



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΕΙΑΣ

# «ΗΛΙΑΚΟ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ»

Φώτης Μαυροματάκης

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΠΙΚΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΝΩΣΕΩΝ ΑΠΟΦΟΙΤΩΝ

## «ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

Το πρόγραμμα συνδιοργανώνεται από:

Το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Τ.Ε.Ι. Κρήτης

Το Τμήμα Χημείας του Πανεπιστημίου Κρήτης



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ  
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Η ΠΡΑΞΗ ΥΛΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» ΚΑΙ ΣΥΓΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ (ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ – ΕΚΤ) ΚΑΙ ΑΠΟ ΕΘΝΙΚΟΥΣ ΠΟΡΟΥΣ ΕΣΠΑ 2007-2013

**Στοιχεία επικοινωνίας**

*Εισηγητής:* Φώτης Μαυροματάκης

*Εργαστήριο* Ενεργειακών και Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

*Ίδρυμα:* Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης

Laboratory for Energy and Photovoltaic Systems (LEPS)

*Τηλ:* 2810379212

*Fax:* 2810379222

*Email:* fotis@staff.teicrete.gr



**Περιεχόμενα**

Κεφάλαιο 1. Ηλιακό και Φωτοβολταϊκό Δυναμικό.....	2
1.1 Ο Ήλιος .....	2
1.2 Φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας .....	4
1.3 Συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας.....	6
1.4 Ηλιακή γεωμετρία και σκίαση.....	10
1.5 Πρότυπες συνθήκες.....	15
1.6 Φωτοβολταϊκό Δυναμικό .....	17

## Κεφάλαιο 1. Ηλιακό και Φωτοβολταϊκό Δυναμικό

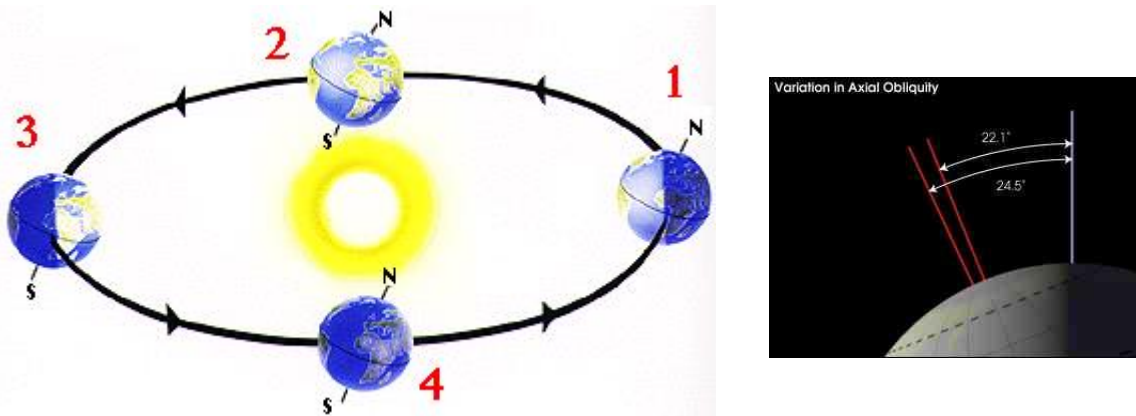
### 1.1 Ο Ήλιος

Ο ήλιος αποτελεί την πηγή ενέργειας για την ανάπτυξη εφαρμογών όπως αυτές που στηρίζονται στη μετατροπή φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια. Η κατανόηση βασικών στοιχείων του Ήλιου, της φασματικής κατανομής της ακτινοβολίας, της ηλιακής γεωμετρίας, της επίδρασης του προσανατολισμού μιας επιφάνειας στην εισερχόμενη πυκνότητα ισχύος είναι απαραίτητη για την κατανόηση και επεξεργασία ηλιακών δεδομένων.

Ο ήλιος είναι μια σφαίρα θερμών αερίων με μια μέση ακτίνα 695.000 χλμ και μια ισοδύναμη θερμοκρασία μέλανος σώματος 5800 βαθμών Kelvin. Η θερμοκρασία αυτή προκύπτει θεωρώντας ένα μέλαν σώμα που εκπέμπει την ίδια ενέργεια με τον ήλιο. Η μέση απόσταση Γης-Ήλιου ανέρχεται σχεδόν σε 150.000.00 χλμ., η μάζα του σε  $2 \cdot 10^{30}$  kg, η επιτάχυνση της βαρύτητας σε  $274 \text{ m/s}^2$  ενώ η λαμπρότητα του ανέρχεται σε  $3.85 \cdot 10^{26}$  Watt ή  $1.07 \cdot 10^{20}$  kWh/sec. Η ενέργεια παράγεται στον εσωτερικό του Ήλιου, όπου επικρατούν θερμοκρασίες μερικών εκατομμυρίων βαθμών, με τη διαδικασία της σύντηξης. Εκτιμάται ότι το 90% της ενέργειας παράγεται σε μια κεντρική περιοχή ακτίνας περίπου 160.000 χλμ. Η περιοχή αυτή περιλαμβάνει το 40% της μάζας του. Σε μια απόσταση 490.000 χλμ. από το κέντρο η θερμοκρασία έχει πέσει στους 130.000 βαθμούς ενώ στην επιφάνεια του η θερμοκρασία φθάνει του 5000 βαθμούς Kelvin.

Η τροχιά της Γης γύρω από τον Ήλιο δεν είναι κυκλική αλλά ελλειπτική με την απόκλιση από την κυκλική τροχιά να είναι σχετικά μικρή. Η απόσταση της Γης από τον Ήλιο μεγιστοποιείται κατά την περίοδο του καλοκαιριού και φθάνει το 1,01668 της μέσης απόστασης (1 αστρονομική μονάδα αντιστοιχεί σε 149.597.871 χλμ.) δηλ. έχει αυξηθεί κατά 1,67%. Αντίθετα το χειμώνα η Γη πλησιάζει τον Ήλιο και η απόσταση μειώνεται κατά το ίδιο ποσοστό ή κατά παράγοντα 0,9833. Η μεταβολή στην απόσταση φαίνεται να είναι σε αντίθεση με την κοινή διαπίστωση ότι το χειμώνα η ενέργεια που δέχεται η Γη από τον Ήλιο είναι λιγότερη από ότι το καλοκαίρι που η απόσταση είναι μεγαλύτερη. Η μεγάλη διαφορά οφείλεται στην κλίση του άξονα περιστροφής της Γης ως προς το επίπεδο της τροχιάς της που ανέρχεται σε 23,4 μοίρες. Οι εποχές οφείλονται στη διαφορά από την πλήρη καθετότητα του άξονα περιστροφής ο οποίος μεταπίπτει, όπως ο άξονας μιας σβούρας, με μια περίοδο 41.000 ετών από 22 έως 24,5 μοίρες. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1, η θέση 1 αντιστοιχεί στο χειμώνα (περιοχές που ανήκουν στο Βόρειο ημισφαίριο είναι «μακριά» από τον Ήλιο), η θέση 2 αντιστοιχεί στην Άνοιξη, η θέση 3 αντιστοιχεί στο καλοκαίρι και τέλος η θέση 4 αντιστοιχεί στο

φθινόπωρο. Στις θέσεις 1 και 3 η διάρκεια της ημέρας είναι η ελάχιστη και η μέγιστη δυνατή αντίστοιχα. Στις θέσεις 2 και 4 η διάρκεια της ημέρας είναι η ίδια και ίση με τη διάρκεια της νύκτας.



Σχήμα 1.1: Δημιουργία εποχών και κλίση άξονα περιστροφής της Γης (Πηγή: NASA)

Για ένα παρατηρητή στο νότιο ημισφαίριο οι εποχές ακολουθούν αντίθετη πορεία (Θέση 1:

καλοκαίρι, Θέση 2: φθινόπωρο, Θέση 3: χειμώνας, Θέση 4: άνοιξη). Η απόσταση της Γης από τον Ήλιο έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ενέργειας που φθάνει στα όρια της ατμόσφαιρας και κατά συνέπεια και στην επιφάνεια της Γης. Θεωρώντας ότι η ενέργεια των  $3.85 \cdot 10^{26}$  Joule ανά sec εκπέμπεται ισότροπα από μια σφαίρα ακτίνας 695.000 χλμ. και ότι η ενέργεια διατηρείται, τότε η ενέργεια που δέχεται η Γη στη μέση απόσταση προκύπτει ως εξής:

$$G_{sc} = 3.85 \cdot 10^{26} \text{ Watt} \cdot \frac{1}{4 \pi (149.600.000.000 \text{ m})^2} = 1369 \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2}$$

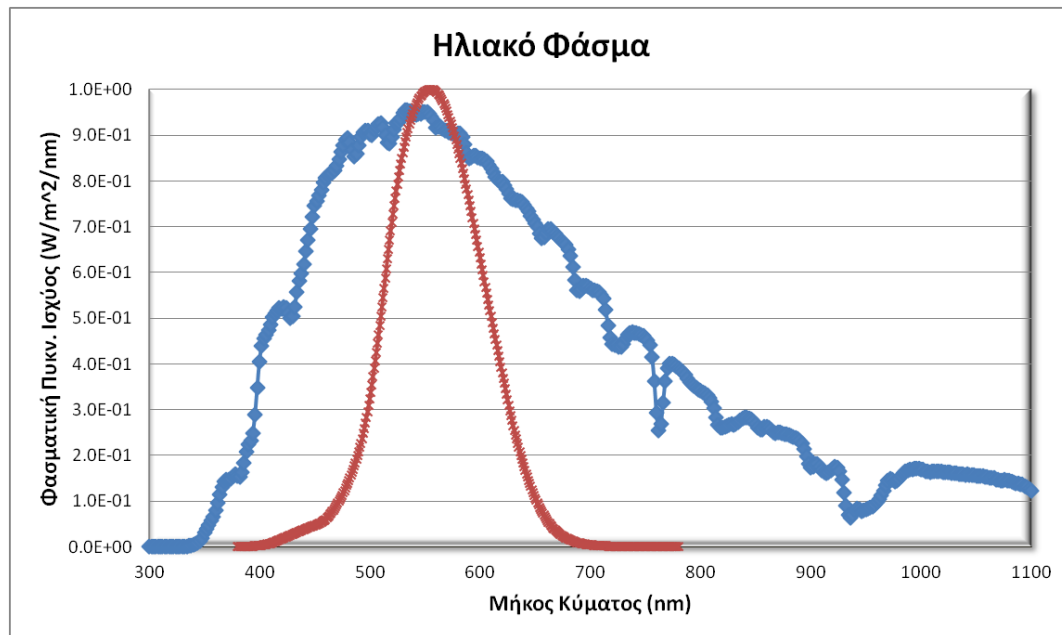
Πειραματικές μετρήσεις από δορυφόρους δείχνουν ότι μεταβάλλεται ελαφρά εξαιτίας της δραστηριότητας του Ήλιου αλλά οι τιμές παραμένουν κοντά σε αυτή την τιμή. Δεδομένα από έξι διαφορετικούς δορυφόρους δίνουν μεγέθη μεταξύ 1364 και 1374  $\text{Watt/m}^2$  (Πηγή: NOAA και World Radiation Center). Στα πλαίσια της παρούσας εκπαίδευσης θα χρησιμοποιούμε την τιμή των 1367  $\text{Watt/m}^2$  που ονομάζεται ηλιακή σταθερά ( $G_{sc}$ ) και εκφράζει την ενέργεια σε Joule που δέχεται κάθετα μια επιφάνεια  $1 \text{ m}^2$  κάθε δευτερόλεπτο. Ισοδύναμα τα 1367  $\text{Watt/m}^2$  αντιστοιχούν σε 4,92  $\text{MJ/m}^2/\text{hr}$ . Χρησιμοποιώντας την ηλιακή σταθερά είναι εύκολο να εκτιμήσουμε τη συνολική ενέργεια που λαμβάνει ένας δίσκος με ακτίνα ίση με την ακτίνα της Γης κατά τη διάρκεια ενός έτους

$$E = \pi R^2 \cdot G_{sc} \cdot 365 \cdot 24 \text{ h} = 1,5 \cdot 10^{18} \text{ kWh}$$

όταν η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση για το 2014 ανέρχεται ενδεικτικά σε  $1,5 \cdot 10^{14}$  kWh. Ο υπολογισμός είναι απλοϊκός αλλά δείχνει τις δυνατότητες που προσφέρει η ηλιακή ακτινοβολία με την κατάλληλη εκμετάλλευση της τόσο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όσο και θερμικής.

