



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

**Ηλιακή Γεωμετρία : Προσδιορισμός της Άμεσης Ηλιακής Δέσμης  
για Εφαρμογή σε Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις  
για Συντεταγμένες Τόπου  $(37.96^{\circ}, -23.72^{\circ})$  και  $(39.3^{\circ}, -22.38^{\circ})$**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ Ν. ΚΟΝΤΟΠΟΥΛΟΥ**

**Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Δέρβος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π**

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2012





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

**Ηλιακή Γεωμετρία : Προσδιορισμός της Άμεσης Ηλιακής Δέσμης  
για Εφαρμογή σε Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις  
για Συντεταγμένες Τόπου  $(37.96^{\circ}, -23.72^{\circ})$  και  $(39.3^{\circ}, -22.38^{\circ})$**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ Ν. ΚΟΝΤΟΠΟΥΛΟΥ**

**Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Δέρβος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π**

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

.....	.....	.....
Κωνσταντίνος Δέρβος	Παναγιώτα Βασιλείου	Γεώργιος Ματσόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.	Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2012



.....  
Κοντοπούλου Ν. Ευαγγελία

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Ευαγγελία Ν. Κοντοπούλου 2012

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου 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 τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται διεξοδικά η ηλιακή γεωμετρία. Με βάση τη θέση του Ηλίου αλλά και τη σχετική του κίνηση ως προς τη Γη υπολογίζονται, με χρήση των ηλιακών εξισώσεων, οι ηλιακές συντεταγμένες (αζιμούθιο και ύψος Ηλίου) μεγέθη πολύ χρήσιμα σε πολλές επιστήμες όπως η αστρονομία, η μετεωρολογία αλλά και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.

Ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον Ήλιο –πεδίο που μελετάται στην εργασία- οι ηλιακές συντεταγμένες έχουν βαρύνουσα σημασία, αφού ανάλογα με την κίνηση του Ήλιου και τη γεωγραφική θέση κάθε περιοχής μπορεί η στήριξη των φωτοβολταϊκών στοιχείων να αυξήσει ή να μειώσει κατά πολύ την ενεργειακή τους απόδοση.

Για τον υπολογισμό των συντεταγμένων του Ηλίου κρίνεται απαραίτητη και αρκετά σημαντική η χρήση κατάλληλου προγραμματιστικού περιβάλλοντος για την επεξεργασία των δεδομένων. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε περιβάλλον Matlab και δημιουργήθηκε ένας εύχρηστος και φιλικός προς το χρήστη κώδικας που υπολογίζει σε ετήσια βάση τη θέση του Ηλίου ανά κάποιο βήμα το οποίο επιλέγεται από το χρήστη. Στην εργασία αναλύονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του κώδικα για τις συντεταγμένες της Αθήνας και των Φαρσάλων.

Στη συνέχεια της εργασίας αναλύθηκε η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον Ήλιο. Εξετάστηκε η διαδρομή που ακολουθεί αλλά και τα εμπόδια που συναντά στο ταξίδι της μέχρι τη Γη και ορίστηκαν οι μηχανισμοί απορρόφησης, σκέδασης και ανάκλασης που αποτελούν τους κύριους λόγους που η ακτινοβολία φτάνει μειωμένη στην επιφάνεια της Γης. Επιπλέον αναλύθηκε το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie που με δεδομένες τις συντεταγμένες του Ήλιου και τη συνολική ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης μπορεί να υπολογίσει την ακτινοβολία που «χάθηκε» στη διαδρομή είτε επειδή ανακλάστηκε, είτε επειδή σκεδάστηκε.

Στην παρούσα εργασία έγινε η ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας στις συνιστώσες της για διάφορες ημέρες του χρόνου για τις συντεταγμένες της Αθήνας με χρήση του παραπάνω μοντέλου. Σε αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα μετρήσεων του εργαστηρίου φωτοβολταϊκής τεχνολογίας του Ε.Μ.Π.

Η συστηματική μελέτη των μηχανισμών σκέδασης και τελικά ο προσδιορισμός του είδους της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε κάθε περιοχή διαχρονικά, αποτελούν σημαντικό εργαλείο αλλά και κριτήριο για την επιλογή του τρόπου στήριξης φωτοβολταϊκών πλαισίων με γνώμονα την απόδοσή τους.

**Λέξεις κλειδιά:**

Ήλιος, ηλιακή γεωμετρία, ηλιακές συντεταγμένες, αζιμούθιο, ύψος Ηλίου, στήριξη φωτοβολταϊκών πλαισίων, solar trackers, ηλιακή ακτινοβολία, αέρια μάζα, ηλιακή τροχιά, σκέδαση, ανάκλαση, μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας, άμεση ηλιακή δέσμη, μέθοδος Erbs-Klein-Duffie, Φάρσαλα.



## **ABSTRACT**

This thesis studies the solar geometry in detail; more precisely, based on the position of the sun and its relative motion to the Earth, the solar coordinates (azimuth and altitude) can be calculated. This information is considered to be essential in many disciplines such as astronomy, meteorology and in the field of electrical energy production by means of photovoltaic technology.

In order to calculate the coordinates of the Sun, the MATLAB environment was used and a convenient and user-friendly software was created. This program calculates the position of the Sun on an annual basis in a user-defined time step and has been applied to the coordinates of the cities of Athens and Farsala.

Furthermore, this thesis describes aspects of the photovoltaic phenomenon theory and the function of semiconductors and the photovoltaic systems. Additionally, some of the most important and commonly used ways of supporting a photovoltaic panel are discussed.

Moreover, the radiation emitted by the Sun is analyzed. Based on the path that the solar radiation follows and the obstacles it encounters on its journey to the Earth, the mechanisms of absorption, scattering and reflection are studied as they constitute the main reasons for the reduction of the radiation that reaches the Earth's surface. Additionally, the Erbs-Klein-Duffie model is analyzed; this, given the coordinates of the Sun and the total radiation falling on the Earth's surface, can calculate the radiation lost due to reflection or scattering.

Finally, the solar radiation for the coordinates of Athens has been calculated by using measurements from the N.T.U.A. Laboratory of Photovoltaic Technology.

To conclude, a systematic study of the amount of solar radiation that impacts in a region and the mechanisms reducing it consist important tools and criteria for choosing the photovoltaic panels support.

### **Keywords:**

Sun, solar geometry, solar coordinates, azimuth, sun's altitude, support of photovoltaic panels, solar trackers, solar radiation, Erbs-Klein-Duffie model, measurement of solar radiation, airmass, solar orbit, diffuse solar radiation, direct solar radiation, reflection, scattering, Farsala.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Ηλιακή γεωμετρία.....	15
1.1. Εισαγωγή.....	15
1.2. Ήλιος και Γη.....	15
1.3. Σχετική κίνηση Ήλιου- Γης.....	19
1.4. Μοντέλο μελέτης κίνησης.....	20
1.4.1. Ηλιακή Ώρα.....	23
1.4.1.1. Μεσημβρινός αναφοράς.....	23
1.4.1.2. Μήκος τόπου.....	23
1.4.1.3. Εξίσωση χρόνου.....	24
1.4.2. Ηλιακή απόκλιση $\delta$ .....	25
1.4.3. Γωνία ώρας $\omega$ .....	26
1.4.4. Συντεταγμένες Ηλίου.....	27
1.4.5. Ανατολή, δύση και ηλιοφάνεια.....	27
1.4.5.1. Εφαρμογή για τις συντεταγμένες της Αθήνας.....	27
1.4.6. Αναζήτηση των ηλιακών συντεταγμένων για τέσσερις ημέρες του έτους στην Αθήνα.....	30
2. Υλικά και διατάξεις φωτοβολταϊκής τεχνολογίας και τεχνικές στήριξης φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	33
2.1. Εισαγωγή.....	33
2.2. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο και ημιαγωγοί.....	33
2.3. Δημιουργία ηλεκτρικά φορτισμένων ημιαγωγών.....	34
2.4. Δημιουργία της επαφής (του ηλεκτρικού πεδίου).....	35
2.5. Η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας.....	35
2.6. Φωτοβολταϊκές διατάξεις και αντίστοιχα υλικά.....	36
2.7. Υλικά που χρησιμοποιούνται για φωτοβολταϊκά.....	37

2.7.1.	Τύποι φωτοβολταϊκών συστημάτων πυριτίου «μεγάλου πάχους».....	37
2.7.1.1.	Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου ( <i>single crystalline silicon, sc-Si</i> ).....	37
2.7.1.2.	Φωτοβολταϊκά κελιά πολυκρυσταλλικού πυριτίου ( <i>multicrystalline silicon, mc – Si</i> ).....	38
2.7.1.3.	Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου ( <i>ribbon silicon</i> )...	38
2.7.2.	Φωτοβολταϊκά υλικά «λεπτών επιστρώσεων», <i>thin film</i> .....	39
2.7.2.1.	Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός ( $CuInSe_2$ ή CIS, με προσθήκη γαλλίου CIGS).....	39
2.7.2.2.	Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου ( <i>Amorphous ή thin film silicon, a – Si</i> ).....	40
2.7.2.3.	Τελουριούχο κάδμιο ( $CdTe$ ).....	41
2.7.2.4.	Αρσενικούχο γάλλιο ( $GaAs$ ).....	42
2.7.3.	Υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία.....	42
2.7.4.	Άλλες Τεχνολογίες.....	43
2.8.	Τρόποι εγκατάστασης φωτοβολταϊκών.....	44
2.8.1.	Αυτόνομα ή αυτοδύναμα φωτοβολταϊκά συστήματα ( <i>off – grid systems</i> ).....	44
2.8.2.	Διασυνδεδεμένα με το δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα .....	46
2.8.3.	Υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα.....	47
2.9.	Συλλογή του ηλιακού φωτός.....	48
2.9.1.	Στήριξη με σταθερή γωνία κλίσης του συλλέκτη.....	48
2.9.2.	Στήριξη με εποχιακή ρύθμιση της κλίσης του συλλέκτη.....	49
2.9.3.	Συστήματα συνεχούς ημερήσιας παρακολούθησης, ιχνηλάτες ( <i>trackers</i> ).....	50
2.9.3.1.	Στροφή γύρω από έναν άξονα.....	51
2.9.3.1.1.	Ο αζιμουθιακός ιχνηλάτης.....	51
2.9.3.1.2.	Πολικός ιχνηλάτης ( <i>poloar tracker</i> ).....	52
2.9.3.2.	Στροφή γύρω από δύο άξονες.....	52
2.10.	Κριτική και γενικά συμπεράσματα για τους <i>solar trackers</i> .....	53
3.	Παρακολούθηση ηλιακής τροχιάς.....	55
3.1.	Εισαγωγή.....	55
3.2.	Ανάλυση του κώδικα.....	55

3.3. Εφαρμογή του κώδικα για τις συντεταγμένες της Αθήνας.....	59
3.4. Εφαρμογή του κώδικα για τις συντεταγμένες των Φαρσάλων.....	61
4. Ηλιακή ακτινοβολία.....	67
4.1. Εισαγωγή.....	67
4.2. Η πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας από τη δημιουργία της μέχρι το έδαφος.....	67
4.3. Οι μηχανισμοί εξασθένησης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στη γήινη ατμόσφαιρα.....	71
4.4. Αέρια Μάζα.....	72
4.5. Μεταβολή των Αερίων Μαζών για την Αθήνα στη διάρκεια του έτους.....	73
4.6. Μεταβολή των Αερίων Μαζών για τα Φάρσαλα στη διάρκεια του έτους.....	74
4.7. Εποχιακή Μεταβολή Αερίων Μαζών.....	75
4.8. Συμπεράσματα.....	75
5. Μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας.....	77
5.1. Εισαγωγή.....	77
5.2. Το πυρανόμετρο.....	77
5.3. Το πυρηλιόμετρο.....	80
5.4. Το ακτινόμετρο.....	81
5.5. Ο ηλιογράφος – καταγραφικό Campbell-Stokes.....	82
5.6. Συμπεράσματα.....	84
6. Είδη ακτινοβολιών και μέθοδος Erbs Klein Duffie.....	85
6.1. Εισαγωγή.....	85
6.2. Τα είδη της ηλιακής ακτινοβολίας.....	85
6.3. Σκοπός του υπολογισμού των συνιστωσών της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας.....	87
6.4. Μοντέλα υπολογισμού των συνιστωσών της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας.....	88
6.5. Ανάλυση του μοντέλου Erbs – Klein – Duffie.....	88
6.6. Εφαρμογή του μοντέλου Erbs – Klein – Duffie για μετρήσεις που πάρθηκαν	

<i>στην Αθήνα για διάφορες ημέρες του έτους.....</i>	<i>91</i>
<i>7. Συμπεράσματα και προεκτάσεις.....</i>	<i>103</i>
<i>Βιβλιογραφία.....</i>	<i>105</i>
<i>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</i>	<i>106</i>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ : ΗΛΙΑΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

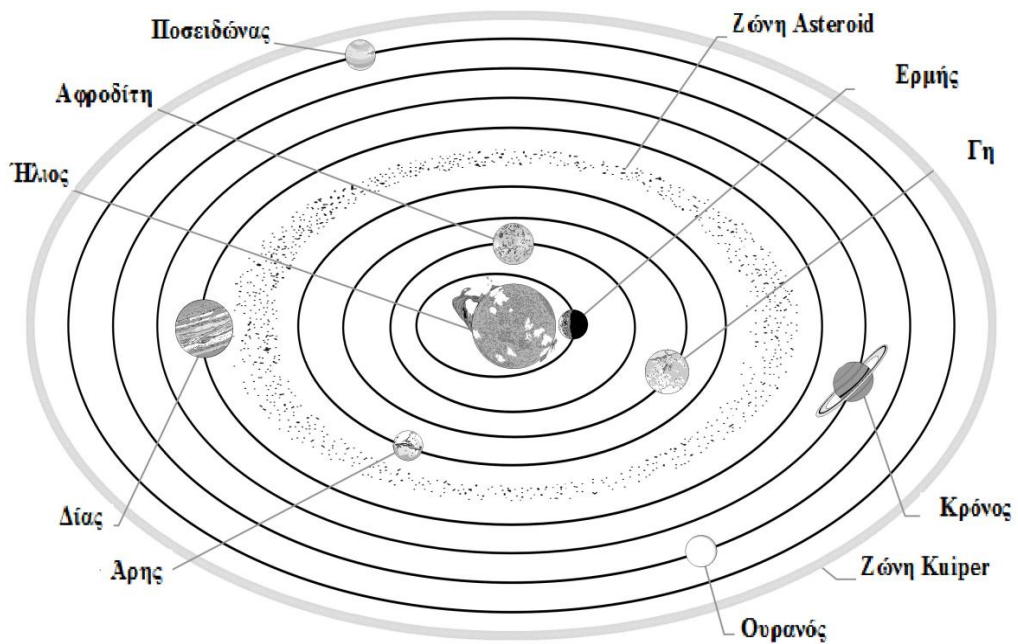
### 1.1. Εισαγωγή

Το πρώτο κεφάλαιο μελετά κάποια χαρακτηριστικά του Ήλιου και της Γης όπως επίσης και των κινήσεών τους. Ακόμα εξετάζει ένα μοντέλο που μελετά τη σχετική τους κίνηση και διατυπώνει τις εξισώσεις που το περιγράφουν. Τέλος, το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται για της συντεταγμένες της Αθήνας και στη συνέχεια παρουσιάζονται και αναλύονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα όσον αφορά την ηλιοφάνεια και την τροχιά του ηλίου.

