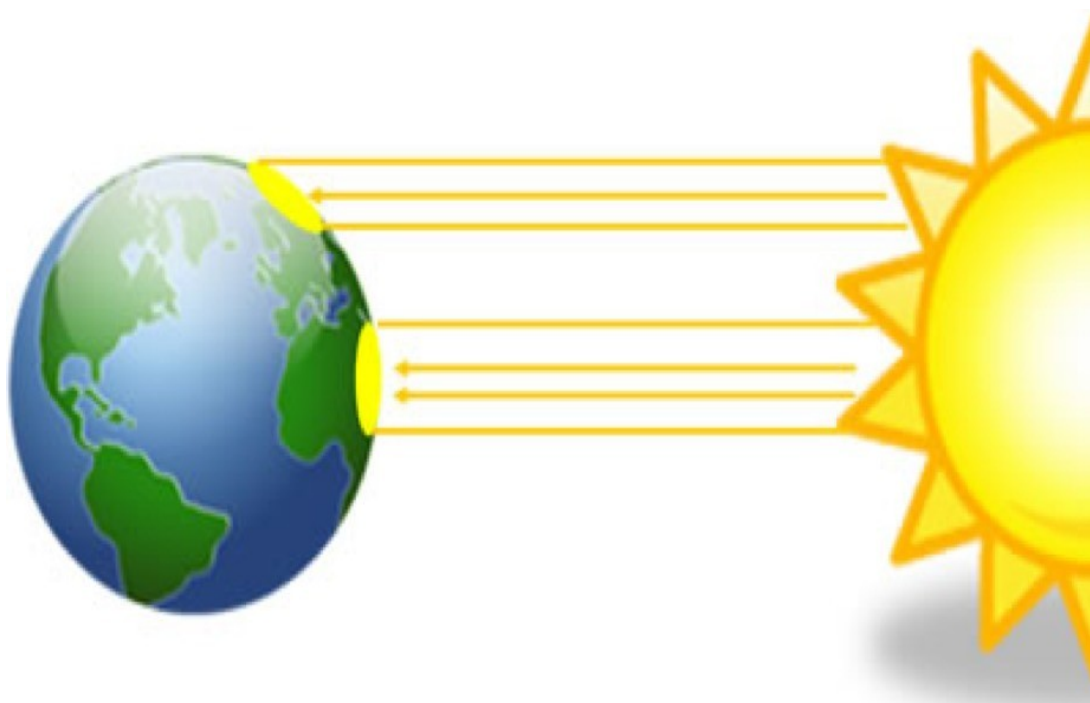


Διανεμημένη Παραγωγή

ΜΟΣΧΟΠΟΥΛΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ 9105

vtmoscho@ece.auth.gr



Ηλιακή Ακτινοβολία/Solar Radiation

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Εισαγωγή	4
Φασματική Κατανομή Ηλιακής Ακτινοβολίας.....	5
Απόκλιση Ηλίου	5
Σκέδαση-Απορρόφηση Ηλιακής Ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα	7
Τροχιά ηλίου / ατμόσφαιρα	10
Μέτρηση Ηλιακή Ακτινοβολίας – Όργανα Μέτρησης	13
Βιβλιογραφία/Πηγές	18

Περίληψη

Ο Ήλιος αποτελεί μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, η οποία είναι δωρεάν διαθέσιμη. Μάλιστα, είναι η κύρια εξωπλανητική πηγή ενέργειας της Γης, κάτι που έχει άμεσο αντίκτυπο σε δυο τομείς, α) στον καιρό και στο κλίμα και β) στην παραγωγή ενέργειας που προέρχεται από αυτόν. Στην παρούσα εργασία γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση του τι είναι ηλιακή ακτινοβολία (μεγέθη/μονάδες μέτρησης), ποια είναι τα διάφορα είδη της τα οποία συναντάμε, ποια τα φασματικά χαρακτηριστικά της, πώς μεταβάλλεται η έντασή της κατά τη διάρκεια της ημέρας και του χρόνου και πώς αυτό επηρεάζεται γεωμετρικά από την σχετική κίνηση Γης-Ήλιου, ενώ, επίσης, περιγράφεται πώς υφίστανται απώλειες κατά τη διαδρομή της μέσα από τα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας του πλανήτη μας. Τέλος, γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των διάφορων βασικών μετρητικών διατάξεων που χρησιμοποιούνται για την ακριβή μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας σε περιοχές οικονομικού ή μη ενδιαφέροντος.

Εισαγωγή

Με τον όρο **Ηλιακή Ακτινοβολία** (Solar irradiance) εννοούμε την εκπομπή και διάδοση ενέργειας μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είτε στο κενό, είτε διαπερνώντας ένα μέσο (πχ. Ατμόσφαιρα) που προέρχεται από τον ήλιο. Αυτή η ενέργεια είναι δυνατό να συλλεχθεί και να μετατραπεί σε άλλες χρήσιμες μορφές ενέργειας (Ηλεκτρική, Θερμότητα) με τη βοήθεια διάφορων τεχνολογιών. Πιο συγκεκριμένα, Ηλιακή Ακτινοβολία ορίζεται ως η ισχύς ανά μονάδα εμβαδού που λαμβάνεται από τον Ήλιο με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Μονάδα μέτρησης της Ηλιακής Ακτινοβολίας είναι το Watt ανά τετραγωνικό μέτρο (W/m^2) στο SI. Ένα, επίσης, χρήσιμο μέγεθος είναι η **Ενέργεια Ηλιακής Ακτινοβολίας** που είναι ουσιαστικά το ολοκλήρωμα της ισχύος της Ηλιακής Ακτινοβολίας στο χρόνο, με αντίστοιχη μονάδα Joule ανά τετραγωνικά μέτρα (J/m^2).

Η Ηλιακή Ακτινοβολία μπορεί να μετρηθεί είτε στο διάστημα, είτε στην επιφάνεια της Γης, αλλά και εν γένει σε οποιαδήποτε επιφάνεια. Στη δεύτερη περίπτωση, όπως θα εξηγηθεί και στη συνέχεια, η λαμβάνουσα ακτινοβολία επιδέχεται κάποιες αλλοιώσεις προτού φτάσει στην μετρούμενη επιφάνεια (μερική απορρόφηση από την ατμόσφαιρα, διασκόρπιση).

Γενικά, υπάρχουν τρεις τύποι Ηλιακής ακτινοβολίας που προστίθενται και μετρώνται σε μια επιφάνεια:

- **Άμεση Ακτινοβολία (Beam Radiation)** είναι αυτή η οποία φτάνει απευθείας από τον ήλιο στην επιφάνεια του εδάφους, χωρίς να έχει υποστεί σκέδαση (αλλαγή κατεύθυνσης) κατά τη διαδρομή της μέσα στην ατμόσφαιρα. Εξαρτάται από την απόσταση ήλιου – γης, την απόκλιση δ του άξονα της γης, το ηλιακό ύψος β , το γεωγραφικό πλάτος ϕ , το απόλυτο υψόμετρο της θέσης μελέτης, την κλίση της επιφάνειας επί της οποίας προσπίπτει θ_r , καθώς και από την απορρόφηση και διάχυση, την οποία υφίσταται μέσα στην ατμόσφαιρα. Για το συμβολισμό της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας θα χρησιμοποιείται το σύμβολο I_{dir} (σε W/m^2)
- **Διάχυτη Ακτινοβολία (Diffuse Sky Radiation)** είναι το ποσό της ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια του εδάφους μετά την ανάκλαση ή τη σκέδασή του μέσα στην ατμόσφαιρα. Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται από το ηλιακό ύψος β , το υψόμετρο της θέσης μελέτης, την ποσότητα και το είδος των νεφών, καθώς και από την παρουσία διαφόρων κέντρων σκεδάσεως (αερολυμάτων, υδροσταγόνων κλπ) που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Για το συμβολισμό της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας θα χρησιμοποιείται το σύμβολο I_{dif} (σε W/m^2).
- **Ανακλώμενη Ακτινοβολία (Ground Radiation)** είναι το ποσό της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία επιφάνεια, ανακλώμενο από το έδαφος και τις περιβάλλουσες σε αυτήν επιφάνειες. Η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται βασικά από το είδος των επιφανειών που περιβάλλουν τη θέση μελέτης, ειδικότερα δε από τη λευκαύγειά τους και το υλικό από το οποίο απαρτίζονται, παράμετροι που καθορίζουν το λεγόμενο συντελεστή ανακλαστικότητας. Για το συμβολισμό της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας θα χρησιμοποιείται το σύμβολο I_{ref} .