## 1.2 Φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας

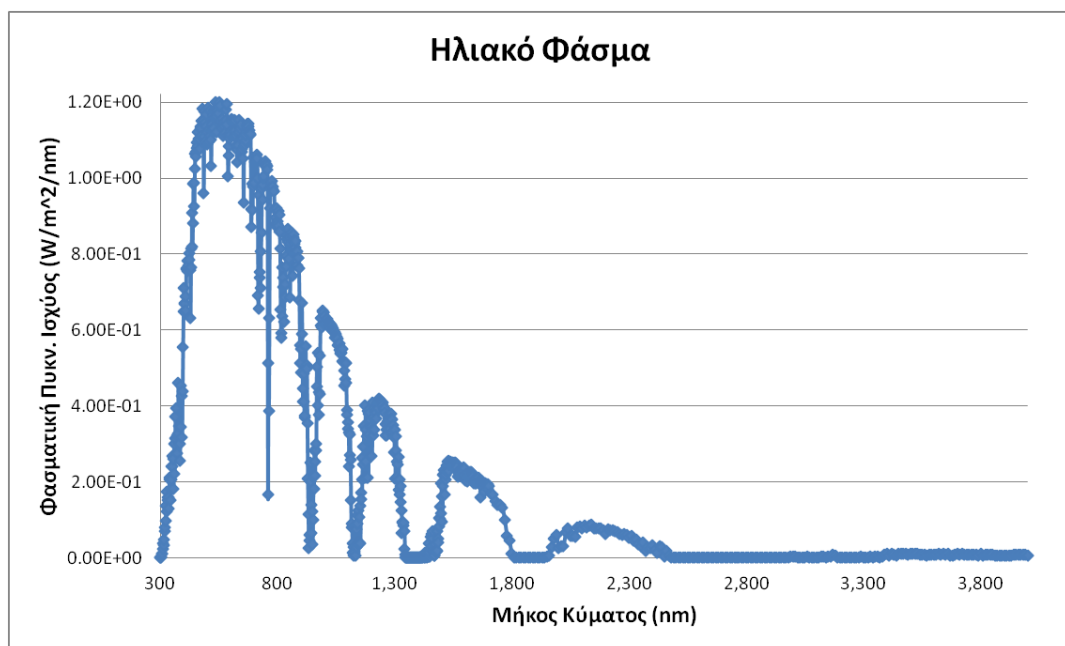
Η ηλιακή σταθερά αναφέρεται στο σύνολο των μηκών κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας που θα λάμβανε ένα αισθητήρας τοποθετημένος κάθετα στις ηλιακές ακτίνες και έξω από την ατμόσφαιρα της Γης. Όμως ιδιαίτερα για φωτοβολταϊκές εφαρμογές είναι χρήσιμο να γνωρίζουμε την κατανομή του ηλιακού φωτός σε κάθε μήκος κύματος.



Σχήμα 1.2: Τυπικό ηλιακό φάσμα και απόκριση του ανθρώπινου οφθαλμού (Πηγή: LEPS)

Το Σχήμα 1.2 δείχνει ένα τυπικό ηλιακό φάσμα της απευθείας συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας από το 300 μέχρι τα 1100 nm καταγεγραμμένο με φασματοφωτόμετρο του Εργαστηρίου Ενεργειακών και Φωτοβολταϊκών Συστημάτων. Βασικό στοιχείο που προκύπτει είναι ότι ο Ήλιος δεν εκπέμπει εξίσου σε όλα τα μήκη κύματος. Το ηλιακό φάσμα εκτείνεται μέχρι τα 8000 nm αν και σε τέτοια μήκη κύματος, η φασματική πυκνότητα ισχύος είναι πολύ μικρότερη από το μέγιστο που εμφανίζει στα 550 nm (Σχήμα 1.3). Η φασματική πυκνότητα ισχύος αναφέρεται στην ενέργεια που εκπέμπει ο ήλιος ανά μονάδα επιφάνειας ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα μήκους κύματος. Η καφέ χρώματος καμπύλη δείχνει ενημερωτικά την απόκριση του ανθρώπινου οφθαλμού κατά τη διάρκεια της ημέρας. Είναι εμφανές ότι ο ήλιος δεν εκπέμπει το ίδιο σε όλα τα μήκη κύματος. Το γεγονός αυτό είναι σημαντικό κατά την αναζήτηση υλικών που θα χρησιμοποιηθούν σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές αφού θα πρέπει να εκμεταλλεύονται περιοχές του ηλιακού φάσματος με όσο το δυνατόν υψηλότερες τιμές πυκνότητας ισχύος. Το υπεριώδες εκτείνεται από τα 100 μέχρι τα 315 nm και χωρίζεται σε τρεις υποπεριοχές (UV-A, UV-B, UV-C), το οπτικό από τα 400 μέχρι τα 780 nm και το υπέρυθρο από τα 780 nm μέχρι 10<sup>6</sup> nm και χωρίζεται σε τρεις υποπεριοχές (κοντινό, μεσαίο, μακρινό).

Τυπικές τιμές πυκνότητας ισχύος στο οριζόντιο επίπεδο στο Εργαστήριο ανέρχονται σε 800 – 900 W/m<sup>2</sup> κατά την καλοκαιρινή περίοδο. Οι τιμές είναι αρκετά χαμηλότερες από την ηλιακή σταθερά και γίνεται κατανοητό ότι η μείωση οφείλεται αφενός στη γεωμετρία αλλά και στην απορρόφηση της ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα. Απορρόφηση και σκέδαση είναι οι βασικοί μηχανισμοί που προκαλούν μείωση της ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια της Γης. Το όζον, το οξυγόνο, υδρατμοί, διοξείδιο του άνθρακα, ρύποι είναι από τα βασικά στοιχεία που απορροφούν το ηλιακό φως και τροποποιούν το φάσμα σε σχέση με αυτό εκτός της ατμόσφαιρας. Μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας προέρχεται και από τη σκέδαση (Rayleigh) που προκαλείται από σωματίδια στην ατμόσφαιρα με τυπικές διαστάσεις μικρότερες των μηκών κύματος του οπτικού φωτός. Η ένταση της σκέδασης είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος που σημαίνει ότι τα μικρότερα μήκη κύματος (τα μπλε) σκεδάζονται πιο εύκολα από τα μεγαλύτερα μήκη κύματος (τα κόκκινα).

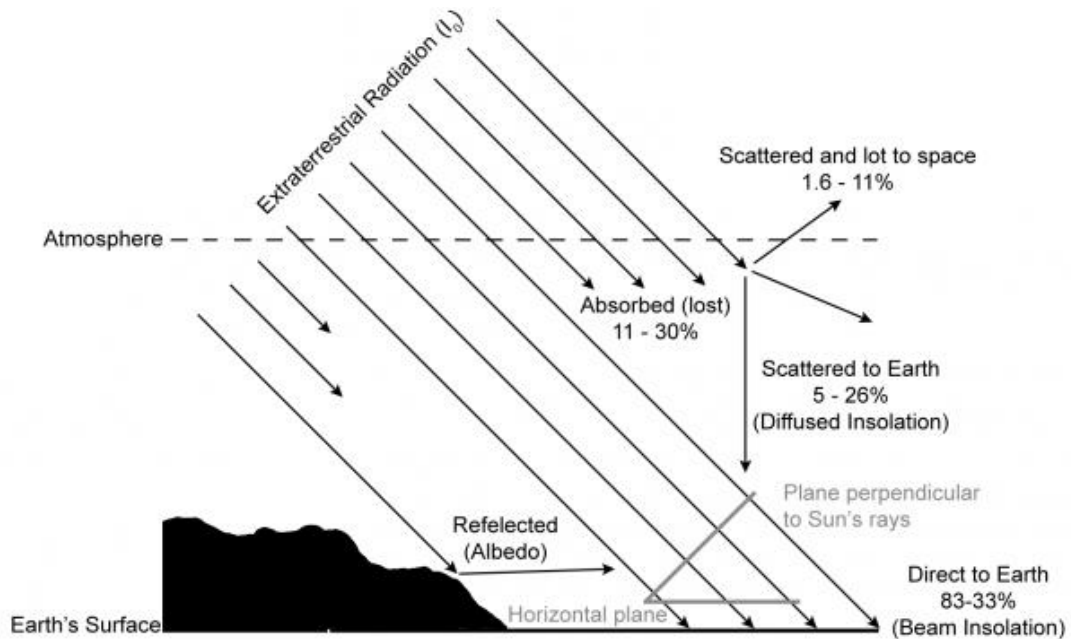


Σχήμα 1.3: Μοντέλο ηλιακού φάσματος από το υπεριώδες μέχρι το υπέρυθρο (Πηγή: LEPS)

Χρησιμοποιώντας συνολικές τιμές από ένα ημερολογιακό έτος προκύπτει ότι ένα ποσοστό 6% της εισερχόμενης πυκνότητας ισχύος σκεδάζεται από τον αέρα, τους υδρατμούς και αεροσόλ, 20% ανακλάται από νέφη ενώ ένα ποσοστό 19% απορροφάται από την ατμόσφαιρα και τα νέφη, οπότε τελικά ένα ποσοστό της τάξης του 55% φθάνει στην επιφάνεια της Γης, διαθέσιμο για ηλιακές εφαρμογές (Πηγή: NASA). Το Σχήμα 1.4 δείχνει ενδεικτικές ποσοστιαίες απώλειες και τους αντίστοιχους παράγοντες για μια οριζόντια και μια κεκλιμένη επιφάνεια κατά τη διάρκεια μιας μέρας (Πηγή: Itacanet). Τα ακριβή ποσοστά με τα οποία συνεισφέρει κάθε μηχανισμός καθορίζονται από τη σύνθεση της ατμόσφαιρας και τη θέση του Ήλιου ως προς τον παρατηρητή. Η θέση του ήλιου (ύψος



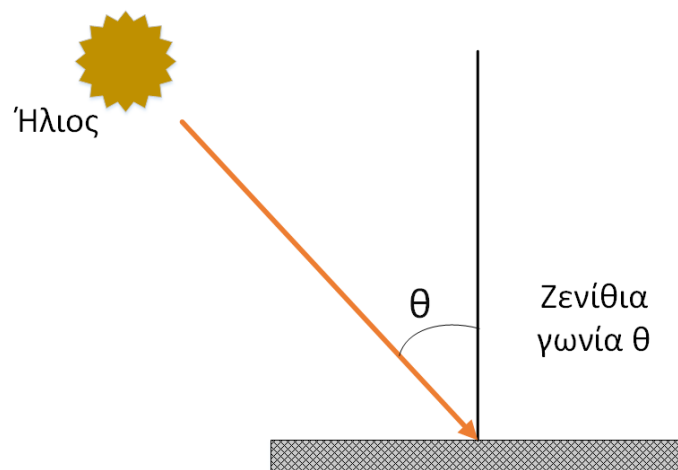
από το οριζόντιο επίπεδο) καθορίζει το μήκος της διαδρομής που θα πρέπει να διανύσει το φως για να φθάσει το συλλέκτη.



Σχήμα 1.4: Τυπικά ποσοστά απορρόφησης-σκέδασης της πυκνότητας ισχύος (Πηγή: ITACANET)

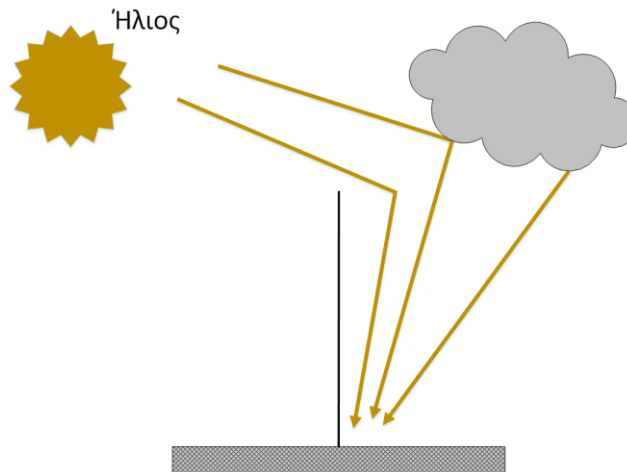
### 1.3 Συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται (λαμβάνει) μια επιφάνεια στο οριζόντιο επίπεδο αποτελείται από δύο συνιστώσες, την απευθείας και τη διάχυτη. Η απευθείας συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ουσιαστικά το φως του ήλιου που φθάνει στο συλλέκτη χωρίς καμιά αλληλεπίδραση με την ατμόσφαιρα. Για μια επιφάνεια στο οριζόντιο επίπεδο η γωνία πρόσπτωσης συμπίπτει με τη ζενίθια γωνία. Σε αυτή την περίπτωση η πυκνότητα ισχύος στο οριζόντιο επίπεδο δίνεται από τη σχέση  $BHI = BNI \cos(\theta)$  όπου BNI (Beam Normal Irradiance) η απευθείας συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας (Σχήμα 1.5). Η προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο δηλώνεται



Σχήμα 1.5: Η απευθείας συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας προβάλλεται στο οριζόντιο επίπεδο.

