



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Τεχνολογίες Ενέργειας και Περιβάλλοντος

Σημειώσεις Εργαστηριακού Μαθήματος

Δρ. Κολοκοτσά Διονυσία

Δρ. Σπυριδάκη Αθηνά



Χανιά 2016

Πίνακας Περιεχομένων

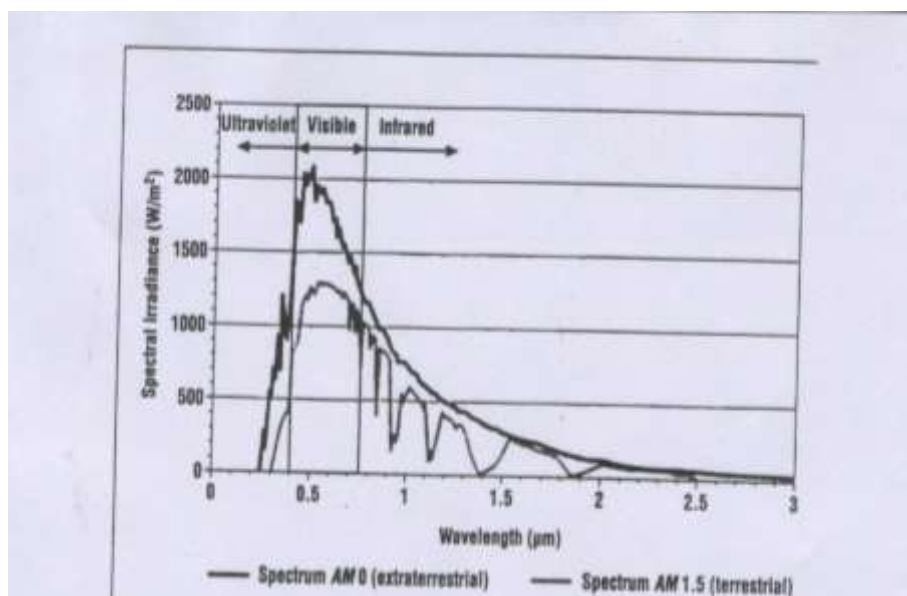
1	Ηλιακή Γεωμετρία – Υπολογισμός Ηλιακής Ακτινοβολίας	3
1.1	Εισαγωγή στην ηλιακή ακτινοβολία	3
1.2	Ηλιακή γεωμετρία	4
1.3	Ένταση και πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας	12
1.3.1	Επίδραση της γήινης ατμόσφαιρας	13
1.3.2	Υπολογισμός άμεσης και διάχυτης συνιστώσας από μετρήσεις ακτινοβολίας	15
1.4	Μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας	17
1.4.1	Γενική περιγραφή των οργάνων μέτρησης ακτινοβολίας	17
1.4.2	Όργανα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας	20
1.4.3	Παράγοντες που επιδρούν στη λειτουργία των οργάνων μέτρησης ακτινοβολίας	23
1.4.4	Τοποθέτηση των οργάνων μέτρησης ακτινοβολίας	24
1.5	Συλλογή ηλιακής ακτινοβολίας	24
1.5.1	Βέλτιστη τοποθέτηση ηλιακού συλλέκτη ως προς τη γωνία κλίσης του και τον προσανατολισμό του	25
1.6	Εφαρμογές εκμετάλλευσης ηλιακής ακτινοβολίας	25
1.7	Πειραματικό μέρος	28
1.7.1	Σκοπός του πειράματος	28
1.7.2	Οδηγίες για την πραγματοποίηση του πειράματος	29
1.7.3	Ανάλυση – Επεξεργασία μετρήσεων	30
1.8	Βιβλιογραφικές αναφορές	30

1 Ηλιακή Γεωμετρία – Υπολογισμός Ηλιακής Ακτινοβολίας

1.1 Εισαγωγή στην ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μια σημαντική και αστείρευτη πηγή ενέργειας. Για την αξιοποίησή της από τα συστήματα που έχουν αναπτυχθεί είναι απαραίτητη η γνώση του ηλιακού δυναμικού μιας περιοχής, δηλαδή της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας.

Με τον όρο «ηλιακή ενέργεια» αναφερόμαστε στην ενέργεια που λαμβάνει η Γη από τον Ήλιο. Η ηλιακή ενέργεια μεταφέρεται με την ηλιακή ακτινοβολία. Σε ετήσια βάση, ο Ήλιος εκπέμπει από την επιφάνειά του ενέργεια της τάξης των $3,91 \times 10^{26}$ W. Από αυτά, μόνο τα $1,8 \times 10^{16}$ W φτάνουν στο ανώτερο όριο της ατμόσφαιρας, στη μέση απόσταση Γης-Ηλίου (149600000km). Συνεπώς η Γη δέχεται κάθε χρόνο ενέργεια ίση με $5,78 \times 10^{18}$ J, ποσό το οποίο είναι πολύ μεγαλύτερο από όλα τα γνωστά ενεργειακά αποθέματα του πλανήτη.

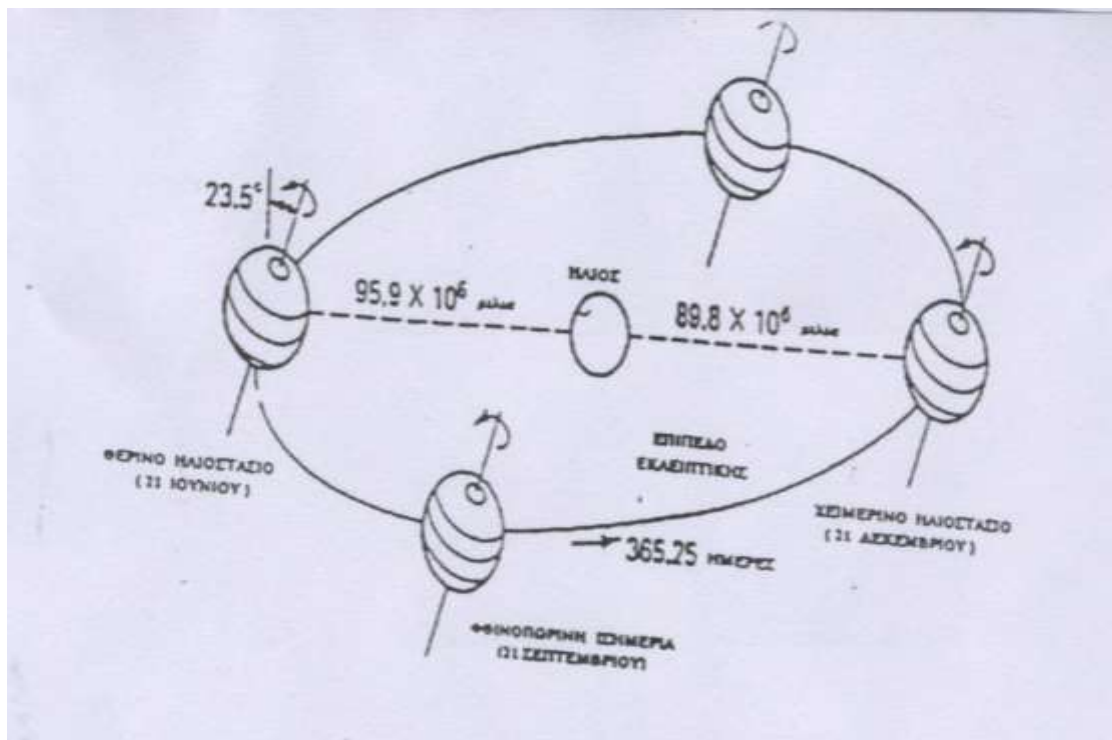


Σχήμα 1: Σύγκριση ηλιακού φάσματος που φτάνει στο ανώτατο όριο της γήινης ατμόσφαιρας με ηλιακό φάσμα που φτάνει στο έδαφος.

Το μεγαλύτερο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας εκπέμπεται στην περιοχή του υπέρυθρου και του ορατού φάσματος. Η περιοχή που ενδιαφέρει περισσότερο, σε σχέση με την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, είναι τα μήκη κύματος μεταξύ 0,3μm και 12μm.

1.2 Ηλιακή γεωμετρία

Η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζει μεγάλες διαφοροποιήσεις, ανάλογα με την εποχή του έτους, την ώρα της ημέρας, τη διαδρομή της ηλιακής ακτίνας μέσα από τη γήινη ατμόσφαιρα (και τη σύσταση της γήινης ατμόσφαιρας), την ηλιακή δραστηριότητα, κ.ά παράγοντες. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε κάποιες βασικές έννοιες ηλιακής γεωμετρίας.