Η υπέρθεση των παραπάνω τριών τύπων ακτινοβολίας δίνει τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία, που ονομάζεται **Ολική Ηλιακή Ακτινοβολία (Global Solar Radiation)**

Η φασματική κατανομή της Ηλιακής Ακτινοβολίας εμφανίζεται στο παρακάτω σχήμα. Προκύπτει ότι το 44% της ακτινοβολίας εντοπίζεται στο ορατό φως, το 7% βρίσκεται στην υπεριώδη περιοχή, ενώ, τέλος, το 49% βρίσκεται στην περιοχή των υπέρυθρων. Η ακτινοβολία από ένα **μέλαν σώμα** σε θερμοκρασία 5800 K, έχει φασματική κατανομή παραπλήσια με εκείνη της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα της Γης. Επομένως, ο ήλιος μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μέλαν σώμα με θερμοκρασία επιφάνειας 5800 K. Το μέλαν σώμα στην ουσία είναι ένα ιδανικό υλικό, το οποίο απορροφά πλήρως την προσπίπτουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε κάθε μήκος κύματος, επομένως και το φως, ενώ, επίσης, εκπέμπει τη μέγιστη δυνατή ακτινοβολία, η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία του.

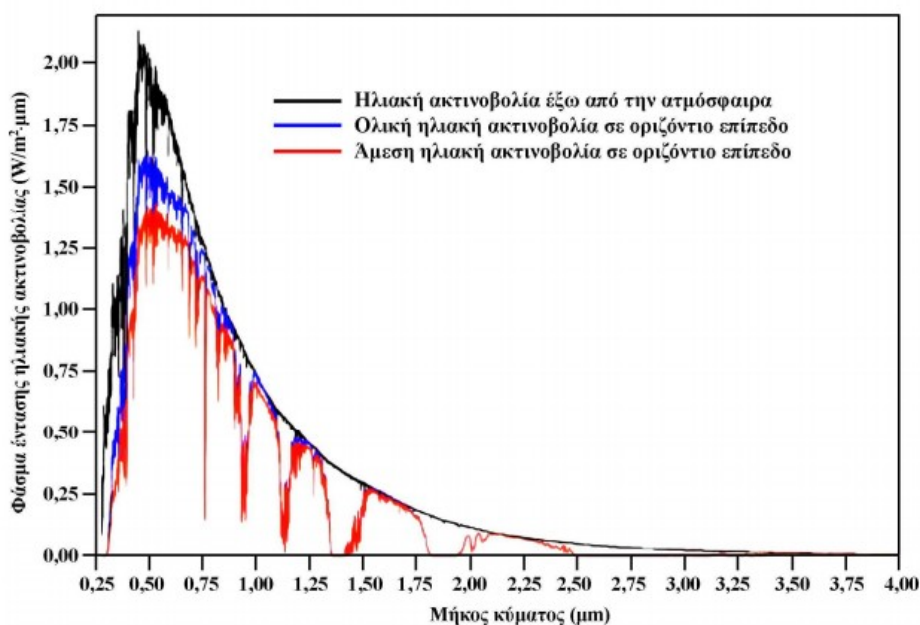


Figure 1: Φασματική κατανομή έντασης Ηλιακής Ακτινοβολίας

Απόκλιση Ηλίου

Η γη περιστρέφεται γύρω από τον ήλιο σε ένα επίπεδο που ονομάζεται επίπεδο εκλειπτικής τροχιάς. Ο άξονας βορρά – νότου της γης αποκλίνει από την κάθετο στο επίπεδο εκλειπτικής τροχιάς κατά μία γωνία, η οποία, κατά τη διάρκεια του έτους, μεταβάλλεται από $-23,45^\circ$ έως $23,45^\circ$ περίπου. Η γωνία αυτή, η οποία σχηματίζεται ανάμεσα στον άξονα βορρά – νότου και στο επίπεδο της εκλειπτικής τροχιάς της γης, ονομάζεται **απόκλιση άξονα γης** (earth declination). Το αποτέλεσμα της μεταβαλλόμενης απόκλισης του άξονα της γης είναι ότι οι ακτίνες του ήλιου προσβάλλουν τα διάφορα γεωγραφικά σημεία στην επιφάνεια της γης με διαφορετική γωνία, ανάλογα με τη σχετική θέση της γης ως προς τον ήλιο. Πράγματι η γωνία μεταξύ του άξονα βορρά – νότου και των ηλιακών ακτίνων μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους από μία ελάχιστη τιμή ίση με $90 - 23,45 = 66,55^\circ$, έως μία μέγιστη τιμή ίση με $90 + 23,45 = 113,45^\circ$. Η γωνία αυτή, η οποία σχηματίζεται ανάμεσα στον άξονα

της γης και στη διεύθυνση πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων στη γη, ονομάζεται απόκλιση ηλίου – γης.

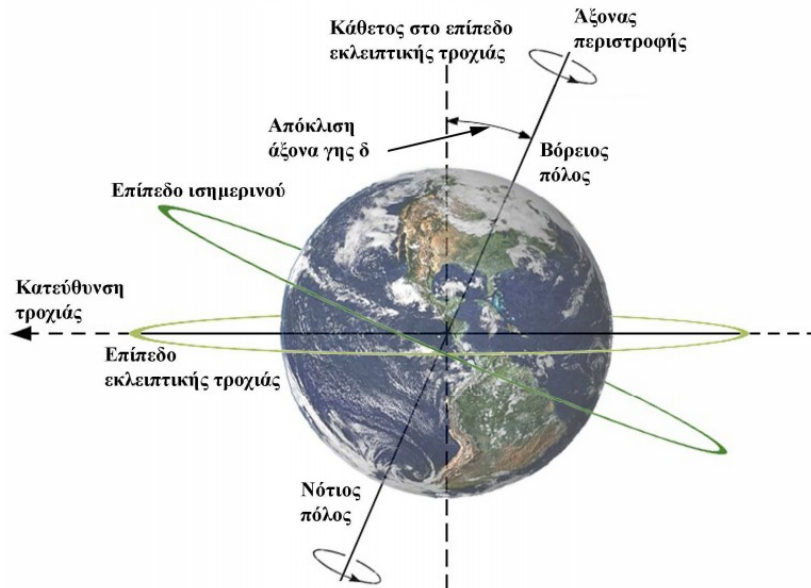


Figure 2: Σχετική θέση Γης σε σχέση με το επίπεδο εκλειπτικής τροχιάς

Αυτό οδηγεί στη δημιουργία των γνωστών τεσσάρων εποχών του έτους. Την 21^η Δεκεμβρίου, το βόρειο ημισφαίριο έχει κλίση 23.45 μοίρες μακριά από τον ήλιο κάτι που σηματοδοτεί το χειμερινό ηλιοστάσιο για το βόρειο ημισφαίριο. Επίσης, την 21^η Μαρτίου και την Σεπτεμβρίου εμφανίζονται η εαρινή και η φθινοπωρινή, αντίστοιχα, ισημερία. Οι ισημερίες είναι κοινές και για το νότιο ημισφαίριο. Τα δύο ηλιοστάσια για το νότιο ημισφαίριο είναι αντίθετα σε σχέση με αυτά του βόρειου ημισφαιρίου. Δηλαδή στις 21 Δεκεμβρίου, κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο, η απόκλιση στο νότιο ημισφαίριο έχει την ελάχιστη τιμή της ($66,55^\circ$) και η διάρκεια της ημέρας είναι η μέγιστη εντός του έτους. Αντίστοιχα, στις 21 Ιουνίου, κατά το θερινό ηλιοστάσιο, η απόκλιση στο νότιο ημισφαίριο έχει τη μέγιστη τιμή της ($113,45^\circ$) και η διάρκεια της ημέρας είναι η ελάχιστη εντός του έτους [4].

