



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

ΣΚΙΑΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΠΑΠΑΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ Ι. ΠΑΝΤΕΛΕΗΜΟΝΑ

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Δέρβος

ΑΘΗΝΑ 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΣΚΙΑΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΠΑΠΑΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ Ι. ΠΑΝΤΕΛΕΗΜΟΝΑ

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Δέρβος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 10^η Απριλίου 2014

Κ. Δέρβος

Π. Βασιλείου

Η. Αβραμόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Copyright © Παντελεήμων Ι. Παπαχριστοδούλου 2014.

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών
Ε.Μ.Π.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας
εργασίας εξολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό.

Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη
κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης υπό την προϋπόθεση
να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.
Ερωτήματα που αφορούν την χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό
σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που αναφέρονται σε αυτό το έγγραφο
εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι
αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου
Πολυτεχνείου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ : ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία μελετά διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στην γη, και είναι αξιοποιήσιμη από φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Οι παράμετροι σχετίζονται τόσο με την ηλιακή γεωμετρία, όσο και με τις ιδιότητες της ηλιακής ακτινοβολίας καθεαυτής.

Πιο αναλυτικά, στο πρώτο κεφάλαιο, μελετήθηκε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο εν γένει. Δόθηκε έμφαση στις ιδιότητες των ημιαγωγών που επιτρέπουν την τέλεση του φαινομένου αυτού. Επίσης, περιγράφηκε η διάταξη και η επεξεργασία που κάνουν τα ημιαγωγά υλικά λειτουργικά και ικανά να παράγουν ηλεκτρική τάση από την πρόσπτωση του ηλιακού φωτός. Παρακάτω, έγινε μνεία στις ειδικές τεχνικές που χρησιμοποιεί η σύγχρονη τεχνολογία ώστε να βελτιστοποιήσει την αποδοτικότητα μιας φωτοβολταϊκής εφαρμογής.

Το δεύτερο κεφάλαιο ασχολείται με την ηλιακή γεωμετρία. Αναλύονται οι κινήσεις του ήλιου και της γης, και περιγράφεται το ειδικό σύστημα αναφοράς που θεωρεί ακίνητο έναν παρατηρητή στην επιφάνεια της γης. Ακολουθεί ορισμός των γεωμετρικών και άλλων μεγεθών και εξισώσεων που παράγουν τις ηλιακές συντεταγμένες για αυτό το σύστημα αναφοράς.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η ηλιακή ακτινοβολία, ο μηχανισμός δημιουργίας της, αλλά και οι αλληλεπιδράσεις με την ατμόσφαιρα της γης. Παρατίθενται δε, και ακριβείς τιμές της ισχύος αυτής της ακτινοβολίας, σε διάφορα στάδια.

Ακολούθως, το τέταρτο κεφάλαιο ασχολείται με την βέλτιστη διάταξη των φωτοβολταϊκών πλαισίων, μελετώντας παράγοντες που επηρεάζουν την διάταξη αυτή, όπως ο προσανατολισμός, η γωνία κλίσης, και η σχετική θέση των πλαισίων αναμεταξύ του. Στο κεφάλαιο περιλαμβάνεται και μια μελέτη των κινητών φωτοβολταϊκών πλαισίων και των τρόπων που αυτά βελτιώνουν της πρόσληψη ηλιακής ενέργειας.

Το πέμπτο κεφάλαιο ασχολείται με τα όργανα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας, τις αρχές λειτουργίας τους και τις εφαρμογές τους. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στο πιο διαδεδομένο και αξιόπιστο όργανο, το πυρανόμετρο.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο, μελετάται η κατάτμηση της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες συνιστώσες, όπως η διάχυτη και η συνιστώσα ευθείας δέσμης. Αφού μελετηθούν τα διάφορα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για τον σκοπό αυτό, εφαρμόζεται το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie και αναγράφονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ : Σκίαση φωτοβολταϊκού, διάχυτη ηλιακή συνιστώσα, συνιστώσα ευθείας δέσμης, ηλιακή γεωμετρία

CHAPTER ONE : ABSTRACT

This thesis examines various parameters affecting the amount of solar radiation that reaches the Earth , and is usable in photovoltaic applications . The parameters are associated with both solar geometry and the properties of the solar radiation itself.

Solar geometry is the geometric relationships defined by relative motion of the sun with the earth. This paper clarifies the encoding sizes of this motion, through the solar coordinates (azimuth and altitude sun) in the celestial sphere . Emphasis is placed on various parameters affecting these coordinates , whether they relate to space, such as latitude , solar differential etc. , either concerning the time as angle of the day , local time , etc.

Moreover , the solar radiation is considered from its birth in the core of the sun until it reaches the earth's surface . Forward, all mechanisms that affect the amount of solar radiation during the trip are examined, whether they concern the dissemination of energy in a vacuum, or the interaction of solar energy with the Earth's atmosphere , through phenomena such as refraction, diffusion and reflection.

Having data on solar radiation , it is considered the best way to setup a solar panel to maximize the reception of solar energy . Diagrams and calculations are provided to quantify more precisely the effects of various factors affecting this way.

Additionally , emphasis was given to the separation of solar radiation on certain components (diffuse, direct beam) . To this end, the model of Erbs-Klein-Duffie is applied, on solar radiation measurements taken from the file measurements of photovoltaic laboratory of NTUA, and the results were plotted and evaluated .

KEYWORDS : shading of photovoltaic panel, diffuse component, direct beam, solar geometry

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο και τεχνολογίες φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	13
1.1. Εισαγωγή.....	13
1.2. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	13
1.2.1 Ημιαγωγοί.....	13
1.2.2 Δημιουργία ηλεκτρικά φορτισμένων ημιαγωγών.....	17
1.2.3 Επίδραση φωτός.....	21
1.3. Ιστορική αναδρομή.....	22
1.4 Υλικά και τεχνολογίες κατασκευής φωτοβολταϊκών.....	23
1.4.1. Φωτοβολταϊκά μεγάλου πάχους.....	23
1.4.1.1. Μονοκρυσταλλικά.....	23
1.4.1.2. Πολυκρυσταλλικά.....	24
1.4.1.3. Ταινίας πυριτίου.....	25
1.4.2 Λεπτών υμενίων.....	26
1.4.2.1. Άμορφου πυριτίου.....	27
1.4.2.2. Τελουριούχου Κάδμιου.....	28
1.4.2.3. Αρσενικούχου Γαλλίου.....	29
1.4.2.4. Δισεληνιούχου Ινδιούχου Χαλκού.....	29
1.4.3. Υβριδικά φωτοβολταϊκά.....	30
1.4.4. Άλλες τεχνολογίες.....	31
1.4.4.1. Νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου.....	31
1.4.4.2. Οργανικά πολυμερή στοιχεία.....	31
1.4.4.3. Φωτοβολταϊκά φτιαγμένα από περοβσκήτη.....	32
2. Γεωμετρία ήλιου-γης.....	33
2.1. Εισαγωγή.....	33
2.2. Ήλιος.....	33

2.3. Γη.....	34
2.4. Γεωμετρία ήλιου-γης.....	35
2.4.1. Σύστημα αναφοράς.....	35
2.4.2. Συντεταγμένες στην ουράνια σφαίρα.....	38
2.4.3. Ηλιακή ώρα.....	39
2.4.4. Ηλιακή απόκλιση δ	41
2.4.5. Γωνία ώρας ω	42
2.4.6. Προσδιορισμός της θέσης του ήλιου.....	42
3. Ηλιακή ακτινοβολία.....	45
3.1. Εισαγωγή.....	45
3.2. Δημιουργία ηλιακής ακτινοβολίας.....	45
3.3. Ληηφθείσα ακτινοβολία στην γη.....	46
3.4. Ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα.....	48
3.4.1 Μηχανισμοί εξασθένησης.....	48
3.4.2. Αέρια μαζα.....	49
4. Προσλαμβανόμενη ακτινοβολία από φωτοβολταϊκό πλαίσιο.....	53
4.1.Εισαγωγή.....	53
4.2. Σταθερά φωτοβολταϊκά πλαίσια.....	53
4.2.1. Προσανατολισμός.....	53
4.2.2. Γωνία κλίσης.....	54
4.2.3. Σχετική θέση των πλαισίων μεταξύ τους.....	54
4.3. Μη σταθερά φωτοβολταϊκά πλαίσια.....	67
4.3.1. Φωτοβολταϊκά πλαίσια με εποχιακή κλίση.....	67
4.3.2. Ηλιακοί ιχνηλάτες.....	69
4.3.2.1. Περιστροφή γύρω από έναν άξονα.....	70
4.3.2.1.1. Ηλιακοί χνηλάτες οριζοντίου άξονα.....	70
4.3.2.1.2.Αζιμουθιακοί ιχνηλάτες.....	71
4.3.2.1.3. Ιχνηλάτες κεκλιμένου άξονα περιστροφής.....	71

. 4.3.2.2. Περιστροφή σε 2 άξονες.....	72
5. Μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας.....	75
5.1. Εισαγωγή.....	75
5.2. Πυρανόμετρο.....	77
5.3. Πυρηλιόμετρο.....	78
5.4. Καταγραφικό <i>Campbell-Strokes</i>	80
6. Καθορισμός των συνιστωσών της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω της μεθόδου <i>Erbss-Klein-Duffie</i>	83
6.1. Εισαγωγή.....	83
6.2. Οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας.....	83
6.3. Μοντέλα διαχωρισμού της ηλιακής ακτινοβολίας.....	85
6.3.1. Παραμετρικά μοντέλα.....	85
6.3.2. Μοντέλα κατάτμησης.....	86
6.4. Μοντέλο <i>Erbss-Klein-Duffie</i>	87
6.5. Εφαρμογή του μοντέλου <i>Erbss-Klein-Duffie</i> και συμπεράσματα.....	90
6.6. Μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την 11 ^η Απριλίου 2013.....	103
6.6.1. Γενικά.....	103
6.6.2. Πυρανόμετρο <i>Kipp&Zonen SP Lite</i>	103
6.6.3. Περιγραφή της διαδικασίας.....	104
6.6.4. Διαγράμματα και συμπεράσματα.....	105
Βιβλιογραφία.....	109

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ : ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΣΙΩΝ

1.1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στον παρόν κεφάλαιο καταρχήν αναλύεται η αρχή λειτουργίας του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Για να γίνει αυτό, είναι αναγκαίο να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στους ημιαγωγούς και τις ξεχωριστές ιδιότητές τους όσον αφορά την ηλεκτραγωγιμότητα και την επίδραση με το φως, που τους καθιστούν τα κατάλληλα υλικά για τις φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Κατόπιν, και αφού το φωτοβολταϊκό φαινόμενο έχει θεμελιωθεί θεωρητικά, παρατίθεται μια σύντομη αναφορά στην εξέλιξη της μελέτης του φαινομένου από την ανακάλυψή του έως σήμερα. Τέλος, το κεφάλαιο κλείνει με μια επισκόπηση των διαφορετικών υλικών και τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται σήμερα στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές.

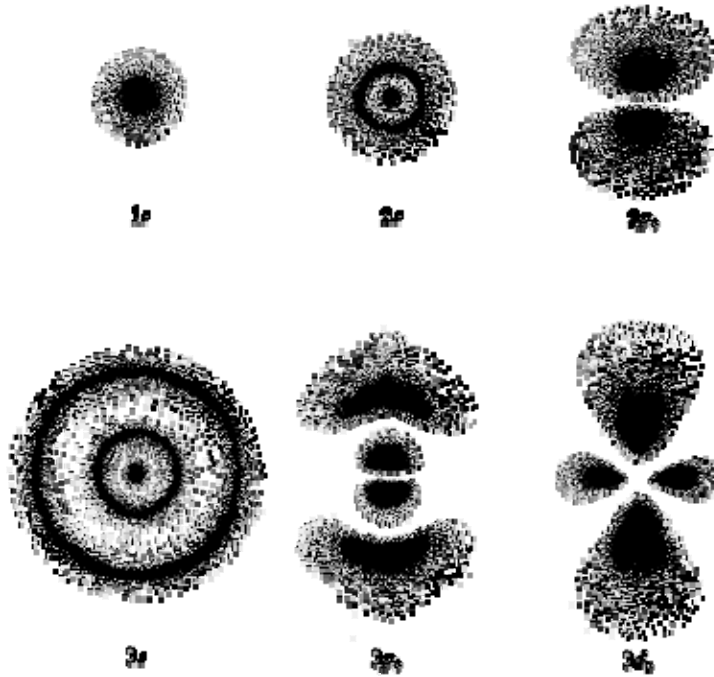
1.2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

1.2.1. Ημιαγωγοί

Ημιαγωγός είναι κάθε υλικό που έχει ειδική αντίσταση με τιμές ανάμεσα σε αυτές των μονωτών (μεγάλη) και των αγωγών (μικρή) και που εμφανίζει ραγδαία μείωση της ειδικής του αντίστασης με την αύξηση της θερμοκρασίας του. Συνήθως οι ημιαγωγοί στην καθαρή κρυσταλλική δομή τους είναι αμιγώς μονωτές, αλλά κάτω από ειδικές συνθήκες, ή και μέσω προσμίξεων, λειτουργούν ως καλοί αγωγοί του ηλεκτρικού ρεύματος. Για να γίνουν κατανοήτες οι ιδιότητες των ημιαγωγών, θα πρέπει να εξεταστούν σε υποατομική κλίμακα και υπό το πρίσμα της κβαντομηχανικής.

Σύμφωνα με αυτή την θεωρία, ένα ηλεκτρόνιο που περιφέρεται γύρω από ένα πυρήνα, έχει συγκεκριμένες πιθανότητες να βρίσκεται σε συγκεκριμένες περιοχές του χώρου. Οι πιθανότητες αυτές υπολογίζονται μέσω της εξίσωσης Schrodinger, απ' την οποία προκύπτουν σαν λύσεις ένα σύνολο κυματοσυναρτήσεων, κάθε μια από τις οποίες αντιστοιχεί σε διαφορετική ενεργειακή κατάσταση για κάποιο ηλεκτρόνιο. Η

κυματοσυνάρτηση που περιγράφει την πιθανότητα του ηλεκτρονίου να βρεθεί κάπου, αποτελεί το τροχιακό του. Τα τροχιακά έχουν συγκεκριμένες αναπαραστάσεις στον τρισδιάστατο χώρο.

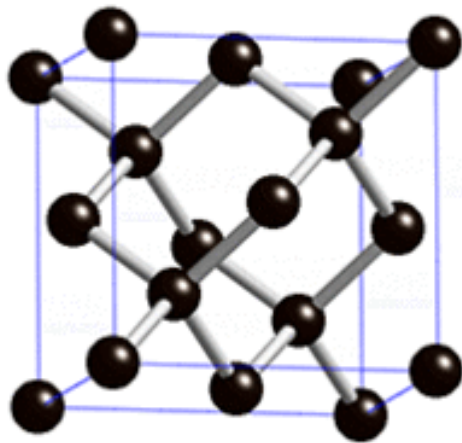


Εικ. 1.1 : Εικόνες τροχιακών

Στην εικόνα 1.1, παρατίθενται ενδεικτικά κάποιες αναπαραστάσεις τροχιακών, όπως αυτές προκύπτουν από την λύση της εξίσωσης Schrodinger. Οι αναπαραστάσεις αυτές οπτικοποιούν πιθανότητες. Αυτό σημαίνει ότι περιοχές όπου είναι έντονα μαυρισμένες παριστάνουν τα σημεία του χώρου όπου το ηλεκτρόνιο είναι πιο πιθανό να βρεθεί, ενώ αντίστροφα, στις περιοχές όπου η συγκέντρωση των μαύρων τελειών είναι πιο αραιή, μειώνεται αντίστοιχα και η πιθανότητα ύπαρξης του ηλεκτρονίου εκεί.

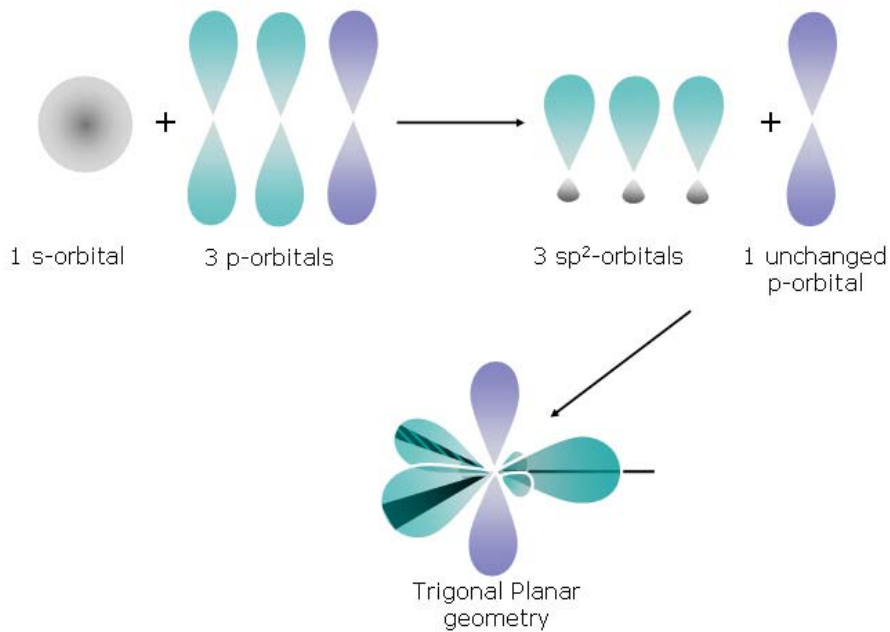
Κάθε ηλεκτρόνιο έχει συγκεκριμένο τροχιακό το οποίο καθορίζει πλήρως την ενέργειά του, η οποία είναι κβαντισμένο μέγεθος και παίρνει διακριτές τιμές. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν ορισμένες μόνο ενεργειακές καταστάσεις, οι οποίες μπορούν να καταληφθούν από συγκεκριμένο αριθμό ηλεκτρονίων. Έτσι, στα ελεύθερα άτομα, τα ηλεκτρόνια καταλαμβάνουν πρώτα τα τροχιακά ελάχιστης ενέργειας στην

εσωτερική στιβάδα, και κατόπιν συμπληρώνουν τις επόμενες διαθέσιμες ενεργειακές καταστάσεις, καταλαμβάνοντας τροχιακά εξωτερικών και πιο απομακρυσμένων από τον πυρήνα στιβάδων. Τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στιβάδας, που ονομάζονται και ηλεκτρόνια σθένους, έχουν καθοριστικό ρόλο στην διαμόρφωση των χημικών ιδιοτήτων των στοιχείων. Τα ελεύθερα άτομα έχουν την τάση να συμπληρώνουν την εξωτερική τους στιβάδα ώστε να περιέλθουν σε κατάσταση σταθερότητας και ελάχιστης ενέργειας. Έτσι, ανάλογα με τον αριθμό των ηλεκτρονίων σθένους, ένα άτομο είτε δίνει, είτε παίρνει, είτε μοιράζεται ηλεκτρόνια. Εκεί οφείλεται η δημιουργία κρυσταλλικής δομής σε ένα ημιαγωγό, καθώς πολλά ελεύθερα άτομα συγκροτούνται κατάλληλα και μοιράζονται τα ηλεκτρόνια σθένους τους, μέσω αυτής της δομής.



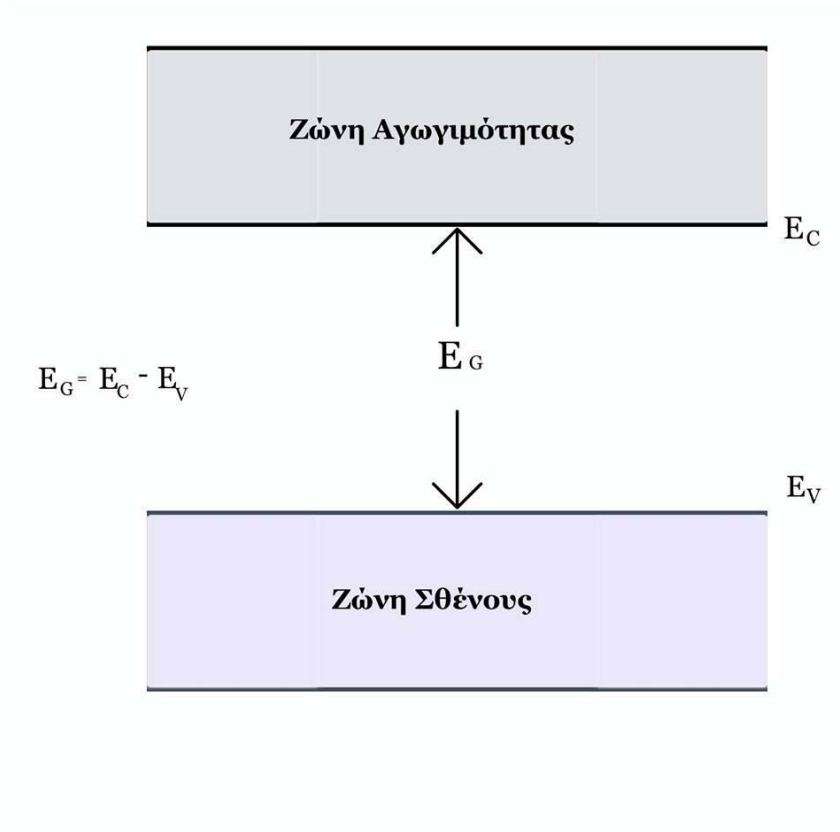
Εικ. 1.2 : Κρυσταλλική δομή ημιαγωγού

Θεωρούμε τώρα την περίπτωση όπου ελεύθερα άτομα συγκροτούνται για να σχηματίσουν ένα κρυσταλλικό στερεό. Όσο η απόσταση μεταξύ των γειτονικών πυρήνων μικραίνει, τα τροχιακά των ηλεκτρονίων σθένους του ενός ατόμου επικαλύπτουν τα αντίστοιχα του άλλου. Η επικάλυψη των τροχιακών τα διαταράσσει ενεργειακά. Οι αρχικές στάθμες ενέργειας χάνουν το νόημα τους και σχηματίζονται νέα τροχιακά, που επίσης αντιστοιχούν σε διακριτές ενεργειακές καταστάσεις των ηλεκτρονίων. Το φαινόμενο ονομάζεται υβριδισμός.



Εικ. 1.3 : Υβριδικά τροχιακά

Αν η απόσταση μεταξύ των πυρήνων των ατόμων ενός στερεού μικρύνει κι άλλο, η έντονη επικάλυψη των τροχιακών διαφορετικών ατόμων σε συνδυασμό με τον κβαντισμό των ενεργειακών καταστάσεων, δημιουργεί ζώνες όπου τα ηλεκτρόνια μέσα τους έχουν συγκεκριμένη ενέργεια .Δημιουργείται έτσι μια ζώνη ενεργειακά κατώτερη, όπου τα ηλεκτρόνια έχουν χαμηλή ενέργεια και έχουν συμπληρώσει όλες τις διαθέσιμες ενεργειακές στάθμες. Η ζώνη αυτή ονομάζεται **ζώνη σθένους**. Σ αυτή την ζώνη τα ηλεκτρόνια συμμετέχουν στον σχηματισμό των χημικών δεσμών μεταξύ των ατόμων προς δημιουργία της κρυσταλλικής δομής. Παράλληλα δημιουργείται μια ζώνη ανώτερης ενέργειας με ηλεκτρόνια ελεύθερα κινούμενα στον κρύσταλλο. Τα ηλεκτρόνια της ζώνης αυτής είναι αυτά που συμμετέχουν στην δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος, για αυτό και η ζώνη λέγεται **ζώνη αγωγιμότητας**.



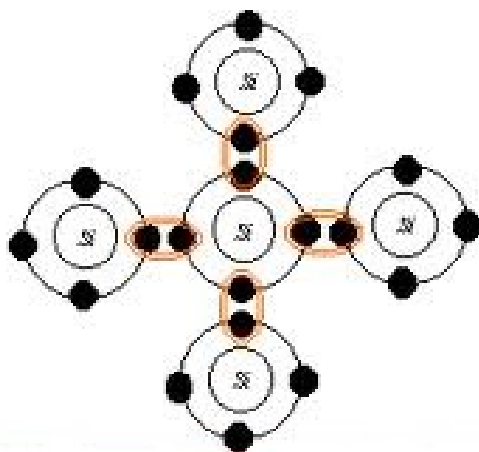
Εικ. 1.4 : Ενεργειακές ζώνες

Παρατηρούμε ότι οι ενεργειακές στάθμες των ηλεκτρονίων κατατάσσονται είτε στην ζώνη αγωγιμότητας είτε στην ζώνη σθένους μέσω της διάκρισης που δημιουργεί το απαγορευμένο διάκενο. Οι τιμές ενέργειας που αντιστοιχούν σ' αυτή την περιοχή δεν προκύπτουν ως λύσεις της εξίσωσης Schrodinger και άρα είναι αδύνατο για τα ηλεκτρόνια να τις έχουν.

1.2.2. Δημιουργία ηλεκτρικά φορτισμένων ημιαγωγών

Σε κανονικές θερμοκρασίες, το κρυσταλλικό πλέγμα που σχηματίζουν οι ημιαγωγοί δρα ως κανονικός μονωτής, και αυτό γιατί τα άτομα έχουν συμπληρωμένη την εξωτερική τους στιβάδα, επομένως, δεν υπάρχουν διαθέσιμα ηλεκτρόνια για την δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος. Για παράδειγμα ας θεωρήσουμε άτομα πυρίτιου Si. Το πυρίτιο είναι ο κυριότερος ημιαγωγός και χρησιμοποιείται ευρέως στις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις. Το πυρίτιο έχει ατομικό αριθμό 14, που σημαίνει ότι

ένα μεμονωμένο άτομο πυριτίου έχει 14 ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά κατανέμονται στις διάφορες στιβάδες, συμπληρώνοντας, κατά τα γνωστά, πρώτα τις στιβάδες χαμηλής ενέργειας και κατόπιν αυτές που είναι περισσότερο απομακρυσμένες από τον πυρήνα και απαιτούν υψηλότερη ενέργεια. Έτσι, οι πρώτες δύο στιβάδες, που απαιτούν 2 και 8 ηλεκτρόνια αντίστοιχα είναι πλήρως συμπληρωμένες, και περισσεύουν 4 ηλεκτρόνια για να καταλάβουν θέσεις της τρίτης στιβάδας, η οποία χρειάζεται 8 ηλεκτρόνια για να συμπληρωθεί. Συνεπώς, ένα μεμονωμένο άτομο πυριτίου έχει ανάγκη από 4 ηλεκτρόνια για να περιέλθει σε σταθερή κατάσταση χαμηλής ενέργειας. Γι' αυτό τον λόγο, πολλά άτομα πυριτίου, όταν βρεθούν μαζί, σχηματίζουν την χαρακτηριστική κρυσταλλική δομή, συγκροτούμενα με τέτοιο τρόπο ώστε καθένα άτομο να συνδέεται με τέσσερα γειτονικά και να μοιράζεται από ένα ηλεκτρόνιο μαζί τους.

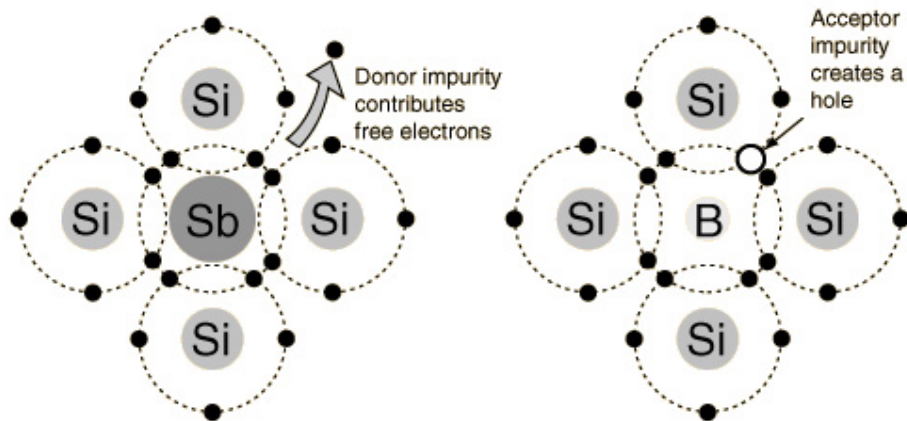


Εικ 1.5 : Ομοιοπολικοί δεσμοί στον κρύσταλλο πυριτίου

Καθώς η εξωτερική στιβάδα του καθενός ατόμου στην κρυσταλλική δομή πυριτίου είναι συμπληρωμένη, το υλικό δεν είναι ηλεκτρικά αγωγίμο. Οι ηλεκτραγώγιμες ιδιότητες του κρυσταλλικού πυριτίου δημιουργούνται με τεχνητό τρόπο, και για την ακρίβεια με κατάλληλες προσμίξεις.

Ας φανταστούμε, για παράδειγμα, ότι στο καθαρό πυρίτιο προσθέτουμε μια ορισμένη ποσότητα ατόμων φωσφόρου. Ο φώσφορος έχει επίσης ασυμπλήρωτη την εξωτερική στιβάδα του, μόνο που έχει 5 ηλεκτρόνια σθένους. Όταν άτομα φωσφόρου προστεθούν στην κρυσταλλική δομή του πυριτίου, συμμετέχουν κι αυτά στην δομή αυτή, σχηματίζοντας δεσμούς με τα γειτονικά άτομα πυριτίου. Κάθε άτομο φωσφόρου μοιράζεται 4 ηλεκτρόνια σθένους με τα γειτονικά άτομα πυριτίου. Όμως, περισσεύει ένα ηλεκτρόνιο σθένους το οποίο δεν μοιράζεται με κάποιο άτομο πυριτίου. Το συγκεκριμένο ηλεκτρόνιο έλκεται από τον πυρήνα του φωσφόρου μέσω δυνάμεων coulomb. Η δύναμη αυτή δεν είναι αρκετά ισχυρή, με συνέπεια, όταν διοχετεύεται στην διάταξη ένα ποσό ενέργειας (που δεν είναι απαραίτητα πολύ μεγάλο) , με την μορφή θερμότητας για παράδειγμα, το ηλεκτρόνιο να ελευθερώνεται από την ελκτική δύναμη του πυρήνα και να κινείται ελεύθερο στον κρύσταλλο. Ως εκ τούτου, στο υλικό αυτό υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια, ικανά να λειτουργήσουν ως φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος. Η συγκεκριμένη ιδιότητα επιτυγχάνεται και με άλλα στοιχεία που έχουν 5 άτομα στην εξωτερική στιβάδα, όπως το αρσενικό As ή το αντιμόνιο Sb. Οι αγωγοί που δημιουργούνται με αυτό τον τρόπο ονομάζονται αγωγοί τύπου-N, (εκ του negative, λόγω της αρνητικής φόρτισης).

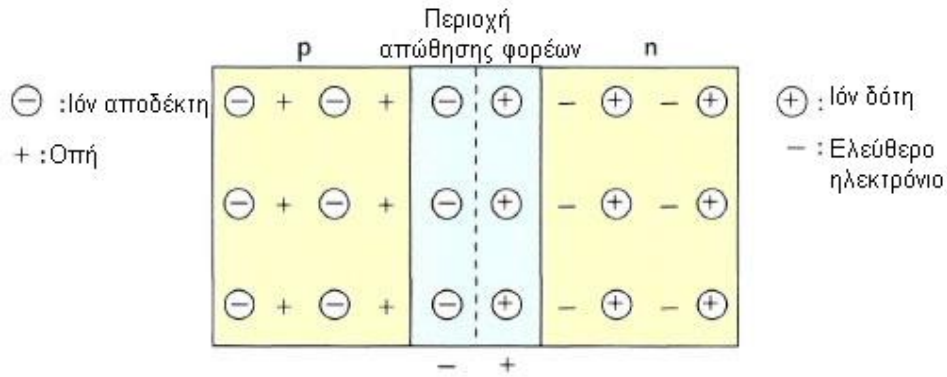
Αντίστοιχα, μπορούμε να δημιουργήσουμε κρυσταλλικό πυρίτιο με θετική φόρτιση, προσθέτοντας στο καθαρό πυρίτιο άτομα κάποιου τρισθενούς στοιχείου. Ας πάρουμε για παράδειγμα το στοιχείο βόρειο Β. Το στοιχείο αυτό έχει τρία ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στιβάδα. Όταν αναμιχθεί με άτομα πυριτίου, συμμετέχει στην κρυσταλλική δομή του, μοιραζόμενο τα τρία ηλεκτρόνια σθένους του. Όμως, για να δημιουργηθεί η κρυσταλλική δομή απαιτούνται 4 ηλεκτρόνια, ενώ το βόρειο προσφέρει μόλις τρία. Συνεπώς, μια θέση μένει κενή, επιτελώντας στην δημιουργία μια θετικής οπής. Σχηματίζεται έτσι ένα υλικό που υπολείπεται κάποιων ηλεκτρονίων, και άρα είναι δεκτικό σε ηλεκτρικό ρεύμα. Οι αγωγοί αυτού του τύπου ονομάζονται αγωγοί τύπου-P (εκ του positive). Αγωγοί τύπου-P σχηματίζονται επίσης εάν προσμιχθούν στο πυρίτιο άτομα γάλλιου Ga ή ίνδιου In.



Εικ. 1.6 : Ομοιοπολικοί δεσμοί στον κρύσταλλο πυριτίου με προσμίξεις. Αριστερά : Πυρίτιο με Αντιμόνιο προς δημιουργία αγωγού τύπου-n. Δεξιά : Πυρίτιο με Βόρειο προς δημιουργία αγωγού τύπου-p.

Σημειώνεται ότι οι διάφορες προσμίξεις πρέπει να συμμετέχουν στην κρυσταλλική δομή του πυριτίου καταλαμβάνοντας τις ίδιες σχετικές θέσεις στο πλέγμα, με αυτές που θα καταλάμβαναν τα άτομα του πυριτίου. Για τον λόγο αυτό, τα στοιχεία που λειτουργούν ως δότες ή αποδέκτες ηλεκτρονίων πέπει να έχουν παραπλήσια ατομική ακτίνα με το άτομο του στοιχείου Si.

