690	2.148
10	2.596	3.087	4.409	5.556	6.838	7.389	7.724	7.236	5.659	4.251	2.892	2.331
15	2.774	3.224	4.519	5.593	6.793	7.294	7.645	7.252	5.775	4.434	3.078	2.503
20	2.936	3.345	4.606	5.602	6.718	7.169	7.533	7.232	5.860	4.593	3.248	2.661
25	3.082	3.448	4.670	5.583	6.612	7.013	7.386	7.174	5.914	4.727	3.400	2.804
30	3.210	3.533	4.709	5.537	6.476	6.826	7.205	7.081	5.936	4.835	3.532	2.932
35	3.321	3.598	4.724	5.464	6.311	6.611	6.993	6.951	5.926	4.916	3.645	3.042
40	3.412	3.645	4.714	5.365	6.118	6.369	6.750	6.786	5.884	4.969	3.736	3.135
45	3.483	3.671	4.680	5.240	5.898	6.101	6.477	6.588	5.810	4.994	3.805	3.210
50	3.534	3.677	4.622	5.089	5.654	5.810	6.178	6.358	5.705	4.991	3.852	3.265
55	3.563	3.663	4.539	4.916	5.386	5.498	5.855	6.097	5.570	4.960	3.877	3.301
60	3.572	3.630	4.434	4.719	5.098	5.168	5.511	5.809	5.406	4.901	3.878	3.318
65	3.560	3.576	4.306	4.503	4.793	4.823	5.148	5.494	5.213	4.815	3.857	3.315
70	3.527	3.503	4.157	4.267	4.472	4.466	4.770	5.157	4.995	4.702	3.813	3.292
75	3.473	3.412	3.987	4.014	4.139	4.102	4.382	4.799	4.751	4.562	3.747	3.250
80	3.399	3.302	3.798	3.746	3.797	3.735	3.988	4.425	4.484	4.398	3.659	3.188
85	3.305	3.175	3.592	3.466	3.452	3.371	3.594	4.038	4.197	4.211	3.549	3.108
90	3.192	3.031	3.370	3.176	3.108	3.018	3.207	3.643	3.890	4.001	3.419	3.009

Πίνακας 1.7 : Οι βέλτιστες λύσεις της μέσης μηνιαίας ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια για διάφορες γωνίες κλίσης  $\beta$  σε  $kWh/m^2$

Όπως είναι αναμενόμενο, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες το σύστημα λειτουργεί καλύτερα σε μικρές γωνίες κλίσης, ενώ τη χειμερινή εποχή σε μεγαλύτερες μέχρι και  $60^\circ$ . Είναι αξιοσημείωτο ότι κατά τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο η βέλτιστη απορρόφηση ακτινοβολίας δίνεται για μηδενική κλίση, δηλαδή για οριζόντια τοποθέτηση της επιφάνειας, καθώς και ότι δεν δίνεται βέλτιστη γωνία άνω των  $60^\circ$  για κανένα μήνα του έτους.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η εποχική εξάρτηση των καμπυλών της μέσης μηνιαίας ακτινοβολίας σε  $kWh/m^2$  για γωνίες κλίσης της επιφάνειας στις 0, 15, 30, 45, 60 και 90 μοίρες. Το διάγραμμα αυτό επιβεβαιώνει την παραπάνω παρατήρηση ότι οι μικρές γωνίες κλίσης δίνουν

καλύτερα αποτελέσματα τους καλοκαιρινούς μήνες και χαμηλότερα τους χειμερινούς, ενώ οι μεγαλύτερες γωνίες λειτουργούν αντίστροφα.



Διάγραμμα 1.1 : Η εποχική εξάρτηση της μέσης μηνιαίας ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια σε kWh/m<sup>2</sup> συναρτήσει της κλίσης β

## 2) Υπολογισμός της συνολικής ωριαίας ακτινοβολίας I και των συνιστώσεων της δέσμης I<sub>b</sub> και διάχυσης I<sub>d</sub>

Το πρώτο βήμα θα είναι η εκτίμηση της ωριαίας ακτινοβολίας από τα μέσα ημερήσια δεδομένα που υπολογίστηκαν ήδη για κάθε μήνα. Οι δύο αυτές μεταβλητές συνδέονται μέσω του λόγου  $r_t$  και την εξίσωση [1.3.7] :

$$r_t = I/H$$

Για τους απαραίτητους τους υπολογισμούς θα αξιοποιηθούν τα δεδομένα για τη μέση μηνιαία ημερήσια ακτινοβολία, δηλαδή οι τιμές  $\bar{H}$  αντί των H. Θα αναλυθεί δηλαδή η ωριαία ακτινοβολία για την μέση ημέρα κάθε μήνα που αντιπροσωπεύει και όλες τις υπόλοιπες.

Πρώτα όμως θα πρέπει να υπολογιστούν οι τιμές του λόγου της συνολικής ωριαίας προς την συνολική ημερήσια ακτινοβολία. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω των καμπυλών της Εικόνας 16 ή από την εξίσωση που τις αντιπροσωπεύει [1.3.8] :

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s}$$

$$\text{με } a = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60^\circ) \text{ και } b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 60^\circ)$$

Όπως φαίνεται ο λόγος  $r_t$  είναι συνάρτηση των ωριαίων γωνιών  $\omega$  και  $\omega_s$ . Οπότε θα είναι χρήσιμο να παρουσιαστεί συναρτήσει της ωριαίας γωνίας, δηλαδή τη γωνία (ή τις ώρες) που απέχει το χρονικό διάστημα που εξετάζεται από τη στιγμή της ηλιακής μεσημβρίας. Προς απλοποίηση των υπολογισμών τα αποτελέσματα θεωρούνται συμμετρικά ως προς την ώρα της ηλιακής μεσημβρίας, δηλαδή ανά ζεύγη ωρών που ισαπέχουν από τη χρονική αυτή στιγμή. Υπενθυμίζεται ότι η ηλιακή μεσημβρία συμβαίνει για  $\omega=0$ , άρα στις 12 το μεσημέρι. Οι τιμές θα ελέγχονται για διαστήματα μίας ώρας, για τη μέση χρονική στιγμή του κάθε ζεύγους ώρας ξεκινώντας από αυτή της μεσημβρίας (δηλαδή τι συμβαίνει  $\pm 0,5$  ώρες από την ηλιακή μεσημβρία) και συνεχίζονται μέχρι  $\pm 6,5$  ώρες από αυτή, δηλαδή μέχρι την ώρα που ανατέλλει και δύει, αντίστοιχα, ο ήλιος. Επίσης η ωριαία γωνία δύσης του ηλίου  $\omega_s$  θεωρείται σταθερή για κάθε μήνα (αφού εξετάζεται η μέση ημέρα του μήνα). Έτσι, αφού βρεθούν οι μεταβλητές  $a$  και  $b$  παίρνουμε τις εξής τιμές για τον λόγο  $r_t$  :

Month	$\omega_s$ (rad)	a	b
January	1.268	0.519	0.557
February	1.390	0.578	0.501
March	1.538	0.645	0.436
April	1.701	0.714	0.371
May	1.840	0.766	0.321
June	1.910	0.790	0.299
July	1.878	0.780	0.309
August	1.759	0.737	0.350
September	1.601	0.673	0.410
October	1.438	0.600	0.479
November	1.300	0.534	0.542
December	1.232	0.501	0.573

Πίνακας 2.1 : Οι παράγοντες  $a$  και  $b$  της εξίσωσης του λόγου  $r_t$  συναρτήσει της ωριαία γωνίας δύσης του ηλίου για τη μέση ημέρα κάθε μήνα

### $r_t$

Hours from solar noon		±6.5	±5.5	±4.5	±3.5	±2.5	±1.5	±0.5
	$\omega$ (deg)	97.5	82.5	67.5	52.5	37.5	22.5	7.5
Month	$\omega_s$ (rad)// $\omega$ (rad)	1.702	1.440	1.178	0.916	0.654	0.393	0.131
January	1.268	-0.0435	-0.0226	0.0140	0.0605	0.1080	0.1468	0.1686
February	1.390	-0.0283	-0.0056	0.0278	0.0675	0.1067	0.1381	0.1555
March	1.538	-0.0133	0.0095	0.0392	0.0724	0.1040	0.1289	0.1425
April	1.701	-0.0001	0.0214	0.0474	0.0750	0.1005	0.1202	0.1310
May	1.840	0.0088	0.0289	0.0519	0.0758	0.0974	0.1139	0.1229
June	1.910	0.0126	0.0319	0.0537	0.0759	0.0959	0.1111	0.1193
July	1.878	0.0110	0.0306	0.0529	0.0759	0.0966	0.1123	0.1209
August	1.759	0.0039	0.0248	0.0495	0.0754	0.0992	0.1175	0.1274
September	1.601	-0.0078	0.0146	0.0428	0.0736	0.1027	0.1253	0.1378
October	1.438	-0.0231	-0.0002	0.0321	0.0695	0.1059	0.1349	0.1510
November	1.300	-0.0393	-0.0176	0.0181	0.0627	0.1078	0.1444	0.1649
December	1.232	-0.0484	-0.0285	0.0089	0.0576	0.1081	0.1496	0.1729

Πίνακας 2.2 : Ο λόγος της ωριαίας προς ημερήσιας ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια για κάθε ζεύγος ωρών της μέσης ημέρα κάθε μήνα

Αφού λοιπόν, είναι γνωστές οι τιμές των  $r_t$  και  $\bar{H}$  για κάθε ωριαίο ζεύγος και κάθε μήνα, η ωριαία προσπίπτουσα ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια είναι υπολογίσιμη :

$$I = r_t \times \bar{H} \text{ (kW/m}^2\text{)}$$



I

Hrs from solar noon	±6.5	±5.5	±4.5	±3.5	±2.5	±1.5	±0.5
Month ///ω(deg)	97.5	82.5	67.5	52.5	37.5	22.5	7.5
January	-0.0883	-0.0459	0.0284	0.1227	0.2192	0.2980	0.3423
February	-0.0723	-0.0144	0.0710	0.1722	0.2721	0.3521	0.3965
March	-0.0504	0.0359	0.1489	0.2750	0.3953	0.4897	0.5417
April	-0.0003	0.1067	0.2358	0.3733	0.5006	0.5988	0.6523
May	0.0556	0.1818	0.3273	0.4774	0.6139	0.7178	0.7741
June	0.0870	0.2198	0.3703	0.5236	0.6617	0.7664	0.8229
July	0.0785	0.2191	0.3795	0.5439	0.6926	0.8055	0.8666
August	0.0254	0.1621	0.3237	0.4932	0.6490	0.7685	0.8334
September	-0.0382	0.0718	0.2106	0.3623	0.5052	0.6167	0.6778
October	-0.0812	-0.0006	0.1129	0.2445	0.3728	0.4749	0.5314
November	-0.0895	-0.0402	0.0414	0.1429	0.2457	0.3292	0.3760
December	-0.0871	-0.0514	0.0160	0.1037	0.1946	0.2692	0.3112

Πίνακας 2.3 : Η συνολική ωριαία ακτινοβολία που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια για κάθε ωριαίο ζεύγος της μέσης ημέρας κάθε μήνα σε kW/m<sup>2</sup>

Οι τιμές με το κόκκινο χρώμα είναι αρνητικές και αυτό σημαίνει ότι για το εξεταζόμενο ζεύγος ωρών του μήνα που προκύπτει η αρνητική τιμή, δεν υπάρχει διαθέσιμη ακτινοβολία στην οριζόντια επιφάνεια διότι ο ήλιος βρίσκεται πίσω από τον ορίζοντα (δεν έχει ανατείλει για τις πρωινές ώρες ή έχει δύσει αντίστοιχα για τις απογευματινές). Σημειώνεται ότι οι τιμές για τις ώρες αυτές δεν συμμετέχουν αθροιστικά στον υπολογισμό της συνολικής ημερήσιας ακτινοβολίας για τη μέση ημέρα του κάθε μήνα, θεωρούνται δηλαδή μηδενικές. Παρατηρούμε ακόμη πως οι μεγαλύτερες τιμές βρέθηκαν για την ώρα μεσημβρίας.

Η ίδια μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της συνολικής ωριαίας προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε μία οριζόντια επιφάνεια θα χρησιμοποιηθεί και για την συνιστώσα της διάχυσης. Συγκεκριμένα μέσω της εξίσωσης [1.3.10] :

$$r_d = I_d / H_d$$

Από τη σχέση αυτή μπορούμε να εξαγάγουμε τις τιμές της ωριαίας ακτινοβολίας διάχυσης συναρτήσει της μέσης μηνιαίας ακτινοβολίας διάχυσης για την μέση ημέρα του μήνα. Δηλαδή αντικαθιστώντας το  $H_d$  με το  $\bar{H}_d$  που έχει ήδη βρεθεί στο πρώτο μέρος των υπολογισμών.

Ο λόγος της ωριαίας διάχυσης προς τη μέση μηνιαία ημερήσια ακτινοβολία διάχυσης  $r_d$ , μπορεί να εκτιμηθεί από τις καμπύλες της Εικόνας 17 ή από την εξίσωση [1.3.11] που αντιπροσωπεύει αυτές τις συσχετίσεις:

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s}$$

Οι τιμές του λόγου  $r_d$  συναρτήσει των ωριαίων γωνιών  $\omega$  και  $\omega_s$  προκύπτουν ως εξής :

**$r_d$**

Hours from solar noon		±6.5	±5.5	±4.5	±3.5	±2.5	±1.5	±0.5
	$\omega$ (deg)	97.5	82.5	67.5	52.5	37.5	22.5	7.5
Month	$\omega_s$ (rad)// $\omega$ (rad)	1.702	1.440	1.178	0.916	0.654	0.393	0.131
January	1.268	-0.0975	-0.0382	0.0191	0.0705	0.1125	0.1421	0.1575
February	1.390	-0.0553	-0.0088	0.0362	0.0765	0.1095	0.1327	0.1448
March	1.538	-0.0226	0.0135	0.0482	0.0794	0.1049	0.1229	0.1322
April	1.701	-0.0001	0.0281	0.0553	0.0797	0.0997	0.1138	0.1211
May	1.840	0.0122	0.0357	0.0584	0.0788	0.0954	0.1072	0.1133
June	1.910	0.0168	0.0384	0.0593	0.0781	0.0934	0.1042	0.1098
July	1.878	0.0148	0.0373	0.0590	0.0784	0.0943	0.1055	0.1113
August	1.759	0.0056	0.0317	0.0569	0.0794	0.0979	0.1109	0.1176
September	1.601	-0.0125	0.0201	0.0516	0.0798	0.1029	0.1192	0.1276
October	1.438	-0.0429	-0.0003	0.0409	0.0779	0.1080	0.1294	0.1404
November	1.300	-0.0847	-0.0292	0.0245	0.0725	0.1118	0.1395	0.1539
December	1.232	-0.1136	-0.0495	0.0123	0.0678	0.1131	0.1451	0.1617

Πίνακας 2.4 : Ο λόγος της ωριαίας προς ημερήσιας ακτινοβολίας διάχυσης σε οριζόντια επιφάνεια για κάθε ζεύγος ωρών της μέσης ημέρα κάθε μήνα

Μπορεί λοιπόν να εκτιμηθεί η ωριαία ακτινοβολία διάχυσης για κάθε ζεύγος ωρών για τον κάθε μήνα από την σχέση :

$$I_d = r_d \times \bar{H}_d \text{ (kW/m}^2\text{)}$$

**$I_d$**

Hrs from solar noon		±6.5	±5.5	±4.5	±3.5	±2.5	±1.5	±0.5
Month // $\omega$ (deg)		97.5	82.5	67.5	52.5	37.5	22.5	7.5
January		-0.0888	-0.0348	0.0174	0.0642	0.1024	0.1294	0.1434
February		-0.0666	-0.0106	0.0436	0.0921	0.1318	0.1598	0.1743
March		-0.0382	0.0228	0.0818	0.1346	0.1778	0.2083	0.2241
April		-0.0002	0.0587	0.1156	0.1666	0.2082	0.2377	0.2529
May		0.0280	0.0822	0.1344	0.1813	0.2195	0.2466	0.2606
June		0.0396	0.0907	0.1400	0.1842	0.2203	0.2459	0.2591
July		0.0328	0.0824	0.1303	0.1733	0.2084	0.2332	0.2461
August		0.0112	0.0632	0.1134	0.1584	0.1951	0.2211	0.2346
September		-0.0221	0.0355	0.0912	0.1411	0.1819	0.2107	0.2256
October		-0.0596	-0.0004	0.0568	0.1081	0.1499	0.1795	0.1949
November		-0.0823	-0.0283	0.0238	0.0705	0.1087	0.1356	0.1496
December		-0.0945	-0.0412	0.0103	0.0564	0.0941	0.1208	0.1346

Πίνακας 2.5 : Η ωριαία ακτινοβολία διάχυσης για κάθε ωριαίο ζεύγος της μέσης ημέρας κάθε μήνα σε kW/m<sup>2</sup>

Οι αρνητικές τιμές και εδώ έχουν την ίδια σημασία με τις αντίστοιχες για τη συνολική ωριαία ακτινοβολία I.

Έτσι, γνωρίζοντας ότι το άθροισμα της ακτινοβολίας δέσμης και της ακτινοβολίας διάχυσης δίνουν τη συνολική ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια για μία συγκεκριμένη ώρα (ή ζεύγος ωρών),  $I = I_b + I_d$ , είναι δυνατή η εκτίμηση και της συνιστώσας της ακτινοβολίας δέσμης για κάθε ώρα της μέσης ημέρας του μήνα. Οπότε προκύπτουν τις τιμές :

$$I_b = I - I_d \text{ (kW/m}^2\text{)}$$

### I<sub>b</sub>

Hrs from solar no	±6.5	±5.5	±4.5	±3.5	±2.5	±1.5	±0.5
Month ///ω(deg)	97.5	82.5	67.5	52.5	37.5	22.5	7.5
January	0.0005	-0.0111	0.0110	0.0585	0.1168	0.1686	0.1989
February	-0.0057	-0.0038	0.0274	0.0800	0.1403	0.1922	0.2222
March	-0.0122	0.0131	0.0672	0.1404	0.2175	0.2814	0.3176
April	-0.0001	0.0480	0.1203	0.2067	0.2923	0.3611	0.3994
May	0.0276	0.0996	0.1929	0.2961	0.3943	0.4712	0.5135
June	0.0474	0.1292	0.2302	0.3394	0.4414	0.5206	0.5638
July	0.0458	0.1367	0.2492	0.3706	0.4842	0.5723	0.6205
August	0.0142	0.0989	0.2103	0.3349	0.4538	0.5474	0.5988
September	-0.0160	0.0363	0.1194	0.2212	0.3234	0.4060	0.4522
October	-0.0217	-0.0002	0.0561	0.1364	0.2229	0.2953	0.3365
November	-0.0072	-0.0119	0.0176	0.0724	0.1371	0.1936	0.2264
December	0.0074	-0.0101	0.0057	0.0473	0.1005	0.1485	0.1767

Πίνακας 2.6 : Η ωριαία ακτινοβολία δέσμης για κάθε ωριαίο ζεύγος της μέσης ημέρας κάθε μήνα σε kW/m<sup>2</sup>

Συνεπώς, συνοψίζοντας τους παραπάνω υπολογισμούς, έχουν εκτιμηθεί οι τιμές της συνολικής ωριαίας ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια I καθώς και οι συνιστώσες της δέσμης I<sub>b</sub> και διάχυσης I<sub>d</sub>. Με αυτά τα δεδομένα καθώς και εκείνα που υπολογίστηκαν στο πρώτο μέρος των υπολογισμών, μπορεί να εκτιμηθεί η προσπίπτουσα ωριαία ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια I<sub>T</sub>.