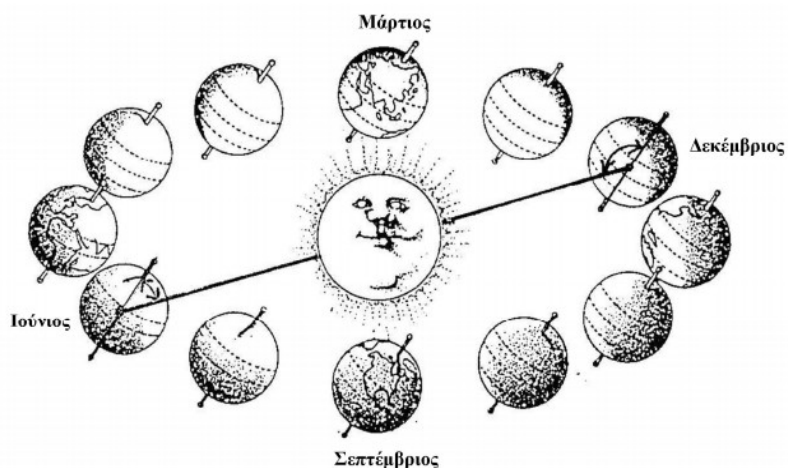


Figure 3: Ετήσια σχετική κίνηση της Γης ως προς τον Ήλιο

Σκέδαση-Απορρόφηση Ηλιακής Ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα

Η **σκέδαση (scattering)** της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μια φυσική διαδικασία που σχετίζεται με το φως και την αλληλεπίδρασή του με την ύλη και εμφανίζεται σε όλα τα μήκη κύματος. Σε αυτή τη διαδικασία, ένα σωματίδιο στην πορεία ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος συνεχώς αφαιρεί ενέργεια από το προσπίπτον κύμα και επανεκπέμπει εκ νέου την ενέργεια αυτή προς όλες τις κατευθύνσεις. Το Σχ. 4 παρουσιάζει τυπικά μοτίβα σκέδασης ανάλογα με το μέγεθος του σωματιδίου. Λαμβάνοντας υπόψη μια δέσμη φώτος (μαύρο βέλος), η ακτινοβολία διασπείρεται σε διάφορες πιθανές κατευθύνσεις, ενώ το κάθε μοτίβο υποδεικνύει τη σχετική πιθανότητα ενός φωτονίου να διασκορπιστεί σε μια δεδομένη κατεύθυνση. Για παράδειγμα, ένα μικρό ανισοτροπικό σωματίδιο τείνει να διασκορπίζει το φως εξίσου προς τα εμπρός και προς τα πίσω (στα αριστερά στο Σχ. 4), ενώ η πιθανότητα η εύρεση φωτονίων προς τις κατευθύνσεις κάθετες προς εκείνη της προσπίπτουσας δέσμης είναι μικρή. Όταν το μέγεθος των σωματιδίων αυξάνεται, η ποσότητα της διάσπαρτης ενέργειας είναι μεγαλύτερη στις προς τα εμπρός κατευθύνσεις (με πιθανώς πολύπλοκα μοτίβα). Σε κάθε περίπτωση, η ενέργεια που επιστρέφει πίσω, δεν είναι αμελητέα.

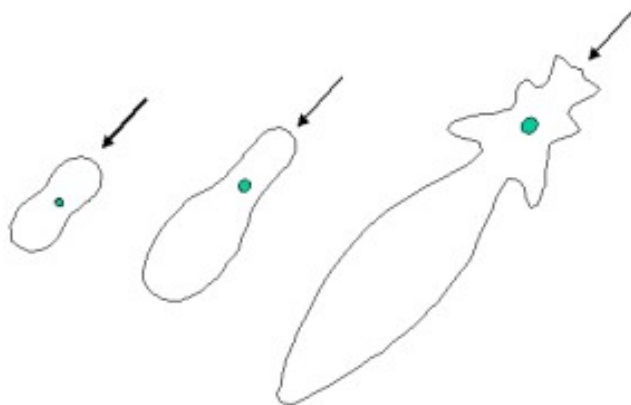


Figure 4: Τυπικά μοτίβα σκέδασης με βάση το μέγεθος του ανισοτροπικού σκεδάζοντος σωματιδίου (το μαύρο βέλος συμβολίζει τη δέσμη του προσπίπτοντος φωτός)

Η **απορρόφηση (absorption)** είναι μια διαδικασία που εμφανίζεται στην ατμόσφαιρα και αφορά ουσιαστικά στην ενέργεια που απορροφάται από ένα σωματίδιο. Η σκέδαση, καθώς και η απορρόφηση αφαιρούν ενέργεια από την ακτινοβολία κατά τη διάσχιση της γήινης ατμόσφαιρας. Η σκέδαση, η απορρόφηση και κατά συνέπεια η συνολική ελάττωση της ακτινοβολίας είναι εξαρτημένες του μήκους κύματος. Η ελάττωση της ενέργειας μιας δέσμης εξαρτάται από το μήκος της οπτικής διαδρομής που διανύει στην ατμόσφαιρα, όπως εξηγήθηκε και παραπάνω. Το μήκος αυτής της διαδρομής ονομάζεται **μάζα αέρα (air mass)**. Όσο ψηλότερα βρίσκεται ο ήλιος στον ορίζοντα, τόσο μικρότερη είναι η μάζα αέρα και κατά συνέπεια παρατηρούμε λιγότερη ελάττωση ενέργειας της δέσμης.

Όλα τα συστατικά της ατμόσφαιρας συμβάλλουν σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό στην απόσβεση της ηλιακής ακτινοβολίας στην πορεία της μέχρι το έδαφος. Η απόσβεση αυτή συμβαίνει ως αποτέλεσμα των προαναφερθέντων μηχανισμών σκέδασης και απορρόφησης που συμβαίνουν σε όλο

το ηλιακό φάσμα. Στα πάνω στρώματα της ατμόσφαιρας, οι βασικοί μηχανισμοί είναι η απορρόφηση των ακτινών X και της υπεριώδους περιοχής, καθώς και η σκέδαση της ιώδους και μπλε περιοχής του φάσματος. Τα παραπάνω οφείλονται κυρίως σε άτομα οξυγόνου, στο στρώμα του όζοντος και σε οξείδια του αζώτου. Καθώς η ακτινοβολία φτάνει στα κατώτερα στρώματα, η απόσβεση πλέον, εμφανίζεται σε μεγαλύτερα μήκη κύματος και οφείλεται σε υδατμούς, διοξείδιο του άνθρακα, αερολύματα και άλλα μικροσωματίδια. Οι διακυμάνσεις στις συγκεντρώσεις υδατμών, όζοντος, αερολυμάτων (καθώς και στις οπτικές ιδιότητες των τελευταίων), οδηγούν σε αντίστοιχη διακύμανση στην τελική ολική ακτινοβολία που λαμβάνεται στο έδαφος του πλανήτη, κάτι που υποδεικνύει τη δυσκολία στην ακριβή εκτίμηση της επίδρασης της ατμόσφαιρας σε αυτήν.