ως BHI (Beam Horizontal Irradiance). Η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι το φως του ήλιου που έχει υποστεί μεταβολή της διεύθυνσης του εξαιτίας της αλληλεπίδρασης του με τα συστατικά της ατμόσφαιρας. Εναλλακτικά, η διάχυτη συνιστώσα είναι το φως που προέρχεται από οπουδήποτε από την ουράνια σφαίρα εκτός της απευθείας συνιστώσας (Σχήμα 1.6).



Σχήμα 1.6: Η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο.

Το σύνολο της ηλιακής ακτινοβολίας που προκύπτει από την προβολή της απευθείας στο οριζόντιο επίπεδο και τη διάχυτη (D) ονομάζεται ολική ηλιακή ακτινοβολία (G) και δίνεται από τη σχέση  $G = BNI \cdot \cos(\theta) + D$ . Οι ποσότητες G, BNI, D εκφράζουν την πυκνότητα ισχύος της αντίστοιχης ηλιακής ακτινοβολίας με μονάδα  $W/m^2$  (ενέργεια ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας). Όταν η επιφάνεια ή ο συλλέκτης σχηματίζει μη μηδενική γωνία με το οριζόντιο επίπεδο τότε υπεισέρχεται στην ολική πυκνότητα ισχύος (στο κεκλιμένο επίπεδο) και μια νέα συνιστώσα ηλιακής ακτινοβολίας που προκύπτει από την ανάκλαση του φωτός στο έδαφος. Η προηγούμενη σχέση τότε γίνεται  $G_t = BNI \cdot \cos(\theta) + D_t$  με το δείκτη «t» να δηλώνει τις ποσότητες στο κεκλιμένο επίπεδο (tilted). Σε αυτή την περίπτωση η γωνία  $\theta$  δεν είναι πλέον η ζενίθια γωνία αλλά η γωνία πρόσπτωσης της απευθείας συνιστώσας στο κεκλιμένο επίπεδο. Ο υπολογισμός της απαιτεί γνώση της γωνιακής θέσης του ήλιου και του προσανατολισμού της επιφάνειας.

Η μελέτη του ηλιακού δυναμικού απαιτεί μετρήσεις και καταγραφή των δεδομένων για πολλά έτη ώστε τα στατιστικά στοιχεία να είναι αξιόπιστα. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι πυρανόμετρα, πυρηλιόμετρα και κυψελίδες αναφοράς. Τα πυρανόμετρα είναι όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ολικής και της διάχυτης πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας και η φασματική τους ευαισθησία είναι πρακτικά ανεξάρτητη του μήκους κύματος (Σχήμα 1.7, αριστερά). Η βασική αρχή λειτουργίας των πυρανομέτρων στηρίζεται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, στη μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική (φαινόμενο Seebeck). Ένα

Θερμοζεύγος μπορεί να παράγει μια τάση μερικών μικροβόλτ (μV) έως αρκετές δεκάδες μικροβόλτ, ανάλογα με το υλικό, για κάθε μεταβολή της θερμοκρασίας του κατά ένα βαθμό Κελσίου.



Σχήμα 1.7: Όργανα μέτρησης πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας.

Επειδή αυτή η τάση είναι σχετικά μικρή, οι κατασκευαστές πυρανομέτρων χρησιμοποιούν αρκετά θερμοζεύγη συνδεδεμένα σε σειρά για να ανέλθει η τάση εξόδου στα επίπεδα των mV. Η απορρόφηση ακτινοβολίας από τον αισθητήρα οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του γεγονός που επηρεάζεται από τον άνεμο, τη βροχή και την εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας προς το περιβάλλον. Ο αισθητήρας καλύπτεται από δύο γυάλινους θόλους υψηλής ποιότητας γυαλιού για τη μείωση των παραπάνω απωλειών. Οι δύο θόλοι δεν επηρεάζουν τη γωνιακή απόκριση του οργάνου αλλά καθορίζουν το εύρος μηκών κύματος που καταγράφουν, συνήθως από 280 έως τα 3000 nm.

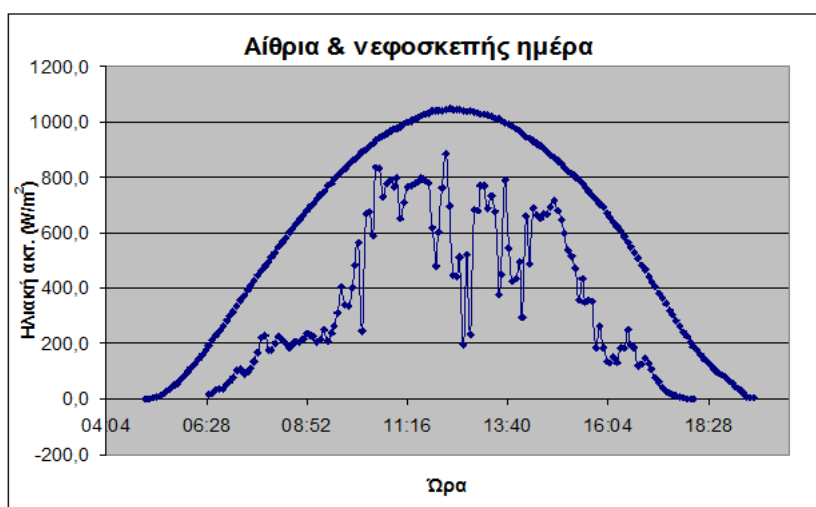
Το πυρηλιόμετρο είναι κατασκευασμένο για να μετράει μόνο την απευθείας συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας (Σχήμα 1.7, δεξιά). Ο αισθητήρας είναι αντίστοιχος ενός πυρανομέτρου αλλά είναι τοποθετημένος στη βάση ενός «σωλήνα» με οπτικό πεδίο 5° και πρέπει να είναι τοποθετημένο σε ηλιοτρόπιο ώστε να ακολουθεί με ακρίβεια τη φαινόμενη κίνηση του ήλιου. Το εύρος μηκών κύματος που καταγράφουν ξεκινά από τα 200 nm μέχρι τα 4000 nm. Τα σφάλματα σε επίπεδο στιγμιαίων τιμών ανέρχονται σε  $\pm 3\%$  για την απευθείας συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας και σε  $\pm 4\%$  για την ολική πυκνότητα ισχύος με την κατάλληλη συντήρηση και λειτουργία. Οι κυψελίδες αναφοράς (Σχήμα 1.8) χρησιμοποιούν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο ως τον αισθητήρα λήψης της ηλιακής ακτινοβολίας και κατά συνέπεια εμφανίζουν φασματική και γωνιακή απόκριση. Εκμεταλλεύονται το γεγονός ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι ανάλογο της εισερχόμενης πυκνότητας ισχύος. Έτσι είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση τους σε σχέση με τις επιπτώσεις από τη θερμοκρασία, το φάσμα και τη γωνιακή συμπεριφορά τους. Παρά τη βαθμονόμηση μια κυψελίδα αναφοράς δεν μπορεί να καταγράψει το φάσμα του ήλιου σε όλα τα μήκη κύματος αλλά μόνο σε αυτά που καθορίζονται από τις ιδιότητες του υλικού που έχει χρησιμοποιηθεί. Για παράδειγμα, το πυρίτιο επιτρέπει την καταγραφή μηκών κύματος από 300 έως 1100 nm. Το βασικό πλεονέκτημα μιας τυπικής κυψελίδας αναφοράς έγκειται στο κόστος κτήσης της

που είναι αρκετά χαμηλότερο από αυτό ενός πυρανομέτρου αλλά η ακρίβεια της είναι της τάξης του 10% ή καλύτερη.



Σχήμα 1.8: Κυψελίδα αναφοράς για τη μέτρηση της ολικής πυκνότητας ισχύος.

Πέρα από τις στιγμιαίες τιμές της πυκνότητας ισχύος είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε και τη συνολική ενέργεια που δέχεται μια επιφάνεια (π.χ. ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο). Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η πυκνότητα ισχύος εκφράζει την ενέργεια ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας τότε η ενεργειακή απολαβή είναι το ολοκλήρωμα της πυκνότητας ισχύος σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, δηλ.  $H = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} G(t)dt$ . Ο υπολογισμός της ενεργειακής απολαβής εξαρτάται από την εφαρμογή και το διάστημα ολοκλήρωσης μπορεί να ποικίλει από μερικά δευτερόλεπτα έως ημέρες, μήνες κ.λπ. Η καταγραφή των δεδομένων από ένα πυρανόμετρο γίνεται από ειδικές ηλεκτρονικές διατάξεις που επιτρέπουν την αυτόματη καταγραφή και αποθήκευση τους. Το Σχήμα 1.9 δείχνει την ολική πυκνότητα ισχύος στο οριζόντιο επίπεδο από μια αίθρια και μια συννεφιασμένη ημέρα.



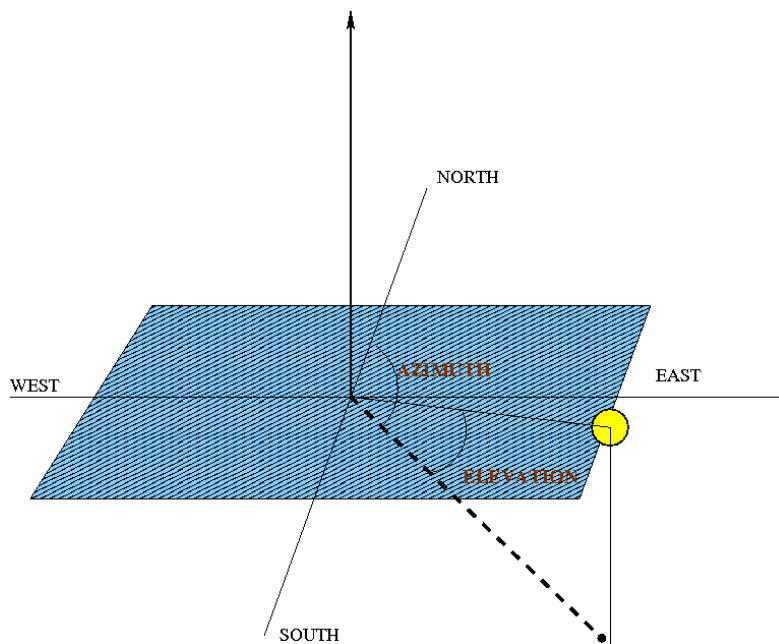
Σχήμα 1.9: Δεδομένα πυκνότητας ισχύος στο οριζόντιο επίπεδο.

Η περίοδο καταγραφής είναι πέντε λεπτά όπως φαίνεται από τα σημεία του γραφήματος. Έτσι η ενεργειακή απολαβή υπολογίζεται πλέον ως ένα άθροισμα τιμών και όχι ως ολοκλήρωμα μιας

συνάρτησης, δηλ.  $H = \sum G \delta t$ , με  $\delta t = 5 \text{ min}$ . Το άθροισμα πραγματοποιείται στο επιθυμητό χρονικό διάστημα που στην περίπτωση του Σχήματος 1.9 είναι μια ημέρα, τυπικά 24 h. Η ενεργειακή απολαβή στο κεκλιμένο επίπεδο συμβολίζεται με  $H_t$  ενώ η μονάδα της μπορεί να είναι σε  $\text{Joule/m}^2$  ή  $\text{GJ/m}^2$  ή  $\text{kWh/m}^2$  ή  $\text{MWh/m}^2$ .

#### 1.4 Ηλιακή γεωμετρία και σκίαση

Η θέση του ήλιου κάθε χρονική στιγμή είναι γνωστή με πολύ μεγάλη ακρίβεια και καθορίζεται από δύο γωνίες σε σχέση με ένα παρατηρητή στην επιφάνεια της Γης. Η πρώτη γωνία είναι το αζιμούθιο και δηλώνει τη θέση του ήλιου σε σχέση με το Βορά ( $0^\circ$ ). Είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ δύο επιπέδων, το ένα επίπεδο περιλαμβάνει τον παρατηρητή και τον άξονα Βορά-Νότου ενώ το δεύτερο επίπεδο περιλαμβάνει τον παρατηρητή και τον Ήλιο. Με αυτή τη σύμβαση η Ανατολή είναι στις  $90^\circ$ , ο Νότος στις  $180^\circ$ , η Δύση στις  $270^\circ$ , και ο Βοράς ξανά στις  $360^\circ$ . Η δεύτερη γωνία είναι το ύψος του Ήλιου και είναι η γωνία που σχηματίζει το οριζόντιο επίπεδο με την ευθεία παρατηρητή-Ήλιου και μπορεί να παίρνει τιμές στο διάστημα  $0-90^\circ$ . Το Σχήμα 1.10 δείχνει το αζιμούθιο (azimuth) και το ύψος (elevation) του Ήλιου σε σχέση με τον παρατηρητή (ή το φωτοβολταϊκό πλαίσιο) στο κέντρο.