### 1.2. Ήλιος και Γη

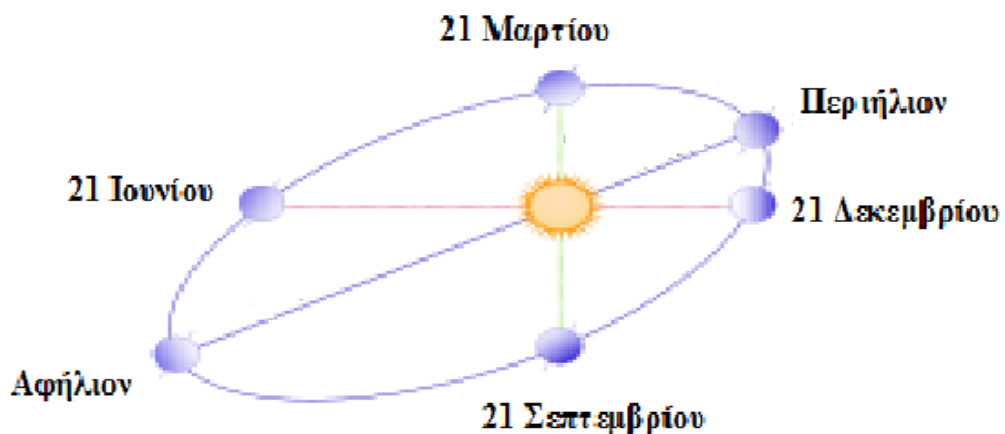
Ο Ήλιος είναι ένας αστέρας της κύριας ακολουθίας με φασματικό τύπο G2 V, έχει δηλαδή μεγαλύτερη μάζα και θερμοκρασία από ότι ένα μέσο αστέρι αλλά σημαντικά μικρότερη από έναν μπλε γίγαντα, ενώ η ηλικία του εκτιμάται στα 5 δισεκατομμύρια. Ακολουθεί μία τροχιά μέσα στον Γαλαξία σε μία απόσταση 25.000 με 28.000 έτη φωτός από το κέντρο του, ολοκληρώνοντας μία περιφορά σε περίπου 226 εκατομμύρια έτη. Γύρω από τον Ήλιο έχουν τις τροχιές τους οι οκτώ πλανήτες, μεταξύ τους και η Γη.

Στην αντίληψη του μεγέθους του Ήλιου συχνά γίνεται λόγος του όρου "φαινόμενη διάμετρος του Ηλίου". Φαινόμενη διάμετρος του Ηλίου η οποία είναι η γωνία  $AGB$  με την οποία παρατηρείται ο Ήλιος από τη Γη όταν  $A$  και  $B$  είναι αντιδιαμετρικά σημεία της περιφέρειας του δίσκου του Ηλίου και  $\Gamma$  το σημείο της Γης (του παρατηρητή). Η διχοτόμος  $AGB$  εκφράζει την απόσταση Γης-Ηλίου. Η φαινόμενη διάμετρος του Ήλιου μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους: Στις 3 Ιανουαρίου λαμβάνει τη μεγαλύτερη τιμή, ίση προς  $32' 36'',2$  ενώ στις 4 Ιουλίου περιορίζεται στην ελάχιστη τιμή των  $31' 32''$ .



Σχ.1.1 : Το Ηλιακό σύστημα

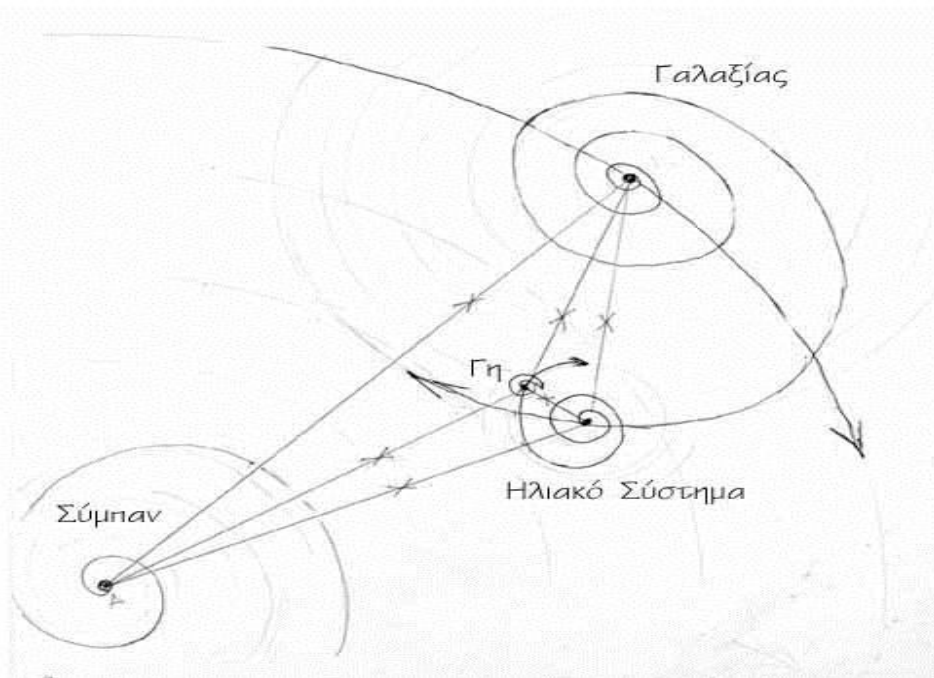
Αυτή η μεταβολή της φαινόμενης διαμέτρου αποδεικνύει ότι η Γη δεν περιφέρεται γύρω τον Ήλιο σε κυκλική τροχιά αλλά σε ελλειπτική σε τρόπο ώστε την 4η Ιανουαρίου η απόσταση Γης-Ήλιου να λαμβάνει την ελάχιστη τιμή των 147.098.074 km και στις 4 Ιουλίου τη μέγιστη τιμή των 152.100.000 km. Έτσι η μέση τιμή της απόστασης είναι 152.097.701 km.



Σχ.1.2 : Περιφορά της Γης γύρω από τον Ήλιο



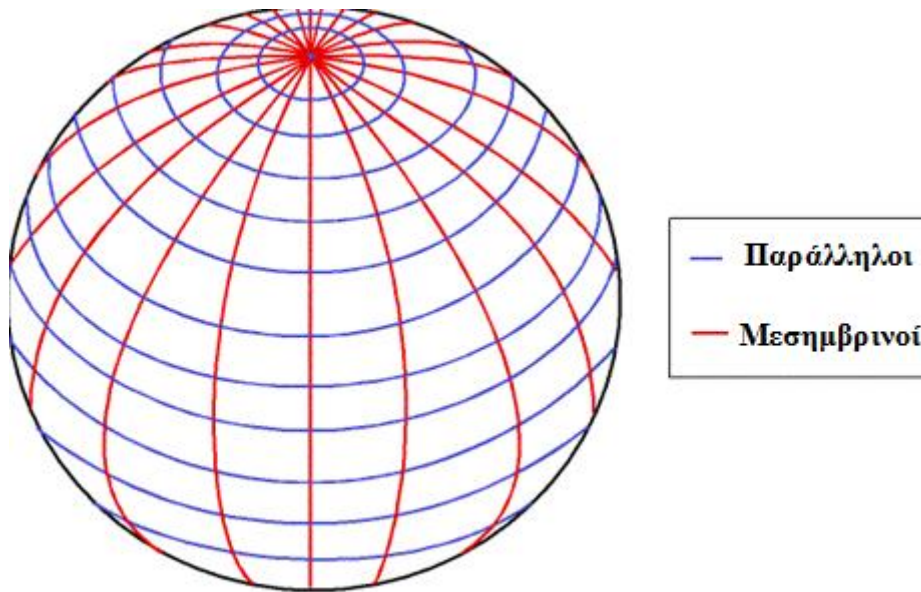
Η Γη όμως δεν περιφέρεται μόνο γύρω από τον Ήλιο. Στην πραγματικότητα πραγματοποιεί τέσσερις κινήσεις: την περιστροφή γύρω από τον άξονά της, την περιφορά γύρω από τον Ήλιο, την ηλιακή μεταβατική περιφορά που πραγματοποιεί ακολουθώντας την περιστροφή του Ηλιακού συστήματος και την Γαλαξιακή μεταβατική περιφορά που πραγματοποιεί ακολουθώντας την περιστροφή του Γαλαξία.



Σχ.1.3 : Κινήσεις της Γης

Οι πιο σημαντικές κινήσεις οι οποίες και θα μελετηθούν είναι οι δύο πρώτες. Για τη μελέτη αυτή είναι απαραίτητο να αναφερθούν κάποια στοιχεία όσον αφορά τον προσδιορισμό της θέσης ενός παρατηρητή στο γήινο έδαφος.

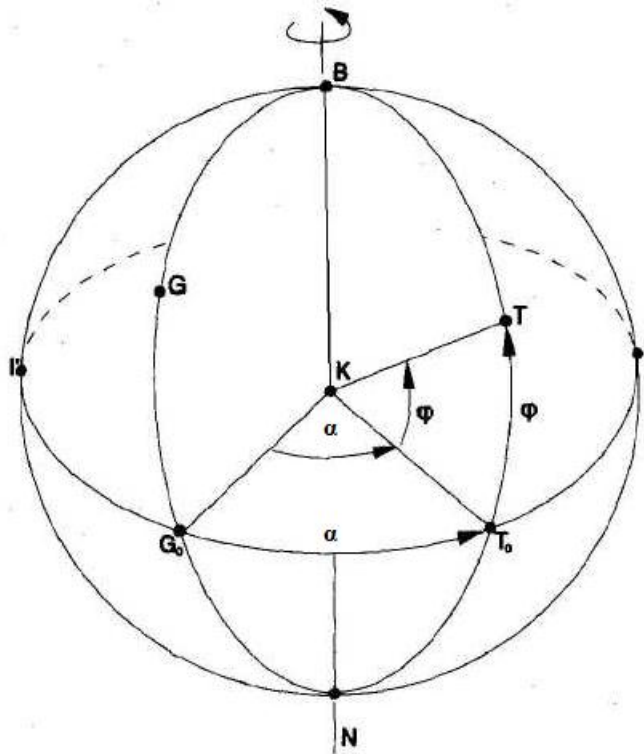
Όπως είναι γνωστό, η οποιαδήποτε θέση πάνω στη Γη προσδιορίζεται με τη βοήθεια κάθετων ημικυκλίων που ονομάζονται μεσημβρινοί και οριζόντιων παράλληλων κύκλων που ονομάζονται παράλληλοι.



Σχ.1.4 : Μεσημβρινοί και Παράλληλοι κύκλοι

Αρχή σε αυτό το σύστημα αποτελούν ο μεσημβρινός του Γκρίνουιτς και ο Ισημερινός και γι' αυτό το σημείο τομής τους αποτελεί το σημείο αναφοράς στην επιφάνεια της Γης.

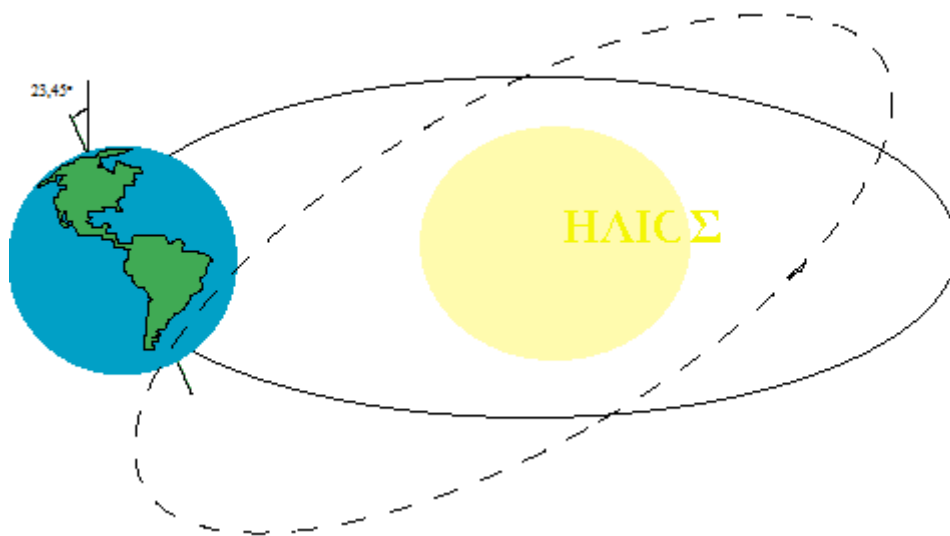
Η Γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του Ισημερινού και μία νοητή γραμμή που ενώνει το κέντρο της Γης με την τοποθεσία που πρόκειται να προσδιοριστεί ονομάζεται γεωγραφικό πλάτος  $\varphi$  και παίρνει θετικές τιμές στο Βόρειο ημισφαίριο. Αντίστοιχα, η γωνία από τον πρώτο μεσημβρινό ονομάζεται γεωγραφικό μήκος  $\alpha$  ή αλλιώς  $L_{local}$  και παίρνει θετικές τιμές δυτικά του Greenwich. Το ζεύγος  $(\alpha, \varphi)$  αποτελούν τις συντεταγμένες του τόπου. Για παράδειγμα σε όλη την εργασία οι συντεταγμένες για την Αθήνα έχουν ληφθεί ως  $\varphi=37,96^\circ$  και  $\alpha=-23,72^\circ$  (η αρνητική τιμή του  $\alpha$  οφείλεται στο ότι η Αθήνα βρίσκεται ανατολικά του πρώτου μεσημβρινού).



Σχ. 1.5 : Προσδιορισμός Γεωγραφικών Συντεταγμένων

### 1.3. Σχετική κίνηση Ήλιου- Γης

Όπως αναφέρθηκε η Γη βρίσκεται σε μία διαρκή κίνηση τόσο γύρω από τον εαυτό της όσο και γύρω από τον ήλιο. Η περιστροφή της γύρω από τον Ήλιο ολοκληρώνεται σε 365,25 ημέρες, ενώ η περιστροφή γύρω από τον πολικό της άξονα ολοκληρώνεται σε 23 ώρες και 56 λεπτά. Η τροχιά της σχηματίζει μία έλλειψη, η οποία ορίζει το εκλειπτικό επίπεδο. Όσον αφορά τον πολικό άξονα της Γης, όπως πλέον γνωρίζουμε, δεν είναι κατακόρυφος αλλά σχηματίζει γωνία  $\delta = 23,45^\circ$  με την κάθετη στο εκλειπτικό επίπεδο. Η γωνία αυτή ονομάζεται γωνιακή απόκλιση.

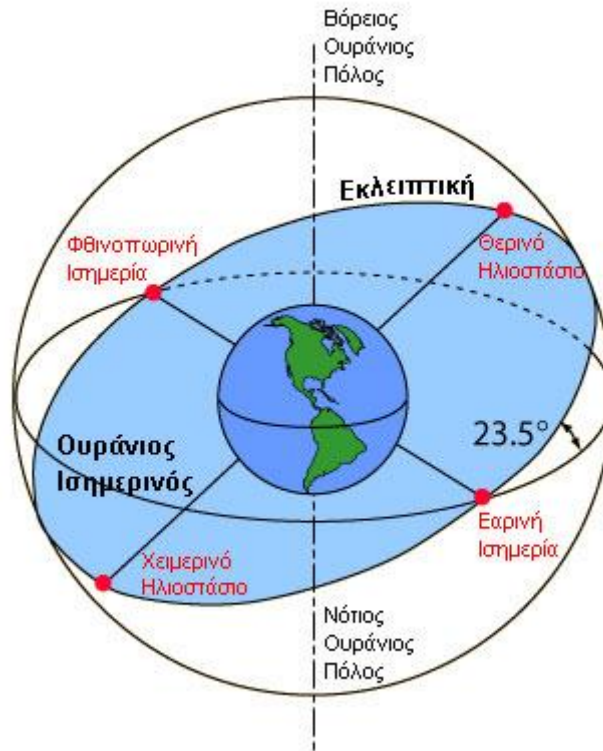


Σχ.1.6: Ελλειπτική τροχιά Γης- γωνιακή απόκλιση

#### 1.4. Μοντέλο μελέτης κίνησης

Επειδή παρατηρούμε τον ήλιο από τη Γη, το να μελετήσουμε τη γεωμετρία του γίνεται πολύ δύσκολο, δεδομένου του ότι ο παρατηρητής κινείται. Τέτοιου είδους περίπλοκες θεωρήσεις και υπολογισμοί μπορούν να απλοποιηθούν θεωρώντας τη Γη σαν κέντρο ελλειπτικής τροχιάς στην οποία κινείται αυτή τη φορά, ο ήλιος. Στο απλοποιημένο αυτό μοντέλο ο άξονας της γης γίνεται κατακόρυφος ενώ το επίπεδο στο οποίο ορίζεται η ελλειπτική τροχιά του ήλιου σχηματίζει γωνία με το επίπεδο που ορίζεται από τον ισημερινό της Γης (ουράνιος ισημερινός) ίση με την ηλιακή απόκλιση.