### 3) Εκτίμηση της συνολικής ωριαίας ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια με το μοντέλο HDKR

Το μοντέλο HDKR θα χρησιμοποιηθεί προς εκτίμηση της συνολικής ωριαίας ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια  $I_T$ . Υπενθυμίζεται πως η μέθοδος αυτή είναι μία βελτίωση του ιστροπικού μοντέλου και θεωρείται από τις πλέον συντηρητικές καθώς δίνει συνήθως αποτελέσματα με τιμές κοντά σε αυτές που έχουν μετρηθεί. Χρησιμοποιείται η εξίσωση [1.4.13]

$$I_T = (I_b + I_d A_i) R_b + I_d (1 - A_i) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[ 1 + f \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right] + I_{\rho_g} \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

Γι' αυτή τη μέθοδο ισχύει η παραδοχή ότι η συνολική διάχυση αποτελείται από δύο μέρη, αυτό της ιστροπικής και αυτό της περιφερειακής διάχυσης (δεν συμπεριλαμβάνεται ο όρος της διάχυσης του ορίζοντα).

Από τους υπολογισμούς του πρώτου και δεύτερου μέρους είναι διαθέσιμες οι τιμές των  $I_b$ ,  $I_d$ ,  $R_b$ . Θα πρέπει επομένως να βρεθούν και αναλυθούν ο δείκτης ανισοτροπίας  $A_i$  και ο διαμορφωτικός παράγοντας  $f$  του συντελεστή διόρθωσης.

Ο δείκτης ανισοτροπίας  $A_i$ , είναι συνάρτηση που χαρακτηρίζει την διαπερατότητα της ατμόσφαιρας ως προς την ακτινοβολία δέσμης. Η εξίσωση που δίνει τον δείκτη είναι η [1.4.9] :

$$A_i = \frac{I_{bn}}{I_{on}} = \frac{I_b}{I_o}$$

Είναι δηλαδή ο λόγος της ωριαίας ακτινοβολίας δέσμης προς την ωριαία εκτός ατμόσφαιρας ακτινοβολία και υποδηλώνει το ποσοστό της ακτινοβολίας δέσμης που καταφέρνει να διαπεράσει την εκάστοτε καιρική κατάσταση της ατμόσφαιρας. Ο αριθμητής του κλάσματος αυτού έχει βρεθεί και αναλυθεί για κάθε ώρα της μέσης ημέρας του μήνα κατά τους παραπάνω υπολογισμούς. Θα υπολογιστεί λοιπόν η ωριαία εκτός ατμόσφαιρας ακτινοβολία  $I_o$  για τα ίδια χρονικά διαστήματα, μέσω της σχέσης [1.2.14] :

$$I_o = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \times \left[ \cos \varphi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \varphi \sin \delta \right]$$

Η εξίσωση αυτή είναι η ολοκληρωμένη μορφή εκείνης που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ημερήσιας εκτός ατμόσφαιρας ακτινοβολίας  $H_o$ , οπότε το  $\omega_2$  λαμβάνεται ως η μέγιστη ωριαία γωνία για το κάθε εξεταζόμενο ζεύγος ωρών και το  $\omega_1$ , αντίστοιχα, η ελάχιστη. Ακόμη, επειδή η εξίσωση αυτή δίνει αποτέλεσμα σε  $J/m^2$  θα γίνει μετατροπή σε  $kW/m^2$  πολλαπλασιάζοντας με  $(10^{-3}/3600)$ . Θα είναι λοιπόν:

$I_0$

$\omega_{max}$ (deg)	105	90	75	60	45	30	15	0
Hrs from solar noon	$\pm 6.5$	$\pm 5.5$	$\pm 4.5$	$\pm 3.5$	$\pm 2.5$	$\pm 1.5$	$\pm 0.5$	
Month// $\omega$ (deg)	97.5	82.5	67.5	52.5	37.5	22.5	7.5	
January	-0.445	-0.175	0.086	0.320	0.511	0.646	0.716	
February	-0.333	-0.053	0.217	0.459	0.656	0.796	0.869	
March	-0.177	0.106	0.379	0.623	0.823	0.965	1.038	
April	-0.001	0.274	0.539	0.777	0.971	1.108	1.179	
May	0.135	0.395	0.645	0.870	1.054	1.183	1.250	
June	0.195	0.445	0.686	0.903	1.079	1.204	1.269	
July	0.168	0.421	0.666	0.885	1.064	1.190	1.256	
August	0.058	0.324	0.582	0.812	1.001	1.134	1.203	
September	-0.107	0.171	0.439	0.680	0.876	1.015	1.087	
October	-0.281	-0.002	0.267	0.508	0.706	0.845	0.917	
November	-0.415	-0.143	0.119	0.354	0.546	0.681	0.751	
December	-0.473	-0.207	0.050	0.281	0.469	0.602	0.670	

Πίνακας 3.1 : Τα ποσά της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας για κάθε ζεύγος ωρών της μέσης ημέρα κάθε μήνα σε ( $kW/m^2$ )

Αν τώρα διαιρεθούν οι τιμές της ωριαίας συνιστώσας της ακτινοβολίας δέσμης  $I_b$ , με τις παραπάνω του  $I_0$  προκύπτουν οι τιμές του δείκτη ανισοτροπίας  $A_i$  σύμφωνα με την εξίσωση [1.4.9] :

$A_i$

Hrs from solar noon	$\pm 6.5$	$\pm 5.5$	$\pm 4.5$	$\pm 3.5$	$\pm 2.5$	$\pm 1.5$	$\pm 0.5$
Month// $\omega$ (deg)	97.5	82.5	67.5	52.5	37.5	22.5	7.5
January	-0.001	0.063	0.128	0.183	0.229	0.261	0.278
February	0.017	0.072	0.127	0.174	0.214	0.241	0.256
March	0.069	0.124	0.177	0.225	0.264	0.292	0.306
April	0.203	0.175	0.223	0.266	0.301	0.326	0.339
May	0.204	0.252	0.299	0.340	0.374	0.398	0.411
June	0.243	0.290	0.336	0.376	0.409	0.432	0.444
July	0.273	0.325	0.374	0.419	0.455	0.481	0.494
August	0.245	0.305	0.362	0.412	0.454	0.483	0.498
September	0.150	0.212	0.272	0.325	0.369	0.400	0.416
October	0.077	0.117	0.210	0.268	0.316	0.350	0.367
November	0.017	0.083	0.148	0.205	0.251	0.284	0.301
December	-0.016	0.049	0.114	0.169	0.214	0.247	0.264

Πίνακας 3.2 : Ο αδιάστατος δείκτης ανισοτροπίας για κάθε ζεύγος ωρών της μέσης ημέρα κάθε μήνα

Υπενθυμίζεται ότι υπό καθαρές καιρικές συνθήκες ο δείκτης  $A_i$  θα είναι υψηλός ενώ όσο η δέσμη της ακτίνας παρεμποδίζεται τόσο ο δείκτης είναι χαμηλότερος. Οι σχεδόν μηδενικές (ή αρνητικές) τιμές υποδηλώνουν την μη ύπαρξη δεσμικής ακτίνας αφού τότε το  $I_b=0$ .

Ο συντελεστής διόρθωσης του μοντέλου HDKR  $(1 + f \sin^3(\frac{\beta}{2}))$  συμβάλει στην εκτίμηση και της τρίτης συνιστώσας της διάχυσης, αυτής της λάμπης του ορίζοντα, για τις καθαρές καιρικά ημέρες αλλά μέσω του όρου  $f$  και για τις νεφελώδεις ημέρες. Ο διαμορφωτικός παράγοντας  $f$  προκύπτει από την εξίσωση [1.4.11] :

$$f = \sqrt{I_b/I}$$

Θα χρησιμοποιηθούν οι τιμές της συνολικής ωριαίας ακτινοβολίας και της ωριαίας ακτινοβολίας δέσμης για κάθε ζεύγος ωρών για τη μέση ημέρα του κάθε μήνα, που προέκυψαν από το δεύτερο μέρος των υπολογισμών. Έτσι προκύπτει άμεσα :

f

Hrs from solar noon	±6.5	±5.5	±4.5	±3.5	±2.5	±1.5	±0.5
Month//ω (deg)	97.5	82.5	67.5	52.5	37.5	22.5	7.5
January	0.000	0.491	0.622	0.691	0.730	0.752	0.762
February	0.280	0.515	0.621	0.682	0.718	0.739	0.749
March	0.492	0.604	0.672	0.714	0.742	0.758	0.766
April	0.608	0.671	0.714	0.744	0.764	0.777	0.782
May	0.704	0.740	0.768	0.788	0.801	0.810	0.814
June	0.738	0.767	0.789	0.805	0.817	0.824	0.828
July	0.764	0.790	0.810	0.825	0.836	0.843	0.846
August	0.748	0.781	0.806	0.824	0.836	0.844	0.848
September	0.648	0.711	0.753	0.781	0.800	0.811	0.817
October	0.516	0.636	0.705	0.747	0.773	0.789	0.796
November	0.284	0.544	0.652	0.712	0.747	0.767	0.776
December	0.000	0.444	0.599	0.675	0.719	0.743	0.753

Πίνακας 3.3 : Ο διαμορφωτικός παράγοντας του συντελεστή διόρθωσης

Τέλος, προτού εξαχθούν τα αποτελέσματα της μεθόδου για την ωριαία ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια, θα πρέπει να αναφερθεί ο λόγος  $R_b$  που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 1.2.2 και ορίζεται ως ο λόγος της ακτινοβολίας δέσμης σε κεκλιμένη επιφάνεια προς εκείνη σε οριζόντια επιφάνεια για οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Ο λόγος αυτός διαφέρει από τον μέσο μηνιαίο λόγο  $\bar{R}_b$  που αναλύθηκε στο πρώτο μέρος των υπολογισμών. Ο  $R_b$  είναι εξαρτημένος τόσο από την κλίση της επιφάνειας  $\beta$  όσο και από την ωριαία γωνία  $\omega$  όπως φαίνεται και στην εξίσωση [1.2.9] οπότε και θα έχει διαφορετική τιμή για κάθε ωριαίο ζεύγος που εξετάζεται :

$$R_b = \frac{\cos \theta_z}{\cos \theta} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta}$$

σημειώνεται ότι η δεύτερη ισότητα ισχύει για  $\gamma=0$ , παραδοχή που έγινε εξαρχής.

Είναι πλέον όλοι οι όροι της εξίσωσης του μοντέλου HDKR γνωστοί και μπορεί να γίνει η εκτίμηση της ωριαίας ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια. Θα είναι χρήσιμο σε αυτή την περίπτωση να ελεγχθεί και η εποχική επίδραση που θα έχει η κλίση  $\beta$  της επιφάνειας σε κάθε μήνα. Έτσι διαπιστώνεται σε ποια γωνία κλίσης θα γίνεται η μέγιστη απορρόφηση ακτινοβολίας, άρα και χρησιμοποιήσιμης ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση, για απλοποίηση των υπολογισμών θα γίνει προσομοίωση ως προς το ημερήσιο άθροισμα της ωριαίας ακτινοβολίας για κάθε ζεύγος ωρών. Δηλαδή τη συνολική ημερήσια ακτινοβολία του κάθε μήνα που προκύπτει από το σύνολο των ωρών που προσδίδουν ενέργεια στο σύστημα. Για να πραγματοποιηθεί αυτό θα πρέπει για κάθε γωνία κλίσης  $\beta$  που ελέγχεται, να υπολογίζεται το άθροισμα των  $I_T$  κάθε ζεύγους ωρών για τον εν λόγω μήνα και να πολλαπλασιάζεται με το 2, ώστε να λαμβάνονται οι τιμές για όλο το εύρος της ημέρας (τις πρωινές και απογευματινές ώρες). Αξίζει να σημειωθεί ότι τυχόν αρνητικές τιμές που προκύπτουν από τους υπολογισμούς για πολύ πρωινές ή απογευματινές ώρες των χειμερινών μηνών (δηλαδή πριν ανατείλει ή δύσει ο ήλιος), λαμβάνονται υπόψη ως μηδενικές αφού ουσιαστικά δεν έχουν αρνητική επιρροή στο σύστημα και την απορρόφηση από τον συλλέκτη, δηλαδή θεωρείται πως το σύστημα για εκείνες τις ώρες δεν λειτουργεί ( $I_T=0$ ).

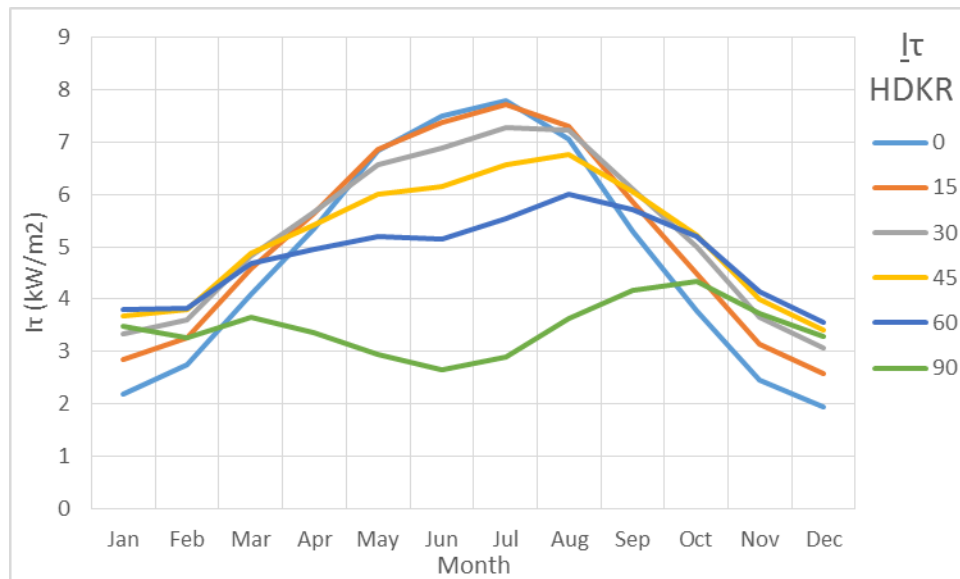
Θα αναλυθούν λοιπόν οι τιμές του συνολικού  $I_T$  για τη μέση ημέρα κάθε μήνα, εξετάζοντας τις τιμές της ανά 5 μοίρες της κλίσης της επιφάνειας  $\beta$ . Με το πράσινο χρώμα έχουν επισημανθεί οι μέγιστες τιμές του συνόλου των  $I_T$  για τη μέση ημέρα κάθε μήνα, που προκύπτουν από την τοποθέτηση της επιφάνειας του συλλέκτη σε συγκεκριμένη γωνία.

$\beta$ // Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0	2.193	2.743	4.094	5.354	6.831	7.490	7.781	7.064	5.304	3.768	2.463	1.942
5	2.421	2.928	4.276	5.479	6.879	7.492	7.806	7.185	5.518	4.031	2.705	2.162
10	2.636	3.098	4.437	5.575	6.888	7.452	7.786	7.264	5.701	4.273	2.932	2.370
15	2.837	3.252	4.574	5.641	6.860	7.370	7.722	7.302	5.851	4.491	3.142	2.566
20	3.022	3.389	4.687	5.678	6.795	7.249	7.614	7.315	5.969	4.683	3.336	2.747
25	3.191	3.508	4.776	5.686	6.695	7.088	7.464	7.288	6.054	4.850	3.510	2.913
30	3.341	3.611	4.839	5.664	6.559	6.891	7.275	7.219	6.105	4.989	3.665	3.063
35	3.472	3.698	4.878	5.614	6.407	6.661	7.073	7.110	6.123	5.099	3.798	3.195
40	3.584	3.764	4.891	5.535	6.225	6.422	6.834	6.961	6.106	5.181	3.909	3.309
45	3.674	3.811	4.879	5.429	6.011	6.149	6.558	6.774	6.055	5.233	3.998	3.403
50	3.742	3.836	4.841	5.296	5.767	5.846	6.248	6.550	5.971	5.254	4.063	3.477
55	3.789	3.840	4.777	5.136	5.494	5.514	5.906	6.290	5.853	5.245	4.110	3.530
60	3.812	3.823	4.688	4.951	5.195	5.156	5.534	5.996	5.703	5.205	4.133	3.562
65	3.812	3.784	4.574	4.741	4.871	4.774	5.134	5.670	5.520	5.133	4.130	3.571
70	3.791	3.723	4.435	4.507	4.523	4.370	4.710	5.313	5.307	5.032	4.102	3.559
75	3.750	3.641	4.273	4.251	4.155	3.946	4.263	4.929	5.064	4.900	4.048	3.524
80	3.685	3.537	4.086	3.975	3.768	3.507	3.806	4.519	4.793	4.739	3.968	3.467
85	3.596	3.413	3.878	3.679	3.365	3.084	3.355	4.087	4.495	4.548	3.863	3.388
90	3.485	3.268	3.649	3.365	2.954	2.649	2.890	3.635	4.172	4.331	3.733	3.288

Πίνακας 3.4 : Οι βέλτιστες λύσεις της ωριαίας ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια για διάφορες γωνίες κλίσης  $\beta$  με το μοντέλο HDKR σε  $kW/m^2$

Με μία πρώτη παρατήρηση διαπιστώνεται ότι το μοντέλο HDKR δίνει βέλτιστη γωνία κλίσης κατά τους χειμερινούς μήνες  $>60^\circ$  σε αντίθεση με τους αρχικούς υπολογισμούς που έγιναν για τη  $H_T$  όπου προέκυψαν βέλτιστες γωνίες κλίσης μέχρι τις  $60^\circ$ , καθώς και ότι για κανένα μήνα δεν προκύπτει βέλτιστη τιμή για την οριζόντια τοποθέτηση ( $\beta=0$ ).