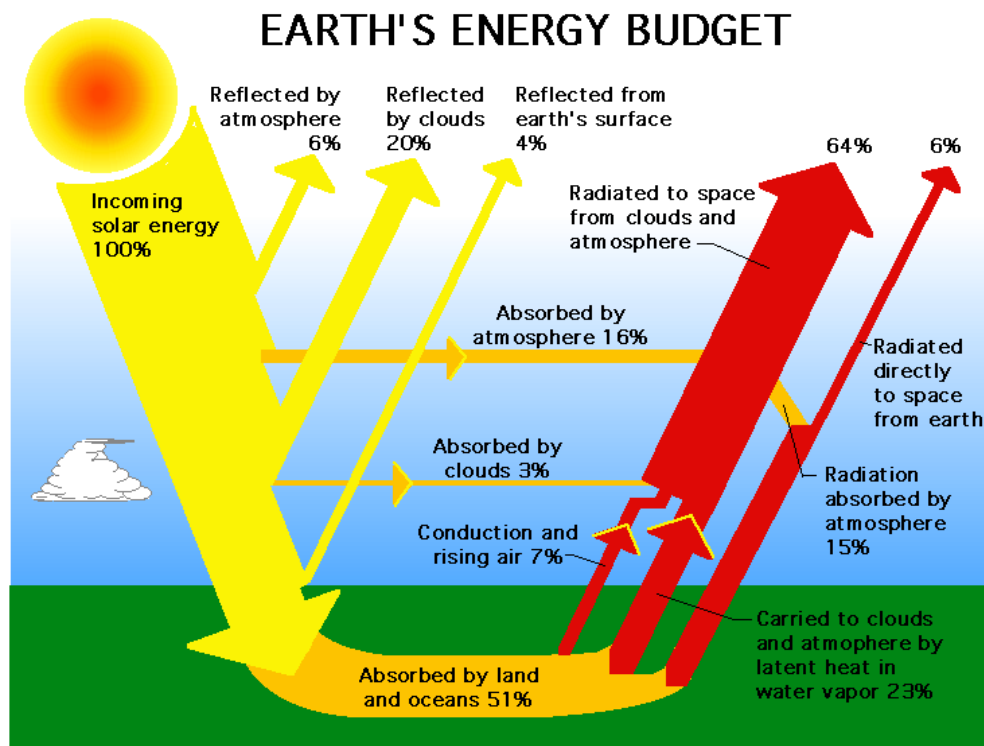


Figure 5: Αναπαράσταση απωλειών της ηλιακής ακτινοβολίας μέχρι να φτάσει στο έδαφος

Στα υψηλότερα στρώματα, η απορρόφηση προκαλείται κυρίως λόγω του όζοντος, το οποίο μειώνει κυρίως ακτινοβολία με μήκη κύματος λ μικρότερα των $0.3\mu\text{m}$, ενώ, επίσης, μειώνει σε μικρότερο βαθμό στην περιοχή 0.5 μέχρι $0.7\mu\text{m}$, ενώ οι υδατμοί εμφανίζουν εμφανίσιμη απορρόφηση σε περιοχή με λ μεγαλύτερο από $0.65\mu\text{m}$.

Τα μόρια αερίων σκεδάζουν την ακτινοβολία με διαδικασία η οποία περιγράφεται από τον νόμο λ^{-4} του Rayleigh. Για το ορατό φως, τα μπλε φωτόνια σκεδάζονται περισσότερο από τα άλλα, ενώ αυτά που δέχονται το μικρότερο ποσοστό σκέδασης είναι τα κόκκινα. Αυτός είναι ο λόγος που ο ουρανός είναι μπλε κατά τη διάρκεια της ημέρας, καθώς τα μπλε φωτόνια που σκεδάζονται περισσότερο απ' όλα τα

υπόλοιπα, σχηματίζοντας ένα μεγάλο ποσοστό διάχυτης ακτινοβολίας (diffuse radiation) που λαμβάνει κανείς στην επιφάνεια της Γης.

Τα αερολύματα παίζουν, επίσης, σημαντικό ρόλο στη σκέδαση της ακτινοβολίας, ο οποίος εξαρτάται από τη χημική σύσταση, τη συγκέντρωση και το μέγεθός τους. Περιγράφονται κατά βάση από το νόμο του Ångström που ορίζει το οπτικό πάχος των αερολυμάτων ως: $\delta_{\text{aer}} = b(\lambda/\lambda_1)^{-\alpha}$, όπου α και b είναι οι συντελεστές θολότητας του Ångström, με το α να χαρακτηρίζει τη φασματική συμπεριφορά των αερολυμάτων στο οπτικό πάχος με σύνηθες εύρος από 0 έως 4, ενώ το b χαρακτηρίζει το πλάτος οπτικού πάχους ενός αερολύματος (λ_1 είναι το μήκος κύματος $1\mu\text{m}$).

Τα σύννεφα αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό σταγόνων νερού ή/και παγοκρυστάλλων, με αποτέλεσμα να προκαλούν έντονη σκέδαση της ακτινοβολίας που περνάει (έντονη απόσβεση). Το ποσό της ακτινοβολίας που περνάει μειώνεται δραματικά με τη αύξηση του γεωμετρικού πάχους του νέφους. Το **οπτικό βάθος** (optical depth) ενός σύννεφου είναι αδιάστατο μέγεθος που χαρακτηρίζει το μέγεθος της απόσβεσης. Πρακτικά, τιμή 0 σημαίνει καθόλου απόσβεση (π.χ καθαρός ουρανός), ενώ μια τιμή γύρω στο 3-4 είναι αρκετή για να είναι σχεδόν αδύνατη η παρατήρηση του Ηλίου από το έδαφος μέσα από το σύννεφο (ισχυρή απόσβεση της άμεσης συνιστώσας της ακτινοβολίας). Εξαρτάται από το γεωμετρικό πάχος του σύννεφου, αλλά και το είδος του (μέγεθος σταγόνων, παγοκρυστάλλων), ενώ θεωρείται ανεξάρτητη από το μήκος κύματος λ της ίδιας της ακτινοβολίας.

Συστατικά ατμόσφαιρας	Σκέδαση	Απορρόφηση
Όζον	Μπορεί να αγνοηθεί	Ισχυρή για λ μικρότερα από $0.3\mu\text{m}$
Αέρια (εκτός όζοντος)	Ισχυρή (λ^{-4}), αυξάνει με αύξηση του λ	Μικρή
Υδατμοί	Μπορεί να αγνοηθεί	Παρατηρήσιμη για λ μεγαλύτερο από $0.65\mu\text{m}$
Αερολύματα	Τάξης $\lambda^{-\alpha}$, $0 < \alpha < 4$	Μικρή
Σύννεφα	Ισχυρή και ανεξάρτητη του λ (κατά προσέγγιση)	Μικρή

Table 1: Επίδραση συστατικών της ατμόσφαιρας στην απόσβεση της ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει του λ (μήκος κύματος)

Τροχιά του Ηλίου - Ηλιακό Παράθυρο

Όπως γνωρίζουμε, τα καλοκαίρια κάνει περισσότερη ζέστη, ενώ οι χειμώνες εμφανίζουν περισσότερο κρύο. Ακόμα, παρατηρούμε ότι όταν έχει καλοκαίρι στο βόρειο ημισφαίριο, το νότιο ημισφαίριο έχει χειμώνα. Τα καλοκαίρια είναι θερμότερα κύριως λόγω του γεγονότος ότι η τροχιά του Ηλίου είναι ψηλότερα στον ουρανό, κάτι που οδηγεί σε πιο μεγάλες μέρες και πιο έντονη εκπομπή ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό γίνεται πιο κατανοητό με το παρακάτω παράδειγμα με το φακό.

Σε ένα σκοτεινό δωμάτιο ανάβουμε το φακό, ο οποίος δείχνει στην επιφάνεια ακριβώς από πάνω, σχηματίζοντας γωνία 90° με αυτήν. Στη συνέχεια μειώνουμε τη γωνία του φακού με την επιφάνεια. Παρατηρούμε ότι, ενώ η επιφάνεια της φωτιζόμενης περιοχής έχει αυξηθεί, η ένταση της φωτεινότητας μειώθηκε σε σχέση με την πρώτη περίπτωση. Κάτι παρόμοιο συμβαίνει και με το ηλιακό φως, το οποίο όταν έρχεται από υψηλότερα στον ουρανό, παρέχει δυνατότερο φως και περισσότερη ακτινοβολία.