Σχήμα 2: Κίνηση της Γης γύρω από τον Ήλιο

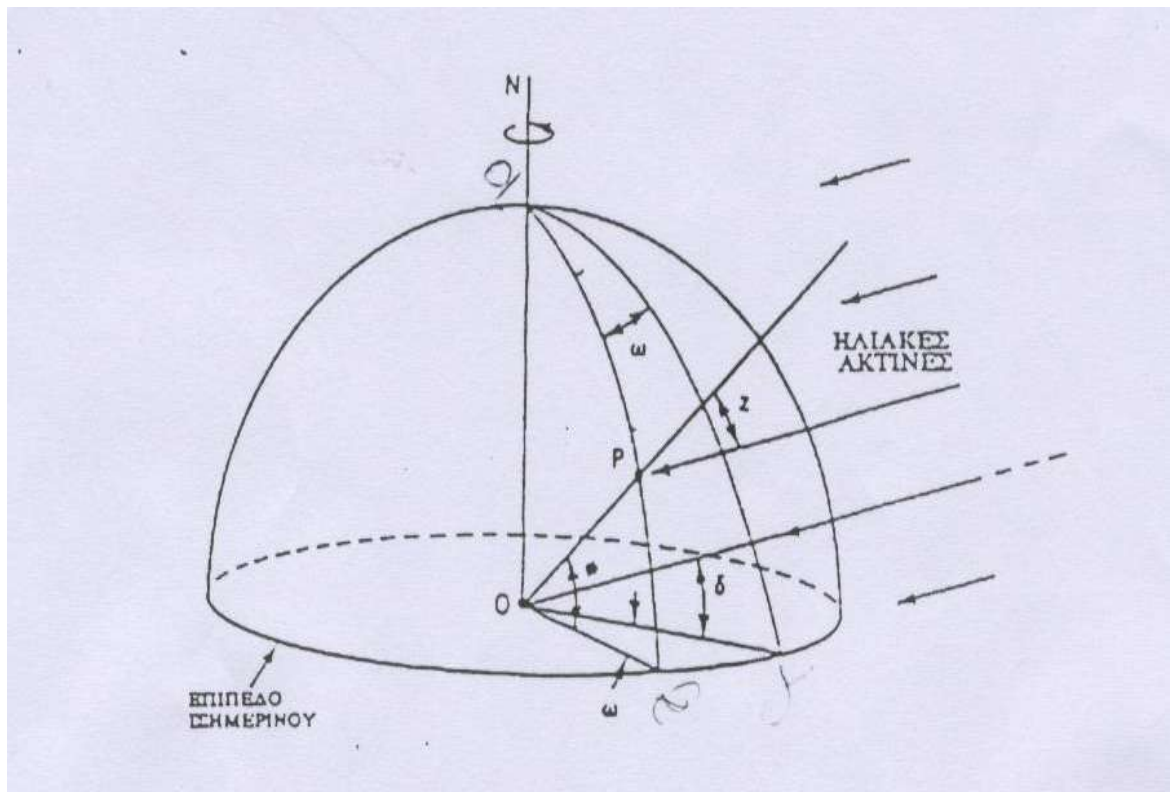
Η Γη περιστρέφεται γύρω από τον Ήλιο μέσα σε χρονικό διάστημα 1 έτους, ακολουθώντας ελλειπτική τροχιά, με τον Ήλιο να κατέχει μία από τις εστίες της. Αυτό σημαίνει ότι η απόσταση μεταξύ Γης και Ήλιου δεν είναι σταθερή μέσα στη διάρκεια ενός έτους: η πλησιέστερη απόσταση είναι τον Ιανουάριο, ενώ η μεγαλύτερη τον Ιούλιο. Παράλληλα, κάθε 24h η Γη διαγράφει μία πλήρη περιστροφή από τα δυτικά προς τα ανατολικά γύρω από τον άξονά της (άξονας BN). Ο άξονας BN της Γης αποκλίνει από την κάθετο στο επίπεδο της ελλειπτικής τροχιάς κατά $23,45^\circ$.

Οι παραπάνω κινήσεις είναι υπεύθυνες για την εμφάνιση των εποχών και τον ημερήσιο κύκλο στη Γη. Για υπολογισμούς ακτινοβολίας είναι προτιμότερη η χρήση συντεταγμένων που είναι σταθερές στη Γη, θεωρώντας ότι ο Ήλιος περιστρέφεται γύρω από τη Γη. Κατά τη διάρκεια ενός έτους, η θέση του Ήλιου δεν παραμένει σταθερή, λόγω μεταβολής της απόκλισης δ του Ήλιου, της γωνίας δηλαδή που σχηματίζεται από την ευθεία που ενώνει τα κέντρα Ηλίου και Γης και από το επίπεδο του Ισημερινού. Η μεταβολή αυτή έχει ως συνέπεια την αυξομείωση της ηλιακής ακτινοβολίας και την εμφάνιση των διαφόρων εποχών.

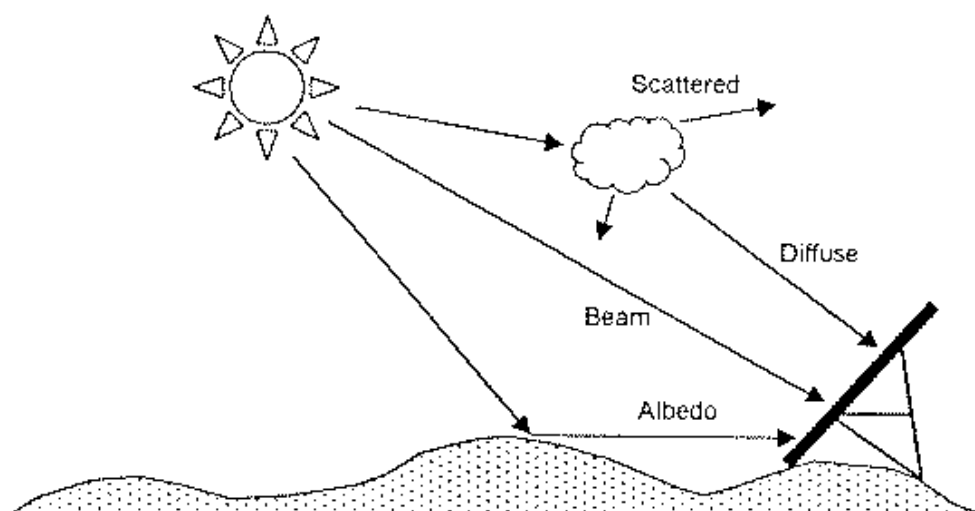
Επίσης, καθημερινά ο Ήλιος διαγράφει μια κυκλική τροχιά στον ουράνιο θόλο. Κατά την εαρινή και θερινή περίοδο του έτους, οι τροχιές αυτές διαγράφονται ολοένα και πιο βόρεια στον ουρανό (η ανατολή/δύση του Ήλιου παρατηρούνται ολοένα και πιο νωρίς/αργά). Κατά τη φθινοπωρινή και χειμερινή περίοδο συμβαίνει το αντίθετο. Το χειμώνα ο Ήλιος ανατέλλει νότια της Ανατολής και το καλοκαίρι βόρεια. Κατά το ίδιο 24/ωρο, το μεγαλύτερο ύψος του Ήλιου στον ουρανό παρατηρείται τις μεσημβρινές ώρες της ημέρας. Αυτό έχει επίσης ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία προσπίπτει σε μια περιοχή.

Συνεπώς η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μια περιοχή της Γης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θέση του Ήλιου σε σχέση με τη συγκεκριμένη περιοχή. Η πραγματική θέση του Ήλιου στον ουρανό καθορίζεται από το ύψος Ηλίου και το αζιμούθιό του. Οι παράμετροι αυτές σχετίζονται με το γεωγραφικό πλάτος του παρατηρητή ενός τόπου (δηλαδή της υπό μελέτη περιοχής).

Ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά φτάνει σε μια περιοχή της γήινης επιφάνειας γίνεται μέσω διαφόρων σχέσεων, οι οποίες συνδέουν τη θέση του Ήλιου στον ουράνιο θόλο και τη θέση (συντεταγμένες) της εξεταζόμενης περιοχής. Οι κυριότερες παράμετροι οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι οι:



Σχήμα 3: Ορισμός γεωγραφικού πλάτους (ϕ), γωνίας ώρας (ω) και ηλιακής απόκλισης (δ).