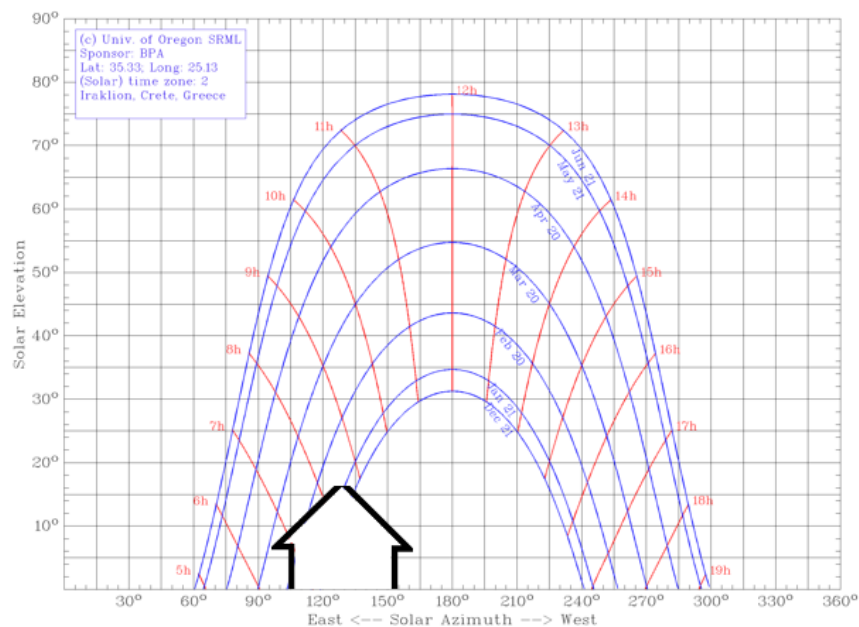


Σχήμα 1.10: Η θέση του Ήλιου ως προς ένα παρατηρητή

Ο υπολογισμός της θέσης του ήλιου κάθε χρονική στιγμή μέσα σε ένα έτος μας επιτρέπει να εκτιμήσουμε τις πιθανότητες σκίασης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος από εξωτερικούς παράγοντες (κτίρια, δέντρα, βουνά κ.λπ.). Απαιτείται ο καθορισμός των συντεταγμένων του εμποδίου στο ίδιο σύστημα με τις συντεταγμένες του Ήλιου (αζιμούθιο, ύψος). Το Σχήμα 1.11 δείχνει την τροχιά του Ήλιου μέσα σε μια ημέρα και σε διαφορετικές περιόδους μέσα σε ένα έτος. Η τοποθέτηση του

εμποδίου σε ένα τέτοιο διάγραμμα επιτρέπει να εκτιμηθούν οι απώλειες στην ενεργειακή απολαβή εξαιτίας κυρίως της απώλειας της απευθείας συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης, μειώνεται κατά μικρότερο ποσοστό και η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας αφού ο συλλέκτης «βλέπει» (ή έχει πρόσβαση) μικρότερη τμήμα της ουράνιας σφαίρας. Το ελεύθερο λογισμικό *pvgis* (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>) έχει τη δυνατότητα να λάβει υπόψη του την ύπαρξη εμποδίων στους σχετικούς υπολογισμούς ενώ εμπορικά λογισμικά έχουν τη δυνατότητα αναλυτικότερων υπολογισμών τέτοιων φαινομένων και με μεγαλύτερη χρονική διακριτικότητα.

Κατά τη σχεδίαση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος καταβάλλεται κάθε δυνατή προσπάθεια για την

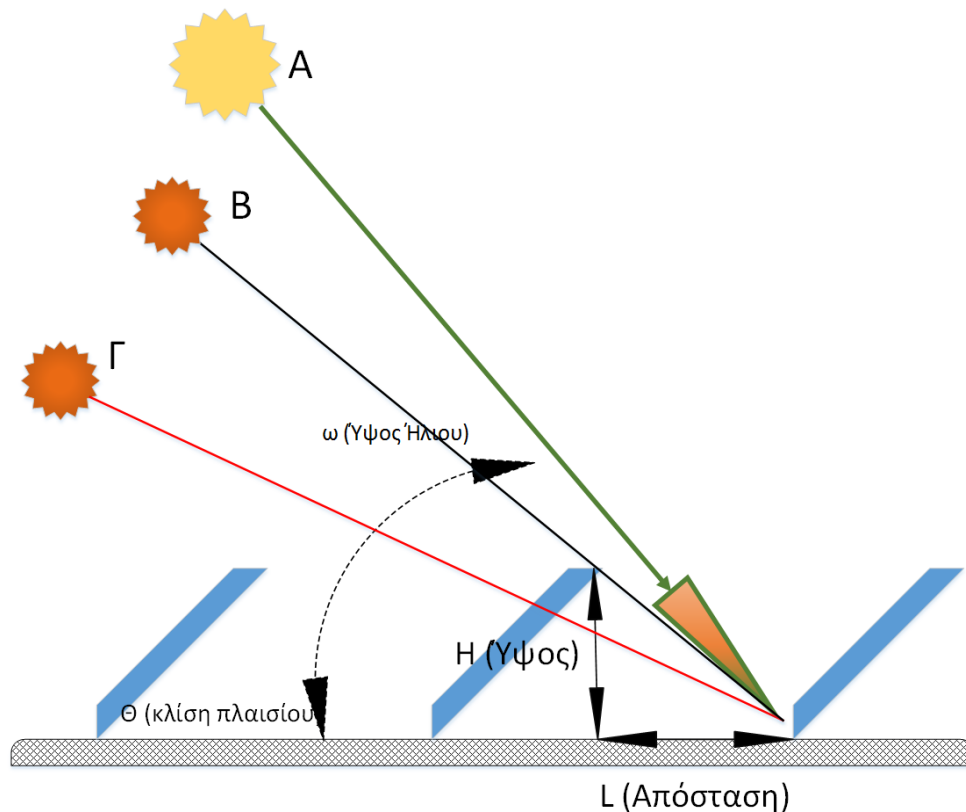


Σχήμα 1.11: Η τροχιά του ήλιου σε επιλεγμένες ημέρες

πλήρη αποφυγή εμποδίων που επηρεάζουν την ενεργειακή απολαβή. Εκτός από εξωτερικά εμπόδια, φαινόμενα σκίασης προκαλούνται και από τις διαδοχικές σειρές φωτοβολταϊκών πλαισίων σε μια εγκατάσταση. Η πρώτη σειρά μένει ανεπηρέαστη από αυτό το φαινόμενο, όμως η δεύτερη δέχεται τη σκίαση από την πρώτη, η τρίτη από τη δεύτερη κ.ο.κ. Το Σχήμα 1.12 δείχνει τρεις διαδοχικές σειρές φωτοβολταϊκών στο οριζόντιο επίπεδο και τον Ήλιο σε ύψος  $\omega$ . Η πρώτη βασική απαίτηση είναι να μην προκαλείται σκίαση όταν ο ήλιος βρίσκεται στη χαμηλότερη θέση του, κατά το ηλιακό μεσημέρι, μέσα στο έτος γιατί τότε το μήκος της σκιάς ενός εμποδίου μεγιστοποιείται. Αυτό συμβαίνει στο χειμερινό ηλιοστάσιο όπου σε ένα τόπο με γεωγραφικό πλάτος  $\phi$  το μέγιστο ύψος του Ήλιου δίνεται από τη σχέση  $\omega_{min} = 90^\circ - 23.4^\circ - \phi$ . Για την Κρήτη με ένα τυπικό γεωγραφικό πλάτος  $35.3^\circ$  το ελάχιστο ύψος του Ήλιου προκύπτει να είναι  $31^\circ$ . Η απαίτηση είναι να μη σκιάζεται το χαμηλότερο σημείο ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου μιας επόμενης σειράς από την προηγούμενη κατά το ηλιακό μεσημέρι, όταν ο Ήλιος είναι στο γεωγραφικό νότο. Η γεωμετρία που εμφανίζεται με τη θέση Α είναι



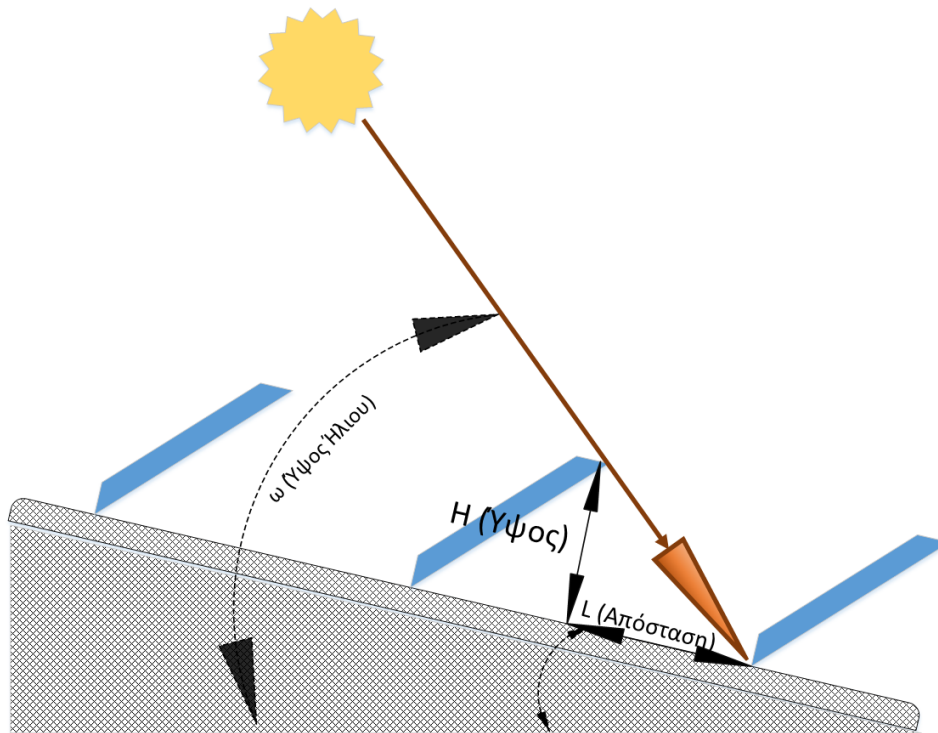
η προτιμητέα κατάσταση όπου το ύψος του Ήλιου είναι μεγαλύτερο από τη γωνία που σχηματίζεται από το ύψος  $H$  (προβαλλόμενο ύψος φωτοβολταϊκής συστοιχίας) και την απόσταση  $L$  (μήκος μεταξύ προβαλλόμενου ίχνους υψηλότερου σημείου προηγούμενης σειράς και του χαμηλότερου σημείου της επόμενης σειράς). Η οριακή κατάσταση είναι στη θέση Β όπου όταν ο Ήλιος είναι στο νότο κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο μια επόμενη σειρά μόλις και δε σκιάζεται από την προηγούμενη σειρά. Αυτό όμως σημαίνει ότι τις υπόλοιπες ώρες της ημέρας θα προκαλείται σκίαση αφού ο Ήλιος είναι χαμηλότερα στον ορίζοντα. Στη θέση Γ μια προηγούμενη σειρά θα αποκόπτει την απευθείας συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας, θα προκαλείται σημαντική μείωση της εισερχόμενης ενεργειακής απολαβής και κατά συνέπεια θα μειώνεται και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Γεωμετρία όπως της θέσης Γ δε συνίσταται, ιδίως για εγκαταστάσεις με μονοκρυσταλλικά-πολυκρυσταλλικά πλαίσια, αφού οι επιπτώσεις της σκίασης δεν είναι γραμμικές.



