



2 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ



Η κύρια πηγή δημιουργίας των ΑΠΕ είναι ο Ήλιος, δηλαδή η ηλιακή ακτινοβολία, γι' αυτό και στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε βασικά χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας. Αρχικά περιγράφεται το ηλιακό φάσμα, όπως και το τμήμα του φάσματος που φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Περιγράφονται επίσης οι μηχανισμοί μέσω των οποίων προκαλείται η εξασθένηση αυτού του φάσματος, όταν εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της Γης. Στη συνέχεια περιγράφονται οι αλγεβρικές σχέσεις που προκύπτουν από τη γεωμετρία του συστήματος ηλιακής ακτινοβολίας-γήινης επιφάνειας και επιτρέπουν τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας στη γήινη επιφάνεια. Τέλος εξετάζονται οι χρονικές μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης, καθώς και τα όργανα μέτρησής της.

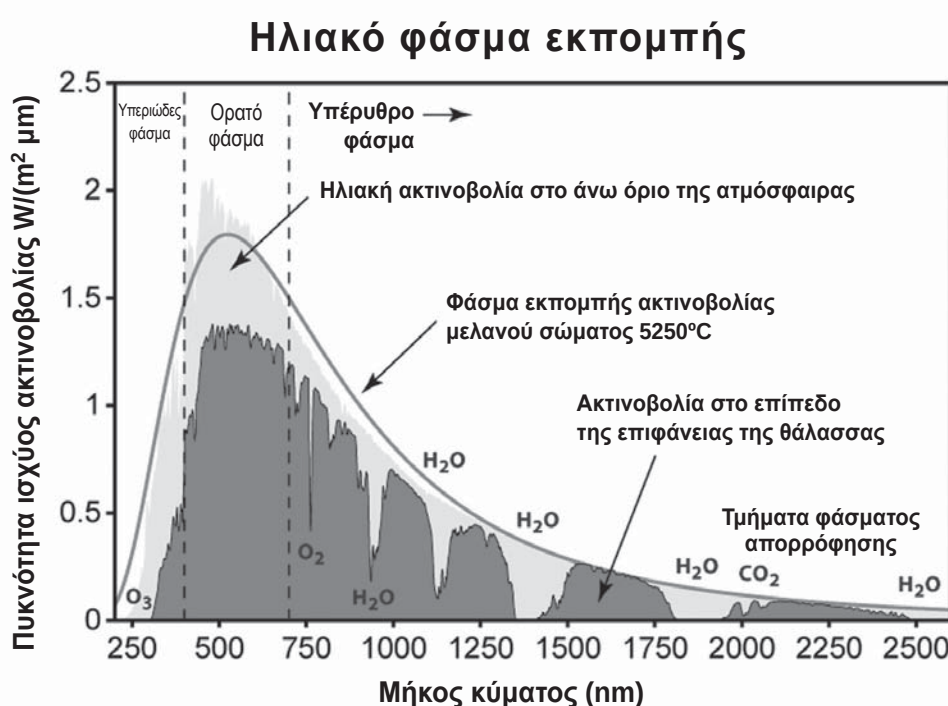
2.1 Το ηλιακό φάσμα

Ο Ήλιος αποτελεί το κεντρικό σώμα του ηλιακού μας συστήματος. Η ενέργειά του προέρχεται από την πυρηνική σύντηξη (υδρογόνου H προς ήλιο He) που συμβαίνει στο εσωτερικό του. Μέρος της ενέργειας που εκπέμπει φτάνει και στη Γη. Από το εξωτερικό τμήμα του Ήλιου (τη φωτόσφαιρα) εκπέμπεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, το φάσμα της οποίας φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Η μορφή του φάσματος μπορεί να προσεγγιστεί θεωρητικά ως το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπει μέλαν σώμα¹ με θερμοκρασία 5.250°C (όση περίπου είναι η

¹ Η έννοια του μέλανος σώματος είναι θεμελιώδης στη φυσική και σε οποιοδήποτε σχετικό πανεπιστημιακό βιβλίο μπορεί ο αναγνώστης να βρει εκτεταμένους ορισμούς και αναλύσεις. Πολύ καλή και σύντομη παρουσίαση μπορεί να βρεθεί στους Duffie & Beckman, 2006. Με συντομία μπορεί να αναφερθεί ότι το μέλαν σώμα ορίζεται ως το ιδανικό-θεωρητικό σώμα που απορροφά όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω του (ιδανικός απορροφητής δηλαδή $\alpha = 1$) και επίσης εκείνο που επανεκπέμπει όλη την ακτινοβολία που απορ-



θερμοκρασία της φωτόσφαιρας του Ήλιου). Αυτή η ακτινοβολία φτάνει στα όρια της ατμόσφαιρας της Γης και τμήμα της απορροφάται από τα αέρια που βρίσκονται εκεί (κυρίως οξυγόνο, όζον, υδρατμοί, διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, υποξείδιο του αζώτου, χλωροφθοράνθρακες CFC κ.λπ.). Έτσι, στην επιφάνεια της Γης δεν φτάνει ολόκληρο το ηλιακό φάσμα, αλλά το μεγαλύτερο τμήμα του (βλ. Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1 Το ηλιακό φάσμα για την άμεση ηλιακή ακτινοβολία στα όρια της ατμόσφαιρας και στο επίπεδο της θάλασσας. Φαίνονται επίσης η καμπύλη εκπομπής μέλανος σώματος θερμοκρασίας 5.250°C (όση περίπου είναι η θερμοκρασία της φωτόσφαιρας του Ήλιου), καθώς και τμήματα απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας από αέρια της ατμόσφαιρας. (Πηγή: commons.wikimedia.org)

ροφά (δηλαδή $\epsilon = 1$), με αποτέλεσμα να διατηρεί τη θερμοκρασία του σταθερή. Πραγματικό μέλαν σώμα δεν υπάρχει στη φύση (δηλαδή το μέλαν σώμα, είναι μια θεωρητική κατασκευή, ένα θεωρητικό πρότυπο, χρήσιμο για την οικοδόμηση των φυσικών θεωριών), αλλά υπάρχουν σώματα που προσεγγίζουν τις ιδιότητές του (απορρόφηση, εκπομπή), όπως, για παράδειγμα, ένα μαύρο κουτί από συγκεκριμένο υλικό.

Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλιακής ακτινοβολίας εκτείνεται (κατά 99%) ανάμεσα σε μήκη κύματος 0,3-2,5 μm . Το φάσμα διαχωρίζεται συνήθως σε τρεις βασικές περιοχές:

1. Την περιοχή της υπεριώδους ακτινοβολίας² ($\lambda < 0,4 \mu\text{m}$)
2. Την περιοχή της ορατής ακτινοβολίας³ ($0,4 \mu\text{m} < \lambda < 0,7 \mu\text{m}$)⁴
3. Την περιοχή της υπέρυθρης ακτινοβολίας⁵ ($0,7 \mu\text{m} < \lambda$)

Από το παραπάνω διάγραμμα του ηλιακού φάσματος διαπιστώνει κανείς τα εξής:

- Η μέγιστη ενέργεια του ηλιακού φάσματος βρίσκεται σε μήκος κύματος μεταξύ 0,5-0,6 μm (ορατό φάσμα).
- Στο υπεριώδες τμήμα του φάσματος η ενέργεια μειώνεται απότομα καθώς το μήκος κύματος μειώνεται.
- Στο υπέρυθρο τμήμα του φάσματος η ενέργεια μειώνεται με πολύ μικρότερο ρυθμό καθώς το μήκος κύματος αυξάνεται.

Η ακριβής μορφή του ηλιακού φάσματος που φτάνει σε κάθε μέρος της Γης εξαρτάται από την απόσταση που διανύει η ηλιακή ακτινοβολία μέσα στην ατμόσφαιρα. Όσο μεγαλύτερη απόσταση διανύει, τόσο μεγαλύτερη απορρόφηση υφίστανται τα τμήματα του φάσματος που απορροφώνται από τα αέρια της ατμόσφαιρας. Η απόσταση αυτή εξαρτάται από τη σχετική θέση του Ήλιου και του συγκεκριμένου τόπου όπου γίνεται η μέτρηση του φάσματος. Οι ακτίνες του Ήλιου μπορούν να προσπίπτουν κατακόρυφα στο συγκεκριμένο τόπο (και τότε διανύουν τη μικρότερη δυνατή απόσταση μέσα στην ατμόσφαιρα⁶), αλλά μπορεί να προσπίπτουν και υπό γωνία (από 0-90°).

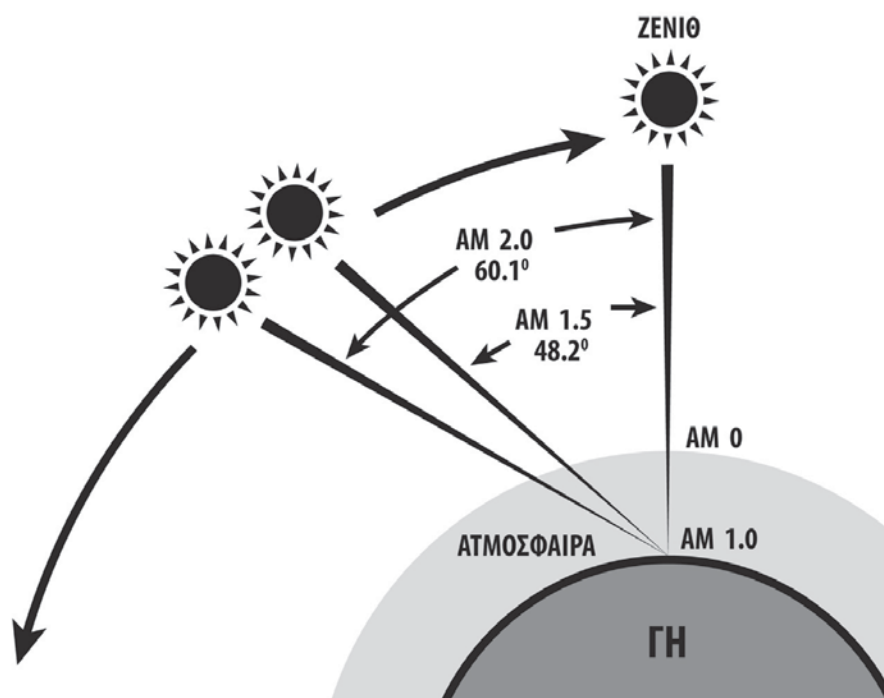
² UV Ultra Violet.