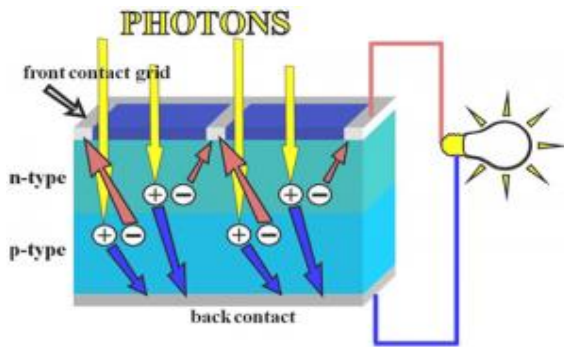
Για την δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός ηλεκτρικού πεδίου. Το πεδίο αυτό, όσον αφορά τους ημιαγωγούς πυριτίου, δημιουργείται φέρνοντας κοντά πυρίτιο τύπου-P με πυρίτιο τύπου-N. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του πυριτίου τύπου-N έλκονται από τις θετικές οπές του πυριτίου τύπου-P. Και αντιστοίχως, οι ελεύθερες οπές του πυριτίου τύπου-P διαχέονται προς το πυρίτιο τύπου-N. Με αυτό τον τρόπο, στην περιοχή που τα δύο διαφορετικού τύπου πυρίτια γειτνιάζουν, έχουμε περίσσεια αρνητικών ηλεκτρικών φορέων από την μία πλευρά και περίσσεια θετικών ηλεκτρικών φορέων από την άλλη. Συνεπώς, στην ενδιάμεση περιοχή, η οποία καλείται περιοχή απογύμνωσης, δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο, που επιτρέπει την κίνηση ηλεκτρονίων μόνο προς μία κατεύθυνση.



Εικ. 1.7 : Κατανομή ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών

1.2.3. Επίδραση φωτός

Ως γνωστόν το φως μεταδίδεται με την μορφή μικρών πακέτων ενέργειας που λέγονται φωτόνια. Όταν το φως πέφτει σε μια δίοδο p-n, όπως η διάταξη που περιγράφηκε ανωτέρω, ορισμένα φωτόνια απορροφούνται από τα άτομα, προσδίδοντας επιπλέον ενέργεια σε ηλεκτρόνια. Τα διεγερθέντα ηλεκτρόνια που ανήκουν στο ημιαγωγό τύπου-p κινούνται τελικώς προς την ζώνη απογύμνωσης, την οποία και διασχίζουν λόγω του υπάρχοντος πεδίου εκεί, και καταλήγουν στην περιοχή του ημιαγωγού τύπου-n. Με αυτό τον τρόπο καθίσταται περίσσεια ηλεκτρονίων στην περιοχή τύπου-n, και τα ηλεκτρόνια αυτά δύνανται να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος αν τοποθετηθούν ηλεκτρόδια στις πλευρές των ημιαγωγών τύπου-p και τύπου-n ώστε να υπάρξει κλειστός αγωγίμος δρόμος. Το ρεύμα αυτό είναι και το εκμεταλλεύσιμο μέσω φωτοβολταϊκού φαινομένου.



Εικ 1.8 : Δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος λόγω φωτοβολταϊκού φαινομένου

Διευκρινίζεται ότι η δημιουργία ρεύματος διαρκεί όσο χρονικό διάστημα η διάταξη δέχεται φως και μόνο, για λόγους που γίνονται εύκολα κατανοητοί σύμφωνα με τα παραπάνω.

1.3. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η πρώτη καταγραφή του φωτοβολταϊκού φαινομένου έγινε το 1839, όταν ο Γάλλος φυσικός Edmond Becquerel ανακάλυψε τυχαία σε κάποια πειράματά του, την δημιουργία τάσης σε μια ηλεκτρολυτική επαφή φτιαγμένη από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια. Το επόμενο σημαντικό βήμα επετεύχθη στα 1876, όταν ο Adams και ο φοιτητής του Day, παρατήρησαν μια παραγόμενη ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος όταν μια πλάκα σεληνίου εκτιθόταν στο ηλιακό φως. Την επόμενη χρονιά, ο Willoughby Smith βοήθησε στην κατασκευή του πρώτου φωτοβολταϊκού κελίου από σελήνιο.

Ο μελετητής που επεξήγησε εμπειριστικά το φωτοβολταϊκό φαινόμενο δεν ήταν άλλος από τον Albert Einstein, ο οποίος περιέγραψε το φαινόμενο το 1904, και ακολούθως τιμήθηκε με βραβείο νόμπελ για αυτή του την εργασία, το 1921. Το 1918, ο Πολωνός φυσικός Czochralski παρέθεσε την μέθοδο παραγωγής ημιαγωγού μονοκρυσταλλικού πυριτίου, μια μέθοδος που χρησιμοποιείται βελτιστοποιημένη ακόμη και σήμερα. Ένα σημαντικό βήμα στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών εφαρμογών έγινε από τους Mott και Schottky, οι οποίοι το 1849 ανέπτυξαν την θεωρία την διόδου σταθερής κατάστασης. Το πρώτο ηλιακό κελί ήταν γεγονός το 1854 στα εργαστήρια της εταιρείας Bell, και χρωστά την ύπαρξή του στους Charin, Fuller και Pearson. Τα επόμενα χρόνια, φωτοβολταϊκά πάνελ προσαρμόστηκαν σε

δορυφόρους ώστε να τους παρέχουν ενέργεια κατευθείαν από τον ήλιο, ενώ κατά την δεκαετία του 1960 φωτοβολταϊκά συστήματα εγκαθίστανται πλέον και στην γη σε διάφορες χώρες, αρχής γενομένης από την Ιαπωνία και τις Η.Π.Α. Έκτοτε, η τεχνολογία αναπτύχθηκε περαιτέρω με αποτέλεσμα τόσο την αύξηση της απόδοσης όσο και την μείωση του κόστους τους, με συνέπεια τα φωτοβολταϊκά συστήματα να είναι πλέον προσιτά και ευρέως διαδεδομένα στην αγορά.

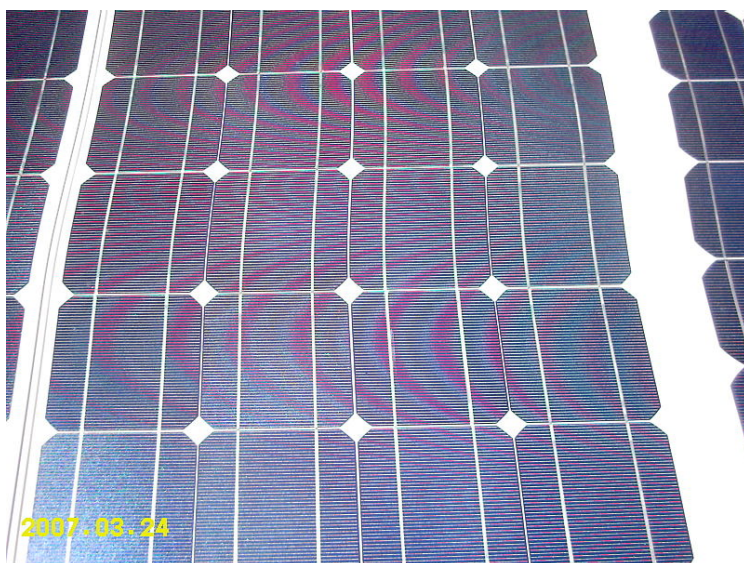
1.4. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή φωτοβολταϊκών πλαισίων ποικίλλουν ανάλογα με τις διάφορες τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί. Κάθε υλικό έχει τα δικά του χαρακτηριστικά, διαφέρει τόσο ως προς την απόδοση όσο και ως προς το κόστος, και προσφέρει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι κύριες κατηγορίες στις οποίες μπορούν να κατανεμηθούν τα διαφορετικά υλικά είναι δύο, και αφορούν τα φωτοβολταϊκά μεγάλου πάχους και τα φωτοβολταϊκά λεπτών επιστρώσεων, χωρίς να σημαίνει ότι δεν υπάρχουν και τεχνικές που δεν εντάσσονται σε καμία από αυτές τις δύο κατηγορίες.

1.4.1. Φωτοβολταϊκά μεγάλου πάχους

1.4.1.1. Μονοκρυσταλλικά

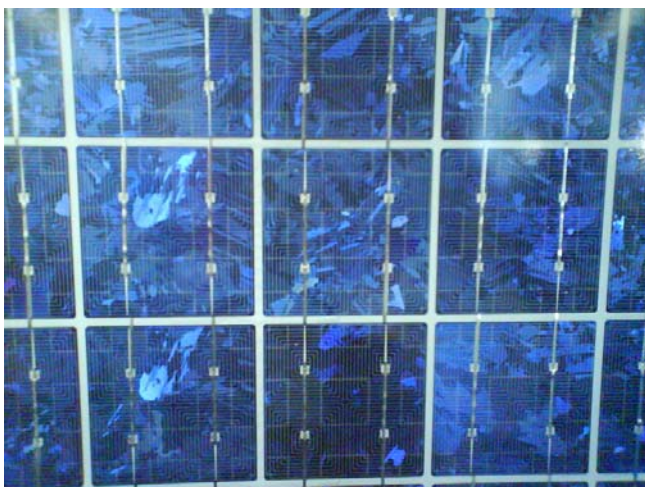
Τα φωτοβολταϊκά κελιά αυτού του είδους έχουν απόδοση που κυμαίνεται από 15% έως 18% για το πλαίσιο. Το πάχος τους είναι περίπου 0,3mm. Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κελιά έχουν μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα από τα πολυκρυσταλλικά, δηλαδή η σχέση της απόδοσης με την επιφάνεια είναι συμφέρουσα. Απ' την άλλη, έχουν αυξημένο κόστος σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά. Η απόδοσή τους επηρεάζεται αρνητικά σε σημαντικό βαθμό όταν πρόκειται για χαμηλές ή υψηλές τιμές θερμοκρασίας ή ηλιακής ακτινοβολίας. Παρολαυτά, η κατασκευή τους είναι αρκετά ανθεκτική ώστε η απόδοση να μην επηρεάζεται δραματικά με την πάροδο του χρόνου. Βασικές μέθοδοι παρασκευής τους είναι η μέθοδος CZ (Czochralski), που αναφέρθηκε και στην παράγραφο [] και η μέθοδος FZ (float zone). Αξίζει να σημειωθεί ότι εργαστηριακά έχει επιτευχθεί κελί μονοκρυσταλλικού πυριτίου με απόδοση που αγγίζει το 25%.



Εικ. 1.9 : Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο

1.4.1.2. Πολυκρυσταλλικά

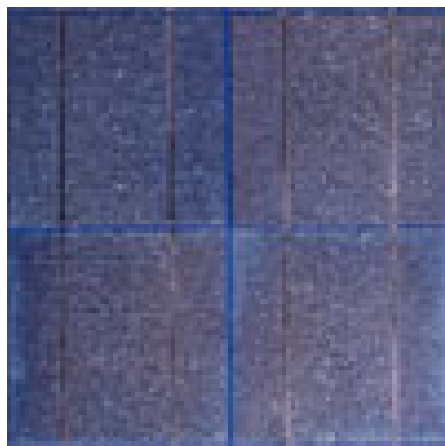
Το πάχος τους είναι, όπως και στα μονοκρυσταλλικά, περίπου 0,3mm. Αποτελούνται κατά τμήματα από μονοκρυσταλλικές περιοχές, διακριτές από γυμνό οφθαλμό. Όσο μεγαλύτερες είναι αυτές οι περιοχές, τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση του κελιού. Σε εργαστηριακές συνθήκες έχουν δημιουργηθεί πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πλαίσια με απόδοση που προσεγγίζει το 20%, αλλά τα πλαίσια που κυκλοφορούν στο εμπόριο έχουν απόδοση που κυμαίνεται μεταξύ 13% και 15%. Η διαδικασία κατασκευής αυτού του είδους πλαισίων είναι φθηνότερη από των μονοκρυσταλλικών, γι αυτό και η τιμή τους είναι κατά κανόνα χαμηλότερη. Η απόδοσή τους, όπως και στα μονοκρυσταλλικά πλαίσια, ελαττώνεται κατά πολύ για ακραίες τιμές θερμοκρασίας και ηλιοφάνειας. Επιπλέον, η πάροδος του χρόνου επιδρά αρνητικά στην απόδοση, κάτι που μειώνει την διάρκεια ζωής τους.



Εικ.1.10 : Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο

1.4.1.3. Ταινίας πυριτίου

Η συγκεκριμένη τεχνολογία φωτοβολταϊκών είναι σχετικά πρόσφατη και αναπτύσσεται από την εταιρεία Evergreen Solar. Το πάχος της ταινίας είναι περίπου 0,3mm, αλλά η χρήση πυριτίου μπορεί εν δυνάμει να μειωθεί έως και 50% ε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνολογίες φωτοβολταϊκών κυψελών πυριτίου μεγάλου πάχους. Η απόδοσή τους, όσον αφορά τις ταινίες που κυκλοφορούν στο εμπόριο, προσεγγίζει το 13%, ενώ εργαστηριακά έχουν επιτευχθεί αποδόσεις που κυμαίνονται στο 18%.

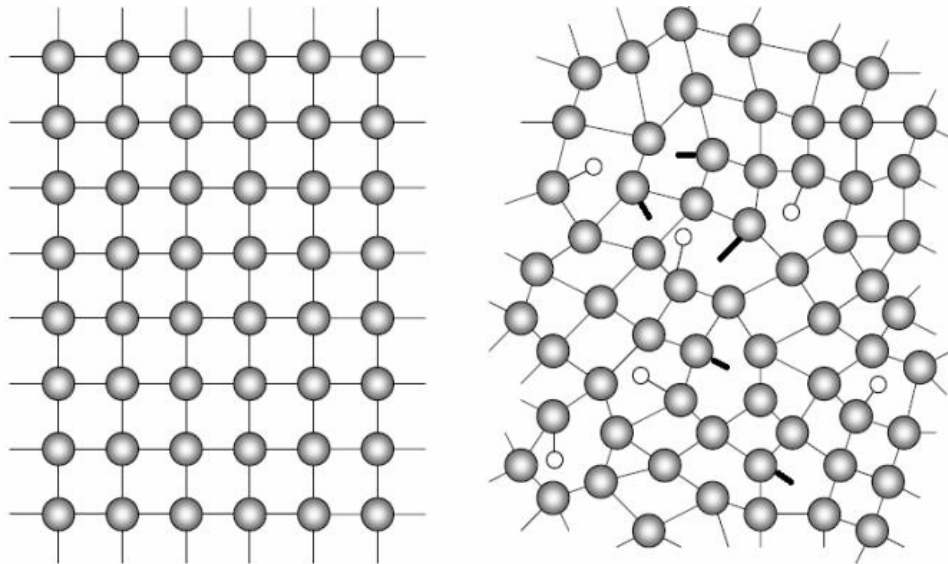


Εικ.1.11 : Ταινία πυριτίου

1.4.2. Λεπτών υμενίων (*thin film*)

Τα thin-film πλαίσια διαφέρουν σημαντικά από τα κρυσταλλικά, από την αρχική φάση κατασκευής τους. Αντί τα ημιαγώγιμα υλικά να χυτευθούν και στη συνέχεια να καταταμηθούν σε στοιχεία, στην thin-film εναποτίθενται σαν μια λεπτή ημιαγώγιμη μεμβράνη πάνω σε ένα χαμηλού κόστους υπόστρωμα, συνήθως γυαλί. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι: εναπόθεση ατμών (vapour deposition), διαδικασίες ψεκασμού (sputter processes) και ηλεκτρολυτικά λουτρά (electrolytic baths). Τα ημιαγώγιμα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι άμορφο πυρίτιο (a-Si), δισηληνιούχος χαλκός με ίνδιο (CIS) και τελουριούχο κάδμιο (CdTe) [25]. Λόγω της υψηλής απορροφητικότητας της ακτινοβολίας αυτών των υλικών, στρώματα με πάχη μικρότερα από 0,001mm είναι θεωρητικώς ικανοποιητικά για τη μετατροπή του ηλιακού φωτός. Κατά την παραγωγή των thin film στοιχείων οι θερμοκρασίες που απαιτούνται είναι 2000 ° C-6000 ° C μόνο, έναντι των θερμοκρασιών των κρυσταλλικών που κυμαίνονται περί τους 15000 ° C. Η χαμηλότερη κατανάλωση υλικού και ενέργειας, καθώς και η ικανότητα για μια ιδιαίτερα αυτοματοποιημένη παραγωγή καθιστούν την τεχνολογία thin film πιο συμφέρουσα από άποψη κόστους σε σύγκριση με τη συμβατική τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου

1.4.2.1. Άμορφου πυριτίου



Εικ.1.12 : Δεξιά : Τυπικός κρύσταλλος πυριτίου. Αριστερά : Άμορφο πυρίτιο

Ο χαρακτηρισμός ‘άμορφο φωτοβολταϊκό στοιχείο’ προέρχεται από το γεγονός ότι τα άτομα του ημιαγωγού –του πυριτίου συγκεκριμένα- είναι διατεταγμένα με τυχαίο τρόπο. Η κατασκευή τους επιτυγχάνεται τοποθετώντας ημιαγωγίμο υλικό πάνω σε λεπτό υπόστρωμα υποστήριξης χαμηλού κόστους, όπως γυαλί και αλουμίνιο. Λόγω της μικρότερης χρησιμοποιούμενης ποσότητας πυριτίου, το κόστος παρασκευής τέτοιων πλαισίων είναι σημαντικά μικρότερο, άρα και η τιμή τους. Παρολαυτά, η απόδοσή τους είναι επίσης μικρότερη σε σχέση με άλλες τεχνολογίες και για την ακρίβεια κυμαίνονται μεταξύ 6% και 8% για τα πλαίσια του εμπορίου, ενώ εργαστηριακά έχουν επιτευχθεί αποδόσεις μέχρι 14%.

Σημαντικό πλεονέκτημα του άμορφου πυριτίου είναι ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες. Βεβαίως, κατά την διάρκεια του χειμώνα η απόδοση πέφτει αλλά το καλοκαίρι επανέρχεται, ένα φαινόμενο που είναι γνωστό ως θερμική αναγέννηση. Επίσης, η συγκεκριμένη τεχνολογία πλεονεκτεί σημαντικά έναντι άλλων

στην απορρόφηση της διάχυτης ακτινοβολίας, κατά την διάρκεια συννεφιασμένων ημερών, για αυτό και προτείνεται γενικά για περιοχές με περιορισμένη ηλιοφάνεια.

Το κύριο μειονέκτημα των φωτοβολταϊκών πλαισίων άμορφου πυριτίου έγκειται στην χαμηλή ενεργειακή τους πυκνότητα. Για την ακρίβεια, για την παραγωγή ενός συγκεκριμένου ποσού ενέργειας απαιτείται σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

1.4.2.2. Τελουριούχο Καδμίου (CdTe)

Το Τελουριούχο Κάδμιο έχει ενεργειακό διάκενο γύρω στο 1eV το οποίο είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα κάτι που του δίνει σοβαρά πλεονεκτήματα όπως την δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές όμως μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 6-8%. Στο εργαστήριο η απόδοση στα φωτοβολταϊκα στοιχεία έχει φθάσει το 16%. Μελλοντικά αναμένεται το κόστος του να πέσει αρκετά. Σημαντικότερος κατασκευαστής για φωτοβολταϊκα στοιχεία **CdTe** είναι η **First Solar**. Τροχοπέδη για την χρήση του αποτελεί το γεγονός ότι το κάδμιο σύμφωνα με κάποιες έρευνες είναι καρκινογόνο με αποτέλεσμα να προβληματίζει το ενδεχόμενο της εκτεταμένης χρήσης του. Ήδη η Greenpeace έχει εναντιωθεί στην χρήση του. Επίσης προβληματίζει ή έλλειψη του Τελουρίου. Σημαντικότερη χρήση του είναι ή ενθυλάκωση του στο γυαλί ως δομικό υλικό (**BIPV Building Integrated Photovoltaic**).



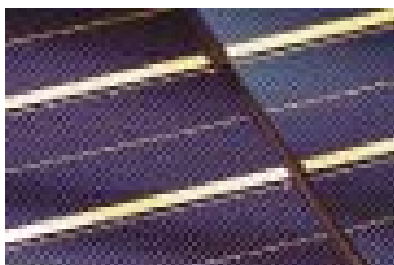
Εικ.1.13 : Τελουριούχο Κάδμιο

1.4.2.3. Αρσενικούχου Γαλλίου (GaAs)

Το Γάλλιο είναι ένα παραπροϊόν της ρευστοποίησης άλλων μετάλλων όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Είναι πιο σπάνιο ακόμα και από τον χρυσό. Το Αρσενικό δεν είναι σπάνιο άλλα έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες.

Το αρσενικούχο γάλλιο έχει ενεργειακό διάκενο 1,43eV που είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η απόδοση του στην μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction) είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29%. Επίσης τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες γεγονός που επιβάλλει σχεδόν την χρήση τους σε εφαρμογές ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων (solar concentrators). Τα φωτοβολταϊκα στοιχεία GaAs έχουν το πλεονέκτημα ότι αντέχουν σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας, για αυτό αλλά και λόγω της πολύ υψηλής απόδοσης του ενδείκνυται για διαστημικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος.

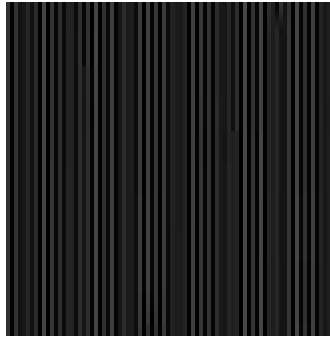


Εικ. 1.14 : Αρσενικούχο Γάλλιο

1.4.2.4. Δισεληνιούχου Ινδιούχου Χαλκού (CuInSe₂ ή CIS)

Ο δισεληνιούχος ινδιούχος χαλκός είναι ημιαγωγικό υλικό, τύπου-n ή τύπου-p, με τον υψηλότερο συντελεστή απορρόφησης που έχει μετρηθεί μέχρι σήμερα. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των CIS εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον λόγο χαλκού/ινδίου. Πλεονεκτούν σε σχέση με τα στοιχεία άμορφου πυριτίου, καθώς δεν εμφανίζουν

μείωση στην απόδοσή τους λόγω της ακτινοβολίας (light degradation), και προσφέρουν επίσης μεγάλη οικονομία στα ημιαγώγιμα υλικά [12]. Μειονέκτημα της τεχνολογίας είναι οι περιορισμένες ποσότητες ινδίου που είναι διαθέσιμες στη φύση, καθώς επίσης και τα αυξημένα μέτρα ασφαλείας που λαμβάνονται κατά την κατασκευή, εξαιτίας και της παραγωγής σεληνιούχου υδρογόνου, ενός εξαιρετικά τοξικού αερίου. Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), χύτευση πυριτίου και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC . Η απόδοση των πλαισίων φτάνει μέχρι και 11% με ορισμένες σύγχρονες τεχνικές, ενώ εργαστηριακά έχει επιτευχθεί απόδοση της τάξης του 18,8%, η οποία είναι από τις υψηλότερες αποδόσεις που έχουν μετρηθεί όσον αφορά τα φωτοβολταϊκά πλαίσια λεπτών επιστρώσεων.



Εικ.1.15 : Δισεληνιούχος Ινδιούχος Χαλκός

1.4.3. Υβριδικά φωτοβολταϊκά

Ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών.

- HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer). Τα πιο γνωστά εμπορικά υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω) ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

Κατασκευάζεται από την Sanyo Solar. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές στο 17,2% και το οποίο σημαίνει ότι χρειαζόμαστε μικρότερη επιφάνεια για να έχουμε την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά στοιχεία

έχουν απόδοση 19,7%. Αλλα πλεονεκτήματα για τα υβριδικά φωτοβολταϊκα στοιχεία είναι η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στην διάχυτη ακτινοβολία. Φυσικά, αφού προσφέρει τόσα πολλά, το υβριδικο φωτοβολταϊκο είναι και κάπως ακριβότερο σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια. Επίσης, λόγω του γεγονότος ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι καινούργια, δεν υπάρχουν ικανοποιητικά στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις σχετικά με την απόδοσή τους και την διάρκεια τους.

1.4.4. Άλλες τεχνολογίες

Παράλληλα με τις κλασσικές τεχνολογίες φωτοβολταϊκών, αναπτύσσονται σε διαφορα εργαστήρια και εναλλακτικές τεχνολογίες. Οι καινούργιες πατέντες εξελίσσονται και βελτιώνονται με ραγδαίους ρυθμούς και δεν αποκλείεται να επικρατήσουν στο μέλλον στο πεδίο των φωτοβολταϊκών.

Παρακάτω παρατίθενται ορισμένες από αυτές τις τεχνολογίες.

1.4.4.1. Νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου (nc-Si)

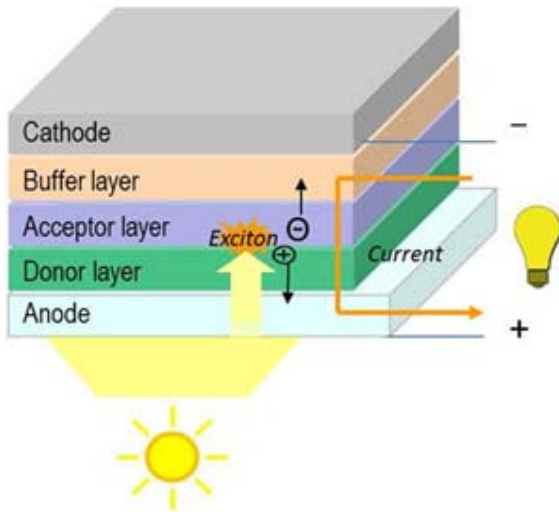
Τα νανοκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα ή αλλιώς τα ηλιακά κύτταρα κβαντικών τελειών είναι κύτταρα βασισμένα σε νανοκρυστάλλους. Τα φωτοευαίσθητα ηλιακά κύτταρα είναι φωτοβολταϊκά βασισμένα σε νανοδιάστατο ημιαγωγό. Κύτταρα λεπτού φίλμ στα οποία ο ημιαγωγός βρίσκεται ανάμεσα στον φωτοευαίσθητοποιητή και τον ηλεκτρολύτη και βασίζονται στο φωτοηλεκτροχημικό φαινόμενο.

Πολλά εργαστήρια ανά τον κόσμο πειραματίζονται με την συγκεκριμένη τεχνολογία με πολύ υποσχόμενα αποτελέσματα. Είναι πιθανό στο μέλλον, τα φωτοβολταϊκά αυτά να προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως ευκαμψία, χαμηλό κόστος, καθαρή πηγή ενέργειας και απόδοση που φτάνει έως και 65%!

1.4.4.2. Οργανικά πολυμερή στοιχεία

Στα λεγόμενα ηλεκτροχημικά ή οργανικά στοιχείαη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια πραγματοποιείται σε οργανικά συστήματα.Τα πολυμερή ηλιακά κύτταρα (πλαστικά ηλιακά κύτταρα) είναι ένας τύπος των οργανικών φωτοβολταϊκών. Είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, η οποία εμφανίζεται μετην μορφή λεπτού φίλμ.Τα οργανικά φωτοβολταϊκά βρίσκονται ακόμα

σε ερευνητικό στάδιο. Η αρχική τους μορφή ήταν υγρή και στην πορεία των ερευνών έφτασε σε πηκτή, παχύρρευστη μορφή. Οι ερευνητές προσπαθούν να κατασκευάσουν όσο πιο δυνατόν στερεά οργανικά στοιχεία, ώστε να σχηματιστεί το πάνελ. Λόγω της ρευστότητας της πρώτης ύλης (υγρό διάλυμα) τα οργανικά φωτοβολταϊκά παρουσιάζουν ευκαμψία. Επιπλέον, χαρακτηρίζονται από πολυχρωμία, λόγω των χρωστικών ουσιών στο διάλυμα.



Εικ.1.16 : Οργανικό φωτοβολταϊκό κελί. Διακρίνονται τα διάφορα στρώματα στην κατασκευή του.

1.4.4.3. Φωτοβολταϊκά φτιαγμένα από περοβσκίτη.

Ο περοβσκίτης είναι ορυκτό οξείδιο του ασβεστίου και του τιτανίου. Τα φωτοβολταϊκά από αυτή την κλάση των υλικών υπόσχονται τόσο φθηνότερες όσο και αποδοτικότερες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις. Η πρόοδος στην συγκεκριμένη τεχνολογία είναι αλματώδης, αφού η απόδοση του εργαστηριακά έχει φτάσει στο 15% μόλις σε τέσσερα χρόνια

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ : ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΗΛΙΟΥ - ΓΗΣ

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

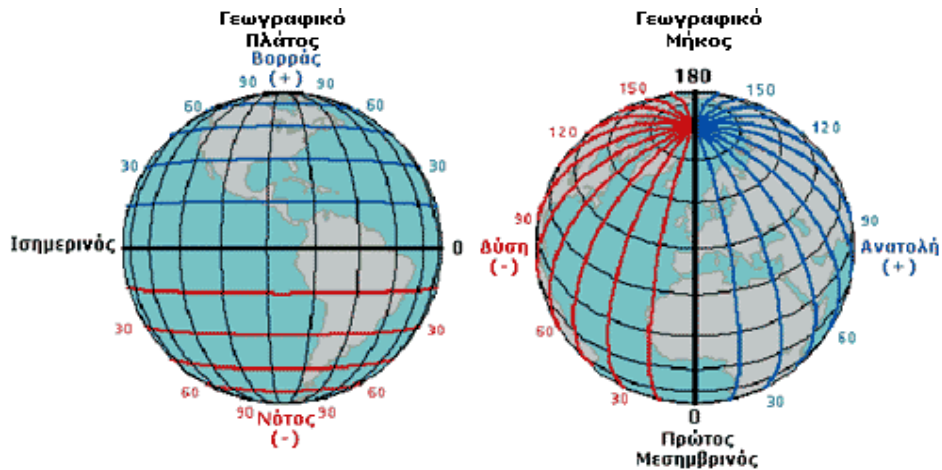
Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η σχετική θέση και κίνηση της γης σε σχέση με τον ήλιο. Στην πρώτη ενότητα παρατίθενται γενικές πληροφορίες σχετικά με τον ήλιο, τα χαρακτηριστικά του ως αστέρα, την θέση που έχει στο σύμπαν και τις κινήσεις που εκτελεί. Στην δεύτερη ενότητα παρέχονται πληροφορίες σχετικά με την γη, την γεωλογική της σύσταση, την θέση της στο ηλιακό σύστημα και τις κινήσεις που εκτελεί αναφορικά με το σύμπαν, τον ήλιο και τον εαυτό της (περιστροφή). Τέλος, η τελευταία ενότητα αναφέρεται στην ηλιακή γεωμετρία, δηλαδή στην φαινόμενη κίνηση του ηλίου από έναν παρατηρητή που βρίσκεται στην επιφάνεια της γης. Για να γίνει αυτό, χρειάστηκε να θεωρήσουμε την σχετική κίνηση ήλιου-γης παίρνοντας ως σημείο αναφοράς κάποιο σημείο στην επιφάνεια της γης. Παράλληλα, εισάγονται μεγέθη όπως η ηλιακή απόκλιση και η ηλιακή ώρα που βοηθούν στον μετασχηματισμό του σημείου αναφοράς, και τέλος παρατίθενται οι τύποι που κωδικοποιούν την φαινόμενη ηλιακή τροχιά στην ουράνια σφαίρα ενός παρατηρητή στην επιφάνεια της γης, συναρτήσει του χρόνου και της τοποθεσίας.

2.2. ΗΛΙΟΣ

Ο ήλιος είναι ένας κίτρινος αστέρας νάνος που βρίσκεται στην κύρια ακολουθία, με φασματικό τύπο G2V και επιφανειακή θερμοκρασία περίπου 5.800 βαθμοί Κέλβιν. Η ηλικία του υπολογίζεται στα 5 δις έτη, ενώ η συνολική διάρκεια ζωής για αστέρες τέτοιου τύπου υπολογίζεται στα 10 δις έτη. Ο ήλιος απέχει από το κέντρο του γαλαξία περίπου 26.000 έτη φωτός, και η περίοδος περιφοράς του ως προς αυτό είναι 226 εκατομμύρια έτη. Ταυτόχρονα, εκτελεί διαφορετική περιστροφή, δηλαδή περιστρέφεται πιο γρήγορα στον ισημερινό από τους πόλους του, με περίοδο που ποικίλλει ανάμεσα σε 27 και 31 ημέρες. Λόγω της βραδείας περιστροφής του το σχήμα του είναι σχεδόν απολύτως κυκλικό, με ακτίνα περίπου εφτακόσιες χιλιάδες χιλιόμετρα. Γύρω από τον Ήλιο περιφέρονται οι 9 γνωστοί πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος, δεμένοι από την βαρυτική του έλξη.

2.3. ΓΗ

Η γη είναι ο τρίτος κατά σειρά κοντινότερος πλανήτης στον ήλιο, απ'τον οποίο απέχει μεση απόσταση περίπου 149 εκατομμύρια χιλιόμετρα. Έχει ηλικία περίπου 4,5 δις έτη και ακτίνα στον ισημερινό ίση με 6.378km. Η γη είναι πέμπτος μεγαλύτερος σε μάζα πλανήτης στο ηλιακό σύστημα, και ο μεγαλύτερος απ' τους τέσσερις που διαθέτουν στερεό φλοιό (οι άλλοι τρεις είναι οι Αφροδίτη, Ερμής και Άρης). Η σύσταση της γης είναι κατά ένα τρίτο σίδηρος, κατά 60% οξυγόνο, μαγνήσιο και πυρίτιο, και κατά το λοιπό 6% άλλα στοιχεία. Οι κινήσεις της γης είναι τέσσερις : η περιστροφή γύρω από τον άξονά της, η περιφορά γύρω από τον ήλιο, η ηλιακή μεταβατική περιφορά, που πραγματοποιεί ακολουθώντας την περιφορά του ηλιακού συστήματος και η γαλαξιακή μεταβατική περιφορά, που πραγματοποιεί ακολουθώντας την περιστροφή του Γαλαξία. Οι σημαντικές για την ανθρώπινη κλίμακα, κινήσεις είναι οι δύο πρώτες. Για να προσδιοριστεί μια θέση πάνω στην γη, ορίζονται κάθετα στον ισημερινό, ημικύκλια που τέμνονται στους πόλους και ονομάζονται μεσημβρινοί. Επιπλέον, ορίζονται παράλληλοι προς τον ισημερινό κύκλοι που ονομάζονται παράλληλοι. Η γωνιακή απόσταση ανάμεσα σ' ένα σημείο και τον μεσημβρινό αναφοράς ονομάζεται γεωγραφικό μήκος, ενώ η αντίστοιχη απόσταση από τον παράλληλο αναφοράς είναι το γεωγραφικό πλάτος. Μεσημβρινός αναφοράς ορίζεται ο μέσημβρινός του γκρήνουιτς, ενώ η θετική φορά είναι προς τα δυτικά. Αντίστοιχα, παράλληλος αναφοράς είναι ο ισημερινός, με τα σημεία που βρίσκονται βορείως αυτού να έχουν θετικό γεωγραφικό πλάτος, ενώ οι περιοχές του νότιου ημισφαιρίου έχουν αρνητικό.