Σχήμα 4: Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο γωνίας κλίσης β (πηγή: <http://users.cecs.anu.edu.au/~Andres.Cuevas/Sun/Irrad/Irradiation.html>)

5. **Αληθής ηλιακός χρόνος (t_{sol}):** Ο χρόνος που χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς στην ηλιακή γεωμετρία. Η μέτρησή του γίνεται με βάση τη γωνιακή μετατόπιση του Ήλιου ως προς το γήινο μεσημβρινό του τόπου. Ο αληθής ηλιακός χρόνος διαφέρει από τον τοπικό χρόνο t_{std} ενός τόπου, γιατί τα ρολόγια βασίζονται σε έναν θεωρητικό, ομοιόμορφα κινούμενο Ήλιο (μέσος Ήλιος).

Για τον υπολογισμό του ηλιακού χρόνου (σε min) από τον τοπικό χρόνο t_{std} ενός τόπου, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$t_{sol} = t_{std} + \frac{L_{std} - L_{loc}}{15^\circ/h} + \frac{E_t}{60min/h} \quad (\text{εξ.}) 1$$

όπου:

L_{loc} το γεωγραφικό μήκος του τόπου, με αρνητικό πρόσημο αν ο τόπος βρίσκεται ανατολικά του μεσημβρινού Greenwich και θετικό αν βρίσκεται δυτικά του.

L_{std} η ζώνη ώρας του τόπου, με αρνητικό πρόσημο αν ο τόπος βρίσκεται ανατολικά του μεσημβρινού Greenwich και θετικό αν βρίσκεται δυτικά του. Για την Ελλάδα π.χ. είναι: $L_{std} 2^*(-15)=-30$.

E_t η εξίσωση του χρόνου, η οποία δίνει τη χρονική διαφορά μεταξύ της ηλιακής μεσημβρίας από τη μεσημβρία του τόπου:

$$E_t = 9,87 \sin 2B - 7,53 \cos B - 1,5 \sin B \quad (\text{εξ.}) 2$$

με:

$$B = 360^\circ \frac{n-81}{364} \quad (\text{εξ.}) 3$$

6. **Ηλιακή απόκλιση (δ):** καλείται η γωνιακή απόσταση των ηλιακών ακτίνων βόρεια ή νότια του Ισημερινού. Είναι δηλαδή η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ

του επιπέδου της εκλειπτικής (της ευθείας που ενώνει τα κέντρα Ηλίου και Γης) και του επιπέδου Ισημερινού. Δίνεται από τη σχέση:

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad (\text{εξ.}) 4$$

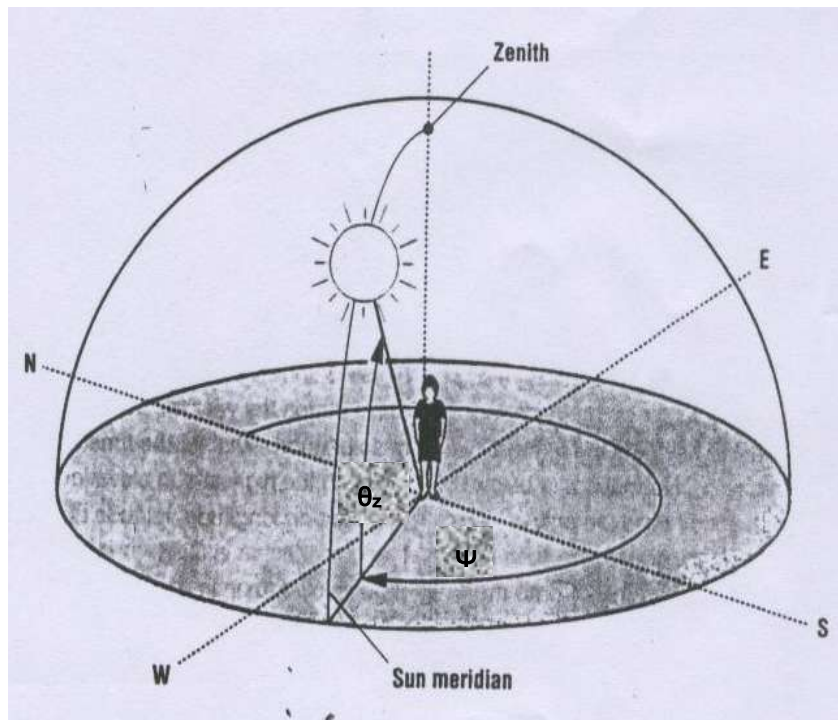
όπου η δ υπολογίζεται σε μοίρες και n είναι η Ιουλιανή Ημέρα. Η ηλιακή απόκλιση μεταβάλλεται μέσα στο έτος, με μέγιστη τιμή $+23,5^\circ$ κατά το θερινό και ελάχιστη τιμή $+23,5^\circ$ κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο, για το Βόρειο Ημισφαίριο.

7. **Ωριαία γωνία Ηλίου (ω):** είναι η γωνία κατά την οποία πρέπει να περιστραφεί ο μεσημβρινός του τόπου για να γίνει παράλληλος προς τις ακτίνες του Ήλιου. Δίνεται από τη σχέση:

$$\omega = \frac{(t_{\text{sol}} - 12)h}{24h} 360^\circ = (t_{\text{sol}} - 12) 15^\circ \quad (\text{εξ.}) 5$$

όπου t_{sol} ο αληθής ηλιακός χρόνος. Οι 15° αντιστοιχούν στη γωνιακή απόσταση που καλύπτει η Γη μέσα σε 1h, καθώς περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό της. Κατά την ηλιακή μεσημβρία είναι $\omega=0$, ενώ κάθε ώρα η τιμή της ω μεταβάλλεται κατά 15° . Τις πρωινές ώρες οι τιμές της θεωρούνται αρνητικές, ενώ τις απογευματινές ώρες λαμβάνονται θετικές.

8. **Γωνία ύψους Ηλίου (α):** είναι η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης των ηλιακών ακτίνων και του επιπέδου του ορίζοντα. Παίρνει τιμές μεταξύ 0° - 90° , οι οποίες μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του έτους, με τις μεγαλύτερες ετήσιες τιμές να εμφανίζονται κατά τη θερινή περίοδο. Το ύψος Ηλίου μεταβάλλεται επίσης κατά τη διάρκεια της ημέρας: κατά την ανατολή του Ήλιου είναι μηδενικό, παίρνει τη μέγιστη τιμή του το μεσημέρι και στη συνέχεια μειώνεται ξανά, έως ότου μηδενιστεί με τη δύση του Ήλιου.



Σχήμα 6: Ορισμός γωνιών που καθορίζουν τη θέση του Ήλιου.

9. **Ζενίθεια γωνία του Ήλιου (θ_z):** είναι η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης των ηλιακών ακτίνων (δηλαδή της ευθείας που ενώνει τον τόπο με το κέντρο του Ήλιου) και της κατακόρυφης. Η ζενίθεια γωνία και το ύψος Ηλίου είναι γωνίες συμπληρωματικές, δηλαδή ισχύει:

$$\theta_z + \alpha = 90^\circ \quad (\text{εξ.}) \ 6$$

Ο υπολογισμός τους είναι συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους του τόπου, της ηλιακής απόκλισης και της ωριαίας γωνίας του Ήλιου:

$$\cos(\theta_z) = \sin \alpha = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (\text{εξ.}) \ 7$$

Είναι προφανές ότι η ζενίθεια γωνία παίρνει επίσης τιμές από 0° έως 90° .

10. **Αζιμούθια γωνία Ηλίου (Ψ):** είναι η γωνία που σχηματίζουν η προβολή των ηλιακών ακτίνων στο οριζόντιο επίπεδο με τη κατεύθυνση του νότου. Παίρνει τιμές από 0° - 180° , με τις δυτικές γωνίες να θεωρούνται θετικές και τις ανατολικές αρνητικές. Για νότιο προσανατολισμό, είναι $\Psi=0$. Η αζιμούθια

γωνία του Ήλιου εξαρτάται από την ηλιακή απόκλιση, το ύψος Ηλίου και την ωριαία γωνία του Ήλιου. Υπολογίζεται από την:

$$\sin \Psi = \cos \delta \frac{\sin \omega}{\cos \alpha} \quad (\text{εξ.}) 8$$

11. **Αζιμούθια γωνία επιφάνειας (ϕ_p):** είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο μεταξύ της κατεύθυνσης του Νότου (τοπικός μεσημβρινός Βορρά-Νότου) και της προβολής, στο οριζόντιο επίπεδο, της κάθετου στην επιφάνεια. Παίρνει τιμές από -180° έως $+180^\circ$. Παρακάτω απεικονίζονται οι τιμές της ϕ_p για τις 4 κύριες κατευθύνσεις.