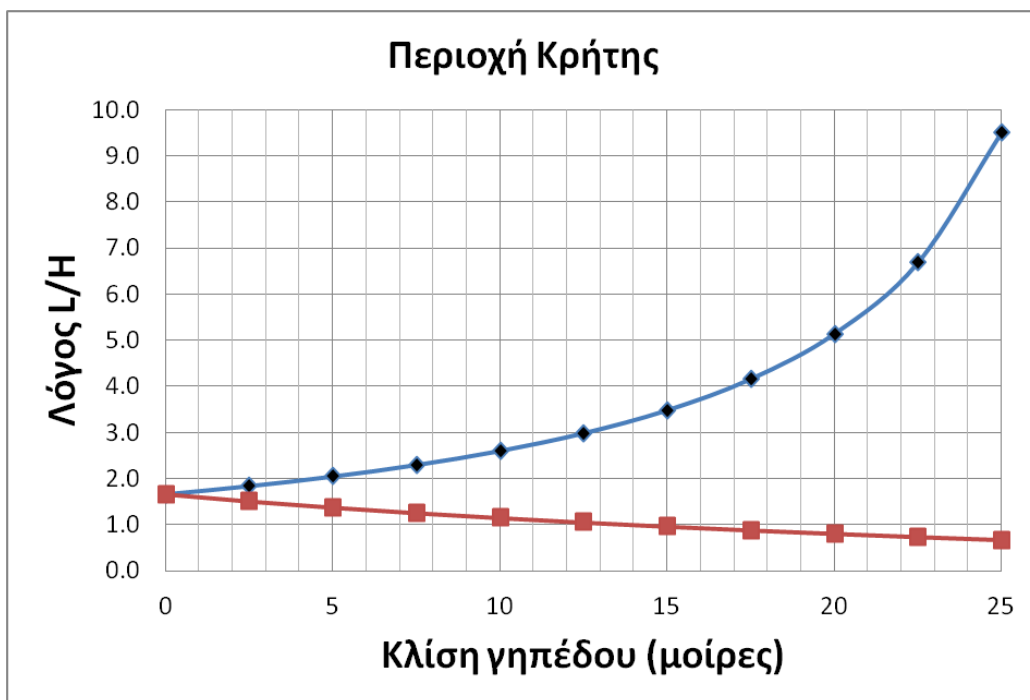
Σχήμα 1.12: Εσωτερικά φαινόμενα σκίασης σε μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση

Χρησιμοποιώντας τη θέση Β για τον υπολογισμό της απαιτούμενης απόστασης μεταξύ των διαδοχικών σειρών έχουμε  $\varepsilon\varphi(\omega) \geq \frac{H}{L}$ . Με εφαρμογή για  $\omega = 31^\circ$ , προκύπτει  $0.6 \geq \frac{H}{L}$  ή ισοδύναμα  $L \geq 1.66 \cdot H$ . Με λίγα λόγια θα πρέπει η απόσταση  $L$  να είναι τουλάχιστον 1,66 φορές το προβαλλόμενο ύψος  $H$  της συστοιχίας. Τυπικά στην Κρήτη χρησιμοποιείται λόγος 2 για τον καθορισμό της σχετικής απόστασης μεταξύ των διαδοχικών συστοιχιών. Υπάρχουν περιπτώσεις

εγκατάστασης όπου το γήπεδο έχει κλίση είτε θετική (χαμηλότερο σημείο προς το νότο, υψηλότερο προς το βορά, Σχήμα 1.13) είτε αρνητική ή αντίθετη (υψηλότερο προς το νότο, χαμηλότερο προς το βορά). Εφαρμόζοντας παρόμοια επιχειρήματα προκύπτουν αποτελέσματα όπως αυτά που εμφανίζονται στα Σχήματα 1.14, 1.15 και 1.16.



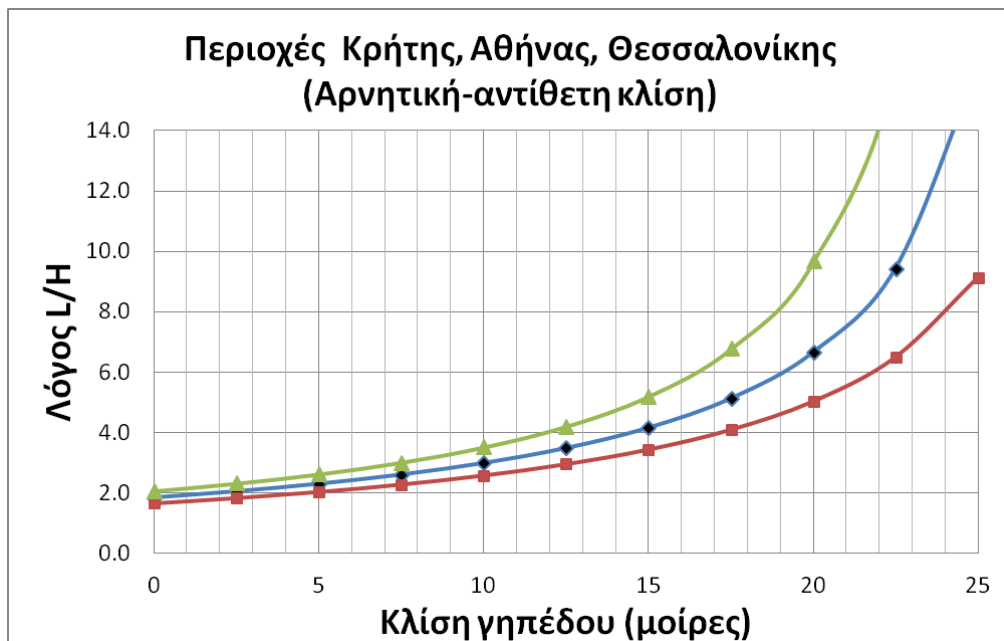
Σχήμα 1.13: Εσωτερικά φαινόμενα σκίασης σε γήπεδο με αντίθετη κλίση



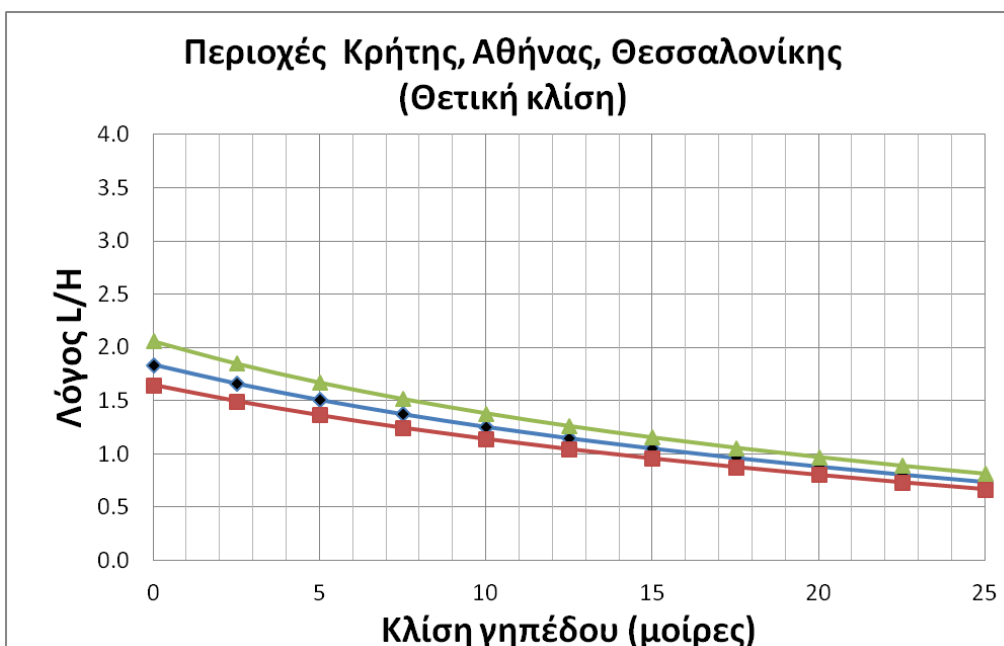
Σχήμα 1.14: Ο λόγος L/H για γήπεδο με θετική κλίση (καφέ καμπύλη) και αντίθετη κλίση (μπλε)



Η διαφορά μεταξύ γηπέδων με αντίθετες κλίσεις είναι σημαντική και έχει άμεση επίπτωση στη μέγιστη ισχύ που μπορεί να εγκατασταθεί σε ένα χώρο με δεδομένο εμβαδό. Επειδή το ύψος του Ήλιου εξαρτάται άμεσα από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου παρουσιάζει ενδιαφέρον η αντίστοιχη μεταβολή του λόγου  $L/H$ . Το Σχήμα 1.15 δείχνει τη μεταβολή του λόγου  $L/H$  ως προς την κλίση του γηπέδου για τρεις περιοχές με διαφορετικό γεωγραφικό πλάτος, Κρήτη (καφέ καμπύλη), Αθήνα (μπλε καμπύλη) και Θεσσαλονίκη (πράσινη καμπύλη). Για γήπεδα με θετική κλίση οι διαφορές είναι αρκετά μικρές και μειώνονται με την αύξηση της κλίσης του γηπέδου (Σχήμα 1.16).



Σχήμα 1.15: Ο λόγος  $L/H$  για γήπεδα με αντίθετη κλίση σε Κρήτη, Αθήνα, Θεσσαλονίκη



Σχήμα 1.16: Ο λόγος  $L/H$  για γήπεδα με θετική κλίση σε Κρήτη, Αθήνα, Θεσσαλονίκη

## 1.5 Πρότυπες συνθήκες

Οι πρότυπες συνθήκες (STC, Standard Test Conditions) καθορίζουν τους περιορισμούς που πρέπει να εφαρμόζονται ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ΦΒ στοιχείων/πλαισίων από διαφορετικούς κατασκευαστές. Βασικό στοιχείο αποτελεί η ονομαστική ισχύς ενός ΦΒ πλαισίου που είναι η μέγιστη ισχύς που αποδίδει σε αυτές τις συνθήκες. Οι πρότυπες συνθήκες καθορίζουν την πυκνότητα ισχύος, τη θερμοκρασία του πλαισίου και τη φασματική κατανομή του φωτός. Συνοπτικά, οι συνθήκες είναι

1. Πυκνότητα ισχύος στο επίπεδο του πλαισίου  $1000 \text{ W/m}^2$ ,
2. Θερμοκρασία ΦΒ κυψελίδας  $25 \text{ }^\circ\text{C}$
3. Αέρια Μάζα 1.5

Η πρώτη αναφέρεται στην εισερχόμενη πυκνότητα ισχύος στο ΦΒ στοιχείο ή πλαίσιο ενώ η δεύτερη στη θερμοκρασία του ημιαγωγικού υλικού. Η αέρια μάζα αναφέρεται στη διαδρομή του φωτός μέσα από την ατμόσφαιρα και στις αλληλεπιδράσεις του φωτός με τα συστατικά της. Οι συνθήκες αυτές σπάνια ισχύουν στην πράξη και οι κυριότεροι παράγοντες που συνεισφέρουν σε αυτό είναι η στιγμιαία πυκνότητα ισχύος και η θερμοκρασία. Κάθε κατασκευαστής ΦΒ στοιχείων ή πλαισίων

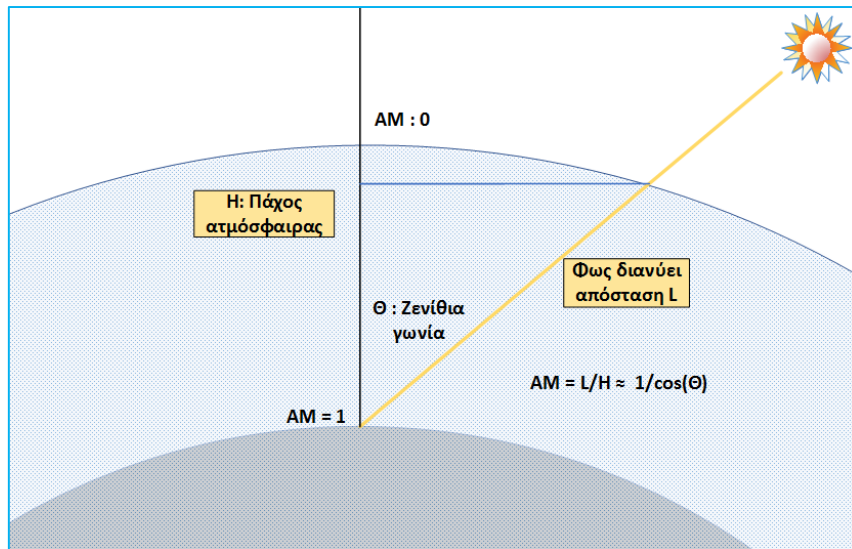
### ELECTRICAL PERFORMANCE

PV Module Type		■
<b>At <math>1000 \text{ W/m}^2</math> (STC)*</b>		
Maximum Power	[W]	135
Maximum System Voltage	[V]	1000
Maximum Power Voltage	[V]	17.7
Maximum Power Current	[A]	7.63
Open Circuit Voltage ( $V_{oc}$ )	[V]	22.1
Short Circuit Current ( $I_{sc}$ )	[A]	8.37

Σχήμα 1.17: Βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά στις πρότυπες συνθήκες

υποχρεούται να αναγράφει στο φύλλο δεδομένων (Σχήμα 1.17, data sheet), ανάμεσα στα άλλα, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά στις πρότυπες συνθήκες (μέγιστη ισχύς, ρεύμα βραχυκύκλωσης, τάση ανοικτού κυκλώματος, ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος και τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος). Αναλυτικότερα, η αέρια μάζα ορίζεται ως το πηλίκο του μήκους της διαδρομής που διανύει το φως (η απευθείας συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας) μέχρι το ΦΒ πλαίσιο προς το μήκος της ελάχιστης δυνατής διαδρομής στο συγκεκριμένο τόπο. Η ελάχιστη διαδρομή συμβαίνει όταν ο Ήλιος είναι στο ζενίθ δηλ. κατακόρυφα πάνω από τον παρατηρητή ή το ΦΒ πλαίσιο.