Στην πραγματικότητα το μοντέλο αυτό αντιστοιχίζεται πλήρως στην πραγματική κίνηση των ουράνιων σωμάτων τοποθετώντας τον παρατηρητή πάνω στη Γη και όχι έξω από το σύστημα.

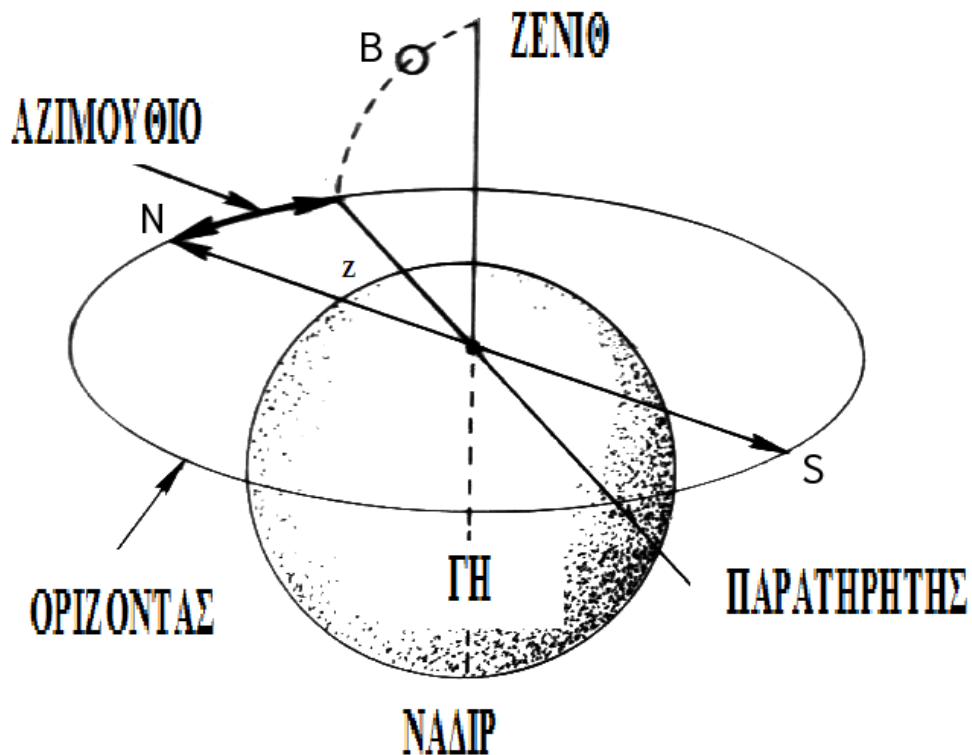


Σχ. 1.7 : Μοντέλο σχετικής κίνησης Ήλιου-Γης

Το μοντέλο αυτό που περιγράφει πλέον την κίνηση «του Ήλιου ως προς τη Γη» επιτρέπει σε παρατηρητή ο οποίος βρίσκεται στο κέντρο της Γης να εντοπίζει τον ήλιο σε γωνία  $\delta$  από τον ουράνιο ισημερινό. Όμως ούτε αυτή η θέση ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, εφόσον δεν είναι πιθανή θέση για παρατηρητή! Γι' αυτό το λόγο πρέπει να συνυπολογιστεί η πραγματική θέση του παρατηρητή πάνω στη γήινη σφαίρα. Αυτό προϋποθέτει τη μεταφορά του συστήματος συντεταγμένων στο εκάστοτε ζητούμενο σημείο συνυπολογίζοντας τις συντεταγμένες του τόπου.

Μετά τη μεταφορά των συντεταγμένων όλοι οι υπολογισμοί γίνονται στο «φυσικό» σύστημα συντεταγμένων για κάθε παρατηρητή που βρίσκεται επάνω στην επιφάνεια της Γης. Το σύστημα αυτό αναφέρεται σε επίπεδο εφαπτόμενο σε συγκεκριμένη θέση και τέμνει την ουράνια σφαίρα στον ορίζοντα. Αυτή η θεώρηση είναι εξαιρετικά λειτουργική αφού ο ήλιος θεωρούμε ότι κινείται πάνω στην ουράνια σφαίρα. Σημαντικό για το μοντέλο και συχνά αναφερόμενο είναι το σημείο ζενίθ που αποτελεί σημείο τομής της κάθετης στο οριζόντιο επίπεδο και της ουράνιας σφαίρας .

Για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης του ήλιου στην ουράνια σφαίρα μας χρειάζονται δύο γωνίες που αποτελούν και τις συντεταγμένες του. Η **γωνία  $\beta$**  που σχηματίζεται μεταξύ του οριζόντιου επιπέδου και της νοητής γραμμής που ενώνει τον παρατηρητή και τον ήλιο ονομάζεται **ύψος ηλίου** και αποτελεί την πρώτη συντεταγμένη. Η **γωνία  $Z$**  σχηματίζεται μεταξύ μιας ορισμένης κατεύθυνσης που θα αναφέρεται στο νότο και της προβολής του ήλιου στο οριζόντιο επίπεδο ονομάζεται **αζιμούθιο** και αποτελεί τη δεύτερη συντεταγμένη. Η γωνία  $\beta$  μπορεί να πάρει τιμές από  $0^\circ$  έως  $90^\circ$ . Η τιμή  $0^\circ$  αναφέρεται στη δύση ή την ανατολή ενώ οι  $90^\circ$  αποτελούν το ανώτερο ύψος ηλίου που μπορεί να προσεγγιστεί μόνο για συγκεκριμένα γεωγραφικά πλάτη και για συγκεκριμένες ημέρες του χρόνου. Το αζιμούθιο  $Z$  μπορεί να πάρει τιμές από  $-180^\circ$  έως  $180^\circ$ . Η τιμή  $0^\circ$  αντιστοιχεί στο νότο ενώ έχουμε θετικές τιμές όσο κινούμαστε προς τη δύση. Το ζεύγος ( $\beta, Z$ ) αρκεί για τον πλήρη προσδιορισμό της θέσης του ηλίου στην ουράνια σφαίρα. Βοηθητικά χρησιμοποιείται η γωνία  $\phi_z$  η οποία σχηματίζεται μεταξύ του ζενίθ και της νοητής ευθείας που ενώνει τον παρατηρητή με τον ήλιο και είναι συμπληρωματική της  $\beta$ .



Σχ.1.8: Τροχιά και συντεταγμένες Ηλίου στον ουράνιο θόλο.

#### 1.4.1. Ηλιακή Ώρα

Ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν μας στη μελέτη της κίνησης του ήλιου είναι **η ηλιακή ώρα** δηλαδή η ώρα που αναφέρεται στον ήλιο. Η ηλιακή ώρα  $T_{\text{solar}}$  διαφέρει από την ώρα του εκάστοτε τόπου αφού η τοπική ώρα  $T_{\text{local}}$  εξαρτάται από το γεωγραφικό μήκος και πλάτος του κάθε τόπου όπως επίσης και από την ημέρα του έτους στην οποία αναφέρεται ο υπολογισμός. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χρειάζονται διορθώσεις στην τοπική ώρα ώστε να προσεγγίσουμε την  $T_{\text{solar}}$ .

##### 1.4.1.1. Μεσημβρινός αναφοράς

Για να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα της θέσης του ζητούμενου τόπου προσαρμόζουμε χρονικά το συγκεκριμένο γεωγραφικό του μήκος στην αντίστοιχη ζώνη ώρας. Ο συλλογισμός αυτός βασίζεται στο ότι η Γη στρέφεται κατά  $15^\circ$  ανά μία ώρα και είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τη ζώνη ώρας του τόπου  $\Delta T_{\text{GMT}}$  δηλαδή τη διαφορά ώρας με την ώρα GMT (Greenwich mean time). Με αυτό τον τρόπο υπολογίζουμε **τις μοίρες του μεσημβρινού αναφοράς Lst** με τη βοήθεια του παρακάτω τύπου:

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

Για παράδειγμα αν θέλαμε να υπολογίσουμε το μεσημβρινό αναφοράς των Φαρσάλων από τον τύπο θα παίρναμε ότι  $\text{Lst} = 15^\circ / \text{h} * (-2) \text{h} = -30^\circ$  αφού η ζώνη ώρας για την Ελλάδα είναι -2 h.

##### 1.4.1.2. Μήκος τόπου

Αφού βρήκαμε τον μεσημβρινό αναφοράς είναι απαραίτητο να διορθώσουμε την ώρα για το συγκεκριμένο γεωγραφικό μήκος του τόπου. Δεδομένου του ότι η Γη στρέφεται κατά  $1^\circ$  ανά 4min η διόρθωση αντιστοιχεί στον παρακάτω τύπο:

$$4\text{min}/^\circ * (\text{L}_{\text{st}} - \text{L}_{\text{local}})$$

### 1.4.1.3. Εξίσωση χρόνου

Το πρόβλημα που προκύπτει από χρονικές παρεκκλίσεις λόγω τις συγκεκριμένης ημέρας του έτους που μελετάμε επιλύεται μέσα από τη χρήση μίας εμπειρικής **εξίσωσης χρόνου E** η οποία συνυπολογίζει την χρονική διάρκεια που χρειάζεται ο ήλιος για να ολοκληρώσει την τροχιά του στην ουράνια σφαίρα. Οι αποκλίσεις στη διάρκεια αυτή οφείλονται τόσο στην κάλυψη άνισων αποστάσεων κατά την περιστροφή της Γης γύρω από τον ήλιο, όσο και στην κλίση του άξονα της Γης ως προς το επίπεδο περιστροφής.

Δύο από τις πιο γνωστές μεθόδους υπολογισμού της εξίσωσης χρόνου E είναι οι εξής:

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

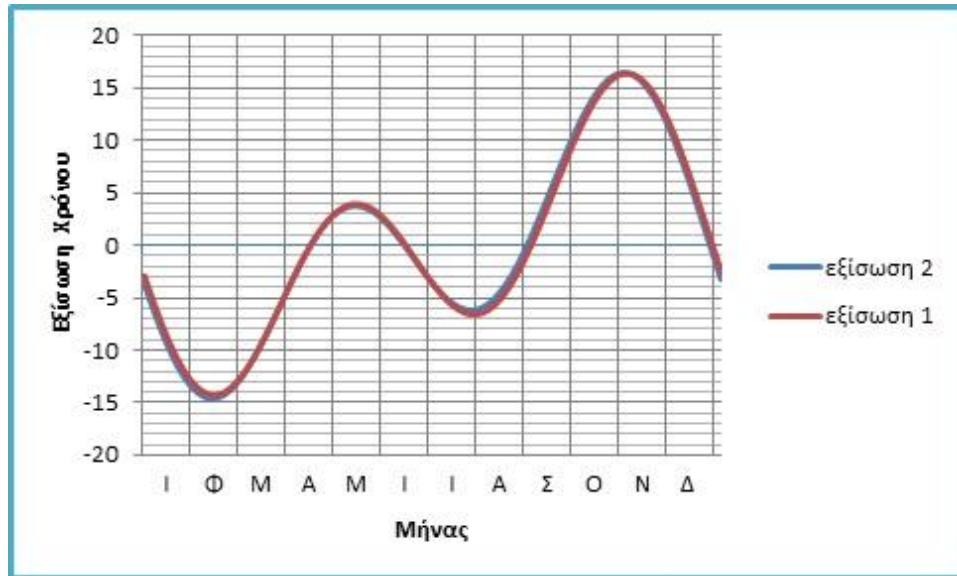
Όπου  $B = (DoY - 1) * 360^\circ / 365$ , η γωνία ημέρας που εξαρτάται από την ημέρα του έτους Day of Year και σχετίζεται με την πρώτη μέρα του έτους.

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

Όπου  $B = (DoY - 81) * 360^\circ / 365$ , η γωνία ημέρας που εξαρτάται από την ημέρα του έτους Day of Year και σχετίζεται με την εαρινή ισημερία στην 21<sup>η</sup> Μαρτίου.

Όπως είναι φανερό η δεύτερη εξίσωση είναι πολύ πιο εύχρηστη από την πρώτη αφού είναι αρκετά πιο απλή. Για να τη χρησιμοποιήσουμε βέβαια θα πρέπει να αποδειχθεί ότι δίνει τα ίδια αποτελέσματα με την πρώτη. Γι' αυτό το λόγω κατασκευάστηκε το παρακάτω συγκριτικό διάγραμμα των εξισώσεων για όλες τις μέρες του χρόνου:





Σχ.1.9 : Γραφική Παράσταση Εξίσωσης Χρόνου

Παρατηρούμε ότι οι δύο γραφικές παραστάσεις συμπίπτουν, κάτι που μας επιτρέπει να χρησιμοποιούμε τη δεύτερη για τους υπολογισμούς μας.

Χρησιμοποιώντας όλες τις παραμέτρους που προαναφέρθηκαν καταλήγουμε στον παρακάτω συνοπτικό τύπο για τον υπολογισμό της  $T_{solar}$  για δεδομένη  $T_{local}$ .

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

Αξίζει να σημειωθεί ότι για την  $T_{local}$  λαμβάνεται υπόψη μόνο η χειμερινή ώρα και όχι η θερινή, η οποία θεωρείται σύμβαση.

#### 1.4.2. Ηλιακή απόκλιση $\delta$

Άλλος ένας σημαντικός παράγοντας για τον προσδιορισμό της θέσης του ηλίου στην ουράνια σφαίρα είναι η ηλιακή **απόκλιση  $\delta$**  δηλαδή η γωνία μεταξύ του επιπέδου του ουράνιου ισημερινού και της νοητής ευθείας μεταξύ Γης και ήλιου. Όπως ειπώθηκε και παραπάνω η γωνία  $\delta$  θα είναι  $23,45^{\circ}$  στο θερινό ηλιοστάσιο,  $-23,45^{\circ}$  στο χειμερινό ηλιοστάσιο ενώ θα μηδενίζεται στις δύο ισημερίες. Υπάρχουν δύο τύποι που συνυπολογίζουν την επίδραση της ημέρας του έτους στη γωνία  $\delta$ . Αυτοί είναι:

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

και

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

Και οι δύο τύποι βασίζονται στο γεγονός ότι κατά την εαρινή ισημερία (DoY=81) η γωνία  $\delta$  μεγιστοποιείται και γι' αυτό το λόγω ο πρώτος χρησιμοποιεί τον όρο 284 δηλαδή όσες μέρες έχουν περάσει από την εαρινή ισημερία μέχρι την πρώτη Γενάρη ενώ ο δεύτερος χρησιμοποιεί τον όρο 81 δηλαδή όσες μέρες έχουν περάσει από την πρώτη Γενάρη μέχρι την εαρινή ισημερία. Στην πραγματικότητα δεν υπάρχει καμία διαφορά μεταξύ των τύπων και στη συνέχεια θα χρησιμοποιείται ο πρώτος.

#### 1.4.3. Γωνία ώρας $\omega$

Η τελευταία σημαντική γωνία την οποία θα χρησιμοποιήσουμε ώστε να προσδιορίσουμε πλήρως την τροχιά του ηλίου στην ουράνια σφαίρα είναι η **ηλιακή γωνία ώρας  $\omega$** . Η  $\omega$  ορίζεται ως η γωνία εκείνη ανάμεσα στη νοητή γραμμή που ενώνει την εκάστοτε θέση του ηλίου στην ουράνια σφαίρα με τον παρατηρητή και τη νοητή γραμμή που ενώνει τον παρατηρητή με το ζενίθ του ηλίου για τον κάθε τόπο.