Πίνακας 1: Διορθωτικοί Συντελεστές Άμεσης Ηλιακής Ακτινοβολίας

Κατεύθυνση	ϕ_p ($^\circ$)
Νότος	0
Βορράς	-180
Ανατολή	-90
Δύση	90

12. **Γωνία πρόσπτωσης ηλιακών ακτίνων (θ):** η γωνία μεταξύ της κάθετης στην κεκλιμένη επιφάνεια και της ευθείας που ενώνει ένα σημείο της κεκλιμένης επιφάνειας με το κέντρο του Ήλιου. Παίρνει τιμές από 0° έως 90° και υπολογίζεται από την:

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \phi_p + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \phi_p \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \phi_p \sin \omega \quad (\text{εξ.}) 9$$

Για επιφάνεια με νότιο προσανατολισμό ($\phi_p=0^\circ$), από την εξ. (11) προκύπτει τελικά η:

$$\cos \theta = \cos \delta \cos \omega \cos(\phi - \beta) + \sin \delta \sin(\phi - \beta) \quad (\text{εξ.}) 10$$

1.3 Ένταση και πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας

Η ροή ακτινοβολίας η οποία προέρχεται από διάφορες διευθύνσεις και η οποία εκπέμπεται ή διέρχεται από τη μονάδα της επιφάνειας ανεξαρτήτως γωνίας πρόσπτωσης, ονομάζεται **πυκνότητα ισχύος** της ακτινοβολίας και μετριέται σε μονάδες W/m^2 . Ως **ένταση** (W/m^2) ορίζεται το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα σε μοναδιαία επιφάνεια και στη μονάδα του χρόνου, δηλαδή ο ανά μονάδα επιφάνειας ρυθμός με τον οποίο η ακτινοβολία προσπίπτει σε μια επιφάνεια. Η ποσότητα ολοφασματικής ενέργειας που φτάνει στο εξωτερικό όριο της γήινης ατμόσφαιρας (στη μέση απόσταση Γης-Ήλιου), σε μοναδιαία επιφάνεια που κείται κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης της ηλιακής ακτίνας και στη μονάδα του χρόνου, καλείται ηλιακή σταθερά G_0 και ισούται με $1367W/m^2$.

Λόγω του ότι η τροχιά της Γης γύρω από τον Ήλιο δεν είναι κυκλική, η ακτινοβολία που δέχεται η γήινη επιφάνεια μεταβάλλεται μέσα στο έτος. Για το λόγο αυτό, στην τιμή της ηλιακής σταθεράς προστίθεται ένας διορθωτικός όρος E_0 :

$$E_0 = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 n}{365}\right) \quad (\text{εξ.}) 11$$

Συνεπώς, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα και προσπίπτει, στη μονάδα του χρόνου, σε μια μοναδιαία επιφάνεια κάθετη στις ακτίνες του Ήλιου δίνεται, για μια συγκεκριμένη ημέρα του έτους, από την:

$$G_{on} = G_0 E_0 = G_0 \left[1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 n}{365}\right) \right] \quad (\text{εξ.}) 12$$

όπου G_0 η ηλιακή σταθερά.

Αντίστοιχα, η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει έξω από την ατμόσφαιρα της Γης και προσπίπτει, στη μονάδα του χρόνου, σε μια επιφάνεια οριζόντια και παράλληλη προς το έδαφος της πλησιέστερης γήινης τοποθεσίας, δίνεται από τη σχέση:

$$I_o = G_{on} \cos \theta_z =$$

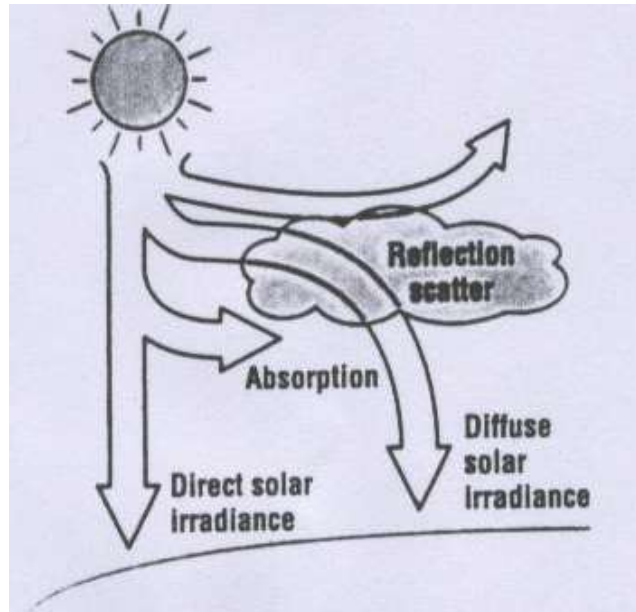
$$G_o \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360 n}{365} \right) \right] (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega) \quad (\text{εξ.}) 13$$

όπου n η Ιουλιανή ημέρα του έτους, φ το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, δ η ηλιακή απόκλιση και ω η ωριαία γωνία.

1.3.1 Επίδραση της γήινης ατμόσφαιρας

Μικρό μόνο μέρος της ηλιακής αυτής ακτινοβολίας που φτάνει στο ανώτερο όριο της ατμόσφαιρας προσπίπτει τελικά στην επιφάνεια της Γης. Κατά τη διαδρομή της μέσα από τη γήινη ατμόσφαιρα, η ηλιακή ακτινοβολία υφίσταται εξασθένηση, η οποία οφείλεται σε απορρόφηση και σκέδαση από τα μόρια και τα διάφορα ατμοσφαιρικά συστατικά.

Η ακτινοβολία που προσπίπτει τελικά σε μια επιφάνεια στο έδαφος διακρίνεται στην **άμεση** και στη **διάχυτη** συνιστώσα. Το άθροισμα των συνιστωσών αυτών αποτελεί την **ολική ακτινοβολία** (συμβολ. I) που προσπίπτει σε μια επιφάνεια. **Άμεση** (συμβολ. I_b) ονομάζεται η ακτινοβολία που προέρχεται απ' ευθείας από τον Ήλιο, αποτελεί δηλαδή μια δέσμη ακτίνων. Η άμεση ακτινοβολία μετριέται πάντοτε ως προς επιφάνεια κάθετη προς την κατεύθυνση διάδοσης του φωτός. **Διάχυτη** (συμβολ. I_d) είναι η ακτινοβολία που έρχεται από διάφορες κατευθύνσεις και προέρχεται από ανακλάσεις των ηλιακών ακτίνων πάνω σε διάφορες επιφάνειες (κτίρια, έδαφος, κλπ, γνωστή και ως **διάχυτα ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία**), από σκέδασή τους από τα συστατικά της ατμόσφαιρας, αλλά και από άλλες πηγές εκπομπής (γήινη ακτινοβολία, φθορισμός, κλπ). Η ολική διάχυτη ακτινοβολία είναι το άθροισμα όλων των παραπάνω συνιστωσών. Η μέτρηση της διάχυτης και της ολικής ακτινοβολίας γίνεται ως προς το οριζόντιο επίπεδο.



Σχήμα 7: Η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα από την ατμόσφαιρα. Άμεση και διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία.

Ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$I = I_b + I_d \quad (\text{εξ.}) 14$$

Κατά την ανατολή του Ήλιου, η I καθορίζεται κυρίως από τη διάχυτη συνιστώσα I_d της ακτινοβολίας. Καθώς προχωράει η μέρα και ο Ήλιος ανυψώνεται από τον ορίζοντα, η συμβολή της άμεσης συνιστώσας I_b αυξάνεται. Η αύξηση αυτή συνεχίζεται έως το μεσημέρι, ώρα κατά την οποία κυριαρχεί, σε ανέφελη ημέρα, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Μετά το μεσημέρι, η επίδραση της άμεσης ακτινοβολίας αρχίζει και πάλι να ελαττώνεται, για να επικρατήσει η διάχυτη συνιστώσα κατά τις απογευματινές προς βραδινές ώρες.