³ Visible Radiation.

⁴ Τα μήκη κύματος στο ορατό φάσμα συχνά εκφράζονται σε «νανόμετρα» nm και είναι 400-700 nm.

⁵ Infrared Radiation IR.

⁶ Ουσιαστικά το λεγόμενο «πάχος» της ατμόσφαιρας.

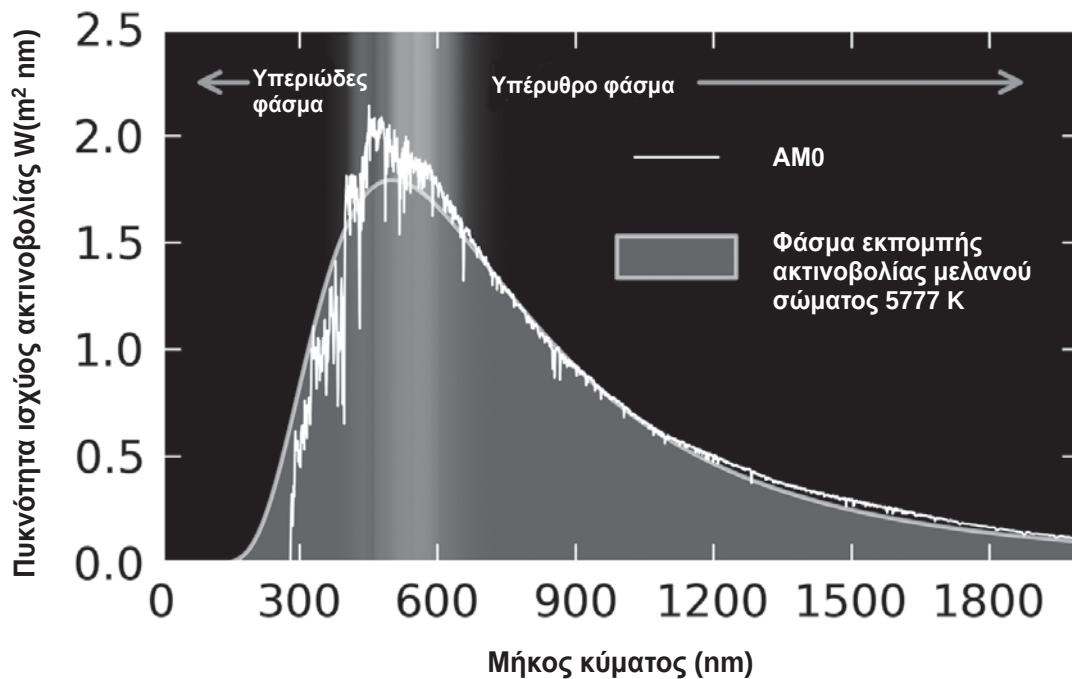


Σχήμα 2.2 Οι βασικές κατηγορίες της «μάζας αέρα» [Air mass], AM0, AM1, AM1,5 AM2.

Για να ξεχωρίζουν οι διάφορες περιπτώσεις ηλιακού φάσματος (ανάλογα με τη διανυόμενη απόσταση μέσα στην ατμόσφαιρα) έχει υιοθετηθεί μια συντομογραφία, το AM⁷, που δηλώνει την απόσταση που διανύει η ηλιακή ακτινοβολία μέσα στην ατμόσφαιρα ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης. Το AM1 υποδηλώνει ότι η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει κατακόρυφα (δηλαδή η γωνία πρόσπτωσης είναι 0°). Τα AM1,5 και AM2 δηλώνουν γωνία πρόσπτωσης ~45° και ~60° αντίστοιχα (δηλαδή μεγαλύτερη διανυόμενη απόσταση στην ατμόσφαιρα). Το AM0 αντιστοιχεί στο φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας στα όρια της ατμόσφαιρας (δηλαδή πριν εισέλθει στο εσωτερικό της). Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας στη Γη για AM0, καθώς και το ισοδύναμο φάσμα του μέλανος σώματος για θερμοκρασία 5.777 K⁸, που είναι η θερμοκρασία του Ήλιου. Το εμβαδόν και των δύο καμπυλών είναι ίσο με 1.367 W/m², όσο είναι και η τιμή της ηλιακής σταθεράς G_{sc} (βλ. παρακάτω).

⁷ Το AM είναι τα αρχικά των λέξεων Air Mass (μάζα αέρα).

⁸ Οι τιμές της θερμοκρασίας στη φωτόσφαιρα του Ήλιου που εμφανίζονται στη βιβλιογραφία έχουν μικρή διακύμανση και εκφράζονται σε βαθμούς Κελσίου °C ή βαθμούς Κέλβιν K.



Σχήμα 2.3 Το ηλιακό φάσμα για την άμεση ηλιακή ακτινοβολία στα όρια της ατμόσφαιρας AM0 και το ισοδύναμο φάσμα του μέλανος σώματος για θερμοκρασία 5.777 K, που είναι η θερμοκρασία του Ήλιου.

(Πηγή: commons.wikimedia.org)

Όπως είναι προφανές, όσο μεγαλύτερη απόσταση διανύει η ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα τόσο περισσότερο εξασθενεί (λόγω της απορρόφησης). Η πυκνότητα ηλιακής ισχύος στα όρια της ατμόσφαιρας (AM0) ονομάζεται *ηλιακή σταθερά* G_{sc} και έχει τιμή $\sim 1.367 \text{ W/m}^2$ ⁹, ενώ για AM1 και AM2 οι τιμές της είναι $\sim 1.060 \text{ W/m}^2$ και $\sim 880 \text{ W/m}^2$ αντίστοιχα¹⁰.

Η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας (ενέργειας) στα διάφορα τμήματα του φάσματος (υπεριώδες, ορατό και υπέρυθρο) δεν είναι ομοιόμορφη, όπως μπορεί να παρατηρήσει κάποιος στο αντίστοιχο σχήμα. Το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας κατανέμεται στο υπέρυθρο τμήμα του φάσματος και το μικρότερο στο υπεριώδες. Για πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας υπό γωνία $\sim 45^\circ$ (AM1,5) η κατανομή της στο έδαφος είναι περίπου¹¹:

⁹ Η τιμή της σε διάστημα ορισμένων ετών έχει διακύμανση $\sim 0,1\%$, που οφείλεται στην αντίστοιχη διακύμανση της ηλιακής δραστηριότητας (Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 24).

¹⁰ Καγκαράκης, 1987, σελ. 32.

¹¹ Twidell & Weir, 2006, σελ. 87.

- 52% υπέρυθρο τμήμα
- 43% ορατό τμήμα
- 5% υπεριώδεις τμήμα.

2.2 Η διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα απ' την ατμόσφαιρα

Η ατμόσφαιρα της Γης εκτείνεται σε ύψος μεγαλύτερο από 300-700 km πάνω από το έδαφος¹². Οι κυριότερες ζώνες της είναι η τροπόσφαιρα, η στρατόσφαιρα, η μεσόσφαιρα και η θερμόσφαιρα. Τα μετεωρολογικά φαινόμενα συμβαίνουν κυρίως στο κατώτερο τμήμα της ατμόσφαιρας, δηλαδή, την τροπόσφαιρα (που εκτείνεται σε ύψος ~17 km πάνω από το έδαφος). Το 99% του συνολικού όγκου της ατμόσφαιρας βρίσκεται μέσα στα πρώτα ~37 km από το έδαφος¹³. Μέχρι αυτά τα ύψη η θερμοκρασία μειώνεται καθ' ύψος με θερμοβαθμίδα 0,65 K/100 m¹⁴, ενώ η ατμοσφαιρική πίεση επίσης μειώνεται αλλά όχι με σταθερό ρυθμό. Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία διέρχεται από την ατμόσφαιρα αλληλεπιδρά με τα αέρια που την αποτελούν μέσω των μηχανισμών της απορρόφησης, της ανάκλασης και της ελαστικής σκέδασης. Τα βασικά αέρια από τα οποία αποτελείται η ατμόσφαιρα και, κυρίως, αλληλεπιδρούν με την ηλιακή ακτινοβολία, είναι το οξυγόνο, το όζον O₃, οι υδρατμοί, το διοξείδιο του άνθρακα CO₂, το μεθάνιο CH₄, το υποξείδιο του αζώτου N₂O, και οι χλωροφθοράνθρακες CFC. Μέσω των μηχανισμών της απορρόφησης, της ανάκλασης και της σκέδασης η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας εξασθενεί και έτσι στην επιφάνεια του εδάφους φτάνει ένα μικρότερο τμήμα της από αυτό που εκπέμπεται από τον Ήλιο.

Στο μηχανισμό της απορρόφησης (συντονισμού) τα μόρια των αερίων απορροφούν συγκεκριμένα μήκη κύματος (συχνότητες) της ηλιακής ακτινοβολίας (που είναι χαρακτηριστικές για κάθε αέριο) και έτσι η ένταση της ηλιακής ενέργειας σ' αυτά τα μήκη κύματος είναι εξασθενημένη όταν φτάνει στο έδαφος.

Στο μηχανισμό της ανάκλασης η ηλιακή ακτινοβολία ανακλάται από τα αέρια της ατμόσφαιρας με τρόπο ανεξάρτητο από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία έχει το ίδιο το μήκος κύματος με την προσπίπτουσα.