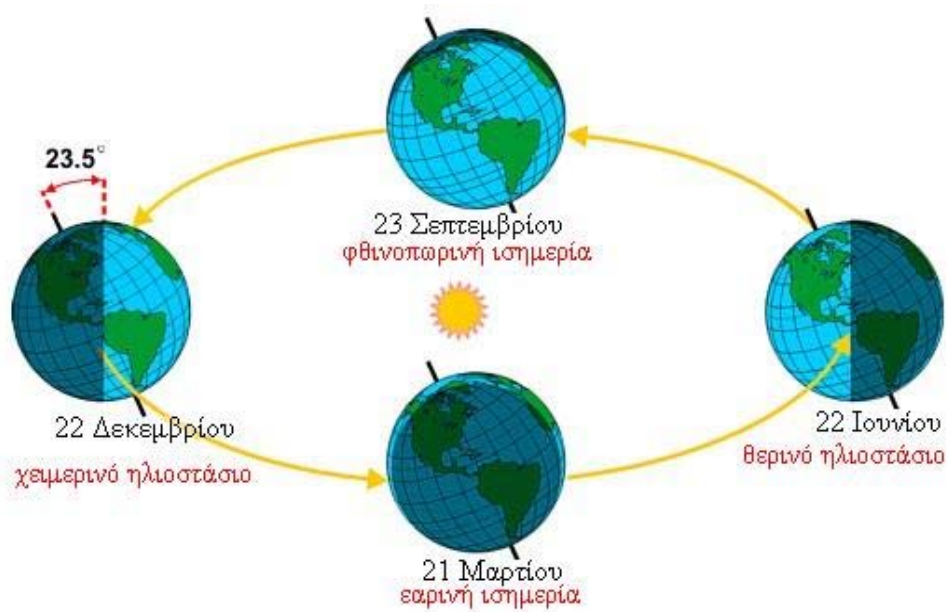
Εικ.2.1. : Παράλληλοι και μεσημβρινοί της γης

2.4 . ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΗΛΙΟΥ-ΓΗΣ

2.4.1. Σύστημα αναφοράς

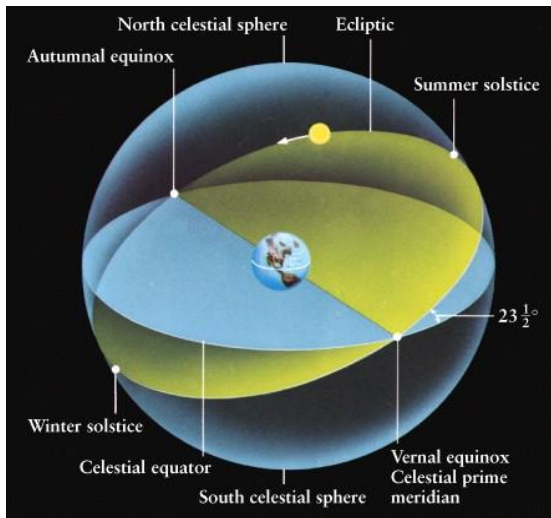
Η γη περιφέρεται γύρω απ' τον ήλιο ακολουθώντας ελλειπτική τροχιά, με την μία εστία της έλλειψης να είναι ο ίδιος ο ήλιος. Αυτό γίνεται αντιληπτό κι από την μεταβολή της φαινόμενης διαμέτρου του ηλίου. Η φαινόμενη διάμετρος του ηλίου είναι η γωνία ΑΓΒ όταν τα Α,Β είναι αντιδιαμετρικά σημεία του ηλίου και Γ ένας παρατηρητής στην γη. Η διχοτόμος της ΑΓΒ εκφράζει ικανοποιητικά την απόσταση γης-ηλίου. Πράγματι, η φαινόμενη διάμετρος του ηλίου παίρνει την μέγιστη τιμή της ($32' 36''$) στις 3 Ιανουαρίου και την ελάχιστη τιμή ($31' 32''$) στις 4 Ιουλίου. Αντίστοιχα, η απόσταση γης-ηλίου μεταβάλλεται και παίρνει την ελάχιστη τιμή (152,1 εκατομύρια km) την πρώτη Ιανουαρίου και την μέγιστη τιμή (147,1 εκατομύρια km) στις 2 Ιουλίου. Η μέση απόσταση γης-ηλίου είναι 149.504.312 km. Η περίοδος περιστροφής της γης είναι 1 ημέρα, και η αντίστοιχη περιφοράς γύρω από τον ήλιο, είναι $365 \frac{1}{4}$ ημέρες. Το επίπεδο που ορίζει η ελλειπτική τροχιά της γης σχηματίζει με τον άξονα περιστροφής της, γωνία ίση με 23,45 μοίρες και σταθερή καθ'όλη την διάρκεια του έτους. Η απόσταση από τον ήλιο μεταβάλλεται λόγω της εκκεντρότητας της τροχιάς περιφοράς, και παίρνει την ελάχιστη τιμή στο περιήλιο και την μέγιστη τιμή στο αφήλιο της τροχιάς. Ανάλογα με την θέση της γης στην

ελλειπτική τροχιά ορίζουμε τις εποχές αναφορικά με το βόρειο ημισφαίριο, που μας ενδιαφέρει.



Εικ2.2 : Η θέση της γης σε συνάρτηση με τις εποχές

Για τους υπολογισμούς στην ηλιακή ενέργεια, είναι βολικότερο να θεωρούμε σύστημα με την γη σταθερή και τον ήλιο να περιφέρεται γύρω της στο εκλειπτικό επίπεδο. Ορίζουμε ως ουράνιο ισημερινό το επίπεδο που περιέχει τον ισημερινό της γης. Ο ουράνιος ισημερινός τέμνει κάθετα τον άξονα περιστροφής της γης στο κέντρο της, ενώ σχηματίζει γωνία με το εκλειπτικό επίπεδο ίση με 23,45 μοίρες.



Εικ. 2.3 : Εκλειπτικό επίπεδο όταν η γη θεωρείται σταθερή

Ο ημισφαιρικός ούρανιος θόλος που περιβάλλει την γη για ένα παρατηρητή που βρίσκεται στο κέντρο της γης ονόμαζεται ούρανια σφαίρα. Όταν μελετούμε κάποιο ουράνιο αντικείμενο στην ουράνια σφαίρα, δεν μας ενδιαφέρει η απόσταση του από την γη, παρά μόνο η γωνία που σχηματίζει η πρόβολή του με το επίπεδο αναφοράς. Το επίπεδο αναφοράς είναι ο ουράνιος ισημερινός.

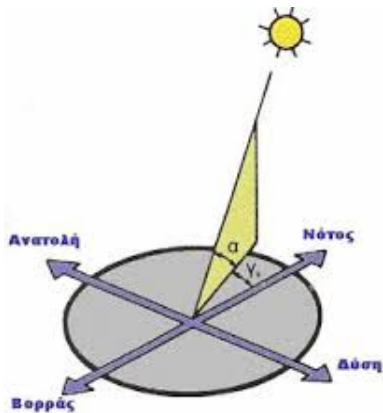
Η γωνία που σχηματίζει η ευθεία που ενώνει τα κέντρα γης-ηλίου με το επίπεδο του ουράνιου ισημερινού ονομάζεται ηλιακή απόκλιση και συμβολίζεται με δ . Επί της ουσίας είναι το ύψος του ηλίου για κάποιον παρατηρητή στο κέντρο της γης (τοποθετημένο σε επίπεδο παράλληλο με αυτό που εφάπτεται στην επιφάνεια της γης στη συγκεκριμένη τοποθεσία). Η ηλιακή απόκλιση μεταβάλλεται συνεχώς, αλλά λόγω του ότι ακολουθεί αργή μεταβολή (μικρότερη από μισή μοίρα στην διάρκεια μιας ημέρας), στην παρούσα εργασία θεωρείται ότι η ηλιακή απόκλιση παραμένει σταθερή κατά της διάρκεια μιας συγκεκριμένης μέρας. Επίσης, η ηλιακή απόκλιση γίνεται απολύτως μέγιστη κατά τα ηλιοστάσια ($\delta=23,45^\circ$ κατά το θερινό ηλιοστάσιο στις 21/6 και $\delta=-23,45^\circ$ κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο στις 21/12) και μηδενική στην φθινοπωρινή (21/9) και εαρινή (21/3) ισημερία.

Βεβαίως, για τον προσδιορισμό της θέσης του ηλίου, θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η πραγματική θέση του παρατηρητή, που είναι ένα σημείο πάνω στην επιφάνεια της γης και όχι στο κέντρο της. Άρα, το επίπεδο αναφοράς για έναν παρατηρητή είναι το

επίπεδο που εφάπτεται στη επιφάνεια της γης στο σημείο που βρίσκεται ο παρατηρητής. Ορίζεται επίσης το ζενίθ, ως το σημείο όπου η κατακόρυφος προς το επίπεδο αναφοράς που διέρχεται από το σημείο του παρατηρητή, συναντά την ουράνια σφαίρα.

2.4.2. Συντεταγμένες στην ουράνια σφαίρα

Υιοθετώντας το παραπάνω σύστημα αναφοράς, αρκούν 2 γωνίες για τον προσδιορισμό της θέσης οποιουδήποτε ουράνιου αντικειμένου στην ουράνια σφαίρα. Η πρώτη, η γωνία β λέγεται και ύψος και είναι η γωνία που σχηματίζει η ευθεία ήλιου-παρατηρητή με το οριζοντιο επίπεδο αναφοράς. Η δεύτερη συμβολίζεται με Z και ονομάζεται αζιμούθιο, είναι δε η γωνία που σχηματίζει η προβολή του αντικειμένου στην ουράνια σφαίρα, ως προς τον νότο. Το ύψος β παίρνει τιμές από 0 έως 90 μοίρες, με την μηδενική τιμή να αντιστοιχίζεται στις ώρες ανατολής και δύσης του ήλιου, ενώ η μέγιστη γωνία των 90 μοιρών παρατηρείται σε συγκεκριμένες ώρες (ηλιακό μεσημέρι) και περιοχές (για γεωγραφικά πλάτη, απολύτως μικρότερα ή ίσα με 23,45 μοίρες) της υδρογείου, όταν ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ της τοποθεσίας. Το αζιμούθιο παίρνει τιμές από -90 έως και 90 μοίρες. Η τιμή 0 ισχύει όταν ο ήλιος είναι ευθυγραμμισμένος με τον νότο, ενώ το αζιμούθιο παίρνει θετικές τιμές όσο κινούμαστε προς την δύση, και αρνητικές προς την ανατολή.



Εικ.2.4 : Οι γωνίες που καθορίζουν την θέση του ήλιου στην ουράνια σφαίρα. Με α σημειώνεται το ύψος του ήλιου και με γ το αζιμούθιο.

2.4.3. Ηλιακή ώρα

Για τους υπολογισμούς μας, είναι αναγκαίο να εισαχθεί η έννοια της ηλιακής ώρας. Η ηλιακή ώρα, σ' αντίθεση με την τοπική, έχει ως αναφορά τον ήλιο: πάντα την στιγμή που ο ήλιος είναι στο ανώτατο σημείο της ημερήσιας τροχιάς του, η ηλιακή ώρα είναι 12 το μεσημέρι ακριβώς! Επομένως, πρέπει να γίνουν συγκεκριμένες διορθώσεις ούτως ώστε η τοπική ώρα (T_{local}) να μετατρέπεται σε ηλιακή (T_{solar}).

Η πρώτη διόρθωση που χρειάζεται έχει να κάνει με την θέση του παρατηρητή πάνω στην γη. Ο καθορισμός της τοπικής ώρας γίνεται μέσω των μεσημβρινών αναφοράς. Η γη ολοκληρώνει μια πλήρη περιστροφή 360 μοιρών σε 24 ώρες, άρα στρέφεται κατά 15 μοίρες την ώρα. Ανά 15 μοίρες λοιπόν, και με αρχή τον μεσημβρινό του γκρήνουιτς, ορίζεται ο μεσημβρινός αναφοράς για κάθε τόπο, που καθορίζει και την τοπική ώρα. Ο μεσημβρινός αναφοράς υπολογίζεται με τη βοήθεια του τύπου:

$$Lst = 15^\circ / h * \Delta T_{GMT}$$

Όπου:

Το ΔT_{GMT} είναι η διαφορά μεταξύ της ώρας GMT (Greenwich Mean Time), δηλαδή της ώρας του μεσημβρινού του Greenwich, και της ώρας του μεσημβρινού αναφοράς (Lst) για την συγκεκριμένη τοποθεσία. Η διαφορά αυτή είναι πάντα ακέραια. Παραδείγματος χάριν, για την Ελλάδα η διαφορά είναι -2, οπότε η τοπική ώρα αναφέρεται στον δεύτερο μεσημβρινό αναφοράς ανατολικά του Greenwich. Επομένως, με χρήση αυτού του τύπου βρίσκουμε για την Ελλάδα, $Lst = -30$ μοίρες

Η δεύτερη διόρθωση λαμβάνει υπ' όψιν την μεταβολή της χρονικής διάρκειας (σε λεπτά) που απαιτεί ο ήλιος για να μεταφερθεί κατά μήκος της ηλιακής τροχιάς στην ουράνια σφαίρα και να διανύσει τον ουρανό του παρατηρητή. Η χρονική παρρέκκλιση τούτη, οφείλεται στην εκκεντρότητα της τροχιάς της γήινης περιφοράς, και στην μεταβολή της απόστασης γης-ηλίου που αυτή συνεπάγεται. Η διόρθωση αυτή υπολογίζεται μέσω εμπειρικών τύπων. Ένας τύπος είναι αυτός

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

Όπου B είναι η γωνία ημέρας, η οποία συναρτάται από την ημέρα του έτους, DoY, που επιχειρείται ο προσδιορισμός της ηλιακής ώρας. Η γωνία ημέρας B υπολογίζεται μέσω του τύπου

$$B=(DoY-1)*360^{\circ} /364,$$

όπου η παράμετρος DoY παίρνει ακέραιες από 1 έως 365 και αριθμεί με την σειρά τις ημέρες του έτους, αρχίζοντας από την πρώτη Ιανουαρίου.

Άλλος τύπος, περισσότερο εύχρηστος,για τον υπολογισμό της διόρθωσης της τοπικής ώρας είναι ο εξής

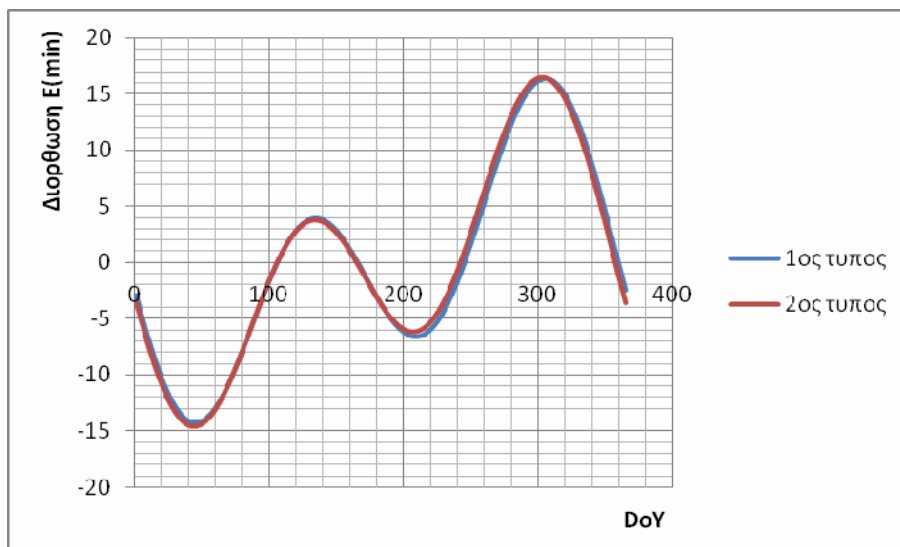
$$E=9,87 * \sin(2*B)-7,53*\cos B-1,5* \sin B$$

Για τον συγκεκριμένο τύπο,η γωνία ημέρας υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης

$$B=(DoY-81)*360^{\circ} /365,$$

όπου η παράμετρος DoY είναι η ίδια με πριν, αλλά στον συγκεκριμένο τύπο η γωνία ημέρας σχετίζεται με την απόσταση της ημέρας από την εαρινή ισημερία στις 21 Μαρτίου (όπου ισχύει DoY=80)

Οι δυο εξίσωσεις είναι σχεδόν ισοδύναμες και παράγουν τα ίδια αποτελέσματα,οπώς δείχνει και το παρακάτω διάγραμμα.



Εικ.2.5 : Σύγκριση των δύο διαφορετικών τύπων που αφορούν την διόρθωση χρόνου

Συνεπώς, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε όποιον από τους δύο τύπους θέλουμε, με τον δεύτερο τύπο να προτείνεται, χάριν απλότητας.

Για να μετατρέψουμε την τοπική ώρα σε ηλιακή, χρησιμοποιώντας όλα τα παραπάνω, τελικά καταλήγουμε στον εξής τύπο

$$T_{\text{solar}} = T_{\text{local}} + E + 4 \text{min}/^{\circ} * (L_{\text{st}} - L_{\text{local}})$$

Όπου :

T_{solar} η προς υπολογισμό ηλιακή ώρα

T_{local} η τοπική ώρα

E η διόρθωση σε λεπτά, που εισάγεται απ' την εξίσωση χρόνου

L_{st} ο μεσημβρινός αναφοράς (για την Ελλάδα υπολογίστηκε ίσο με -30)

L_{local} το γεωγραφικό μήκος του τόπου που προσδιορίζουμε την ώρα

Προκειμένου να υπολογιστεί η θέση του ηλίου στην ουράνια σφαίρα σε οποιοδήποτε σημείο της επιφάνειας της γης, μας είναι χρήσιμο να υπολογίσουμε ακόμα 2 γωνίες, την ηλιακή απόκλιση δ και την γωνία ώρας ω .

2.4.4. Ηλιακή απόκλιση δ

Η ηλιακή απόκλιση, αν θεωρηθεί σταθερή κατά την διάρκεια της μέρας, υπολογίζεται απ' τον παρακάτω τύπο

$$\delta (^{\circ}) = 23,45^{\circ} * \sin[(360^{\circ} / 365) * (DoY + 284)]$$

ή εναλλακτικά

$$\delta (^{\circ}) = 23,45^{\circ} * \sin[(360^{\circ} / 365) * (DoY - 81)]$$

Και οι δύο τύποι είναι ισοδύναμοι, καθώς και οι δύο χρησιμοποιούν την ημερολογιακή απόσταση της μέρας που μας ενδιαφέρει απ' την εαρινή ισημερία, και παίρνουν ως δεδομένη μια σταθερή ανά μέρα μεταβολή της ηλιακής απόκλισης

2.4.5 Γωνία ώρας ω

Η ωριαία γωνία για ένα ουρανιο αντικείμενο σε συσκευριμένη τοποθεσία πάνω στην γη ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζουν τα παρακάτω ημιεπίπεδα:

-το ημιεπίπεδο που ορίζει ο πολικός άξονας της γης με το ζενίθ της τοποθεσίας

-το ημιεπίπεδο που ορίζει ο πολικός άξονας της γης με το σημείο της θέσης του αντικείμενου στην ουράνια σφαίρα

Συγκεκριμένα για τον ήλιο, ορίζεται με τον ίδιο τρόπο η ηλιακή ωριαία γωνία. Το μέγεθος αυτό εκφράζει επί της ουσίας την γωνία που πρέπει να στραφεί η γη ως προς τον πολικό της άξονα ουτως ώστε το επίπεδο που ορίζει ο τοπικός μεσημβρινός μιας συγκεκριμένης τοποθεσίας πάνω στη γη να περιέχει τον ήλιο.

Γενικά, η γωνία ώρας υπολογίζεται απ' τον τύπο :

$$\omega = 15^\circ/h * (T_{\text{solar}} - 12)$$

Καθώς η γη περατώνει μια περιστροφή 360 μοιρών σε 1 ημέρα, η γωνιακή της ταχύτητα είναι $15^\circ/h$. Αυτή είναι και η ταχύτητα μεταβολής της ωριαίας γωνίας. Όπως φαίνεται και από τον τύπο, η ωριαία γωνία μηδενίζεται όταν $T_{\text{solar}} = 12$, δηλαδή όταν ο ήλιος είναι στο απόγειο της ημερήσιας τροχιάς του, κατά το ηλιακό μεσημέρι. Η γωνία ω παίρνει αντίστοιχα αρνητικές τιμές πριν το ηλιακό μεσημέρι και θετικές μετά από αυτό.

2.4.6. Προσδιορισμός της θέσης του ηλίου

Γνωρίζοντας όλα τα παραπάνω μεγέθη, δηλαδή την ηλιακή αποκλιση δ , την ωριαία γωνία ω αλλά και το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας, μπορούμε να προσδιορίσουμε την θέση του ήλιου πάνω στην ουράνια σφαίρα, για οποιαδήποτε στιγμή του έτους.

Όπως έχουμε δει, στο παράλληλο σύστημα συντεταγμένων, αυτό που χρησιμοποιούμε, για τον προσδιορισμό μιας θέσης στην ουράνια σφαίρα χρησιμοποιούνται δύο συντεταγμένες, το ύψος β και το αζιμούθιο Z .

Το ύψος β δίνεται απ' τον τύπο

$$\sin\beta = \sin\delta \cdot \sin\varphi + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega$$

ενώ το αζιμούθιο Z δίνεται απ τον τύπο

$$\cos Z = (\sin\beta \cdot \sin\varphi - \sin\delta) / (\cos\beta \cdot \cos\varphi)$$

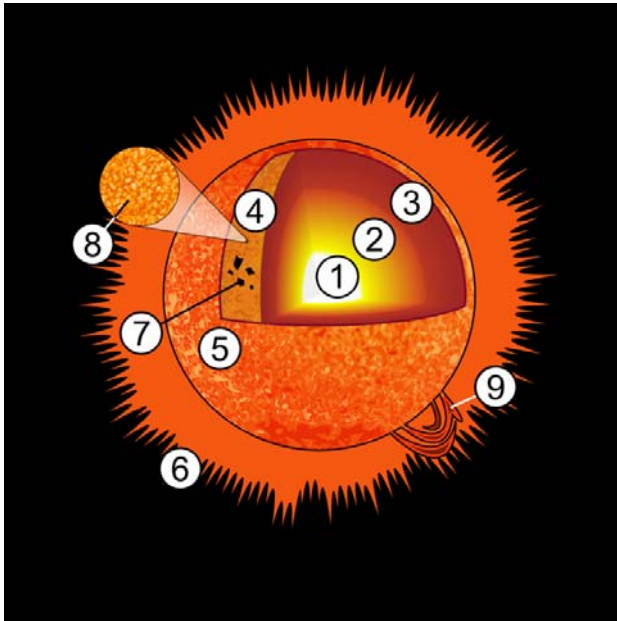
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ : ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η διαδρομή που ακολουθά η ηλιακή ενέργεια -υπό μορφή ακτινοβολίας- από την δημιουργία της στον ήλιο μέχρι την διάδοσή της ως την επιφάνεια της γης όπου καθίσταται εκμεταλλεύσιμη. Αρχικά μελετώνται οι διαδικασίες που γίνονται στο εσωτερικό του ήλιου που οδηγούν στην δημιουργία αυτής της ενέργειας. Ακολούθως, παρουσιάζεται το ταξίδι της ηλιακής ακτινοβολίας από τον ήλιο προς την γη, όπως επίσης και η επίδραση της απόστασης σύμφωνα με τον νόμο διάδοσης της ακτινοβολίας. Τέλος, εξετάζονται τα φυσικά φαινόμενα που επενεργούν στην ηλιακή ακτινοβολία που τελικά φθάνει στην γη, και κυρίως η επίδραση αυτής με την ατμόσφαιρα. Παράλληλα, εισάγεται το πολύ σημαντικό στην μελέτη της ηλιακής ενέργειας μέγεθος της αέριας μάζας

3.2. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας του ηλίου παράγεται στον πυρήνα του. Ο πυρήνας του ηλίου έχει διάμετρο 175.000 km,όσο περίπου το ένα τέταρτο της ακτίνας ολόκληρου του ηλίου. Λόγω της βαρυτικής έλξης προς το κέντρο του άστρου, οι θερμοκρασίες και οι πιέσεις που επικρατούν εκεί είναι τόσο υψηλές, που παρόλο που η ύλη βρίσκεται σε αέρια και ιονισμένη μορφή, είναι πιο συνεκτική από τα στερεά, ενώ η πυκνότητά της επίσης είναι πολύ υψηλή. Εξαιτίας αυτών των ακραίων συνθηκών, στον πυρήνα του ηλίου συμβαίνει το φαινόμενο της πυρηνικής σύντηξης, που είναι και αυτό που παράγει την ενέργεια του ηλίου. Σε υποατομικό επίπεδο, οι πυρήνες ατόμων υδρογόνου (πρωτόνια), λόγω των ακραίων συνθηκών του πυρήνα του ήλιου, συγκρούονται τόσο βίαια και ορμητικά, ώστε σχηματίζουν πυρήνες του στοιχείου ηλίου He. Αυτή η αλυσωτή αντίδραση, που ονομάζεται αλυσίδα p-p,είναι εξώθερμη και απελευθερώνει ενέργεια στο περιβάλλον με την μορφή ακτινοβολίας γάμμα και κινητικής ενέργειας συγκεκριμένων νετρίνων. Τα φωτόνια αυτής της ακτινοβολίας γάμμα, απορροφούνται απ τα διπλανά άτομα και επανεκπέμπονται συνεχώς σε τυχαία κατεύθυνση, χάνοντας κάθε φορά λίγη από την ενέργειά τους. Τελικώς, και μέσα από μια διαδικασία που διαρκεί δεκάδες χιλιάδες χρόνια, κάποια από αυτά τα φωτόνια φτάνουν στα εξωτερικά στρώματα του ηλίου και ακτινοβολούν προς όλες τις κατευθύνσεις στο σύμπαν, προσπίπτοντας έτσι και στη γη.



Εικ. 3.1 : Απεικόνιση του ήλιου. 1. Πυρήνας 2. Ζώνη ακτινοβολίας 3.Ζώνη μεταφοράς 4. Φωτόσφαιρα 5. Χρωμόσφαιρα 6. Στέμμα 7. Ηλιακή κηλίδα 8. Κοκκίδωση 9. Έκλαμψη

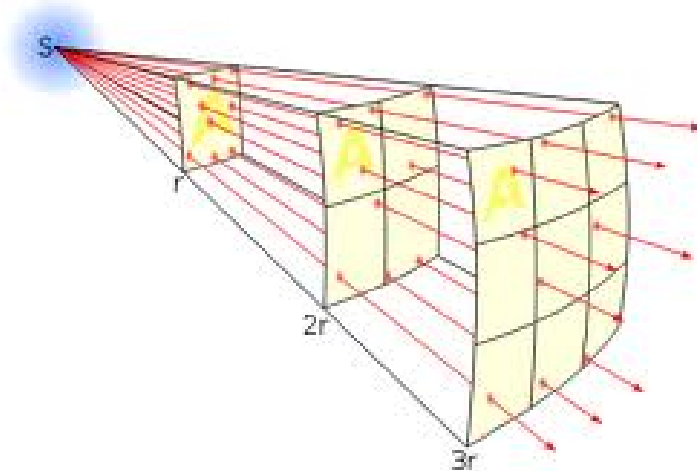
3.3. ΛΗΦΘΕΙΣΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΤΗ ΓΗ

Η συνολική ακτινοβολία που εκπέμπει ο ήλιος από την φωτόσφαιρά του υπακούει στον νόμο **STEFAN-BOLTZMANN**, ο οποίος υπολογίζει την ισχύ της συναρτήσεως της ηλιακής ακτίνας, της ικανότητας εκπομπής ϵ και της θερμοκρασίας T .

$$P = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot (4\pi R^2)$$

Ο παραπάνω νόμος μας δίνει της τιμή των $3,91 \cdot 10^{26}$ W ως ισχύ εκπέμπουσας ακτινοβολίας από την φωτόσφαιρα του ηλίου. Αυτή η ισχύς διαχέεται προς όλες τις κατευθύνσεις του διαστήματος και μόνο ένα μικρό μέρος της φτάνει στη γη. Η ακτινοβολία στην φωτόσφαιρα έχει μικρό μήκος κύματος και άρα υψηλή ενέργεια, όσο όμως ταξιδεύει και διανύει τις αποστάσεις του διαστήματος, το μήκος κύματος μεγαλώνει και χάνεται κάποια ενέργεια με αποτέλεσμα τα φωτόνια που φτάνουν στην γη να έχουν μικρότερη ενέργεια και συχνότητα από ότι είχαν την στιγμή της εκπομπής τους. Αυτό μπορεί να γίνει κατανοητό και με την χρήση του φυσικού νόμου του αντίστροφου τετραγώνου (Inverse Square Law). Σύμφωνα με αυτόν τον νόμο, η ένταση μιας ακτινοβολίας διαδιδόμενης στο κενό, εξασθενεί ανάλογα με

το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή της ακτινοβολίας. Αυτό σημαίνει ότι αν διπλασιάσουμε την απόσταση, η ακτινοβολία θα υποτετραπλασιαστεί, και ούτω καθεξής.



Εικ.3.2 : Ο νόμος του αντίστροφου τετραγώνου. Στις σημειωμένες επιφάνειες αντιστοιχεί ίδια συνολική ενέργεια

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσλαμβάνει καθημερινά η γη δεν είναι σταθερή αλλά παρουσιάζει κάποιες διακυμάνσεις που οφείλονται στην μεταβολή της απόστασης γης-ηλίου και σχετίζονται με τον προαναφερθέντα νόμο του αντίστροφου τετραγώνου. Παρ'ολ'αυτά, οι διακυμάνσεις αυτές είναι μάλλον ασήμαντες, οπότε μπορεί να θεωρηθεί οπότε μπορεί να θεωρηθεί ότι η συνολική προσλαμβανόμενη από την γη ηλιακή ακτινοβολία είναι σταθερή για κάθε μέρα του έτους. Για τις περισσότερες τεχνολογικές εφαρμογές, χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς η σταθερά $G_{\text{solar_constant}}$. Το μέγεθος αυτό εκφράζει την πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται η γη, θεωρώντας την απόσταση από τον ήλιο ως την μέση απόσταση ήλιου-γης. Η $G_{\text{solar_constant}}$ έχει μετρηθεί αρκετές φορές, αλλά ως πρότυπη τιμή χρησιμοποιούμε αυτή των Duffie και Beckman του 1991, όπου η ηλιακή σταθερά βρέθηκε ίση με 1367 W/m^2 . Αυτή η τιμή είναι πολύ σημαντική, καθώς αντιπροσωπεύει το διαθέσιμο ποσό ενέργειας που έχουμε για τον πλανήτη.

Με βάση αυτή την σταθερά, μπορούμε να υπολογίσουμε την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει την ατμόσφαιρα της γης για κάθε μέρα διαφορετικά. Πράγματι, αν ορίσουμε το μέγεθος $G_{\text{extra_terrestrial}}$ ως την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας σε

κάθετη συγκεκριμένη επιφάνεια ακριβώς έξω απ' την ατμόσφαιρα της γης, και για συγκεκριμένη μέρα του έτους, τότε ισχύει ο τύπος:

$$G_{\text{extra_terrestrial}} = G_{\text{solar constant}}[1+0,033.\cos((360^\circ \cdot \text{DoY})/365)]$$

Όπου το DoY, όπως έχει οριστεί και στο κεφάλαιο 3, αντιπροσωπεύει την αρίθμηση των ημερών του έτους ξεκινώντας από την 1^η Ιανουαρίου. Η $G_{\text{extra_terrestrial}}$ μετριέται σε W/m^2 .

3.4. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΤΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

3.4.1. Μηχανισμοί Εξασθένησης

Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει την ατμόσφαιρα της γης, και λόγω του νόμου του αντίστροφου τετραγώνου έχει εξασθενήσει, δηλαδή έχει μειωθεί η ενέργεια της και έχει αυξηθεί το μήκος κύματος. Έτσι, όταν η ακτινοβολία εισέρχεται στην ατμόσφαιρα, μόλις το 7% της φασματικής της απόκρισης βρίσκεται στην υπεριώδη ζώνη (για μήκη κύματος $\lambda < 0,4 \mu\text{m}$), ενώ το 47% ανήκει στο ορατό φάσμα και το υπόλοιπο 46% είναι υπέρυθρο φως ($\lambda > 0,75 \mu\text{m}$).