1.3.2 Υπολογισμός άμεσης και διάχυτης συνιστώσας από μετρήσεις ακτινοβολίας

1.3.2.1 Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο

Σε περίπτωση που είναι γνωστή η ωριαία ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης, για τον προσδιορισμό της αντίστοιχης διάχυτης συνιστώσας σε οριζόντιο επίπεδο μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο των Orgill και Hollands. Στο μοντέλο αυτό, ως **ωριαίος δείκτης αιθριότητας**, k_t , ορίζεται το πηλίκο της ωριαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας I σε οριζόντιο επίπεδο, προς την αντίστοιχη τιμή στο όριο της ατμόσφαιρας I_0 και αποτελεί ένα μέτρο της διαπερατότητας της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία:

$$k_t = \frac{I}{I_0} \quad (\text{εξ.}) 15$$

Σύμφωνα με τα όσα έχουν αναφερθεί στις προηγούμενες παραγράφους, η I_0 υπολογίζεται από την:

$$I_0 = G_{on} \cos\theta_z \quad (\text{εξ.}) 16$$

θεωρώντας ότι το $\cos\theta_z$ είναι υπολογισμένο στο μέσο της κάθε ώρας. Να σημειωθεί ότι με I συμβολίζονται γενικά οι ωριαίες τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Ο λόγος της ωριαίας τιμής της διάχυτης ακτινοβολίας που φτάνει, σε οριζόντιο επίπεδο, στην εξεταζόμενη επιφάνεια, ως προς την αντίστοιχη ολική ακτινοβολία που φτάνει στην ίδια επιφάνεια ονομάζεται **ποσοστό διάχυσης**, k_d :

$$k_d = \frac{I_d}{I} \quad (\text{εξ.}) 17$$

Το ποσοστό διάχυσης υπολογίζεται συναρτήσει του δείκτη αιθριότητας, βάσει των σχέσεων:

$$k_d = \frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,00 - 0,249 k_t & \text{αν } k_t < 0,35 \\ 1,557 - 1,84 k_t & \text{αν } 0,35 < k_t < 0,75 \\ 0,177 & \text{αν } k_t > 0,75 \end{cases} \quad (\text{εξ.}) 18$$

Στη συνέχεια, από την τιμή του k_d υπολογίζεται η ζητούμενη τιμή I_d .

Γνωρίζοντας την ολική και τη διάχυτη ακτινοβολία που προσπίπτουν σε οριζόντιο επίπεδο, μπορούμε, από την:

$$I_b = I - I_d \quad (\text{εξ.}) 19$$

να υπολογίσουμε την άμεση ακτινοβολία που δέχεται το οριζόντιο επίπεδο.

1.4 Μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας

Για την μελέτη του ηλιακού δυναμικού μιας περιοχής είναι απαραίτητη η μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το μέγεθος που ενδιαφέρει κυρίως είναι η μέτρηση της ενέργειας που μεταφέρεται στην περιοχή στη μονάδα του χρόνου και για συγκεκριμένη φασματική περιοχή, δηλαδή η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας.

1.4.1 Γενική περιγραφή των οργάνων μέτρησης ακτινοβολίας

Υπάρχει πληθώρα επιστημονικών οργάνων μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Κυριότερα είναι τα φασματοφωτόμετρα, τα ακτινόμετρα (στα οποία εντάσσονται τα πυρανόμετρα και τα πυρηλιόμετρα), καθώς και οι ανιχνευτές ακτινοβολίας. Ο σχεδιασμός, η ακρίβεια και το είδος μέτρησης που εκτελεί το κάθε όργανο διαφοροποιούνται ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής. Σε γενικές γραμμές ένα όργανο μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας αποτελείται από:

1. Το συλλέκτη της ακτινοβολίας
2. Τη διάταξη φασματικής ανάλυσης της ακτινοβολίας
3. Τη μονάδα ανίχνευσης και καταμέτρησης της ακτινοβολίας
4. Τη μονάδα καταγραφής της ακτινοβολίας

1.4.1.1 Συλλέκτης ακτινοβολίας

Ο συλλέκτης της ακτινοβολίας αποτελεί το σημείο εισόδου της ακτινοβολίας στο όργανο. Εκεί συλλέγονται τα φωτόνια που προσπίπτουν υπό συγκεκριμένη γεωμετρία και στη συνέχεια οδηγούνται στη διάταξη φασματικής ανάλυσης. Η γεωμετρία πρόσπτωσης των ακτίνων καθορίζει ποια συνιστώσα της ακτινοβολίας θα μετρηθεί (ολική, άμεση ή διάχυτη).

Πιο αναλυτικά, η μέτρηση της ολικής ακτινοβολίας συνίσταται στη μέτρηση της πυκνότητας ροής της ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια η οποία τοποθετείται οριζόντια. Σαν οριζόντια επιφάνεια αναφοράς (συλλέκτης) χρησιμοποιείται η είσοδος μιας σφαίρας ολοκλήρωσης ή ένα πλακίδιο διάχυσης. Οι σφαίρες ολοκλήρωσης παρέχουν μεγαλύτερη απόδοση, όμως για χρήση σε εξωτερικούς χώρους τα πλακίδια διάχυσης εμφανίζονται πιο ανθεκτικά.

Η μέτρηση της άμεσης συνιστώσας συνίσταται στη μέτρηση της πυκνότητας ροής της ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια (πλακίδιο διάχυσης), η οποία τοποθετείται κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας. Λόγω της προέλευσης της ακτινοβολίας αυτής (απ' ευθείας από τον Ήλιο), η στερεά γωνία που βλέπει η μονάδα εισόδου πρέπει να είναι πολύ μικρή, ώστε να εμποδίζεται η διέλευση φωτονίων από ανακλάσεις, σκεδάσεις, κλπ. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός σωλήνα μικρής διαμέτρου ή διαδοχικών διαφραγμάτων. Ο άξονας της διάταξης προσανατολίζεται συνεχώς προς τον ηλιακό δίσκο. Η όλη διάταξη θα πρέπει να παρακολουθεί την κίνηση του Ήλιου, ώστε να δέχεται καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας την άμεση ηλιακή ακτινοβολία.

Η μέτρηση της διάχυτης συνιστώσας συνίσταται στη μέτρηση της ολικής ακτινοβολίας, εξασφαλίζοντας ότι αποκλείονται όλα τα φωτόνια που προέρχονται από την άμεση συνιστώσα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας στεφάνης μικρής διαμέτρου, η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ του ηλιακού δίσκου και της επιφάνειας αναφοράς του οργάνου και προσφέρει την απαραίτητη σκίαση από τις ηλιακές ακτίνες που προέρχονται απ' ευθείας από τον ηλιακό δίσκο. Μια άλλη μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η έμμεση μέτρηση της διάχυτης ακτινοβολίας, ως το αποτέλεσμα της αφαίρεσης των τιμών της άμεσης από τις τιμές της ολικής ακτινοβολίας, υπό την προϋπόθεση οι μετρήσεις τους να είναι ταυτόχρονες.

1.4.1.2 Διάταξη φασματικής ανάλυσης

Μετά τη συλλογή τους, τα φωτόνια οδηγούνται στη διάταξη η οποία αναλύει την εισερχόμενη ακτινοβολία σε επιμέρους φασματικές περιοχές. Το εύρος των περιοχών αυτών καθορίζεται από την εκάστοτε εφαρμογή, με δυνατότητα μηδενικής ή και πλήρους φασματικής ανάλυσης. Ανάλογα με το εύρος της φασματικής περιοχής λειτουργίας, τα όργανα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας διακρίνονται σε:

1. Ευρείας φασματικής περιοχής, με εύρος απόκρισης μεγαλύτερο των 20nm περίπου.
2. Στενής φασματικής περιοχής, με εύρος απόκρισης μικρότερο των 10nm περίπου.
3. Φασματοφωτόμετρα, με εύρος απόκρισης μικρότερο των 2nm (δυνατότητα ανίχνευσης σχεδόν μονοχρωματικών ακτινοβολιών).

Οι δύο πρώτες κατηγορίες είναι γνωστές και ως **ακτινόμετρα**.

Ένα όργανο μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας χαρακτηρίζεται από την **απόλυτη φασματική απόκρισή** του, η οποία εκφράζει την ευαισθησία του οργάνου στην ανίχνευση ακτινοβολίας για κάθε μήκος κύματος της περιοχής λειτουργίας του. Τιμές κοντά στη μονάδα χαρακτηρίζουν πολύ ευαίσθητα όργανα. Λόγω δυσκολίας προσδιορισμού της, χρησιμοποιείται συνήθως η κανονικοποιημένη έκφραση ως προς το μήκος κύματος στο οποίο διαπιστώνεται η μέγιστη ευαισθησία του οργάνου, η οποία ονομάζεται **σχετική φασματική απόκριση**.

1.4.1.3 Μονάδα ανίχνευσης και καταμέτρησης της ακτινοβολίας

Εξερχόμενη από τη διάταξη ανάλυσης, η ακτινοβολία προσπίπτει σε έναν ανιχνευτή και καταμετρείται είτε ο αριθμός των φωτονίων, είτε η ισχύς που αυτά μεταφέρουν, παράγοντας ένα ηλεκτρικό ή ηλεκτρονικό σήμα. Ως

ανιχνευτές στα φασματοφωτόμετρα χρησιμοποιούνται συνήθως φωτοπολλαπλασιαστές, ενώ στα ακτινόμετρα φωτοδίοδοι.