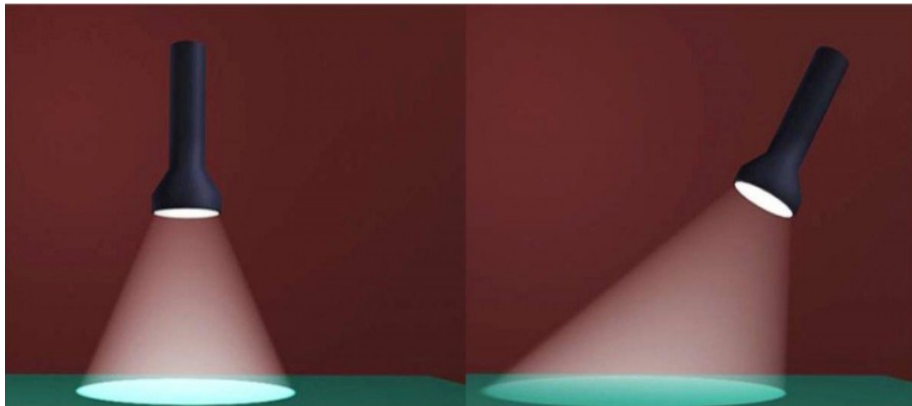


Figure 6: Κατακόρυφη - υπό γωνία πρόσπτωση φωτός

Σχετικά με το γιατί ο Ήλιος βρίσκεται υψηλότερα στον ουρανό το καλοκαίρι, η απάντηση έγκειται στην απόκλιση του άξονα περιστροφής της Γης σε σχέση με την τροχιά της περιστροφής της γύρω από τον Ήλιο. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού στο βόρειο ημισφαίριο, ο βόρειος πόλος βρίσκεται προς τη μεριά του ήλιου, κάτι που ως συνέπεια έχει ο ήλιος να βρίσκεται υψηλότερα στον ουρανό, παράγοντας μεγαλύτερο φωτισμό και περισσότερη θερμότητα. Στο θερινό ηλιοστάσιο (21^η Ιουνίου), το βόρειο ημισφαίριο παρουσιάζει όσο μεγαλύτερη κλίση προς τη μεριά του ήλιου γίνεται, κάτι που οδηγεί σε μέρα με τη μεγαλύτερη και υψηλότερη **τροχιά του ήλιου (Sun's Path)** στον ουρανό. Με την ίδια λογική, στο χειμερινό ηλιοστάσιο (21^η Δεκεμβρίου) παρατηρείται μέγιστη κλίση του βορείου ημισφαιρίου αντίθετα από τον ήλιο, που συνεπάγεται τη μικρότερη και πιο χαμηλή τροχιά του ήλιου στον ουρανό.

Στο παρακάτω σχήμα (αριστερά) παρατηρούμε μια ημισφαιρική αναπαράσταση της επιφάνειας της Γης με κέντρο ένα σταθερό σημείο παρατήρησης. Οι τροχιές που διαγράφονται αντιστοιχούν σε ηλιακές τροχιές για το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο. Όπως είναι λογικό, τα δύο μονοπάτια είναι διαφορετικά και, μάλιστα, η τροχιά του θερινού ηλιοστασίου είναι μεγαλύτερη και πιο ψηλά σε σχέση

με τη δεύτερη. Κατά τη διάρκεια του έτους, η ηλιακή τροχιά (Sun's Path) κυμαίνεται μεταξύ αυτών των δύο ακροτάτων τροχιών.

Στο σχήμα δεξιά έχουν σχηματιστεί δύο καμπύλες που συνδέουν τις δύο ακραίες τροχιές. Η καθε μια εμφανίζει τη θέση του ήλιου για όλες τις ημέρες του έτους για μια συγκεκριμένη ώρα (9 π.μ και 3 μ.μ). Οι συγκεκριμένες ώρες σηματοδοτούν το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ο Ήλιος βρίσκεται σε ύψος στο οποίο παράγεται ικανοποιητική ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι, το “παράθυρο” που

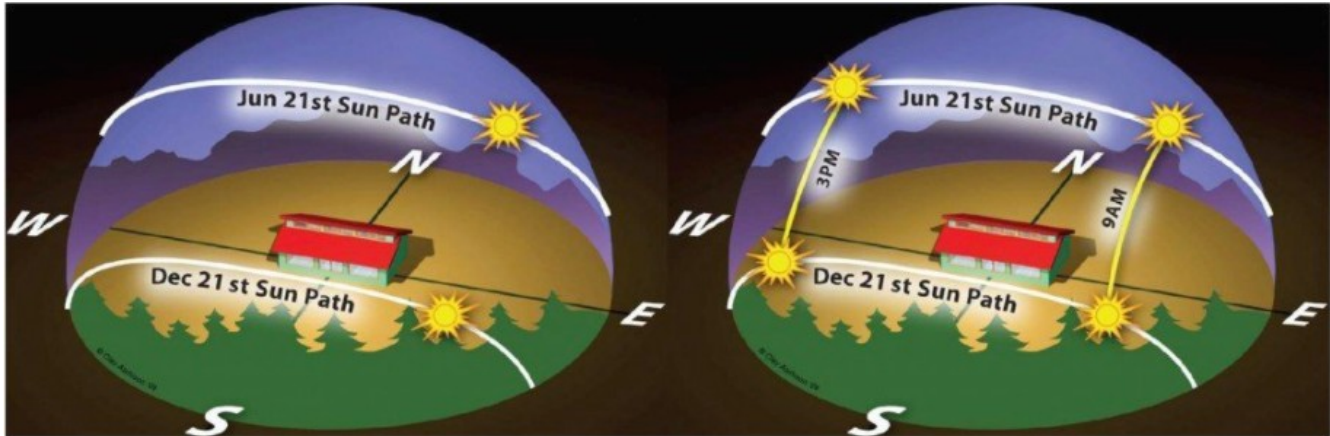


Figure 7: Τροχιά Ήλιου στον ουρανό για διάφορες περιόδους της ημέρας και του έτους σχηματίζεται από τις ώρες 9 π.μ και 3 μ.μ και τα ηλιοστάσια ονομάζεται **Ηλιακό Παράθυρο** (Solar Window) και δείχνει τις θέσεις στον ουρανό απ' όπου προέρχεται η συντριπτική ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους. Είναι προφανές, ότι σε σημεία που πρόκειται να τοποθετηθεί σύστημα φωτοβολταϊκών είναι αναγκαίο το ηλιακό παράθυρο να μην σκιάζεται από φυσικά εμπόδια (δέντρα, βουνά), καθώς έτσι μειώνεται σημαντικά το ποσό της ενέργειας που μπορεί να παραχθεί.

Η θέση του ήλιου στον ορίζοντα ως προς ένα γεωγραφικό σημείο στην επιφάνεια της γης προσδιορίζεται απόλυτα με τη βοήθεια δύο γωνιών, του ηλιακού ύψους, ή της συμπληρωματικής του που ονομάζεται γωνία ζενίθ, και του αζιμουθίου του ήλιου.

- Το **ηλιακό ύψος** β του ήλιου ως προς συγκεκριμένο γεωγραφικό σημείο είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το εν λόγω γεωγραφικό σημείο με τη θέση του ήλιου στον ορίζοντα και στην προβολή της ανωτέρω ευθείας στην επιφάνεια της γης.
- Το **αζιμούθιο** ϕ_s του ήλιου ως προς συγκεκριμένο γεωγραφικό σημείο είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή στο οριζόντιο επίπεδο της ευθείας που ενώνει το εν λόγω σημείο με τη θέση του ήλιου στον ορίζοντα και στη διεύθυνση βορρά – νότου.