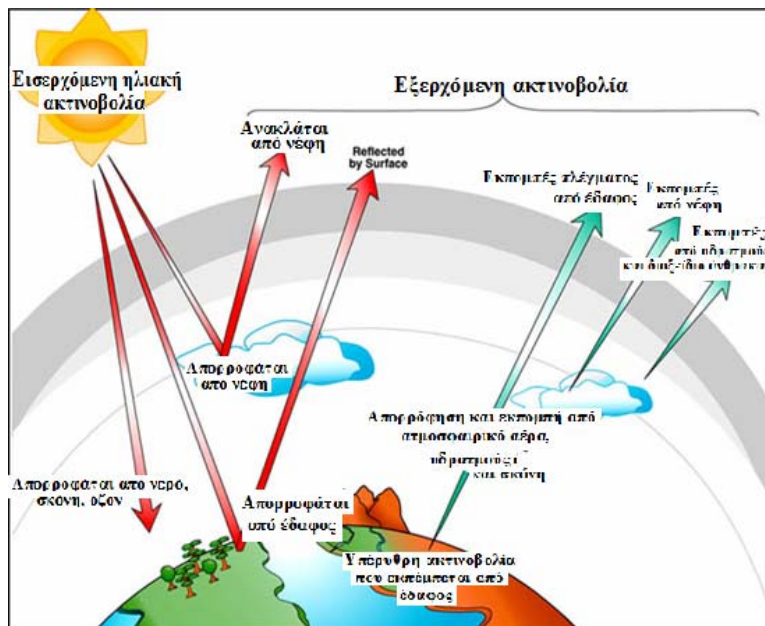
Από την στιγμή που η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στην ατμόσφαιρα, και μέχρι να φτάσει στην επιφάνεια της γης, εξασθενεί επιπλέον, λόγω της επίδρασης της ατμόσφαιρας. Συγκεκριμένα, αν μετρήσουμε την μέση πυκνότητα ισχύος που φτάνει στην επιφάνεια της θάλασσας θα βρούμε την τιμή 1 KW/m^2 , δηλαδή 1000 W/m^2 . Αυτή η τιμή αναφέρεται συχνά και ως **ισχύς ενός ήλιου**, και αποτελεί την πρότυπη τιμή ηλιακής ακτινοβολίας για τις εφαρμογές των επίγειων ηλιακών συλλεκτών. Σύμφωνα, όμως, με την παγκόσμια ηλιακή σταθερά, η ποσότητα ισχύος που δέχεται η γη ανά μονάδα επιφάνειας είναι 1367 W/m^2 . Παρατηρούμε ότι ένα σημαντικό ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που διαπερνά την γήινη ατμόσφαιρα, δεν φτάνει ποτέ την επιφάνεια της γης. Αυτό συμβαίνει λόγω των μηχανισμών εξασθένησης της ακτινοβολίας. Οι μηχανισμοί εξασθένησης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι τρεις, και αξίζει να αναλυθούν περαιτέρω.

Ο πρώτος μηχανισμός είναι η **απορρόφηση**. Τα διερχόμενα από την ατμόσφαιρα, φωτόνια του ηλίου απορροφούνται από τα μόρια της ύλης που υπάρχουν εκεί. Η

ακτινοβολία που απορροφάται είτε μετατρέπεται σε θερμότητα, είτε επανεκπέμπεται από τα μόρια με μορφή ακτινοβολίας μικρότερης ενέργειας και μεγαλύτερου μήκους κύματος. Η υπεριώδης ακτινοβολία απορροφάται κυρίως απ' το όζον, ενώ η υπέρυθρη ακτινοβολία απορροφάται από τους υδατμούς της ατμόσφαιρας, το διοξείδιο του άνθρακα και το ρυπογόνο SF₆ (εξαφθοριούχο θείο).

Ο δεύτερος μηχανισμός αφορά την **σκέδαση**. Η σκέδαση του ηλιακού φωτός δεν είναι παρά η αλλαγή κατεύθυνσης των φωτονίων λόγω συγκρούσεων με την ύλη της ατμόσφαιρας. Υπεύθυνα για την σκέδαση του φωτός μπορούν να θεωρηθούν όλα τα σωματίδια της ατμόσφαιρας, από τους υδατμούς και τον ατμοσφαιρικό αέρα, μέχρι τους σωματιδιακούς ρύπους και την αιωρούμενη σκόνη.

Ο τρίτος μηχανισμός είναι η **αντανάκλαση** που πραγματοποιείται σε διεπιφάνειες διαφορετικής οπτικής πυκνότητας και είναι ανεξάρτητη από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.



Εικ. 3.3 : Απορρόφηση, σκέδαση και αντανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας

3.4.2. Αέρια μάζα (AM)

Η επίδραση της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία είναι ευθέως ανάλογη με την απόσταση που διανύει το φως στην ατμόσφαιρα. Πράγματι, όσο πιο μεγάλη είναι η διαδρομή μιας δέσμης φωτός στην ατμόσφαιρα, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα η

δέσμη αυτή να υποστεί απορρόφηση ή σκέδαση, και άρα να χάσει μεγαλύτερο μέρος απ την ενέργειά της. Για τον λόγο αυτό, ορίζεται το μέγεθος της αέριας μάζας. Η **αέρια μάζα (AM)** είναι ο λόγος της διαδρομής του φωτός μέσα στην ατμόσφαιρα, προς το συνολικό πάχος της ατμόσφαιρας. Για τον προσδιορισμό της αέριας μάζας, καθοριστικό ρόλο παίζει η γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών (συμβολίζεται με γ_s). Η γωνία πρόσπτωσης υπολογίζεται πάντοτε ως προς ηλιακό συλλέκτη τοποθετημένο παράλληλα με το οριζόντιο επίπεδο του εδάφους. Άμεσα γίνεται κατανοητό ότι η γωνία πρόσπτωσης ταυτίζεται με το ύψος β του ήλιου, στην περίπτωση αυτή. Η αέρια μάζα AM, συνδέεται με την γωνία γ_s με την ακόλουθη σχέση :

$$AM = 1/(\cos(90-\gamma_s))$$

Εύκολα καταλαβαίνουμε μέσω αυτού του τύπου ότι $AM=1$, όταν $\gamma_s=90$, δηλαδή όταν ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ της τοποθεσίας. Αντίθετα, ο δείκτης της αέριας μάζας μηδενίζεται όταν αναφερόμαστε σε περιοχές ακριβώς έξω από την ατμόσφαιρα της γης. Αυτό είναι λογικό, καθώς σε τέτοιες περιοχές, το φως δεν έχει διασχίσει ακόμη την γήινη ατμόσφαιρα. Συμβατικά, όταν αναφερόμαστε στην πρότυπη ισχύ ενός ήλιου (βλ.4.3) παίρνουμε ως τιμή της αέριας μάζας την $AM=1,5$. Η τιμή αυτή ισχύει για γωνία πρόσπτωσης $\gamma_s = 41,8$, μια γωνία που παρατηρείται για το ηλιακό φάσμα στην διάρκεια μιας τυπικής ηλιόλουστης μέρας. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταβολή της αέριας μάζας σύμφωνα με την εποχή και την ημέρα του χρόνου, για συγκεκριμένη τοποθεσία. Όπως έχει αναπτυχθεί στο κεφάλαιο 2 (2.4.6), το ύψος β του ήλιου δίνεται από τον τύπο :

$$\sin\beta = \sin\delta \cdot \sin\varphi + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega$$

όπου δ είναι η ηλιακή απόκλιση, φ είναι το γεωγραφικό πλάτος και ω είναι η γωνία ώρας. Το ύψος του ήλιου κατά την διάρκεια της ημέρας μεταβάλλεται σε ένα διάστημα τιμών με άκρα την μηδενική τιμή που ισχύει, όπως είναι προφανές, τις στιγμές της ανατολής και της δύσης του, και την τιμή του ηλιακού ζενίθ, η οποία επιτυγχάνεται κατά την στιγμή του ηλιακού μεσημεριού, όταν η γωνία ώρας ω είναι μηδενική. Για να υπάρχει κοινό μέτρο σύγκρισης της αέριας μάζας ανάμεσα σε διαφορετικές ημέρες, στους παρακάτω υπολογισμούς θεωρούμε την γωνία ώρας μηδενική, και συγκρίνουμε τις τιμές της αέριας μάζας κατά την στιγμή του ηλιακού μεσημεριού. Χρησιμοποιώντας τον τύπο για την αέρια μάζα που δόθηκε παραπάνω :

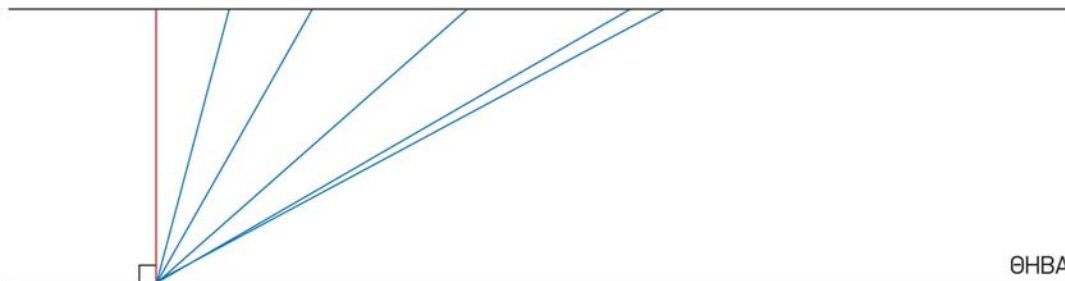
$$AM = 1/(\cos(90-\gamma_s))$$

εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι η μέγιστη τιμή αέριας μάζας για μια τοποθεσία, είναι όταν το ύψος του ήλιου παίρνει την μικρότερη τιμή του. Αυτό συμβαίνει, για τις περιοχές του βόρειου ημισφαιρίου, κατά την διάρκεια του χειμερινού ηλιοστάσιου, στις 21/12. Αντίστοιχα, ο δείκτης αέριας μάζας γίνεται ο ελάχιστος μέσα στο έτος, την ημέρα όπου το ύψος του ήλιου γίνεται μέγιστο, δηλαδή κατά το θερινό ηλιοστάσιο στις 21/6. Τις υπόλοιπες μέρες, η αέρια μάζα καταλαμβάνει τιμές ανάμεσα στο μέγιστο και στο ελάχιστο. Αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε τιμή της αέριας μάζας στο διάστημα αυτό αντιστοιχεί σε 2 ημέρες του έτους. Αυτό συμβαίνει επειδή η ηλιακή απόκλιση για δυο ημέρες του έτους που ισαπέχουν χρονικά από κάποιο ηλιοστάσιο, είναι ίση. Συνεπώς, με απλή επισκόπηση του τύπου για το ύψος του ήλιου, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η φαινόμενη τροχιά του ήλιου στον ουρανό σε συγκεκριμένη περιοχή για αυτές τις δύο μέρες είναι ίση, ως εκ τούτου ίσες είναι και οι αέριες μάζες που αναφέρονται στις μέρες εκείνες.

Στα παρακάτω σχήματα (Εικ. 3.4, 3.5) διερευνάται η μεταβολή της αέριας μάζας μιας τοποθεσίας κατά την διάρκεια του έτους. Συγκεκριμένα, έχουν υπολογιστεί οι τιμές της AM, όταν αυτή παίρνει την ελάχιστη τιμή της (21/6) όπως επίσης και την μέγιστη τιμή της (21/12). Επιπλέον έχει υπολογιστεί το αντίστοιχο ύψος του ήλιου για κάποιες χαρακτηριστικές τιμές της αέριας μάζας, ώστε να ποσοτικοποιηθεί καλύτερα η ετήσια μεταβολή της. Έχουν επιλεγεί δύο τοποθεσίες, μία στην Ελλάδα και συγκεκριμένα η Θήβα, η οποία έχει γεωγραφικό πλάτος ίσο με $38,32^\circ$, ενώ η άλλη τοποθεσία είναι το Παρίσι, το οποίο έχει γεωγραφικό πλάτος ίσο με $48,85^\circ$. Αυτό έγινε για να επιτευχθεί κατευθείαν σύγκριση των δύο περιοχών ώστε να αναδειχτεί ο ρόλος του γεωγραφικού πλάτους μιας τοποθεσίας στις τιμές της αέριας μάζας. Πράγματι, από τα σχήματα καταλαβαίνουμε ότι όσο πιο βόρεια είναι μια τοποθεσία, τόσο αυξάνεται ο δείκτης αέριας μάζας, που σημαίνει ότι οι ηλιακές ακτίνες διασχίζουν περισσότερη ατμόσφαιρα, με ότι αυτό συνεπάγεται αναφορικά με το πόσο της ηλιακής ενέργειας που φτάνει στην επιφάνεια της γης. Θυμίζουμε ότι όλοι οι υπολογισμοί που έγιναν για τα παρακάτω σχήματα αφορούν το ηλιακό μεσημέρι της κάθε ημέρας που αναφέρεται.



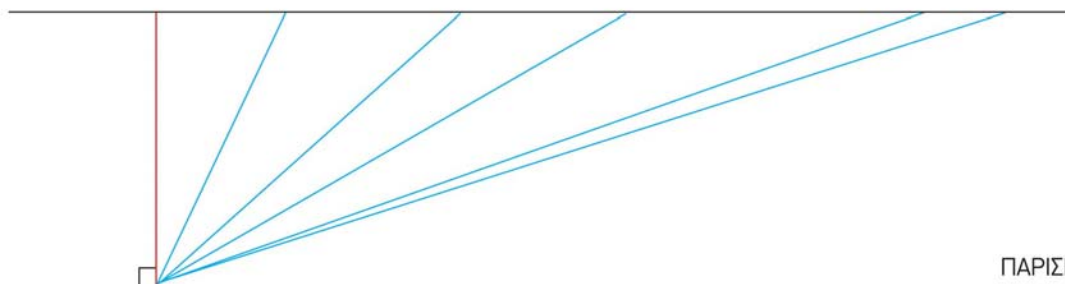
AM	21/6	13 5&30/8	25/2&16/2	19/1&7/12	21/12
Υψος (°)	1,034	1,15	1,5	2	2,114
	75,12	60,35	41,39	30	28,2



Εικ. 3.4 : Μεταβολή της Αέριας Μάζας κατά την διάρκεια του έτους για την Θήβα Βοιωτίας



AM	21/6	24/3&19/9	21/2&19/10	12/1& 28/11	21/12
Υψος (°)	1,107	1,5	2	3	3,28
	64,7	41,89	30	19,475	17,7



Εικ. 3.5 : Μεταβολή της Αέριας Μάζας κατά την διάρκεια του έτους για το Παρίσι

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ : ΠΡΟΣΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

4.1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αποδοτικότητα μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης έχει προφανή σχέση με την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η ποσότητα αυτή, με την σειρά της, εξαρτάται ισχυρά από την θέση του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Με τον όρο 'θέση' εννοούμε όχι μόνο το συγκεκριμένο σημείο πάνω στην γήινη σφαίρα, αλλά και τον προσανατολισμό του πλαισίου, την θέση του σε σχέση με τον ήλιο, όπως επίσης και η σχετική θέση των εγκατεστημένων πλαισίων μεταξύ τους. Αυτοί οι παράγοντες θα μελετηθούν και θα αναλυθούν στο παρόν κεφάλαιο. Αρχικά, παρατίθεται μια μελέτη των παραγόντων αυτών αποκλειστικά για σταθερά φωτοβολταϊκά πλαίσια. Ακολούθως, γίνεται αναφορά και σε μη σταθερά φωτοβολταϊκά πλαίσια, τους τρόπους λειτουργίας τους, τις διαφορές τους, όπως και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που προσφέρουν.

4.2. ΣΤΑΘΕΡΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ

4.2.1. Προσανατολισμός

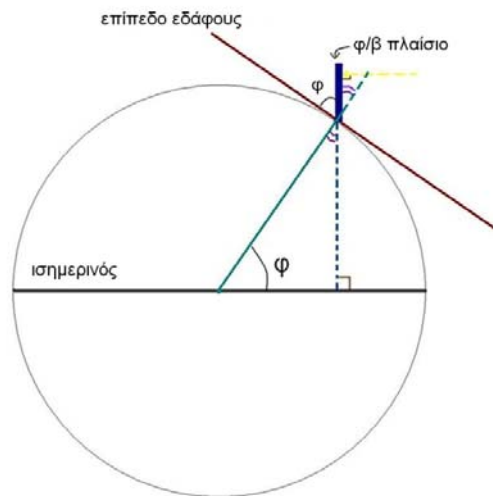
Ο σωστός προσανατολισμός του φωτοβολταϊκού πλαισίου μπορεί να αυξήσει αρκετά την ποσότητα της προσλαμβάνουσας ακτινοβολίας. Η σωστή τοποθέτηση απαιτεί την εκμετάλλευση όσο το δυνατόν περισσότερης ηλιακής ενέργειας, λόγω περισσότερων και αποδοτικότερων ωρών ηλιοφάνειας. Οι αποδοτικότερες ώρες ηλιοφάνειας είναι αυτές περίξ του ηλικάκου μεσημεριού, όπου ο ήλιος έχει το μέγιστο ύψος, οπότε η ακτινοβολία που προσλαμβάνει η τοποθέσια στην γη, γίνεται μέγιστη. Επομένως, ένα σταθερό φωτοβολταϊκό πλαίσιο πρέπει να είναι προσανατολισμένο προς το ηλιακό ζενίθ, κατά το οποίο η αζιμουθιακή γωνία είναι πάντα μηδέν. Ο κατάλληλος προσανατολισμός του πλαισίου ως προς τον άξονα βορρά-νότου σχετίζεται με την γωνία που σχηματίζει το ζενίθ της ηλιακής τροχιάς σε μια τοποθεσία με το ζενίθ της τοποθεσίας καθ' αυτής. Αν το ζενίθ της τοποθεσίας βρίσκεται βορειότερα από το ζενίθ του ήλιου, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι

αποδοτικότερα αν προσανατολισθούν προς νότο, και αντιστρόφως. Το που θα είναι το ζενίθ της ηλιακής τροχιάς εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας. Έτσι, στις περιοχές βορειότερα του τροπικού του καρκίνου, (τις λεγόμενες εύκρατες βόρειες), το ηλιακό μεσημέρι είναι πάντα προς τον νότο. Αντίστροφα, στις περιοχές νοτιότερα του τροπικού του αιγόκερω, το ηλιακό μεσημέρι είναι πάντα προς τον βορρά. Στις ενδιάμεσες τροπικές περιοχές η σχετική θέση μεταβάλλεται ανάλογα με την εποχή, αλλά πάντως το ύψος του ήλιου (κατά το ηλιακό μεσημέρι) είναι πάντα μεγάλο, δηλαδή ο ήλιος είναι ψηλά στον ουρανό. Όσον αφορά την Ελλάδα, που ανήκει στην βόρεια εύκρατη ζώνη, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι πάντα τοποθετημένα προς τον νότο, και αυτή είναι η πιο συμφέρουσα διάταξη για όλες τις εποχές του χρόνου.

4.2.2. Γωνία κλίσης

Σχετικά με την γωνία κλίσης του πλαισίου, η κατάλληλη γωνία για μέγιστη απορρόφηση ακτινοβολίας διαφέρει ανά εποχή, καθώς αλλάζει το ύψος του ηλίου. Για σταθερά φωτοβολταϊκά πλαίσια, η βέλτιστη γωνία κλίσης είναι περίπου όση το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί, αν αναλογιστούμε την ετήσια κίνηση της γης ως προς τον ήλιο. Ως γνωστόν, η ηλιακή απόκλιση μιας τοποθεσίας ακολουθεί μια περιοδική μεταβολή, με χρόνο περιόδου ένα έτος. Έτσι, για κάθε τοποθεσία του βορείου ημισφαιρίου, η ηλιακή απόκλιση κατά το θερινό ηλιοστάσιο λαμβάνει την υψηλότερη τιμή (+23.45 °) και ακολούθως μειώνεται μέρα με την μέρα, ωσότου να λάβει την μικρότερη τιμή της (-23.45 °) κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο. Κατόπιν, η ηλιακή απόκλιση αυξάνεται και πάλι μέχρι να ξαναφτάσει την μέγιστη τιμή της. Επομένως, κατά την περίοδο ενός έτους, και λόγω της ομαλής μεταβολής της ηλιακής απόκλισης από μέρα σε μέρα, μπορεί να θεωρηθεί ότι η μέση ηλιακή απόκλιση μιας τοποθεσίας, είναι μηδέν. Θυμίζουμε ότι για μηδενική ηλιακή απόκλιση, οι ακτίνες του ηλίου είναι παράλληλες με το επίπεδο του ισημερινού της γης. Όμως το επίπεδο που ορίζει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο με γωνία κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος είναι κάθετο προς το επίπεδο του

ισημερινού. Αυτό γίνεται αντιληπτό αν αναλογιστούμε ότι η ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με ένα σημείο στην επιφάνειά της είναι κάθετη προς το εφαπτόμενο επίπεδο στο σημείο αυτό. Επιπλέον, η ευθεία αυτή ορίζει με το επίπεδο του ισημερινού γωνία ίση με αυτή που ορίζει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο με το εφαπτόμενο επίπεδο (ίση με το γεωγραφικό πλάτος). Καθώς οι δυο γωνίες είναι ίσες και οι δυο πλευρές των είναι κάθετες μεταξύ τους, έπεται ότι και οι άλλες δυο πλευρές τους είναι κάθετες μεταξύ τους.



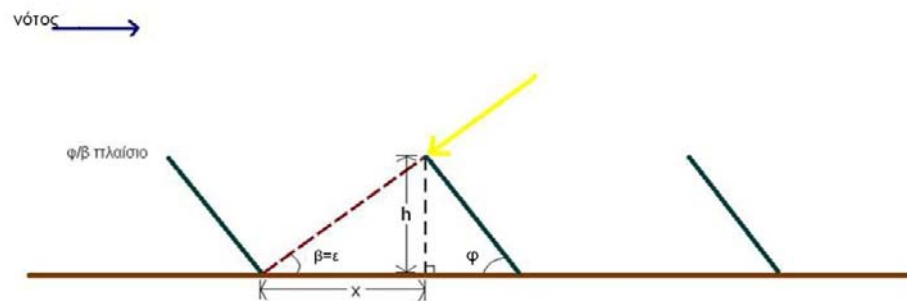
Εικ. 4.1 : Το επίπεδο ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου με γωνία κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας είναι κάθετο στο επίπεδο του ισημερινού

Συνεπώς, αν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι τοποθετημένο με γωνία κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας, οι ακτίνες του ηλίου προσκρούουν κάθετα στην επιφάνειά του, όταν η ηλιακή απόκλιση είναι μηδέν. Γνωρίζοντας ότι η κάθετη πρόσκρουση σε μια επιφάνεια είναι η αποδοτικότερη από πλευράς πρόσληψης ενέργειας, γίνεται εμφανές ότι μια γωνία κλίσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής, αποτελεί την βέλτιστη επιλογή. Σημειώνεται ότι αν η γωνία λήψης των ηλιακών ακτινών από ένα πλαίσιο είναι ακριβώς η ορθή, δημιουργούνται έντονα ανακλαστικά φαινόμενα και η απόδοση δεν είναι η αναμενόμενη. Αυτός είναι ο λόγος που η γωνία κλίσης ενός

φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος, και όχι ακριβώς ίση.

4.2.3. Σχετική θέση των πλαισίων μεταξύ τους

Εφόσον καθοριστεί ο προσανατολισμός και η γωνία κλίσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, πρέπει να διερευνηθεί το πρόβλημα της διάταξης πολλών φωτοβολταϊκών πλαισίων μαζί. Κι αυτό γιατί σε έναν περιορισμένο χώρο, όπως μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, το κάθε πλαίσιο, με την σκιά που απλώνει όταν φωτίζεται, σκιάζει τα υπόλοιπα πλαίσια, επηρεάζοντας έτσι την απόδοσή τους. Η πιθανότητα ένα πλαίσιο να ρίχνει την σκιά του στην επιφάνεια κάποιου άλλου, αυξάνεται αν αυξηθεί το μέγεθος των πλαισίων και μειώνεται όσο μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ τους.



Εικ.4.2 : Για γωνίες ύψους ήλιου μεγαλύτερες της ϵ , το φωτοβολταϊκό πλαίσιο δεν επηρεάζεται από την σκιά του μπροστινού του

Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2, για μια ελάχιστη γωνία ύψους του ήλιου και μετά, η σκιά εξαλείφεται εντελώς και οι ηλιακές ακτίνες καλύπτουν ολόκληρη την οθόνη του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Στην οριακή περίπτωση όπου η σκιά ενός

μπροστινού πλαισίου μόλις που δεν καλύπτει το επόμενο, η γωνία του ύψους του ήλιου έχει μια ορισμένη τιμή, η οποία εκφράζεται μέσω της εφαπτομένης της, που ισούται με x/h , όπου x, h τα μεγέθη που φαίνονται στην εικόνα 4.2.

Η ποσότητα x/h είναι λοιπόν η εφαπτομένη του ελάχιστου ύψους του ήλιου, για να έχουμε πλήρη κάλυψη του πλαισίου από τον ήλιο. Επιπλέον, είναι μία καλή έκφραση για την απόσταση μεταξύ των πλαισίων, όταν είναι δεδομένο το μέγεθος και η γωνία κλίσης τους. Υπο αυτή την έννοια, δείχνει πόσο 'αραιή' είναι η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση και σχετίζεται με την καλύτερη εκμετάλλευση ενός δεδομένου χώρου.

Το ύψος του ήλιου διαφέρει από εποχή σε εποχή, αλλά και από τόπο σε τόπο. Πιο συγκεκριμένα, η διαφοροποίηση από τόπο σε τόπο συναρτάται ισχυρά από το γεωγραφικό πλάτος των περιοχών, αφού ανάλογα με αυτό, αλλάζει και η σχετική θέση με τον ήλιο. Η τροχιά του ήλιου έχει μεγαλύτερο ύψος σε περιοχές κοντά στον ισημερινό, ενώ αυτό μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε προς τους πόλους. Τις επιπτώσεις αυτού του γεγονότος μπορούμε να κατανοήσουμε καλύτερα εάν εκφράσουμε την ποσότητα x/h συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους και λοιπών παραμέτρων, και αποκτήσουμε έτσι μια ποσοτική επισκόπηση του θέματος.

Για τον υπολογισμό του ύψους του ήλιου συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους, ο ακόλουθος τύπος χρησιμοποιείται (όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 2.4.6):

$$\sin\beta = \sin\delta * \sin\phi + \cos\delta * \cos\phi * \cos\omega$$

Όπου:

β : το ύψος του ήλιου

δ : η ηλιακή απόκλιση για την δεδομένη ημέρα του χρόνου

ϕ : το γεωγραφικό πλάτος

ω : η γωνία ώρας την συγκεκριμένη στιγμή της μέρας

Θυμίζουμε ότι η ηλιακή απόκλιση είναι η γωνία που σχηματίζει το επίπεδο του ισημερινού της γης με την ευθεία που ενώνει τα κέντρα γης-ηλίου. Η γωνία δ είναι διαφορετική για κάθε μέρα του χρόνου και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\delta = 23,45^\circ * \sin [(360/365) * (DoY + 284)]$$

Όσο για την γωνία ώρας, αυτή εκφράζει την χρονική απόσταση (αντιστοιχισμένη σε μοίρες) του ήλιου από το ζενίθ της τροχιάς του. Όπως εύκολα συνάγεται από τον σχετικό τύπο, το ύψος του ήλιου είναι το ίδιο για αντίθετες τιμές της γωνίας ω , δηλαδή η φαινόμενη ηλιακή τροχιά είναι συμμετρική ως προς τον άξονα βορρά-νότου. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο συμπέρασμα για τους υπολογισμούς της διάρκειας πλήρους κάλυψης. Καθώς η γωνία ώρας είναι γραμμική συνάρτηση της ηλιακής ώρας, όπως αυτή υπολογιζόταν στην παράγραφο 2.4.3, έπεται ότι για ισαπέχουσες ώρες από το μεσημέρι -για παράδειγμα, τη δέκατη πρωινή και τη δεύτερη απογευματινή-, ο ήλιος έχει το ίδιο ύψος. Φυσικά, οι ώρες αυτές δεν είναι οι τοπικές αλλά οι ηλιακές.

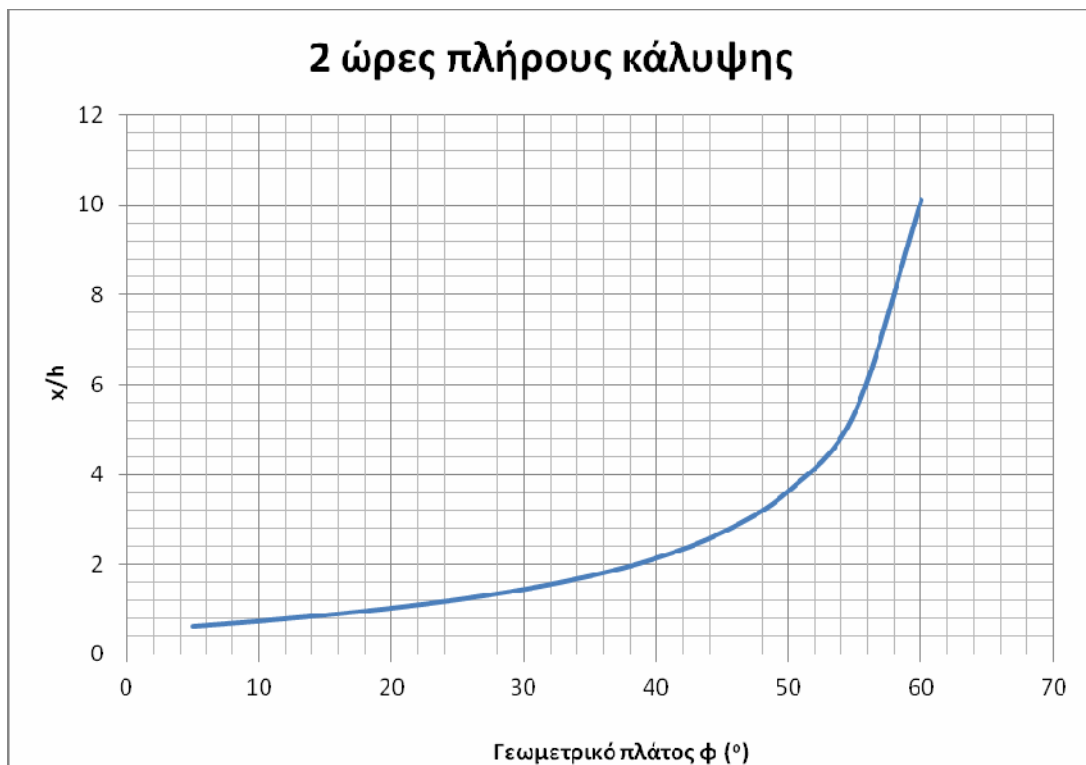
Επομένως, αν για μια δεδομένη προμεσημβρινή ώρα, το ύψος του ήλιου γίνεται αρκετά μεγάλο ώστε να παρέχει πλήρη κάλυψη στο φωτοβολταϊκό πάνελ, την αντίστοιχη -ισαπέχουσα από το ηλιακό μεσημέρι- μεταμεσημβρινή ώρα το ύψος του ήλιου θα γίνεται αρκετά μικρό ώστε να μην είναι πια δυνατή η λειτουργία υπό πλήρη κάλυψη. Όλες τις ενδιάμεσες ώρες, οι ακτίνες του ήλιου θα καλύπτουν εξ' ολοκλήρου το πάνελ. Η αζιμουθιακή γωνία είναι πάντα μηδέν, καθώς τα πλαίσια είναι σταθερά προσανατολισμένα προς τον νότο.

Η ώρα που αρχίζει η πλήρης κάλυψη για δεδομένη γεωμετρία και τοποθεσία, είναι μεταβλητή από μέρα σε μέρα. Όσο ο ήλιος ακολουθεί τροχιές ψηλά στον ουρανό, δηλαδή το καλοκαίρι, τόσο αυξάνονται οι ώρες πλήρους κάλυψης. Αντίστοιχα, τον χειμώνα που ο ήλιος είναι πιο χαμηλά στον ουρανό, η σκίαση διαρκεί πιο πολύ. Συγκεκριμένα, κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο, στις 21/12, το ύψος της τροχιάς του ήλιου είναι το μικρότερο στο έτος, οπότε όσον αφορά τις ώρες πλήρους κάλυψης, αυτή η μέρα είναι η λιγότερο αποδοτική. Συνεπώς, όλοι οι παρακάτω υπολογισμοί θα αφορούν το χειμερινό ηλιοστάσιο, ούτως ώστε να καλυφθεί η χειρότερη δυνατή

περίπτωση από πλευράς απόδοσης. Για την συγκεκριμένη μέρα, η ηλιακή απόκλιση παίρνει την ανώτατη τιμή της και ισούται με $\delta=23,45^\circ$.

Γνωρίζοντας αυτά, μπορεί να μελετήσουμε καλύτερα την επίδραση του γεωγραφικού πλάτους στην σχετική θέση των φωτοβολταϊκών πάνελ.

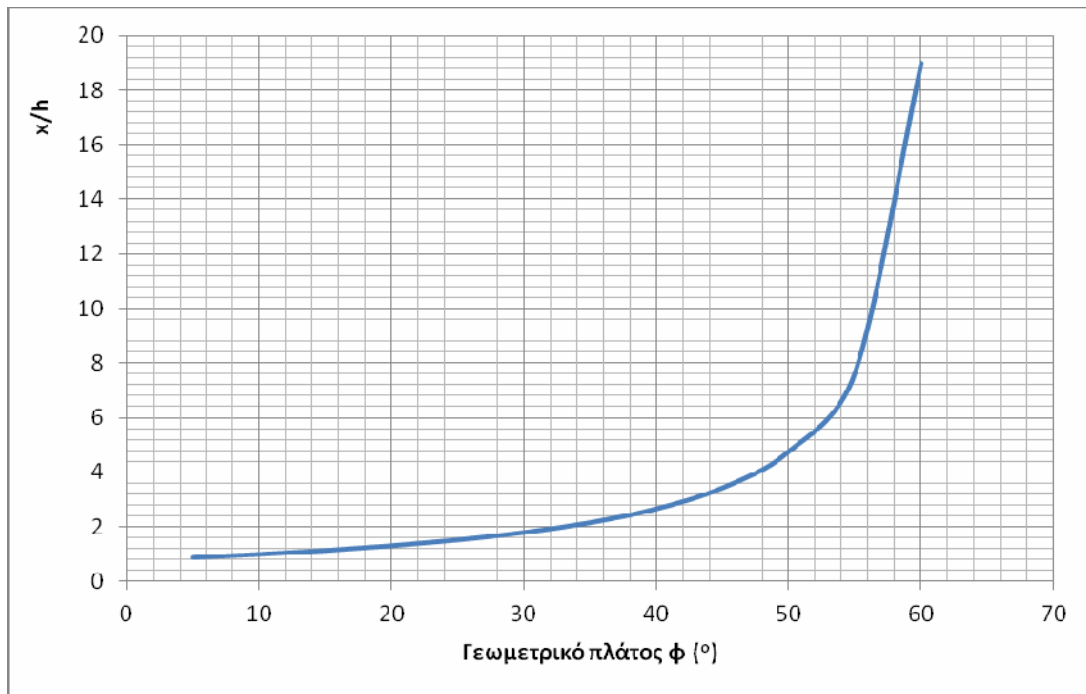
Αρχικά, θεωρούμε ως ελάχιστη απαιτούμενη απόδοση τις δύο ώρες πλήρους κάλυψης. Αυτό σημαίνει ότι η πλήρης κάλυψη ξεκινάει στις 11 και τελειώνει στη 1, ηλιακές ώρες αμφότερες. Τότε, αν γίνουν οι υπολογισμοί, προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα (Εικ.4.3).