1.4.1.4 Μονάδα καταγραφής της ακτινοβολίας

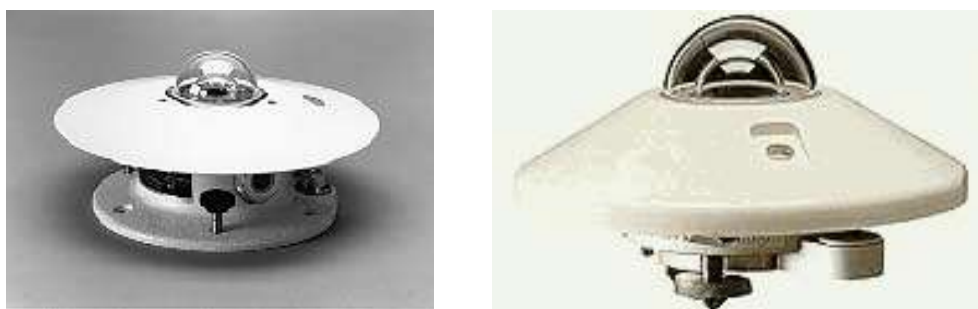
Το σήμα του ανιχνευτή οδηγείται στο σύστημα καταγραφής, το οποίο πλέον απαρτίζεται αποκλειστικά από υπολογιστές.

1.4.2 Όργανα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας

Παρακάτω θα αναφερθούμε εκτενέστερα στις κυριότερες κατηγορίες οργάνων μέτρησης της ακτινοβολίας.

1.4.2.1 Ακτινόμετρα (πυρηλιόμετρα, πυρανόμετρα)

Τα όργανα αυτά παρέχουν τη δυνατότητα μέτρησης της ολικής, άμεσης και διάχυτης πυκνότητας ροής της ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια και σε συγκεκριμένες φασματικές περιοχές. Δεν υπάρχει δυνατότητα ανίχνευσης μεταβολών του φάσματος, αλλά ανίχνευσης μεταβολών της συνολικής ροής της ακτινοβολίας στην περιοχή λειτουργίας τους. Ανάλογα με το πόσο στενή ή ευρεία είναι η φασματική περιοχή λειτουργίας τους, κατατάσσονται σε ακτινόμετρα ευρείας ή στενής φασματικής περιοχής. Η φασματική απόκριση των ακτινομέτρων καθορίζεται από τον κατασκευαστή, συνήθως με τη χρήση φίλτρων με μέγιστη διαπερατότητα στη φασματική περιοχή που επιθυμείται.



Σχήμα 8: Πυρανόμετρα

Ανάλογα με το τι μετράει το κάθε όργανο, διακρίνονται σε πυρανόμετρα και πυρηλιόμετρα. Τα **πυρανόμετρα** μετρούν την πυκνότητα ροής σε ολόκληρο το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας (ολοφασματική ακτινοβολία, από 280nm έως 3000nm) σε οριζόντια επιφάνεια. Τα όργανα αυτά χρησιμεύουν για τη μέτρηση τόσο της ολικής, όσο και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας του ημισφαιρίου γύρω από το όργανο.

Στα σύγχρονα πυρανόμετρα η επιφάνεια του αισθητήρα καλύπτεται από δύο ομόκεντρους γυάλινους θόλους, για προστασία από τις εξωτερικές συνθήκες. Οι θόλοι αυτοί εξασφαλίζουν επίσης σταθερότητα στη θερμική απόκριση του οργάνου. Μεταξύ των δύο θόλων υπάρχει κενό. Ο αισθητήρας ενός πυρανομέτρου έχει οπτικό πεδίο 0°-180°.

Η αρχή λειτουργίας ενός πυρανομέτρου βασίζεται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, σύμφωνα με το οποίο, στα άκρα θερμοστοιχείου που βρίσκονται σε διαφορετική, μεταξύ τους, θερμοκρασία, αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού. Μέσα στο όργανο υπάρχουν δύο πλάκες, μια μαύρου χρώματος κοντά στην επιφάνεια, με κεραμικό υπόστρωμα και μια άλλη στο εσωτερικό του οργάνου, η οποία δεν έχει υποστεί επεξεργασία αμαύρωσης. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία απορροφάται από τη μαύρη πλάκα στην επιφάνεια του οργάνου, θερμαίνοντάς τη. Δε συμβαίνει όμως το ίδιο και με την πλάκα στο εσωτερικό του πυρανομέτρου, με αποτέλεσμα να δημιουργείται διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στις δύο πλάκες.

Κάτω από την επιφάνεια μαύρου χρώματος υπάρχουν εκατοντάδες θερμοστοιχεία, οι μισές επαφές των οποίων είναι συνδεδεμένες με τη μαύρη επιφάνεια και οι άλλες μισές με τη δεύτερη επιφάνεια, η οποία χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας αναφοράς. Αυτός ο συνδυασμός πολλών θερμοηλεκτρικών ζευγών ονομάζεται θερμοπύλη και γίνεται με σκοπό την αύξηση της τάσης στα ελεύθερα άκρα τους, ώστε να μπορεί να μετρηθεί. Το σήμα του πυρανομέτρου είναι της τάξης των μερικών mV και οδηγείται σε κατάλληλη συσκευή μέτρησης (βολτόμετρο), η οποία

ταυτόχρονα πραγματοποιεί και ολοκλήρωση του σήματος. Τα όργανα αυτά λέγονται ηλιακοί ολοκληρωτές (Solar integrators).

Για τη μέτρηση της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας τα πυρανόμετρα εφοδιάζονται με μία στεφάνη η οποία τοποθετείται κάθετα στην διεύθυνση του Ήλιου για όλο το γεωγραφικό πλάτος των 0° - 90° Βορά και Νότου. Με τον τρόπο αυτό ο γυάλινος θόλος σκιάζεται συνεχώς κατά τη διάρκεια της ημέρας και δεν εισέρχεται η απ' ευθείας ακτινοβολία του Ήλιου στον αισθητήρα του οργάνου. Η θέση της στεφάνης αυτής θα πρέπει να ρυθμίζεται ανάλογα με την τιμή του ηλιακού ύψους. Επίσης κάθε λίγες ημέρες η θέση της θα πρέπει να επαναπροσαρμόζεται στην κλίση του Ήλιου.



Σχήμα 9: Πυρανόμετρο με στεφάνη

Τα **πυρηλιόμετρα** μετρούν την άμεση συνιστώσα της ακτινοβολίας, είτε της ολοφασματικής, είτε σε συγκεκριμένες ευρείες φασματικές περιοχές, η οποία προσπίπτει σε κάθετη, ως προς την ακτινοβολία, επιφάνεια. Αποτελούνται από ένα σωλήνα, ο οποίος επιτρέπει τη διέλευση μόνο της άμεσης συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας. Η εισερχόμενη στο όργανο άμεση ακτινοβολία ανιχνεύεται από έναν αισθητήρα, ο οποίος είναι τοποθετημένος στο βάθος του σωλήνα. Το όργανο

τοποθετείται πάνω σε κατάλληλη ηλεκτρονική βάση, η οποία επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση της τροχιάς του Ήλιου (αστροστάτη), έτσι ώστε ο ηλιακός δίσκος να είναι πάντοτε ορατός από το σωλήνα.

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα για τους Συλλέκτες ακτινοβολίας (παρ. 1.4.1.1), η άμεση συνιστώσα της ακτινοβολίας μπορεί επίσης να μετρηθεί με χρήση δύο όμοιων ακτινομέτρων μέτρησης της ολικής ακτινοβολίας (πυρανομέτρων), τοποθετώντας το ένα από τα δύο κάτω από ένα σκιάδιο. Με τον τρόπο αυτό τα δύο όργανα μετρούν ταυτόχρονα την ολική και τη διάχυτη ακτινοβολία. Η άμεση ακτινοβολία προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ ολικής και διάχυτης ακτινοβολίας. Η μέθοδος είναι εύχρηστη και οικονομική, ωστόσο δεν παρέχει μεγάλη ακρίβεια.

1.4.3 Παράγοντες που επιδρούν στη λειτουργία των οργάνων μέτρησης ακτινοβολίας

Σημαντική επίδραση στη μετρούμενη ακτινοβολία ασκεί η **διαπερατότητα** των οπτικών τμημάτων του οργάνου. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία υφίσταται εξασθένηση στα διάφορα οπτικά μέρη (φακούς, φίλτρα, κλπ), ενώ παράλληλα μέρος της ανακλάται στο συλλέκτη αλλά και τον ανιχνευτή. Τελικά, μέρος μόνο της αρχικά προσπίπτουσας ακτινοβολίας ανιχνεύεται. Λόγω όμως του γεγονότος ότι το ποσοστό που δεν ανιχνεύεται είναι σταθερό και εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του οργάνου μέτρησης, είναι εύκολα προσδιορίσιμο και συνεκτιμώμενο στο συντελεστή βαθμονόμησης του οργάνου.