Στο διάγραμμα που ακολουθεί, φαίνονται οι καμπύλες που σχηματίζονται για το σύνολο των τιμών βέλτιστων  $I_T$  (σε  $kWh/m^2$ ), της μέσης ημέρα κάθε μήνα για γωνία κλίσης 0, 15, 30, 45, 60 και 90 μοίρες αντίστοιχα, όπως προβλέπονται από το συγκεκριμένο μοντέλο. Αξιοποιώντας τα δεδομένα που παρήγαγαν οι προηγούμενοι υπολογισμοί, θα λάβουμε μία εικόνα της απόδοσης του συστήματος υπό αυτές τις γωνίες κλίσης κατά την περίοδο ενός έτους :



Διάγραμμα 3.1 : Η εποχική εξάρτηση της ωριαίας ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια σε  $kWh/m^2$  συναρτήσει της κλίσης  $\beta$  με το μοντέλο HDKR



#### 4) Εκτίμηση της συνολικής ωριαίας ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια με το μοντέλο Perez

Το μοντέλο του Perez είναι πιο σύνθετο στη χρήση του από αυτό των HDKR. Συνήθως προβλέπει λίγο μεγαλύτερο σύνολο ακτινοβολίας στην κεκλιμένη επιφάνεια. Αν και θεωρείται η λιγότερο συντηρητική μέθοδος θα αξιοποιηθεί ως μέτρο σύγκρισης για τις εκτιμήσεις του μοντέλου HDKR που έγιναν στο προηγούμενο μέρος των υπολογισμών.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, λαμβάνονται υπόψη και οι τρεις συνιστώσες της διάχυσης (αντίθετα με το μοντέλο HDKR). Αναλυτικά η εξίσωση για την ωριαία ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια με το μοντέλο του Perez είναι η [1.4.19] :

$$I_T = I_b R_b + I_d (1 - F_1) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_d F_1 \frac{a}{b} + I_d F_2 \sin \beta + I_{pg} \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

Η βασική διαφορά ανάμεσα στα δύο μοντέλα που χρησιμοποιούνται (HDKR και Perez) βρίσκεται στον τρόπο που υπολογίζεται η συνεισφορά της διάχυσης. Το μοντέλο Perez χρησιμοποιεί τέσσερις συντελεστές που έχουν επιρροή σε όλες τις συνιστώσες της διάχυσης ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $a$ ,  $b$ ).

Συνεπώς, προτού γίνουν οι προβλέψεις της μεθόδου, είναι απαραίτητη η εκτίμηση των συντελεστών  $F_1$  της περιφερειακής συνιστώσας της διάχυσης και  $F_2$  της συνιστώσας λάμψης του οριζοντα. Οι συντελεστές αυτοί είναι συναρτήσεις τριών παραμέτρων που καθορίζονται από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στον ουρανό : την γωνία ζενίθ  $\theta_z$ , την καθαρότητα  $\epsilon$  και την λάμψη  $\Delta$ .

Στον όρο της συνιστώσας της περιφερειακής ακτινοβολίας διάχυσης, υπάρχουν οι όροι  $a$  και  $b$  που χαρακτηρίζουν τις γωνίες πρόσπτωσης του κώνου της περιφερειακής ακτινοβολίας και όταν οι συλλέκτες έχουν χρήσιμες αποδόσεις ο λόγος τους  $a/b$  γίνεται ίσος με τον λόγο  $R_b$ . Οι όροι  $a$  και  $b$  μπορούν να βρεθούν από τις εξισώσεις [1.4.15] :

$$a = \max(0, \cos \theta), \quad b = \max(\cos 85^\circ, \cos \theta_z)$$

Είναι αναγκαίο λοιπόν σε αυτό το σημείο να υπολογιστεί το συνημίτονο της γωνίας ζενίθ  $\theta_z$ , όπως και το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης  $\theta$  για την ακτινοβολία δέσμης. Η γωνία ζενίθ εξαρτάται αποκλειστικά από τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά  $\varphi$ ,  $\delta$  που είναι σταθερά για κάθε μήνα και την ωριαία γωνία  $\omega$ , έτσι μπορεί εύκολα να βρεθεί από την εξίσωση [1.2.5] :

$$\cos \theta_z = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta$$

Από τις διαθέσιμες τιμές που αναλύθηκαν κατά το πρώτο μέρος των υπολογισμών και την εξίσωση [1.2.5] προκύπτει το συνημίτονο της γωνίας ζενίθ για κάθε συμμετρικό ζεύγος ώρας ως προς τον κάθε μήνα του έτους :

$\cos\theta_z$

Hrs from solar noon	±6.5	±5.5	±4.5	±3.5	±2.5	±1.5	±0.5
Month//ω (deg)	97.5	82.5	67.5	52.5	37.5	22.5	7.5
January	-0.316	-0.124	0.062	0.228	0.364	0.460	0.510
February	-0.238	-0.038	0.156	0.329	0.471	0.571	0.623
March	-0.129	0.077	0.275	0.453	0.599	0.701	0.755
April	-0.001	0.202	0.398	0.574	0.717	0.819	0.871
May	0.101	0.296	0.484	0.652	0.790	0.888	0.938
June	0.147	0.336	0.519	0.683	0.817	0.911	0.960
July	0.127	0.318	0.504	0.670	0.805	0.901	0.951
August	0.043	0.243	0.437	0.610	0.751	0.851	0.903
September	-0.079	0.127	0.325	0.503	0.649	0.751	0.804
October	-0.204	-0.001	0.195	0.370	0.514	0.615	0.668
November	-0.297	-0.102	0.086	0.254	0.392	0.489	0.540
December	-0.336	-0.146	0.036	0.200	0.334	0.429	0.478

Πίνακας 4.1 : Οι τιμές του συνημίτονου της γωνίας ζενίθ

Σε επόμενους υπολογισμούς θα χρειαστούν και οι τιμές της γωνίας ζενίθ σε μοίρες, αυτό γίνεται εύκολα λογαριάζοντας το τόξο  $\cos^{-1}$  για κάθε τιμή του παραπάνω πίνακα.

$\theta_z$

Hrs from solar noon	±6.5	±5.5	±4.5	±3.5	±2.5	±1.5	±0.5
Month//ω (deg)	97.5	82.5	67.5	52.5	37.5	22.5	7.5
January	108.414	97.107	86.452	76.803	68.643	62.597	59.337
February	103.784	92.165	81.033	70.763	61.885	55.147	51.438
March	97.397	85.596	74.019	63.044	53.227	45.460	41.009
April	90.043	78.335	66.534	54.973	44.155	35.022	29.372
May	84.206	72.801	61.066	49.272	37.799	27.434	20.290
June	81.559	70.365	58.747	46.945	35.263	24.338	16.237
July	82.729	71.435	59.758	47.951	36.351	25.670	18.020
August	87.523	75.919	64.117	52.425	41.300	31.647	25.434
September	94.529	82.727	71.025	59.790	49.570	41.297	36.438
October	101.776	90.072	78.775	68.264	59.086	52.036	48.113
November	107.268	95.868	85.082	75.270	66.929	60.713	57.347
December	109.615	98.419	87.912	78.442	70.475	64.605	61.455

Πίνακας 4.2 : Η γωνία ζενίθ σε μοίρες για κάθε ωριαίο ζεύγος της μέσης ημέρας κάθε μήνα

Τα κελιά με το κόκκινο χρώμα αντιστοιχούν σε γωνίες  $>90^\circ$ , το οποίο σημαίνει πως ο ήλιος βρίσκεται πίσω από τον ορίζοντα σύμφωνα με τον ορισμό της γωνίας ζενίθ.

Στην συνέχεια θα εκτιμηθεί το μέγεθος της γωνίας πρόσπτωσης  $\theta$  της δέσμης ακτινοβολίας σε μία επιφάνεια μέσω της εξίσωσης [1.2.6] που περιλαμβάνει το τεχνητό γεωγραφικό πλάτος  $(\varphi-\beta)$ , είναι δηλαδή άμεσα εξαρτημένη από την κλίση της επιφάνειας του συλλέκτη :

$$\cos \theta = \cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta$$

### cosθ

Hrs from solar noon	±6.5	±5.5	±4.5	±3.5	±2.5	±1.5	±0.5
Month//ω (deg)	97.5	82.5	67.5	52.5	37.5	22.5	7.5
January	-0.316	-0.124	0.062	0.228	0.364	0.460	0.510
February	-0.238	-0.038	0.156	0.329	0.471	0.571	0.623
March	-0.129	0.077	0.275	0.453	0.599	0.701	0.755
April	-0.001	0.202	0.398	0.574	0.717	0.819	0.871
May	0.101	0.296	0.484	0.652	0.790	0.888	0.938
June	0.147	0.336	0.519	0.683	0.817	0.911	0.960
July	0.127	0.318	0.504	0.670	0.805	0.901	0.951
August	0.043	0.243	0.437	0.610	0.751	0.851	0.903
September	-0.079	0.127	0.325	0.503	0.649	0.751	0.804
October	-0.204	-0.001	0.195	0.370	0.514	0.615	0.668
November	-0.297	-0.102	0.086	0.254	0.392	0.489	0.540
December	-0.336	-0.146	0.036	0.200	0.334	0.429	0.478

Πίνακας 4.3 : Οι τυπικές τιμές του συνημίτονου της γωνίας πρόσπτωσης για σε οριζόντια επιφάνεια ( $\beta=0$ )

Παρατήρηση : Οι τιμές που παρουσιάζονται εδώ είναι ενδεικτικές για  $\beta=0$ , αφού η γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  δίνεται συναρτήσει της κλίσης  $\beta$  του επιπέδου. Η εξάρτηση αυτή συμμετέχει αλυσιδωτά και για τις τιμές του επομένου πίνακα για το όρο  $\alpha$  που είναι επίσης ενδεικτικός για μηδενική κλίση.

Μέσω των δεδομένων που αναλύθηκαν για τις γωνίες  $\theta_z$  και  $\theta$  είναι εφικτός ο υπολογισμός των όρων  $\alpha$  και  $b$ . Για τον όρο  $\alpha$  είναι γνωστό ότι θα έχει τιμή είτε μηδενική (αν το  $\cos\theta < 0$ ) είτε ίση με το  $\cos\theta$ . Συνεπώς,

### α

Hrs from solar noon	±6.5	±5.5	±4.5	±3.5	±2.5	±1.5	±0.5
Month//ω (deg)	97.5	82.5	67.5	52.5	37.5	22.5	7.5
January	0.000	0.000	0.062	0.228	0.364	0.460	0.510
February	0.000	0.000	0.156	0.329	0.471	0.571	0.623
March	0.000	0.077	0.275	0.453	0.599	0.701	0.755
April	0.000	0.202	0.398	0.574	0.717	0.819	0.871
May	0.101	0.296	0.484	0.652	0.790	0.888	0.938
June	0.147	0.336	0.519	0.683	0.817	0.911	0.960
July	0.127	0.318	0.504	0.670	0.805	0.901	0.951
August	0.043	0.243	0.437	0.610	0.751	0.851	0.903
September	0.000	0.127	0.325	0.503	0.649	0.751	0.804
October	0.000	0.000	0.195	0.370	0.514	0.615	0.668
November	0.000	0.000	0.086	0.254	0.392	0.489	0.540
December	0.000	0.000	0.036	0.200	0.334	0.429	0.478

Πίνακας 4.4 : Οι τιμές του όρου  $\alpha$  που ισούται με την μεγαλύτερη τιμή ανάμεσα στη μηδενική και την τιμή του συνημίτονου της γωνίας πρόσπτωσης

Για τον όρο  $b$  αντίστοιχα, που είναι ανεξάρτητος της κλίσης  $\beta$ , θα είναι είτε ίσο με το  $\cos 85^\circ = 0,872$  (όταν είναι μεγαλύτερο του  $\cos \theta_z$ ), είτε ίσο με την τιμή του  $\cos \theta_z$  για το συγκεκριμένο ζεύγος ωρών του μήνα. Επομένως :

**b**

Hrs from solar noon	±6.5	±5.5	±4.5	±3.5	±2.5	±1.5	±0.5
Month// $\omega$ (deg)	97.5	82.5	67.5	52.5	37.5	22.5	7.5
January	0.087	0.087	0.087	0.228	0.364	0.460	0.510
February	0.087	0.087	0.156	0.329	0.471	0.571	0.623
March	0.087	0.087	0.275	0.453	0.599	0.701	0.755
April	0.087	0.202	0.398	0.574	0.717	0.819	0.871
May	0.101	0.296	0.484	0.652	0.790	0.888	0.938
June	0.147	0.336	0.519	0.683	0.817	0.911	0.960
July	0.127	0.318	0.504	0.670	0.805	0.901	0.951
August	0.087	0.243	0.437	0.610	0.751	0.851	0.903
September	0.087	0.127	0.325	0.503	0.649	0.751	0.804
October	0.087	0.087	0.195	0.370	0.514	0.615	0.668
November	0.087	0.087	0.087	0.254	0.392	0.489	0.540
December	0.087	0.087	0.087	0.200	0.334	0.429	0.478

Πίνακας 4.5 : Οι τιμές του όρου  $b$  που ισούται με τη μεγαλύτερη μεταξύ των τιμών του συνημίτονου των  $85^\circ$  και του συνημιτόνου της γωνίας ζενίθ

Απομένει να εκτιμηθούν οι συντελεστές  $F_1$ ,  $F_2$ . Υπενθυμίζεται πως οι συντελεστές λάμπης  $F_1$  και  $F_2$  είναι συναρτήσεις στατιστικά προερχόμενων συντελεστών για περιοχές τιμών της παραμέτρου  $\varepsilon$  και δίνονται από τις σχέσεις [1.4.18] :

$$F_1 = \max \left[ 0, \left( f_{11} + f_{12}\Delta + \frac{\pi\theta_z}{180} f_{13} \right) \right]$$

$$F_2 = (f_{21} + f_{22}\Delta + \frac{\pi\theta_z}{180} f_{23})$$

Οι όροι  $f_{11}$ ,  $f_{12}$ ,  $f_{13}$ ,  $f_{21}$ ,  $f_{22}$ ,  $f_{23}$  δίνονται από τον Πίνακα 2 της ενότητας 1.4.3 για διάφορες περιοχές τιμών της παραμέτρου καθαρότητας  $\varepsilon$ .

Η παράμετρος καθαρότητας  $\varepsilon$  δίνεται από την σχέση [1.4.16] :

$$\varepsilon = \frac{\frac{I_d + I_{b,n}}{I_d} + 5,535 \times 10^{-6} \theta_z^3}{1 + 5,535 \times 10^{-6} \theta_z^3}$$

Οι γωνίες  $\theta_z$  υπολογίστηκαν προηγουμένως σε μοίρες, όπως και η συνιστώσα της ωριαίας συνολικής διάχυσης  $I_d$  από το δεύτερο μέρος των υπολογισμών. Απομένει η εκτίμηση του όρου  $I_{b,n}$ , της ωριαίας

ακτινοβολίας δέσμης σε ένα επίπεδο κάθετο προς την κατεύθυνση της διάδοσης της ακτινοβολίας. Από την Εικόνα 9 της ενότητας 1.2.2, προκύπτει :

$$I_{b,n} = I_b \frac{1}{\cos \theta_z}$$

Τα ποσά της ακτινοβολίας αυτής για κάθε ωριαίο ζεύγος της μέσης ημέρα κάθε μήνα σε kWh/m<sup>2</sup> (αφού οι διαθέσιμες τιμές της I<sub>b</sub> είναι σε αυτές τις μονάδες)

I<sub>b,n</sub>

Hrs from solar noon	±6.5	±5.5	±4.5	±3.5	±2.5	±1.5	±0.5
Month//ω (deg)	97.5	82.5	67.5	52.5	37.5	22.5	7.5
January	-0.002	0.090	0.178	0.256	0.321	0.366	0.390
February	0.024	0.101	0.176	0.243	0.298	0.336	0.356
March	0.095	0.171	0.244	0.310	0.363	0.401	0.421
April	0.170	0.237	0.302	0.360	0.407	0.441	0.458
May	0.273	0.337	0.399	0.454	0.499	0.531	0.547
June	0.323	0.384	0.444	0.497	0.541	0.571	0.587
July	0.362	0.429	0.495	0.553	0.601	0.635	0.652
August	0.329	0.407	0.482	0.549	0.604	0.643	0.663
September	0.203	0.286	0.367	0.440	0.499	0.540	0.562
October	0.106	0.199	0.288	0.368	0.434	0.480	0.504
November	0.024	0.116	0.205	0.285	0.350	0.396	0.420
December	-0.022	0.069	0.157	0.236	0.301	0.346	0.370

Πίνακας 4.6 : Το ποσό της ακτινοβολίας δέσμης σε ένα επίπεδο κάθετο προς την κατεύθυνση της διάδοσης της ακτινοβολίας σε kWh/m<sup>2</sup>

Με τα δεδομένα αυτά, μπορεί να λυθεί η εξίσωση της παραμέτρου καθαρότητας ε και να ομαδοποιηθούν οι τιμές που προκύπτουν σε κάποιες από τις περιοχές τιμών που δίνονται στον Πίνακα 2 της ενότητας 1.4.3, με τους όρους f<sub>xy</sub> εφαρμόζοντας ένα χρωματικό κώδικα για κάθε εύρος τιμών του ε.