Στο μηχανισμό της σκέδασης συμβαίνει ταυτόχρονα εκτροπή της ακτινοβολίας από την πορεία της, καθώς και απορρόφησή της, αλλά και επανεκπομπή της (από

¹² Ανάλογα με την ηλιακή δραστηριότητα. Για περισσότερα βλ. <http://www-das.uwo.edu/~geerts/cwx/notes/chap01/tropo.html> (10/9/2012).

¹³ Φραγκιαδάκης, 2004, σελ. 34.

¹⁴ Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 28.

τα ηλεκτρόνια των αερίων) σε διαφορετικά μήκη κύματος, που έχει ως συνέπεια την ενίσχυση (της έντασης) κάποιων μηκών κύματος και την εξασθένηση κάποιων άλλων.

Ως αποτέλεσμα αυτών των μηχανισμών η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει εξασθενημένη στο έδαφος της Γης. Αν συμβολιστεί με G_g (ή G_t)¹⁵ η πυκνότητα της ηλιακής ισχύος που φτάνει στο έδαφος της Γης, ενώ με G_{sc} η ηλιακή σταθερά G_{sc} (πυκνότητα ηλιακής ισχύος στα όρια της ατμόσφαιρας), τότε θα ισχύει:

$$G_g = G_{sc} \tau_G$$

όπου τ_G είναι καθαρός αριθμός που ονομάζεται συντελεστής μετάδοσης [transmission factor] και εκφράζει το ποσοστό της εξασθένησης της πυκνότητας ηλιακής ισχύος καθώς διαπερνά την ατμόσφαιρα (λόγω σκέδασης και απορρόφησης).

Η μέση τιμή της πυκνότητας της ηλιακής ισχύος G_g από $G_{sc} \sim 1.370 \text{ W/m}^2$ που είναι στα όρια της ατμόσφαιρας (πριν εισέλθει), μειώνεται στο έδαφος της Γης σε (ανώτερες) τιμές της τάξεως των 1.150 W/m^2 .

2.3 Ενεργειακό ισοζύγιο Γης-διαστήματος (εδάφους-ατμόσφαιρας)

Η ηλιακή ακτινοβολία-ενέργεια (κοσμική ηλιακή ακτινοβολία) που φτάνει στα όρια της ατμόσφαιρας¹⁶ υπολογίζεται στα $5,6 \cdot 10^{24} \text{ J}$ σε ετήσια βάση. Περίπου το 31% απ' αυτή ανακλάται άμεσα και επιστρέφει στο διάστημα. Το υπόλοιπο 69% εισέρχεται στην ατμόσφαιρα¹⁷. Το μεγαλύτερο ποσοστό από την ακτινοβολία αυτή φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ μικρό ποσοστό απορροφάται στην ατμόσφαιρα. Έτσι, στην επιφάνεια του εδάφους φτάνει:

- μέρος της μικρού μήκους κύματος κοσμικής ηλιακής ακτινοβολίας που δεν αλληλεπιδρά με την ατμόσφαιρα
- μέρος της κοσμικής ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται στην ατμόσφαιρα
- μέρος της ακτινοβολίας που επανεκπέμπεται από τα αέρια της ατμόσφαιρας λόγω του φαινομένου της σκέδασης (είναι περίπου στα μήκη κύματος της κοσμικής ηλιακής ακτινοβολίας)

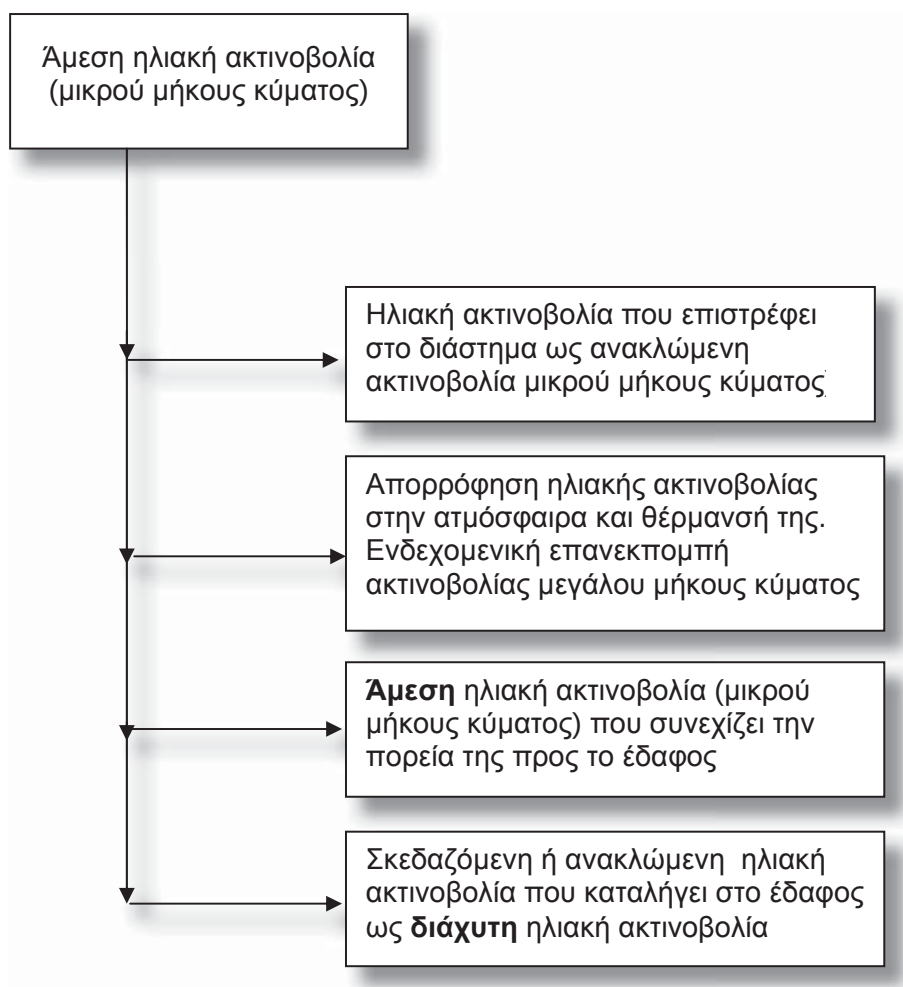
¹⁵ g = global, t = total.

¹⁶ Στην αγγλική βιβλιογραφία αυτή η ακτινοβολία ονομάζεται extraterrestrial solar radiation. Ένας κατάλληλος ελληνικός όρος θα ήταν κοσμική ηλιακή ακτινοβολία.

¹⁷ Τα αριθμητικά στοιχεία προέρχονται από τους Kaltschmitt et al, 2007. Τα ίδια στοιχεία (στη μια ή στην άλλη μορφή) μπορεί κάποιος να τα βρει σε πολλά σημεία της διεθνούς βιβλιογραφίας, όπως, π.χ., Twidell & Weir, 2006 / Sorensen, 2004 κ.λπ.

- (καθώς και) ασήμαντο ποσό μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας (θερμική ακτινοβολία) που εκπέμπεται από τα αέρια της ατμόσφαιρας (και τα νέφη) λόγω αύξησης της θερμοκρασίας τους (από την αλληλεπίδραση με την ηλιακή ακτινοβολία).

Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη Γη χωρίς να σκεδαστεί (ή να ανακλαστεί) είναι η **άμεση** ηλιακή ακτινοβολία, ενώ η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει μετά από ανάκλαση ή σκέδαση ονομάζεται **διάχυτη** ηλιακή ακτινοβολία. Το Σχήμα 2.4 δείχνει συνοπτικά την πορεία της κοσμικής ηλιακής ακτινοβολίας από τα όρια της ατμόσφαιρας έως την επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 2.4 Πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας από τα όρια της ατμόσφαιρας έως την επιφάνεια του εδάφους.

Η αλληλεπίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα είναι *σύνθετη* διαδικασία, τα βασικά στοιχεία της οποίας περιγράφηκαν παραπάνω. Τα κύρια αποτελέσματα αυτής της αλληλεπίδρασης συνοψίζονται στα παρακάτω:

- Η ηλιακή ακτινοβολία καθώς εισέρχεται στην ατμόσφαιρα αλληλεπιδρά κατά ένα μέρος της με τα αέρια της ατμόσφαιρας και ένα άλλο μέρος της φτάνει ανεπηρέαστο στην επιφάνεια
- Τα αέρια της ατμόσφαιρας (γενικά η ατμόσφαιρα) ακτινοβολούν τόσο θερμική ακτινοβολία (δηλαδή μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία) όσο και μικρότερου μήκους κύματος ακτινοβολία προς δυο κατευθύνσεις: προς το διάστημα και προς το έδαφος.

Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος κατά το μεγαλύτερο ποσοστό της απορροφάται (~το 4% ξαναγυρίζει πίσω προς την ατμόσφαιρα¹⁸) μέσω διαφόρων διαδικασιών (εξάτμιση γλυκού και θαλασσινού νερού, φωτοσύνθεσης κ.λπ.). Αποτέλεσμα της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας από το έδαφος είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους (μέση τιμή $\sim 14^{\circ}\text{C} = 287\text{ K}$)¹⁹ και συνεπώς η εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος (το φάσμα της καθορίζεται από τη θερμοκρασία των 287 K). Αυτή η ακτινοβολία που εκπέμπεται από το έδαφος δε διαφεύγει (κατά πολύ μεγάλο ποσοστό) στο διάστημα αλλά απορροφάται (ή ανακλάται) από την ατμόσφαιρα και επανεκπέμπεται (και) προς το έδαφος. Συνεπώς δημιουργείται ένα *σύνθετο ενεργειακό ισοζύγιο* μεταξύ ατμόσφαιρας (του ανώτερου και κατώτερου ορίου της) και εδάφους με θετικές και αρνητικές ενεργειακές ροές, που έχει ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία του εδάφους να είναι $\sim 14^{\circ}\text{C} = 287\text{ K}$ και η θερμοκρασία της εξώτερης ατμόσφαιρας $\sim 54^{\circ}\text{C} = 327\text{ K}$ ²⁰. Η παγίδευση της θερμικής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα έχει ως συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας της Γης κατά 40°C (σε σχέση μ' αυτή που θα είχε αν δεν υπήρχε η ατμόσφαιρα) και οδηγεί στο λεγόμενο φαινόμενο του θερμοκηπίου²¹.