Εικ. 4.3 : Μεταβολή του x/h συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους για 2 ώρες πλήρους κάλυψης κατά την 21/12

Παρατηρούμε (Εικ.5.3) ότι, για το βόρειο ημισφαίριο, όσο αυξάνει το γεωγραφικό πλάτος τόσο μειώνεται η απόδοση μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, Αυτό γίνεται εμφανές αν δούμε την αύξηση του παράγοντα x/h . Όπως είναι γνωστό, όσο η τιμή αυτή ανεβαίνει, έπεται ότι το ένα εγκατεστημένο πλαίσιο είναι πιο απομακρυσμένο από το άλλο, συνεπώς σε πεπερασμένο εμβαδό, πιο λίγα πλαίσια τοποθετούνται συνολικά.

Τα ίδια ποιοτικά χαρακτηριστικά μπορούμε να παρατηρήσουμε, αν απαιτήσουμε τουλάχιστον 4 ώρες πλήρους κάλυψης, κάθε μέρα.

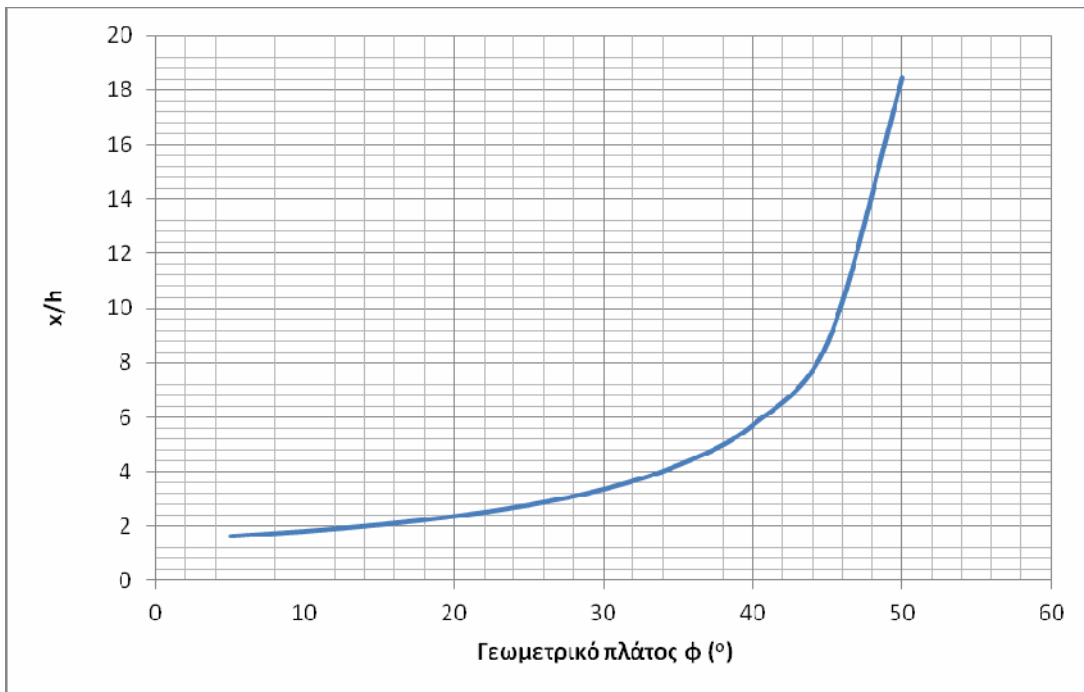


Εικ. 4.4 : Μεταβολή του x/h συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους για 4 ώρες πλήρους κάλυψης κατά την 21/12

Και εδώ (Εικ.4.4) βλέπουμε ότι όσο αυξάνει το γεωμετρικό πλάτος, η απόσταση μεταξύ των πλαισίων για να τηρείται η συνθήκη τεσσάρων ωρών πλήρους κάλυψης γίνεται απαγορευτική. Συγκεκριμένα, για περιοχές γεωγραφικού πλάτους 55° , το

x/h ισούται περίπου με 8, ενώ αν μετακινηθούμε μόλις 5 μοίρες βορειότερα, το x/h εκτοξεύεται στο 18. Είναι φανερό ότι για γεωγραφικά πλάτη μεγαλύτερα των $55^\circ - 60^\circ$ οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις δεν είναι διόλου αποδοτικές.

Παρακάτω (Εικ. 4.5), θεωρώντας 6 ώρες πλήρους κάλυψης, δηλαδή από τις 9 το πρωί μέχρι τις 3 το μεσημέρι (ηλιακές ώρες), έχουμε :

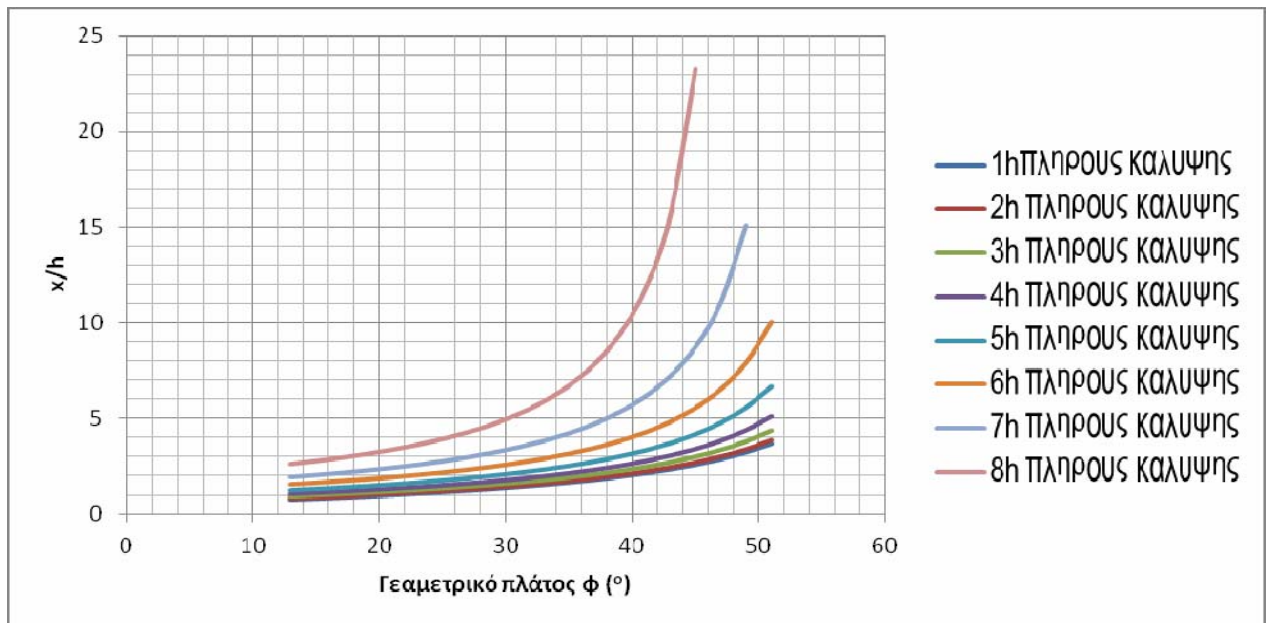


Εικ. 4.5 : Μεταβολή του x/h συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους για 6 ώρες πλήρους κάλυψης κατά την 21/12

Οι καμπύλες και στα τρία διαγράμματα (Εικ. 4.3, 4.4, 4.5) έχουν κοινά χαρακτηριστικά. Όλες είναι γνησίως αύξουσες, αλλά, αρχικά η κλίση τους είναι μικρή. Πράγματι, σε κάθε καμπύλη, οι περιοχές που βρίσκονται νοτιότερα, είναι λιγότερο ευαίσθητες στην μεταβολή του γεωγραφικού πλάτους. Από ένα σημείο και μετά όμως, το οποίο σημείο μπορεί να εκφραστεί και ως το 'γόνατο' της καμπύλης, η μεταβολή είναι εντεινόμενη, και μετά από λίγο ραγδαία. Στο παραπάνω διάγραμμα (Εικ.4.5), παρατηρούμε ότι ο λόγος x/h παραμένει μικρότερος από 4

μέχρι τις 34 μοίρες περίπου, και μικρότερος από 6 μέχρι τις 40 μοίρες. Παρόλ' αυτά, στις 50 μοίρες γεωγραφικού πλάτους, δηλαδή 10 μοίρες βορειότερα, η ποσότητα x/h έχει τριπλασιαστεί και φτάνει το 18.

Για ευρύτερη οπτική, μπορούμε να υπερθέσουμε τα διαφορετικά, ανάλογα με τις ελάχιστες ώρες πλήρους κάλυψης, διαγράμματα στους ίδιους άξονες.



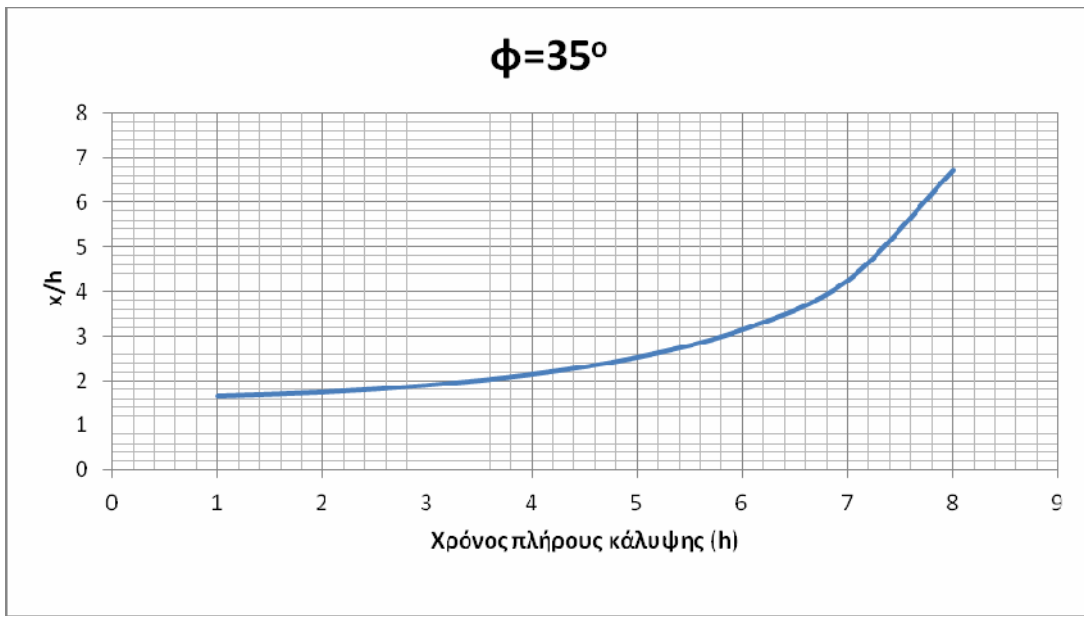
Εικ. 4.6 : Μεταβολή του x/h συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους για διαφορετικές ώρες πλήρους κάλυψης κατά την 21/12

Με μια συνολική επισκόπηση των καμπύλων του διαγράμματος της εικόνας 4.6, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι για γεωγραφικά πλάτη περίπου 40° (ένας παράλληλος που περνάει και από την Ελλάδα, λίγο πιο βόρεια από την Αθήνα) και κάτω, η απόδοση του φωτοβολταϊκού είναι αρκούντως ικανοποιητική, καθώς τα αντίστοιχα σημεία δεν ξεπερνάνε ποτέ το γόνατο της καμπύλης. Έτσι, η ποσότητα x/h δεν παίρνει απαγορευτικά μεγάλες τιμές. Συγκεκριμένα, παραμένει κάτω από 5 ακόμα και αν απαιτηθούν 6 ώρες πλήρους κάλυψης, κατά την διάρκεια της 21^{ης} Δεκεμβρίου, με τον χρόνο αυτό να αυξάνεται τις υπόλοιπες μέρες του χρόνου.

Επιπρόσθετα, για τα ίδια πλάτη η επίτευξη 4 ώρων τουλάχιστον, πλήρους κάλυψης κάθε μέρας, είναι δυνατή για εγκαταστάσεις όπου η απόσταση των πλαίσιων δεν ξεπερνά τα 3 μέτρα.

Παρατηρείται επίσης, η επίδραση που έχουν οι απαιτούμενες ώρες πλήρους κάλυψης, ανεξαρτήτως γεωγραφικού πλάτους. Φαίνεται λοιπόν ότι όσο αυξάνουν οι απαιτήσεις σε ώρες πλήρους κάλυψης, τόσο αυξάνει όχι μόνο το x/h , αλλά και ο ρυθμός αύξησης του τελευταίου. Πράγματι, η καμπύλη που αντιστοιχεί στις 8 ώρες πλήρους κάλυψης είναι αρκετά απομακρυσμένη σε σχέση με τις υπόλοιπες, πράγμα που δείχνει ότι η απαίτηση για τόσες ώρες πλήρους ηλιοφάνειας είναι μάλλον υπερβολική. Αντίθετα, οι καμπύλες που αντιστοιχούν στις 5 ώρες και λιγότερο, έχουν μικρή διαφορά μεταξύ τους, για αυτό το εύρος γεωγραφικού πλάτους. Για να επιβεβαιωθεί ο συλλογισμός, μπορεί να σχεδιασθεί το κατάλληλο διάγραμμα που να δείχνει την ακριβή επίδραση των απαιτούμενων ωρών πλήρους κάλυψης, στην απόσταση τοποθέτησης των πλαίσιων, για συγκεκριμένο γεωγραφικό πλάτος.

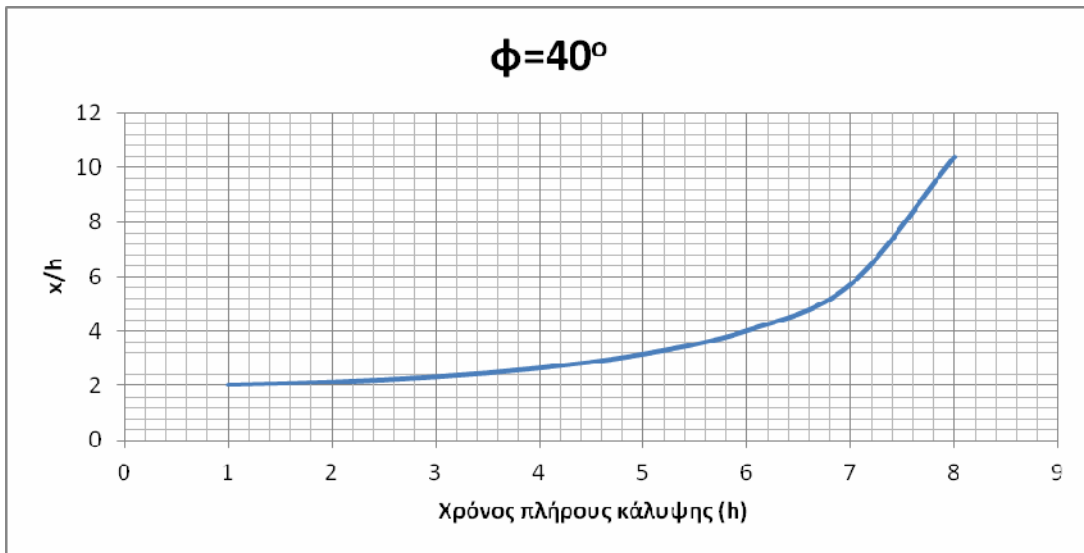
Το παρακάτω διάγραμμα (Εικ.4.7) δείχνει την μεταβολή της ποσότητας x/h συναρτήσει του χρόνου πλήρους κάλυψης, για το γεωγραφικό πλάτος των 35° .



Εικ. 4.7 : Μεταβολή του x/h συναρτήσει της διάρκειας πλήρους κάλυψης κατά την 21/12, για γεωγραφικό πλάτος 35°

Παρατηρείται, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι όσο πιο πολλές ώρες πλήρους κάλυψης απαιτούμε, τόσο αυξάνει ο λόγος x/h , δηλαδή τόσο μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ των πλαισίων δεδομένου ύψους,. Παρόλ' αυτά, η εν λόγω απόσταση παραμένει σε σχετικά μικρές τιμές, που σημαίνει ότι οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις σε τέτοιο γεωγραφικό πλάτος είναι αρκούντως αποδοτικές.

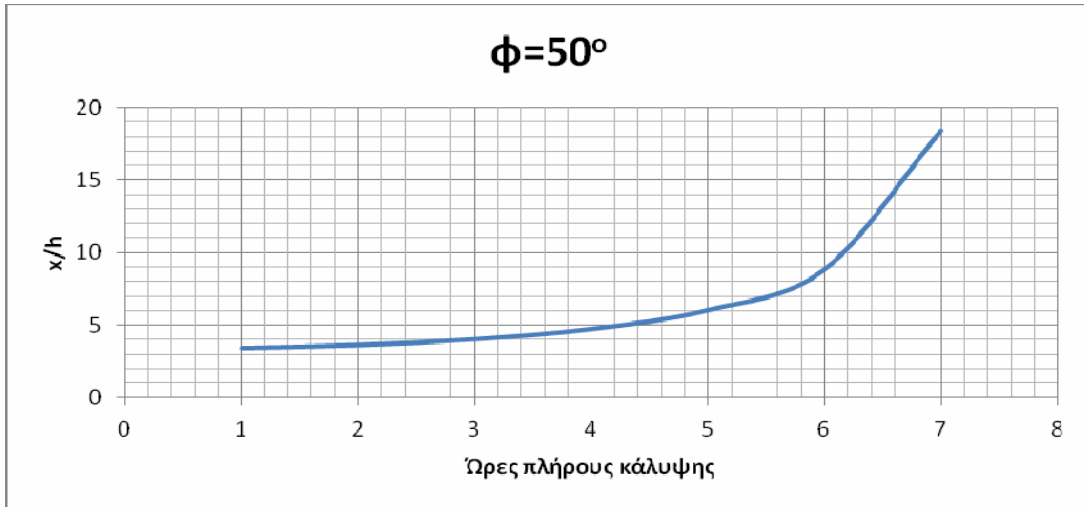
Παρακάτω, παρατίθεται το αντίστοιχο διάγραμμα (Εικ.4.8) που αφορά περιοχές με γεωγραφικό πλάτος ίσο με 40 μοίρες. Θυμίζουμε ότι ο παράλληλος των 40 μοιρών διέρχεται και από την Ελλάδα.



Εικ. 4.8 : Μεταβολή του x/h συναρτήσει της διάρκειας πλήρους κάλυψης κατά την 21/12, για γεωγραφικό πλάτος 40 μοιρών

Παρατηρούμε ότι μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση σε αυτό το πλάτος είναι αρκετά συμφέρουσα, καθώς το κάθε πλαίσιο μπορεί να εκμεταλλεύεται καθημερινά αρκετές ώρες ηλιοφάνειας στο σύνολο της επιφανείας του, χωρίς να τοποθετείται πολύ μακριά σε σχέση με τα άλλα πλαίσια. Συγκεκριμένα, εάν πλαίσια με κατακόρυφο ύψος ενός μέτρου τοποθετηθούν σε απόσταση περίπου τεσσάρων μέτρων το ένα από το άλλο, είναι εγγυημένο ότι θα εκμεταλλεύονται τουλάχιστον 6 ώρες ηλίου, όλες τις ημέρες του χρόνου, αν κι εφόσον οι μέρες είναι ηλιόλουστες. Αντίθετα, αν απαιτηθούν περισσότερες ώρες πλήρους κάλυψης, η απόσταση μεταξύ των πλαισίων μεγαλώνει με απότομους ρυθμούς .

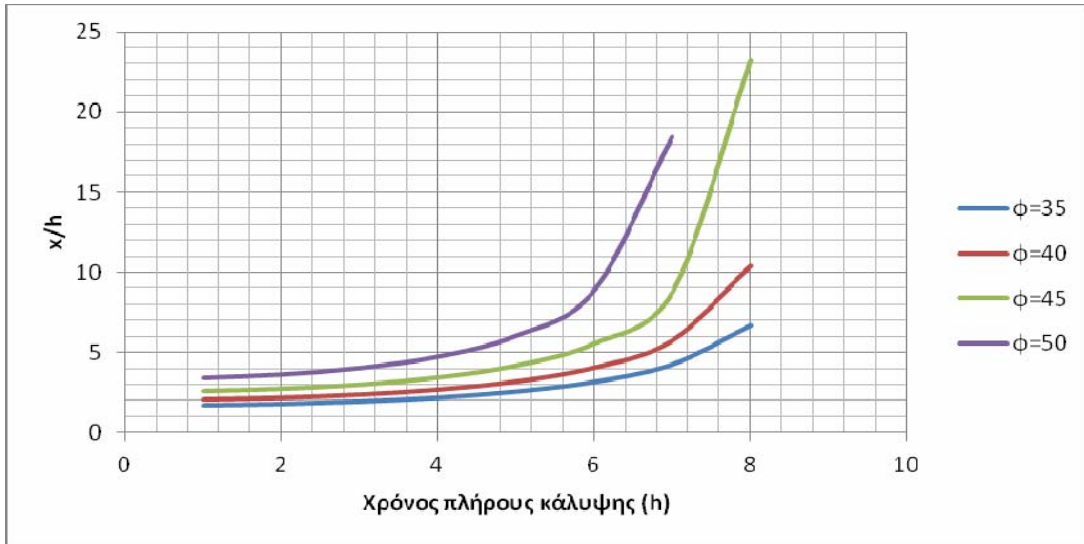
Ακολούθως (Εικ. 4.9), δίνεται η καμπύλη που παριστάνει την συνάρτηση του λόγου x/h με τις ώρες πλήρους κάλυψης ενός φωτοβολταϊκού πάνελ, όταν το γεωγραφικό πλάτος είναι 50 μοίρες.



Εικ. 4.9 : Μεταβολή του x/h συναρτήσει της διάρκειας πλήρους κάλυψης κατά την 21/12, για γεωγραφικό πλάτος 50 μοιρών

Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι περιοχές με γεωγραφικό πλάτος πενήντα μοιρών δεν είναι κατάλληλες για αποδοτικές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις. Ο λόγος x/h γίνεται αρκετά μεγάλος ακόμη και αν απαιτηθούν λίγες ώρες ηλιοφάνειας. Για την ακρίβεια, για να είναι δυνατή η απορρόφηση ηλιακής ενέργειας από όλη την επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου για τουλάχιστον 4 ώρες για κάθε ημέρα του χρόνου, ο λόγος x/h πρέπει να είναι περίπου 5, όταν για γεωγραφικό πλάτος 40 μοιρών ο αντίστοιχος λόγος (και άρα και η απόσταση των εγκατεστημένων πλαισίων) είναι περίπου ο μισός. Αξίζει να αναφερθεί ότι η απαίτηση για 8 ώρες πλήρους κάλυψης, δεν μπορεί εκ των πραγμάτων να ικανοποιηθεί για τέτοια γεωγραφικά πλάτη.

Παρακάτω (Εικ. 4.10) παρατίθενται οι καμπύλες για διάφορα γεωμετρικά πλάτη στο ίδιο διάγραμμα, για να γίνουν περισσότερο κατανοητές οι διαφορές τους.



Εικ. 4.10 : Μεταβολή του x/h συναρτήσει της διάρκειας πλήρους κάλυψης κατά την 21/12, για διάφορα γεωγραφικά πλάτη

4.3. ΜΗ ΣΤΑΘΕΡΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ

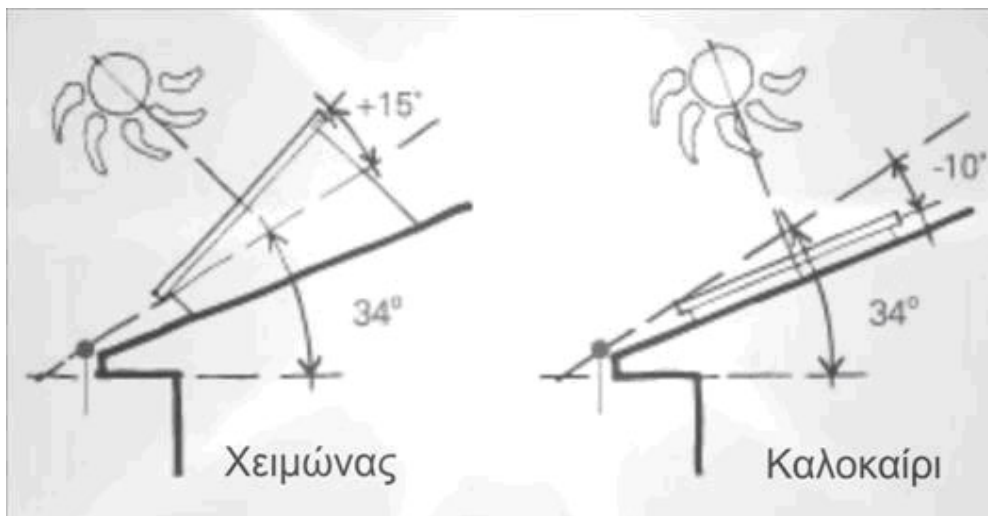
Εκτός από τα σταθερά φωτοβολταϊκά πλαίσια, συγκεκριμένες τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί, που επιτρέπουν πλαίσια των οποίων ο προσανατολισμός προς τον ουρανό να είναι μεταβλητός. Φυσικά αυτό γίνεται προς όφελος της απόδοσης των πλαισίων, καθώς ένας πιο κατάλληλος προσανατολισμός επιτρέπει μεγαλύτερη απορρόφηση ηλιακής ενέργειας. Τα κινητά φωτοβολταϊκά πλαίσια ομαδοποιούνται σε δύο κατηγορίες: σε εκείνα με ρυθμιζόμενη κλίση ανάλογα με την εποχή και στους ηλιακούς ιχνηλάτες.

4.3.1. Φωτοβολταϊκά πλαίσια με εποχιακή κλίση

Τέτοιου είδους πλαίσια επιτρέπουν την μεταβολή της γωνίας κλίσης ανάλογα με την εποχή, ούτως ώστε να αυξάνεται η απόδοση. Το μηχανολογικό μέρος της αλλαγής κλίσης είναι αρκετά απλό ώστε να μπορεί να το κάνει ο χρήστης από μόνος του,

χωρίς την βοήθεια κάποιου ειδικού. Για να είναι ωφέλιμη η αλλαγή γωνίας, θα πρέπει η επιφάνεια του πλαισίου να προσανατολίζεται ως προς τον ήλιο έτσι ώστε να λαμβάνει τις ακτίνες του τελευταίου υπό γωνία όσο το δυνατόν εγγύτερα της ορθής.

Η ρύθμιση της γωνίας κλίσης του συλλέκτη γίνεται δύο φορές τον χρόνο, μία κατά την έναρξη του χειμερινού εξαμήνου, περίπου στα τέλη του Σεπτεμβρίου, δηλαδή μετά την φθινοπωρινή ισημερία, και μία στις αρχές του θερινού εξαμήνου, κατά την εαρινή ισημερία στις 21 Μαρτίου. Η βέλτιστη γωνία κλίσης για τον χειμώνα είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής αυξημένο κατά 10-15 μοίρες περίπου. Πράγματι, εφόσον κατά την διάρκεια του χειμώνα η τροχιά του ηλίου καταλαμβάνει μικρότερα ύψη, μία αύξηση της γωνίας κλίσης επιτρέπει την συλλογή ηλιακού φωτός υπό αποδοτικότερη γωνία. Αντίστοιχα, κατά την διάρκεια του θέρους, η βέλτιστη γωνία κλίσης του συλλέκτη είναι το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας μειωμένο κατά 10-15 μοίρες, για τους ίδιους ακριβώς λόγους, καθώς κατά το καλοκαίρι, το ύψος της τροχιάς του ηλίου είναι το μεγαλύτερο μέσα στην περίοδο του έτους.



Εικ. 4.11 : Φωτοβολταϊκό πλαίσιο με εποχιακή κλίση

Φυσικά, το όλο σύστημα μπορεί να γίνει ακόμη πιο αποδοτικό αν επιτρέπονται 3 ή και περισσότερες ρυθμίσεις της γωνίας κλίσης κατά την διάρκεια ενός έτους. Αυτό επιτρέπει στο συλλέκτη να προσαρμόζεται ακόμη καλύτερα στα εποχιακά δεδομένα της τροχιάς ήλιου και να προσεγγίζει περισσότερο την κάθετο, όσον αφορά την γωνία λήψης των ηλιακών ακτίνων.

4.3.2. Ηλιακοί ιχνηλάτες

Όπως είδαμε από τα παραπάνω, όταν η γωνία υπό την οποία η επιφάνεια ενός συλλέκτη απορροφά τις ηλιακές ακτίνες, προσεγγίζει την κάθετο, τόσο μεγαλώνει η απόδοση του συλλέκτη και η συνολική απορρόφηση ενέργειας. Φυσικά, η βέλτιστη απορρόφηση συμβαίνει όταν οι ηλιακές ακτίνες προσκρούουν εντελώς κάθετα στην επιφάνεια του συλλέκτη. Με τα είδη στησίματος φωτοβολταϊκών πλαισίων που έχουμε εξετάσει παραπάνω, αυτό συμβαίνει σπάνια. Πράγματι, τόσο στα σταθερά φωτοβολταϊκά πλαίσια, όσο και σε αυτά με εποχιακή ρύθμιση, η γωνία πρόσπτωσης του ηλιακού φωτός σπανίως είναι κάθετη, και αν αυτό συμβεί, πρόκειται να διαρκέσει κάποιες στιγμές μονάχα.

Αντιθέτως, συγκεκριμένες συσκευές έχουν σχεδιασθεί ώστε να εντοπίζουν την θέση του ηλίου στην ουράνια σφαίρα και να στρέφουν το πάνελ προς αυτόν. Αυτές οι συσκευές ονομάζονται ηλιακοί ιχνηλάτες, καθότι εντοπίζουν τα 'ίχνη' του ηλίου, και συνεπώς την θέση του στην ουράνια σφαίρα. Οι ηλιακοί ιχνηλάτες δεν βρίσκουν εφαρμογή μόνο στις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, αλλά και σε διάφορες άλλες συσκευές, όπως θερμικά συστήματα, όργανα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας και λοιπά. Όσον αφορά τις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, προσφέρουν μια αύξηση της απόδοσης της τάξεως του 30% με 50%, συγκρινόμενο με τις άλλες τεχνολογίες που έχουν αναλυθεί παραπάνω.

Οι ηλιακοί ιχνηλάτες, ανάλογα με τον τύπο της κίνησης που εκτελούν κατά την λειτουργία τους, ομαδοποιούνται σε 2 κατηγορίες:

-περιστροφή γύρω από έναν άξονα

-περιστροφή γύρω από δύο άξονες

4.3.2.1. Περιστροφή γύρω από έναν άξονα

Οι ηλιακοί ιχνηλάτες της κατηγορίας αυτής έχουν ένα βαθμό ελευθερίας, όσον αφορά την κίνησή τους. Συνήθως, περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα που είναι ευθυγραμμισμένος με τον μεσημβρινό που διέρχεται από τον τόπο εγκατάστασης. Όπως γίνεται κατανοητό, το πάνελ είναι στραμμένο προς την ανατολή τις πρωινές ώρες, και ακολούθως στρέφεται προς την δύση κατά την διάρκεια της μέρας, ακολουθώντας την πορεία του ήλιου. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλιακών ιχνηλατών με έναν βαθμό ελευθερίας.

4.3.2.1.1. Ηλιακοί ιχνηλάτες οριζοντίου άξονα

Σε αυτό τον τύπο, ο άξονας περιστροφής είναι τοποθετημένος οριζόντια σε σχέση με το έδαφος. Αυτός ο τρόπος είναι αρκετά αποδοτικός όσον αφορά τα κόστη της εγκατάστασης, καθώς οι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται ο ένας μετά τον άλλο, επί ενός κοινού άξονα περιστροφής, που απαιτεί στηρίγματα στην αρχή και στο τέλος της σειράς μόνο. Παράλληλα από την μία γραμμή τοποθετούνται κι άλλες, με τον ίδιο τρόπο, λαμβάνοντας υπ' όψιν ποια είναι η κατάλληλη απόσταση μεταξύ του ώστε να μην σκιάζει η μια γραμμή την άλλη. Ο άξονας περιστροφής είναι προσανατολισμένος στον άξονα βορρά-νότου, ενώ η περιστροφή κατά της διάρκεια της μέρας γίνεται από την ανατολή προς την δύση, ακολουθώντας την τροχιά του ήλιου. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ηλιακοί συλλέκτες αυτού του είδους είναι εξόχως αποδοτικοί για μικρά γεωγραφικά πλάτη, δηλαδή περιοχές που είναι πιο κοντά στον ισημερινό, όπου ο ήλιος ακολουθεί τροχιές που προσεγγίζουν το ζενίθ της τοποθεσίας.