Η ηλιακή γωνία ώρας θεωρείται μηδενική στην περίπτωση που ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ της τροχιάς του (ηλιακό μεσημέρι). Οι γωνίες  $\omega$  που δημιουργούνται ανατολικότερα του ηλιακού μεσημεριού θεωρούνται αρνητικές, ενώ εκείνες που δημιουργούνται δυτικά του ζενίθ μετά το ηλιακό μεσημέρι θεωρούνται θετικές.

Επειδή, όπως έχει αναφερθεί, η Γη κινείται με  $15^{\circ}/\text{h}$ , υπολογίζουμε την εκάστοτε γωνία  $\omega$  μετρώντας το χρόνο που χρειάζεται μέχρι το ηλιακό μεσημέρι ή που έχει περάσει από το ηλιακό μεσημέρι με τη βοήθεια της ηλιακής ώρας και καταλήγουμε στον παρακάτω απλό τύπο:

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

Με βάση αυτή τη θεώρηση το ηλιακό μεσημέρι αποτελεί τον “άξονα συμμετρίας” της τροχιάς που διαγράφει ο Ήλιος στον ουράνιο θόλο. Δηλαδή η ελλειπτική τροχιά του στην ουράνια σφαίρα από την ανατολή μέχρι το ηλιακό μεσημέρι όπου  $\omega = 0^\circ$ , επαναλαμβάνεται συμμετρικά ως τη δύση, με άξονα συμμετρίας μία κάθετη στο επίπεδο νοητή ευθεία που ξεκινά από το ζενίθ. Αυτό σημαίνει ότι για παράδειγμα το ύψος ηλίου  $\beta$  θα είναι το ίδιο μία ώρα πριν και μετά το ηλιακό μεσημέρι.

#### 1.4.4. Συντεταγμένες Ηλίου

Με βάση όλα όσα προαναφέρθηκαν μπορούμε πλέον να καταλήξουμε στις εξισώσεις που θα προσδιορίζουν τις συντεταγμένες  $(\beta, Z)$  της θέσης του Ήλιου:

για το ύψος Ηλίου  $\beta$  και ταυτόχρονα τη συμπληρωματική  $\varphi_Z$  ισχύει ότι:

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

και για το αζιμούθιο  $Z$  ισχύει:

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

#### 1.4.5. Ανατολή, δύση και ηλιοφάνεια

Απαραίτητες για τον υπολογισμό των συντεταγμένων  $(\beta, Z)$  θεωρούνται και οι ώρες ανατολής, δύσης και ηλιοφάνειας για τον κάθε τόπο. Οι ώρες αυτές διαφέρουν τόσο ανάλογα με τις γεωγραφικές συντεταγμένες όσο και με την συγκεκριμένη ημέρα του χρόνου για την οποία έγινε η μελέτη. Η χρησιμότητά τους σε ένα διάγραμμα  $\beta$ - $Z$  είναι αυτονόητη αφού προσδιορίζουν την έναρξη και τη λήξη των υπολογισμών μας όπως επίσης και το πλήθος τους.

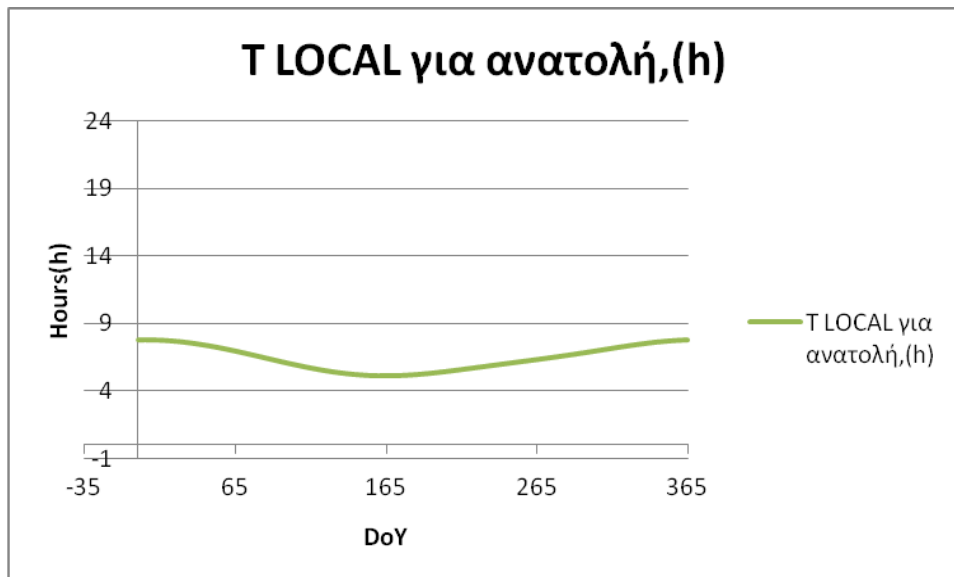
##### 1.4.5.1. Εφαρμογή για τις συντεταγμένες της Αθήνας

Για την εύρεσή τους έγινε η εξής θεώρηση: γνωρίζουμε ότι τη στιγμή της ανατολής και τη στιγμή της δύσης το ύψος Ηλίου  $\beta$  μηδενίζεται. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τις προαναφερθείσες εξισώσεις βρίσκεται η

τοπική ώρα  $T_{local}$  η οποία αναφέρεται στις μηδενικές τιμές του  $\beta$  και έτσι προκύπτουν οι ώρες ανατολής και δύσης. Τέλος, αφαιρώντας τις στιγμές έναρξης και λήξης της ηλιακής τροχιάς μπορούμε να βρούμε τη διάρκεια ηλιοφάνειας για κάθε ημέρα.

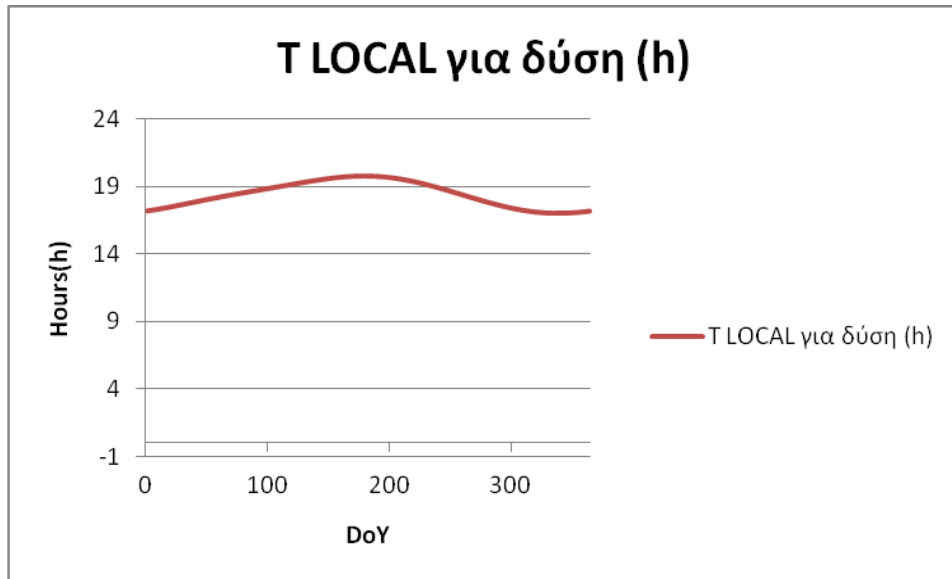
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα που παριστάνουν τις ώρες ανατολής, δύσης και ηλιοφάνειας για τις 365 ημέρες του χρόνου για τις συντεταγμένες της Αθήνας ( $\varphi=37,96^\circ$ ,  $\alpha=-23,72^\circ$ ).

Για την ανατολή:



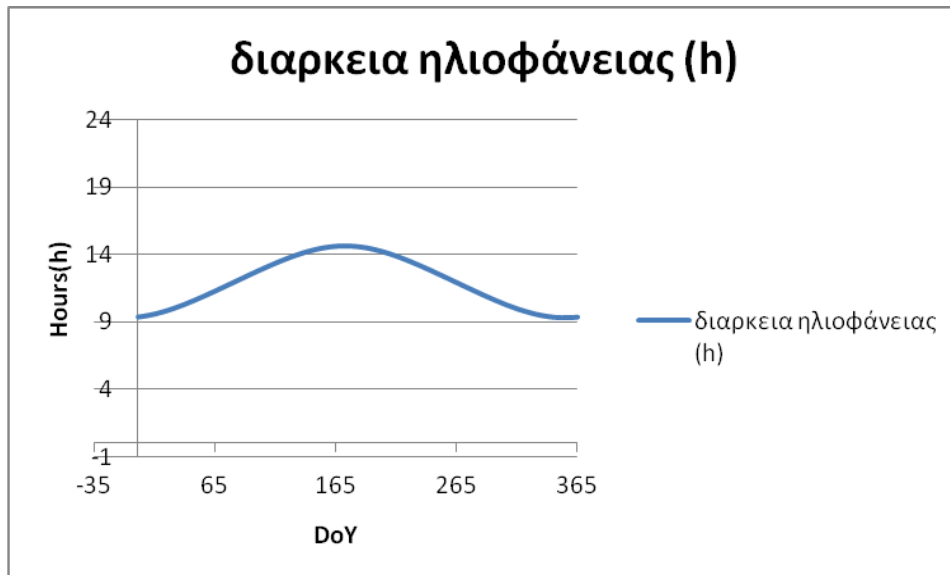
Σχ.1.10 : Γραφική Παράσταση Τοπικών Ωρών Ανατολής για την Αθήνα

Για τη δύση:



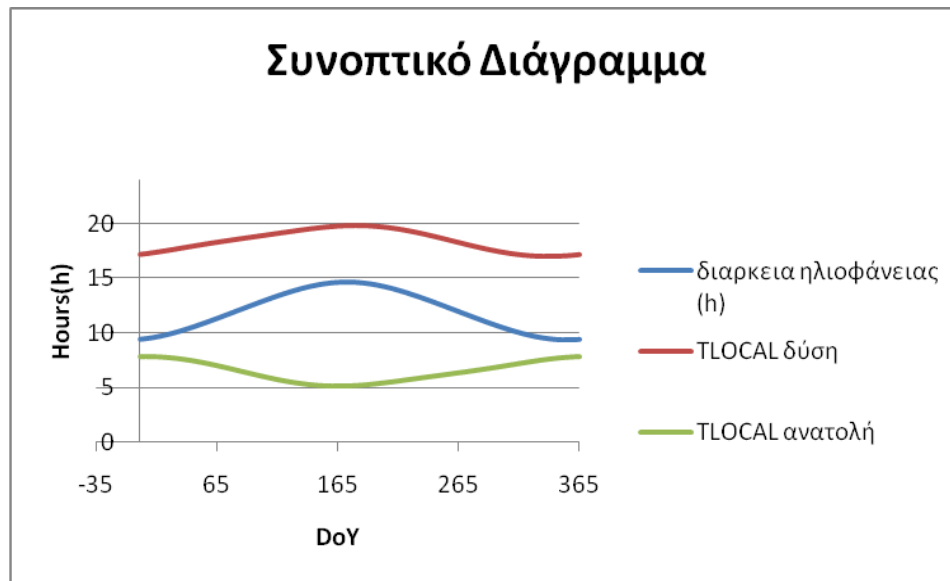
Σχ.1.11 : Γραφική Παράσταση Τοπικών Ωρών Δύσης για την Αθήνα

Για την ηλιοφάνεια:



Σχ.1.12 : Γραφική Παράσταση Ωρών Ηλιοφάνειας για την Αθήνα

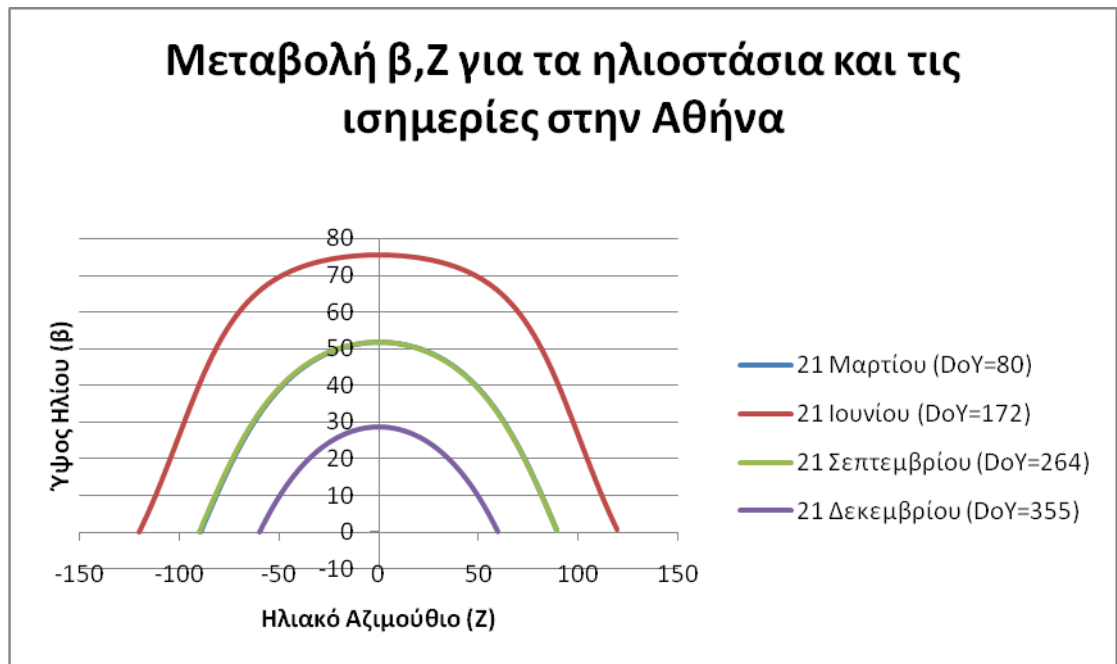
Τέλος δίνεται ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα με όλα τα αποτελέσματα:



Σχ.1.13 : Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Τοπικών Ωρών Ανατολής, Δύσης και ηλιοφάνειας για την Αθήνα

#### 1.4.6. Αναζήτηση των ηλιακών συντεταμένων για τέσσερις ημέρες του έτους στην Αθήνα

Συνοψίζοντας, έχουμε διαθέσιμα όλα τα απαραίτητα στοιχεία ώστε να υπολογίσουμε τις συντεταγμένες ( $\beta, Z$ ) για οποιαδήποτε ημέρα του έτους, για οποιοδήποτε τόπο. Παρακάτω δίνεται διάγραμμα  $\beta-Z$  της Αθήνα για το χειμερινό ηλιοστάσιο (21 Δεκεμβρίου), για το θερινό ηλιοστάσιο (21 Ιουλίου), για την εαρινή ισημερία (21 Μαρτίου) και για τη φθινοπωρινή ισημερία (21 Οκτωβρίου).



Σχ.1.14 : Γραφική Παράσταση  $\beta$ - $Z$  για τα ηλιοστάσια και τις ισημερίες για την Αθήνα

Τα αποτελέσματα του διαγράμματος είναι απόλυτα λογικά. Και στις τέσσερις γραφικές παραστάσεις το ύψος ηλίου  $\beta$  ξεκινά από μηδενικές τιμές, φτάνει στο ζενίθ το ηλιακό μεσημέρι και στη συνέχεια μειώνεται με συμμετρικό τρόπο. Ταυτόχρονα το αζιμούθιο  $Z$  ξεκινά από ακραίες αρνητικές τιμές την ανατολή, προσεγγίζοντας το μηδέν το ηλιακό μεσημέρι και τέλος συνεχίζει συμμετρικά παίρνοντας θετικές τιμές.