Οι ενεργειακές ροές²² που συμβαίνουν μεταξύ Γης και Ήλιου (ως σύστημα) έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία του *οικοσυστήματος της Γης*, όπως είναι γνωστό τις τελευταίες χιλιετίες.

¹⁸ Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 31.

¹⁹ Twidell & Weir, 2006, σελ. 101.

²⁰ ο.π.

²¹ Τα κυριότερα αέρια που συνεισφέρουν στο λεγόμενο φαινόμενο του θερμοκηπίου [Greenhouse effect] είναι το διοξείδιο του άνθρακα CO_2 , το υποξείδιο του αζώτου N_2O και το μεθάνιο CH_4 , δηλαδή τα λεγόμενα αέρια θερμοκηπίου [Greenhouse Gases/GHG].

²² Για περισσότερα σε σχέση με τις ενεργειακές ροές βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 23-32, ενώ αναλυτικότερα περιγράφονται στον Sorensen, 2004, ειδικότερα σελ. 122-134.



Σχήμα 2.5 Το ενεργειακό ισοζύγιο της Γης μεταξύ ατμόσφαιρας και εδάφους.
(Πηγή: National Aeronautics and Space Administration (NASA))

2.4 Ορισμοί - όροι φυσικών μεγεθών που συνδέονται με την ηλιακή ακτινοβολία

Για παρατηρητή που βρίσκεται στο έδαφος της Γης (σε οριζόντιο επίπεδο) η **ολική ηλιακή ακτινοβολία**²³ που δέχεται μπορεί να διαχωριστεί σε δύο συνιστώσες: την άμεση²⁴ και τη διάχυτη²⁵. Ως **άμεση ηλιακή ακτινοβολία** ορίζεται αυτή που προσπίπτει σε μια επιφάνεια κατευθείαν από τον Ήλιο (διανύοντας ευθύγραμμη πορεία), ενώ ως **διάχυτη** αυτή που προσπίπτει στην ίδια επιφάνεια απ' όλες τις υπόλοιπες κατευθύνσεις. Η πρακτική διάκριση ανάμεσα στις δύο συνιστώσες είναι ότι η άμεση ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να συγκεντρωθεί²⁶, ενώ η διάχυτη όχι. Είναι πολύ σημαντικό όταν γίνεται αναφορά σε μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας να

²³ Total ή global radiation.

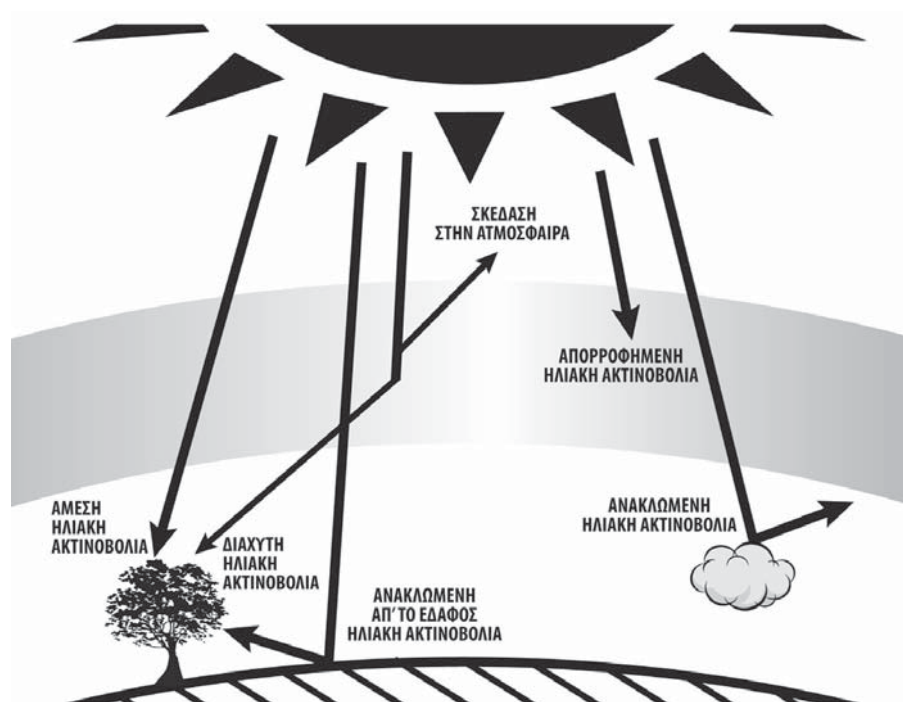
²⁴ Direct ή beam radiation.

²⁵ Diffuse radiation.

²⁶ Γεγονός που αξιοποιείται σε πολλές εφαρμογές ΑΠΕ όπως σε ορισμένους τύπου φωτοβολταϊκών στοιχείων ή θερμικών ηλιακών συλλεκτών κ.λπ.

γίνεται ξεκάθαρο τόσο σε ποια συνιστώσα της αναφερόμαστε (ολική, άμεση ή διάχυτη) όσο και σε επίπεδο ποιου προσανατολισμού προσπίπτει. Το επίπεδο μπορεί να είναι *κάθετο* στη διεύθυνση πρόσπτωσης της ακτινοβολίας, μπορεί να είναι *οριζόντιο* στο συγκεκριμένο τόπο ή να σχηματίζει *τυχαία γωνία πρόσπτωσης* της ηλιακής ακτινοβολίας. Για να είναι ξεκάθαρες αυτές οι διακρίσεις χρησιμοποιούνται κάποιοι διεθνείς δείκτες²⁷, όπως είναι οι παρακάτω²⁸:

Για την ολική ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται ο δείκτης t [total]²⁹, για την άμεση ηλιακή ακτινοβολία ο δείκτης b [beam], για τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία ο δείκτης d [diffuse], για οριζόντιο επίπεδο ο δείκτης h [horizontal], για επίπεδο που ταυτίζεται με την επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη ο δείκτης c [collector], ενώ για επίπεδο κάθετο³⁰ στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία ο δείκτης n . Στο Σχήμα 2.6 φαίνονται η άμεση, η διάχυτη, καθώς και η ανακλώμενη απ' το έδαφος ηλιακή ακτινοβολία (ή albedo, όπως είναι καθιερωμένο να ονομάζεται στη διεθνή βιβλιογραφία).



Σχήμα 2.6 Η άμεση, η διάχυτη και η ανακλώμενη απ' τα σύννεφα και το έδαφος ηλιακή ακτινοβολία.

²⁷ Δηλαδή subscripts.

²⁸ Σε ορισμένα βιβλία μπορεί κάποιος να βρει μικρές διαφοροποιήσεις. Στο παρόν βιβλίο χρησιμοποιούνται οι επικρατέστεροι διεθνείς συμβολισμοί.

²⁹ ή ο δείκτης g από την αγγλική λέξη global.

³⁰ normal ή perpendicular.

Σε όλη τη περιγραφή των ΑΠΕ ο αναγνώστης θα συναντήσει όρους όπως ηλιακή ακτινοβολία, ηλιακή ενέργεια, ηλιακή πυκνότητα ενέργειας, ηλιακή πυκνότητα ισχύος³¹ κ.λπ. Για την καλύτερη κατανόηση της συνέχειας αυτού του κεφαλαίου αλλά και ολόκληρου του βιβλίου, καλό θα ήταν να διασαφηνιστούν οι σημαντικότεροι απ' αυτούς τους όρους (τουλάχιστον όσον αφορά τη χρησιμοποίησή τους σ' αυτό το βιβλίο), καθώς και οι μονάδες μέτρησής τους.

Οι όροι **ηλιακή ακτινοβολία** [*solar radiation*] και **ηλιακή ενέργεια** [*solar energy*] έχουν παρόμοια σημασία και χρησιμοποιούνται ανάλογα με το ποιος «ταιριάζει» καλύτερα στο συγκεκριμένο πλαίσιο χρησιμοποίησης. Οι μονάδες μέτρησής τους είναι το Joule (J) στο διεθνές σύστημα (SI) ή η βατώρα (Wh) ή κιλοβατώρα (kWh).

Ο όρος **πυκνότητα ηλιακής ενέργειας** [*irradiation or radiant exposure*] χρησιμοποιείται για να περιγραφεί η «ποσότητα» ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μια επιφάνεια ανά μονάδα μέτρησής της³². Δηλαδή εκφράζει την ενέργεια/επιφάνεια και οι μονάδες μέτρησής της είναι το 1 J/m^2 στο διεθνές σύστημα (SI) ή η βατώρα ή κιλοβατώρα ανά τετραγωνικό μέτρο (1 Wh/m^2 , 1 kWh/m^2).

Ο όρος **πυκνότητα ηλιακής ισχύος**³³ [*irradiance*] χρησιμοποιείται όταν χρειάζεται να περιγραφεί ο ρυθμός με τον οποίο δέχεται ενέργεια μια επιφάνεια ανά μονάδα μέτρησής της, δηλαδή εκφράζει την ισχύ/επιφάνεια και οι μονάδες μέτρησής της είναι το 1 W/m^2 (SI) ή kW/m^2 .

Ο αγγλικός συμβολισμός G χρησιμοποιείται συνήθως για να δηλώσει την πυκνότητα ηλιακής ισχύος μαζί με τους κατάλληλους δείκτες κάθε φορά. Για παράδειγμα, το σύμβολο G_t ³⁴ σημαίνει τη συνολική πυκνότητα ηλιακής ισχύος, ενώ το G_b την αντίστοιχη άμεση πυκνότητα ηλιακής ισχύος και το G_d την αντίστοιχη διάχυτη πυκνότητα ηλιακής ισχύος³⁵.

³¹ Στην αγγλική βιβλιογραφία όρους όπως radiation, irradiation, irradiance κ.λπ.