4.3.2.1.2. Αζιμουθιακοί ιχνηλάτες

Οι συγκεκριμένοι ιχνηλάτες στρέφονται γύρω από έναν άξονα που είναι κάθετος ως προς το έδαφος. Το σύστημα ακολουθεί την κίνηση του ήλιου, και για την ακρίβεια ταυτίζεται με την αζιμουθιακή γωνία του τελευταίου, ώστε να μεγιστοποιεί την πρόσληψη ενέργειας. Το πάνελ είναι τοποθετημένο υπό γωνία κλίσης που ακολουθεί την λογική που έχουμε ήδη αναφέρει (5.2.2). Ο συγκεκριμένος τρόπος εγκατάστασης είναι πιο αποδοτικός όταν αφορά μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη, εξ' ου και η γωνία κλίσης του συλλέκτη. Τέτοιοι ιχνηλάτες χρησιμοποιούνται στις μονάδες παραγωγής ενέργειας, καθώς οδηγούν σε σημαντική αύξηση της παρεχόμενης ισχύος, σε σχέση με τις ακίνητες εγκαταστάσεις. Συγκεκριμένα, η αύξηση κυμαίνεται μεταξύ 25% και 35%, ανάλογα με την τοποθεσία, τον τρόπο κίνησης και την ιδιαίτερη ποιότητα του συστήματος. Προσοχή πρέπει να δοθεί και στην θέση των πλαισίων σε σχέση με τα άλλα, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια προσλαμβανόμενης ενέργειας λόγω σκίασης, στο διαθέσιμο έδαφος.



Εικ. 4.12 : Αζιμουθιακός ιχνηλάτης

4.3.2.1.3. Ιχνηλάτες κεκλιμένου άξονα περιστροφής.

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν όλοι οι ηλικάοι ιχνηλάτες των οποίων ο άξονας περιστροφής είναι τοποθετημένος σε γωνία ανάμεσα στις 0 (οριζόντιοι ιχνηλάτες) και 90 μοίρες (αζιμουθιακοί ιχνηλάτες). Από όλες τις διαθέσιμες γωνίες και τεχνικές

ιδιαίτερο ενδιαφέρον από πλευράς απόδοσης παρουσιάζει ο πολικός ιχνηλάτης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, το σύστημα περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα παράλληλο με τον πολικό άξονα της γης, τοποθετημένο σε γωνία ίση με το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας. Με αυτό τον τρόπο, ο ήλιος βρίσκεται πάντα σε ένα επίπεδο κάθετο στην επιφάνεια του συλλέκτη. Η ακριβής γωνία πρόσπτωσης του ηλιακού φωτός είναι μεν μεταβλητή, αλλά ποτέ δεν διαφέρει περισσότερο από 23.45° από την κάθετη στον συλλέκτη. Βάσει αυτής της τεχνικής, παρατηρείται αύξηση έως και 40% της παρεχόμενης ενέργειας, ανάλογα με την εποχή του έτους και την τοποθεσία. Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται ευρέως σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και θερμικούς σταθμούς.

4.3.2.2. Περιστροφή σε 2 άξονες

Οι ηλιακοί ιχνηλάτες αυτού του τύπου κατασκευάζονται έτσι ώστε να παρακολουθούν την τροχιά του ήλιου στον ουρανό και να προσανατολίζονται ακριβώς κάθετα ως προς τις ακτίνες του. Για να επιτύχουν την ακριβή ευθυγράμμιση με την θέση του ήλιου, έχουν την ικανότητα να κινούνται σε 2 άξονες, καθένας από τους οποίους αντιστοιχεί και σε καθεμία από τις δύο συντεταγμένες που απαιτεί ο προσδιορισμός της θέσης ενός αντικειμένου στην ουράνια σφαίρα. Ο πρώτος άξονας έχει την ικανότητα να στρέφεται από την ανατολή προς την δύση και έτσι να ευθυγραμμίζεται με την αζιμούθια γωνία του ήλιου, ενώ ο δεύτερος εξισώνεται με την γωνία του ύψους του ήλιου. Απαιτούνται συνεπώς δύο συστήματα κίνησης, ανεξάρτητα το ένα με το άλλο, που δρουν σαν συστοιχία, και για αυτό τον λόγο αυτοί οι ιχνηλάτες είναι πιο πολύπλοκοι από κατασκευαστικής απόψεως, από τους απλούς.

Λόγω της πλήρους ευθυγράμμισης του ιχνηλάτη με την θέση του ήλιου, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι αυτού του είδους οι συσκευές απορροφούν την μέγιστη δυνατή ηλιακή ενέργεια κάθε στιγμή και για όλες τις εποχές του έτους. Ως εκ τούτου, η παραγόμενη ισχύς τους φτάνει το 150% της ισχύος που παράγει ένας

σταθερός συλλέκτης, ενώ η απόδοση του συστήματος προσεγγίζει την μονάδα. Παρολαυτά, ο ηλιακός ιχνηλάτης έχει κάποια άλλα μειονεκτήματα. Λόγω της πολύπλοκης μηχανικής κατασκευής τους και των ευαίσθητων ηλεκτρονικών συστημάτων, είναι πιο ακριβός σε σχέση με τους σταθερούς συλλέκτες, ενώ και το κόστος συντήρησης είναι μεγαλύτερο.

Για την παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο μέθοδοι. Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί ειδικούς αισθητήρες που καθορίζουν την διεύθυνση του ηλιακού φωτός και στρέφουν αναλόγως την επιφάνεια του συλλέκτη. Οι αισθητήρες συνήθως τοποθετούνται στο βάθος ειδικών εσοχών, ώστε να αντιδρούν σύμφωνα με την σκίαση που δημιουργείται πάνω τους και να στρέφονται κατά την κατεύθυνση που ελαχιστοποιεί αυτή την σκίαση. Κατά κανόνα, απαιτούνται τουλάχιστον δύο αισθητήρες για τον καθορισμό καθεμίας από τις συντεταγμένες που ορίζουν την θέση του ήλιου στην ουράνια σφαίρα.

Η δεύτερη μέθοδος κάνει χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών. Για την ακρίβεια, ειδικά προγράμματα υπολογίζουν την ακριβή θέση του ήλιου όταν τους καταχωρηθούν οι συντεταγμένες της τοποθεσίας και η ακριβής ημέρα και ώρα. Έτσι, ο ιχνηλάτης στρέφεται αυτόματα προς τον ήλιο σύμφωνα με τις υπολογισθέντες τιμές του ύψους και του αζιμούθιου. Τέτοιου είδους ιχνηλάτης χρησιμοποιήθηκε ώστε να παρθούν οι μετρήσεις που χρησιμοποιούνται στην παράγραφο 6.6.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ : ΜΕΤΡΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

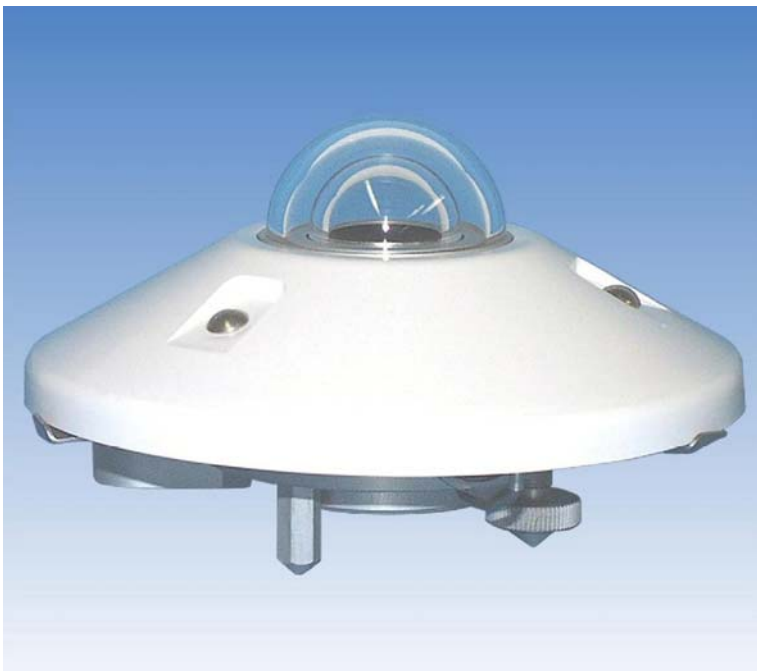
Το κεφάλαιο αυτό αφορά τα όργανα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, εξετάζονται το πυρανόμετρο, το πυρηλιόμετρο, το ακτινόμετρο και το καταγραφικό Campbell-Strokes. Για καθένα από αυτά, αναλύεται η αρχή λειτουργίας του, γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή από την στιγμή της εφεύρεσής του μέχρι σήμερα ώστε να αναδειχτεί η εξέλιξη και η βελτίωσή του με την πάροδο των ετών και αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα, όπως επίσης και τα ειδικά χαρακτηριστικά.

5.2. ΠΥΡΑΝΟΜΕΤΡΟ

Πρόκειται για το πιο διαδεδομένο και αξιόπιστο όργανο μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Το πυρανόμετρο μετρά τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει σε οριζόντια επιφάνεια (G_{global}), δηλαδή συνεκτιμά τον συνδυασμό της άμεσης και της διάχυτης συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας. Η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στους αισθητήρες ροής θερμότητας. Το διαφορικό πυρανόμετρο περιλαμβάνει μια θερμοηλεκτρική στήλη, στην οποία, η διαφορά θερμότητας που παράγει μια μαύρη επιφάνεια που απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με την θερμότητα που παράγει μια λευκή επιφάνεια που ανακλά την ηλιακή ακτινοβολία, δημιουργεί ένα ασθενές αλλά μετρήσιμο ηλεκτρικό σήμα, και μέσω αυτού προσδιορίζεται η ποσότητα ηλιακής ενέργειας

Το πυρανόμετρο εφευρέθηκε από τον Σουηδό φυσικό Anders Knutsson Ångström κατά τον 19^ο αιώνα, και η αρχική διάταξη αποτελούταν από τέσσερις ταινίες μαγγανίου, από τις οποίες οι δυο ήταν μαυρισμένες με πλατινούχο ουσία και οι άλλες δυο ήταν επιστρωμένες με οξείδιο του μαγνησίου ή οξείδιο του ψευδαργύρου. Οι δυο τελευταίες ταινίες θερμαίνονταν, ώσπου η διαφορά θερμοκρασίας να εξισωθεί με την θερμοκρασία των μαυρισμένων ταινιών. Κατόπιν γινόταν μέτρηση της διαφοράς θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας θερμοστοιχεία. Έκτοτε, διάφοροι τύποι πυρανόμετρων έχουν χρησιμοποιηθεί, καθώς προχωρούσε η τεχνολογία.

Το σύγχρονο πυρανόμετρο αποτελείται από μία μαύρη επιφάνεια με κεραμικό υπόστρωμα κάτω από την οποία υπάρχουν εκατοντάδες θερμοστοιχεία λειτουργώντας έτσι σαν θερμικός αισθητήρας. Πέριξ αυτού υπάρχει ένας θόλος, μονός ή διπλός, που κατασκευάζεται από γυαλί ή ακρυλικό πλαστικό. Αυτός ο θόλος διασφαλίζει την σωστή λειτουργία του πυρανόμετρου με πολλούς τρόπους. Αρχικά, μονώνει θερμικά τον αισθητήρα, απομονώνοντάς τον από φαινόμενα θερμικής συναγωγής αλλά και από απώλειες θερμότητας στο περιβάλλον. Επιπλέον, προστατεύει τον αισθητήρα από ρεύματα αέρα, σωματιδιακούς ρύπους ή σκόνη, που αφενός επηρεάζουν την ποιότητα των μετρήσεων, αφετέρου αποτελούν κίνδυνο για υλική φθορά του αισθητήρα. Τέλος, ο θόλος αποτελεί κατάλληλο φίλτρο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, ώστε να προσδιορίζεται η φασματική απόκριση της ακτινοβολίας που εισέρχεται στο εσωτερικό της διάταξης. Ο θόλος είναι κατάλληλα κατασκευασμένος ώστε να αυτοκαθαρίζεται από τους υγροποιημένους υδρατμούς ή το βρόχινο νερό που μαζεύεται στην επιφάνειά του.



Εικ. 5.1 : Σύγχρονο πυρανόμετρο

Τυπικά, τα πυρανόμετρα τοποθετούνται σε οριζόντιο προσανατολισμό, παρέχοντας μέγιστη απόκριση όταν ο ήλιος βρίσκεται στο τοπικό ζενίθ, και μηδενική απόκριση κατά τις ώρες της αυγής και του σούρουπου. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται απόκριση συνημιτόνου. Επίσης, το πυρανόμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την μέτρηση

αμιγώς της διάχυτης συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό γίνεται με την χρήση ενός δίσκου που τοποθετείται απέναντι από τον ήλιο, ρίχνοντας την σκιά του στον αισθητήρα και άρα μην αφήνοντας έτσι την άμεση ηλιακή δέσμη να θερμάνει τον αισθητήρα. Επιπλέον, το πυρανόμετρο χρησιμοποιείται και για τη μέτρηση της ανακλώμενης μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας (albedo) όταν τοποθετείται απέναντι στη θάλασσα.

Τα πυρανόμετρα χρησιμοποιούν συνήθως αισθητήρες τύπου thermopile και προδιαγράφονται και βαθμονομούνται από συγκεκριμένα πρότυπα ISO που υιοθετούνται από τον παγκόσμιο οργανισμό μετεωρολογίας (WMO). Έτσι ανάλογα με την ποιότητά τους ταξινομούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Την Secondary standard , που αντιστοιχεί στα καλύτερα όργανα και πρότυπα
- Την First class , που αντιστοιχεί σε μεσαίας κατηγορίας όργανα
- Την Second class , που αντιστοιχεί σε χαμηλού κόστους και ποιότητας όργανα

Σημειώνεται επίσης ότι στην τελευταία κατηγορία κατατάσσονται και τα πυρανόμετρα που δεν λειτουργούν με αισθητήρες καταγραφής θερμότητας, αλλά βασίζουν την λειτουργία τους σε φωτοδιόδους που λειτουργούν σε διαφορετική φασματική απόκριση. Ουσιαστικά, αυτά τα όργανα κατατάσσονται στην κατηγορία των ηλιακών στοιχείων. Το ηλιακό στοιχείο ή φωτοδίοδος, είναι ικανό να μας παρέχει δεδομένα για την ηλιακή ακτινοβολία με περίοδο της τάξης των ms, όταν το τυπικό πυρανόμετρο χρειάζεται κάποια δευτερόλεπτα. Παρολαυτά, η έντονη εξάρτησή τους από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος (λειτουργούν καλύτερα σε θερμοκρασίες γύρω στους 25°C ενώ η λειτουργικότητά τους σε άλλες θερμοκρασίες μειώνεται καταλυτικά), αλλά και η αδυναμία τους να καταγράψουν ένα εκτενές τμήμα του ηλιακού φάσματος καθιστά τα ηλιακά στοιχεία λιγότερο αξιόπιστα από τα τυπικά πυρανόμετρα που δουλεύουν με ‘thermopiles’.

5.3. ΠΥΡΗΛΙΟΜΕΤΡΟ

Το πυρηλιόμετρο είναι όργανο που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της άμεσης δέσμης της ηλιακής ακτινοβολίας. Το όργανο αποτελείται κατά κύριο λόγο από έναν επιμηκή κύλινδρο, στο βάθος του οποίου υπάρχει ένας αισθητήρας τύπου thermopile. Το ηλιακό φως εισέρχεται μέσω αυτού του κυλίνδρου και επιδρά με τον αισθητήρα, ώστε ο τελευταίος να μετατρέψει την θερμότητα σε ένα ηλεκτρικό σήμα, το οποίο μπορεί να μετρηθεί. Το μετρούμενο ηλεκτρικό σήμα αντιστοιχίζεται μέσω ενός κατάλληλου τύπου σε μια ορισμένη τιμή πυκνότητας ηλιακής ακτινοβολίας ανά επιφάνεια. Η κατασκευή στηρίζεται σε σύστημα περιστροφής και σκόπευσης, ώστε ο κύλινδρος να προσανατολίζεται προς τον ήλιο, και να απομονώνει έτσι – συνυπολογιζομένου και του επιμηκούς σχήματός του- την άμεση δέσμη της ηλιακής ακτινοβολίας από τις υπόλοιπες συνιστώσες της (διάχυτη και albedo) (βλ 7.2).



Εικ. 5.2: Πυρηλιόμετρο

Το πυρηλιόμετρο συνδυάζεται ιδανικά με ένα καλό πυρανόμετρο ώστε να καθορισθεί η διάχυτη ακτινοβολία του ήλιου. Πράγματι, η ταυτόχρονη καταγραφή της συνιστώσας άμεσης δέσμης μέσω ενός πυρηλιομέτρου, και της ολικής ακτινοβολίας μέσω ενός πυρανομέτρου, προσδιορίζει –από την διαφορά των δύο μετρήσεων- την διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας κάθε στιγμή της ημέρας.

5.4. ΑΚΤΙΝΟΜΕΤΡΟ

Το ακτινόμετρο συνιστά ένα επίγειο μετεωρολογικό όργανο που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της έντασης της άμεσης δέσμης της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα

σημαντικότερα μέρη ενός ακτινομέτρου είναι ένα θερμοηλεκτρικό ζεύγος που αποτελεί τον αισθητήρα της συσκευής, και ένα ευαίσθητο γαλβανόμετρο συνδεδεμένο με αυτό το ζεύγος. Για να μπορέσει να απομονωθεί η άμεση δέσμη του ηλίου, το ακτινόμετρο τοποθετείται σε κατάλληλη θέση ώστε μόνο παράλληλες ηλιακές ακτίνες κατευθείαν από τον ήλιο να επιδρούν στο θερμοηλεκτρικό ζεύγος. Αυτό επιτυγχάνεται τοποθετώντας τον αισθητήρα της συσκευής στο βάθος ενός στρεπτόμενου μεταλλικού σωλήνα, ο οποίος άπτεται επί μεταλλικής βάσης η οποία είναι επίσης στρεπτή. Με αυτή την διάταξη, ο μεταλλικός σωλήνας μπορεί να προσανατολίζεται κατάλληλα, ώστε να κοιτάει ακριβώς προς τον ήλιο, και έτσι ο αισθητήρας που βρίσκεται στην βάση του, να προσλαμβάνει εξ' ολοκλήρου την άμεση δέσμη, και μόνο αυτή. Ο προσανατολισμός του μεταλλικού σωλήνα γίνεται είτε χειροκίνητα, είτε μέσω προγράμματος που υπολογίζει την θέση του ηλίου στην ουράνια σφαίρα, δηλαδή το ύψος και την αζιμουθιακή γωνία, για την συγκεκριμένη περιοχή και ώρα, και στρέφει κατάλληλα την διάταξη. Συν τοις άλλοις, η τοποθέτηση του αισθητήρα εντός του σωλήνα προσφέρει προστασία από τους ανέμους και τα σωματίδια σκόνης που αυτοί μεταφέρουν και μπορούν να βλάψουν την λειτουργία του.



Εικ. 5.3 : Ακτινόμετρο

Ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται στα ακτινόμετρα είναι διαφόρων ειδών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια φυσική διάταξη, όπως μια φωτοδίοδος ή ένας αισθητήρας ροής θερμότητας, μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται και στα πυρανόμετρα και τα πυρηλιόμετρα. Απ' την άλλη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αισθητήρας ένα χημικό

σύστημα, οπότε η περίπτωση αυτή συνιστά το χημικό ακτινόμετρο. Το χημικό σύστημα συνήθως είναι μια χημική αντίδραση, της οποίας η απόδοση μεταβάλλεται σύμφωνα με την ηλιακή ενέργεια που δέχεται. Έτσι, μετρώντας την απόδοση της αντίδρασης, μπορούμε να την αντιστοιχίσουμε σε συγκεκριμένο ποσό ηλιακής ακτινοβολίας.

5.5. ΚΑΤΑΓΡΑΦΙΚΟ CAMPBELL-STROKES

Το καταγραφικό Campbell-Stokes είναι ένας τύπος ηλιόμετρου που εφευρέθηκε από τον John Francis Campbell και το 1853 και τροποποιήθηκε από τον George Gabriel Stokes το 1879. Ο αυθεντικός σχεδιασμός από τον Campbell αποτελούταν από μια γυάλινη σφαίρα τοποθετημένη σε ένα ξύλινο δοχείο με τέτοιο τρόπο ώστε το ηλιακό φως να αφήνει ένα ίχνος πάνω στο ξύλινο πλαίσιο. Μέσω τους ίχνους αυτού μπορούσαν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα αναφορικά με την διάρκεια της ηλιακής ακτινοβολίας. Η τροποποίηση που επέβαλε ο Stokes συνίσταται στην αντικατάσταση του ξύλινου δοχείου με μεταλλικό, ενώ το ηλιακό ίχνος αφηνόταν πλέον σε ένα κομμάτι χαρτί κατάλληλα τοποθετημένο πίσω από την γυάλινη σφαίρα. Η συσκευή είναι σχεδιασμένη ώστε να μετράει τις ώρες ηλιοφάνειας σε έναν τόπο μέσω του ίχνους που αφήνεται στο χαρτί.



Εικ. 5.4 : Καταγραφικό Campbell - Stokes

Η ίδια βασική αρχή λειτουργίας χρησιμοποιείται και στα σύγχρονα καταγραφικά, με πολύ λίγες αλλαγές. Η αρχή αυτή είναι απλή. Η γυάλινη σφαίρα συγκεντρώνει τις ακτίνες του ηλίου προς το πίσω μέρος της όπου είναι τοποθετημένο το χαρτί, πάνω σε ειδικό βάθρο και συγκρατούμενο από ρυθμιζόμενες εγκοπές ώστε να παρέχεται η δυνατότητα αλλαγής της πλευρικής θέσης του, ανάλογα με το ύψος του ήλιου την

κάθε εποχή. Έτσι, για το βόρειο ημισφαίριο, χρησιμοποιούνται κατά την διάρκεια του έτους 3 διαφορετικές κάρτες. Η πρώτη αντιστοιχεί στην χειμωνιάτικη περίοδο και χρησιμοποιείται από 15 Οκτωβρίου έως 28 Φεβρουαρίου, η δεύτερη αφορά τις ισημερίες και τοποθετείται από την πρώτη Μαρτίου μέχρι την 11^η Απριλίου, και από τις 3 Σεπτέμβρη μέχρι τις 14 Οκτώβρη, και η Τρίτη κάρτα χρησιμοποιείται κατά την θερινή περίοδο, από 12 Απριλίου μέχρι 2 Σεπτεμβρίου. Το χαρτόνι φέρει ωριαίες διαγραμμίσεις με δεκαδικές υποδιαίρέσεις στο εσωτερικό της κάθε ώρας, ενώ το ηλιακό μεσημέρι αντιστοιχεί στο κέντρο της θερμικής ταινίας. Η όλη συσκευή τοποθετείται σε οριζόντιο επίπεδο αναφοράς και έχει προσανατολισμό προς τον νότο ώστε να συγκεντρώνει το μέγιστο δυνατό ποσό ηλιοφάνειας –στο βόρειο ημισφαίριο - , ενώ υπάρχει δυνατότητα ειδικής ρύθμισης του πλαισίου συγκράτησης του θερμικού χαρτονιού ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος της συγκεκριμένης περιοχής.

Όσο οι ηλιακές ακτίνες συγκεντρώνονται στο θερμικό χαρτόνι, αυτό καίγεται και δημιουργείται πάνω του μια οπή. Βάσει της οπής αυτής εξαγόνται συμπεράσματα αναφορικά με της διάρκεια ηλιοφάνειας στο τέλος κάθε μέρας. Σημειώνεται ότι η έμμεση δέσμη της ηλιακής ακτινοβολίας δεν είναι αρκετά δυνατή για να προκαλέσει καύση του χαρτονιού, ως εκ τούτου οι μετρήσεις του καταγραφικού αφορούν κυρίως την άμεση δέσμη της ηλιακής ακτινοβολίας. Συνεπώς, είναι σημαντικό για την ορθή λειτουργία της συσκευής, αυτή να τοποθετείται σε μέρη που δεν παραμποδίζεται η απευθείας επαφή της με τις ηλιακές ακτίνες από διάφορα εμπόδια.

Τα κύρια πλεονεκτήματα του καταγραφικού συνίστανται στη ευκολία και την απλότητα της χρήσης του. Η ίδια συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί οπουδήποτε στον κόσμο με λίγες περαιτέρω τροποποιήσεις. Επιπλέον, η έλλειψη κινητών μερών στην σύσκευή κάνει την συντήρησή της εξαιρετικά απλή. Επιπρόσθετα, η συσκευή είναι σχετικά φθηνή. Από την άλλη, η συσκευή έχει κάποια σοβαρά μειονεκτήματα. Η δημιουργούμενη οπή στο θερμικό χαρτόνι είναι αρκετά ασαφής από την φύση της και η ερμηνεία της συχνά επιδέχεται υποκειμενικές κρίσεις. Το πρόβλημα της ασάφειας γίνεται ιδιαίτερα έντονο κατά τις ώρες της ανατολής και της δύσης και γενικότερα οποτεδήποτε το ύψος του ήλιου είναι σχετικά μικρό. Επιπλέον, ακόμα και αραιή συννεφία δημιουργεί προβλήματα στην λειτουργικότητά του καθώς, όπως προαναφέρθηκε, η συσκευή δεν είναι ευαίσθητη στην διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας, παρά μόνο στην άμεση. Τέλος, δυσμενείς καιρικές συνθήκες είναι ικανές να εμποδίσουν την λειτουργία του καταγραφικού. Συγκεκριμένα, η

βροχή συχνά καταστρέφει το χαρτί και κάνει αδύνατη την αναγνωσή του, ενώ ο γυάλινος θόλος γίνεται αδιαφανής σε συνθήκες παγετού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ : ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ERBS- KLEIN-DUFFIE

6.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρακάτω κεφάλαιο γίνεται διάκριση των συνιστωσών που συνθέτουν την ολική ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ένα σημείο στην επιφάνεια της γης. Ακολουθεί μια σύντομη αναφορά στους διαφορετικούς τύπους μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί ώστε να ποσοτικοποιούν την διάκριση αυτή. Κατόπιν, επιλέγεται ένα από αυτά τα μοντέλα και αναλύεται περαιτέρω. Επιπλέον, το συγκεκριμένο μοντέλο εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας υπαρκτές μετρήσεις της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας από διάφορες ημέρες, για τις συντεταγμένες της Αθήνας, ενώ παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα και τα συμπεράσματά τους. Τέλος, παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα και συμπεράσματα, όπως αυτά προέκυψαν από προσωπική συλλογή μετρήσεων της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την 11^η Απριλίου 2013.

6.2. ΟΙ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

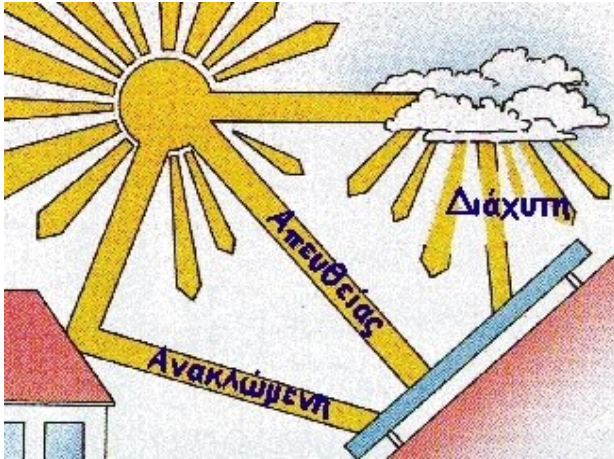
Όπως είδαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η ηλιακή ακτινοβολία παράγεται στο πυρήνα του ηλίου και από κει διαχέεται προς όλες τις κατευθύνσεις του διαστήματος, φτάνοντας έτσι στην ατμόσφαιρα της γης. Η ακτινοβολία που προσεγγίζει την ατμόσφαιρα απ' ευθείας από τον ήλιο ονομάζεται, ως γνωστόν, $G_{extra_terrestrial}$, και διαφοροποιείται κατά την διάρκεια του έτους. Αυτή η διαφοροποίηση οφείλεται στην μεταβολή της απόστασης γης-ηλίου λόγω της ελλειπτικής τροχιάς της γης.

Ακολούθως, η ακτινοβολία διαθλάται και διασχίζει την ατμόσφαιρα της γης προσπίπτοντας τελικώς στην επιφάνεια της γης. Κατά την διάσχιση της ατμόσφαιρας υπόκειται στα φαινόμενα της σκέδασης, της απορρόφησης και της ανάκλασης, λόγω των διάφορων σωματιδίων που συνιστούν την γήινη ατμόσφαιρα, όπως επίσης και της σκόνης και των σωματιδιακών ρύπων. Έτσι, ένα σημαντικό μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσεγγίζει εξωτερικά την ατμόσφαιρα της γης, (δηλαδή η $G_{extra_terrestrial}$) δεν φτάνει ποτέ στην επιφάνειά της. Το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που τελικώς προσπίπτει στην επιφάνεια της γης ονομάζεται G_{global} , και είναι το μόνο εκμεταλλεύσιμο από τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Συνεπώς, αυτό το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας αποτελεί πεδίο έρευνας, μελέτης και πειραματισμών.

Η G_{global} αποτελείται από διάφορες συνιστώσες, που έχουν να κάνουν με την προέλευση της ακτινοβολίας που μετράται σε κάποιο σημείο στην γη. Έτσι, η ακτινοβολία που προσπίπτει σε κάποιο όργανο μέτρησης και προέρχεται κατευθείαν από τον ήλιο, συνιστά την συνιστώσα άμεσης δέσμης, και συμβολίζεται με G_{beam} . Τούτη η συνιστώσα αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της προσπίπτουσας στο έδαφος ακτινοβολίας κατά τις ηλιόλουστες μέρες όπου ο ουρανός είναι καθαρός από σύννεφα, και συνεπώς τίποτα δεν παρεμβάλλεται μεταξύ του ηλίου και του εδάφους. Όμως η συνιστώσα άμεσης δέσμης δεν είναι η μόνη που φτάνει στην επιφάνεια της γης. Μπορούμε να αισθανθούμε την ηλιακή ακτινοβολία, -ως φως και ζέστη, ακόμα και όταν ο ουρανός είναι συννεφιασμένος. Συνεπώς, κάποιο πόσο ηλιακής ακτινοβολίας υπάρχει στο έδαφος της γης, ακόμα κι αν ο ήλιος δεν κοιτάει απευθείας προς αυτό. Το ποσό αυτό αποτελεί την διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία συμβολίζεται με G_{diff} . Κάθε σημείο στη γη λαμβάνει διάχυτη ακτινοβολία, από όλες τις κατευθύνσεις και κατά μερικώς τυχαίο και ανισοτροπικό τρόπο. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στην ύπαρξη υδρατμών στην ατμόσφαιρα, οι οποίοι διαθλούν και ανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία προς πάσα κατεύθυνση. Κατά τις ηλιόλουστες μέρες, η G_{diff} αποτελεί ένα μικρό σχετικά κλάσμα της ολικής ακτινοβολίας, ενώ τις συννεφιασμένες μέρες, είναι η κυρίαρχη συνιστώσα της, καθώς αφενός η συνιστώσα ευθείας δέσμης είναι μικρή, αφετέρου η υγρασία στην ατμόσφαιρα έντονη.

Τέλος, ένα ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνει ένα όργανο σε ένα σημείο της γης, προέρχεται από αντανάκλαση της ακτινοβολίας αυτής στο παρακείμενο έδαφος. Πράγματι, όπως γνωρίζουμε, η επιφάνεια της γης δεν απορροφά πλήρως την ακτινοβολία που δέχεται, παρά αντανακλά ένα μέρος αυτής πίσω στο περιβάλλον. Αυτό το μέρος συνιστά την albedo συνιστώσα. Η απορροφισιμότητα του εδάφους, και άρα και οι ανακλαστικές ιδιότητές του, εξαρτάται από την σύστασή του και το ιδιαίτερο σχήμα της επιφάνειάς του. Μπορεί δε, να ποσοτικοποιηθεί χρησιμοποιώντας τον συντελεστή ανάκλασης albedo, ένα αδιάστατο μέγεθος, μικρότερο της μονάδας, που ισούται με τον λόγο της ανακλώμενης ισχύος προς την προσπίπτουσα ισχύ σε μια συγκεκριμένη επιφάνεια. Ο συντελεστής ανάκλασης albedo είναι μικρός (δεν ξεπερνά το 0,25) σε επιφάνειες με μεγάλη απορροφισιμότητα της ηλιακής ισχύος, όπως η άσφαλτος, το καλλιεργημένο γρασίδι ή το φυτικό χώμα. Αντίθετα, επιφάνειες όπως η άμμος, το μπετόν και ο πάγος έχουν

μεγάλο συντελεστή ανάκλασης albedo, ο οποίος φτάνει και μέχρι την τιμή 0,9 στην περίπτωση του φρέσκου χιονιού. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συνιστώσα albedo της ηλιακής ακτινοβολίας δεν λογίζεται υπ' όψιν στο μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε για τον καθορισμό των συνιστωσών της ηλιακής ακτινοβολίας.



Εικ. 6.1 : Οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας

6.3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Διάφορα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται για τον διαχωρισμό της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται ένα σημείο στην επιφάνεια της γης, στις διάφορες συνιστώσες του. Αυτά τα μοντέλα μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο μεγάλες οικογένειες, τα μοντέλα κατάτμησης και τα παραμετρικά μοντέλα.

6.3.1. Παραμετρικά μοντέλα.

Τα παραμετρικά μοντέλα απαιτούν λεπτομερείς πληροφορίες για το περιβάλλον ώστε να συναγάγουν τα κατάλληλα συμπεράσματα. Ένα μεγάλο σύνολο παραγόντων που επηρεάζουν τον διαχωρισμό της ηλιακής ακτινοβολίας στις διάφορες συνιστώσες πρέπει να καθορισθεί λεπτομερώς προτού προχωρήσουμε στην ανάλυση των δεδομένων από τις μετρήσεις της ηλιακής ισχύος. Έτσι, ατμοσφαιρικοί και

μετεωρολογικοί παράγοντες, όπως ο τύπος και η κατανομή των νεφών, ο άνεμος, η θερμοκρασία και η υγρασία στην ατμόσφαιρα για μια συγκεκριμένη μέρα, αλλά και ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της τοποθεσίας, όπως το υψόμετρο και το γεωγραφικό πλάτος, πρέπει να είναι ήδη γνωστά ή υπολογίσιμα, για την χρησιμοποίηση τέτοιων μοντέλων.