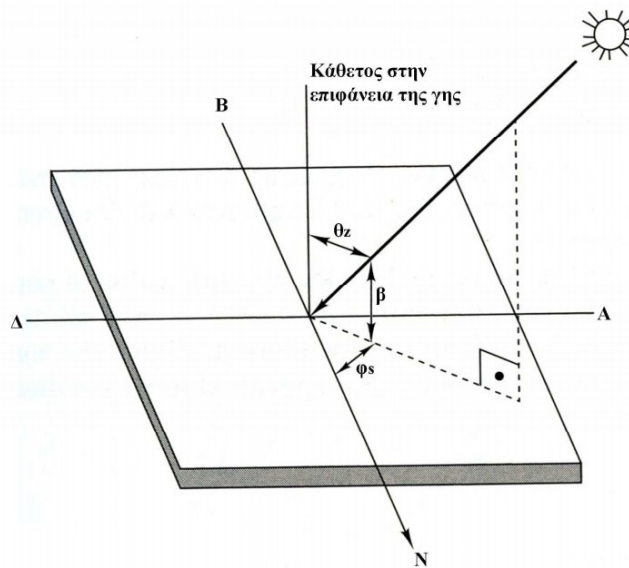


Figure 8: Θέση Ηλίου στον ουρανό συναρτήσει του ύψους και της αζιμουθιακής γωνίας

Η θέση του Ήλιου στον ούρανο κάθε χρονική στιγμή, σε κάθε σημείο της Γης μπορεί να υπολογιστεί με εξαιρετική ακρίβεια (<0.01 deg) με τη βοήθεια αλγορίθμων που προκύπτουν από μαθηματικές εξισώσεις που μοντελοποιούν την γεωμετρία της κίνησης της Γης ως προς αυτόν [7]. Σήμερα υπάρχουν έτοιμες εφαρμογές που οπτικοποιούν το μονοπάτι του Ήλιου για οποιαδήποτε περιοχή, όπως φαίνεται παρακάτω στο σχήμα το μονοπάτι του Ήλιου για τη Θεσσαλονίκη καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

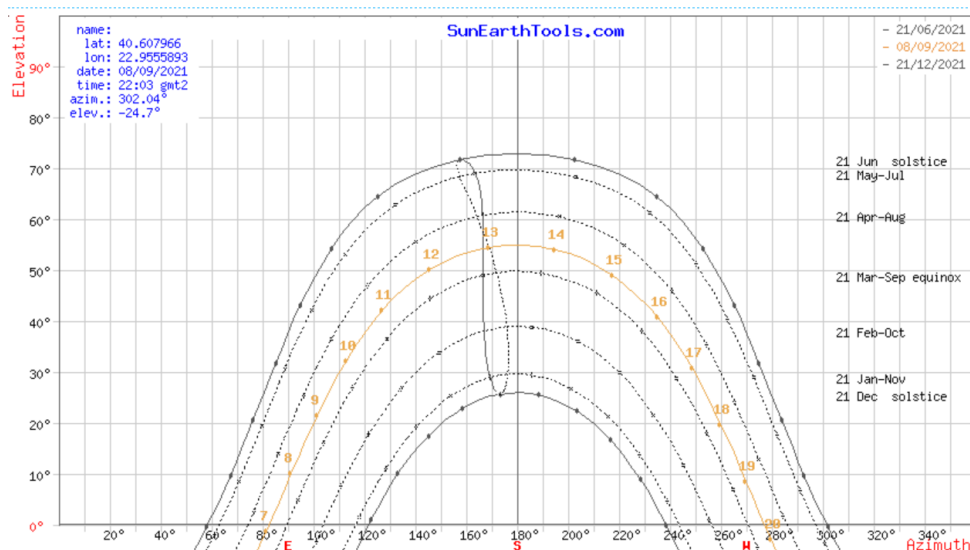


Figure 9: Ετήσια διακύμανση τροχιάς Ηλίου για τη Θεσσαλονίκη

Μέτρηση Ηλιακής Ακτινοβολίας

Σε διάφορες εφαρμογές, όπως στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών ή στη ενεργειακή μελέτη των παραθύρων ενός κτηρίου είναι αναγκαίο να γίνονται μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια κάθε χρονική στιγμή, ώστε στη συνέχεια να πραγματοποιούνται παρεμβάσεις (πχ. τοποθέτηση φωτοβολταϊκών σε κατάλληλη κλίση) που θα μεγιστοποιήσουν την εκμετάλλευση της ενέργειας που παρέχεται από τον ήλιο. Για το σκοπό αυτό, υπάρχουν κάποιες μετρητικές διατάξεις και συσκευές που δίνουν με σχετική ακρίβεια είτε την ένταση της ισχύος της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας (solar irradiance) είτε την ενέργεια αυτής σε κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (solar irradiation).

Το **πυρανόμετρο (pyranometer)** είναι μια συσκευή που μετράει την προσπίπτουσα ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2) πάνω σε μια επιφάνεια. Στην ουσία, η μετρούμενη ποσότητα είναι η συνολική λαμβανόμενη ισχύς από ένα ημισφαιρικό οπτικό πεδίο (πχ. ουράνιος θόλος) πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια. Παραδοσιακά, τα πυρανόμετρα χρησιμοποιούνταν κυρίως για κλιματολογικές μελέτες και παρακολούθηση των καιρικών φαινομένων, όμως, με την άνοδο της ζήτησης για ηλιακή ενέργεια παρατηρήθηκε ενισχυμένο ενδιαφέρον για τις συγκεκριμένες μετρητικές συσκευές. Το πυρανόμετρο μετράει τη Συνολική Ηλιακή Ακτινοβολία ανα μονάδα επιφάνειας ανά μονάδα χρόνου, η οποία, φυσικά, περιλαμβάνει την άμεση, καθώς και τη διάχυτη ακτινοβολία, όπως φαίνεται και στο σχήμα 10α.

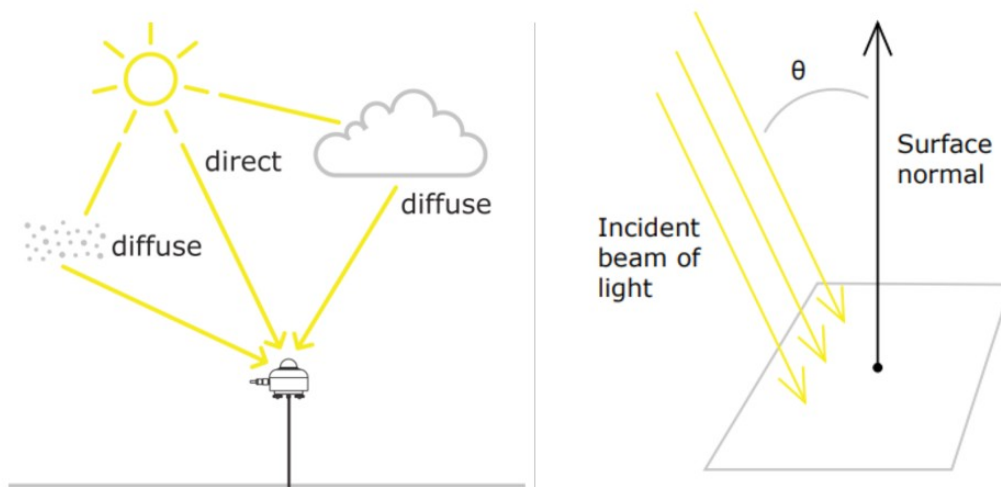


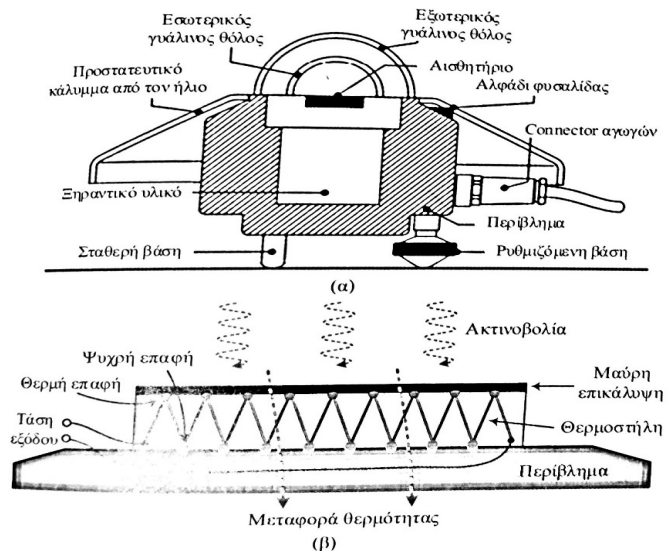
Figure 10: α) Το πυρανόμετρο μετράει τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία β) Γωνία πρόσπτωσης ηλιακών ακτίνων σε επιφάνεια