Για το θερινό ηλιοστάσιο που αποτελεί και τη “μεγαλύτερη ημέρα” του έτους, παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση λαμβάνει τις μεγαλύτερες και περισσότερες τιμές για  $\beta$  και  $Z$ , ενώ το χειμερινό ηλιοστάσιο παίρνουμε αντίστοιχα τις χαμηλότερες και λιγότερες τιμές. Όσον αφορά τις ισημερίες, παρατηρούμε ότι οι γραφικές παραστάσεις τους ταυτίζονται, πράγμα απόλυτα λογικό αφού τότε ο ήλιος ανατέλλει και δύει τις ίδιες ώρες.

Κλείνοντας, η σημασία της μελέτης έγκειται στο ότι γνωρίζοντας τις ακριβείς ηλιακές συντεταγμένες για κάθε ώρα και ημέρα του χρόνου μπορούμε να προσδιορίσουμε διάνυσμα το οποίο θα στρέφεται έτσι ώστε να “δείχνει” μονίμως προς τον Ήλιο. Αυτό είναι κάτι εξαιρετικά χρήσιμο στην περίπτωση κατασκευής στρεφόμενου φωτοβολταϊκού στοιχείου που σκοπό έχει να έχει

την επιφάνειά του μονίμως κάθετη στο διάνυσμα αυτό ώστε να απορροφά όσο το δυνατόν περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ : ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ**

### *2.1. Εισαγωγή*

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται η λειτουργία των στρεφόμενων φωτοβολταϊκών στοιχείων και για αυτό το λόγο είναι απαραίτητο να δοθούν στοιχεία για το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και το πώς δημιουργείται για τη σημασία των ημιαγωγικών υλικών στις φωτοβολταϊκές διατάξεις, τα υλικά που χρησιμοποιούνται, τον τρόπο που συνδέονται μεταξύ τους ή με πιθανό δίκτυο και τέλος τον τρόπο που στήνονται προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη απόδοση που είναι και βασικό ζητούμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

### *2.2. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο και ημιαγωγοί*

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και η λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος στηρίζεται στις βασικές ιδιότητες των ημιαγωγικών υλικών σε ατομικό επίπεδο. Το χαρακτηριστικό στοιχείο ενός ημιαγωγού που το διαφοροποιεί από τα υπόλοιπα υλικά είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων ενός ατόμου που βρίσκονται στην εξωτερική του στοιβάδα (στοιβάδα σθένους).

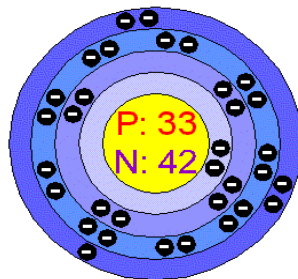
Όλα τα άτομα που έχουν λιγότερα ή περισσότερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα ψάχνουν άλλα άτομα με τα οποία μπορούν να ανταλλάξουν ηλεκτρόνια ή να μοιραστούν κάποια με σκοπό τελικά να αποκτήσουν συμπληρωμένη εξωτερική στοιβάδα σθένους. Ο πιο σημαντικός εκπρόσωπος των ημιαγωγών είναι αναμφισβήτητα το πυρίτιο που χρησιμοποιείται κατά κόρον στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Το πυρίτιο έχει ατομικό αριθμό 14 και έχει στην εξωτερική του στοιβάδα 4 ηλεκτρόνια. Στην τάση του να συμπληρώσει την εξωτερική του στοιβάδα οφείλεται και η κρυσταλλική δομή του πυριτίου αφού όταν συνυπάρχουν πολλά άτομα μαζί διατάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε να συνεισφέρουν ηλεκτρόνια με όλα τα γειτονικά τους άτομα και τελικά με αυτόν τον τρόπο να αποκτούν μια συμπληρωμένη εξωτερική στοιβάδα και κρυσταλλική δομή. Αυτή είναι και η καθοριστική ιδιότητα που έχουν τα κρυσταλλικά υλικά.

Στην κρυσταλλική του μορφή όμως το πυρίτιο είναι σταθερό. Δεν έχει ανάγκη ούτε να προσθέσει ούτε να διώξει ηλεκτρόνια κάτι που ουσιαστικά του δίνει ηλεκτρικά χαρακτηριστικά πολύ κοντά σε αυτά ενός μονωτή αφού δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια για τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος στο εσωτερικό του.

### 2.3. Δημιουργία ηλεκτρικά φορτισμένων ημιαγωγών

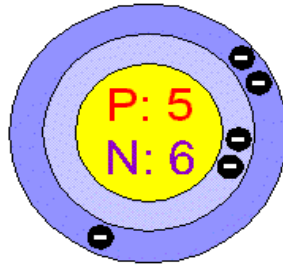
Τις ημιαγωγές ιδιότητές του, το πυρίτιο τις αποκτά με τεχνητό τρόπο. Αυτό πρακτικά γίνεται με την πρόσμειξη με άλλα στοιχεία τα οποία είτε έχουν ένα ηλεκτρόνιο περισσότερο είτε ένα λιγότερο στη στοιβάδα σθένους τους. Αυτή η πρόσμειξη τελικά κάνει τον κρύσταλλο δεκτικό είτε σε θετικά φορτία (υλικό τύπου P) είτε σε αρνητικά φορτία (υλικό τύπου N).

Για να φτιαχτεί λοιπόν ένας ημιαγωγός τύπου N ή αλλιώς ένας αρνητικά φορτισμένος κρύσταλλος πυριτίου θα πρέπει να γίνει πρόσμειξη ενός υλικού με 5 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα, όπως για παράδειγμα το αρσενικό (As).



Σχ.2.1 : Αρσένιο As

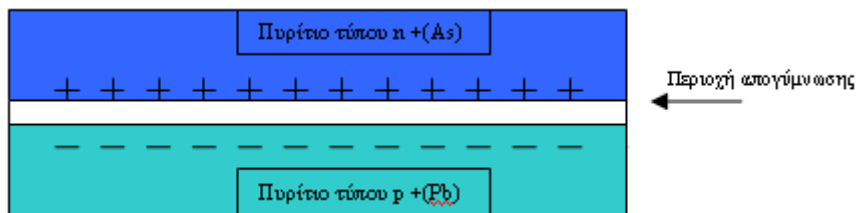
Αντίστοιχα για να δημιουργήσουμε έναν ημιαγωγό τύπου P ή αλλιώς έναν θετικά φορτισμένο κρύσταλλο πυριτίου χρειάζεται να γίνει πρόσμειξη στον κρύσταλλο αυτό κάποιου υλικού όπως το βόριο (B) που έχει τρία ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα.



Σχ2.2 : Βόριο B

#### 2.4. Δημιουργία της επαφής (του ηλεκτρικού πεδίου)

Εάν φέρουμε σε επαφή δύο κομμάτια πυριτίου τύπου N και τύπου P το ένα απέναντι από το άλλο δημιουργείται μία δίοδος ή αλλιώς ένα ηλεκτρικό πεδίο στην επαφή των δύο υλικών το οποίο επιτρέπει την κίνηση ηλεκτρονίων προς μία κατεύθυνση μόνο.



Σχ2.3 : Επαφή πυριτίου τύπου N και τύπου P

Τα επιπλέον ηλεκτρόνια της επαφής N έλκονται από τις οπές της επαφής P. Αυτό το ζευγάρι των δύο υλικών είναι το δομικό στοιχείο του φωτοβολταϊκού κελιού και η βάση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.

#### 2.5. Η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία έρχεται με τη μορφή πακέτων ενέργειας ή φωτονίων. Τα φωτόνια όταν προσπίπτουν σε μία διάταξη φωτοβολταϊκού κελιού περνούν αδιατάραχα την επαφή τύπου N και χτυπούν τα άτομα της περιοχής τύπου P. Τα ηλεκτρόνια της περιοχής τύπου P αρχίζουν να κινούνται μεταξύ των οπών ώσπου τελικά φτάνουν στην περιοχή της διόδου όπου και έλκονται πλέον από το θετικό πεδίο της εκεί περιοχής.

Αφού ξεπεράσουν το ενεργειακό χάσμα αυτής της περιοχής μετά είναι αδύνατο να επιστρέψουν. Στο κομμάτι της επαφής N πλέον έχουμε μία περίσσεια ηλεκτρονίων που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε. Αυτή η περίσσεια των ηλεκτρονίων μπορεί να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα εάν τοποθετήσουμε μία διάταξη όπως ένας μεταλλικός αγωγός στο πάνω μέρος της επαφής N και στο κάτω της επαφής P και ένα φορτίο ενδιάμεσα με τέτοιο τρόπο ώστε να κλείσει ένας αγωγίμος δρόμος για το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται. Αυτή είναι απλοποιημένα η γενική αρχή λειτουργίας του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

#### *2.6. Φωτοβολταϊκές διατάξεις και αντίστοιχα υλικά*

Με τη βοήθεια του φωτοβολταϊκού φαινομένου λοιπόν υπάρχουν διατάξεις που μπορούν με την πτώση της ηλιακής ακτινοβολίας να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Αυτές οι ηλεκτρονικές διατάξεις αποτελούν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που αλλιώς είναι γνωστά και σαν φωτοβολταϊκά κύτταρα ή φωτοβολταϊκές κυψέλες. Πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία ηλεκτρονικά συνδεδεμένα μεταξύ τους δημιουργούν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο και αυτό αποτελεί τη δομική μονάδα μιας φωτοβολταϊκής γεννήτριας (PV module) δηλαδή το τμήμα μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης που περιέχει φωτοβολταϊκά στοιχεία και παράγει συνεχές ρεύμα. Όταν πολλά φωτοβολταϊκά πλαίσια που έχουν προκατασκευαστεί συναρμολογηθούν σε μία ενιαία κατασκευή, αποτελούν το φωτοβολταϊκό πάνελ ή PV panel που είναι έτοιμο να εγκατασταθεί σε μία φωτοβολταϊκή εγκατάσταση. Μία ομάδα από φωτοβολταϊκά πλαίσια ή πάνελα με ηλεκτρική αλληλοσύνδεση που τοποθετούνται σε κοινή κατασκευή στήριξης αποτελούν μία φωτοβολταϊκή συστοιχία.

## 2.7. Υλικά που χρησιμοποιούνται για φωτοβολταϊκά

### 2.7.1. Τύποι φωτοβολταϊκών συστημάτων πυριτίου «μεγάλου πάχους»

#### 2.7.1.1. Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (*single crystalline silicon, sc-Si*)



Σχ.2.4 : Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο

Το πάχος τους είναι γύρω στα 0,3mm. Η απόδοσή τους στη βιομηχανία κυμαίνεται από 15% έως 18% για το πλαίσιο. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως 24,7%. Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέσης απόδοσης /επιφάνειας ή «ενεργειακής πυκνότητας». Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι το υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά. Βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (float zone). Αμφότερες βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου. Το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό με την υψηλότερη απόδοση στο εμπόριο σήμερα είναι της Sun Power με απόδοση πλαισίου 18,5%. Είναι μάλιστα το μοναδικό που έχει τις μεταλλικές επαφές στο πίσω μέρος του πάνελ αποκομίζοντας έτσι μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπίδρασης με την ηλιακή ακτινοβολία.

### 2.7.1.2. Φωτοβολταϊκά κελιά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (*multicrystalline silicon, mc – Si*)



Σχ.2.5 : Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο

Το πάχος τους είναι επίσης περίπου 0,3mm. Η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτή των μονοκρυσταλλικών, για αυτό και η τιμή τους είναι συνήθως χαμηλότερη. Οπτικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κελιά.

Σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20% ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 13% έως και 15% για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (panel). Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απευθείας στερεοποίησης DS (*directional solidification*), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου (χύτευση) και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC.

### 2.7.1.3. Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (*ribbon silicon*)



Σχ. 2.6: Ταινία πυριτίου

Πρόκειται για μια σχετικά νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Αναπτύσσεται από την Evergreen Solar. Προσφέρει έως και 50% μείωση στη χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών κυψελών πυριτίου. Η απόδοση για αυτά τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχει φτάσει πλέον γύρω στο 12% με 13% ενώ το πάχος του είναι περίπου 0,3 mm. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 18%.

## 2.7.2. Φωτοβολταϊκά υλικά «λεπτών επιστρώσεων», *thin film*.

### 2.7.2.1. Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe<sub>2</sub> ή CIS, με προσθήκη γαλλίου CIGS)



Σχ2.7: Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός

Ο δισεληνοϊνδιούχος χαλκός έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως αλλά παρόλα αυτά η απόδοσή του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11% για τα πλαίσια.

Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του 18,8% η οποία είναι και η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών λεπτής επιστρώσεως. Με την πρόσμειξη γαλλίου η απόδοσή του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο. Το πρόβλημα που υπάρχει είναι ότι το Ίνδιο υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στη φύση. Στα επόμενα χρόνια πάντως αναμένεται το κόστος του να είναι αρκετά χαμηλότερο.

### 2.7.2.2. Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous ή thin film silicon, a – Si)



Σχ 2.8 : άμορφο πυρίτιο

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αυτά έχουν αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού (πυρίτιο στην περίπτωση μας) πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους, όπως γυαλί ή αλουμίνιο. Έτσι και λόγω της μικρότερης ποσότητας πυριτίου που χρησιμοποιείται η τιμή τους είναι γενικότερα αρκετά χαμηλότερη.

Ο χαρακτηρισμός άμορφο φωτοβολταϊκό προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου. Οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά thin films πυριτίου κυμαίνονται για το πλαίσιο από 6 έως 8 % ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14%.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για το φωτοβολταϊκό στοιχείο a-Si είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά).

Το μειονέκτημα των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επίσης υπάρχουν αμφιβολίες όσον αφορά τη διάρκεια των άμορφων πλαισίων μιας και δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις αφού η τεχνολογία είναι σχετικά καινούρια.



Παρόλα αυτά οι κατασκευαστές πλέον δίνουν εγγυήσεις απόδοσης 20 ετών. Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0,0001mm ενώ το υπόστρωμα μπορεί να είναι από 1 έως 3 mm.

### 2.7.2.3. Τελουριούχο κάδμιο (CdTe)

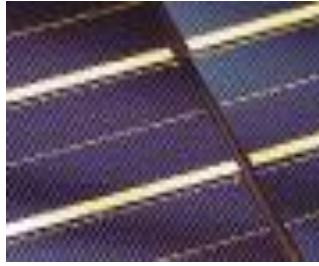


Σχ 2.9 : Τελουριούχο κάδμιο CdTe

Το τελουριούχο κάδμιο έχει ενεργειακό διάκενο γύρω στο 1 eV το οποίο είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα κάτι που του δίνει σοβαρά πλεονεκτήματα όπως της δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας . Οι σύγχρονες τεχνικές όμως μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 6 έως 8%. Στο εργαστήριο η απόδοση στα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχει φτάσει το 16%.

Μελλοντικά αναμένεται το κόστος του να πέσει αρκετά. Σημαντικότερος κατασκευαστής για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία CdTe είναι η First Solar. Τροχοπέδη για τη 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 στη χρήση του. Επίσης προβληματίζει η έλλειψη του τελουρίου. Σημαντικότερη χρήση του είναι η ενθυλάκωσή του στο γυαλί ως δομικό υλικό (BIPV – building integrated photovoltaic).

#### 2.7.2.4. Αρσενικούχο γάλλιο (GaAs)



Σχ. 2.10 : Αρσενικούχο γάλλιο 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 αλλά έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες. Το αρσενικούχο γάλλιο έχει ενεργειακό διάκενο 1,43 eV που είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η απόδοσή του στη μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunctions) 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 φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs έχουν το πλεονέκτημα ότι αντέχουν σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας, για αυτό και λόγω της πολύ υψηλής απόδοσής του ενδείκνυται για διαστημικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος.