Range of ε	f11	f12	f13	f21	f22	f23
1.000-1.065	-0.008	0.588	-0.062	-0.06	0.072	-0.022
1.065-1.230	0.13	0.683	-0.151	-0.019	0.066	-0.029
1.230-1.500	0.33	0.487	-0.221	0.055	-0.064	-0.026
1.500-1.950	0.568	0.187	-0.295	0.109	-0.152	0.014
1.950-2.800	0.873	-0.392	-0.362	0.226	-0.462	0.001
2.800-4.500	1.132	-1.237	-0.412	0.288	-0.823	0.056
4.500-6.200	1.06	-1.6	-0.359	0.264	-1.127	0.131
6.200-∞	0.678	-0.327	-0.25	0.156	-1.377	0.251

Πίνακας 4.7 (Πίνακας 2): Οι περιοχές τιμών της παραμέτρου καθαρότητας ε και οι αντίστοιχες τιμές των f<sub>xy</sub>

ε

Hrs from solar noon	±6.5	±5.5	±4.5	±3.5	±2.5	±1.5	±0.5
Month//ω (deg)	97.5	82.5	67.5	52.5	37.5	22.5	7.5
January	1.002	0.576	3.229	2.139	2.123	2.201	2.261
February	0.950	-0.795	2.023	1.890	1.977	2.091	2.166
March	0.594	2.675	1.920	1.964	2.114	2.267	2.359
April	-152.275	2.105	1.993	2.126	2.325	2.499	2.589
May	3.262	2.308	2.312	2.506	2.750	2.932	3.008
June	3.036	2.448	2.494	2.716	2.974	3.152	3.214
July	3.671	2.727	2.740	2.982	3.278	3.489	3.568
August	7.220	2.881	2.728	2.929	3.227	3.474	3.591
September	-0.615	2.952	2.350	2.427	2.638	2.846	2.965
October	0.739	-106.900	2.369	2.234	2.351	2.502	2.600
November	0.962	0.302	2.957	2.202	2.211	2.303	2.372
December	1.028	0.733	4.219	2.140	2.087	2.150	2.203

Πίνακας 4.8 : Η τιμές του αδιάστατου δείκτη καθαρότητας ε και η ομαδοποίηση τους στις αντίστοιχες περιοχές τιμών

Ο παράγοντας καθαρότητας ε είναι ουσιαστικά ανεξάρτητος της κλίσης της επιφάνειας β. Δηλαδή, τα ε που υπολογίστηκαν για κάθε ωριαία ζεύγη και μήνα θα είναι σταθερά όταν αλλάζει η μεταβλητή σχεδιασμού β. Παρατηρείται ότι οι περισσότερες τιμές ανήκουν στο εύρος 1.950-2.800, λιγότερες στο εύρος 2.800-4.500, δύο τιμές στην κλίμακα 1.500-1.950 και μόλις μία στην 6.200+. Οι τιμές με τον κόκκινο χρωματισμό είναι εκείνες για τις οποίες δεν υπάρχει διαθέσιμη ακτινοβολία την συγκεκριμένη ώρα για εκείνο τον μήνα όπως υποδείχθηκε κατά τους προηγούμενους υπολογισμούς, οπότε δεν θα ληφθούν υπόψη.

Γνωρίζοντας λοιπόν σε ποια κλίμακα αντιστοιχεί κάθε τιμή του ε, μπορούμε να επιλέξουμε τις κατάλληλες τιμές των όρων  $f_{xy}$  από τον αντίστοιχο πίνακα. Ωστόσο, θα πρέπει να προβλέψουμε και τον παράγοντα λάμψης Δ για να είναι δυνατός ο υπολογισμός των παραγόντων  $F_1$  και  $F_2$ . Ο παράγοντας Δ δίνεται από την [1.4.17] :

$$\Delta = m \frac{I_d}{I_{on}} = \frac{1}{\cos \theta_z} \frac{I_d}{I_{on}}$$

Οι τιμές της κάθετα προσπίπτουσας ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας  $I_{on}$  είναι υπολογίσιμες μέσω της εξίσωσης [1.1.1] σε όρους I και αφού είναι αποκλειστικά συνάρτηση της μέσης ημέρας θα έχει σταθερές τιμές για κάθε μήνα.

$$I_{on} = G_{on} = G_{sc} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right)$$

Επομένως, επειδή και το κλάσμα  $I_d / \cos \theta_z$  δίνει σταθερό αποτέλεσμα για κάθε ζεύγος ώρας, θα είναι επίσης σταθερός και ο παράγοντας λάμψης Δ κατά τη διάρκεια μιας ημέρας ανεξάρτητα από την ώρα

για την οποία εξετάζεται. Τα ποσά της ακτινοβολίας  $I_{on}$  και οι τιμές του παράγοντα  $\Delta$  παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

Month	$I_{on}$	$\Delta$
January	1.410	0.199
February	1.398	0.200
March	1.379	0.215
April	1.356	0.214
May	1.336	0.208
June	1.325	0.204
July	1.323	0.196
August	1.335	0.195
September	1.355	0.207
October	1.378	0.212
November	1.398	0.198
December	1.409	0.200

Πίνακας 4.9 : Οι τιμές της κάθετα προσπίπτουσας ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα σε  $kW/m^2$  και ο αδιάστατος παράγοντας λάμψης  $\Delta$  και κάθε μέση ημέρα του μήνα

Συνεπώς, για να υπολογιστούν τώρα οι συντελεστές  $F_1$  και  $F_2$  θα αξιοποιηθούν τα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν για τις γωνίες ζενίθ  $\theta_z$ , ο παράγοντας  $\Delta$  και ο πίνακας με τις περιοχές τιμών του  $\epsilon$  για να επιλεγούν τα κατάλληλα  $f_{11}, f_{12}, f_{13}, f_{21}, f_{22}, f_{23}$ . Για διάκριση των αποτελεσμάτων ακολουθείται σε κάθε κελί η χρωματική κωδικοποίηση που χρησιμοποιήθηκε κατά τον υπολογισμό του παράγοντα  $\epsilon$ .

### $F_1$

Hrs from solar noon	$\pm 6.5$	$\pm 5.5$	$\pm 4.5$	$\pm 3.5$	$\pm 2.5$	$\pm 1.5$	$\pm 0.5$
Month/ $\omega$ (deg)	97.5	82.5	67.5	52.5	37.5	22.5	7.5
January	0	0	0.264	0.310	0.361	0.399	0.420
February	0	0	0.283	0.241	0.404	0.446	0.470
March	0	0.248	0.227	0.390	0.452	0.501	0.530
April	0	0.294	0.369	0.442	0.510	0.568	0.604
May	0.269	0.332	0.406	0.480	0.553	0.677	0.729
June	0.294	0.349	0.422	0.497	0.626	0.705	0.763
July	0.295	0.345	0.419	0.493	0.629	0.706	0.761
August	0.232	0.345	0.392	0.466	0.594	0.664	0.708
September	0	0.281	0.343	0.414	0.479	0.579	0.614
October	0	0	0.292	0.359	0.417	0.461	0.486
November	0	0	0.275	0.320	0.372	0.412	0.433
December	0	0	0.253	0.299	0.349	0.386	0.406

Πίνακας 4.10 : Ο συντελεστής λάμψης  $F_1$  και η αντιστοιχία του στις κατάλληλες περιοχές τιμών του δείκτη καθαρότητας

## F<sub>2</sub>

Hrs from solar noon	±6.5	±5.5	±4.5	±3.5	±2.5	±1.5	±0.5
Month//ω (deg)	97.5	82.5	67.5	52.5	37.5	22.5	7.5
January			0.208	0.135	0.135	0.135	0.135
February			0.135	0.096	0.135	0.135	0.134
March		0.128	0.094	0.128	0.127	0.127	0.127
April		0.129	0.128	0.128	0.128	0.128	0.128
May	0.199	0.131	0.131	0.131	0.131	0.144	0.137
June	0.200	0.133	0.133	0.133	0.155	0.144	0.136
July	0.208	0.137	0.137	0.137	0.163	0.152	0.145
August	0.272	0.202	0.137	0.137	0.168	0.159	0.153
September		0.199	0.132	0.131	0.131	0.158	0.153
October			0.130	0.129	0.129	0.129	0.129
November			0.208	0.136	0.136	0.135	0.135
December			0.209	0.135	0.135	0.135	0.135

Πίνακας 4.11 : Ο συντελεστής λάμψης F<sub>2</sub> και η αντιστοιχία του στις κατάλληλες περιοχές τιμών του δείκτη καθαρότητας

Τα κελιά με το κόκκινο χρώμα στον πίνακα του συντελεστή F<sub>1</sub> είναι αυτά που δίνουν τιμή <0, ενώ στον πίνακα του F<sub>2</sub> σε αυτά τα κελιά δεν ορίζεται τιμή που να έχει χρήσιμη σημασία για τις ώρες αυτές αφού δεν υπάρχει ακτινοβολία προς το σύστημα.

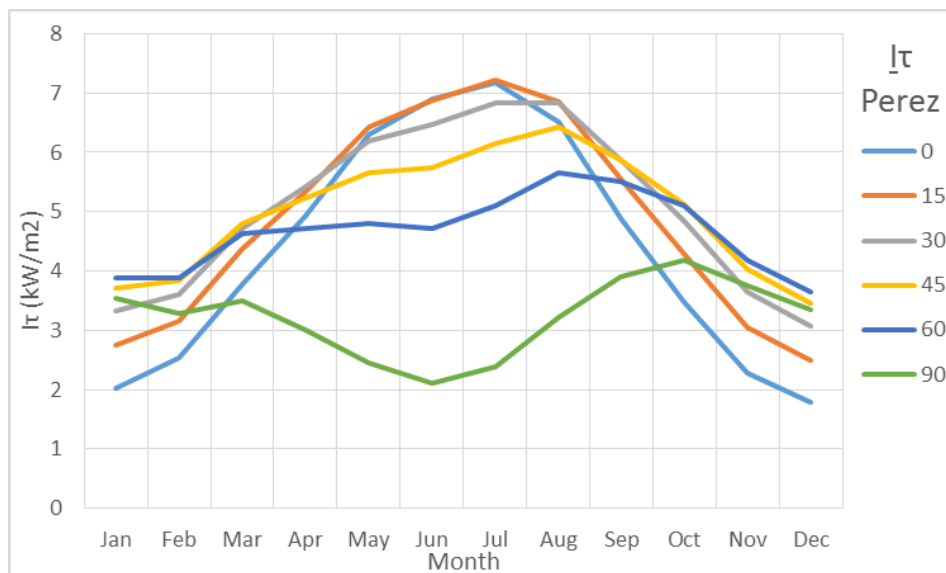
Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω αποτελέσματα, προκύπτει ότι είναι δυνατόν να υπολογιστεί η ωριαία ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια που προκύπτει από το μοντέλο Perez και να εξεταστούν οι τιμές για διάφορες γωνίες κλίσης με σκοπό να εξαχθούν οι βέλτιστες τιμές για κάθε μήνα. Για να είναι τα αποτελέσματα σε συγκρίσιμη μορφή, θα ακολουθηθεί η διαδικασία που προηγήθηκε στο μοντέλο HDKR. Θα αθροιστούν δηλαδή οι ωριαίες τιμές που προκύπτουν από τους υπολογισμούς του μοντέλου και την εξίσωση [1.4.19] ώστε να προκύψουν οι συνολικές ημερήσιες τιμές, που θα αντιπροσωπεύουν την μέση ημέρα του κάθε μήνα. Το αποτέλεσμα που προκύπτει θα διπλασιαστεί επειδή οι υπολογισμοί έχουν γίνει για ζεύγη ωρών. Σε αυτά τα αθροίσματα δεν συμμετέχουν οι τυχόν αρνητικές τιμές που προκύπτουν για τα ζεύγη που δεν λαμβάνεται ακτινοβολία. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι βέλτιστες τιμές του συνόλου της I<sub>T</sub> για τη μέση ημέρα κάθε μήνα, εξετάζοντας τα αποτελέσματα για διαφορετικές γωνίες κλίσης β ανά τρεις μοίρες. Με πράσινο χρώμα επισημαίνονται τα κελιά με τα μεγαλύτερα ποσά συνολικού I<sub>T</sub> για κάθε μήνα.



$\beta$ // Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0	2.019	2.528	3.772	4.935	6.296	6.903	7.171	6.508	4.889	3.473	2.270	1.786
5	2.279	2.752	3.996	5.100	6.379	6.940	7.231	6.666	5.140	3.765	2.544	2.037
10	2.526	2.960	4.196	5.234	6.422	6.931	7.244	6.782	5.358	4.035	2.802	2.275
15	2.756	3.150	4.370	5.334	6.424	6.878	7.209	6.854	5.542	4.279	3.042	2.499
20	2.970	3.320	4.516	5.401	6.387	6.781	7.129	6.895	5.690	4.496	3.263	2.707
25	3.164	3.469	4.635	5.434	6.312	6.645	7.006	6.892	5.801	4.684	3.463	2.898
30	3.337	3.597	4.724	5.433	6.196	6.467	6.838	6.844	5.875	4.842	3.641	3.069
35	3.489	3.705	4.783	5.398	6.054	6.250	6.649	6.751	5.911	4.968	3.794	3.221
40	3.618	3.790	4.811	5.329	5.876	6.013	6.417	6.614	5.908	5.062	3.922	3.351
45	3.722	3.850	4.810	5.226	5.661	5.739	6.144	6.435	5.866	5.122	4.024	3.459
50	3.802	3.885	4.777	5.090	5.411	5.428	5.832	6.213	5.787	5.148	4.099	3.543
55	3.856	3.895	4.714	4.923	5.127	5.084	5.484	5.952	5.670	5.141	4.149	3.604
60	3.884	3.880	4.622	4.726	4.812	4.716	5.106	5.653	5.516	5.100	4.176	3.641
65	3.886	3.839	4.500	4.499	4.474	4.320	4.698	5.318	5.327	5.025	4.174	3.653
70	3.863	3.774	4.350	4.246	4.108	3.899	4.262	4.953	5.104	4.917	4.145	3.640
75	3.819	3.684	4.172	3.967	3.720	3.455	3.802	4.558	4.848	4.777	4.087	3.603
80	3.749	3.570	3.970	3.667	3.310	3.003	3.334	4.137	4.562	4.605	4.001	3.542
85	3.653	3.434	3.742	3.348	2.883	2.563	2.867	3.691	4.248	4.404	3.889	3.456
90	3.533	3.275	3.493	3.010	2.461	2.110	2.390	3.225	3.908	4.175	3.750	3.351

Πίνακας 4.12 : Οι βέλτιστες λύσεις της ωριαίας ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια για διάφορες γωνίες κλίσης  $\beta$  με το μοντέλο Perez σε  $\text{kW/m}^2$

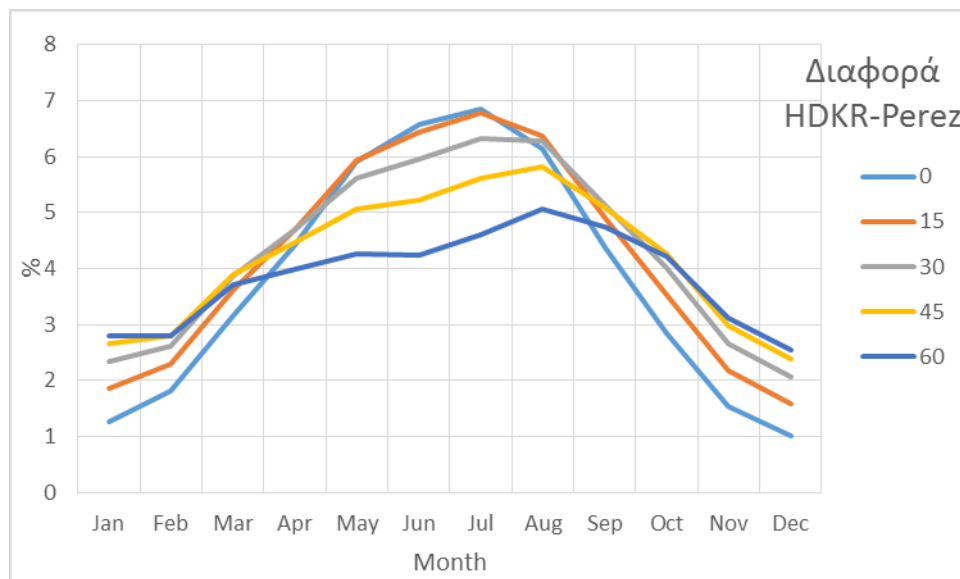
Τέλος, παρουσιάζεται το διάγραμμα με τις καμπύλες των συνολικών τιμών για την  $I_T$  που βρέθηκαν και αναλύθηκαν. Όπως και για το μοντέλο HDKR, έτσι και εδώ εξετάζεται η εποχική εξάρτηση των καμπυλών αυτών κατά την περίοδο ενός έτους. Κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε μία γωνία κλίσης  $\beta$  για 0, 15, 30, 45, 60 και 90 μοίρες.



Διάγραμμα 4.1 : Η εποχική εξάρτηση της ωριαίας ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια σε  $\text{kW/m}^2$  συναρτήσει της κλίσης  $\beta$  με το μοντέλο Perez

Τα αποτελέσματα του μοντέλου Perez είναι κοντά σε αυτά που έδωσε το μοντέλο HDKR όσον αφορά τις βέλτιστες γωνίες λειτουργίας του συστήματος για κάθε μήνα και οι παραπάνω καμπύλες έχουν παρόμοιο ετήσιο μοτίβο. Οι αποκλίσεις στα ποσά που υπολογίστηκαν από τα δύο μοντέλα για την ωριαία ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια είναι μικρές. Στο σημείο αυτό μπορεί να γίνει μια σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών και της ποσοστιαίας απόκλισης τους.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή της διαφοράς που προκύπτει ανάμεσα στα δύο μοντέλα και η εξάρτηση της από τη γωνία και την εποχή.



Διάγραμμα 4.2 : Η ποσοστιαία διαφορά στις βέλτιστες τιμές της ωριαίας ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια από τις εκτιμήσεις των μοντέλων HDKR και Perez

## 5) Υπολογισμός βέλτιστων καμπυλών με την μέθοδο $\bar{\varphi}$ -f chart

Σ' αυτή την ενότητα των υπολογισμών θα αξιοποιηθούν τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από τις εκτιμήσεις των μεθόδων HDKR και Perez, έτσι ώστε να εφαρμοστεί η συνδυαστική μέθοδος σχεδιασμού  $\bar{\varphi}$ -f chart. Μέσω των διαγραμμάτων  $\bar{\varphi}$ -f θα μπορέσουμε να εξετάσουμε και να αξιολογήσουμε την απόδοση του ηλιακού θερμικού συστήματος όταν αυτό λειτουργεί υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Η μέθοδος  $\bar{\varphi}$ -f chart είναι ένας συνδυασμός της μεθόδου f chart και της μεθόδου ημερήσιας χρησιμότητας  $\bar{\varphi}$ . Η μαθηματική σχέση που διέπει τις καμπύλες της μεθόδου είναι η [3.3.5] :

$$f = \bar{\varphi}_{max} Y - 0,015[\exp(3,85f) - 1][1 - \exp(-0,15X')]R_s^{0,76}$$

Μέσω της εξίσωσης αυτής συσχετίζονται οι όροι της μέγιστης ημερήσιας χρησιμότητας  $\bar{\varphi}_{max}$  και του συνολικού κλάσματος του μηνιαίου φορτίου f που παρέχεται από την ηλιακή ενέργεια, συναρτήσεως δύο αδιάστατων παραγόντων, των  $X'$  και  $\bar{\varphi}_{max} Y$ . Οι αδιάστατοι αυτοί παράγοντες λειτουργούν αντίστοιχα ως η τετμημένη και τεταγμένη για τα διαγράμματα παρουσίασης των αποτελεσμάτων.