Για μικρές ζενίθιες γωνίες η αέρια μάζα δίνεται ικανοποιητικά από τη σχέση  $AM = \frac{1}{\cos(\theta)}$ . Έτσι η πρότυπη συνθήκη AM1.5 δηλώνει ότι η ζενίθια γωνία του Ήλιου είναι 48,19 μοίρες ή ισοδύναμα ότι το ύψος του είναι 41,81 μοίρες. Για μεγάλες ζενίθιες γωνίες πρέπει να ληφθεί υπόψη η καμπυλότητα της ατμόσφαιρας και η μεταβολή της πυκνότητας της ατμόσφαιρας με το ύψος από την επιφάνεια της Γης. Τότε η παραπάνω σχέση τροποποιείται και γίνεται πιο σύνθετη. Η συνθήκη AM1 δηλώνει το φάσμα που καταγράφεται όταν ο Ήλιος είναι στο ζενίθ του τόπου (το φως διανύει την ελάχιστη



Σχήμα 1.18: Η αέρια μάζα σχετίζεται με τη διαδρομή του φωτός μέσα στην ατμόσφαιρα

διαδρομή). Η συνθήκη AM0 δηλώνει το φάσμα του Ήλιου όπως καταγράφεται έξω από την ατμόσφαιρα της Γης. Στην Κρήτη η ελάχιστη αέρια μάζα ανέρχεται σε 1.02 δηλ. ο ήλιος είναι σχεδόν στο ζενίθ. Ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ μόνο στις περιοχές της Γης που βρίσκονται μεταξύ των τροπικών του Καρκίνου και του Αιγόκερου κοντά στον Ισημερινό ανάλογα με τη θέση της Γης πάνω στην τροχιά της.

Έχοντας καθορίζει τις συνθήκες μέτρησης ΦΒ στοιχείων/πλαισίων η απόδοση ενός ΦΒ στοιχείου ή πλαισίου στις πρότυπες συνθήκες ορίζεται ως

$$n_{STC} = \frac{P_{max,STC}}{G_{STC} * A}$$

όπου  $P_{max,STC}$  η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς όταν AM1.5 με θερμοκρασία κυψελίδας 25 βαθμών Κελσίου,  $G_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$  και  $A$  η επιφάνεια του στοιχείου ή πλαισίου. Προσοχή πρέπει να δίνεται στον υπολογισμό της απόδοσης όπου για τον υπολογισμό της επιφάνειας ενός πλαισίου μπορεί να χρησιμοποιηθούν είτε οι εξωτερικές διαστάσεις του είτε το πλήθος των στοιχείων που φέρει το πλαίσιο σε συνδυασμό με τις διαστάσεις ενός στοιχείου. Σε πρακτικές εφαρμογές είναι απαραίτητη η χρήση των εξωτερικών διαστάσεων για τον καθορισμό της απαιτούμενης επιφάνειας. Σε τυπικές

συνθήκες λειτουργίας ο ορισμός της απόδοσης διατηρεί την ίδια μαθηματικά μορφή, οι ποσότητες όμως αναφέρονται στις τρέχουσες συνθήκες πυκνότητας ισχύος, θερμοκρασίας στοιχείου/πλασιού και μεγίστης αποδιδόμενης ισχύος.

Οι κατασκευαστές ελέγχουν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ΦΒ στοιχείων/πλασιών με τη βοήθεια ειδικών συσκευών (εξομοιωτές ηλίου) που εξομοιώνουν το φάσμα του ήλιου με τη χρήση ειδικών φίλτρων ενώ το πλαίσιο διατηρείται σε θάλαμο ελεγχόμενης θερμοκρασίας. Η πυκνότητα ισχύος ελέγχεται με τη βοήθεια ειδικών κυψελίδων αναφοράς.

## 1.6 Φωτοβολταϊκό Δυναμικό

Χάρτες φωτοβολταϊκού δυναμικού καταγράφουν την ενέργεια που αποδίδει ετήσια ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ανά kW εγκατεστημένης ονομαστικής ισχύος σε ένα τόπο. Η παραγωγή εξαρτάται από την τεχνολογία των πλασιών, την κλίση τους και τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες. Τα ηλιακά δεδομένα μπορεί να προέρχονται από επίγειες ή δορυφορικές μετρήσεις αρκετών ετών, τουλάχιστον δεκαετίας. Τυπικοί είναι οι χάρτες που παρέχονται από το Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) του Joint Research Centre του Ινστιτούτου Ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Οι χάρτες αποτυπώνουν το ηλιακό δυναμικό (ενεργειακή απολαβή σε kWh/m<sup>2</sup>) και το φωτοβολταϊκό δυναμικό σε kWh/kW (αποδοτικότητα, energy yield) τόσο για το οριζόντιο επίπεδο όσο και για κεκλιμένο με τη βέλτιστη κλίση.

Η αποδοτικότητα  $Y_f$  (energy yield) μιας ΦΒ εγκατάστασης ορίζεται ως

$$Y_f = \frac{E_{\Phi B}}{P_p}$$

όπου  $E_{\Phi B}$  είναι η ενέργεια (kWh) που παράχθηκε σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (συνήθως έτος) και  $P_p$  η ονομαστική ισχύς της εγκατάστασης (kW). Η μονάδα της αποδοτικότητας δίνεται ως kWh/kW αντί για ώρες (h) και εκφράζει την ισοδύναμη παραγωγή ενέργειας από ένα σύστημα 1kW. Το ίδιο αποτέλεσμα μπορεί να ερμηνευτεί και ως οι ώρες που θα πρέπει να λειτουργεί το σύστημα με την ονομαστική του ισχύ για να αποδώσει την ίδια ενέργεια στο ίδιο χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα στην Κρήτη μια τυπική τιμή της αποδοτικότητας για ένα διασυνδεδεμένο σύστημα είναι 1500 kWh/kW και έτσι ένα σύστημα 5 kW αναμένεται να αποδώσει ετήσια 7500 kWh. Ισοδύναμα, ένα σύστημα 1kW θα έπρεπε να λειτουργεί με αυτή την ισχύ επί 1500 ώρες για να αποδώσει την ίδια ενέργεια. Πέρα από την αποδοτικότητα, στη μελέτη του ηλιακού δυναμικού χρησιμοποιείται και η αποδοτικότητα αναφοράς (reference yield) που ορίζεται ως

$$Y_r = \frac{H_t}{G_{STC}}$$

όπου  $H_t$  η ενεργειακή απολαβή σε kWh/m<sup>2</sup> και  $G_{STC}$  η πυκνότητα ισχύος στις πρότυπες συνθήκες (1000 W/m<sup>2</sup> ή 1kW/m<sup>2</sup>). Η αποδοτικότητα αναφοράς σχετίζεται άμεσα με το διαθέσιμο ηλιακό δυναμικό και εκφράζει τις ώρες (peak sun hours) που θα έπρεπε η πυκνότητα ισχύος να είναι σταθερή και ίση με 1kW/m<sup>2</sup> για να καταγραφεί η ίδια ενεργειακή απολαβή. Η αποδοτικότητα αναφοράς δίνεται συνήθως είτε ως μηνιαία μέση ημερήσια τιμή είτε ως μέση ετήσια τιμή. Ως παράδειγμα, η ενεργειακή απολαβή στο Ηράκλειο Κρήτης και στο οριζόντιο επίπεδο ανέρχεται σε 1800 kWh/m<sup>2</sup> ενώ η αποδοτικότητα αναφοράς σε 1800 h.

Η κατασκευή χαρτών του φωτοβολταϊκού δυναμικού απαιτεί υπολογισμό ή εκτίμηση των απωλειών που εμποδίζουν τη λειτουργία ενός συστήματος στις πρότυπες συνθήκες. Η ποσότητα που περιγράφει έμμεσα το σύνολο των απωλειών ενός ΦΒ συστήματος είναι ο λόγος επίδοσης (Performance Ratio) που ορίζεται ως το πηλίκο της ενέργειας που παράχθηκε από το σύστημα προς την ενέργεια που θα παράγονταν αν το σύστημα λειτουργούσε στις πρότυπες συνθήκες, όσον αφορά στη θερμοκρασία και την αέρια μάζα, αλλά δεχόμενο την ίδια πυκνότητα ισχύος. Έτσι ο ορισμός είναι

$$PR = \frac{E_{\phi B}(n, G_t)}{E_{\phi B}(n_{STC}, G_t)} = \frac{Y_f}{Y_r}$$

όπου  $n$  η απόδοση στις εκάστοτε συνθήκες. Ο λόγος επίδοσης εξαρτάται ενδεικτικά από παράγοντες όπως

- Τη θερμοκρασία πλαισίου
- Την ανομοιομορφία πλαισίων
- Την απόκλιση από την ονομαστική ισχύ
- Το φάσμα του ήλιου
- Τη σκόνη, το χιόνι, κ.λπ.
- Τις χαμηλές τιμές πυκνότητας ισχύος
- Τις ωμικές απώλειες στο συνεχές και το εναλλασσόμενο
- Τη σκίαση
- Τη μετατροπή του συνεχούς στο εναλλασσόμενο
- Τη διαθεσιμότητα του συστήματος.

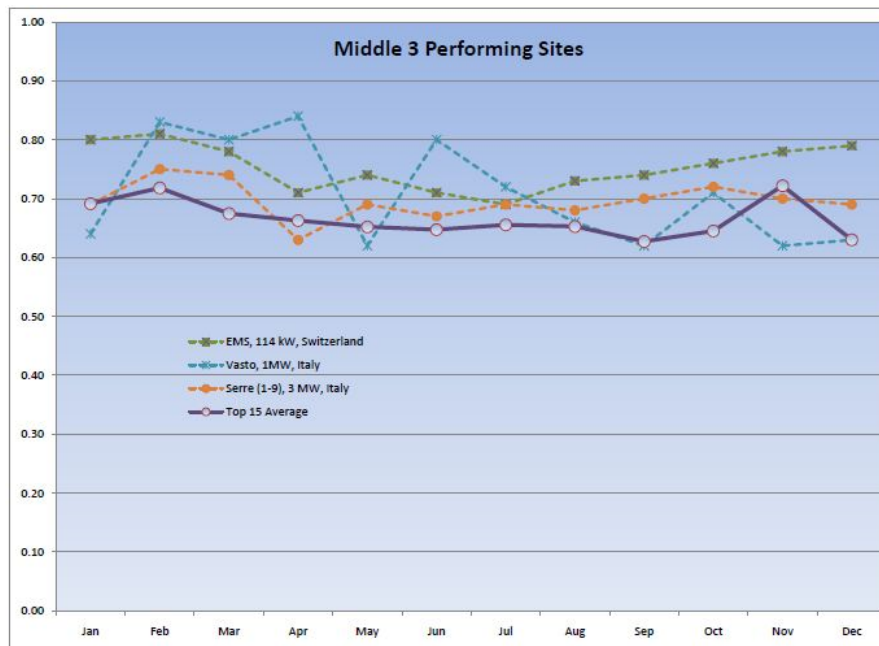
Ο λόγος επίδοσης είναι ένα μέτρο της ποιότητας μιας ΦΒ εγκατάστασης και είναι ανεξάρτητος από τη θέση της. Έτσι είναι επιτρεπτή η σύγκριση εγκαταστάσεων από διαφορετικές περιοχές ή χώρες. Ο λόγος επίδοσης παίρνει τιμές από 0 έως 1 και μπορεί να εκφράζεται και ως ποσοστό. Μια μέση τιμή του λόγου επίδοσης από μελέτες ΦΒ εγκαταστάσεων προκύπτει να είναι 0,75 ή 75%. Μπορεί να υπολογιστεί είτε στιγμιαία είτε για διάστημα μιας ώρας, ημέρας, μήνα, έτους κ.λπ. Μηνιαία ή ετήσια δεδομένα χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της εξέλιξης μια ΦΒ εγκατάστασης στο χρόνο. Απαιτούνται συχνές μετρήσεις της ισχύος εξόδου του συστήματος αλλά και μετρήσεις της πυκνότητας ισχύος για όλο το χρονικό διάστημα ώστε να υπολογιστούν με ικανοποιητική ακρίβεια οι αντίστοιχες τιμές ενέργειας. Η σχέση που συνδέει την παραγόμενη ενέργεια με το λόγο επίδοσης, την ονομαστική ισχύ και την ενεργειακή απολαβή έχει ως εξής:

$$E_{\Phi B} = P_p \cdot PR \cdot \frac{H_t}{G_{STC}}$$

οπότε ο λόγος επίδοσης δίνεται από τη σχέση

$$PR = \frac{E_{\Phi B}}{P_p H_t / G_{STC}}$$

Για παράδειγμα, ο λόγος επίδοσης ΦΒ συστήματος ονομαστικής ισχύος 10 kW που παρήγαγε ετήσια 15.250 kWh με αντίστοιχη ενεργειακή απολαβή 1950 kWh/m<sup>2</sup> είναι 0,782 ή 78,2%.