#### 2.7.3. Υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία

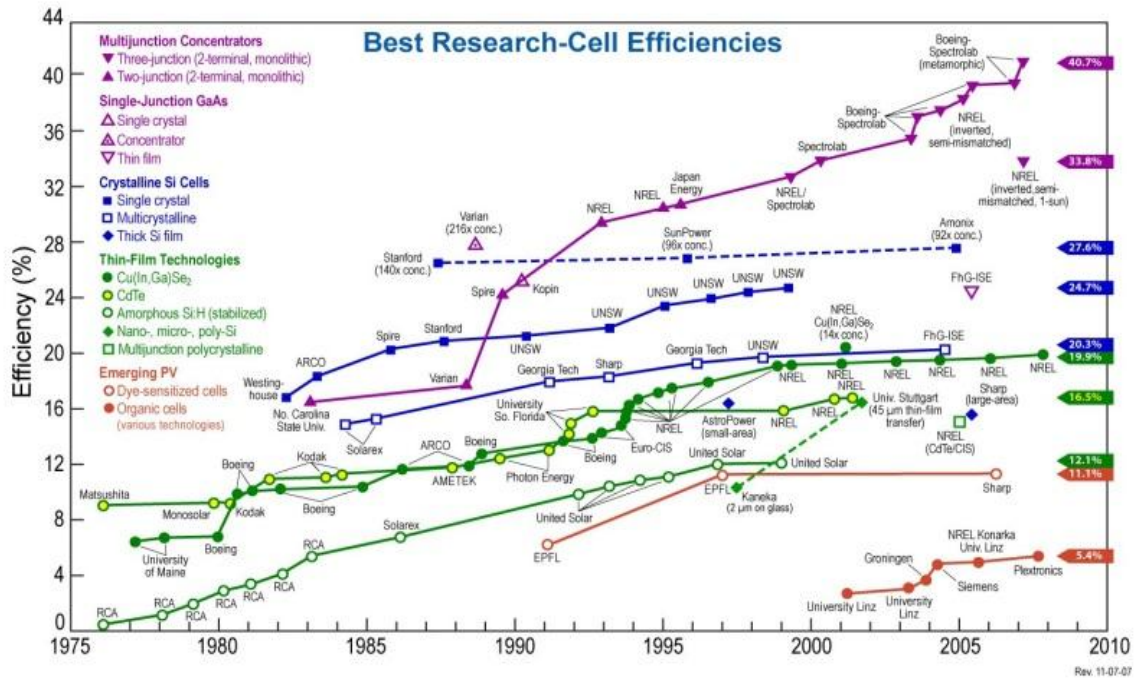
Ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών. Τα πιο γνωστά εμπορικά υβριδικά στοιχεία αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω) ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μία στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου (HIT – heterojunction with intrinsic thin layer).

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%. Άλλα πλεονεκτήματα για τα υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στη διαχεόμενη ακτινοβολία. Φυσικά αφού προσφέρει τόσα πολλά το υβριδικό φωτοβολταϊκό είναι και κάπως ακριβότερο σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια.

#### 3.7.4. Άλλες Τεχνολογίες

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και διάφορα εργαστήρια στον κόσμο παρουσιάζουν νέες πατέντες. Κάποιες από τις τεχνολογίες στα φωτοβολταϊκά στοιχεία που φαίνεται να ξεχωρίζουν και μελλοντικά πιθανώς να γίνει ευρεία η χρήση τους είναι:

- Νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου (nc – Si)
- Οργανικά πολυμερή στοιχεία



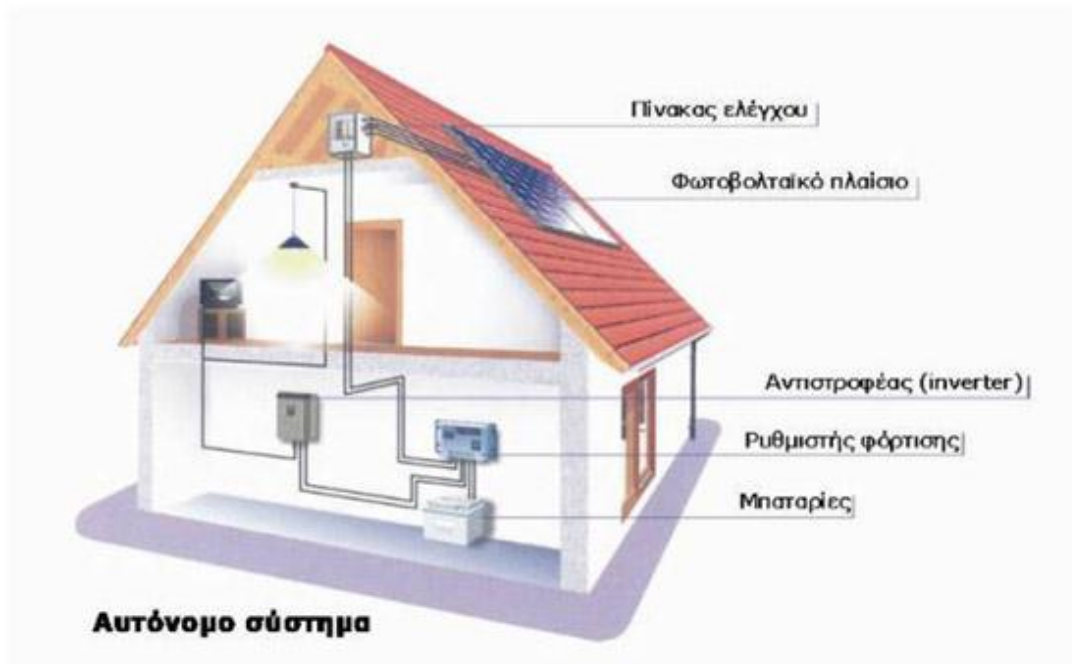
Σχ.2.11 : Εξέλιξη της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων

## 2.8. Τρόποι εγκατάστασης φωτοβολταϊκών

Σήμερα χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τρόποι εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων:

### 2.8.1. Αυτόνομα ή αυτοδύναμα φωτοβολταϊκά συστήματα (off – grid systems)

Τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι ιδανικά για απομακρυσμένες περιοχές όπου δεν υπάρχει τρόπος σύνδεσης με το δίκτυο και όπου είναι δύσκολη η μεταφορά καυσίμου σε περίπτωση χρήσης γεννήτριας diesel. Το σύστημα απαιτεί και την ύπαρξη μονάδας αποθήκευσης (μπαταρία) για τη συνεχή λειτουργία του κατά τις νυχτερινές ώρες ή ώρες συννεφιάς. Ένα τέτοιο σύστημα με τα απαραίτητα εξαρτήματά του φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ.2.12 : Αυτόνομο σύστημα

Ένας ειδικός ρυθμιστής φόρτισης ρυθμίζει την ενέργεια των φωτοβολταϊκών για να εξασφαλίσει την άριστη φόρτιση των μπαταριών. Σε απλές εγκαταστάσεις, η ενέργεια απορροφάται κατευθείαν από τις μπαταρίες από dc καταναλωτές ενώ σε εγκαταστάσεις με συνήθεις ac καταναλωτές το ρεύμα της μπαταρίας μετατρέπεται από συνεχές σε εναλλασσόμενο με αντιστροφή (inverter).

Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται σήμερα σε πολλές εφαρμογές όπως σε αναμεταδότες (ραδιοφώνου ή τηλεόρασης), σε συστήματα επιτήρησης, σε τηλεφωνικούς θαλάμους, σε κεραίες κινητής τηλεφωνίας, σε φάρους, σε διαστημικές πινακίδες, σε στάσεις συγκοινωνίας και σε φωτισμό δρόμων και εθνικών οδών. Επίσης χρησιμοποιούνται σε βάρκες και τροχόσπιτα, σε αρδεύσεις, γεωτρήσεις και σε σιντριβάνια αλλά και σε κτίσματα που δεν υπάρχει η δυνατότητα ηλεκτροδότησης από τη ΔΕΗ. Όλες αυτές οι εφαρμογές χρησιμοποιούν μπαταρίες για αποθήκευση.

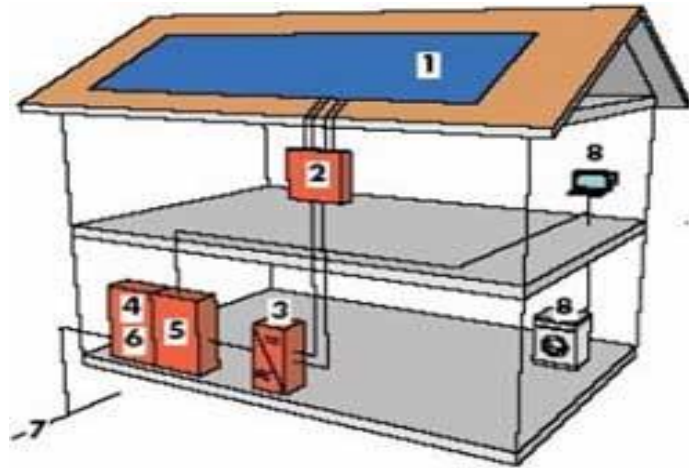
### 2.8.2 Διασυνδεδεμένα με το δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα διασυνδεδεμένα συστήματα προβλέπεται ότι θα αποτελέσουν την κύρια περιοχή ενδιαφέροντος για τα επόμενα χρόνια, αφού η ελληνική νομοθεσία έχει δώσει κίνητρα για τις μικρές οικιακές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις (<5KW).

Αυτά τα συστήματα συνδέονται με το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο. Αυτό σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια της ημέρας ο ηλεκτρισμός που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί ή να χρησιμοποιηθεί άμεσα (κάτι που είναι σύνηθες για συστήματα που εγκαθίστανται σε κτήρια γραφείων και άλλων εμπορικών χρήσεων) ή μπορεί να πωληθεί στη ΔΕΗ (κάτι που είναι σύνηθες για οικιακά συστήματα που ο ιδιοκτήτης μπορεί να λείπει κατά τη διάρκεια της ημέρας). Τη νύχτα όταν το φωτοβολταϊκό δεν μπορεί πια να παράγει ενέργεια, μπορεί να αγοραστεί πλέον ενέργεια από τη ΔΕΗ. Στην πράξη δηλαδή η ΔΕΗ λειτουργεί σαν μια αποθήκη ενέργειας για αυτό αυτά τα συστήματα δεν χρειάζονται μπαταρίες για αποθήκευση. Μπορούμε όμως, αν θέλουμε, να τοποθετήσουμε μπαταρίες, οπότε πλέον το φωτοβολταϊκό μας σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν σύστημα αδιάλειπτης παροχής ενέργειας (UPS) σε περίπτωση διακοπής ρεύματος.

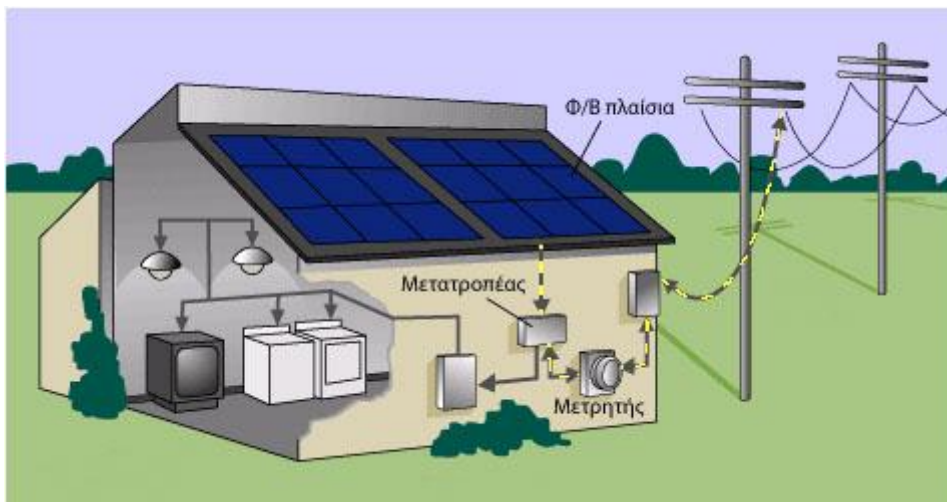
Υπάρχουν διάφοροι τρόποι στην αντιμετώπιση από την ηλεκτρική εταιρία ενός διασυνδεδεμένου συστήματος φωτοβολταϊκών. Για παράδειγμα, στη Γερμανία όλη η ενέργεια που παράγεται πωλείται στην ηλεκτρική εταιρία και ο καταναλωτής αγοράζει για τις ανάγκες του. Αντίθετα, η ενέργεια που παράγεται, πρώτα καλύπτει τις ανάγκες του παραγωγού και το περίσσειμα δίνεται (πωλείται) στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Τέτοια διασυνδεδεμένα συστήματα με τα εξαρτήματά τους (με ένα ή δύο μετρητές) φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:



Σχ.2.13 : Μονάδες συστήματος

- |                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|
| 1.Φ/Β γεννήτρια          | 5.Μετρητής παραγωγής     |
| 2.Ηλ.Πίνακας             | 6.Υφιστάμενος μετρητής   |
| 3.Αντιστροφέας(inverter) | 7.Δίκτυο ΔΕΗ             |
| 4.Κιβώτιο ασφαλειών      | 8.Εσωτερικοί καταναλωτές |



Σχ.2.14 : Σύστημα συνδεδεμένο με το δίκτυο

### 2.8.3. Υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα

Στα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα υπάρχει συνδυασμός αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων με άλλες πηγές ενέργειας όπως γεννήτριες πετρελαίου ή άλλο σύστημα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως για παράδειγμα ανεμογεννήτριες ή γεννήτριες βιομάζας κυρίως όταν απαιτούνται

μεγαλύτερα ποσά ενέργειας που τα αυτόνομα συστήματα δεν μπορούν να παράγουν.

## *2.9. Συλλογή του ηλιακού φωτός*

Ένα σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει ο σχεδιαστής ενός φωτοβολταϊκού συστήματος εκτός από την επιλογή του τρόπου διασύνδεσης (αυτόνομο ή διασυνδεδεμένο με το δίκτυο) αλλά και την επιλογή των επιμέρους υλικών είναι το πού θα στερεωθούν οι βασικές μονάδες, αν θα στερεωθούν σε σταθερές θέσεις ή οι προσανατολισμοί τους θα ακολουθούν (ιχνηλατούν) την κίνηση του ηλίου.

Τρεις είναι οι κυριότεροι τρόποι στήριξης των πλαισίων και διακρίνονται ανάλογα με την ενεργειακή απολαβή:

- Στήριξη με σταθερή γωνία κλίσης του συλλέκτη
- Εποχιακή ρυθμιζόμενη κλίση
- Συνεχούς ημερήσιας παρακολούθησης ηλιοτρόπιο – trackers

### *2.9.1. Στήριξη με σταθερή γωνία κλίσης του συλλέκτη*

Είναι ο απλούστερος και οικονομικότερος τρόπος στήριξης που μπορεί να εφαρμοστεί για την τοποθέτηση συλλεκτών. Ο σχεδιασμός του συστήματος είναι αρκετά απλός καθώς στο μόνο που πρέπει να δοθεί προσοχή είναι η γωνία κλίσης και ο προσανατολισμός των συλλεκτών. Είναι ένας αρκετά αξιόπιστος τρόπος καθώς δεν έχει κινητά μέρη και προτείνεται σε μέρη με ισχυρούς ανέμους, π.χ. βουνά. Επίσης χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να ενσωματώσουμε τους συλλέκτες σε κτήρια, π.χ. προσόψεις, στέγες.





Σχ. 2.15: Φωτοβολταϊκά ενσωματωμένα σε κτίρια

Για την τοποθέτηση των συλλεκτών πρέπει να επιλεγεί η καταλληλότερη γωνία κλίσης και ο προσανατολισμός. Η καταλληλότερη γωνία κλίσης είναι το γεωγραφικό πλάτος  $\phi$  και ο καταλληλότερος προσανατολισμός είναι ο νότος αν βρισκόμαστε στο βόρειο ημισφαίριο και ο βορράς αν βρισκόμαστε στο νότιο.