Ο όρος  $R_s$  είναι ο λόγος της πρότυπης χωρητικότητας θερμικής αποθήκευσης ανά μονάδα εμβαδού συλλέκτη 350 kJ/m<sup>2</sup>°C προς την πραγματική χωρητικότητα αποθήκευσης, και βεβαίως οι καμπύλες που προκύπτουν διαφοροποιούνται για αλλαγές στις τιμές του λόγου αυτού που δίνεται από τη εξίσωση [3.3.6] :

$$R_s = \frac{350}{Mc_p/A_c}$$

Με στόχο την απλοποίηση των υπολογισμών, θα θεωρήσουμε την πραγματική χωρητικότητα αποθήκευσης ίση με 350 kJ/m<sup>2</sup>°C, έτσι ώστε η τιμή του κλάσματος της παραπάνω εξίσωσης να είναι η μονάδα. Δηλαδή  $R_s=1$ .

Έτσι, αν εκτιμηθούν οι αδιάστατοι συντελεστές  $X'$  και  $\bar{\varphi}_{max} Y$ , μέσω της εξίσωσης της μεθόδου θα μπορέσουμε να αξιολογήσουμε τις τιμές του f. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω των εξισώσεων [3.3.3] και [3.3.4] :

$$\bar{\varphi}_{max} Y = \bar{\varphi}_{max} \frac{A_c F_R (\tau\alpha) \bar{H}_T N}{L}$$

$$X' = \frac{A_c F_R U_L (100) \Delta t}{L}$$

Προτού γίνουν οι υπολογισμοί θα πρέπει να γίνουν κάποιες παραδοχές όσον αφορά τις παραμέτρους που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς. Οι παράμετροι αυτές είναι χαρακτηριστικά του συστήματος και της λειτουργίας της διεργασίας που πραγματοποιείται.

Τα γινόμενα  $F_R(\tau\alpha)$  και  $F_R U_L$  που ποσοτικοποιούν τον ρυθμό απορρόφησης και απώλειας ενέργειας από τους συλλέκτες, εξαρτώνται από τον τύπο και τα χαρακτηριστικά του συλλέκτη που χρησιμοποιείται στο σύστημα που προσομοιώνεται. Θα θεωρηθεί ότι οι συλλέκτες του συστήματος έχουν τιμές τυπικές και σταθερές:  $F_R(\tau\alpha) = 4,5 \text{ W/m}^2\text{C}$  και  $F_R U_L = 0,85$

Επιπλέον, η επιφάνεια του συλλέκτη  $A_c$  είναι μία σημαντική μεταβλητή σχεδιασμού για τους υπολογισμούς αυτού του μέρους. Ισχύει ότι όσο μεγαλύτερη επιφάνεια συλλέκτη διατεθεί για το σύστημα τόσο μεγαλύτερο θα είναι και το κλάσμα  $f$ , δηλαδή τόσο μεγαλύτερη η απορρόφηση της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας. Θα θεωρηθεί λοιπόν ότι  $A_c = 100 \text{ m}^2$

Η δεξαμενή αποθήκευσης θεωρείται ότι είναι συμπιεσμένη έτσι ώστε να μην υπάρχει ενεργειακή απόρριψη, δηλαδή ότι οι θερμικές απώλειες είναι μηδενικές:  $Q_s = 0$ .

Συνεπώς το μέγεθος του συνολικού απαιτούμενου φορτίου για κάθε μήνα θα είναι ίσο με την απαίτηση σε θερμότητα του συστήματος,  $L_{\text{tot}}=L$ , αφού δεν υπάρχουν θερμικές απώλειες στη δεξαμενή αποθήκευσης. Αν θεωρηθεί ότι η διεργασία απαιτεί θερμότητα  $L_{\text{req}} = 20\text{kW}$ , το απαιτούμενο φορτίο κάθε μήνα εκτιμάται από τις εξισώσεις [3.3.9] :

$$L \text{ (GJ)} = L_{\text{req}} \times N \times 3600 \times 12 \text{ hours per day} \times \frac{\text{working days per yr}}{365} \times 10^{-6}$$

Για το συγκεκριμένο πρόβλημα, θα θεωρηθεί πως η διεργασία λαμβάνει χώρα για κάθε ημέρα του έτους για δώδεκα ώρες κάθε μέρα.

Month	N	L(kW)	L(GJ)
January	31	7440	26.784
February	28	6720	24.192
March	31	7440	26.784
April	30	7200	25.92
May	31	7440	26.784
June	30	7200	25.92
July	31	7440	26.784
August	31	7440	26.784
September	30	7200	25.92
October	31	7440	26.784
November	30	7200	25.92
December	31	7440	26.784

Πίνακας 5.1 : Ο αριθμός των ημέρων κάθε μήνα και το απαιτούμενο θερμικό φορτίο κάθε μήνα σε kW και GJ

Για το φορτίο που υπολογίστηκε θα πρέπει να οριστεί μία ελάχιστη θερμοκρασία  $T_{\text{min}}$ . Όπως αναφέρθηκε ήδη, σύμφωνα με την παραδοχή ότι δεν υπάρχουν θερμικές απώλειες στη δεξαμενή αποθήκευσης, η θερμοκρασία επιστροφής από το φορτίο θα πρέπει να είναι πάντοτε  $\geq T_{\text{min}}$ . Η θερμοκρασία αυτή για το σύστημα που εξετάζεται θα ληφθεί:  $T_{\text{min}} = 70^\circ\text{C}$ .

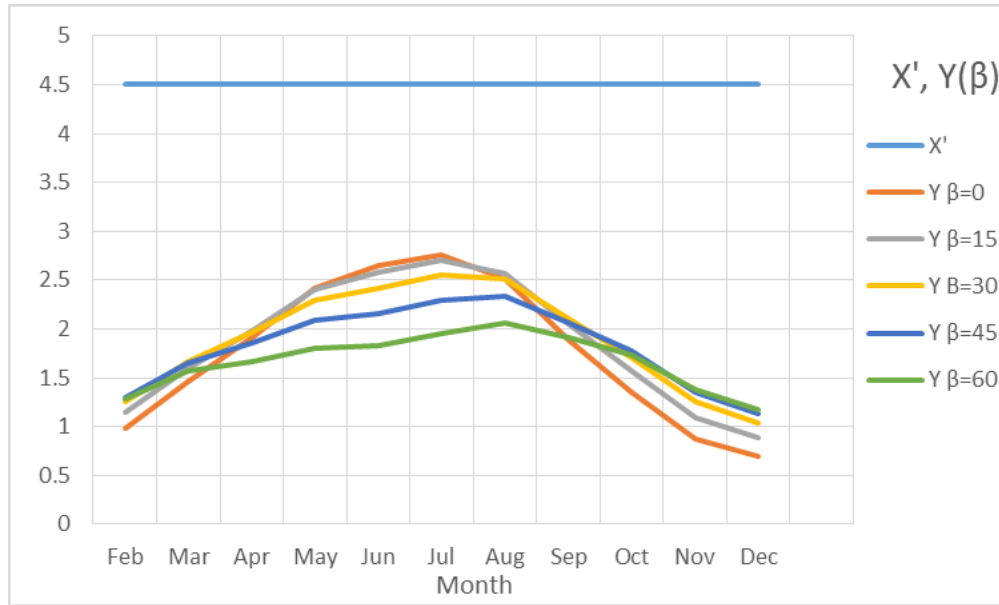
Όλες οι παραπάνω παραδοχές και ορισμοί τιμών, αφορούν τα χαρακτηριστικά ενός συγκεκριμένου συστήματος που εξετάζεται υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Δηλαδή, σε κάθε διαφορετικό σύστημα οι τιμές αυτές θα είναι διαφορετικές. Οι τιμές που έχουν επιλεγεί είναι τυπικές και αντιπροσωπεύουν μια ουδέτερη κατάσταση και όχι ακραίες συνθήκες. Είναι σαφές πως επιλογή διαφορετικών τιμών για τους όρους αυτούς θα επιφέρουν αλλαγές στα αποτελέσματα που λαμβάνονται.

Με τα δεδομένα αυτά και τις παραδοχές που ορίστηκαν, είναι ικανή η εκτίμηση των αδιάστατων συντελεστών  $X'$  και  $Y$ , που θα έχουν ίδια τιμή και για τα δύο μοντέλα σχεδιασμού που αναλύθηκαν (HDKR και Perez). Θα ελεγχθεί η εξάρτηση των συντελεστών αυτών από την κλίση της επιφάνειας του συστήματος :

Month	$X'$	$Y \beta=0$	$Y \beta=15$	$Y \beta=30$	$Y \beta=45$	$Y \beta=60$
January	4.5	0.780	0.982	1.137	1.233	1.265
February	4.5	0.980	1.142	1.251	1.300	1.286
March	4.5	1.460	1.601	1.668	1.658	1.570
April	4.5	1.914	1.981	1.961	1.856	1.671
May	4.5	2.421	2.406	2.294	2.089	1.806
June	4.5	2.651	2.583	2.418	2.161	1.830
July	4.5	2.755	2.708	2.552	2.294	1.952
August	4.5	2.513	2.568	2.508	2.333	2.057
September	4.5	1.891	2.045	2.102	2.058	1.915
October	4.5	1.353	1.570	1.712	1.769	1.736
November	4.5	0.876	1.090	1.251	1.348	1.374
December	4.5	0.692	0.886	1.038	1.137	1.175

Πίνακας 5.2 : Οι τιμές των αδιάστατων συντελεστών  $X'$  και  $Y$ . (Ο συντελεστής  $X'$  είναι ανεξάρτητος της γωνίας κλίσης και του μήνα, ενώ οι τιμές του  $Y$  μεταβάλλονται)

Στον παραπάνω πίνακα ο συντελεστής  $X'$  έχει μία και σταθερή τιμή για κάθε μήνα ανεξάρτητα από την κλίση των επιφανειών του συστήματος, ενώ ο συντελεστής  $Y$  λόγω της εξάρτησης του από τη μέση ημερήσια ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια  $\bar{H}_T$  παρουσιάζει διαφορετικές τιμές υπό διαφορετικές γωνίες κλίσης  $\beta$ . Είναι η ίδια εξάρτηση με εκείνη που αναλύθηκε κατά το πρώτο μέρος των υπολογισμών για την  $\bar{H}_T$ . Σε μορφή γραφήματος :



Διάγραμμα 5.1 : Η σταθερή τιμή του αδιάστατου συντελεστή  $X'$  και οι εποχικές καμπύλες του συντελεστή  $Y$  για διαφορετικές γωνίες κλίσης

Υπενθυμίζεται πως ο αδιάστατος συντελεστής  $Y$ , για τους υπολογισμούς της μεθόδου  $\varphi$ - $f$  chart λαμβάνεται υπόψη ως το γινόμενο  $\varphi_{max}Y$ . Στην περίπτωση που το σύστημα θα είχε διαφορετική επιφάνεια συλλέκτη από αυτή που έχει οριστεί, η σχέση της ως προς τους συντελεστές που ελέγχθηκαν θα είναι αναλογική. Αντιθέτως, για διαφορετικό απαιτούμενο θερμικό φορτίο διεργασίας θα προκύπτουν αντιστρόφως ανάλογες τιμές.

Απομένει λοιπόν η εκτίμηση της μέγιστης μέσης ημερήσιας χρησιμότητας  $\bar{\varphi}_{max}$ . Οι τιμές του όρου αυτού θα εκτιμηθούν μέσω της εξίσωσης της μέσης ημερήσιας χρησιμότητας  $\bar{\varphi}$ , όμως για το ελάχιστο μέσο επίπεδο κρίσιμης ακτινοβολίας  $\bar{X}_{c,min}$ , που δίνεται από την εξίσωση [3.3.2] :

$$\bar{X}_{c,min} = \frac{F_R U_L (T_{min} - \bar{T}_a) / F_R (\bar{\tau} \alpha)}{r_{l,n} R_n \bar{K}_T \bar{H}_o}$$

Ο αριθμητής της παραπάνω σχέσης, αντιστοιχεί και ισούται με την ελάχιστη κρίσιμη ωριαία ακτινοβολία  $I_{T_{c,min}}$ , που είναι το κρίσιμο επίπεδο ωριαίας ακτινοβολίας, για την ελάχιστη απαιτούμενη θερμοκρασία του συστήματος  $T_{min}$ . Είναι φανερό πως όσο μεγαλύτερη είναι η ελάχιστη θερμοκρασία του συστήματος τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η τιμή της  $I_{T_{c,min}}$ . Με άλλα λόγια, θα υπάρχει μεγαλύτερη θερμοκρασιακή απαίτηση από το σύστημα που θα πρέπει να καλυφθεί από την προσπίπτουσα ακτινοβολία που απορροφάται.

Ο λόγος  $R_n$ , είναι ο λόγος ακτινοβολίας κεκλιμένης προς οριζόντια επιφάνεια για τη μέση ημέρα του μήνα και για την ώρα που συμβαίνει η ηλιακή μεσημβρία και μπορεί να υπολογιστεί μέσω της [3.2.12]:

$$R_n = \left(\frac{I_T}{I}\right)_n = \left(1 - \frac{r_{d,n}H_d}{r_{t,n}H}\right)R_{b,n} + \left(\frac{r_{d,n}H_d}{r_{t,n}H}\right)\left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + \rho_g\left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right)$$

Ο λόγος αυτός έχει άμεση σχέση με την κλίση της επιφάνειας του συστήματος και όπως είναι προφανές, θα είναι διαφορετικός για τις τιμές  $I_T$  που αναλύθηκαν με το μοντέλο HDKR και το μοντέλο Perez. Στον παρακάτω πίνακα αναλύεται η μεταβλητότητα του λόγου  $R_n$  για διάφορες τιμές κλίσης  $\beta$  (πρώτα με μπλε χρώμα για το μοντέλο HDKR, μετά με κίτρινο χρώμα για το Perez) :

Month	Rnoon	Rn $\beta=15$	Rn $\beta=30$	Rn $\beta=45$	Rn $\beta=60$	Rn $\beta=15$	Rn $\beta=30$	Rn $\beta=45$	Rn $\beta=60$
January	1	1.36	1.57	1.70	1.73	1.31	1.55	1.70	1.75
February	1	1.28	1.40	1.47	1.45	1.23	1.40	1.48	1.47
March	1	1.22	1.29	1.30	1.25	1.16	1.26	1.28	1.23
April	1	1.16	1.18	1.15	1.06	1.10	1.14	1.11	1.02
May	1	1.13	1.12	1.05	0.93	1.06	1.06	1.00	0.88
June	1	1.11	1.08	1.00	0.87	1.04	1.03	0.95	0.81
July	1	1.12	1.10	1.02	0.90	1.05	1.04	0.97	0.84
August	1	1.16	1.17	1.12	1.01	1.09	1.11	1.07	0.96
September	1	1.21	1.27	1.26	1.19	1.15	1.23	1.23	1.16
October	1	1.28	1.40	1.46	1.43	1.21	1.36	1.42	1.40
November	1	1.35	1.54	1.66	1.68	1.30	1.52	1.65	1.68
December	1	1.38	1.61	1.75	1.80	1.34	1.60	1.77	1.83

Πίνακας 5.3 : Οι τιμές του λόγου της ακτινοβολίας σε κεκλιμένη προς οριζόντια επιφάνεια υπό διάφορες γωνίες κλίσης, για τις τιμές από τα μοντέλα HDKR και Perez αντίστοιχα

Μπορεί να παρατηρηθεί για τον λόγο  $R_n$ , ότι για τις τιμές που αναλύθηκαν από τα δύο μοντέλα για την ώρα της ηλιακής μεσημβρίας, οι αποκλίσεις είναι μικρές, της τάξης  $10^{-2}$ .

Στη συνέχεια θα γίνει η ανάλυση του ελάχιστου μέσου επιπέδου κρίσιμης ακτινοβολίας  $\bar{X}_{c,min}$  για τις δύο μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν. Για τους υπολογισμούς αυτούς είναι απαραίτητες οι τιμές της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας περιβάλλοντος για την τοποθεσία στην οποία το θερμικό σύστημα λειτουργεί, οι οποίες αντλήθηκαν από μετεωρολογικά δεδομένα για την περιοχή της Αθήνας.

Στον πίνακα αναλύεται το ελάχιστο μέσο επίπεδο ακτινοβολίας για γωνίες κλίσης του επιπέδου στις 0, 30 και 60 μοίρες, για τις τιμές που προέκυψαν από το μοντέλο HDKR (μπλε στήλες) και το μοντέλο Perez (κίτρινες στήλες) ξεχωριστά.

Month	$\bar{I}_a$	$X_{c,min} \beta=0$	$X_{c,min} \beta=30$	$X_{c,min} \beta=60$	$\_X_{c,min}$	$X_{c,min} \beta=30$	$\_X_{c,min}$
January	9.83	0.858	0.593	0.537	0.931	0.599	0.533
February	9.5	0.744	0.575	0.556	0.808	0.578	0.548
March	12.62	0.517	0.435	0.450	0.561	0.445	0.456
April	16.25	0.402	0.368	0.411	0.436	0.382	0.427
May	21.4	0.306	0.298	0.357	0.332	0.313	0.379
June	26.31	0.259	0.259	0.322	0.281	0.274	0.347
July	29.42	0.228	0.225	0.277	0.248	0.238	0.296
August	29.2	0.239	0.222	0.256	0.259	0.233	0.270
September	24.13	0.330	0.283	0.300	0.358	0.292	0.308
October	19.45	0.464	0.359	0.351	0.504	0.370	0.359
November	15.14	0.712	0.501	0.459	0.772	0.509	0.460
December	11.18	0.922	0.622	0.554	1.001	0.625	0.547

Πίνακας 5.4 : Οι τιμές του ελάχιστου μέσου επιπέδου ακτινοβολίας υπό διάφορες γωνίες κλίσης, για τις τιμές από τα μοντέλα HDKR και Perez αντίστοιχα

Η μέση ημερήσια χρησιμότητα δίνεται από τις σχέσεις [3.2.14] :

$$\bar{\varphi} = \exp \left\{ \left[ a + b \left( \frac{R_n}{R} \right) \right] \left[ \bar{X}_c + c \bar{X}_c^2 \right] \right\}$$

και οι όροι  $a$ ,  $b$  και  $c$  είναι αποκλειστικά συναρτήσεις του μέσου μηνιαίου δείκτη καθαρότητας  $\bar{K}_T$  :

$$a = 2,943 - 9,271\bar{K}_T + 4,031\bar{K}_T^2$$

$$b = -4,345 + 8,853\bar{K}_T - 3,602\bar{K}_T^2$$

$$c = -0,170 - 0,306\bar{K}_T + 2,936\bar{K}_T^2$$

Η μέγιστη μέση ημερήσια χρησιμότητα  $\bar{\varphi}_{\max}$  είναι πλέον υπολογίσιμη μέσω των προηγούμενων αποτελεσμάτων που αναλύθηκαν.