Η συνεισφορά από την άμεση ακτινοβολία μπορεί να προσεγγιστεί από την ποσότητα $E_{g, \text{beam}} = E \cdot \cos(\theta)$, όπου θ η γωνία μεταξύ της επιφάνειας και της θέσης του ήλιου στον ουράνιο θόλο (σχ. 8β) και E η μέγιστη ποσότητα άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Σε αρκετές περιπτώσεις η επιφάνεια ενδιαφέροντος είναι οριζόντια, με αποτέλεσμα το ημισφαιρικό οπτικό πεδίο να αντιστοιχεί στον

ουράνιο θόλο, ενώ σε άλλες περιπτώσεις, όπως σε φωτοβολταϊκά πάνελ, υπό κλίση. Μια ειδική περίπτωση είναι, επίσης, όταν η επιφάνεια είναι οριζόντια, αλλά το πυρανόμετρο είναι τοποθετημένο ανάποδα, έχοντας προσανατολισμό προς τα κάτω, αντί του ουρανού. Με αυτό το σχηματισμό μετράται η ανακλώμενη ακτινοβολία από την επιφάνεια της γης. Τα πυρανόμετρα είναι αισθητήρες ανίχνευσης ακτινοβολίας που βασίζονται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο. Τα βασικά στοιχεία ενός πυρανόμετρου είναι δύο (ή ένας) θόλοι, μια μαύρη πλήρως απορροφούσα επιφάνεια, ένα thermopile (μετατρέπει θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική), το σώμα του πυρανόμετρου και, ενδεχομένως, διάφορα επιπλέον ηλεκτρονικά. Ο θόλος λειτουργεί σαν φίλτρο που κρατάει μόνο την ακτινοβολία με μήκη κύματος μεταξύ περίπου 0.3 και 3×10^{-6} m, ενώ, ακόμα, βοηθάει στην προστασία της μαύρης επιφάνειας και του thermopile από χιόνι και βροχή. Ιδανικά επιτρέπει να περάσει σχεδόν το 100% της ακτινοβολίας στην παραπάνω περιοχή, αλλά στην πράξη το ποσοστό αυτό κυμαίνεται περίπου στο 92%.



Figure 11: Σύγχρονο πυρανόμετρο



Η φιλτραρισμένη ακτινοβολία απορροφάται από την μαύρη επιφάνεια και μετατρέπεται σε θερμότητα. Αν η ποσότητα εκπομπής που περνάει μέσα από το θόλο είναι τ , A το εμβαδόν της μαύρης επιφάνειας και α ο συντελεστής απορρόφησης της, τότε η συνολική απορρόφηση θερμότητας δίνεται από τη σχέση: $P_{\text{absorption}} = \alpha \cdot \tau \cdot A \cdot E_{\text{gi}}$. Αυτό δημιουργεί μία παράγωγο θερμοκρασίας (temperature gradient) από τη μαύρη επιφάνεια μέσω του thermopile προς το σώμα του πυρανόμετρου, το οποίο δρα σαν απαγωγός θερμότητας. Η θερμοκρασιακή διαφορά δίνεται ως $\Delta T = R_{\text{thermal}} \cdot P_{\text{absorption}}$, όπου R_{thermal} είναι η θερμική αντίσταση του αισθητήρα του thermopile και εξαρτάται από την κατασκευή και γεωμετρία του. Ένα thermopile αποτελείται από ένα πλήθος θερμοζευγών (thermocouples) συνδεδεμένων σε σειρά. Το κάθε θερμοζεύγος δημιουργεί τάση ανάλογη της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ της μαύρης επιφάνειας και του σώματος που αποτυπώνεται από τη σχέση: $u = \zeta \cdot \Delta T$, που ζ είναι ο συντελεστής Seebeck. Η συνολική τάση U κατά μήκος του thermopile είναι το άθροισμα των επί μέρους τάσεων των θερμοζευγών: $U = \sum u_i = N \cdot \zeta \cdot \Delta T$. Τοποθετώντας θερμοζεύγη σε σειρά μας επιτρέπει να ανιχνεύουμε ακόμα και πολύ μικρές διαφορές θερμοκρασίας, με

τη συνολική ευαισθησία να δίνεται ως: $S \equiv U / E = \alpha \cdot \tau \cdot N \cdot \varsigma \cdot R_{\text{thermal}}$, οπότε η μετρούμενη συνολική ακτινοβολία προκύπτει: $E_{\text{gl}} = U / S$.

Κατά τη διάρκεια λήψης μετρήσεων με τα πυρανόμετρα πρέπει να ληφθεί μέριμνα για τη σωστή τοποθέτηση και συντήρηση τους, ώστε να διασφαλίζεται η αξιοπιστία και η συνέχεια των δεδομένων που παράγουν. Για τη συντήρηση τους, οι θόλοι οφείλουν να καθαρίζονται τακτικά, καθώς τυχόν επικάθιση σκόνης, χιονιού ή νερού βροχής πάνω σε αυτούς επηρεάζει σημαντικά τις μετρήσεις ακτινοβολίας, καθώς απορροφούν, διαχέουν ή συγκεντρώνουν μέρος αυτής, οδηγώντας σε εσφαλμένες τιμές ακτινοβολίας. Μερικά σύγχρονα πυρανόμετρα είναι εξοπλισμένα με θερμαντήρες και εξαερισμό αντιμετωπίζοντας τον πάγο και τις σταγόνες νερού, αυξάνοντας την επάρκεια των λαμβανομένων δεδομένων. Είναι σύνηθες η συσκευή να μη χρειάζεται εξωτερική τροφοδοσία για να λειτουργήσει, παρ'όλα αυτά σύγχρονα πυρανόμετρα έχουν ενσωματωμένα ηλεκτρονικά και, γι' αυτό, χρειάζονται (χαμηλής) ισχύος εξωτερική πηγή τροφοδοσίας.

Εκτός από τα πυρανόμετρα με αισθητήριο θερμοστήλης, τα οποία είναι τα πλέον διαδεδομένα και με τη μεγαλύτερη ακρίβεια μέτρησης, υπάρχουν διαθέσιμα και τα **πυρανόμετρα με ημιαγωγό αισθητήριο** (κυψέλη πυριτίου, είτε φωτοδίοδο). Παρακάτω εικονίζεται η τυπική μορφή ενός πυρανομέτρου με φωτοδίοδο. Η φασματική απόκριση στα πυρανόμετρα με κυψέλη πυριτίου (silicon cell pyranometers), περιορίζεται συνήθως στην περιοχή μεταξύ 350nm και 1100nm και, επιπλέον, δεν είναι ομοιόμορφη σ'όλα τα μήκη κύματος της περιοχής αυτής, σε αντίθεση με τα πυρανόμετρα θερμοστήλης που εμφανίζουν σχεδόν ομοιόμορφη απόκριση, σε όλα τα μήκη κύματος από τα 300nm έως τα 3000nm.



Figure 12: Τυπική μορφή ενός πυρανομέτρου με φωτοδίοδο (αριστερά) και ενός πυρανομέτρου με θερμοστήλη (δεξιά)

Καθώς το 80% της ηλιακής ενέργειας κατανέμεται σε μήκη κύματος από τα 350nm έως τα 1100nm, τα πυρανόμετρα με κυψέλη πυριτίου ρυθμίζονται ώστε να εκτιμούν την ηλιακή ακτινοβολία σε όλη τη φασματική περιοχή τους. Εντούτοις, η ρύθμιση του πυρανομέτρου επιτελείται από τον κατασκευαστή

σε ορισμένες συνθήκες ακτινοβολίας, οι οποίες συνήθως αντιστοιχούν σε καθαρό ουρανό και γωνία ζενίθ 45° . Επομένως, τα πυρηνόμετρα με φωτοδίοδο εμφανίζουν σφάλμα στη μέτρηση, εξαιτίας της περιορισμένης φασματικής απόκρισης, όταν οι ηλιακές συνθήκες είναι διαφορετικές από εκείνες της εργοστασιακής ρύθμισης, όπως και κατά τη μέτρηση σε συννεφιά. Πάντως, το κόστος τους είναι πολύ μικρότερο από τα αντίστοιχα με *thermopiles*, ενώ, επίσης, εμφανίζουν και εξαιρετικά μικρότερο χρόνο απόκρισης (της τάξης των ms).