³² Συχνά στην ελληνική και την αγγλική βιβλιογραφία οι όροι ηλιακή ενέργεια και πυκνότητα ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιούνται με την ίδια σημασία. Ο βασικότερος (και ευκολότερος) τρόπος με τον οποίο μπορεί κάποιος να διακρίνει ποιο είναι το περιεχόμενο του όρου που χρησιμοποιείται είναι να δει τις μονάδες μέτρησης (Wh ή Wh/m^2 αντίστοιχα).

³³ Μπορεί σε κάποιο βιβλίο της ελληνικής βιβλιογραφίας να διαβάσετε τον όρο ένταση ακτινοβολίας ή κάποιον άλλο όρο.

³⁴ Σε άλλα βιβλία γράφεται G_g .

³⁵ Μερικές φορές στην ελληνική βιβλιογραφία ο όρος ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται αδιάκριτα για να δηλώσει την πυκνότητα ηλιακής ισχύος ή την πυκνότητα ηλιακής ενέργειας και το σύμβολο G χρησιμοποιείται για όλες αυτές τις περιπτώσεις. Προτείνεται στον αναγνώστη που διαβάζει ελληνικό κείμενο να ξεχωρίζει (από τα συμφραζόμενα ή τη μονάδα μέτρησης) σε ποια έννοια αντιστοιχεί ο όρος ηλιακή ακτινοβολία.

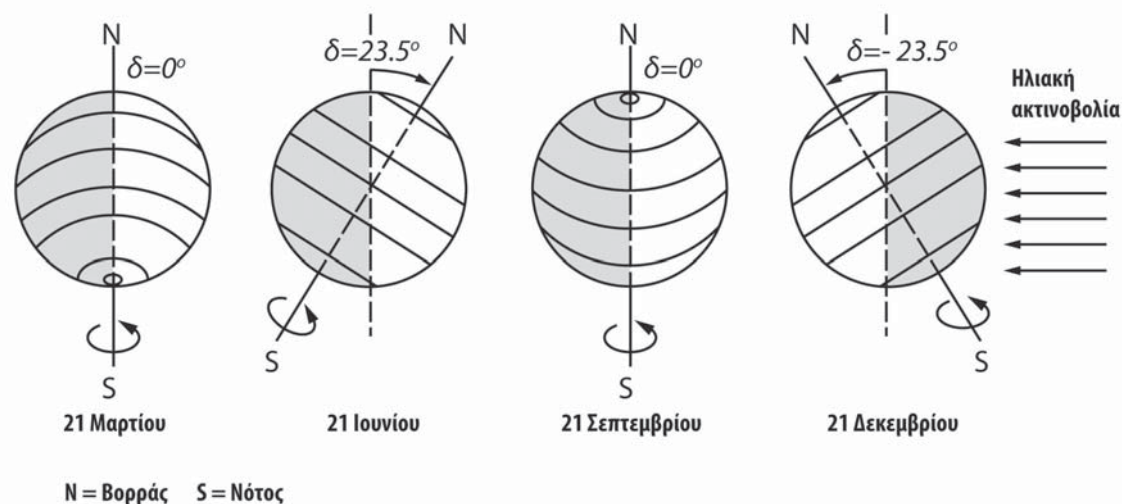
2.5 Η γεωμετρική σχέση ηλιακής ακτινοβολίας και γήινης επιφάνειας

2.5.1 Βασικές έννοιες

Οι υπολογισμοί για την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια που βρίσκεται στο έδαφος της Γης εμπλέκουν ένα σύνολο από γωνίες που σχηματίζονται τόσο μεταξύ Γης και Ήλιου όσο και μεταξύ της διεύθυνσης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στο επίπεδο (στην επιφάνεια) και του ίδιου του επιπέδου³⁶. Παρακάτω παρατίθενται τα σύμβολα που θα χρησιμοποιηθούν σ' αυτό το βιβλίο, καθώς και οι τιμές τους³⁷.

Γεωγραφικό πλάτος φ [latitude]: μπορεί να είναι θετικό (Βόρειο Ημισφαίριο) ή αρνητικό (Νότιο Ημισφαίριο) $-90^\circ \leq \varphi \leq +90^\circ$.

Απόκλιση (ηλιακή) δ [declination]: μπορεί να είναι θετική ή αρνητική, Βόρεια: θετική, $-23,45^\circ \leq \delta \leq +23,45^\circ$.



Σχήμα 2.7 Η γωνία απόκλισης δ (declination) της Γης στις ημερομηνίες των ισημεριών και των ηλιοστασίων.

³⁶ Οι λέξεις επιφάνεια, επίπεδο και επιφάνεια επιπέδου χρησιμοποιούνται παρακάτω με την ίδια σημασία.

³⁷ Όπου χρειάζεται δίνονται μικρές διευκρινίσεις που μπορούν να κατανοηθούν σε συνάρτηση με τα σχήματα που παρατίθενται παρακάτω.

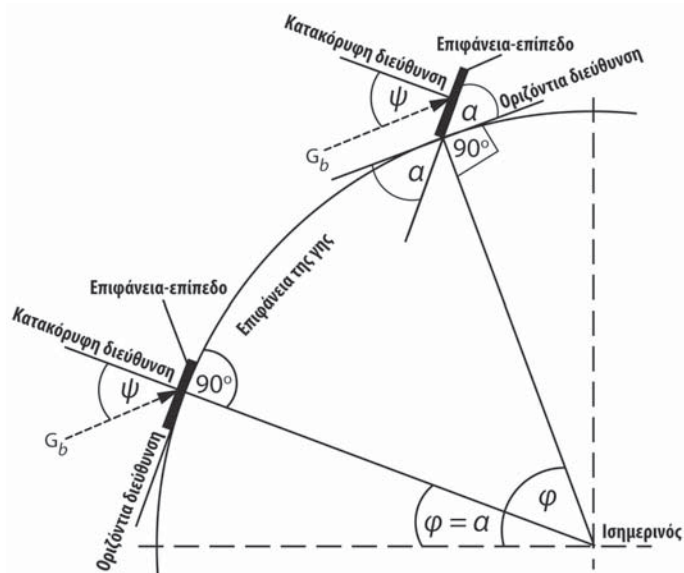
Κλίση α (slope): Η γωνία μεταξύ της επιφάνειας του επιπέδου και της οριζόντιας διεύθυνσης (όταν η επιφάνεια είναι οριζόντια, η κλίση α είναι μηδέν = 0).

Αζιμουθιακή γωνία επιφάνειας β [Surface Azimuth angle]: Η απόκλιση της επιφάνειας από τη νότια κατεύθυνση (όταν είναι νότιος ο προσανατολισμός της επιφάνειας, τότε $\beta=0$ και η κατεύθυνση προς τα δυτικά είναι η θετική) $-180^\circ \leq \beta \leq +180^\circ$

Ημερήσια γωνία του Ήλιου ω_h [hourly angle of the sun]: Η γωνία είναι μηδέν=0 όταν ο Ήλιος είναι στο υψηλότερο σημείο του στη διάρκεια της ημέρας, ενώ είναι αρνητική το πρωί και θετική το απόγευμα. Η ω_h μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την πραγματική ηλιακή ώρα [True Solar Time TST].

2.5.2 Υπολογισμός της πυκνότητας άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντια και κεκλιμένη επιφάνεια (επίπεδο)

Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία που προσλαμβάνει μια επιφάνεια πάνω στη Γη εξαρτάται από το συγκεκριμένο τόπο (γεωγραφικό πλάτος και μήκος), τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο στη διάρκεια του έτους (μέρα-μήνας), καθώς και από τη γωνία πρόσπτωσης ψ της ακτινοβολίας πάνω στην επιφάνεια. Το παρακάτω σχήμα δείχνει δύο τέτοιες επιφάνειες, που η μια είναι οριζόντια, ενώ η άλλη σχηματίζει κλίση α με την οριζόντια διεύθυνση³⁸.



Σχήμα 2.8 Η γεωμετρία της πρόσπτωσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντια και κεκλιμένη επιφάνεια στο έδαφος της Γης.

³⁸ Το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μια επιφάνεια εξαρτάται από την κλίση της επιφάνειας. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν γραφικές παραστάσεις που δείχνουν αυτή την εξάρτηση. Για παράδειγμα, ένα τέτοιο καλό σχήμα μπορείτε να βρείτε στους Duffie & Beckman, 2006.

Η γωνία ψ μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση:

$$\cos\psi = (\cos\alpha \sin\varphi - \cos\varphi \cos\beta \sin\alpha) \sin\delta + (\sin\varphi \cos\beta \sin\alpha + \cos\alpha \cos\varphi) \cos\delta \cos\omega_h + \sin\beta \sin\alpha \cos\delta \sin\omega_h \quad (2.1)$$

Η γωνία ω_h μπορεί να υπολογιστεί από την πραγματική ηλιακή ώρα [True Solar Time TST] ξεκινώντας από την τοπική ώρα LT³⁹ [Local Time] και την ώρα E που λαμβάνει υπόψη της τις περιοδικές διαταραχές του ρυθμού περιστροφής της Γης. Η παρακάτω σχέση μάς δίνει την ω_h :

$$\omega_h = (LT - 60 + 4 (\lambda_0 - \lambda) + E) / 60 \cdot 15 - 180 \quad (2.2)$$

με

$$E = 229,2 [0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B - 0,014615 \cos(2B) - 0,04089 \sin(2B)]$$

και

$$B = (n-1)360/365$$

όπου n είναι η συγκεκριμένη μέρα του χρόνου ($n = 1, 2, 3 \dots 365$), λ_0 είναι ο μεσημβρινός αναφοράς (-15° για ώρα Greenwich GMT) και λ το γεωγραφικό πλάτος του συγκεκριμένου τόπου.