$\bar{\Phi}_{\max}$  - HDKR

$\beta$ // Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0	0.203	0.271	0.397	0.491	0.580	0.633	0.667	0.652	0.550	0.422	0.268	0.183
5	0.238	0.295	0.414	0.501	0.585	0.636	0.672	0.661	0.565	0.448	0.303	0.218
10	0.269	0.316	0.428	0.508	0.588	0.638	0.675	0.667	0.577	0.470	0.334	0.251
15	0.296	0.334	0.440	0.513	0.589	0.638	0.676	0.671	0.587	0.488	0.361	0.279
20	0.320	0.350	0.449	0.515	0.589	0.636	0.675	0.674	0.594	0.503	0.383	0.304
25	0.340	0.362	0.455	0.516	0.586	0.632	0.673	0.674	0.600	0.515	0.402	0.326
30	0.357	0.372	0.460	0.515	0.582	0.626	0.669	0.673	0.603	0.525	0.418	0.344
35	0.371	0.380	0.462	0.511	0.575	0.619	0.663	0.670	0.604	0.532	0.431	0.359
40	0.382	0.385	0.462	0.506	0.566	0.609	0.654	0.665	0.603	0.536	0.441	0.371
45	0.390	0.388	0.460	0.498	0.555	0.596	0.644	0.659	0.600	0.539	0.448	0.381
50	0.396	0.389	0.456	0.488	0.542	0.581	0.631	0.650	0.594	0.539	0.453	0.388
55	0.399	0.388	0.449	0.476	0.525	0.563	0.616	0.638	0.587	0.537	0.455	0.392
60	0.400	0.384	0.440	0.461	0.505	0.542	0.596	0.624	0.578	0.532	0.455	0.394
65	0.399	0.378	0.429	0.443	0.482	0.516	0.573	0.607	0.565	0.525	0.453	0.394
70	0.395	0.370	0.414	0.422	0.455	0.486	0.546	0.586	0.550	0.516	0.448	0.391
75	0.388	0.359	0.397	0.397	0.423	0.450	0.512	0.561	0.532	0.504	0.440	0.385
80	0.379	0.345	0.377	0.369	0.385	0.408	0.472	0.530	0.510	0.489	0.430	0.377
85	0.366	0.329	0.354	0.336	0.341	0.357	0.423	0.493	0.483	0.470	0.417	0.366
90	0.351	0.310	0.326	0.298	0.291	0.299	0.364	0.447	0.451	0.448	0.401	0.352

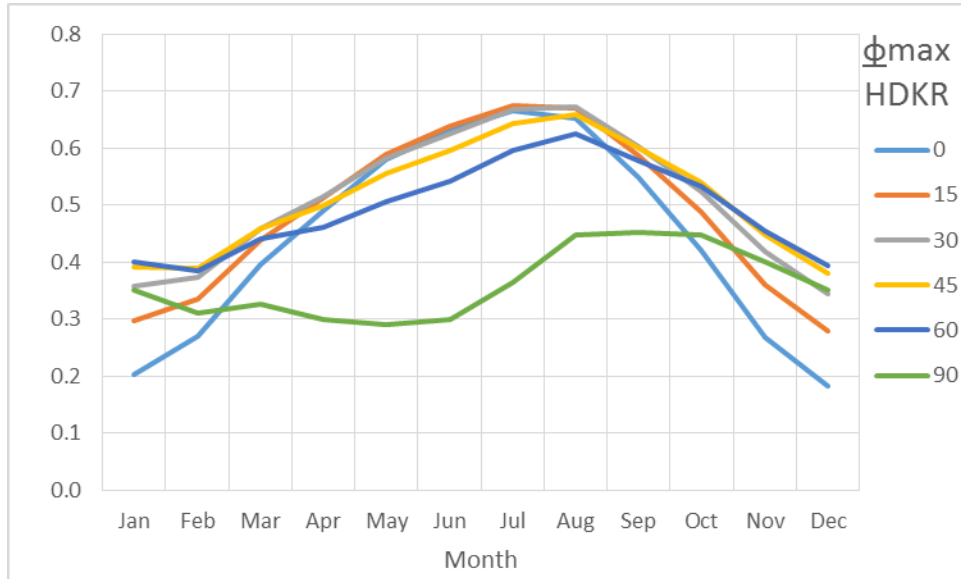
Πίνακας 5.5 : Οι βέλτιστες τιμές της μέγιστης μέσης ημερήσιας χρησιμότητας για διάφορες γωνίες κλίσης με το μοντέλο HDKR

 $\bar{\Phi}_{\max}$  - Perez

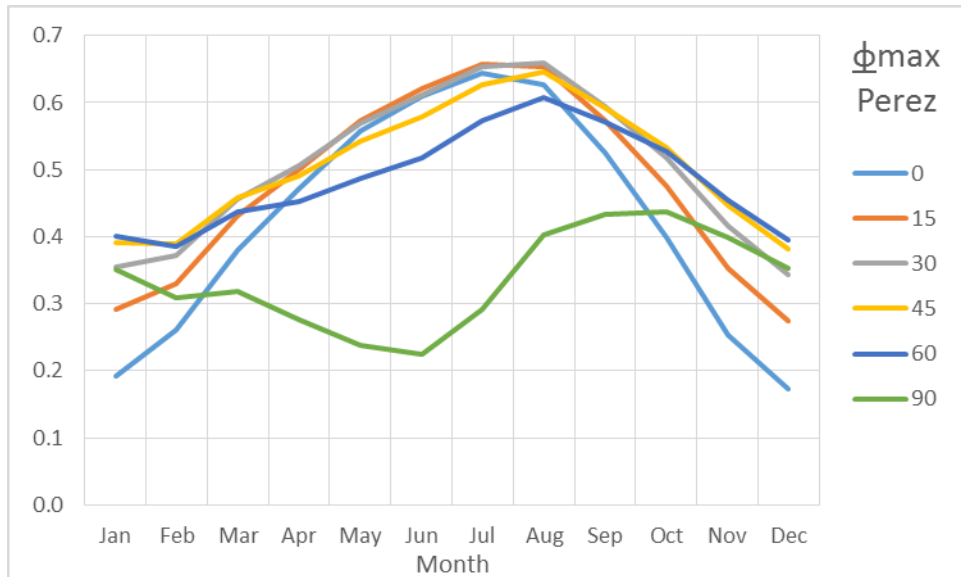
$\beta$ // Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0	0.191	0.261	0.380	0.472	0.557	0.610	0.643	0.627	0.526	0.398	0.253	0.173
5	0.229	0.288	0.400	0.485	0.565	0.616	0.650	0.639	0.545	0.429	0.291	0.211
10	0.262	0.311	0.417	0.494	0.571	0.619	0.655	0.648	0.561	0.454	0.325	0.245
15	0.291	0.331	0.431	0.501	0.574	0.621	0.658	0.654	0.573	0.475	0.353	0.275
20	0.316	0.347	0.442	0.505	0.574	0.620	0.658	0.658	0.582	0.492	0.378	0.302
25	0.337	0.361	0.450	0.507	0.573	0.617	0.657	0.660	0.589	0.506	0.398	0.324
30	0.355	0.372	0.455	0.507	0.569	0.611	0.653	0.659	0.594	0.517	0.415	0.343
35	0.370	0.380	0.459	0.504	0.562	0.603	0.647	0.657	0.596	0.525	0.429	0.359
40	0.382	0.386	0.459	0.499	0.554	0.593	0.638	0.652	0.595	0.530	0.439	0.372
45	0.391	0.389	0.458	0.492	0.542	0.579	0.627	0.645	0.593	0.533	0.447	0.382
50	0.397	0.391	0.453	0.481	0.527	0.563	0.613	0.636	0.588	0.533	0.452	0.389
55	0.400	0.389	0.447	0.469	0.509	0.543	0.595	0.624	0.580	0.531	0.455	0.394
60	0.401	0.386	0.438	0.453	0.488	0.518	0.573	0.608	0.570	0.527	0.455	0.396
65	0.400	0.380	0.426	0.434	0.461	0.489	0.547	0.589	0.558	0.520	0.453	0.395
70	0.396	0.371	0.411	0.411	0.430	0.453	0.514	0.565	0.541	0.510	0.448	0.392
75	0.389	0.360	0.393	0.384	0.393	0.410	0.474	0.536	0.521	0.497	0.440	0.387
80	0.379	0.346	0.372	0.353	0.349	0.358	0.425	0.501	0.497	0.481	0.429	0.378
85	0.367	0.329	0.347	0.317	0.298	0.296	0.365	0.457	0.468	0.461	0.416	0.367
90	0.351	0.310	0.318	0.275	0.239	0.224	0.292	0.403	0.433	0.437	0.399	0.353

Πίνακας 5.6 : Οι βέλτιστες τιμές της μέγιστης μέσης ημερήσιας χρησιμότητας για διάφορες γωνίες με το μοντέλο Perez

Στους παραπάνω πίνακες αναλύθηκαν τα αποτελέσματα για διαφορετικές γωνίες κλίσης  $\beta$  ανά 5 μοίρες και σημειώθηκαν οι μέγιστες τιμές για τον κάθε μήνα. Οι τιμές που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους έχουν πολύ μικρή απόκλιση για τη μέγιστη μέση ημερήσια χρησιμότητα. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα παρακάτω γραφήματα που αναλύουν την  $\bar{\phi}_{\max}$  για διάφορες γωνίες κλίσης.



Διάγραμμα 5.2 : Οι καμπύλες της μέγιστης μέσης ημερήσιας χρησιμότητας για ένα έτος σε διαφορετικές γωνίες κλίσης, από το μοντέλο HDKR



Διάγραμμα 5.3 : Οι καμπύλες της μέγιστης μέσης ημερήσιας χρησιμότητας για ένα έτος σε διαφορετικές γωνίες κλίσης, από το μοντέλο Perez

Συγκεντρώνοντας όλα τα παραπάνω δεδομένα και αναλύσεις για την εξίσωση της μεθόδου  $\bar{\varphi}$ -f chart, είναι δυνατή η εκτίμηση και ανάλυση της συμπεριφοράς του f, του κλάσματος του μηνιαίου θερμικού φορτίου που παρέχεται από την ηλιακή ενέργεια, συναρτήσει της κλίσης β. Θα πρέπει να αναφερθεί πως οι τιμές για το f εξαρτώνται άμεσα από αρκετές παραμέτρους όπως το απαιτούμενο μηνιαίο φορτίο L, η επιφάνεια του συλλέκτη  $A_c$ , η ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος  $T_{min}$ , η θερμική χωρητικότητα αποθήκευσης  $R_s$  και φυσικά η κλίση της επιφάνειας του συλλέκτη κ.α. Θα σημειωθούν επίσης οι διαφορές και αποκλίσεις ανάμεσα στα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις ωριαίες ακτινοβολίες από τα μοντέλα HDKR και Perez.

Αναμένεται μιας μικρής κλίμακας υπερεκτίμηση για τις τιμές που θα ληφθούν λόγω των παραδοχών ότι δεν υπάρχουν θερμικές απώλειες από την δεξαμενή ( $Q_s=0$ ) και ότι ο εναλλάκτης θερμότητας του φορτίου έχει άπειρο μέγεθος ώστε  $F_R'/F_R=1$ .

Η ανάλυση του f έγινε με την μέθοδο δοκιμής σφάλματος με την βοήθεια του επιλυτή (Solver) του Excel. Η εξίσωση [3.3.5] μετατράπηκε έτσι ώστε το ένα μέλος να ισούται με το μηδέν. Δηλαδή :

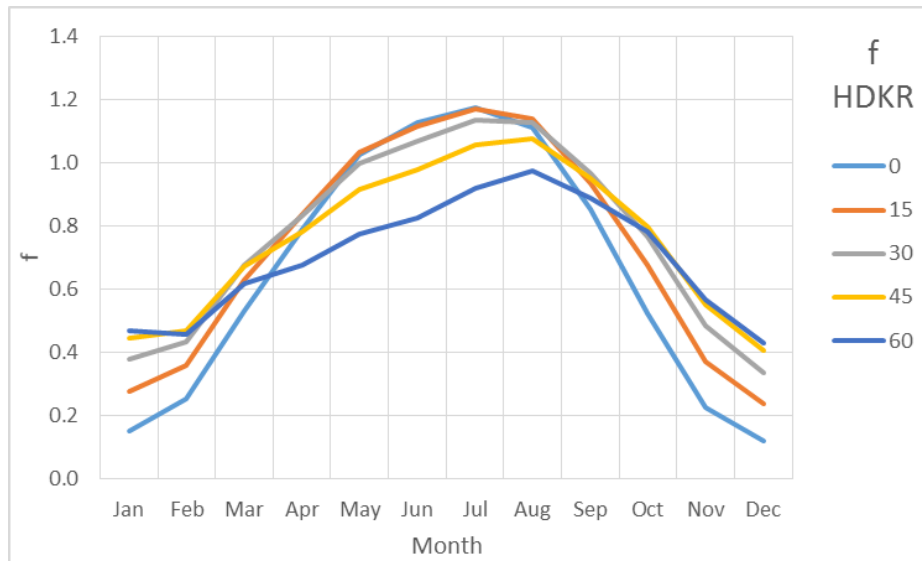
$$\bar{\varphi}_{max} Y - 0,015[\exp(3,85f) - 1][1 - \exp(-0,15X')]R_s^{0,76} - f = 0$$

Σαν αντικειμενική συνάρτηση θεωρήθηκε το άθροισμα της παραπάνω εξίσωσης για κάθε μήνα, βελτιστοποιώντας ώστε το άθροισμα αυτό να προκύπτει μηδενικό. Έτσι, τα κελιά των μεταβλητών θα δίνουν το βέλτιστο f. Οι περιορισμοί που ορίστηκαν στον επιλυτή είναι : θετικές τιμές για τα f που προκύπτουν, μηδενικό αποτέλεσμα της παραπάνω εξίσωσης για κάθε μήνα (άρα και το άθροισμα τους θα είναι μηδενικό).

### f - HDKR

β//Month	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
0	0.153	0.253	0.530	0.792	1.027	1.125	1.172	1.112	0.851	0.523	0.225	0.122
5	0.195	0.291	0.569	0.813	1.033	1.126	1.175	1.126	0.887	0.580	0.275	0.160
10	0.236	0.327	0.601	0.828	1.035	1.122	1.175	1.135	0.915	0.631	0.324	0.199
15	0.277	0.360	0.628	0.837	1.033	1.115	1.170	1.139	0.937	0.675	0.370	0.237
20	0.315	0.389	0.650	0.842	1.026	1.104	1.162	1.140	0.953	0.712	0.412	0.273
25	0.350	0.414	0.665	0.840	1.014	1.089	1.150	1.136	0.963	0.742	0.450	0.307
30	0.381	0.434	0.675	0.834	0.998	1.069	1.134	1.128	0.968	0.766	0.483	0.338
35	0.408	0.450	0.680	0.822	0.977	1.045	1.113	1.116	0.968	0.783	0.511	0.364
40	0.430	0.461	0.678	0.805	0.950	1.015	1.087	1.099	0.963	0.794	0.533	0.387
45	0.448	0.468	0.672	0.782	0.916	0.978	1.056	1.078	0.953	0.800	0.550	0.405
50	0.460	0.470	0.660	0.754	0.877	0.935	1.018	1.050	0.937	0.800	0.561	0.419
55	0.467	0.466	0.642	0.719	0.830	0.884	0.973	1.017	0.916	0.794	0.567	0.428
60	0.469	0.458	0.619	0.678	0.775	0.824	0.919	0.976	0.888	0.782	0.567	0.432

Πίνακας 5.7 : Οι βέλτιστες τιμές του ηλιακού κλάσματος της διεργασίας για κεκλιμένες επιφάνειες  $0^\circ < \beta < 60^\circ$  για κάθε μήνα του έτους, από το μοντέλο HDKR

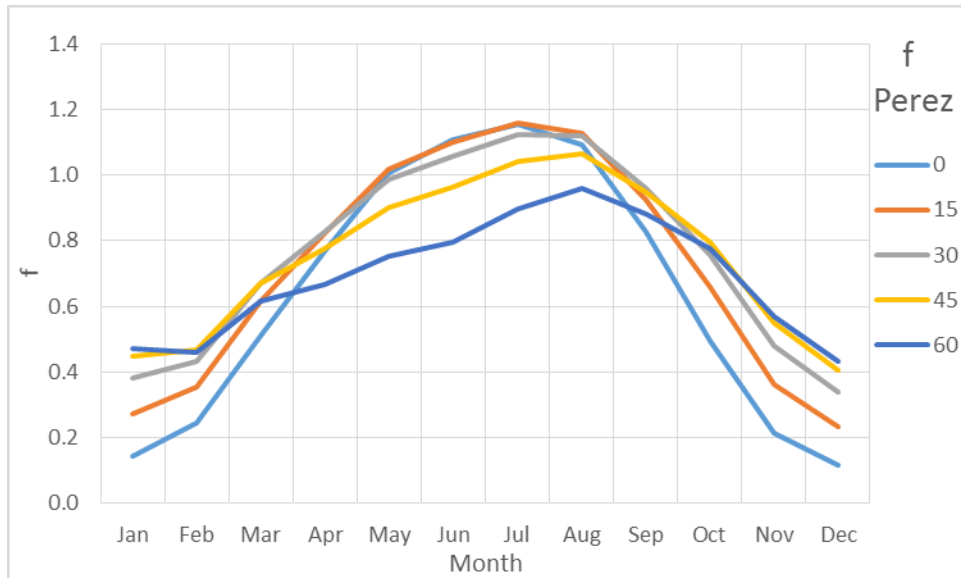


Διάγραμμα 5.4 : Οι καμπύλες του ηλιακού κλάσματος για ένα έτος υπό διαφορετική γωνία κλίσης της επιφάνειας του συλλέκτη, από το μοντέλο HDKR