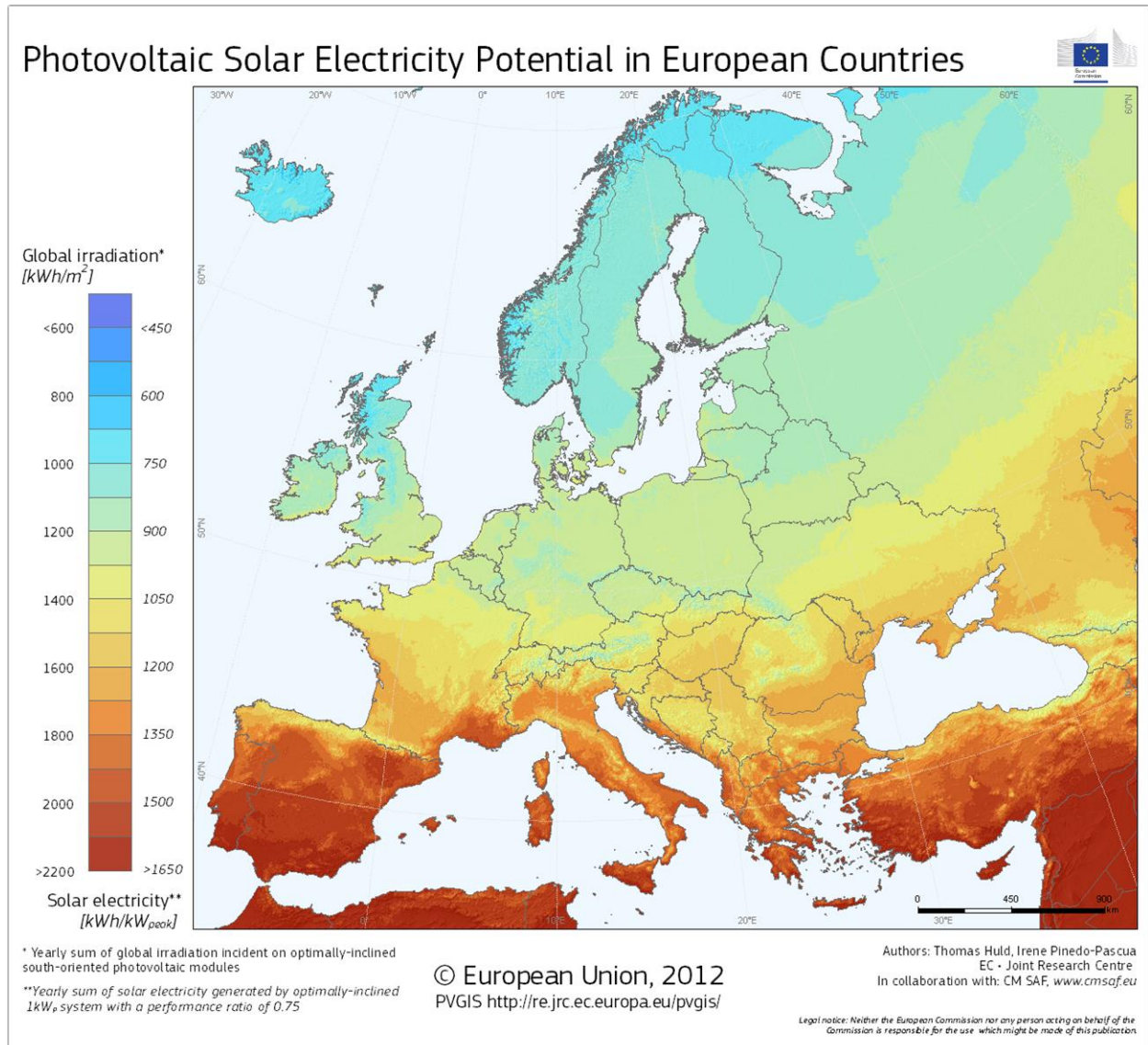


Σχήμα 1.19: Ο λόγος επίδοσης ΦΒ συστημάτων από έρευνα του International Energy Agency (Πηγή: IEA)

Ο λόγος επίδοσης εμφανίζει μεταβολή μέσα στο έτος με μικρότερες τιμές κατά την καλοκαιρινή περίοδο και μεγαλύτερες κατά τη χειμερινή περίοδο, κυρίως εξαιτίας της μείωσης των θερμικών

απωλειών. Η αύξηση του λόγου επίδοσης συνδυάζεται με ΦΒ πλαίσια και αντιστροφείς τάσης υψηλής απόδοσης, με τη χρήση αγωγών κατάλληλης διατομής, με την αποφυγή σκιάσεων καθώς και άλλων παραγόντων που οδηγούν στη μείωση της παραγόμενης ενέργειας.

Το Σχήμα 1.20 δείχνει ταυτόχρονα το ηλιακό δυναμικό (ενεργειακή απολαβή) και το φωτοβολταϊκό



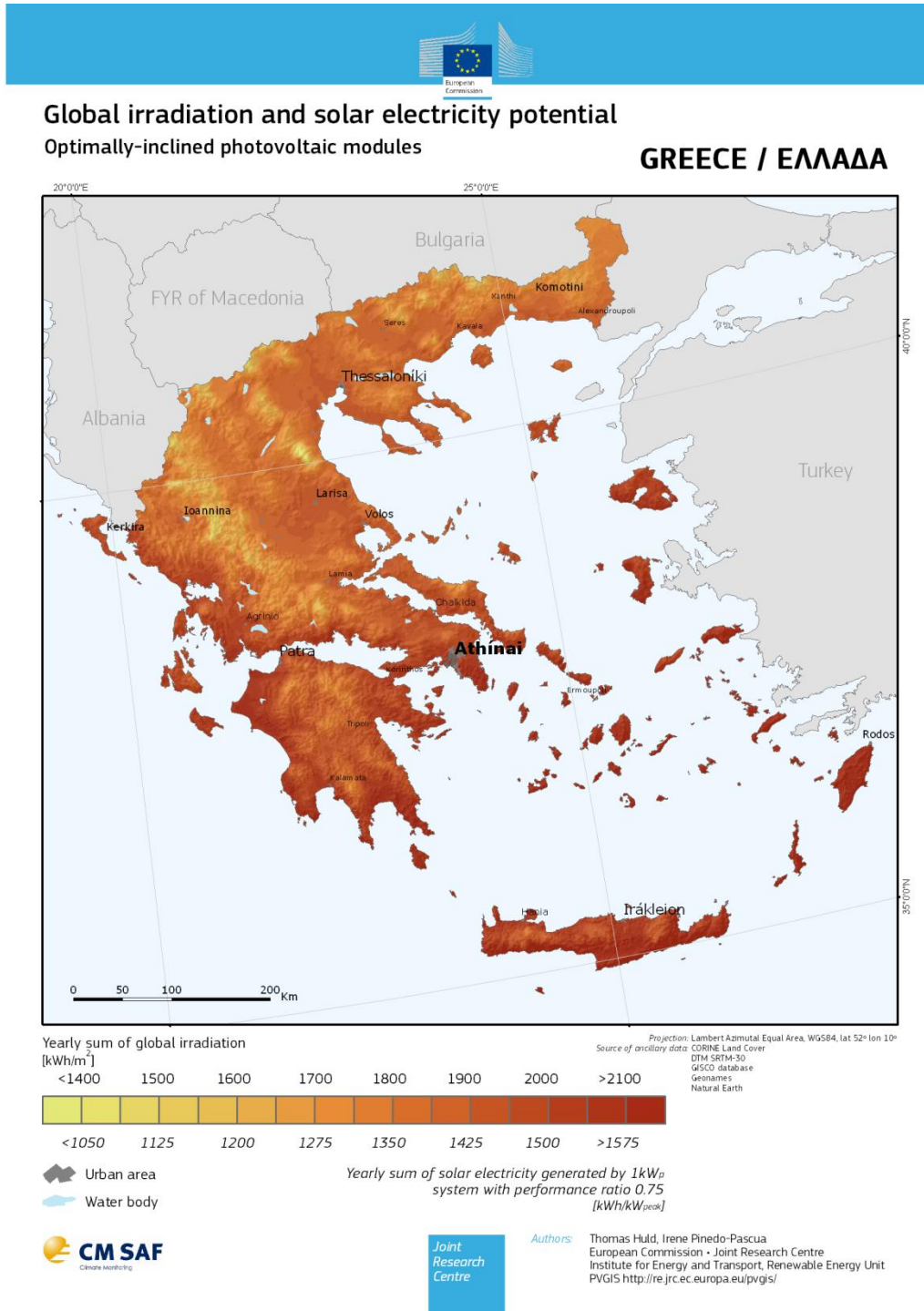
Σχήμα 1.20: Χάρτης ηλιακού και φωτοβολταϊκού δυναμικού (Πηγή: PVGIS)

δυναμικό (αποδοτικότητα) θεωρώντας λόγο επίδοσης σταθερό και ίσο με 0,75 για όλα το έτος και συλλέκτη με τη βέλτιστη κλίση σε κάθε τοποθεσία. Στη βάση δορυφορικών δεδομένων του PVGIS έχουν χρησιμοποιηθεί δεδομένα από δορυφόρους Meteosat που καλύπτουν το διάστημα 1998-2005 και νεότερους δορυφόρους που καλύπτουν το διάστημα 2006-2011. Η χωρική ανάλυση ανέρχεται σε 3 km, στην καλύτερη περίπτωση. Το Σχήμα 1.21 δείχνει ομοίως το ηλιακό και φωτοβολταϊκό δυναμικό της Ελλάδας για μια επιφάνεια προσανατολισμένη στο γεωγραφικό νότο και με τη βέλτιστη



κλίση. Η Κρήτη εμφανίζει υψηλό δυναμικό σε σχέση με άλλες περιοχές της Ελλάδας που μπορεί να αξιοποιηθεί σε εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής

ενέργειας. Για παράδειγμα, η Θεσσαλονίκη εμφανίζει δυναμικό μειωμένο κατά 19% σε σχέση το δυναμικό στην περιοχή του Εργαστηρίου στο Ηράκλειο.



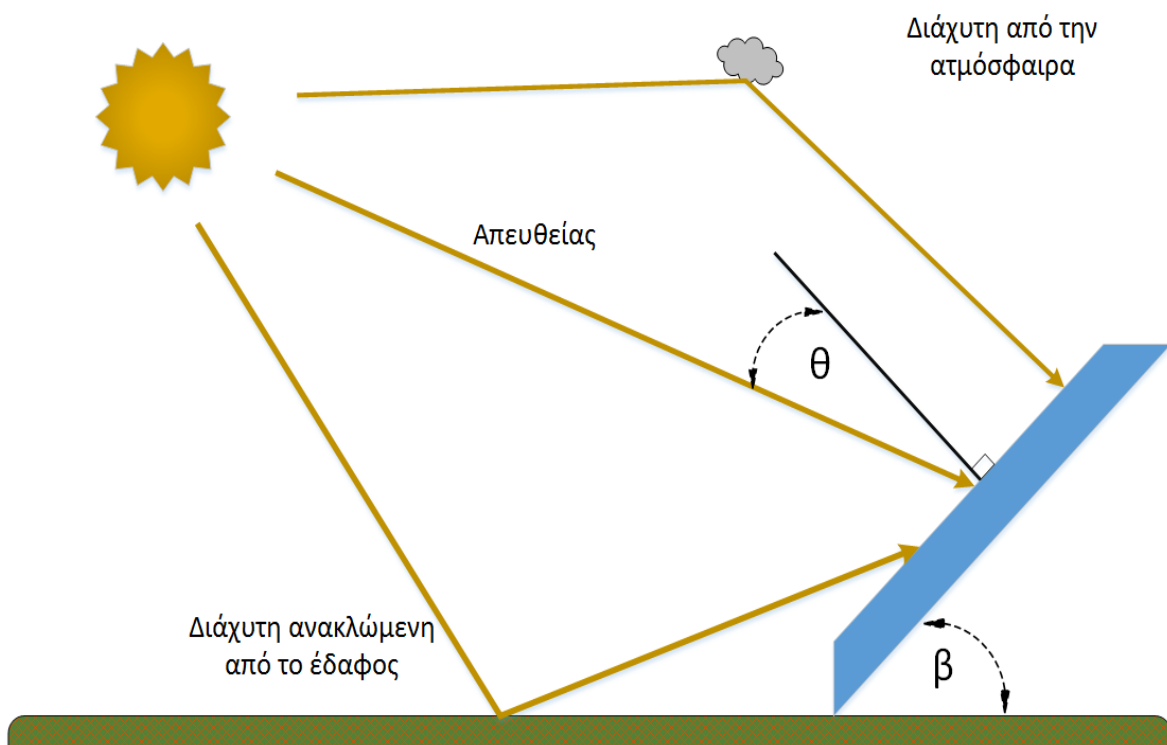
Σχήμα 1.21: Χάρτης ηλιακού και φωτοβολταϊκού δυναμικού της Ελλάδας (Πηγή: PVGIS)