Η απόκλιση δ παίρνει τιμές (βλέπε παραπάνω) από $-23,45^\circ$ (στις 22 Δεκεμβρίου) έως $+23,45^\circ$ (στις 22 Ιουνίου) και μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση:

$$\delta = -23,45 \cos \frac{2\pi}{365,25} (n+10) \quad (2.3)$$

Αν η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια (η κλίση $\alpha = 0$), τότε η παραπάνω σχέση (1) για τη γωνία ψ γίνεται:

$$\cos\psi_z = \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos\omega_h \quad (2.4)$$

Για να υπολογιστεί η *άμεση πυκνότητα ηλιακής ισχύος* $G_{b,a}$ που προσπίπτει σε επιφάνεια που σχηματίζει γωνία κλίσης α με το οριζόντιο επίπεδο χρησιμοποιείται η τιμή της άμεσης πυκνότητας ηλιακής ισχύος G_b που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια, καθώς και οι τιμές των γωνιών ψ , β , γ ⁴⁰ σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$G_{b,a} = G_b [\sin\psi \cos\alpha - \sin\alpha \cos\psi \sin(\gamma - \beta)] \quad (2.5)$$

³⁹ Χειμερινή ώρα εκφρασμένη σε ώρες.

⁴⁰ Όπου γ είναι η ηλιακή αζιμουθιακή γωνία δηλαδή η γωνιακή απόκλιση των ακτίνων του Ήλιου από τον πραγματικό νότο (για το Βόρειο Ημισφαίριο). Οι δυτικές αποκλίσεις θεωρούνται θετικές.

2.5.3 Υπολογισμός της πυκνότητας διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια (επίπεδο)

Ο υπολογισμός της πυκνότητας διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο δεν είναι εύκολος μέσω μιας ακριβούς μαθηματικής σχέσης, καθώς εμπλέκονται πολλοί παράγοντες, οι οποίοι δεν είναι σταθεροί. Μια σχετικά απλή μαθηματική σχέση μπορεί να εξαχθεί αν υποτεθεί ότι η διάχυτη ακτινοβολία εκπέμπεται *ισότροπα* στο χώρο (δηλαδή σε όλες τις κατευθύνσεις έχει την ίδια ένταση)⁴¹. Τότε η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο $G_{d,\alpha}$ εξαρτάται από τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο G_d και τη γωνία κλίσης α του επιπέδου (της επιφάνειας) με το οριζόντιο επίπεδο:

$$G_{d,\alpha} = \frac{1}{2} G_d (1 + \cos \alpha) \quad (2.6)$$

2.5.4 Υπολογισμός της πυκνότητας της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια (επίπεδο)

Ένα (σχετικά) μικρό ποσοστό της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει σε κεκλιμένη επιφάνεια (επίπεδο) οφείλεται σε ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο έδαφος γύρω από την επιφάνεια και στη συνέχεια ανακλάται προς αυτή την επιφάνεια. Για να υπολογιστεί η ανακλώμενη ακτινοβολία χρειάζεται να είναι γνωστός ο λεγόμενος αριθμός albedo A_G (με αυτή την ονομασία αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία) του εδάφους. Ο αριθμός albedo A_G είναι δείκτης του ποσοστού της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται από το έδαφος (και ό,τι το περιβάλλει). Η τιμή του είναι συνήθως σχετικά μικρή, αλλά μεγαλώνει σε περιπτώσεις εδαφών (επιφανειών) που έχουν μεγάλη ανακλαστικότητα (π.χ., χιονοσκεπείς επιφάνειες). Για παράδειγμα, στο χιόνι έχει τιμές μεταξύ 0,7-0,9, στην άμμο 0,25-0,35, ενώ σε αγροτικές ή δασώδεις εκτάσεις 0,1-0,2⁴². Η πυκνότητα $G_{r,\alpha}$ της ανακλώμενης (reflected) ηλιακής ακτινοβολίας δίνεται από τη σχέση:

$$G_{r,\alpha} = A_G G_g \sin^2(\alpha/2) \quad (2.7)$$

όπου G_g (ή G_t) η πυκνότητα της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας.

⁴¹ Η υπόθεση της ισότροπης εκπομπής της διάχυτης ακτινοβολίας βρίσκεται πολύ κοντά στην πραγματικότητα σε περιπτώσεις ανέφελου ουρανού ή χρησιμοποιείται όταν η ακρίβεια του υπολογισμού δε μας ενδιαφέρει να είναι σε πολύ υψηλά επίπεδα. Όταν χρειάζεται μια καλύτερη προσέγγιση, υπάρχουν μαθηματικές εξισώσεις με πολύ περισσότερες παραμέτρους που εξειδικεύουν κάθε συγκεκριμένη κατάσταση. Για περισσότερα βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 37. Για περισσότερα σε σχέση με τον υπολογισμό της ημερήσιας, μηνιαίας και ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο βλ. Duffie & Beckman, 2006, σελ. 85-113.

⁴² Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 38.

2.5.5 Υπολογισμός της πυκνότητας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια (επίπεδο)

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, η πυκνότητα της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας $G_{g,a}$ (ή $G_{t,a}$) σε κεκλιμένη επιφάνεια (επίπεδο)⁴³ θα δίνεται από τη σχέση:

$$G_{g,a} = G_{b,a} + G_{d,a} + G_{r,a} \quad (2.8)$$

2.6 Κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος της Γης

Η πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στα όρια της ατμόσφαιρας εξαρτάται από δύο κυρίως παράγοντες: α) τη διακύμανση της ηλιακής δραστηριότητας και β) τη μεταβαλλόμενη (περιοδικά) μέση απόσταση Γης-Ήλιου. Η εξάρτηση που οφείλεται στον πρώτο παράγοντα καταλήγει σε μικρές μεταβολές της τάξης του 1,5% με διαφορετικές περιοδικότητες και ένταση που οφείλεται κυρίως στις ηλιακές κηλίδες⁴⁴.

Όσον αφορά το δεύτερο παράγοντα η παρακάτω σχέση είναι σχετικά ακριβής στα πλαίσια των εφαρμογών ενός μηχανικού⁴⁵:

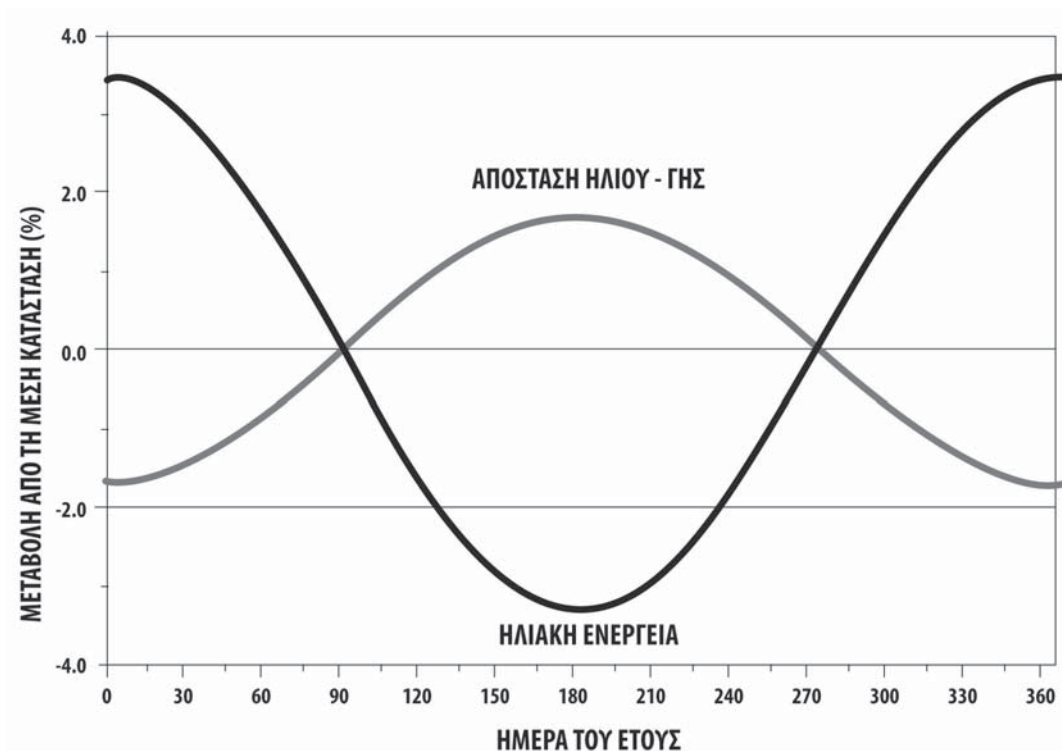
$$G = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (2.9)$$

όπου G είναι η πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας που πέφτει κάθετα σε ένα επίπεδο στα όρια της ατμόσφαιρας και n είναι η νιοστή ημέρα του έτους.

⁴³ Για μια εφαρμογή των παραπάνω στον υπολογισμό της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα επίπεδο και τη συσχέτιση με τις ώρες ηλιοφάνειας βλ. Li D.H.W., Lam T.N.T, Chu, V.W.C., 2008, *Relationship between the total solar radiation on tilted surfaces and the sunshine hours in Hong Kong*, Solar Energy 82, 1220-1228.

⁴⁴ Duffie & Beckman, 2006, σελ. 9. Οι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι για τις εφαρμογές ενός μηχανικού τέτοιες διακυμάνσεις είναι αμελητέες.

⁴⁵ Στους Duffie & Beckman, 2006, σελ. 9, μπορείτε να βρείτε μια πιο αναλυτική και ακριβή σχέση.



Σχήμα 2.9 Η διακύμανση της ενέργειας που δέχεται η Γη συναρτήσει της ημέρας του έτους.