Οι **μεταβολές της θερμοκρασίας** επηρεάζουν κατά τρόπο διαφορετικό τα διάφορα τμήματα του οργάνου, προκαλώντας αύξηση ή μείωση του σήματος του οργάνου. Η λύση στο πρόβλημα αυτό επιτυγχάνεται είτε με χρήση μεθόδων σταθεροποίησης της

θερμοκρασίας λειτουργίας του οργάνου, είτε με χρήση συντελεστή διόρθωσης του σήματος εξόδου για μεταβολές της θερμοκρασίας του οργάνου, σε σχέση με μια θερμοκρασία αναφοράς. Η τελευταία μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως σε όργανα μικρού οικονομικού κόστους, για τα οποία είναι οικονομικά ασύμφορη η εύρεση λύσης μέσω σταθεροποιητών θερμοκρασίας. Δε συνίσταται όμως η χρησιμοποίησή της σε περιπτώσεις που απαιτείται μεγάλη ακρίβεια.

1.4.4 Τοποθέτηση των οργάνων μέτρησης ακτινοβολίας

Η τοποθέτηση ενός πυρανομέτρου πρέπει να εξασφαλίζει τη δυνατότητα μέτρησης της ακτινοβολίας από όλα τα σημεία του ουράνιου θόλου. Για το λόγο αυτό το οπτικό πεδίο του οργάνου προς όλες τις διευθύνσεις θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό ελεύθερο από εμπόδια. Αυτό είναι περισσότερο σημαντικό να ισχύει ως προς το νότο, καθώς, για το Βόρειο Ημισφαίριο, η ακτινοβολία που προέρχεται από το νότιο τμήμα του ουράνιου θόλου είναι ισχυρότερη από αυτήν που προέρχεται από το βόρειο τμήμα του. Επίσης είναι απαραίτητη η καλή οριζοντίωση του οργάνου.

Τα πυρηλιόμετρα πρέπει να συνοδεύονται από διάταξη που τα κατευθύνει αυτόματα προς τον Ήλιο (αστροστάτης).

1.5 Συλλογή ηλιακής ακτινοβολίας

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας αποτελεί μια αποδοτική λύση στην αντιμετώπιση των ενεργειακών απαιτήσεων ενός κτιρίου. Έτσι, η χρήση ηλιακών συλλεκτών είναι ευρέως διαδεδομένη.

1.5.1 Βέλτιστη τοποθέτηση ηλιακού συλλέκτη ως προς τη γωνία κλίσης του και τον προσανατολισμό του

Η σωστή τοποθέτηση ενός ηλιακού συλλέκτη καθορίζει σε σημαντικό ποσοστό το βαθμό απόδοσής του. Γενικά, για τη συλλογή **άμεσης ακτινοβολίας**, ο βέλτιστος προσανατολισμός μιας επιφάνειας είναι ο Νότιος, με τιμές απόκλισης μεταξύ 20° - 30° να μην επηρεάζουν σημαντικά την προσλαμβανόμενη ενέργεια. Παράλληλα, η βέλτιστη γωνία κλίσης θα πρέπει να προσεγγίζει το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, με τιμή κατά 10° - 15° μικρότερη κατά τη θερινή περίοδο του έτους, και 10° - 15° μεγαλύτερη κατά τη χειμερινή περίοδο του έτους.

Η συλλογή **διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας** επηρεάζεται μόνο από την απόλυτη τιμή της κλίσης του συλλέκτη και όχι από τη θέση του Ήλιου, δηλαδή την εποχή του έτους. Μεγαλύτερη απόσταση από το έδαφος σημαίνει αύξηση της διάχυτα ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά ταυτόχρονα μείωση της ακτινοβολίας που υφίσταται διάχυση στην ατμόσφαιρα. Αυτό μπορεί να γίνει σημαντικό σε περιοχές με υγρό κλίμα. Για παράδειγμα, σε ημέρες που υπάρχουν πολλά υδροσταγονίδια στην ατμόσφαιρα, οπότε αναμένεται αυξημένη διάχυση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα, η συλλογή διάχυτης ακτινοβολίας θα μεγιστοποιούνταν με κλίση του συλλέκτη κατά 10% - 15% μικρότερη του τοπικού γεωγραφικού πλάτους, με την οποία ο συλλέκτης προσανατολίζεται για περισσότερο χρόνο προς τον ουρανό.

1.6 Εφαρμογές εκμετάλλευσης ηλιακής ακτινοβολίας

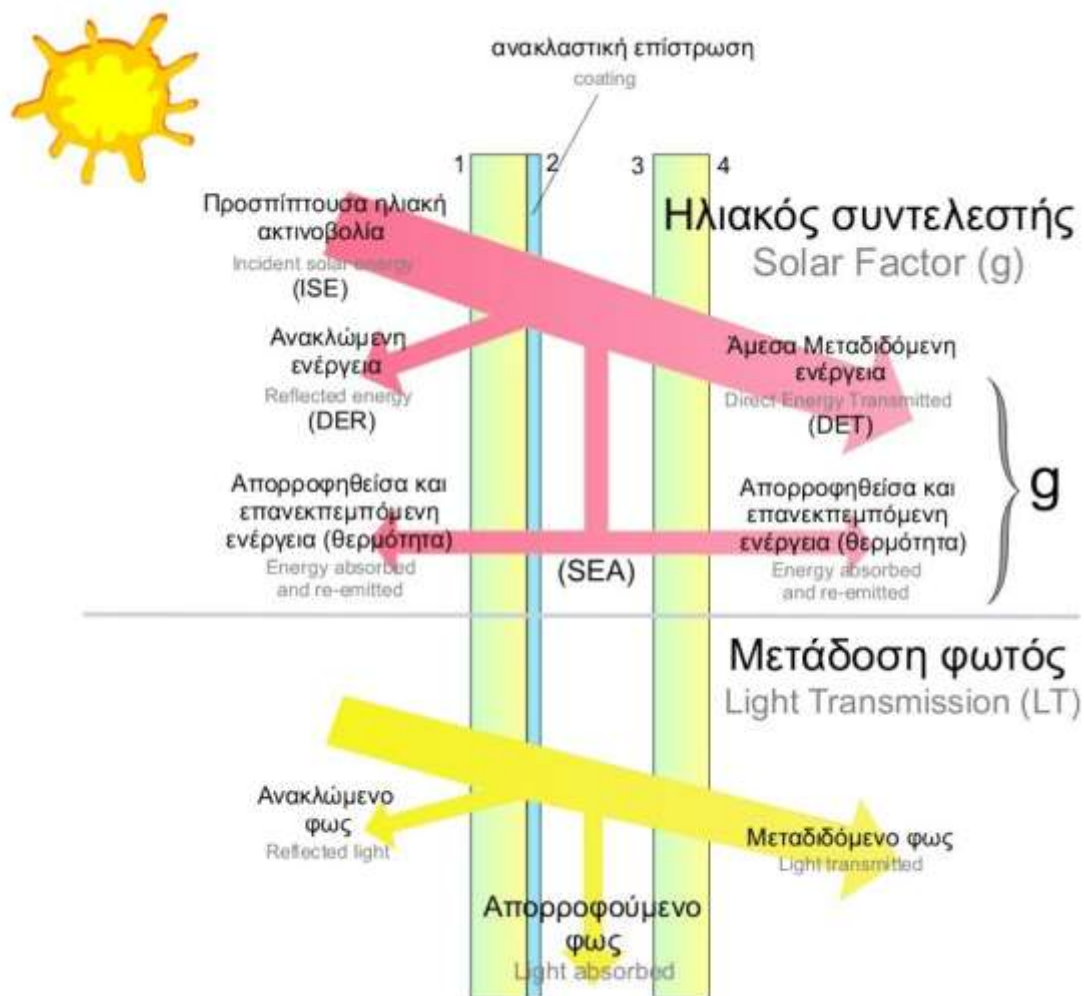
Υπάρχει πληθώρα εφαρμογών για την εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ένα παράδειγμα είναι ο σχεδιασμός ενός κτιρίου έτσι ώστε να εκμεταλλεύεται την ηλιακή ακτινοβολία για τη θέρμανσή του τους χειμερινούς

μήνες και να ελαχιστοποιεί την επίδρασή της κατά τη θερινή περίοδο. Η ύπαρξη παραθύρων μπορεί να συντελέσει σημαντικά στην θέρμανση ενός εσωτερικού χώρου, είτε άμεσα, μέσω της διέλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας, είτε έμμεσα, μέσω απορρόφησής της από το τζάμι.