### f – Perez

β//Month	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
0	0.144	0.244	0.509	0.769	1.004	1.106	1.154	1.091	0.825	0.496	0.212	0.115
5	0.187	0.284	0.552	0.794	1.014	1.108	1.159	1.108	0.865	0.558	0.264	0.154
10	0.230	0.322	0.588	0.812	1.018	1.107	1.160	1.119	0.898	0.613	0.315	0.194
15	0.272	0.356	0.618	0.824	1.017	1.101	1.156	1.126	0.922	0.660	0.363	0.233
20	0.312	0.386	0.641	0.830	1.012	1.091	1.149	1.127	0.941	0.700	0.407	0.271
25	0.348	0.412	0.659	0.830	1.001	1.076	1.137	1.125	0.953	0.732	0.446	0.306
30	0.380	0.433	0.670	0.825	0.985	1.056	1.121	1.117	0.959	0.757	0.480	0.337
35	0.407	0.450	0.675	0.814	0.964	1.031	1.100	1.105	0.960	0.776	0.509	0.365
40	0.430	0.462	0.675	0.797	0.936	0.999	1.074	1.089	0.956	0.788	0.532	0.388
45	0.448	0.469	0.669	0.774	0.902	0.961	1.041	1.066	0.946	0.794	0.549	0.406
50	0.461	0.471	0.657	0.745	0.861	0.916	1.001	1.038	0.930	0.794	0.561	0.420
55	0.468	0.468	0.639	0.710	0.812	0.861	0.953	1.003	0.909	0.788	0.567	0.429
60	0.470	0.460	0.616	0.668	0.754	0.797	0.895	0.961	0.881	0.776	0.567	0.433

Πίνακας 5.8 : Οι βέλτιστες τιμές του ηλιακού κλάσματος της διεργασίας για κεκλιμένες επιφάνειες  $0^\circ < \beta < 60^\circ$  για κάθε μήνα του έτους, από το μοντέλο Perez



Διάγραμμα 5.5 : Οι καμπύλες του ηλιακού κλάσματος για ένα έτος υπό διαφορετική γωνία κλίσης της επιφάνειας του συλλέκτη, από το μοντέλο Perez

Στους παραπάνω πίνακες παρουσιάζονται οι τιμές που δίνει στο ηλιακό κλάσμα  $f$ , κάθε γωνία κλίσης  $\beta$  για κάθε μήνα ενός έτους, και επισημαίνονται με πράσινο χρώμα οι βέλτιστες τιμές ως προς την γωνία. Στα διαγράμματα αναλύεται η εποχική εξάρτηση του ηλιακού κλάσματος για τυπικές γωνίες κλίσης της επιφάνειας του συστήματος σε 0, 15, 30, 45 και 60 μοίρες για κάθε μέθοδο ξεχωριστά.

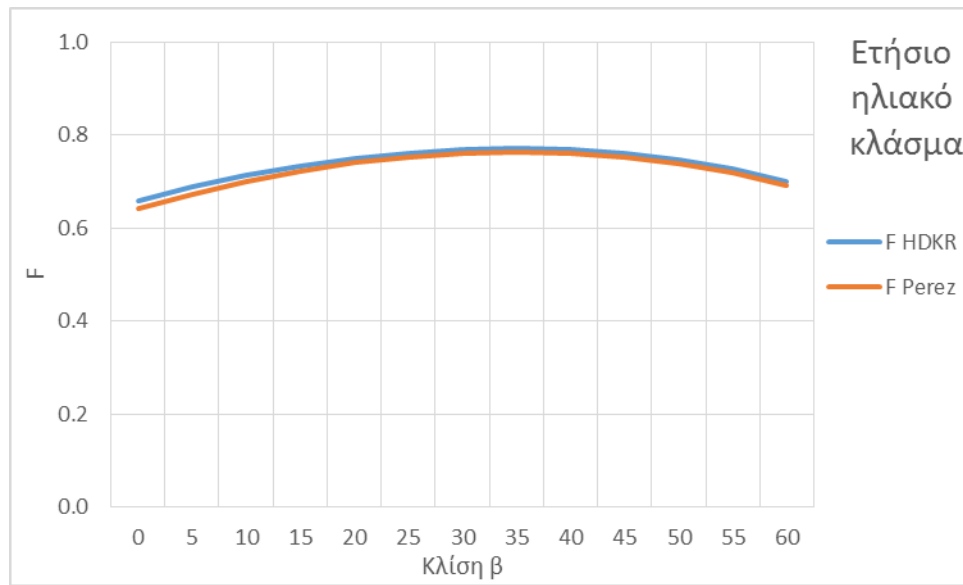
Από την εξίσωση [3.3.11] θα υπολογιστεί το ετήσιο ηλιακό κλάσμα  $F$  για τις τιμές του απαιτούμενου θερμικού φορτίου κατά την πάροδο ενός έτους. Το συνολικό φορτίο που απαιτεί η διεργασία σε ένα έτος είναι το άθροισμα του απαιτούμενου φορτίου για κάθε μήνα ξεχωριστά, ενώ ο αριθμητής είναι το άθροισμα των γινομένων  $f \times L$  για κάθε μήνα :

$$F = \frac{\sum f \times L}{\sum L}$$

Στον πίνακα παρουσιάζονται τα αθροίσματα της παραπάνω εξίσωσης και τα συνολικά ετήσια ηλιακά κλάσματα, εξετάζοντας για γωνία κλίσης της επιφάνειας του συλλέκτη  $0^\circ < \beta < 60^\circ$ . Με κίτρινο χρώμα επισημαίνονται η γωνίες που δίνουν το βέλτιστο  $F$  και με πράσινο εκείνες με την 2<sup>η</sup> και 3<sup>η</sup> υψηλότερη τιμή :

$\beta$ //Annual Sum	f*L HDKR	f*L Perez	L	F HDKR	F Perez
0	207.96	202.30	315.36	0.659	0.641
5	216.99	212.21	315.36	0.688	0.673
10	224.83	220.79	315.36	0.713	0.700
15	231.38	227.95	315.36	0.734	0.723
20	236.58	233.62	315.36	0.750	0.741
25	240.34	237.76	315.36	0.762	0.754
30	242.62	240.30	315.36	0.769	0.762
35	243.34	241.20	315.36	0.772	0.765
40	242.45	240.38	315.36	0.769	0.762
45	239.85	237.76	315.36	0.761	0.754
50	235.46	233.24	315.36	0.747	0.740
55	229.17	226.70	315.36	0.727	0.719
60	220.87	218.02	315.36	0.700	0.691

Πίνακας 5.9 : Τα ετήσια αθροίσματα του γινομένου  $f \times L$  και του φορτίου  $L$  για  $0^\circ < \beta < 60^\circ$  και τα ετήσια ηλιακά κλάσματα που προκύπτουν για αυτές τις γωνίες



Διάγραμμα 5.6 : Η μεταβολή του ετήσιου ηλιακού κλάσματος συναρτήσει της κλίσης  $\beta$

Αναλύοντας περαιτέρω τα αποτελέσματα για  $30^\circ < \beta < 40^\circ$  ανά  $1^\circ$  το βέλτιστο  $F$  προκύπτει για  $\beta = 35^\circ$

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με τους υπολογισμούς επιτεύχθηκε η μελέτη της συμπεριφοράς ενός ηλιακού θερμικού συστήματος υπό συγκεκριμένες και μεταβαλλόμενες μεταβλητές σχεδιασμού. Μέσω αυτών των αποτελεσμάτων επιτυγχάνεται η ποσοτική εκτίμηση και αξιολόγηση των ποσών μεταφερόμενης θερμότητας σε σύστημα που βρίσκεται σε συγκεκριμένη τοποθεσία.

Αρχικά, υπολογίστηκε η μέση μηνιαία προσπίπτουσα ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια ( $\bar{H}_T$ ) για τις καιρικές συνθήκες και το γεωγραφικό πλάτος της Αθήνας. Αυτή η ανάλυση επέτρεψε την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της γωνίας υπό την οποία λειτουργεί η κεκλιμένη επιφάνεια του συστήματος. Η γωνία αυτή (κλίση) εμφανίζει βέλτιστες τιμές για την μέση ημέρα του κάθε μήνα και διαφοροποιείται εποχιακά. Συγκεκριμένα, τους καλοκαιρινούς μήνες, η βέλτιστη γωνία τοποθέτησης των επιφανειών είναι μικρή, μέχρι  $10^\circ$ , ενώ για τους χειμερινούς μήνες η βέλτιστη απορρόφηση ενέργειας πραγματοποιείται σε μεγαλύτερες γωνίες, κοντά στις  $60^\circ$ . Τις ενδιάμεσες εποχικές περιόδους (άνοιξη και φθινόπωρο) τα βέλτιστα επίπεδα απορρόφησης εμφανίζονται για γωνίες ενδιάμεσες των ακραίων του καλοκαιριού και χειμώνα.

Επειδή η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της μέσης μηνιαίας ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια βασίζεται αποκλειστικά σε μηνιαίες τιμές, είναι πιθανό να αποκλίνει σημαντικά από τα πραγματικά ποσά. Για το λόγο αυτό, θεωρήθηκε κρίσιμη η εξέταση των αποτελεσμάτων αυτών σε ημερήσια κλίμακα έτσι ώστε να εξεταστεί η συνέπεια των υπολογισμών. Η μετατροπή των αποτελεσμάτων από την μέση μηνιαία ακτινοβολία κεκλιμένης επιφάνειας σε ημερήσια δεδομένα, δίνει την δυνατότητα να εξεταστούν τα ποσά της προσπίπτουσας ακτινοβολίας κατά την πάροδο μίας ημέρας (της μέσης ημέρας του μήνα). Έτσι προέκυψε η μεταβολή των ποσών της προσπίπτουσας ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας της ημέρας και του μήνα. Οι τιμές αυτές βρέθηκε ότι αυξάνονται όσο πλησιάζει η ώρα της ηλιακής μεσημβρίας, δίνοντας τις μέγιστες τιμές γι' αυτή την χρονική περίοδο καθώς και εποχιακή αύξηση με μέγιστες τιμές αυτές του καλοκαιριού.

Έπειτα, αξιοποιήθηκαν τα δύο βασικά μοντέλα που δίνονται στην βιβλιογραφία για την εκτίμηση των επιπέδων της ωριαίας ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια, αυτές που αντιστοιχούν στα μοντέλα HDKR και Perez. Η χρήση και των δύο μεθόδων δίνει την δυνατότητα να επιβεβαιωθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Οι εκτιμήσεις που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους δεν έχουν σημαντικές διαφορές και η απόκλιση των αποτελεσμάτων κυμαίνεται μεταξύ 1-10%. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται στις εκτιμήσεις για τους καλοκαιρινούς μήνες μέχρι 7% ενώ οι μικρότερες αποκλίσεις αφορούν τους χειμερινούς μήνες μέχρι 3%. Η αρχική πρόβλεψη ότι η μέθοδος Perez θα δώσει ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές, δεν επαληθεύεται. Από την άλλη μεριά όμως, η βέλτιστη γωνία λειτουργίας των επιφανειών του συστήματος για κάθε μήνα όπως αναλύθηκε, δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές και στις περισσότερες περιπτώσεις ταυτίζεται.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου  $\bar{\varphi}$ -f chart, προς απλοποίηση των υπολογισμών, κρίθηκε απαραίτητο να γίνουν κάποιες παραδοχές και να προσδιοριστούν τυπικές τιμές σε κάποιες παραμέτρους που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του συλλέκτη. Σε οποιοδήποτε θερμικό σύστημα με διαφορετικούς συλλέκτες οι τιμές αυτές θα διαφοροποιηθούν και συνεπώς αναλόγως και οι τιμές των συντελεστών που συνδέονται με το ελάχιστο κρίσιμο επίπεδο ωριαίας ακτινοβολίας. Επίσης, ο λόγος της επιφάνειας του συλλέκτη προς το απαιτούμενο θερμικό φορτίο της διεργασίας ασκεί άμεση επίδραση στα

αποτελέσματα. Για το απαιτούμενο φορτίο θεωρήθηκε πως η διεργασία λειτουργεί για 12 ώρες κάθε ημέρα του χρόνου. Αυτό εξαρτάται αποκλειστικά από τον σχεδιασμό της λειτουργίας της διεργασίας και συνεπώς για λιγότερες ώρες ή ημέρες λειτουργίας το ποσό του απαιτούμενου θερμικού φορτίου θα είναι αντιστοίχως μικρότερο. Στο θερμικό φορτίο που απαιτείται από την διεργασία, συνυπολογίζονται και οι θερμικές απώλειες που θα έχει το σύστημα. Για τους υπολογισμούς που έγιναν όμως θεωρήθηκε πως οι απώλειες αυτές είναι μηδενικές, κατά συνέπεια είναι αναμενόμενη μια υπερεκτίμηση στην τιμή του ηλιακού κλάσματος  $f$ . Ο λόγος της θερμικής χωρητικότητας αποθήκευσης ορίστηκε σε τιμή μονάδας, όμως μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τον σχεδιασμό του συστήματος. Για μεγαλύτερες τιμές του λόγου χωρητικότητας, αναμένεται μεγαλύτερο  $f$  σύμφωνα με την βιβλιογραφία. Τέλος, η ελάχιστη απαιτούμενη θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος είναι ακόμη μία μεταβλητή σχεδιασμού που επηρεάζει τις υπολογιζόμενες τιμές του  $f$ . Είναι γνωστό από την βιβλιογραφία πως για μικρότερες θερμοκρασιακές απαιτήσεις το ηλιακό κλάσμα  $f$  θα λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές. Συμπερασματικά όλες οι παραπάνω παράμετροι επηρεάζουν τα αποτελέσματα των υπολογισμών και συνεπώς για να πραγματοποιηθεί ο προσδιορισμός της βέλτιστης γωνίας λειτουργίας του συστήματος θα πρέπει να αφορά συγκεκριμένο σύστημα.

Οι καμπύλες του  $f$  που προέκυψαν από τους υπολογισμούς δίνουν αποτελέσματα που διαφέρουν 0.1-1% μεταξύ των μοντέλων HDKR και Perez.

Επειδή οι τιμές του  $f$  αντιπροσωπεύουν τον λόγο της ηλιακής ενέργειας που τροφοδοτεί το θερμικό σύστημα προς το απαιτούμενο θερμικό φορτίο, όσο πιο κοντά είναι οι τιμές στη μονάδα τόσο πιο αποδοτικό είναι το σύστημα. Πιθανές τιμές μεγαλύτερες της μονάδας σημαίνουν πως υπάρχει περίσσεια θερμικής ενέργειας ως προς το απαιτούμενο θερμικό φορτίο του κάθε μήνα. Οι ετήσιες καμπύλες  $f$  επιβεβαιώνουν τις βέλτιστες γωνίες κλίσης της επιφάνειας των συλλεκτών που αναλύθηκαν κατά τους υπολογισμούς του ημερήσιου συνόλου ωριαίας ακτινοβολίας για την μέση ημέρα ανά μήνα.

Με βάση τους πίνακες που προέκυψαν για το ηλιακό κλάσμα, μπορούν να προταθούν οι βέλτιστες γωνίες κλίσης της επιφάνειας για κάθε μήνα που λειτουργεί το θερμικό σύστημα, έτσι ώστε να υπάρχει η μέγιστη δυνατή απορρόφηση ηλιακής ενέργειας που προσφέρεται στο σύστημα.

Ιανουάριος ≈60°	Φεβρουάριος ≈50°	Μάρτιος ≈35°	Απρίλιος ≈20°	Μάιος ≈10°	Ιούνιος ≈5°
Ιούλιος ≈10°	Αύγουστος ≈20°	Σεπτέμβριος ≈35°	Οκτώβριος ≈50°	Νοέμβριος ≈60°	Δεκέμβριος ≈60°

Στην περίπτωση του σχεδιασμού ενός συστήματος που η επιφάνεια του συλλέκτη θα πρέπει να τοποθετηθεί σε μία συγκεκριμένη και σταθερή γωνία, θα πρέπει να υπολογιστεί το ετήσιο ηλιακό κλάσμα  $F$  και να οριστεί η βέλτιστη γωνία που θα το μεγιστοποιεί. Συγκεκριμένα για το σύστημα που σχεδιάστηκε, το ετήσιο ηλιακό κλάσμα δίνει βέλτιστη τιμή για γωνία 35°.