6.3.2. Μοντέλα κατάτμησης

Τα μοντέλα κατάτμησης υπολογίζουν την διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας, και κατόπιν αυτή της ευθείας δέσμης, χρησιμοποιώντας ως πειραματικά δεδομένα μόνο τις μετρήσεις της συνολικής ακτινοβολίας επί του οριζοντίου εδάφους. Για τους υπολογισμούς στα μοντέλα αυτής της κατηγορίας, χρησιμοποιούνται διάφοροι αδιάστατοι δείκτες, που χαρακτηρίζουν ποσοτικά τον τρόπο διάχυσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα.

Τέτοιοι δείκτες είναι ο δείκτης αιθριότητας k_t , το κλάσμα της διάχυσης k_d , ο συντελεστής διάχυσης k_D , και ο δείκτης άμεσης διάδοσης k_b . Οι δείκτες αυτοί ορίζονται από τις σχέσεις που ακολουθούν:

$$k_t = G_{\text{global}}/G_{\text{ET}}$$

$$k_d = G_{\text{diff}}/G_{\text{global}}$$

$$k_D = G_{\text{diff}}/G_{\text{ET}}$$

$$k_b = G_{\text{beam}}/G_{\text{ET}}$$

όπου G_{global} είναι η συνολική ακτινοβολία που μετράται επί οριζοντίου εδάφους, η $G_{\text{ET}} (=G_{\text{extra_terrestrial}})$ είναι η συνολική ακτινοβολία ακριβώς έξω από την ατμόσφαιρα της γης και σε επίπεδο παράλληλο με το έδαφος της τοποθεσίας και $G_{\text{diff}}, G_{\text{beam}}$, οι συνιστώσες διάχυτης και ευθείας δέσμης αντίστοιχα.

7.4. MONTELO ERBS-KLEIN-DUFFIE

Το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των δεδομένων και των μετρήσεων στην παρούσα εργασία ονομάζεται μοντέλο ERBS-KLEIN-DUFFIE. Ανήκει στα μοντέλα κατάτμησης, αφού χρειάζεται μόνο τις μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας και ορισμένους δείκτες για να συναγάγει συμπεράσματα για τις συνιστώσες της τελευταίας. Οι μετρήσεις της συνολικής ακτινοβολίας γίνονται επί του οριζοντίου εδάφους. Αυτό εξηγεί εν μέρει την παράλειψη -όπως προαναφέρθηκε- της albedo συνιστώσας από τα τελικά αποτελέσματα. Το συγκεκριμένο μοντέλο δεν είναι πιο ακριβές σε σχέση με τα άλλα, είναι όμως το πιο κατάλληλο για να επεξεργαστεί δεδομένα που ανήκουν σε περιοχές με γεωγραφικό πλάτος ανάμεσα στις 31° και τις 42°. Τα δεδομένα που έχουμε αφορούν την Αθήνα η οποία έχει γεωγραφικό πλάτος ίσο με 38°, εξ' ου και η χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου. Στο σημείο αυτό, πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι δεν υπάρχει ένα συγκεκριμένο μοντέλο που να είναι καθολικά πιο ακριβές από τα άλλα. Κάθε μοντέλο είναι πιο κατάλληλο για συγκεκριμένες περιοχές, ενώ ακόμα και αναφορικά με αυτές, σφάλματα και ανακρίβειες δεν αποφεύγονται. Οι όποιες ανακρίβειες όμως, μπορούν να μετριαστούν με την εκ των υστέρων ανάλυση και αναπροσαρμογή των δεδομένων και των αποτελεσμάτων.

Το μοντέλο ERBS-KLEIN-DUFFIE επιτυγχάνει την καλύτερη λειτουργία του για τα προαναφερθέντα γεωμετρικά πλάτη, ενώ παράλληλα οι προβλέψεις του είναι πιο επιτυχημένες για μεσαίου εύρους γωνίες του ηλιακού ύψους (50°-65°). Αντίθετα, τα σφάλματα που παρουσιάζει το μοντέλο εντείνονται όταν το ύψος του ηλίου δεν είναι πολύ μεγάλο.

Για την επεξεργασία των μετρούμενων δεδομένων χρειαζόμαστε, όπως σε όλα τα μοντέλα κατάτμησης τον υπολογισμό κάποιων δεικτών. Αρχικά, υπολογίζουμε τον δείκτη αιθριότητας, για τον οποίον ως γνωστόν ισχύει

$$k_t = G_{\text{global}}/G_{\text{ET,oa}}$$

Για την εύρεση του G_{global} χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις από το αρχείο του εργαστηρίου Φωτοβολταϊκών του Ε.Μ.Π., οι οποίες πάρθηκαν από θερμοαισθητήρες και όργανα μέτρησης, στην ταράτσα του κτηρίου που στεγάζει το εργαστήριο.

Αντίθετα, η ακτινοβολία που δέχεται ένα παράλληλο επίπεδο έξω από την ατμόσφαιρα της γης, $G_{ET,oa}$, δεν λαμβάνεται μέσω μετρήσεων κάποιου οργάνου, και πρέπει να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που μας δίνει η γνώση της σχετικής γεωμετρίας ήλιου-γης και της τιμής της μέσης ηλιακής ισχύος.

Έτσι, έχουμε :

$$G_{ET} = E_o * G_{sc} ,$$

Το E_o είναι ο παράγοντας εκκεντρότητας, καθώς ποσοτικοποιεί τις αλλαγές της προσλαμβάνουσας ηλιακής ακτινοβολίας που οφείλονται στην μεταβολή της απόστασης ήλιου γης λόγω ελλειπτικής τροχιάς της τελευταίας. Οι μεταβολές αυτές συμβαίνουν γιατί η ισχύς της μεταδιδόμενης ακτινοβολίας μειώνεται όσο η απόσταση αυξάνεται και το αντίστροφο. Το E_o μεταβάλλεται αναλόγως με την μέρα, ως εκ τούτου για τον υπολογισμό του θα χρειαστούμε την γωνία ημέρας B που χαρακτηρίζει κάθε διαφορετική ημέρα του έτους. Η γωνία ημέρας έχει ήδη οριστεί σε προηγούμενο κεφάλαιο (2.4.2) και ισούται με :

$$B = (DoY - 81) * 360^\circ / 364$$

Όπου η παράμετρος DoY είναι ο αριθμός της κάθε ημέρας, ξεκινώντας την αρίθμηση από την πρώτη ημέρα του έτους. Ο τύπος υπολογίζει την γωνία σε μοίρες. Γνωρίζοντας την γωνία ημέρας B , η εκκεντρότητα E_o μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τις σειρές Fourier-Spencer, ως εξής

$$E_o = 1,0001 + 0,034221 \cos B + 0,000128 \sin B + 0,000719 \cos 2B + 0,000077 \sin 2B$$

Η ποσότητα G_{sc} είναι η ηλιακή σταθερά, δηλαδή η μέση ισχύς ακτινοβολίας που λαμβάνει η ατμόσφαιρα της γης από τον ήλιο, στην μονάδα της επιφάνειας. Η τιμή της βασίζεται στις ανά καιρούς μετρήσεις της και κάθε τόσο υπολογίζεται καλύτερη προσέγγιση. Η τιμή που έχει τώρα υιοθετηθεί είναι η $G_{sc} = 1367 \text{ W/ m}^2$, και αυτή είναι η τιμή που θα χρησιμοποιηθεί και στους υπολογισμούς.

Ακολούθως, για να βρούμε την εξωγήινη ακτινοβολία σε επίπεδο που εφάπτεται της ατμόσφαιρας και παράλληλο με την επιφάνεια της γης στην τοποθεσία που μας ενδιαφέρει, χρησιμοποιούμε την παρακάτω σχέση

$$G_{ET,ha} = G_{ET} * \sin\beta = E_0 * G_{sc} * \sin\beta$$

Όπου β είναι το ύψος του ήλιου.

Με αυτά τα δεδομένα υπολογίζουμε το k_t , έναν δείκτη που εκφράζει ποσοτικά πόσο καθαρός είναι ο ουρανός την στιγμή των μετρήσεων. Όσο πιο μεγάλη τιμή λαμβάνει τόσο πιο αίθριος και καθαρός είναι ο ουρανός. Αντίθετα, μικρότερες τιμές του k_t εκφράζουν συννεφιασμένο ουρανό και για τιμές που πλησιάζουν στον μηδενισμό (χονδρικά τιμές μικρότερες του 0,22), ο ουρανός την στιγμή της μέτρησης θεωρείται πολύ συννεφιασμένος (ή και βροχερός).

Μέσω της τιμής του δείκτη αιθριότητας υπολογίζουμε το κλάσμα διάχυσης της ακτινοβολίας k_d . Με την χρήση των ακόλουθι εξισώσεων:

$$k_d = 1 - 0,09 k_t \quad , \text{για } k_t < 0,22$$

$$k_d = 0,9511 - 0,1604 * k_t + 4,388 * k_t^2 - 16,638 * k_t^3 + 12,336 * k_t^4 \quad , \text{για } 0,22 < k_t < 0,8$$

$$k_d = 0,165 \quad , \text{για } k_t \geq 0,8$$

Τέλος, γνωρίζοντας τον συντελεστή διάθλασης k_d μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε την συνιστώσα ευθείας δέσμης G_{beam} , χρησιμοποιώντας τον τύπο

$$G_{beam} = (G_{global} / \sin\beta) * (1 - K_d)$$

Και κατόπιν, γνωρίζοντας την συνιστώσα ευθείας δέσμης και την ολική ακτινοβολία στο έδαφος, μπορούμε να υπολογίσουμε την διάχυτη συνιστώσα G_{diff} ως εξής :

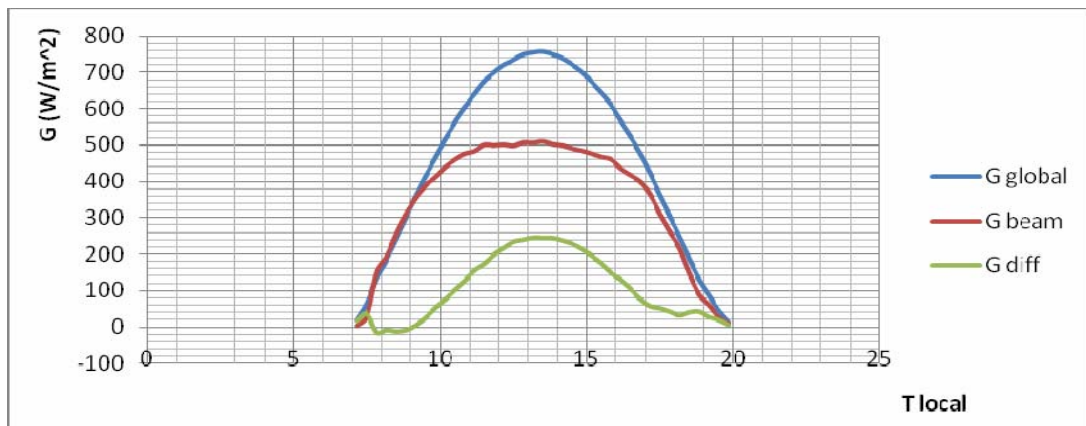
$$G_{diff} = G_{global} - G_{beam}$$

6.5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ERBS-KLEIN-DUFFIE ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του μοντέλου ERBS-KLEIN-DUFFIE, στις μετρήσεις της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας, που πάρθηκαν από την ταράτσα ενός κτιρίου του Ε.Μ.Π. Η δειγματοληψία των ημερών έγινε έτσι ώστε να συμπεριλαμβάνονται ημέρες από όλες τις εποχές του χρόνου, καλύπτοντας και τις οριακές τιμές της ηλιακής τροχιάς, όπως είναι οι ισημερίες και τα ηλιοστάσια. Επίσης, δόθηκε σημασία στο να υπάρχουν τόσο βροχερές όσο και ηλιόλουστες ημέρες, ώστε να φανούν οι συγκριτικές διαφορές αλλά και τα σφάλματα που επιφέρει η μεταβολή του καιρού στα αποτελέσματα.

Αρχικώς, ας δούμε την κατάτμηση της ηλιακής ακτινοβολίας στις συνιστώσες της, για μια τυχαία ανοιξιότιμη μέρα.

23/04/2011

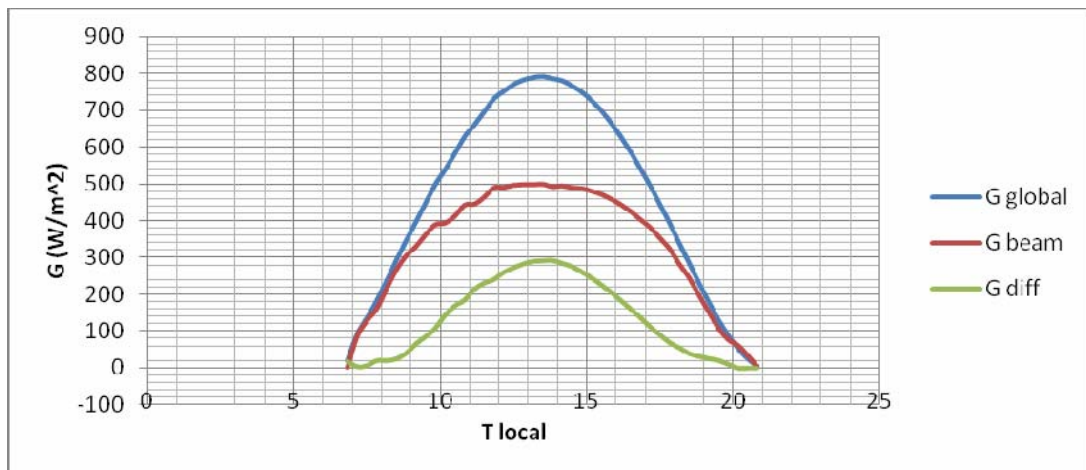


Εικ. 6.2: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 23/04/2011 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

Όπως μπορούμε να δούμε (Εικ.6.2) από την μπλε καμπύλη, που παριστάνει το μέγεθος G_{global} , η συνολική ηλιακή ακτινοβολία δεν παρουσιάζει τυχαίες διακυμάνσεις κατά την διάρκεια ετούτης της ημέρας. Αντιθέτως, ακολουθεί την προβλεπόμενη κατανομή, ξεκινώντας από χαμηλές τιμές νωρίς το πρωί -με το ξημέρωμα-, μέχρι να μεγιστοποιηθεί η τιμή της, γύρω στο 757 W/m^2 , περίπου

κατά το ηλιακό μεσημέρι, όπου ο ήλιος έχει το μέγιστο ύψος. Κατόπιν, η ολική ηλιακή ακτινοβολία μειώνεται και πάλι, σχετικώς συμμετρικά ως προς την αύξησή της, μέχρι να μηδενιστεί όταν ο ήλιος δύσει. Παρόμοια κατανομή ακολουθεί και η ακτινοβολία άμεσης δέσμης, G_{beam} , οπότε εύκολα συνάγεται το συμπέρασμα ότι επρόκειτο για μια καθαρή και ηλιόλουστη μέρα, χωρίς σύννεφα καθ' όλη την διάρκειά της. Η διάχυτη συνιστώσα είναι συνεχώς μικρότερη από την συνιστώσα ευθείας δέσμης, ενώ και αυτής η τιμή μεγιστοποιείται κατά το ηλιακό μεσημέρι περίπου.

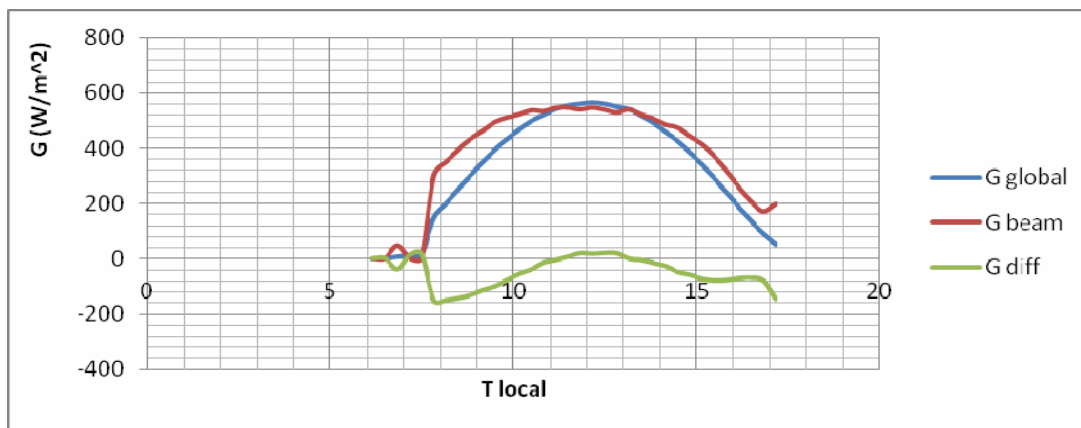
9/7/2011



Εικ. 6.3: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 09/07/2011 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

Πρόκειται πάλι για μια ηλιόλουστη ημέρα, όπως δείχνουν οι χωρίς απότομες διακυμάνσεις καμπύλες του διαγράμματος. Η μέγιστη τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι περίπου 780 W/m^2 , ελαφρώς αυξημένη από την μέγιστη τιμή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο προηγούμενο διάγραμμα (23/4/2011), γεγονός το οποίο μπορεί να εξηγηθεί, καθώς ο Ιούλιος είναι καλοκαιρινός μήνας και η συγκεκριμένη ημέρα (9/7) βρίσκεται πιο κοντά ημερολογιακά στο θερινό ηλιοστάσιο από ότι η 23^η Απριλίου. Επομένως, το ύψος του ήλιου λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές, αυξάνοντας έτσι και την συνολική ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται η τοποθεσία.

19/10/2011

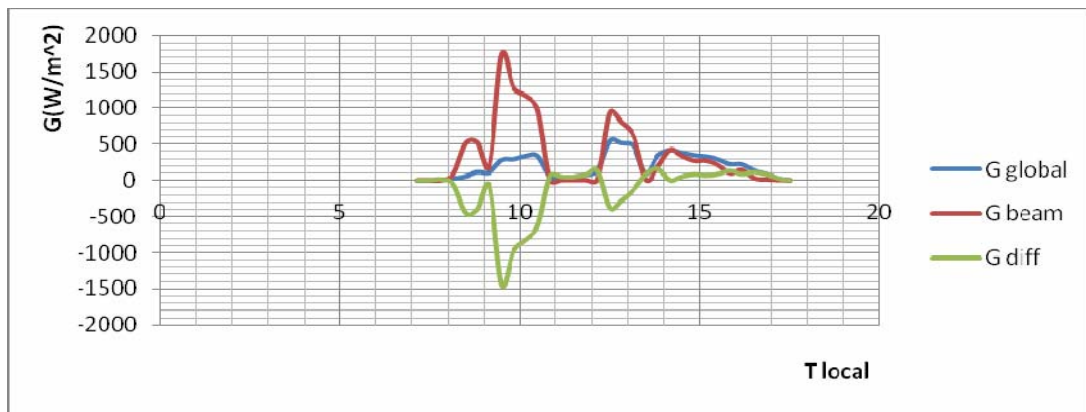


Εικ. 6.4: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 19/10/2011 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα μπορούν να παρατηρηθούν σημαντικές όσο και απρόβλεπτες αποκλίσεις στις καμπύλες που παριστάνουν την άμεση συνιστώσα και την διάχυτη συνιστώσα. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι οι τιμές που λαμβάνει το ύψος του ήλιου την συγκεκριμένη ημέρα δεν είναι υψηλές, και για την ακρίβεια, το ύψος του ήλιου ποτέ δεν ξεπερνά τις 41° . Θυμίζουμε ότι το χρησιμοποιούμενο μοντέλο είναι ιδιαίτερα ακριβές όταν οι μετρήσεις αφορούν ηλιακά ύψη μεταξύ 50° και 65° . Για μικρότερες τιμές το μοντέλο παρουσιάζει κάποια σφάλματα, που γίνονται πιο σημαντικά όσο οι τιμές μικραίνουν κι άλλο. Πράγματι, παρατηρώντας το διάγραμμα, γίνεται σαφές ότι οι καμπύλες ομαλοποιούνται κάπως στην περιοχή της μέγιστης ακτινοβολίας, κατά το μεσημέρι, και αυτό γιατί το ύψος του ήλιου είναι πιο κοντά στην περιοχή την βέλτιστης λειτουργίας, μετριάζοντας έτσι τα σφάλματα. Επιπλέον, με μια προσεκτική παρατήρηση της καμπύλης που παριστάνει την ολική ακτινοβολία, παρατηρείται μια ανωμαλία που αφορά τις πρώτες πρωινές ώρες. Η απόκλιση αυτή δεν μπορεί να αποδοθεί στις μικρές τιμές του ηλιακού ύψους τις συγκεκριμένες ώρες, καθώς η καμπύλη της G_{global} δεν προκύπτει από τους υπολογισμούς που προβλέπει το μοντέλο ERBS-KLEIN-DUFFIE, αλλά βρίσκεται κατευθείαν από τις μετρήσεις που παίρνονται από τα όργανα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας που είναι εγκατεστημένα στην ταράτσα του κτηρίου του Ε.Μ.Π. Κατόπιν τούτου, η συγκεκριμένη ανωμαλία μπορεί να αποδοθεί στις

ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούν στο συγκεκριμένο περιβάλλον της μέτρησης. Πράγματι, ανατολικά των εγκαταστάσεων του Ε.Μ.Π. βρίσκεται σε κοντινή απόσταση το βουνό του Υμηττού. Αυτό έχει σαν συνέπεια το βουνό να ρίχνει την σκιά του πάνω στα όργανα μέτρησης τις πρώτες πρωινές ώρες, κατά τις οποίες το ηλιακό ύψος δεν έχει ακόμη ξεπεράσει το ύψος του βουνού, το οποίο είναι περίπου 9 μοίρες αναφορικά με το σημείο μέτρησης. Έτσι, η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ο τόπος μέτρησης είναι μικρότερη από το αναμενόμενο. Το συγκεκριμένο συστηματικό σφάλμα αφορά όλα τα παρόντα διαγράμματα, η επίδραση του όμως είναι ιδιαίτερα εμφανής κατά τις χειμωνιάτικες μέρες όπου το ύψος του ήλιου είναι γενικά χαμηλότερο, και ως εκ τούτου απαιτείται περισσότερη ώρα για να ξεπεράσει ο ήλιος το ύψος των 9 μοιρών.

20/01/2010

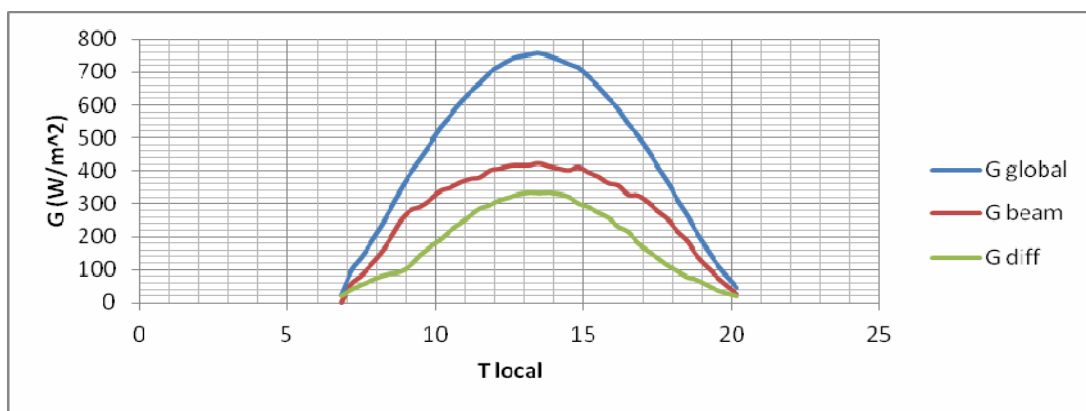


Εικ. 6.5: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 20/01/2010 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

Η συγκεκριμένη μέρα (Εικ.6.5) είχε μάλλον άστατο καιρό, όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό με απλή επισκόπηση της καμπύλης G_{global} . Για την ακρίβεια, παρατηρείται κατακόρυφη πτώση της προσληφθείσας ακτινοβολίας από τις 10.45 πμ μέχρι τις 12.15 πμ περίπου, ενώ παρουσιάζει ανάλογα скаμπανεβάσματα και σε άλλες ώρες της ημέρας. Κατά την διάρκεια εκείνων των ωρών, ο ουρανός ήταν πιθανότατα έντονα συννεφιασμένος ή και βροχερός. Επιπρόσθετα, καθώς πρόκειται για μια χειμερινή ημέρα, το ύψος του ήλιου είναι σχετικά χαμηλό και δεν υπερβαίνει

ποτέ τις 32 μοίρες .Επόμενο είναι λοιπόν, το μοντέλο να παρουσιάζει σοβαρές αποκλίσεις στους υπολογισμούς του.

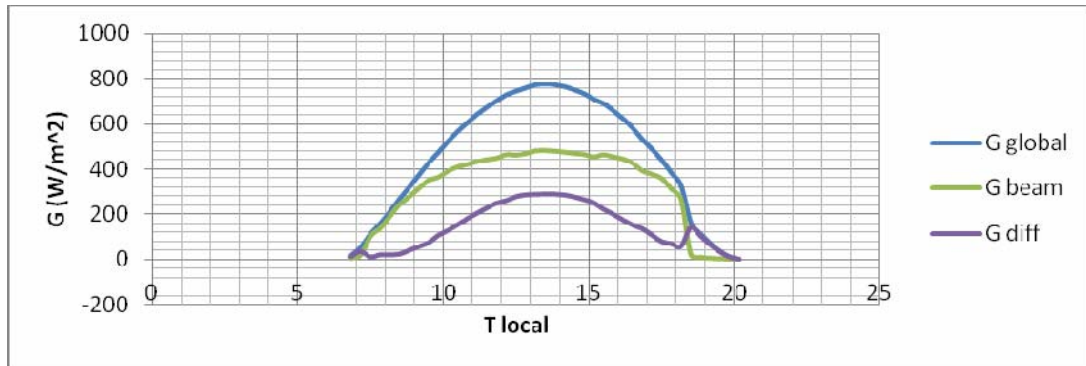
15/06/2012



Εικ. 6.6: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 15/06/2012 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

Πρόκειται για μία καλοκαιρινή ημέρα, ηλιόλουστη καθ' όλη την διάρκεια της όπως δείχνουν οι αρκετά ομαλές κλίσεις των καμπύλων. Η διάχυτη συνιστώσα προέρχεται πιθανότατα εξ' ολοκλήρου από την διάθλαση της ηλιακής ακτινοβολίας στους υδρατμούς της ατμόσφαιρας. Η υγρασία την συγκεκριμένη μέρα ήταν πιθανώς αρκετά αυξημένη αφού παρατηρείται ότι η διάχυτη συνιστώσα δεν είναι κατά πολύ μικρότερη, αριθμητικά, από την ευθεία συνιστώσα. Για την ακρίβεια, όταν η συνιστώσα της ευθείας δέσμης γίνεται μέγιστη, η διάχυτη συνιστώσα ισούται περίπου με το 80% της άμεσης δέσμης. Έτσι, η διάχυτη συνιστώσα αποτελεί σημαντικό κλάσμα της ολικής ακτινοβολίας, οπότε μπορούμε να υποθέσουμε ότι υπήρχε έντονη διάθλαση στους υδρατμούς της ατμόσφαιρας εκείνη την μέρα. Επίσης, το ποσό της ακτινοβολίας που προσκρούει στο έδαφος είναι ιδιαίτερα αυξημένο λόγω της εποχής και του μεγάλου ύψους του ήλιου.

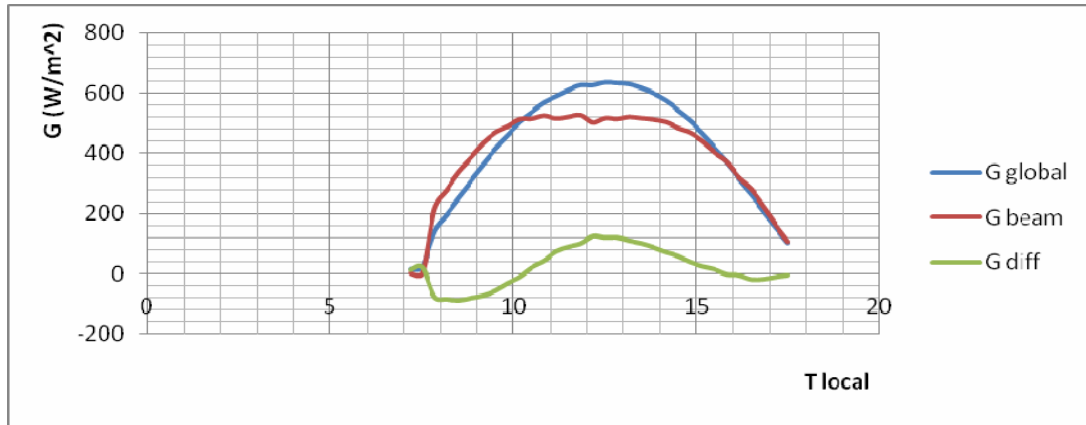
22/7/2011



Εικ.. 6.7: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 22/07/2011 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

Ακόμη μία ηλιόλουστη καλοκαιρινή ημέρα. Το μοντέλο δουλεύει πολύ καλά καθώς το ύψος του ήλιου παίρνει τιμές που ανήκουν στην περιοχή της βέλτιστης λειτουργίας του μοντέλου. Οι καμπύλες έχουν ομαλή κλίση, με εξαίρεση τις ώρες όπου ο ήλιος βαίνει προς την δύση του. Αυτές οι διακυμάνσεις μπορούν να αποδοθούν σε μια απότομη αλλαγή του καιρού, καθώς παρατηρείται ότι από τις 18.00 περίπου και ύστερα, μειώνεται απότομα η ολική ηλιακή ακτινοβολία, ενώ και η διάχυτη συνιστώσα υπερیشύει της συνιστώσας ευθείας δέσμης, γεγονός που συνεπάγεται συννεφιασμένο ουρανό. Η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ιδιαίτερα αυξημένη, λόγω του θέρους. Παράλληλα, συγκριτικά με το προηγούμενο διάγραμμα, που αφορούσε την 15^η Ιουνίου 2012, παρατηρούμε ότι η διάχυτη συνιστώσα δεν αποτελεί τόσο μεγάλο κλάσμα της ολικής ακτινοβολίας, οπότε μπορούμε να υποθέσουμε ότι η συγκέντρωση υδρατμών στην ατμόσφαιρα είναι μικρότερη ετούτη εδώ την μέρα.

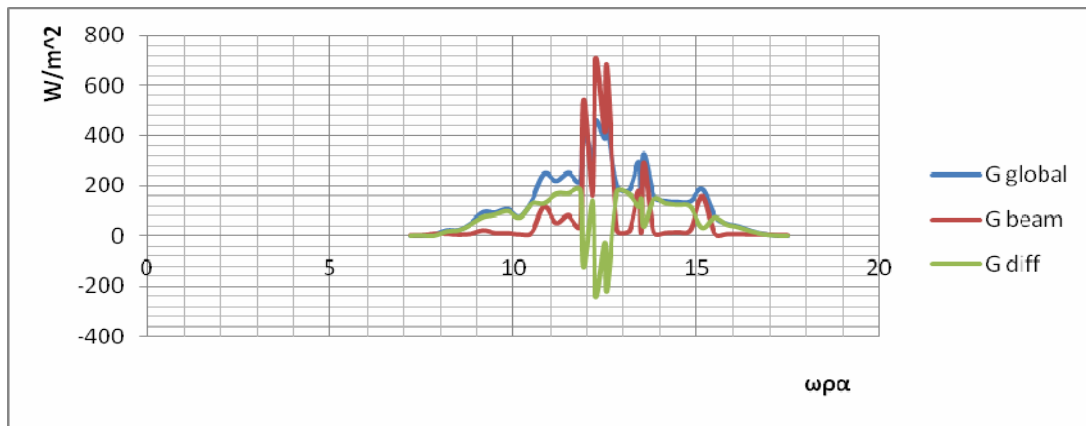
12/03/2011



Εικ. 6.8: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 12/03/2011 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

Το ύψος του ηλίου την συγκεκριμένη μέρα μεγιστοποιείται στις 48° περίπου, οπότε το μοντέλο είναι σχετικά ακριβές, στην περιοχή γύρω από το ηλιακό μεσημέρι. Η ισχύς της ακτινοβολίας δεν είναι υψηλή, όπως ακριβώς θα προβλεπόταν λόγω εποχής, αλλά η ατμόσφαιρα είναι ιδιαίτερος καθαρή, καθώς η διάχυτη συνιστώσα αποτελεί μόλις το ένα πέμπτο της συνολικής ακτινοβολίας.

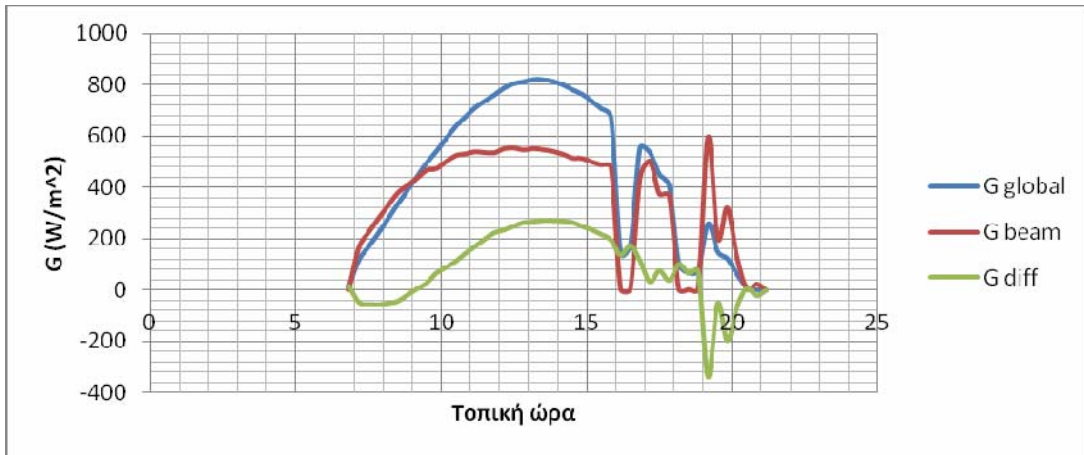
Χειμερινό ηλιοστάσιο



Εικ. 6,9: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 21/12/2010 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

Κατά την διάρκεια του χειμερινού ηλιοστασίου, το ύψος του ηλίου παίρνει τις μικρότερες τιμές από όλες τις μέρες του έτους. Το ηλιακό ζενίθ είναι μικρότερο από τις 30 μοίρες, οπότε η τροχιά του ηλίου απέχει αρκετά από την περιοχή όπου οι προβλέψεις του μοντέλου Erbs-Klein-Duffie είναι αρκούντως ακριβείς. Σ' αυτό το γεγονός οφείλονται οι αποκλίσεις που παρατηρούνται στο διάγραμμα. Τέτοιου είδους αποκλίσεις αναμένονται και σε οποιαδήποτε χειμωνιάτικη ημέρα, για τους ίδιους λόγους. Βεβαίως, ακόμα και έτσι, συγκεκριμένα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν. Παρατηρώντας την κατανόμη της ολικής ακτινοβολίας, σε συνδυασμό με την ποσόστωση της διάχυτης συνιστώσας, που κατά την διάρκεια των περισσότερων ωρών της ημέρας παραμένει μεγαλύτερη από την ακτινοβολία ευθείας δέσμης, γίνεται κατανοητό ότι επρόκειτο για μια έντονα συννεφιασμένη και πιθανώς βροχερή ημέρα.