Πιο συγκεκριμένα, όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια ενός υαλοπίνακα, κάποιο ποσοστό της ανακλάται πίσω προς την ατμόσφαιρα (ανακλαστικότητα r), ένα άλλο ποσοστό διέρχεται μέσα από τον υαλοπίνακα στο κτίριο (διαπερατότητα τ), ενώ ένα τρίτο ποσοστό απορροφάται από τον υαλοπίνακα (απορροφητικότητα α). Η ενέργεια που απορροφάται έχει σαν αποτέλεσμα τη θέρμανση του υαλοπίνακα και την εκπομπή από αυτόν υπέρυθρης ακτινοβολίας προς τον εξωτερικό (ε_1) αλλά και τον εσωτερικό χώρο (ε_2), συμβάλλοντας έτσι στη θέρμανση του εσωτερικού χώρου. Παράλληλα ο αέρας του εσωτερικού χώρου θερμαίνεται και από την απ' ευθείας επίδραση της διερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας.

Ο **συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους, g** , εκφράζει την ικανότητα του τζαμιού να αποκόπτει τα θερμικά κέρδη από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Η τιμή του δηλαδή εξαρτάται από τη συμπεριφορά του υαλοπίνακα ως προς τα τ και ε_2 . Παίρνει τιμές από 0 έως 1, με τις μεγαλύτερες τιμές να αντιστοιχούν σε χαμηλότερης ποιότητας μόνωση και το 0 να αντιστοιχεί σε υαλοπίνακες με μηδενική διαπερατότητα στην ηλιακή ακτινοβολία.

Ο τύπος υαλοπίνακα που θα χρησιμοποιηθεί σε ένα κτίριο είναι καλό να επιλέγεται ανάλογα με τη χρήση (κατοικία, επαγγελματικός χώρος, κλπ.) και το κλίμα της περιοχής, καθώς η θέρμανση ενός κτιρίου από τον Ήλιο είναι επιθυμητή κατά την ψυχρή εποχή του έτους, αλλά όχι κατά τη θερμή.



Σχήμα 10: Μετάδοση ηλιακής ακτινοβολίας μέσα από υαλοπίνακα. Πηγή:

http://www.prismaglass.gr/dat/prisma_storage/dat/67AEE251/news19.pdf

1.7 Πειραματικό μέρος

1.7.1 Σκοπός του πειράματος

Η άσκηση αυτή έχει ως σκοπό την εξοικείωση των φοιτητών με όργανα μέτρησης της ακτινοβολίας (πυρανόμετρο), καθώς και με τους υπολογισμούς που απαιτούνται για την εκτίμηση του ηλιακού δυναμικού μιας περιοχής. Επίσης οι φοιτητές θα κάνουν εκτίμηση της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας στη θέρμανση ενός εσωτερικού χώρου.

Για τις μετρήσεις θα χρησιμοποιηθεί ένα φορητό πυρανόμετρο (LP 471 PYRA 03.5, LP PYRA 03) συνδεδεμένο με ένα φορητό καταγραφικό (DO9847) 3 καναλιών. Το όργανο είναι τοποθετημένο σε ειδική βάση στήριξης, η οποία επιτρέπει τον έλεγχο της γωνίας κλίσης της. Το συγκεκριμένο πυρανόμετρο μπορεί να μετρήσει ολική ακτινοβολία έντασης από 0-2000 W/m² στην περιοχή μηκών κύματος μεταξύ 305nm – 2800nm.

Το πυρανόμετρο LP 471 PYRA 03.5 μετράει ολική ακτινοβολία μετρώντας την τάση (σε μV) στην έξοδο της θερμοπύλης. Η ευαισθησία του (συντελεστής βαθμονόμησης) μετριέται σε μV/(Wm⁻²), ενώ η ένταση της ακτινοβολίας I υπολογίζεται, σε W/m², βάσει της σχέσης:

$$I = \frac{\text{Τάση}}{\text{Ευαισθησία}}$$

Η μετατροπή γίνεται εσωτερικό από το όργανο. Πέραν των όσων έχουν αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες, απαραίτητη προϋπόθεση για τη λήψη σωστών μετρήσεων είναι η διατήρηση καθαρού του θόλου προστασίας του οργάνου.



(α)



(β)

Σχήμα 11: (α) Πυρανόμετρο LP 471 PYRA 03.5, LP PYRA 03 με βάση στήριξης και (β) καταγραφικό (DO9847)

1.7.2 Οδηγίες για την πραγματοποίηση του πειράματος

1. Τοποθετήστε το πυρανόμετρο σε οριζόντια θέση και με τη βοήθεια της πυξίδας στρέψτε το προς νότια κατεύθυνση. Η μαγνητική απόκλιση για την περιοχή μέτρησης να θεωρηθεί αμελητέα.
2. Συνδέστε το πυρανόμετρο με το καταγραφικό στην είσοδο C.
3. Ανοίξτε το καταγραφικό και καταγράψτε τη μέτρηση της ακτινοβολίας συναρτήσει της ώρας.
4. Διατηρώντας τον προσανατολισμό σταθερό, μεταβάλετε τη γωνία κλίσης του πυρανόμετρου ανά 10° , από 0° έως 90° και καταγράψτε τις αντίστοιχες τιμές ακτινοβολίας συναρτήσει του χρόνου μέτρησης. Σε ποια γωνία κλίσης μετρήθηκε η υψηλότερη τιμή ακτινοβολίας;
5. Για την τιμή κλίσης στην οποία παρατηρήθηκε η μέγιστη πρόσπτωση ακτινοβολίας, στρέψτε το πυρανόμετρο προς δέκα διαφορετικές κατευθύνσεις και καταγράψτε τις αντίστοιχες τιμές ακτινοβολίας. Σε

ποιον προσανατολισμό παρατηρείται η μέγιστη τιμή ακτινοβολίας και σε ποιον η ελάχιστη; Πώς το εξηγείτε αυτό;

6. Επαναλάβετε τη μέτρηση για $\beta=90^\circ$ και βόρειο, δυτικό και ανατολικό προσανατολισμό.

1.7.3 Ανάλυση – Επεξεργασία μετρήσεων

7. Να διαχωριστεί η ολική ακτινοβολία που μετρήσατε στην οριζόντια θέση στο βήμα (3) σε άμεση και διάχυτη. Για το σκοπό αυτό να χρησιμοποιήσετε τη θεωρία που αναγράφεται στις σημειώσεις σας (παρ. 1.3.3). Δίνεται η τιμή ηλιακής σταθεράς ίση με 1367 W/m^2 .

Συνάδουν τα αποτελέσματά σας με αυτά που αναμένατε;

8. Θεωρείστε ότι στο σημείο μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας βρίσκεται ένα παράθυρο κατακόρυφης διεύθυνσης και νότιου προσανατολισμού, με τιμή συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους ίση με 0,4. Να υπολογιστεί πόση από την ακτινοβολία που προσπίπτει επάνω στην επιφάνεια του τζαμιού θα διαπεράσει τελικά τον υαλοπίνακα του παραθύρου και θα εισέλθει στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου, συντελώντας στη θέρμανσή του.
9. Επαναλάβετε το βήμα (8) για παράθυρο με βόρειο, δυτικό και ανατολικό προσανατολισμό και συγκρίνετε τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

1.8 Βιβλιογραφικές αναφορές

- Heating and Cooling of Buildings, Revised Second Edition, J.F. Kreider, P.S. Curtiss, A. Rabl, CRC Press
- Meteorology Today, an introduction to weather, climate, and the environment, ninth edition, C.D. Ahrens, BROOKS/COLE

- Meteorology for scientists and engineers, second edition, R.B. Stull, BROOKS/COLE
- Εργαστηριακές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας, Ι.Κ. Καλδέλλης, Κ.Α. Καβαδίας, Εκδ. Αθ. Σταμούλης
- Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, Εκδ. Ζήτη
- Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Α.Α. Φλόκας, Εκδ. Ζήτη
- Σημειώσεις Ατμοσφαιρικής Τεχνολογίας, Α. Μπάης, Δ. Μελάς, Δ. Μπαλής, ΑΠΘ, 2011
- Σημειώσεις ΑΠΕ Ι Κεφ. 3, Δρ. Π. Αξαόπουλος