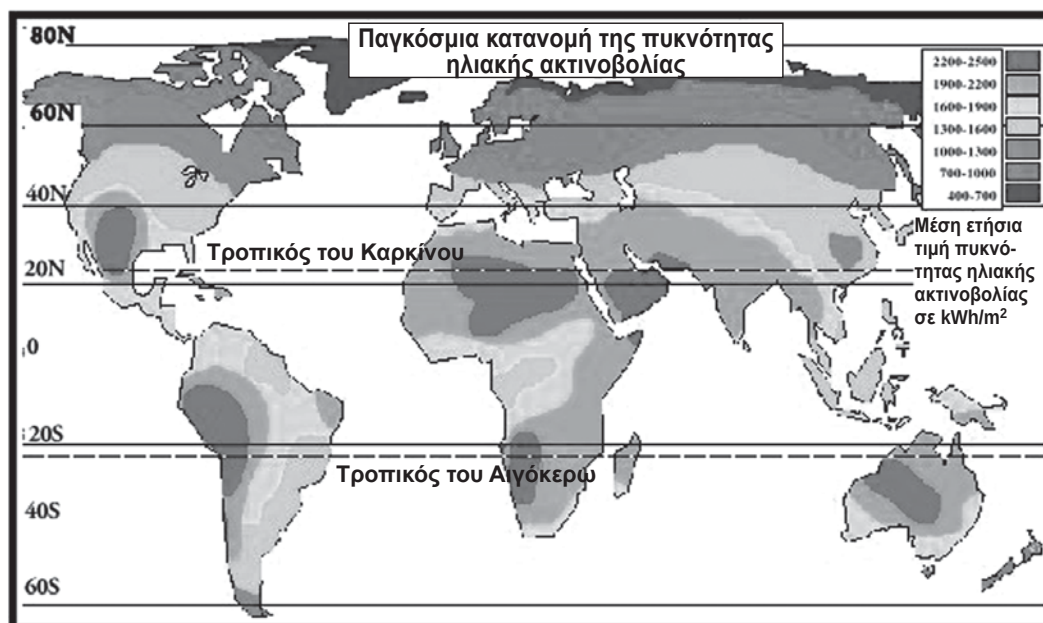
Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στα όρια της ατμόσφαιρας διαπερνά την ατμόσφαιρα, όπου υφίσταται τα φαινόμενα της σκέδασης και της απορρόφησης (βλ. 2.2) και φτάνει στο έδαφος της Γης. Σε κάθε περιοχή μπορεί να μετρηθεί η ημερήσια, η μηνιαία και η ετήσια ηλιακή ακτινοβολία. Το φυσικό μέγεθος που συνήθως υπολογίζεται είναι η πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας-ενέργειας, η οποία εκφράζεται (τις περισσότερες φορές) σε kWh/m^2 για οριζόντια επιφάνεια.

Το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει σε κάθε περιοχή της Γης εξαρτάται αρχικά: α) από το γεωγραφικό πλάτος κάθε τόπου και β) από ειδικά μορφολογικά χαρακτηριστικά⁴⁶ και το μικροκλίμα κάθε περιοχής. Οι υψηλότερες τιμές πυκνότητας ηλιακής ακτινοβολίας-ενέργειας παρατηρούνται στις περιοχές γύρω από τον ισημερινό (κυρίως σε γεωγραφικά πλάτη $15-35^\circ \text{ N}$ ή S)⁴⁷. Σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη οι τιμές μειώνονται. Στο Σχήμα 2.10 φαίνονται οι περιοχές της

⁴⁶ Για παράδειγμα (και γενικά) σε περιοχές που βρίσκονται στην ίδια περιοχή το μεγαλύτερο ετήσιο ποσό ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτει στα μέρη με μεγαλύτερο υψόμετρο.

⁴⁷ Για περισσότερα βλ. Black J.N., *The Distribution of Solar Radiation over the Earth's Surface* από <http://www.springerlink.com/content/y247356868416374/fulltext.pdf> (10/3/2012).

Γης και οι αντίστοιχες ζώνες με τις ετήσιες τιμές της «πυκνότητας ηλιακής ακτινοβολίας-ενέργειας» εκφρασμένες σε kWh/m².



Σχήμα 2.10 Η πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας-ενέργειας σε διάφορες ζώνες της Γης.
(Πηγή: www.alternative-energy-resources.net)

2.7 Χρονικές μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας

Η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε έναν τόπο παρουσιάζει χρονικές μεταβολές κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, ενός μήνα, καθώς και ετήσιες. Κάποιες απ' αυτές τις μεταβολές είναι περιοδικές (και είναι σχετικά προβλέψιμες), ενώ άλλες είναι στοχαστικές. Δύο προβλέψιμες μεταβολές είναι οι παρακάτω:

- Η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της ημέρας παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή της τις μεσημεριανές ώρες όταν ο Ήλιος βρίσκεται στο «ζενίθ».
- Οι μεγαλύτερες τιμές της μηνιαίας ηλιακής ακτινοβολίας σε τόπο του Βορείου Ημισφαιρίου είναι τους καλοκαιρινούς μήνες, ενώ οι μικρότερες τους χειμερινούς μήνες.

Οι στοχαστικές μεταβολές οφείλονται σε συνδυασμό (μετεωρολογικών και κλιματικών) παραγόντων που επηρεάζουν τη διακύμανση της ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια ξεχωριστών ημερών, μηνών ή ετών. Η βασική παράμετρος που επηρεάζει την ηλιακή ακτινοβολία είναι το ποσοστό κάλυψης του ουρανού από τα νέφη.

Όταν η ημέρα είναι αίθρια, υπάρχει το μεγαλύτερο δυνατό ποσοστό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ, όταν είναι νεφосκεπής, μια επιφάνεια στο έδαφος δέχεται μόνο διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία. Επίσης, ακόμα και σε μια αίθρια, η σύσταση των αερίων της ατμόσφαιρας (ιδιαίτερα πάνω από βιομηχανικές περιοχές) μπορεί να επηρεάσει το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος.

α) Οι χρονικές μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας από τόπο σε τόπο

Οι διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας σε έναν τόπο περιγράφονται από πίνακες μετρήσεων που δίνουν τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (για την ακρίβεια πυκνότητας ολικής ηλιακής ισχύος σε W/m^2 ή άλλη αντίστοιχη μονάδα μέτρησης) σε οριζόντιο επίπεδο ανά χρονικό διάστημα 10 ή 15 ή 30 min⁴⁸. Απ' αυτούς τους πίνακες μπορεί να εξαχθεί η συνολική πυκνότητα ολικής ηλιακής ενέργειας-ακτινοβολίας (εκφρασμένη συνήθως σε Wh/m^2 ή kWh/m^2) στη διάρκεια μιας ώρας, μιας ημέρας, ενός μήνα ή ενός έτους και να αποτυπωθεί σε πίνακες και γραφικές παραστάσεις. Για να έχουν πρακτική αξία αυτά τα δεδομένα χρειάζεται να καλύπτουν χρονικές περιόδους αρκετών ετών (από 10 έως 30)⁴⁹. Στο παράρτημα υπάρχει πίνακας όπου παρουσιάζονται οι τιμές της πυκνότητας ολικής ηλιακής ενέργειας-ακτινοβολίας σε ελληνικές πόλεις με δεδομένα που έχουν συλλεχθεί στη χρονική περίοδο 1955-1997⁵⁰.

Από τον πίνακα φαίνεται ότι μέγιστες τιμές έχουμε στη νότια Ελλάδα (μέγιστη τιμή στο Τυμπάκι της Κρήτης $1.787 kWh/m^2$), ενώ ελάχιστες τιμές στη βόρεια Ελλάδα (ελάχιστη τιμή Ιωάννινα $1.476 kWh/m^2$).

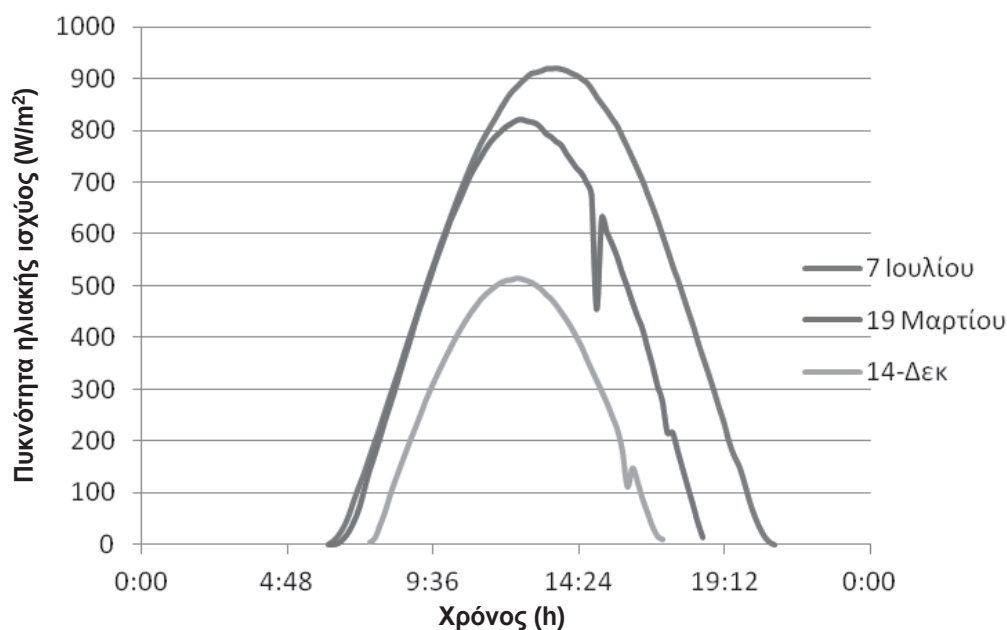
β) Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας σε έναν τόπο στη διάρκεια μιας ημέρας

Κατά τη διάρκεια μιας τυπικής αίθριας ημέρας το μέγιστο της πυκνότητας ολικής ηλιακής ισχύος εμφανίζεται τις μεσημεριανές ώρες. Στο Σχήμα 2.11 φαίνεται η μεταβολή της πυκνότητας ολικής ηλιακής ισχύος στα Χανιά της Κρήτης (γεωγρα-

⁴⁸ Τέτοιοι πίνακες στην Ελλάδα υπάρχουν από διάφορες επιστημονικές πηγές (βλ. Παράρτημα).