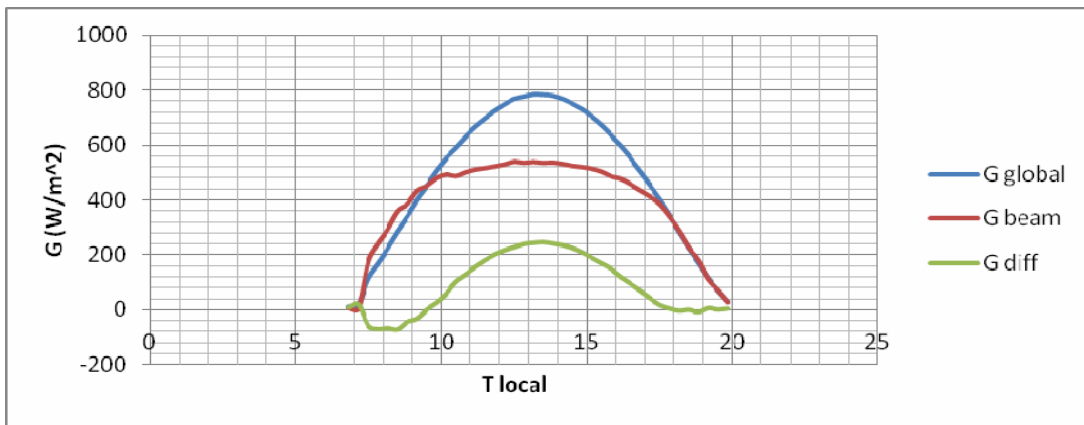
Θερινό ηλιοστάσιο



Εικ. 6,10: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 21/06/2010 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

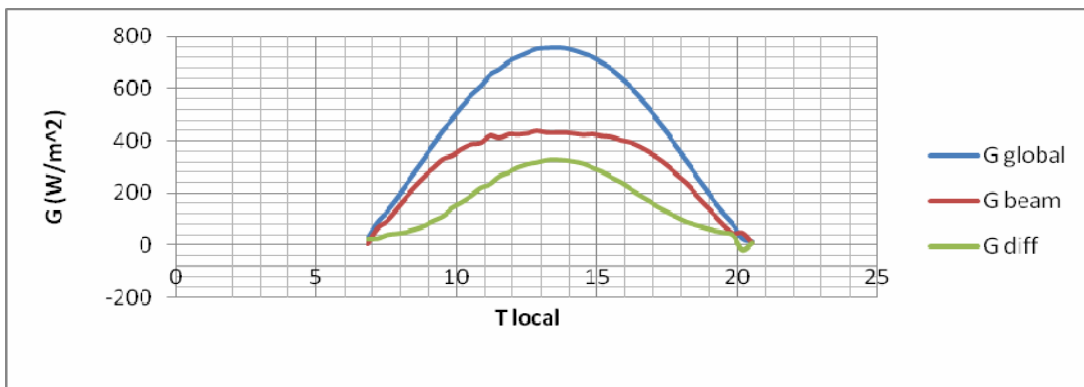
Κατά την διάρκεια του θερινού ηλιοστασίου, η ηλιακή απόκλιση γίνεται μέγιστη ($+23.45^\circ$) και αυτό οδηγεί στην μεγιστοποίηση της τιμής του ηλιακού ζενίθ, συγκρινόμενο με τις υπόλοιπες μέρες του έτους. Φυσικά, αυτό ισχύει για το βόρειο ημισφαίριο, ενώ για το νότιο ισχύει το αντίστροφο. Έτσι, το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie λειτουργεί πολύ καλά καθώς οι τιμές του ηλιακού ύψους ανήκουν στην κατάλληλη περιοχή, κατά την διάρκεια πολλών ωρών της ημέρας. Όσον αφορά το συγκεκριμένο διάγραμμα, παρατηρείται ότι οι καμπύλες ακολουθούν την κατανομή μια τυπικής ηλιόλουστης μέρας, μέχρι περίπου την τέταρτη απογευματινή (τοπική) ώρα, ενώ οι διακυμάνσεις που δημιουργούνται μετά από εκείνη την ώρα μπορούν να αποδοθούν σε μια απότομη αλλαγή των καιρικών συνθηκών, στην μεταστροφή δηλαδή του καθαρού ουρανού σε έντονα συννεφιασμένο ή και βροχερό. Επίσης, όσο η μέρα είναι ακόμα ηλιόλουστη, φαίνεται ότι η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην γη στο σημείο μετρήσεως είναι εξαιρετικά υψηλή, καθώς ξεπερνάει τα 800 W/m^2 κατά την διάρκεια του ηλιακού μεσημεριού, κάτι που είναι λογικό, αφού πρόκειται για μία καλοκαιρινή μέρα όπου ο ήλιος βρίσκεται στο μέγιστο ύψος συγκριτικά με τις υπόλοιπες μέρες του έτους. Επιπλέον, στο διάγραμμα παρουσιάζεται μια μικρή απόκλιση κατά την διάρκεια των πρώτων στιγμών μετά την ανατολή, που μπορεί να αποδοθεί στην σκιά του Υμηττού στο σημείο της μέτρησης.

2/5/2010



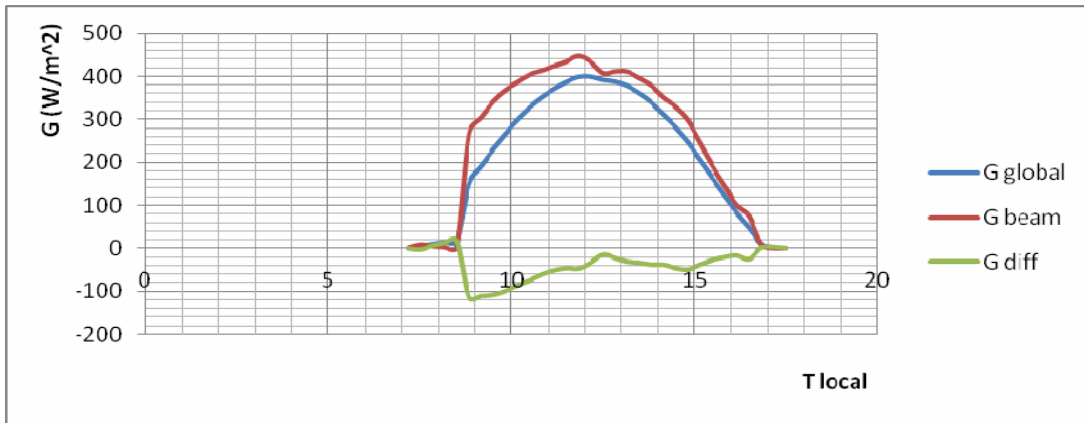
Εικ. 6.11: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για 02/05/2010 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

5/7/2011



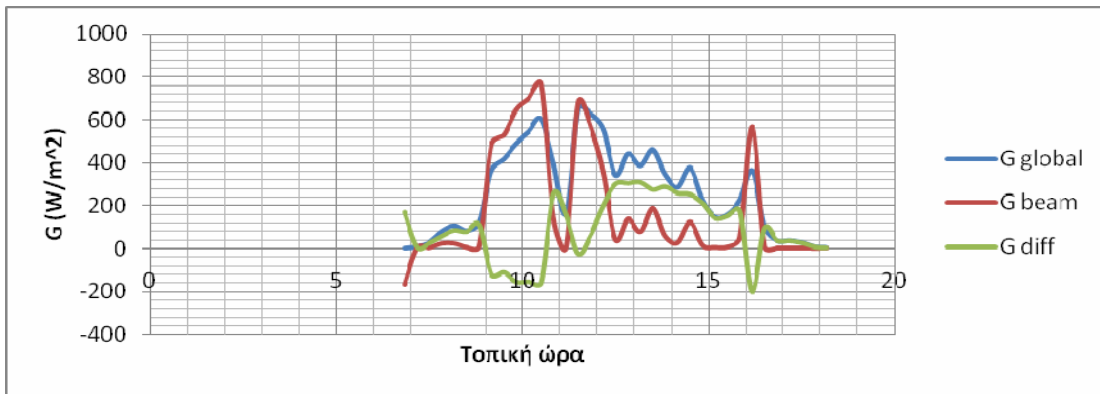
Εικ. 6.12: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για 05/07/2011 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

8/12/2011



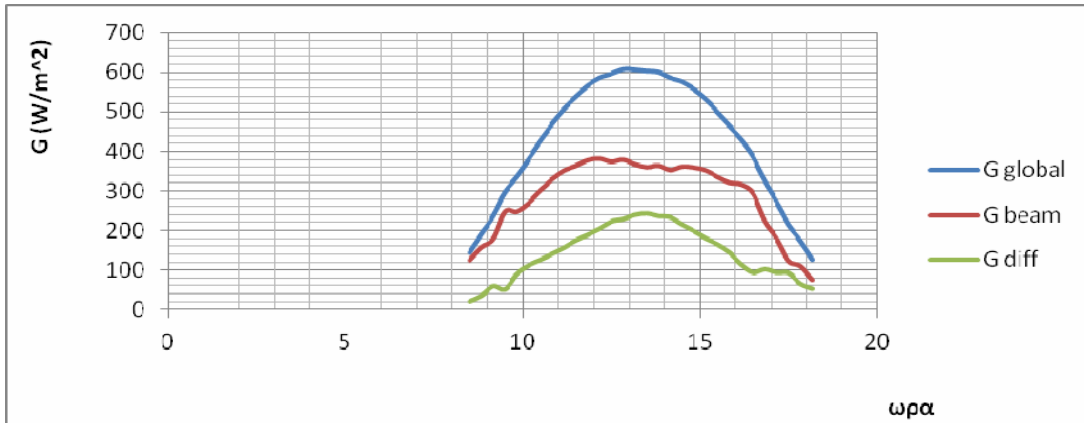
Εικ. 6.13: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 08/12/2011 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

9/3/2010



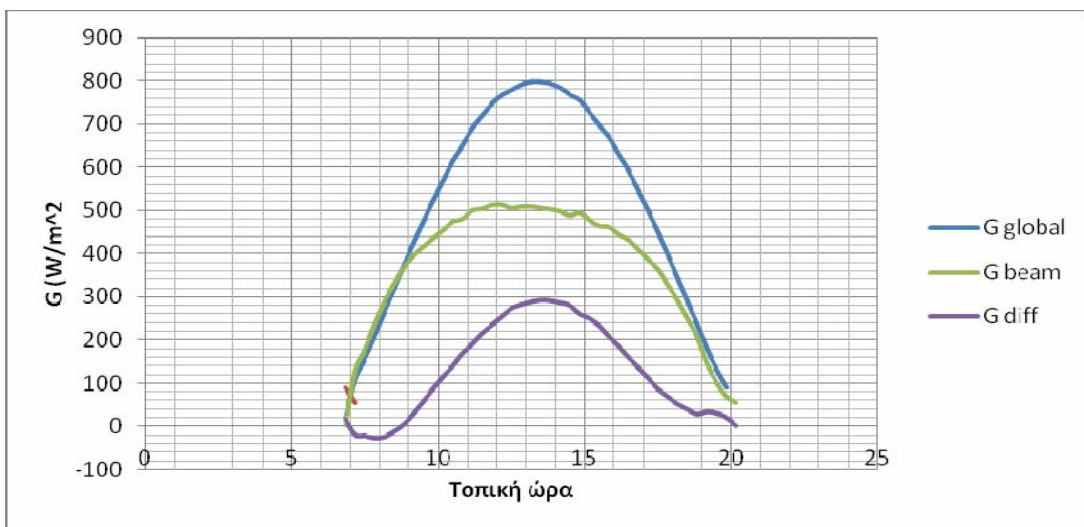
Εικ. 6.14: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 09/03/2010 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

19/9/2011



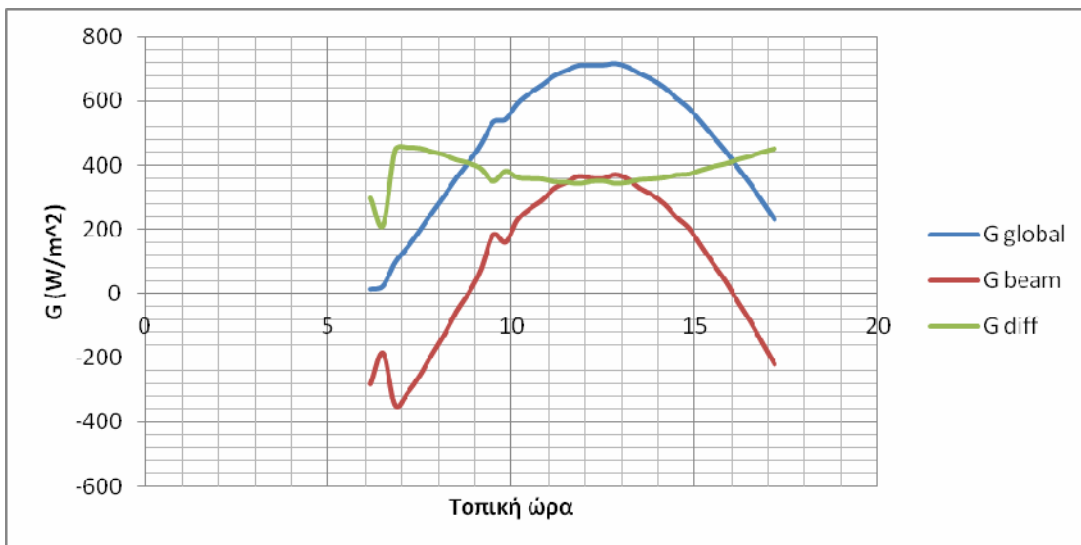
Εικ. 6.15: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 19/09/2011 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

23/6/2011



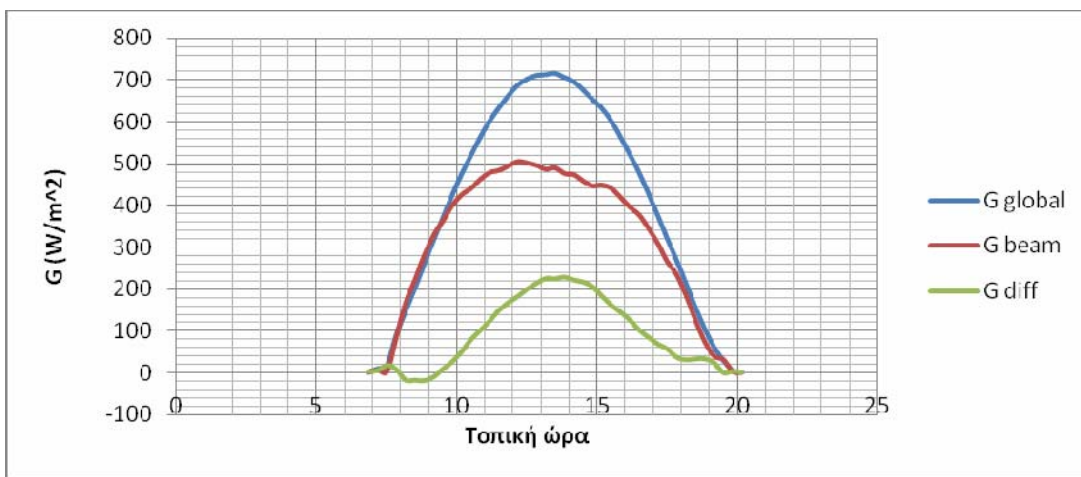
Εικ. 6.16: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 23/06/2011 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

25/8/2011



Εικ. 6.17: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 25/08/2011 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

31/8/2010



Εικ. 6.18: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 31/08/2010 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

Σημειώνεται ότι οι μετρήσεις της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας πάρθηκαν από το αρχείο μετρήσεων σε αντίστοιχη σελίδα στο διαδίκτυο.

6.6. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ 11^Η ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2013

6.6.1. Γενικά

Η παρούσα παράγραφος αφορά την συλλογή διαφόρων μετρήσεων της ηλιακής ακτινοβολίας που έγινε προσωπικά την ημερομηνία 11/4/2013. Τόπος της συλλογής δεδομένων ήταν η ταράτσα του κτιρίου που στεγάζει το Εργαστήριο Φωτοβολταϊκών, στο Ε.Μ.Π. Οι μετρήσεις άρχισαν στις 10.28 προ μεσημβρίας και περατώθηκαν στις 14.30 (μετά μεσημβρίας). Για την συλλογή δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ένα πυρανόμετρο Kipp&Zonen SP Lite, που μου παρείχε το εργαστήριο Φωτοβολταϊκών, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οποίου παρατίθενται στην επόμενη παράγραφο (6.6.2).

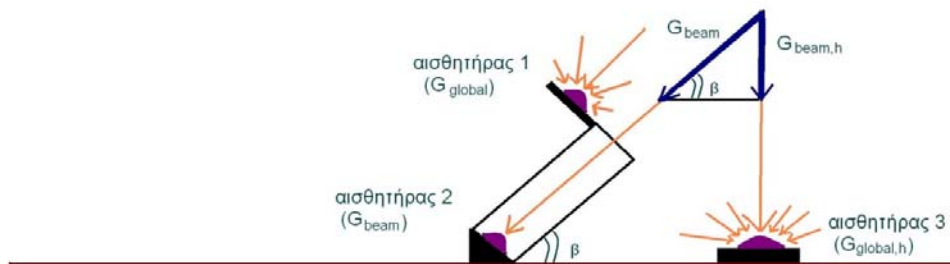
6.6.2. Πυρανόμετρο Kipp&Zonen SP Lite

Το μοντέλο SP Lite της εταιρίας Kipp&Zonen είναι ένα πυρανόμετρο σχεδιασμένο για τυπικές μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας. Είναι ειδικά σχεδιασμένο ως μονάδα παρακολούθησης και καταγραφής της ηλιακής ενέργειας για τις φωτοβολταϊκές εφαρμογές, για την εκτίμηση της αγροτικής εξατμισοδιαπνοής, όπως επίσης και για υπολογισμούς της διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Η συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπό οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες, και ο αισθητήρας της λαμβάνει δεδομένα από όλο το εύρος του νοητού ημισφαιρίου της ουράνιας σφαίρας. Διαθέτει κεραμικό υπόστρωμα, φτιαγμένο από πυρίτιο. Το πυρανόμετρο διαθέτει αισθητήρα φωτοδιόδου, ο οποίος δημιουργεί μια τάση που είναι ανάλογη με την μετρούμενη ηλιακή ακτινοβολία. Λόγω του ιδιαίτερου σχεδιασμού του, η ευαισθησία του οργάνου είναι ανάλογη του συνημιτόνου της γωνίας πρόσπτωσης της εισερχόμενης ακτινοβολίας, επιτρέποντας έτσι συνεχείς και ακριβείς μετρήσεις. Το εύρος του ηλιακού φάσματος που αναλύει κυμαίνεται μεταξύ 0,4 και 1,1 μικρομέτρων, ενώ ο χρόνος απόκρισης είναι λιγότερος από ένα δευτερόλεπτο. Παρουσιάζει μικρή

θερμοκρασιακή εξάρτηση (περίπου 0,15% για κάθε επιπλέον βαθμό Κελσίου), ενώ είναι απόλυτα λειτουργικό για θερμοκρασίες μέχρι 70 βαθμούς Κελσίου. Κατατάσσεται στην κατηγορία πυρανομέτρων First Class, που σημαίνει ότι η ποιότητα του είναι μεσαίας κατηγορίας.

6.6.3. Περιγραφή της διαδικασίας

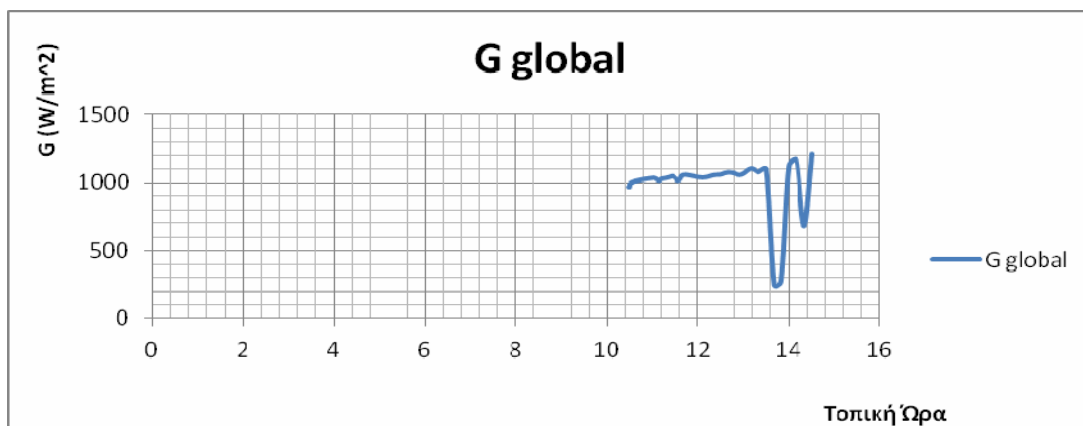
Η συσκευή μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας στήθηκε στην ταράτσα του κτηρίου που στεγάζει το εργαστήριο φωτοβολταϊκών, στο Ε.Μ.Π. Το μέρος δεν έχει φυσικά εμπόδια τριγύρω, ώστε να επηρεασθούν οι μετρήσεις. Η συσκευή είχε τρεις αισθητήρες, ο καθένας από τους οποίους μετρούσε διαφορετικό μέγεθος. Ο πρώτος αισθητήρας μετρούσε την ολική ηλιακή ακτινοβολία που λάμβανε η τοποθεσία, στην διεύθυνση της άμεσης δέσμης του ήλιου. Δίπλα από αυτόν, υπήρχε ο δεύτερος αισθητήρας που μετρούσε την ακτινοβολία ευθείας δέσμης. Για τον λόγο αυτό, είναι τοποθετημένος στο βάθος ενός μεταλλικού κυλινδρικού σωλήνα, ώστε η ακτινοβολία που λαμβάνει να είναι απομονωμένη από την διάχυτη συνιστώσα. Οι δύο αισθητήρες ήταν στερεωμένοι σε περιστρεφόμενη μεταλλική βάση που επιτελούσε λειτουργία ηλιακού ιχνηλάτη: έστρεφε τον μεταλλικό κύλινδρο με τέτοιο τρόπο ώστε να ευθυγραμμίζεται προς τον ήλιο, κι έτσι να μετράται επιτυχώς η συνιστώσα ευθείας δέσμης. Ο ηλιακός ιχνηλάτης λειτουργούσε συνδεδεμένος με υπολογιστή, βάσει ειδικού λογισμικού που υπολόγιζε την θέση του ήλιου στην ουράνια σφαίρα συναρτήσει των συντεταγμένων της τοποθεσίας, την ημερομηνία και την ώρα της ημέρας. Τέλος, υπήρχε και ένας τρίτος αισθητήρας που λάμβανε μετρήσεις της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου εδάφους, δηλαδή την συνιστώσα της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που είναι κάθετη στο επίπεδο του εδάφους μαζί με την διάχυτη συνιστώσα από όλες τις κατευθύνσεις. Οι μετρήσεις έγιναν με βήμα αρχικά ενός λεπτού, και στην συνέχεια το βήμα έγινε 5 λεπτά. Οι ενδείξεις, λόγω της λειτουργίας του πυρανόμετρου που έχει ήδη αναφερθεί, δίνονταν σε miliVolts (mV), και με τους κατάλληλους συντελεστές μετατράπηκαν σε μονάδες μέτρησης ηλιακής ακτινοβολίας (πυκνότητα ισχύος, W/m^2).



Εικ. 6.19 : Οι τρεις αισθητήρες του πυρανόμετρου

7.6.4. Διαγράμματα και συμπεράσματα

Παρακάτω παρατίθενται κάποια διαγράμματα όπως αυτά προέκυψαν από τις ληφθείσες μετρήσεις.

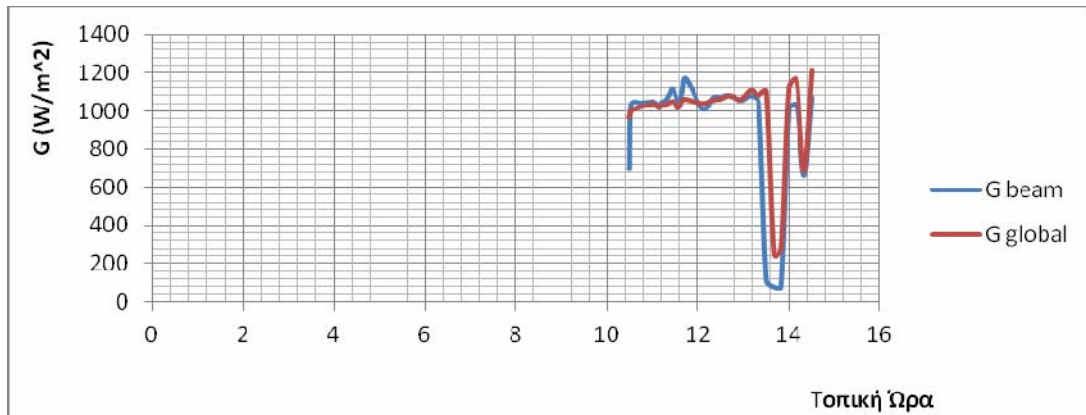


Εικ. 6.20 : Η συνολική ηλιακή ακτινοβολία κατά την 11^η Απριλίου 2013

Παρατηρούμε ότι η όλικη ακτινοβολία κυμαίνεται γενικά σε υψηλά επίπεδα, όπως θα προσμέναμε λόγω της εποχής που γίναν οι μετρήσεις (άνοιξη). Ενώ γενικά η καμπύλη είναι αύξουσα όσο πλησιάζουμε προς το ηλιακό μεσημέρι, κατά την πρώτη ώρα μετά

μεσημβρίας βλέπουμε μια απότομη πτώση της λαμβάνουσας ακτινοβολίας. Αυτό οφείλεται στην συννεφιά που επικράτησε εκείνες τις ώρες. Γενικώς, υπήρχαν εναλλαγές μεταξύ συννεφιάς και ηλιοφάνειας τις ώρες περίξ του μεσημεριού, όπως διαφαίνεται και από τις μεταβολές της κλίσης του διαγράμματος.

Το επόμενο διάγραμμα συμπεριλαμβάνει τις μετρηθείσες τιμές της ολικής ακτινοβολίας μαζί με τις μετρηθείσες τιμές της συνιστώσας ευθείας δέσμης.



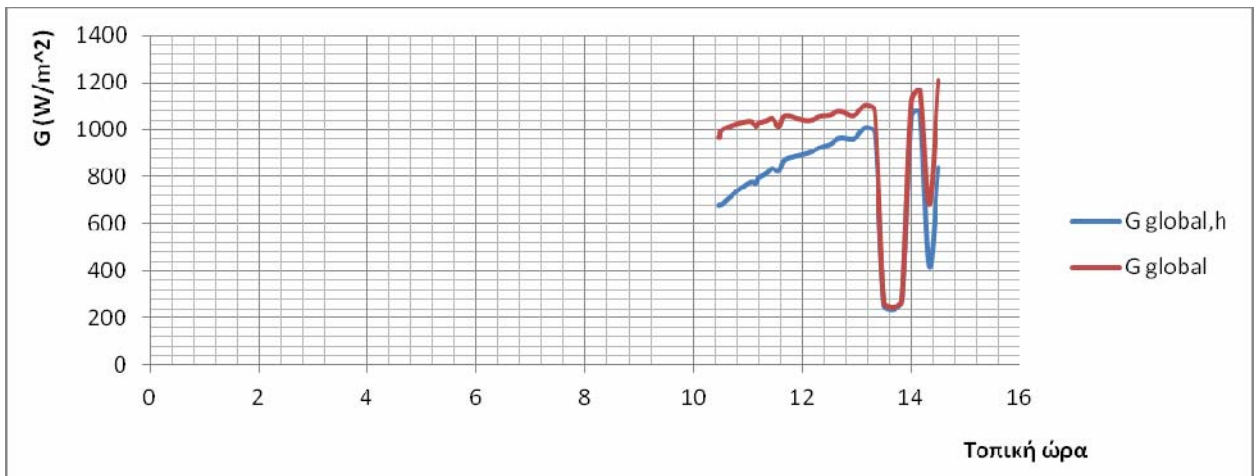
Εικ. 6.21 : Σύγκριση συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας και ακτινοβολίας ευθείας δέσμης κατά την 11^η Απριλίου 2013

Παρατηρούμε ότι, σε αντίθεση από ότι προβλέπει η θεωρία η συνιστώσα ευθείας δέσμης είναι περίπου ίση, και σε μερικά σημεία ακόμη και μεγαλύτερη από την ολική ηλιακή ακτινοβολία. Τούτο το συστηματικό σφάλμα μπορεί να αποδοθεί σε χαρακτηριστικά της συσκευής μέτρησης. Πράγματι, ο αισθητήρας 2 (Εικ.7.19) που είναι σχεδιασμένος να απομονώνει την συνιστώσα ευθείας δέσμης παρουσιάζει αυξημένες μετρήσεις. Αυτό συμβαίνει γιατί το εσωτερικό του κυλίνδρου ενισχύει την ένδειξη του αισθητήρα λόγω των ανακλαστικών ιδιοτήτων της επιφάνειάς του. Οι ηλιακές ακτίνες που εισέρχονται στον κύλινδρο και δεν είναι απολύτως ευθυγραμμισμένες με την κατεύθυνση αυτού, προσκρούουν στα εσωτερικά τοιχώματα και ανακλώνται, φθάνοντας τελικά στον αισθητήρα στην βάση του κυλίνδρου. Συνεπώς, ο αισθητήρας δέχεται επιπλέον ηλιακή ακτινοβολία, πέραν της αμιγούς ευθείας δέσμης, για αυτό και εμφανίζει τις τιμές της συνιστώσας ευθείας δέσμης ενισχυμένες. Είναι δε χαρακτηριστικό ότι κατά την διάρκεια της συννεφιάς, η G_{global} είναι εμφανώς μεγαλύτερη από την συνιστώσα της ευθείας δέσμης, αφού τότε γίνεται περισσότερο έντονη η επίδραση της διάχυτης συνιστώσας που οφείλεται στα

σύννεφα και η οποία μετράται κανονικά από τον αισθητήρα 1, δεν φθάνει όμως ως την βάση του κυλίνδρου που βρίσκεται ο αισθητήρας 2.

Για να αποφευχθεί εν γένει τούτο το συστηματικό σφάλμα, πρέπει να μειωθούν στο ελάχιστο οι ανακλαστικές ιδιότητες των τοιχωμάτων του κυλίνδρου. Αυτό μπορεί να γίνει είτε με μαύρη βαφή, ώστε να απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία, είτε με επένδυση από ειδικό υλικό που αποτρέπει τις ηλιακές ακτίνες να φθάσουν στην βάση του κυλίνδρου, όπου βρίσκεται ο αισθητήρας.

Παρακάτω (Εικ. 6.22), δίνεται το διάγραμμα που συγκρίνει τις ληφθείσες μετρήσεις της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου $G_{global,h}$ με τις τιμές της ολικής ακτινοβολίας στην διεύθυνση της ευθείας ηλιακής δέσμης G_{global} .



Εικ. 6.22 : Σύγκριση της συνολικής ακτινοβολίας οριζοντίου εδάφους και ολικής ακτινοβολίας στην διεύθυνση του ήλιου

Παρατηρούμε ότι οι τιμές της G_{global} είναι κατά κανόνα μεγαλύτερες από τις τιμές της $G_{global,h}$. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο αισθητήρας 1 δέχεται ολόκληρη την συνιστώσα της ευθείας δέσμης, η οποία είναι και η κυρίαρχη συνιστώσα όταν ο ουρανός είναι καθαρός. Αντίθετα, ο αισθητήρας 3, υπεύθυνος για την μέτρηση του $G_{global,h}$ δέχεται μόνο ένα μέρος της συνιστώσας ευθείας δέσμης. Για την ακρίβεια, με απλή επισκόπηση της εικόνας, γίνεται αντιληπτό ότι το πόσο της ακτινοβολίας ευθείας δέσμης που δέχεται το έδαφος δίνεται από την σχέση :

$$G_{beam,h} = G_{beam} * \sin\beta$$

Όπου β το ύψος του ήλιου για κάθε δεδομένη στιγμή.

Όπως παρατηρούμε και στο διάγραμμα 6.22, κατά τις ώρες που ο ουρανός δεν είναι καθαρός και η επίδραση της ευθείας δέσμης εξασθενεί, οι τιμές των G_{global} και $G_{\text{global,h}}$ περίπου ταυτίζονται. Αυτό συμβαίνει γιατί εκείνες τις ώρες, μετράται σχεδόν αποκλειστικά η διάχυτη συνιστώσα, που είναι κατά κανόνα ισοτροπική ως προς τις διάφορες διευθύνσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ.Θ.Δέρβος " Εισαγωγή στα Ημιαγώγιμα Υλικά και Φωτοβολταϊκές Διατάξεις",
Αθήνα 2011
- [2] Erbs, D; Klein, S. and Duffie, J.: ‘Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation’ (1982)
- [3] John Clark Craig : ‘Sun position’
- [4] <http://pveducation.org/>
- [5] <http://el.wikipedia.org>
- [6] <http://eml.ece.ntua.gr>