## 6. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

- [1.1.1] σελ.8  $G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365}\right)$
- [1.1.2] σελ.10  $Solar\ time - Standard\ time = 4(L_{st} - L_{loc}) + E$
- [1.2.1] σελ.12  $\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284+n}{365}\right)$
- [1.2.2] σελ.13  $\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega$
- [1.2.3] σελ.13  $\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma)$
- [1.2.4] σελ.13  $\cos \theta = -\sin \delta \cos \varphi \cos \gamma + \cos \delta \sin \varphi \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \gamma \sin \omega$
- [1.2.5] σελ.13  $\cos \theta_z = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta$
- [1.2.6] σελ.13  $\cos \theta = \cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta$
- [1.2.7] σελ.14  $\cos \omega_s = -\frac{\sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta} = -\tan \varphi \tan \delta$
- [1.2.8] σελ.15  $R_b = \frac{G_{b,T}}{G_b} = \frac{G_{b,n} \cos \theta}{G_{b,n} \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$
- [1.2.9] σελ.15  $R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta}$
- [1.2.10] σελ.15  $R_{b,moon} = \frac{\cos |\varphi - \delta - \beta|}{\cos |\varphi - \delta|}$  ή  $R_{b,moon} = \frac{\cos |-\varphi + \delta - \beta|}{\cos |-\varphi + \delta|}$
- [1.2.11] σελ.16  $G_o = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365}\right) \cos \theta_z$
- [1.2.12] σελ.16  $G_o = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365}\right) \times (\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta)$
- [1.2.13] σελ.16  $H_o = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365}\right) \times \left(\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \varphi \sin \delta\right)$
- [1.2.14] σελ.17  $I_o = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365}\right) \times [\cos \varphi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \varphi \sin \delta]$
- [1.3.1] σελ.17  $\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o}$
- [1.3.2] σελ.18  $K_T = \frac{H}{H_o}$
- [1.3.3] σελ.18  $k_T = \frac{I}{I_o}$
- [1.3.4] σελ.20  $\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,0 - 0,09k_T, & k_T \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604k_T + 4,388k_T^2, & 0,22 \leq k_T \leq 0,80 \\ 0,165, & k_T > 0,8 \end{cases}$

[1.3.5] σελ.21      Για  $\omega_s \leq 81,4^\circ$  :

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 1,0 - 0,2727K_T + 2,4495K_T^2 - 11,9514K_T^3 + 9,3879K_T^4, & K_T < 0,715 \\ 0,143, & K_T \geq 0,715 \end{cases}$$

Για  $\omega_s > 81,4^\circ$  :

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 1,0 + 0,2832K_T - 2,5557K_T^2 + 0,8448K_T^3, & K_T < 0,722 \\ 0,175, & K_T \geq 0,722 \end{cases}$$

[1.3.6] σελ.22      Για  $\omega_s \leq 81,4^\circ$  και  $0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8$

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,391 - 3,560\bar{K}_T + 4,189\bar{K}_T^2 - 2,137\bar{K}_T^3$$

Για  $\omega_s > 81,4^\circ$  και  $0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8$

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,311 - 3,022\bar{K}_T + 3,427\bar{K}_T^2 - 1,821\bar{K}_T^3$$

[1.3.7] σελ.22       $r_t = I/H$

[1.3.8] σελ.23       $r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s}$

[1.3.9] σελ.23       $a = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60^\circ)$  και  $b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 60^\circ)$

[1.3.10] σελ.23       $r_d = I_d/H_d$

[1.3.11] σελ.24       $r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s}$

[1.4.1] σελ.26       $I_T = I_{T,b} + I_{T,d,iso} + I_{T,d,es} + I_{T,d,hz} + I_{T,refl}$

[1.4.2] σελ.26       $A_c I_T = I_b R_b A_c + I_{d,iso} A_s F_{s-c} + I_{d,cs} R_b A_c + I_{d,hz} A_{hz} F_{hz-c} + \sum_i I_i \rho_i A_i F_{i-c}$

[1.4.3] σελ.27       $I_T = I_b R_b + I_{d,iso} F_{c-s} + I_{d,cs} R_b + I_{d,hz} F_{c-hz} + I \rho_g F_{c-g}$

[1.4.4] σελ.27       $R = \frac{I_T}{I}$

[1.4.5] σελ.27       $I_T = I_b R_b + I_d \left( \frac{1+\cos \beta}{2} \right) + I \rho_g \left( \frac{1-\cos \beta}{2} \right)$

[1.4.6] σελ.27       $R = \frac{I_T}{I} = \frac{I_b}{I} R_b + \frac{I_d}{I} \left( \frac{1+\cos \beta}{2} \right) + \rho_g \left( \frac{1-\cos \beta}{2} \right)$

[1.4.7] σελ.28       $I_{d,T} = I_{T,d,iso} + I_{T,d,cs} = I_d \left[ (1 - A_i) \left( \frac{1+\cos \beta}{2} \right) + A_i R_b \right]$

[1.4.8] σελ.28       $A_i = \frac{I_{bn}}{I_{on}} = \frac{I_b}{I_o}$

[1.4.9] σελ.29       $I_T = (I_b + I_d A_i) R_b + I_d (1 - A_i) \left( \frac{1+\cos \beta}{2} \right) + I \rho_g \left( \frac{1-\cos \beta}{2} \right)$

[1.4.10] σελ.29

$$f = \sqrt{I_b/I}$$

[1.4.11] σελ.29

$$I_{d,T} = I_d \left\{ (1 - A_i) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[ 1 + f \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right] + A_i R_b \right\}$$

[1.4.12] σελ.29

$$I_T = (I_b + I_d A_i) R_b + I_d (1 - A_i) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[ 1 + f \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right] + I \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

[1.4.13] σελ.29

$$I_{d,T} = I_d \left[ (1 - F_1) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin \beta \right]$$

[1.4.14] σελ.29

$$a = \max(0, \cos \theta) \text{ και } b = \max(\cos 85^\circ, \cos \theta_z)$$

[1.4.15] σελ.30

$$\varepsilon = \frac{I_d + I_{b,n} + 5,535 \times 10^{-6} \theta_z^3}{I_d + 5,535 \times 10^{-6} \theta_z^3}$$

[1.4.16] σελ.30

$$\Delta = m \frac{I_d}{I_{on}}$$

[1.4.17] σελ.30

$$F_1 = \max \left[ 0, \left( f_{11} + f_{12} \Delta + \frac{\pi \theta_z}{180} f_{13} \right) \right]$$

[1.4.18] σελ.30

$$F_2 = (f_{21} + f_{22} \Delta + \frac{\pi \theta_z}{180} f_{23})$$

[1.4.19] σελ.31

$$I_T = I_b R_b + I_d (1 - F_1) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_d F_1 \frac{a}{b} + I_d F_2 \sin \beta + I \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

[1.4.20] σελ.31

$$\bar{H}_T = \bar{H}_b \bar{R}_b + \bar{H}_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \bar{H} \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

[1.4.21] σελ.31

$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} = \left( 1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \right) \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

[1.4.22] σελ.32

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + \frac{\pi}{180} \omega'_s \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega'_s + \frac{\pi}{180} \sin \varphi \sin \delta}$$

[1.4.23] σελ.32

$$\omega'_s = \min \left[ \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta), \cos^{-1}(-\tan(\varphi - \beta) \tan \delta) \right]$$

[3.1.1] σελ.38

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

[3.1.2] σελ.38

$$Y = \frac{A_c F'_R (\bar{\tau} \alpha) \bar{H}_T N}{L}$$

[3.1.3] σελ.39

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

[3.1.4] σελ.39

$$Y = F_R (\tau \alpha)_n \times \frac{F'_R}{F_R} \times \frac{(\bar{\tau} \alpha)}{(\tau \alpha)_n} \times \bar{H}_T N \times \frac{A_c}{L}$$

[3.2.1] σελ.40

$$\varphi_h = \frac{(I_T - I_{Tc})^+}{I_T}$$

[3.2.2] σελ.41

$$\varphi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(I_T - I_{Tc})^+}{I_T}$$

[3.2.3] σελ.42

$$X_c = \frac{I_{Tc}}{I_T}$$

[3.2.4] σελ.42  $\varphi = \int_{f_c}^1 \varphi_h df$

[3.2.5] σελ.43  $Q_u = A_c F_R [I_T(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)]^+$

[3.2.6] σελ.43  $I_{T_c} = \frac{F_R U_L(T_i - T_a)}{F_R(\tau\alpha)}$

[3.2.7] σελ.43  $Q_u = A_c F_R(\tau\alpha)(I_T - I_{T_c})^+$

[3.2.8] σελ.44  $\bar{Q}_u = \frac{A_c F_R(\tau\alpha)}{N} \sum_N (I_T - I_{T_c})^+$

[3.2.9] σελ.44  $\bar{Q}_u = A_c F_R(\tau\alpha) \bar{I}_T \varphi$

[3.2.10] σελ.44  $X_c = \frac{I_{T_c}}{\bar{I}_T} = \frac{F_R U_L(T_i - T_a)}{F_R(\tau\alpha) n \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} \bar{I}_T}$

[3.2.11] σελ.44  $\bar{\varphi} = \frac{\sum_{days} \sum_{hours} (I_T - I_{T_c})^+}{\bar{H}_T N}$

[3.2.12] σελ.46  $R_n = \left(\frac{I_T}{I}\right)_n = \left(1 - \frac{r_{d,n} H_d}{r_{t,n} H}\right) R_{b,n} + \left(\frac{r_{d,n} H_d}{r_{t,n} H}\right) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right)$

[3.2.13] σελ.46  $\bar{X}_c = \frac{I_{T_c}}{r_{t,n} R_n \bar{H}}$

[3.2.14] σελ.46  $\bar{\varphi} = \exp \left\{ \left[ a + b \left(\frac{R_n}{R}\right) \right] \left[ \bar{X}_c + c \bar{X}_c^2 \right] \right\}$

[3.2.15] σελ.46  $a = 2,943 - 9,271 \bar{K}_T + 4,031 \bar{K}_T^2$   
 $b = -4,345 + 8,853 \bar{K}_T - 3,602 \bar{K}_T^2$   
 $c = -0,170 - 0,306 \bar{K}_T + 2,936 \bar{K}_T^2$

[3.2.16] σελ.48  $I_{T_c} = \frac{F_R U_L(T_i - \bar{T}_a)}{F_R(\tau\alpha) n \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n}}$

[3.2.17] σελ.48  $\sum Q_u = A_c F_R(\tau\alpha) \bar{H}_T \bar{\varphi}$

[3.2.18] σελ.48  $\bar{X}_c = \frac{I_{T_c}}{r_{t,n} R_n \bar{H}} = \frac{F_R U_L(T_i - \bar{T}_a)}{r_{t,n} R_n \bar{K}_T \bar{H}_o}$

[3.3.1] σελ.49  $\sum Q_u = A_c F_R(\tau\alpha) \bar{H}_T \bar{\varphi}_{max}$

[3.3.2] σελ.49  $\bar{X}_{c,min} = \frac{F_R U_L(T_{min} - \bar{T}_a) / F_R(\tau\alpha)}{r_{t,n} R_n \bar{K}_T \bar{H}_o}$

[3.3.3] σελ.49  $\bar{\varphi}_{max} Y = \bar{\varphi}_{max} \frac{A_c F_R(\tau\alpha) \bar{H}_T N}{L}$

[3.3.4] σελ.49  $X' = \frac{A_c F_R U_L(100) \Delta t}{L}$

[3.3.5] σελ.50  $f = \bar{\varphi}_{max} Y - 0,015 [\exp(3,85f) - 1] [1 - \exp(-0,15X')] R_s^{0,76}$

[3.3.6] σελ.50	$R_s = \frac{350}{M c_p / A_c}$
[3.3.7] σελ.51	$L_{tot} = L + Q_s$
[3.3.8] σελ.51	$Q_{st} = (UA)_s (\bar{T}_s - \bar{T}_a) \Delta t$
[3.3.9] σελ.51	$L = L_{req} \Delta t_h$
[3.3.10] σελ.51	$f_{total} = \frac{L_s + Q_{st}}{L_0 + Q_{st}}$
[3.3.11] σελ.52	$F = \frac{\Sigma f \times L}{\Sigma L}$

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Robinson N., Solar Radiation, Elsevier, Amsterdam, (1966)
- [2] Thomas R. N., “Features of the Solar Spectrum as Imposed by the Physics of the Sun”, Transactions of the Conference on Use of Solar Energy Vol.1, University of Arizona Press, Tuscon, (1958)
- [3] Iqbal M., An Introduction to solar radiation, Academic, Toronto, (1983)
- [4] Thekaekara M. P.,”Solar radiation measurement: Techniques and Instrumentation”, Solar Energy **18**, (1976): 309
- [5] Thekaekara M. P., Drummond A. J., “Standard values for the solar constant and its spectral components”, Natl. Phys. Sci. **229**, (1971): 6
- [6] Frohlich C., “Contemporary Measures of the Solar Constant”, The Solar Output and Its Variation, Colorado Associated University Press, (1977)
- [7] Spencer J. W., “Fourier Series Representation of the Position of the Sun”, Search **2** (5), (1971): 172
- [8] Kondratyev K. Y., Radiation in the Atmosphere, Academic, New York, (1969)
- [9] Benford F. and Bock J. E., “A Time Analysis of Sunshine”, Trans. Am. Illumin. **34**, (1939):200
- [10] Cooper P. I., “The Absorption of Solar Radiation in Solar Stills”, Solar Energy **12**, (1969): 3
- [11] Klein S. A., “Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces”, Solar Energy **19**, (1977): 325
- [12] Whillier A., “Solar Radiation Graphs”, Solar Energy **9**, (1965): 164
- [13] Whillier A., Personal communications, (1975) & (1979)
- [14] Hottel H. C. and Woertz B. B., “Performance of Flat-Plate Solar Heat Collectors, Trans. ASME **64**, (1942): 91
- [15] Coulson K. L., Solar and Terrestrial Radiation, Academic, New York, (1975)
- [16] Liu B. Y. H. and Jordan R. C., “The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation”Solar Energy **4** (3), (1960): 1
- [17] Whillier A., “The Determination of Hourly Values of Total Radiation from Daily Summations”, Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. B **7**, (1956): 197
- [18] Reindl D. T., ”Estimating Diffuse Radiation on Horizontal Surfaces and Total Radiation on Tilted Surfaces”, M.S. Thesis, Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison, (1988)
- [19] Reindl D. T., Beckman W. A., Duffie J.A., “Diffuse Fraction Correlations”, Solar Energy **45**, (1990a): 1
- [20] Erbs D. G., Klein S. A., Duffie J. A., “Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily, and Monthly-Average Global Radiation”, Solar Energy **28**, (1982): 293

- [21] Orgill J. F., Hollands K. G., “Correlation Equation for Hourly Diffuse Radiation on a Horizontal Surface, *Solar Energy* **19**, (1977): 357
- [22] Collares-Pereira M., Rabl A., “The Average Distribution of Solar Radiation-Correlations between Diffuse and Hemispherical and Between Daily and Hourly Insolation Values”, *Solar Energy* **22**, (1979a): 155
- [23] Kondrayev K. Y., *Actinometry*, NASA TT F-9712, (1965) also *Radiation in the Atmosphere*, Academic, New York, (1969)
- [24] Perez R., Stewart R., Seals R., Guertin T., “The Development and Verification of the Perez Diffuse Radiation Model”, Sandia National Laboratories Contractor Report SAND88-7030, (1988)
- [25] Liu B. Y. H., Jordan R. C., “The long Term Average Performance of Flat-Plate Solar Energy Collectors”, *Solar Energy* **7**, (1963): 53
- [26] Reindl D. T., Beckman W. A., Duffie J. A., “Evaluation of Hourly Titled Surface Radiation Models, *Solar Energy* **45**, (1990b): 9
- [27] Temps R. C., Coulson K. L., “Solar Radiation Incident Upon Slopes of Different Orientations”, *Solar Energy* **19**, (1977): 179
- [28] Klucher T. M., “Evaluating Models to Predict Insolation on Tilted Surfaces”, *Solar Energy* **23**, (1979): 111
- [29] Hay J. E., Davies J. A., “Calculation of the Solar Radiation Incident on an Inclined Surface”, Proceedings of the First Canadian Solar Radiation Data Workshop, Ministry of Supply and Services, Toronto, Canada, (1980)
- [30] Perez R., Ineichen P., Seals R., Michalsky J., Stewart R., “Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance”, *Solar Energy* **44**, (1990): 271
- [31] Liu B. Y. H., Jordan R. C., “Daily Insolation on Surfaces Tilted Toward the Equator”, *ASHRAE Journal* **3** (10), (1962): 53
- [32] Liu W., Davidson J. H., Kulaki F. A., “Thermal Characterization of Prototypical Integral Collector Storage Systems with Immersed Heat Exchangers”, *Journal Solar Energy Eng.* **127**, (2005): 22
- [33] Furbo S., Knusden S., “Low Flow SDHW Systems Based on Mantle Tanks-Recent Findings”, Proceedings of the 2004 Eurosun Conference of ISES Europe, Freiburg, Germany, (2004)
- [34] Furbo S., Vejen N. K., Shah L. J., “Thermal Performance of a Large Low-Flow Solar Heating System with a Highly Thermally Stratified Tank”, *Trans. ASME Journal, Solar Energy Eng.* **127**, (2005): 15
- [35] Buchberg H., Roulet J. R., “Simulation and Optimization of Solar Collection and Storage for House Heating”, *Solar Energy* **12**, (1968): 31
- [36] Butz L. W., Beckman W. A., Duffie J. A., “Simulation of a Solar Heating and Cooling System”, *Solar Energy* **16**, (1974): 129
- [37] Klein S. A., Cooper P. I., Freeman T. L., Beckman D. M., Beckman W. A., Duffie J. A., “Method of Simulation of Solar Processes and Its Application”, *Solar Energy* **17**, (1975): 29

- [38] Beckman W. A., Klein S. A., Duffie J. A., Solar Heating Design by the f-chart Method, Wiley-Interscience, New York, (1977)
- [39] Buckles W. E., Klein S. A., “Analysis of Solar Domestic Hot Water Heaters”, Solar Energy **25**, (1980): 417
- [40] Duffie J. A., Mitchell J. W., “f-chart Predictions and Measurements”, Trans. ASME Journal, Solar Energy Eng. **105**, (1983): 3
- [41] Klein S. A., “A Design Procedure for Solar Heating Systems”, PhD Thesis, Chemical Engineering, University of Wisconsin-Madison, (1976)
- [42] Klein S. A., Beckman W. A., Duffie J. A., “A Design Procedure for Solar Heating Systems”, Solar Energy **18**, (1976): 113
- [43] Whillier A., “Solar Energy Collection and Its Utilization for House Heating”, ScD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, (1953)
- [44] Hottel H. C., Whillier A., “Evaluation of Flat-Plate Solar Collector Performance”, Transactions of the Conference on the Use of Solar Energy, Vol. 2, Part 1, University of Arizona Press, Tucson, Arizona (1958): 74
- [45] Klein S. A., “Calculations of Flat-Plate Collector Utilizability”, Solar Energy **21**, (1978): 393
- [46] Collares-Pereira M., Rabl A., “Simple Procedure for Predicting Long Term Average Performance of nonconcentrating and concentrating Solar Collectors”, Solar Energy **23**, (1979b): 235
- [47] Klein S. A., Beckman W. A., “A Generalized Design Method for Closed-Loop Solar Energy Systems”, Solar Energy **7**, (1979): 53
- [48] S. Poles, M. Venturin, “Design and modeling the  $\phi$ -f chart method for active solar energy systems”
- [49] Connelly M.R., Giellis R., Jenson G., McMordie R., “Solar Heating a Cooling Computer Analysis-A Simplified Sizing Method for Non-Thermal Specialists”, Proc. Int. Solar Energy Soc. Conf., Winnipeg **10**, (1976): 220
- [50] J.A. Duffie, W.A. Beckman, Solar engineering of thermal processes, Solar Energy Laboratory University of Wisconsin-Madison, Wiley 4<sup>th</sup> ed. (2010)
- [51] S. Poles, M. Venturin, Design and modeling the  $\phi$ -f chart method for active solar energy systems
- [52] George J. Macris, Solar energy and sunshine hours at Athens Greece, National Observatory of Athens, Greece, (1958)
- [53] S. Kalogirou, Solar energy engineering, processes and systems, Academic Press (2009)