Η καταγραφή του ηλιακού δυναμικού είτε επίγεια είτε δορυφορικά πραγματοποιείται με μετρήσεις στο οριζόντιο επίπεδο. Σπάνια όμως ένας συλλέκτης (φωτοβολταϊκό ή ηλιοθερμικό) θα τοποθετηθεί με κλίση μηδέν μοιρών και έτσι προκύπτει η ανάγκη αναγωγής των δεδομένων από το οριζόντιο επίπεδο σε κεκλιμένο με ορισμένη κλίση. Για να γίνει αυτό, εφόσον δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις στο κεκλιμένο επίπεδο, απαιτείται ένα μαθηματικό μοντέλο που θα χρησιμοποιεί τις μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στο οριζόντιο επίπεδο για να τις μετασχηματίσει σε τιμές πυκνότητας ισχύος ή ενεργειακής απολαβής στο κεκλιμένο επίπεδο. Υπάρχουν αρκετά διαφορετικά μοντέλα διαθέσιμα στην επιστημονική βιβλιογραφία και οι διαφορές τους έγκειται στις υποθέσεις που υιοθετούν για τη διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας. Εδώ θα παρουσιαστεί το απλό μοντέλο των Hay & Davies (1980) για τη μετατροπή στιγμιαίων μετρήσεων από το οριζόντιο επίπεδο σε κεκλιμένο επίπεδο με νότιο προσανατολισμό. Οι συνιστώσες που πρέπει να υπολογιστούν είναι οι

- ✓ Απευθείας στο κεκλιμένο επίπεδο
- ✓ Διάχυτη στο κεκλιμένο από τον ουρανό
- ✓ Διάχυτη στο κεκλιμένο από το έδαφος.

Το Σχήμα 1.22 απεικονίζει τις διαφορετικές συνιστώσες που συνεισφέρουν στην ολική πυκνότητα ισχύος που δέχεται μια κεκλιμένη επιφάνεια.



Σχήμα 1.22: Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με συλλέκτη με κλίση

Η απευθείας στο κεκλιμένο επίπεδο υπολογίζεται από τη σχέση

$$B_t = BNI \cdot \cos(\theta)$$

όπου BNI η απευθείας συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας και  $\theta$  η γωνία πρόσπτωσης. Η γωνία πρόσπτωσης υπολογίζεται εφόσον είναι γνωστές τέσσερις γωνίες (αζιμούθιο ήλιου και συλλέκτη, κλίση συλλέκτη και ύψος ήλιου). Η διάχυτη ανακλώμενη από το έδαφος εξαρτάται κυρίως από την ανακλαστικότητα του εδάφους (χώμα, γρασίδι, μπετό κ.λπ.) καθώς και από την κλίση της επιφάνειας. Η αντίστοιχη σχέση είναι η

$$GR_t = GHI \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos(\beta)}{2}$$

όπου GHI η ολική πυκνότητα ισχύος στο οριζόντιο επίπεδο,  $\rho$  η ανακλαστικότητα του εδάφους και  $\beta$  η κλίση του συλλέκτη. Ενδεικτικές τιμές της ανακλαστικότητας διαφόρων υλικών δίνονται στον παρακάτω πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1 Τυπικές τιμές ανακλαστικότητας υλικών

Αστικό περιβάλλον	0.14 - 0.22
Γρασίδι	0.15 - 0.25
Φρέσκο γρασίδι	0.26
Φρέσκο χιόνι	0.82
Στεγνή άσφαλτος	0.09-0.15
Μπετό	0.25-0.35
Αλουμίνιο	0.85
Χαλκός	0.74
Γαλβανισμένο ατσάλι (καθαρό)	0.35
Βρώμικο γαλβανισμένο ατσάλι	0.08

Η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας που προέρχεται από την ατμόσφαιρα διαχωρίζεται σε δύο επιμέρους συνιστώσες. Η μια αναφέρεται υποθέτει ιστροπική εκπομπή από την ατμόσφαιρα

ενώ η δεύτερη αναφέρεται σε σκέδαση από την ατμόσφαιρα αλλά σε μια περιοχή κοντά στον ήλιο. Η πρώτη συνιστώσα δίνεται από τη σχέση

$$(1 - a_i) \cdot \frac{1 + \cos(\beta)}{2}$$

με  $a_i = \frac{BNI}{G_{on}(doy)}$  όπου BNI η απευθείας συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας και  $G_{on}(doy)$  η τιμή της ηλιακής σταθεράς τη συγκεκριμένη (doy, day of year) ημέρα του έτους που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Η ποσότητα  $G_{on}(doy)$  δίνεται από τη σχέση  $G_{sc} \cdot r(doy)$  με

$$\begin{aligned} r(doy) &= \left( \frac{R_{ΓΗΣ-ΗΛΙΟΥ}}{R(doy)} \right)^2 \\ &= 1.00011 \\ &\quad + 0.034221 \cos \Phi + 0.00128 \sin \Phi + 0.000719 \cos 2\Phi + 0.000077 \sin 2\Phi \end{aligned}$$

Η φάση  $\Phi$  δίνεται από τη σχέση  $\Phi = 2 \cdot \pi \cdot \frac{(doy-1)}{365}$ . Η δεύτερη συνιστώσα δίνεται από τη σχέση

$a_i \cdot \frac{\cos(\theta)}{\sin(EL)}$  όπου  $\theta$  η γωνία πρόσπτωσης και EL το ύψος του ήλιου. Τελικά, η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας που προέρχεται από την ατμόσφαιρα δίνεται από τη σχέση

$$D_t = DHI \cdot \left\{ a_i \cdot \frac{\cos(\theta)}{\sin(EL)} + (1 - a_i) \cdot \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right\}$$

Επομένως η ολική πυκνότητα ισχύος σε κεκλιμένο επίπεδο κλίσης  $\beta$  με προσανατολισμό προς το νότο δίνεται από τη σχέση  $G_t = B_t + GR_t + D_t$ . Γενικά, η ακρίβεια των μοντέλων αναγωγής τιμών πυκνότητας ισχύος από το οριζόντιο επίπεδο στο κεκλιμένο είναι της τάξης του 10%. Στη διεθνή βιβλιογραφία είναι διαθέσιμα και άλλα μοντέλα αναγωγής όπως αυτά που καταγράφονται στο Σχήμα 1.22.

Το μοντέλο Perez χρησιμοποιεί διαφορετικές σχέσεις για τον υπολογισμό της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο.

$$E_d = DHI \times \left[ \left( (1 - F_1) \left( \frac{1 + \cos(\theta_T)}{2} \right) + F_1 \left( \frac{a}{b} \right) + F_2 \sin(\theta_T) \right) \right]$$

$$a = \max(0, \cos(AOI))$$

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

Οι  $F_1$  &  $F_2$  είναι εμπειρικές συναρτήσεις που περιγράφουν τη διάχυτη ακτινοβολία γύρω από τον ήλιο και τη διάχυτη κοντά στον ορίζοντα.

DHI: Διάχυτη στο οριζόντιο επίπεδο

DNI: Απευθείας συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας (ή BNI)

AOI: Γωνία πρόσπτωσης

$\theta_z$ : Ζενίθια γωνία

$\theta_T$ : Κλίση ΦΒ πλαισίου.

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

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

$$\varepsilon = \frac{(DHI + DNI)/DHI + \kappa\theta_z^3}{1 + \kappa\theta_z^3}$$

$$\Delta = \frac{DHI \times AM_a}{E_a}$$

$\kappa = 1.041$  (γωνίες σε ακτίνια)

$AM_a$ : Απόλυτη Αέρια μάζα

$E_a$ : Ηλιακή σταθερά

Οι συντελεστές  $f_{11}$ ,  $f_{12}$ ,  $f_{13}$ ,  $f_{21}$ ,  $f_{22}$ ,  $f_{23}$  δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Περιοχή $\varepsilon$	$f_{11}$	$f_{12}$	$f_{13}$	$f_{21}$	$f_{22}$	$f_{23}$
1	-0.008	0.588	-0.062	-0.06	0.072	-0.022
2	0.13	0.683	-0.151	-0.019	0.066	-0.029
3	0.33	0.487	-0.221	0.055	-0.064	-0.026
4	0.568	0.187	-0.295	0.109	-0.152	-0.014

<b>5</b>	0.873	-0.392	-0.362	0.226	-0.462	0.001
<b>6</b>	1.132	-1.237	-0.412	0.288	-0.823	0.056
<b>7</b>	1.06	-1.6	-0.359	0.264	-1.127	0.131
<b>8</b>	0.678	-0.327	-0.25	0.156	-1.377	0.251

Περιοχή ε	Κάτω όριο	Πάνω όριο
<b>1 Συννεφιά</b>	1.000	1.065
<b>2</b>	1.065	1.230
<b>3</b>	1.230	1.500
<b>4</b>	1.500	1.950
<b>5</b>	1.950	2.800
<b>6</b>	2.800	4.500
<b>7</b>	4.500	6.200
<b>8 Αίθρια</b>	6.200	–

**TABLE 1: PERFORMANCE OF ALL TRANSPOSITION MODELS WITH REFERENCE INPUT DATA**

Plane	40°S		90°S		Tracking	
	MBE (%)	RMSE (%)	MBE (%)	RMSE (%)	MBE (%)	RMSE (%)
<b>ALL SKY, N= 116,942</b>						
Mean $E_s$ (W/m <sup>2</sup> )	643.3		432.3		836.0	
ASHRAE	-5.1	7.8	6.5	13.4	-8.1	9.6
Gueymard	-0.8	4.3	5.2	10.6	-1.0	4.2
Hay	-2.1	5.5	-2.7	8.2	-1.9	6.1
HDKR	-1.8	5.3	-0.4	7.7	-1.5	5.9
Isotropic	-5.1	7.8	-5.8	11.6	-8.1	9.6
Klucher	-1.4	4.6	0.3	8.5	-6.0	7.5
Muneer	-0.4	5.2	2.5	9.5	-5.4	7.0
Perez	-2.7	6.7	-4.7	12.0	-2.3	5.8
Reindl	-1.8	5.3	-0.4	7.7	-1.5	5.9
Skartveit	-2.4	5.7	-4.3	9.3	-2.2	6.4
<b>CLEAR SKY, N= 58,880</b>						
Mean $E_s$ (W/m <sup>2</sup> )	763.1		523.5		1019.7	
ASHRAE	-3.6	4.9	0.1	4.5	-5.5	6.2
Gueymard	-1.1	2.7	-0.2	3.8	-1.2	2.1
Hay	-1.0	3.2	-2.2	5.2	-0.3	2.7
HDKR	-0.9	3.1	-1.2	4.7	-0.1	2.7
Isotropic	-3.6	4.9	-4.9	8.1	-5.5	6.2
Klucher	-1.0	2.8	-0.5	5.1	-4.0	4.8
Muneer	0.4	2.8	2.0	5.1	-3.3	4.0
Perez	-0.7	2.6	-0.4	3.9	-1.0	2.1
Reindl	-0.9	3.1	-1.2	4.7	-0.1	2.7
Skartveit	-1.0	3.2	-2.2	5.2	-0.3	2.7

Σχήμα 1.22: Μοντέλα αναγωγής τιμών από το οριζόντιο στο κεκλιμένο επίπεδο (Πηγή: Gueymard ASES 2008)

**Κεφάλαιο 1. Βιβλιογραφία.**

1. Φραγκιαδάκης Ιωάννης, «Φωτοβολταϊκά Συστήματα», Εκδόσεις ΖΗΤΗ, ISBN 960-456-007-7 (τελευταία έκδοση)
2. Χάρτες Ηλιακού & Φωτοβολταϊκού Δυναμικού, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/imaps/index.htm> (PVGIS)
3. Practical Handbook of Photovoltaics (Second Edition), 2011, Augustin McEvoy, Tom Markvart and Luis Castaner, ISBN: 978-0-12-385934-13.
4. Electricity from Sunlight: An Introduction to Photovoltaics, 2010, Paul A. Lynn, ISBN: 978-0-470-74560-1 Hay, J.E., Davies, J.A., 1980. Calculations of the solar radiation incident on an inclined surface. In: Hay, J.E., Won, T.K. (Eds.), Proc. of First Canadian Solar Radiation Data Workshop, 59. Ministry of Supply and Services, Canada
5. Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., Stewart, R., 1990. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. Solar Energy 44 (5), 271–289.