#### 2.9.2. Στήριξη με εποχιακή ρύθμιση της κλίσης του συλλέκτη

Στην πρώτη περίπτωση, δεν υπήρχε δυνατότητα αλλαγής της γωνίας κλίσης του συλλέκτη με αποτέλεσμα η εγκατάσταση να αποδίδει πολύ λιγότερο από τις δυνατότητές της. Για να αυξηθεί η απόδοση του συστήματος κατασκευάζονται βάσεις, στις οποίες τοποθετούνται οι συλλέκτες, με δυνατότητα ρύθμισης της κλίσης τους. Η μηχανολογική κατασκευή είναι σχετικά φθηνή και απλή ώστε όλοι οι χρήστες να μπορούν να κάνουν την εποχιακή ρύθμιση.

Η ρύθμιση του συλλέκτη γίνεται δύο φορές το χρόνο, μία κατά το χειμερινό εξάμηνο (22 Σεπτεμβρίου έως 21 Μαρτίου) και μία κατά το θερινό εξάμηνο (21 Μαρτίου έως 22 Σεπτεμβρίου). Η αλλαγή αυτή γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η κλίση μεταξύ των ακτίνων του ηλίου και της επιφάνειας του συλλέκτη να πλησιάζει όσο το δυνατόν τις  $90^\circ$ .

Για τον προσδιορισμό της σωστής γωνίας του συλλέκτη πρέπει να είναι γνωστά τα μετεωρολογικά δεδομένα του τόπου (ηλιοφάνεια, άνεμος, θερμοκρασία κλπ.).

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι για τη χειμερινή περίοδο η καταλληλότερη γωνία κλίσης είναι το γεωγραφικό πλάτος του τόπου αυξημένο κατά  $10^\circ$  έως  $15^\circ$  ενώ για τη θερινή περίοδο η καταλληλότερη γωνία είναι το γεωγραφικό πλάτος του τόπου μειωμένο κατά  $10^\circ$  έως  $15^\circ$ .

Παρόλο που σε σχέση με τα συστήματα που έχουν σταθερή γωνία κλίσης τους συλλέκτη, με την εποχιακή ρύθμιση καταφέρνουμε μία βελτίωση στην απόδοση του συστήματος, ακόμα υπάρχει περιθώριο βελτιστοποίησης της απόδοσης. Μία πρόταση για περαιτέρω βελτίωση είναι η αλλαγή γωνίας κλίσης τρεις φορές το χρόνο αλλά με μικρότερες αλλαγές στη γωνία κλίσης.

### 2.9.3. Συστήματα συνεχούς ημερήσιας παρακολούθησης ,ιχνηλάτες (trackers)

Σύμφωνα με τα προηγούμενα οι συλλέκτες τοποθετούνται είτε με σταθερή κλίση είτε με εποχιακή ρύθμιση της γωνίας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μικρή απολαβή ενέργειας από τον ήλιο ιδιαίτερα στην πρώτη μέθοδο, με σταθερή γωνία κλίσης. Μια βελτιωμένη εκδοχή είναι η δεύτερη μέθοδος με αυξημένη απολαβή σε σχέση με την πρώτη.

Για υψηλότερη απολαβή ισχύος κατασκευάζονται συσκευές διαρκούς παρακολούθησης της πορείας του ήλιου. Οι συσκευές αυτές ακολουθούν τα «ίχνη» του ηλίου και γι' αυτό ονομάστηκαν ιχνηλάτες. Οι ιχνηλάτες (trackers) στρέφουν τους συλλέκτες έτσι ώστε οι ακτίνες του ήλιου να προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια του συλλέκτη. Με τους ιχνηλάτες υπάρχει μία αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος 30% έως 50% σε σχέση με τους σταθερούς τρόπους στήριξης. Βρίσκουν χρήση τόσο σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές όσο και σε θερμικά συστήματα.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες ιχνηλατών ανάλογα με το είδος της κίνησης που εκτελούν:

- Στροφή γύρω από έναν άξονα
- Στροφή γύρω από δύο άξονες

#### 2.9.3.1. Στροφή γύρω από έναν άξονα

Η συστοιχία περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα με κατάλληλο μηχανισμό, ξεκινώντας από την ανατολή και παρακολουθώντας την πορεία του ήλιου καθ' όλη την ημέρα καταλήγοντας στη δύση. Διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

- Ο αζιμουθιακός ιχνηλάτης
- Ο πολικός ιχνηλάτης

##### 2.9.3.1.1. Ο αζιμουθιακός ιχνηλάτης

Το σύστημα περιστρέφεται ως προς κατακόρυφο άξονα, έτσι ώστε οι ακτίνες του ήλιου να πέφτουν κάθετα στο συλλέκτη. Δηλαδή παρακολουθεί την αζιμουθιακή κίνηση του ήλιου. Για την επιλογή της γωνίας κλίσης των συλλεκτών ακολουθείται η ίδια λογική με τις προηγούμενες μεθόδους. Δηλαδή τοποθετούνται με σταθερή γωνία η οποία επιλέγεται βάσει του γεωγραφικού πλάτους. Χρησιμοποιούνται σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς αυξάνουν την παραγωγή ενέργειας. Η αύξηση ισχύος είναι περίπου 25% έως 35%, εξαρτάται βέβαια από την τοποθεσία, την ποιότητα του συστήματος και τον τρόπο ελέγχου της κίνησης.



Σχ.2.16 : Αζιμουθιακοί ιχνηλάτες

#### 2.9.3.1.2. Πολικός ιχνηλάτης (*polar tracker*)

Το σύστημα περιστρέφεται ως προς άξονα τοποθετημένο σε γωνία ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου παράλληλα με τον πολικό άξονα της γης. Έτσι ο ήλιος βρίσκεται συνεχώς στο επίπεδο που είναι κάθετο στο συλλέκτη. Κατά τη διάρκεια του έτους η γωνία μεταξύ των ακτινών του ηλίου και της κάθετης στο συλλέκτη κυμαίνεται από  $-23,45^\circ$  έως  $+23,45^\circ$ .

Η βασική χρήση των συστημάτων αυτών είναι σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς να αποκλείεται και η χρήση τους σε θερμικούς σταθμούς. Η αύξηση της παραγόμενης ενέργειας φτάνει και το 40% ανάλογα με την εποχή του έτους.

#### 2.9.3.2. Στροφή γύρω από δύο άξονες

Οι ιχνηλάτες με στροφή γύρω από δύο άξονες παρακολουθούν και τις δύο κινήσεις του ηλίου και χρειάζονται και τις δύο συντεταγμένες του ηλίου (αζιμούθιο  $Z$  και ύψος ηλίου  $\beta$ ). Η συστοιχία στρέφεται γύρω από δύο άξονες ξεκινώντας από την ανατολή το πρωί και καταλήγοντας στη δύση το απόγευμα. Η κατασκευαστική διαφορά του ιχνηλάτη δύο αξόνων είναι ότι χρειάζονται δύο συστήματα κίνησης, ένα για κάθε κίνηση.

Λόγω της παρακολούθησης του ηλίου και στους δύο άξονες, οι ακτίνες του ηλίου προσπίπτουν κάθετα στους συλλέκτες καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας αλλά και για όλο το χρόνο. Έτσι γίνεται σαφές ότι αυτό το σύστημα είναι πιο αποδοτικό από όλα τα προηγούμενα. Η αύξηση της παραγόμενης ισχύος φτάνει και το 50% σε σχέση με τη σταθερή στήριξη και η απόδοσή του φτάνει και το 99,9%. Βεβαίως το κόστος του είναι αρκετά ψηλότερο λόγω της χρήσης διπλών ηλεκτρονικών συστημάτων και της πιο περίπλοκης μηχανολογικής κατασκευής. Ο έλεγχος της κίνησης του ιχνηλάτη γίνεται με δύο τρόπους, με τη χρήση αισθητήρων ή με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Όσον αφορά τους αισθητήρες, η μέθοδος βασίζεται στη σκίαση των αισθητήρων σε δύο άξονες. Τοποθετούνται δύο ή περισσότεροι αισθητήρες για τον έλεγχο της

αζιμουθιακής κίνησης του ιχνηλάτη και αντίστοιχα δύο ή περισσότεροι αισθητήρες για τον έλεγχο της γωνίας του ύψους. Όταν ο έλεγχος γίνεται με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή τότε χρησιμοποιούνται εξισώσεις που για κάθε χρονική στιγμή υπολογίζουν τις συντεταγμένες του ηλίου δηλαδή δίνουν τις τιμές που έχουν οι γωνίες αζιμούθιου και ύψους ηλίου. Στην παρούσα εργασία μελετάται ο έλεγχος της θέσης του ηλίου με ηλεκτρονικό υπολογιστή και η αναλυτική διαδικασία γίνεται σε περιβάλλον Matlab.



Σχ.2.17 : Ιχνηλάτης δύο αξόνων



Σχ.2.18 : Ιχνηλάτης δύο αξόνων

## 2.10. Κριτική και γενικά συμπεράσματα για τους ηλιακούς ιχνηλάτες (solar trackers)

Οι trackers πλεονεκτούν συνολικά στην απόδοση της επένδυσης του φωτοβολταϊκού συστήματος και αποδίδουν μεγαλύτερα οικονομικά οφέλη όταν

ισχύουν και άλλες παράμετροι ως προς τη θέση του τόπου αλλά και ως προς τις μετεωρολογικές του συνθήκες. Υπάρχει ένα αυξημένο κόστος γενικότερα στην κατασκευή και την εγκατάσταση αλλά οι ηλιακοί ιχνηλάτες μπορούν να αυξήσουν αρκετά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Φυσικά αυτό και μόνο το γεγονός αποτελεί βασικό κριτήριο για πολλούς επενδυτές που επιθυμούν το μέγιστο όφελος από την επένδυσή τους.

Η αύξηση αυτή μπορεί να ξεκινάει από 10% (για συστήματα μονού άξονα) και μπορεί να φτάσει ακόμα και το 40% αλλά για κάποιες μόνο εποχές του χρόνου. Ο υπολογισμός της μέσης ετήσιας αύξησης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενός συστήματος είναι το κρίσιμο μέγεθος που θα πρέπει να υπολογίσει κανείς για να βγάλει χρήσιμα συμπεράσματα.

Η χρήση των trackers πάντως συστήνεται κυρίως σε περιοχές που έχουν υψηλό ποσοστό άμεσης ακτινοβολίας (όπως στην Ελλάδα). Για αυτόν ακριβώς το λόγο μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι στην Ισπανία και τη Γερμανία (οι δύο περισσότερο ώριμες αγορές του κόσμου) όπου έχουν τοποθετηθεί πολλά φωτοβολταϊκά πάρκα χρησιμοποιούνται διαφορετικές πρακτικές όσον αφορά τα συστήματα στήριξης. Στη μεν συννεφιασμένη Γερμανία τα συντριπτικά περισσότερα εγκατεστημένα συστήματα είναι σταθερά, ενώ στην Ισπανία οι trackers έχουν κατακτήσει ένα πολύ σημαντικό μερίδιο της αγοράς.

Από την άλλη πλευρά θα ήταν χρήσιμο εκτός από το μεγαλύτερο κόστος της επένδυσης να συνυπολογιστεί και το σχετικά μεγαλύτερο κόστος συντήρησης που οφείλεται στην αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος λόγω της ύπαρξης κινητών μερών. Ακόμα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ένα μικρό ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται για την περιστροφική κίνηση των συστημάτων αλλά και ότι υπάρχει ανάγκη για απομακρυσμένο έλεγχο του συστήματος (τηλεπικοινωνιακά) ώστε να αποφευχθεί πιθανή αστοχία στη λειτουργία των trackers αλλά και πιθανή καταστροφή τους από ακραία καιρικά φαινόμενα.

Συμπερασματικά υπάρχουν αρκετές παράμετροι που θα πρέπει κανείς να σταθμίσει για να προχωρήσει στην επιλογή ενός κινητού συστήματος στήριξης σε σχέση με ένα σταθερό.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ : ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ

### 3.1. Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο γνωρίσαμε διάφορα στοιχεία για τα φωτοβολταϊκά συστήματα τύπου solar tracker, στα οποία η επιφάνεια των πανέλων είναι μονίμως κάθετη στη νοητή γραμμή που ενώνει τη θέση του πανέλου με τη θέση του ηλίου στην ουράνια σφαίρα. Τα συστήματα αυτά χρειάζονται μια σειρά δεδομένων που θα δίνουν την ακριβή θέση του ηλίου ανά πάσα στιγμή.

### 3.2 Ανάλυση του κώδικα

Πιο συγκεκριμένα, χρειάζονται το ζεύγος δεδομένων  $(\beta, Z)$ , όπου  $\beta$  το ύψος ηλίου και  $Z$  η αζιμούθια γωνία, όπως γνωρίσαμε και στο πρώτο κεφάλαιο. Με τα ζεύγη αυτά το πάνελ θα στρέφεται συνεχώς προς τον ήλιο, δηλαδή προς τη θέση αυτή  $(\beta, Z)$ . Η διαδικασία αυτή θα ξεκινά από την ανατολή του ηλίου όπου η γωνία  $\beta$  θα αρχίσει να παίρνει θετικές τιμές και θα συνεχίζεται μέχρι τη δύση όπου η  $\beta$  θα μηδενίζεται.

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο είναι να γνωρίζουμε την περίοδο ανά την οποία θα κινείται το πάνελ. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι, όπως είναι φυσικό, όσο πιο συχνά στρέφεται ο μηχανισμός τόσο πιο σύντομα θα χρειαστεί συντήρηση, με αποτέλεσμα το τελικό κόστος να αυξάνεται. Από την άλλη, με όσο μικρότερο βήμα στρέφεται το πάνελ, τόσο πιο αποδοτική θα είναι η λειτουργία του μηχανισμού αφού θα απορροφά περισσότερη ακτινοβολία τις ηλιόλουστες ημέρες. Για παράδειγμα πολλά από τα φωτοβολταϊκά της αγοράς στρέφονται με βήμα 10 λεπτών.

Αφού αποφασιστεί το βήμα -π.χ. δεκάλεπτο- θα πρέπει στη συνέχεια να βρεθούν τα  $(\beta, Z)$  για τη συγκεκριμένη ημέρα. Ο πρώτος υπολογισμός λοιπόν στο παράδειγμά μας θα αφορά την τοπική ώρα ανατολής της συγκεκριμένης θέσης στην οποία είναι εγκατεστημένος ο μηχανισμός, ο δεύτερος θα αφορά τη χρονική στιγμή που θα ακολουθήσει μετά από 10 λεπτά, ο τρίτος μετά από 20 λεπτά κ.ο.κ. Οι υπολογισμοί θα σταματήσουν μόλις ο ήλιος δύσει. Συνεπώς για την συγκεκριμένη ημέρα θα έχουν προκύψει μία σειρά από ζεύγη των οποίων το πλήθος θα είναι συγκεκριμένο και ανάλογο με την εκάστοτε ηλιοφάνεια.

Επειδή αυτή η διαδικασία θα πρέπει να γίνει 365 φορές για κάθε ημέρα του

έτους, και επειδή κάθε φορά θα προκύπτουν διαφορετικού πλήθους ζεύγη λόγω της διαφορετικής διάρκειας της κάθε ημέρας, όπως είναι φυσικό οι υπολογισμοί γίνονται τόσο περίπλοκοι που προκύπτει η ανάγκη χρήσης του προγραμματιστικού περιβάλλοντος Matlab. Ο κώδικας που θα χρησιμοποιηθεί δεν θα πρέπει να είναι μόνο ακριβής και αποδοτικός, αλλά και φιλικός στο χρήστη και ευέλικτος.