⁴⁹ Σε περιπτώσεις που απουσιάζουν δεδομένα για ένα μέρος μιας μεγάλης χρονικής περιόδου και χρειάζομαστε δεδομένα, π.χ., για την μελέτη μιας εγκατάστασης, τότε μπορούμε να αντλήσουμε διαθέσιμα δεδομένα από παραπλήσιες περιοχές (ή περιοχές με παρόμοιες μετεωρολογικές παραμέτρους) ή να κάνουμε «προβολές» των διαθέσιμων δεδομένων στο χρονικό διάστημα που απαιτείται.

⁵⁰ ΤΟΤΕΕ 20701-3/2010, ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ, Αθήνα, Ιούλιος 2010.



Σχήμα 2.11 Η πυκνότητα ολικής ηλιακής ισχύος στα Χανιά της Κρήτης (γεωγραφικό πλάτος $\varphi = 35,5^\circ$) για τρεις διαφορετικές ημέρες κοντά στο χειμερινό και το θερινό ηλιοστάσιο, καθώς και στην εαρινή ισημερία.

(Πηγή: Εργαστήριο Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων Πολυτεχνείου Κρήτης)

φικό πλάτος $\varphi = 35,5^\circ$) για τρεις διαφορετικές ημέρες στη διάρκεια του έτους⁵¹. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η μέγιστη τιμή στη διάρκεια της ημέρας είναι γύρω στις 12⁰⁰-13⁰⁰, ενώ η μέγιστη τιμή στη διάρκεια του έτους είναι το καλοκαίρι και η μικρότερη το χειμώνα. Το εμβαδόν που περικλείεται ανάμεσα στην καμπύλη και τον άξονα του χρόνου δίνει τη συνολική ημερήσια πυκνότητα ολικής ηλιακής ενέργειας-ακτινοβολίας εκφρασμένη σε Wh/m^2 . Η μέση τιμή αυτού του φυσικού μεγέθους για χρονικό διάστημα πέντε ετών (στο Ηράκλειο της Κρήτης με γεωγραφικό πλάτος $\varphi = 35,5^\circ$) είναι $5 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ ⁵². Για περιοχές κοντά στον ισημερινό (με πάνω από 15° γεωγραφικό πλάτος) είναι μεγαλύτερη (μέχρι $7 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$), ενώ σε περιοχές με πάνω από 50° γεωγραφικό πλάτος είναι μικρότερη από $3 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ ⁵³.

⁵¹ Αντίστοιχα τέτοια διαγράμματα μπορούν να βρεθούν στην ελληνική και τη διεθνή βιβλιογραφία για άλλα μέρη.

⁵² Φραγκιαδάκης, 2004.

⁵³ ο.π.

γ) Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας σε έναν τόπο στη διάρκεια των ετών

Σε συγκεκριμένο τόπο η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο δεν αλλάζει μόνο από μέρα σε μέρα ή από μήνα σε μήνα αλλά και από έτος σε έτος. Οι τιμές της πυκνότητας ολικής ηλιακής ενέργειας-ακτινοβολίας για ένα έτος μπορεί να διαφέρουν στη διάρκεια των ετών πάνω από 10%, ενώ οι μέγιστες από τις ελάχιστες τιμές κατά τη διάρκεια πολλών ετών μπορεί να είναι ακόμα μεγαλύτερες.

2.8 Μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας – Όργανα

Η μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να γίνει από όργανα-συσσκευές, οι οποίες μετρούν το φυσικό μέγεθος *πυκνότητα ηλιακής ισχύος*. Ανάλογα με το σχεδιασμό τους τα όργανα μπορεί να μετρούν την ολική, την άμεση και τη διάχυτη πυκνότητα ηλιακής ισχύος. Όλα τα βασικά όργανα⁵⁴ που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας μπορούν (για μεθοδολογικούς σκοπούς) να θεωρηθούν παραλλαγές δυο οργάνων: του πυρανόμετρου (το οποίο μετράει την πυκνότητα *ολικής ηλιακής ισχύος*) και του πυρηλιόμετρου (το οποίο μετράει την πυκνότητα *άμεσης ηλιακής ισχύος*).

Η πυκνότητα ηλιακής ισχύος δεν είναι φυσικό μέγεθος που μπορεί να μετρηθεί άμεσα. Έτσι λοιπόν η βασική αρχή λειτουργίας των οργάνων είναι η μέτρηση φυσικής ποσότητας (συνήθως της θερμότητας που αναπτύσσεται στους αισθητήρες των οργάνων εξαιτίας της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας⁵⁵) και η συσχέτισή της μέσω κάποιων φυσικών-μαθηματικών σχέσεων με το φυσικό μέγεθος της πυκνότητας ηλιακής ισχύος⁵⁶.

Το συνηθέστερο όργανο που μετράει την *πυκνότητα ολικής ηλιακής ισχύος* (συνήθως σε kW/m^2) είναι το πυρανόμετρο [pyranometer]. Στη βασική εκδοχή του αποτελείται από μια θερμοπύλη ευαίσθητη σε όλο το ηλιακό φάσμα (~300-2.800 nm), η οποία περιβάλλεται από γυάλινο θόλο που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία υπό γωνία 0-180°. Το πυρανόμετρο συνήθως τοποθετείται οριζόντια (για να

⁵⁴ Τα είδη των οργάνων που χρησιμοποιούνται καθορίζονται ουσιαστικά από προδιαγραφές που θέτουν τόσο ο Παγκόσμιος Οργανισμός Μετεωρολογίας (World Meteorological Organisation – WMO, http://www.wmo.int/pages/index_en.html) όσο και ο Διεθνής Οργανισμός Μέτρων και Σταθμών (International Standards Organisation – ISO, <http://www.iso.org/iso/home.html>).

⁵⁵ Συνήθως η θερμότητα που ανιχνεύεται σε μια θερμοπύλη μετατρέπεται σε ένα ηλεκτρικό σήμα το οποίο αντιστοιχεί σε μια ηλεκτρική τάση και η οποία στη συνέχεια αντιστοιχείται σε «πυκνότητα ηλιακής ισχύος».

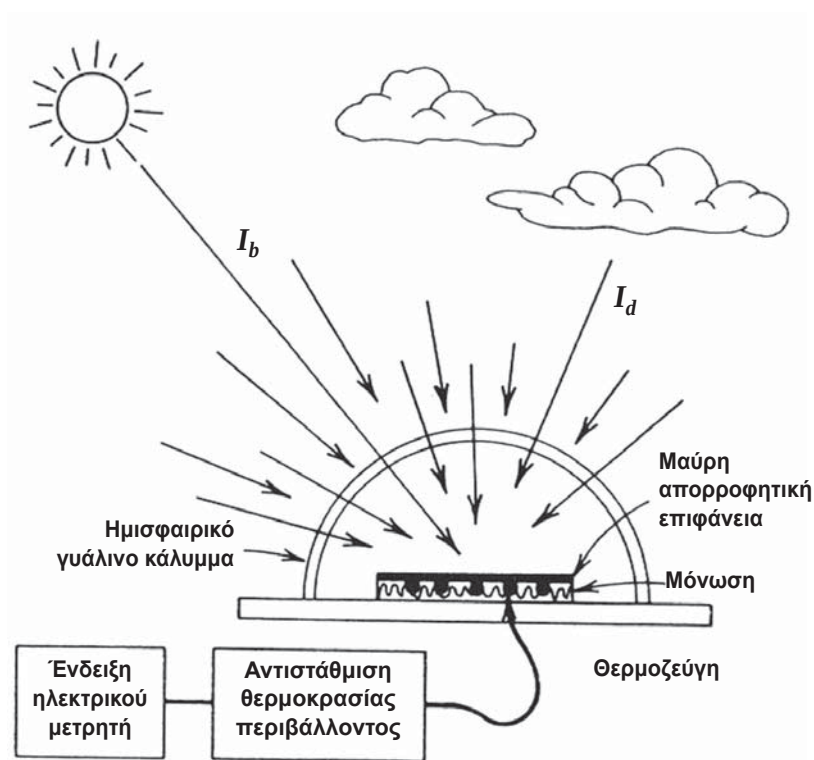
⁵⁶ Για περισσότερα βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 38-39.

μετράει τη πυκνότητα ολικής ηλιακής ισχύος σε οριζόντια επιφάνεια) εκτός από εξειδικευμένες περιπτώσεις⁵⁷. Η θέση του πρέπει να είναι τέτοια που να μπορεί να δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία ανεμπόδιστα απ' όλες τις κατευθύνσεις και χωρίς να σκιάζεται.



Εικόνα 2.1 Πυρανόμετρο για τη μέτρηση της «πυκνότητας ολικής ηλιακής ισχύος». (Πηγή: *commons.wikimedia.org*)

⁵⁷ Για παράδειγμα, η μέτρηση (κυρίως σε εργαστηριακές διατάξεις) της πυκνότητας ολικής ηλιακής ισχύος στην επιφάνεια ενός συλλέκτη (θερμικού ή φωτοβολταϊκού) που είναι σε κλίση σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο.



Σχήμα 2.12 Η αρχή λειτουργίας ενός πυρανομέτρου.
(Πηγή: <http://www.powerfromthesun.net>)

Για τη μέτρηση της *πυκνότητας άμεσης ηλιακής ισχύος* χρησιμοποιείται το πυρηλιόμετρο [pyrheliometer]. Το πυρηλιόμετρο είναι συνδεδεμένο με μηχανισμό ανίχνευσης της πορείας του Ήλιου (ιχνηλάτης [tracker]), έτσι ώστε η ηλιακή ακτινοβολία να προσπίπτει συνεχώς κάθετα στην αισθητήρια επιφάνειά του.

Για τη μέτρηση της *πυκνότητας διάχυτης ηλιακής ισχύος* χρησιμοποιείται πυρανόμετρο στο οποίο υπάρχει σκίαστρο που αποκόβει την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και μηχανισμός ανίχνευσης της πορείας του Ήλιου.