Το **πυρηνιόμετρο (pyrheliometer)** είναι μια συσκευή η οποία, επίσης, δίνει μετρήσεις για την λαμβανόμενη ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια επιφάνεια. Σε αυτή την περίπτωση, όμως, μετράται μόνο η άμεση συνιστώσα της ακτινοβολίας του Ήλιου (*direct solar radiation*). Η συσκευή πρέπει να προσαρτηθεί σε έναν **ηλιοστάτη (solar tracker)**, ώστε να ακολουθεί την πορεία του Ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ο ηλιοστάτης για να ακολουθήσει τον Ήλιο, περιστρέφεται γύρω από 2 άξονες: αυτόν της ζενιθ γωνίας (πάνω – κάτω) και αυτόν της αζιμουθιακής γωνίας (δύση – ανατολή), ενώ η στιγμιαία απαιτούμενη θέση υπολογίζεται με τη βοήθεια GPS συντεταγμένων και του χρόνου, εφαρμόζοντας κάποιον ντετερμινιστικό αλγόριθμο εντοπισμού του Ηλίου. Κάποια πυρηνιόμετρα έχουν ενσωματωμένους επιπλέον ηλιακούς αισθητήρες (*Sun Sensors*) για ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια εντοπισμού, φτάνοντας σε επίπεδα καλύτερα από 0.1° .



Figure 13: α) Σύγχρονο πυρηνιόμετρο, β) Τα πυρηνιόμετρα μετρούν την άμεση (beam) ηλιακή ακτινοβολία

Για να περιοριστεί η μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας μόνο στο κομμάτι που προέρχεται απευθείας από τον Ήλιο, είναι αναγκαίο να περιοριστεί και το οπτικό πεδίο της συσκευής. Έξω από την ατμόσφαιρα της Γης, ο Ήλιος είναι ορατός ως ένας “κυκλικός” δίσκος με γωνιακή απόσταση περίπου 0.27° . Στην επιφάνεια του πλανήτη μας, αυτή η γωνία είναι αρκετά μεγαλύτερη, ενώ εξαρτάται κατά πολύ στην ίδια τη εκάστοτε κατάσταση της ατμόσφαιρας (μεγαλύτερα επίπεδα ομίχλης, οδηγούν σε εμφάνιση του Ήλιου ως μεγαλύτερο). Σύμφωνα με τη σύμβαση του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού, όλα τα σύγχρονα πυρηνιόμετρα χρησιμοποιούν το ίδιο οπτικό πεδίο, το οποίο χαρακτηρίζεται από άνοιγμα με ημι-γωνία 2.5° .

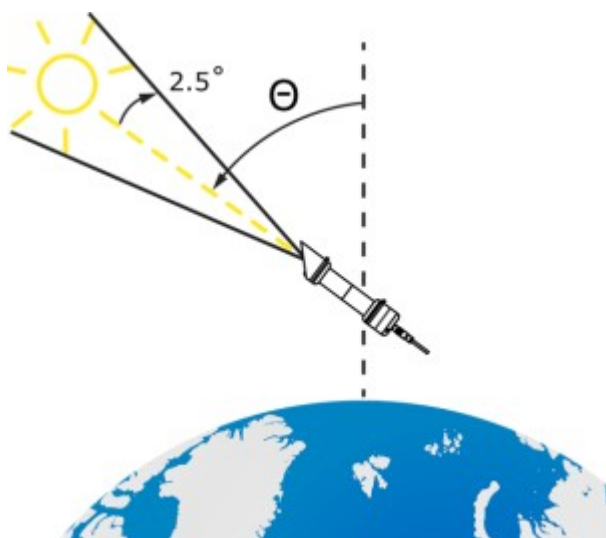


Figure 14: Οπτικό πεδίο πυρηλιόμετρου

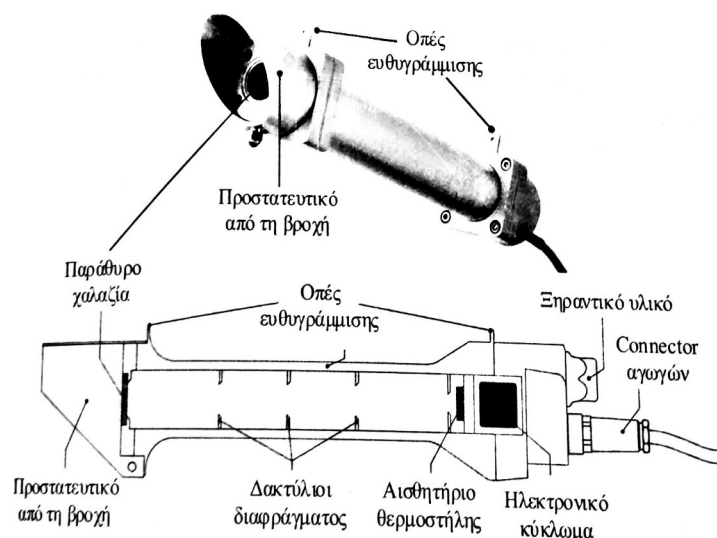


Figure 15: Δομή ενός πυρηλιόμετρου

Ένα πυρηλιόμετρο αποτελείται από ένα παράθυρο χαλαζία, έναν αισθητήρα με μαύρη επιφάνεια απορρόφησης και το σωλήνα του (που καθορίζει το οπτικό πεδίο του οργάνου). Σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας του, είναι παρόμοιος με αυτόν ενός πυρανόμετρου, με το παράθυρο να λειτουργεί σαν φίλτρο που επιτρέπει την είσοδο ακτινοβολίας με μήκη κύματος από 200 nm έως 4000 nm, μπλοκάροντας τη θερμική ακτινοβολία με μήκη κύματος μεγαλύτερα από 4 μm. Η φιλτραρισμένη ακτινοβολία απορροφάται από τη μαύρη επιφάνεια και μετατρέπεται σε θερμότητα, οπότε και στη συνέχεια δημιουργείται η αντίστοιχη τάση από τα θερμοζεύγη του thermopile που περιέχει (βλ. λειτουργία πυρανόμετρου).

Σχετικά με τη συντήρηση ενός πυρηλιόμετρου, οφείλει συνεχώς, όπως και με το πυρανόμετρο, να έχει καθαρό παράθυρο, διότι διαφορετικά (ύπαρξη χιονιού, πάγου, βροχής, δρόσου, σκόνης) μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται, διαχέεται, ενισχύεται, οδηγώντας σε εσφαλμένες μετρήσεις της πραγματικής ποσότητας ηλιακής ακτινοβολίας. Τα σύγχρονα πυρηλιόμετρα έχουν ενσωματωμένους θερμαντήρες για το παράθυρο, αντιμετωπίζοντας αποτελεσματικά χιόνι, πάγο και δρόσο, ενώ για την αντιμετώπιση της σκόνης είναι απαραίτητος ο συχνός καθαρισμός του.

Βιβλιογραφία/Πηγές

- [1] “Ηλιακή γεωμετρία και ακτινοβολία”, Δ Κατσαπρακάκης – 2015
https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/6163/1/02_chapter_5.pdf
- [2] Solar irradiance, Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_irradiance
- [3] Earth Declination <https://susdesign.com/popups/sunangle/declination.php>
- [4] Charting The Sun’s Motion In Relation To Your Home And Permaculture Site
<https://www.permaculturenews.org/2015/10/23/charting-the-suns-motion-in-relation-to-your-home-and-permaculture-site/>
- [5] What is a pyranometer? | Hukseflux https://www.hukseflux.com/uploads/inline/note-what_is_a_pyranometer_v2006.pdf
- [6] Pyrheliometer Description https://www.hukseflux.com/uploads/inline/note-what_is_a_pyrheliometer_v2006.pdf
- [7] Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications
<https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/34302.pdf>
- [8] Solar Energy Fundamentals – Lucien Wald
https://www.researchgate.net/publication/266214117_Solar_radiation_energy_fundamentals
- [9] Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Ισχύος, 2^η Έκδοση – Ιορδάνης Κιοσκερίδης