Το πρόγραμμα έχει κάποιες εισόδους οι οποίες φαίνονται παρακάτω και είναι με τη σειρά:

**function [ GB, GZ ] = diplwmatikh( anat, dush, a, f, lst, dt, p1 )**

- ένας πίνακας 365 στοιχείων που ονομάζεται “anat” και περιέχει τις ώρες ανατολής της περιοχής στην οποία θα τοποθετηθεί ο μηχανισμός. Τα στοιχεία αυτά είναι απαραίτητα διότι θα αποτελούν τον εναρκτήριο υπολογισμό για κάθε ημέρα. Ο πίνακας αυτός θα έχει υπολογιστεί προηγουμένως με τη βοήθεια των ηλιακών εξισώσεων που αναφέρθηκαν στο πρώτο κεφάλαιο. Ο πίνακας που αφορά τις συντεταγμένες της Αθήνας έχει ήδη υπολογιστεί.
- ένας πίνακας 365 στοιχείων που ονομάζεται “dush” και περιέχει τις ώρες δύσης της περιοχής που θα τοποθετηθεί ο μηχανισμός. Τα στοιχεία αυτά είναι απαραίτητα διότι αποτελούν τη στιγμή λήξης των υπολογισμών για κάθε ημέρα. Ο πίνακας αυτός θα έχει υπολογιστεί προηγουμένως με τη βοήθεια των ηλιακών εξισώσεων που αναφέρθηκαν στο πρώτο κεφάλαιο. Ο πίνακας που αφορά τις συντεταγμένες της Αθήνας έχει ήδη υπολογιστεί.
- ένα στοιχείο “a” στη θέση του οποίου θα εισάγεται το γεωγραφικό μήκος του τόπου που μας ενδιαφέρει σε μοίρες (προσοχή πρέπει να δοθεί και στο πρόσημο του γεωγραφικού μήκους).
- ένα στοιχείο “Γ” στη θέση του οποίου θα εισάγεται το γεωγραφικό πλάτος του τόπου που μας ενδιαφέρει σε μοίρες.
- ένα στοιχείο “lst” στη θέση του οποίου θα εισάγεται ο μεσημβρινός αναφοράς της περιοχής Lst που υπολογίζεται από τον τύπο  $Lst = 15^\circ / h * \Delta T_{GMT}$  και θα είναι  $-30^\circ$  για την Ελλάδα.
- ένα στοιχείο “dt” στη θέση του οποίου θα εισάγεται το βήμα ανά το οποίο θέλουμε να υπολογίζει το πρόγραμμα τα (β,Z). Το βήμα αυτό θα πρέπει να



μετατρέπεται σε δεκαδικό σύστημα με μονάδα αναφοράς τη μία ώρα και ύστερα να εισάγεται στο πρόγραμμα (για παράδειγμα το 1 λεπτό αντιστοιχεί σε 0,01667).

- ένα στοιχείο “p1” στο οποίο θα εισάγεται η συγκεκριμένη DoY για την οποία θέλουμε το πρόγραμμα να σχεδιάζει τη γραφική παράσταση των β-Z.

Το πρόγραμμα στο τέλος θα δίνει ως αποτέλεσμα δύο δισδιάστατους πίνακες.

Ο πρώτος θα περιέχει τα υπολογισμένα β και θα έχει 365 γραμμές, μία για κάθε ημέρα του έτους. Όσον αφορά τις στήλες, το πλήθος τους δεν θα είναι περιορισμένο αφού δεδομένου ότι η διάρκεια ηλιοφάνειας αλλάζει καθημερινά, για κάθε ημέρα θα υπολογίζεται διαφορετικό πλήθος β. Αναμένουμε η ημέρα με τα περισσότερα στοιχεία να είναι το θερινό ηλιοστάσιο την 21η Ιουνίου.

Ο δεύτερος θα περιέχει τα υπολογισμένα αζιμούθια Z και θα έχει επίσης 365 γραμμές, μία για κάθε ημέρα του έτους. Όσον αφορά τις στήλες, το πλήθος τους και πάλι δεν θα είναι περιορισμένο αφού δεδομένου ότι η διάρκεια ηλιοφάνειας αλλάζει καθημερινά, για κάθε ημέρα θα υπολογίζεται διαφορετικό πλήθος Z. Αναμένουμε η ημέρα με τα περισσότερα στοιχεία να είναι το θερινό ηλιοστάσιο την 21η Ιουνίου. Επίσης θα πρέπει το πλήθος των β για κάθε ημέρα να είναι ίσο με το πλήθος των Z για την ίδια ημέρα.

Τέλος, αφού το πρόγραμμα τρέξει, θα λάβουμε μία γραφική παράσταση β-Z για την ημέρα που επιλέχθηκε στην αρχή.

Ο κώδικας ξεκινά αρχικοποιώντας τους δύο πίνακες των β και Z και έναν δείκτη i που θα παίρνει τις τιμές της εκάστοτε DoY (δηλαδή θα ξεκινά από 1 και για κάθε ημέρα που περνά θα αυξάνεται κατά 1).

**GB=[];**

**GZ=[];**

Ορίζεται επίσης ένας δείκτης hour στον οποίο θα εισάγονται οι ώρες για τις οποίες θα γίνονται οι υπολογισμοί. Στον hour αρχικά εισάγεται η ώρα ανατολής που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη ημέρα που επεξεργάζεται το πρόγραμμα τη στιγμή εκείνη και στη συνέχεια προστίθεται σε αυτόν το βήμα που έχουμε ορίσει στην αρχή ώστε να γίνει ο επόμενος υπολογισμός κ.ο.κ. Οι δείκτες kb και kz συμβολίζουν τη στήλη στην οποία θα τοποθετείται το κάθε στοιχείο στους πίνακες και κάθε φορά που γίνεται νέος υπολογισμός αυξάνονται κατά 1.

```
hour=anat(i);
```

```
kb=1;
```

```
kz=1;
```

```
hour=hour+dt;
```

```
kb=kb+1;
```

```
kz=kz+1;
```

Οι υπολογισμοί για κάθε ημέρα γίνονται επαναληπτικά με δεδομένη τη συνθήκη ότι ο δείκτης hour δεν έχει ξεπεράσει την ώρα δύσης. Μόλις γίνει αυτό οι υπολογισμοί σταματούν, το i αυξάνεται κατά 1 και ξεκινούν νέοι υπολογισμοί σε νέα επανάληψη για την επόμενη ημέρα.

```
for i=(1:length(anat))
```

```
hour=anat(i);
```

```
kb=1;
```

```
kz=1;
```

```
while hour<dush(i)
```

```
%(prepei swsto proshmo a , lst)
```

```
b=asind(sind(23.45*sind((360/365)*(i+284)))*sind(f)+cosd(23.45*sind((360/365)*(i+284)))*cosd(f)*cosd(15*(hour+(1/60)*(9.87*sind((720/365)*(i-81))-7.53*cosd((360/365)*(i-81))-1.5*sind((360/365)*(i-81))+4*(lst-a))-12)));
```

```
z=-acosd((sind(b)*sind(f)-
```

```
sind(23.45*sind((360/365)*(i+284)))/(cosd(b)*cosd(f)));
```

```
GB(i,kb)=b;
```

Το β υπολογίζεται με βάση την παρακάτω ηλιακή εξίσωση που αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο

$$\beta = \text{asin}(\text{sind} \cdot \text{sin} \varphi + \text{cosd} \cdot \text{cos} \varphi \cdot \text{cos} \omega)$$

στην οποία χρησιμοποιούνται τα α, φ και Lst που δόθηκαν στην αρχή.

Το Z υπολογίζεται με βάση την παρακάτω ηλιακή εξίσωση που αναφέρθηκε επίσης στο πρώτο κεφάλαιο

$$Z = \text{acos}\{(\sin\beta*\sin\varphi - \sin\delta)/(\cos\beta*\cos\varphi)\}$$

στην οποία επίσης χρησιμοποιούνται τα  $\alpha$ ,  $\varphi$  και  $Lst$  που δόθηκαν στην αρχή.

Για να αποκτήσει το  $Z$  τα κατάλληλα πρόσημα, δηλαδή αρνητικά από την ανατολή ως το ηλιακό ζενίθ και θετικά από το ηλιακό μεσημέρι ως τη δύση, έχουμε αντιστρέψει το πρόσημό του  $Z$  όσο η τιμή του είναι μικρότερη από αυτή που υπολογίστηκε ακριβώς πριν.

```

if kz>1
    if GZ(i,kz-1)>z
        GZ(i,kz)=-z;
    else
        GZ(i,kz)=z;
    end
else GZ(i,kz)=z;
end

```

Για τη γραφική παράσταση ζητάμε από το πρόγραμμα να χρησιμοποιήσει στοιχεία από τους πίνακες που έφτιαξε και συγκεκριμένα να χρησιμοποιήσει τη ν-οστή γραμμή όπου το ν θα είναι η p1 ημέρα του έτους που έχει ζητηθεί στην αρχή.

```

switch i
    case p1
        figure(1)
        plot(GZ(p1,:),GB(p1:),'b')
    end

```

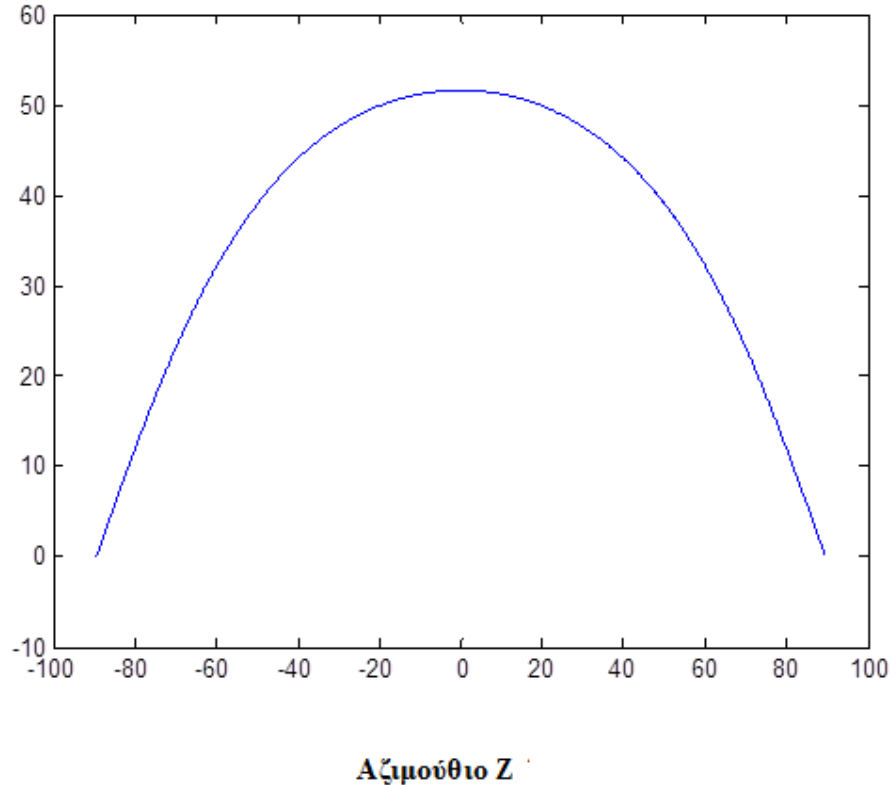
### 3.3. Εφαρμογή του κώδικα για τις συντεταγμένες της Αθήνας

Μετά από αυτή τη συνοπτική παρουσίαση του προγράμματος δίνεται η γραφική παράσταση  $\beta$ - $Z$  που προκύπτει από το πρόγραμμα για την εαρινή ισημερία στις 21 Μαρτίου (DoY=80) για την Αθήνα. Σαν εισόδους εισάγουμε τους πίνακες ανατολής και δύσης που έχουν υπολογιστεί στο πρώτο κεφάλαιο, τις συντεταγμένες της Αθήνας  $\varphi=37,96^\circ$  και  $\alpha=-23,72^\circ$ , τη διαφορά ώρας -2, το βήμα ανά 1 λεπτό (σε δεκαδικό σύστημα αυτό ισοδυναμεί με 0,01667) και τέλος

τον αριθμό 80 που αντιστοιχεί στο DoY του οποίου τη γραφική παράσταση θέλουμε.

Ακολουθεί η παράσταση:

### Υψος Ηλίου $\beta$



Σχ. 3.1 : Γραφική παράσταση matlab για τις συντεταγμένες της Αθήνας

Παρατηρούμε πως το γράφημα ξεκινά από μηδενικά  $\beta$  και αρνητικά  $Z$  και καθώς η ώρα περνά οι τιμές αυτές αυξάνονται ομαλά ως το ηλιακό ζενίθ. Στη συνέχεια ακολουθεί ένας συμμετρικός κλάδος στον οποίο οι τιμές  $\beta$  μειώνονται ενώ τα  $Z$  εξακολουθούν να αυξάνονται. Τα αποτελέσματα είναι αρκετά ακριβή και αναμενόμενα, ενώ η γραφική παράσταση είναι καμπύλη χωρίς ευθύγραμμα τμήματα και κορυφές, πράγμα φυσιολογικό αφού το βήμα που πήραμε είναι αρκετά μικρό.

Θα μπορούσαν να δοθούν και οι πίνακες με όλα τα δεδομένα των  $\beta$  και  $Z$  κάτι τέτοιο όμως θα ήταν δυσλειτουργικό για την εργασία και σχετικά ακατανόητο για τον αναγνώστη γι' αυτό και περιοριζόμαστε στις γραφικές παραστάσεις που είναι κατανοητές και μπορούμε πιο εύκολα να εξάγουμε συμπεράσματα.

Παρατηρούμε ότι το θερινό ηλιοστάσιο που αναλύθηκε και προηγουμένως έχει τη μεγαλύτερη διάρκεια και το υψηλότερο ζενίθ, σε αντίθεση με το χειμερινό ηλιοστάσιο που έχει τη μικρότερη διάρκεια ηλιοφάνειας και το χαμηλότερο ζενίθ. Οι ισημερίες όπως είναι φυσικό έχουν την ίδια διάρκεια ηλιοφάνειας και οι συντεταγμένες του ηλίου συμπίπτουν μεταξύ τους σε κάθε στιγμή της διάρκειάς τους γι' αυτό το λόγο και οι γραφικές τους παραστάσεις ταυτίζονται πλήρως. Τέλος, όλες οι γραφικές παραστάσεις έχουν την προαναφερθείσα συμμετρική μορφή.

Κλείνοντας, το προγραμματιστικό περιβάλλον matlab μας δίνει πολλές δυνατότητες και ευελιξία και μας βοηθά να επεξεργαστούμε και να κατανοήσουμε αυτόν τον τεράστιο όγκο δεδομένων.

Έχοντας πλέον αναφερθεί στην κίνηση του ήλιου και τα συστήματα που μπορούν να απορροφήσουν στο μέγιστο την ακτινοβολία του, είναι καιρός να αναφερθούμε και να αναλύσουμε τα χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας που καταφέρνει τελικά να φτάσει στους συλλέκτες.

### 3.4. Εφαρμογή του κώδικα για τις συντεταγμένες των Φάρσάλων

Συνοψίζοντας, το πρόγραμμα είναι ακριβές και λειτουργικό, οπότε μένει να διαπιστωθεί το αν είναι ευέλικτο και φιλικό προς το χρήστη γι' αυτό και θα επιχειρηθεί να επαναληφθεί η διαδικασία για την περίπτωση όπου ο μηχανισμός solar tracker τοποθετηθεί στα Φάρσαλα.

Αρχικά θα πρέπει να υπολογιστούν οι πίνακες ανατολής και δύσης της περιοχής. Αυτό θα γίνει χρησιμοποιώντας τις ηλιακές εξισώσεις του πρώτου κεφαλαίου.

Κατ' αρχήν οι συντεταγμένες της περιοχής είναι  $\alpha = -22,38^\circ$  και  $\varphi = 39,3^\circ$  ενώ αφού η διαφορά ώρας θα είναι  $\Delta T_{GMT} = -2$ , η ζώνη ώρας θα προκύψει  $Lst = 15^\circ / h * \Delta T_{GMT} = -30^\circ$ .

Θα χρησιμοποιήσουμε την απλή εξίσωση χρόνου

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

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

ενώ για την ηλιακή απόκλιση θα χρησιμοποιήσουμε τον τύπο

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

Για τη γωνία ώρας  $\omega$  θα χρησιμοποιήσουμε τον τύπο

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

και για την  $T_{solar}$  τον τύπο

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

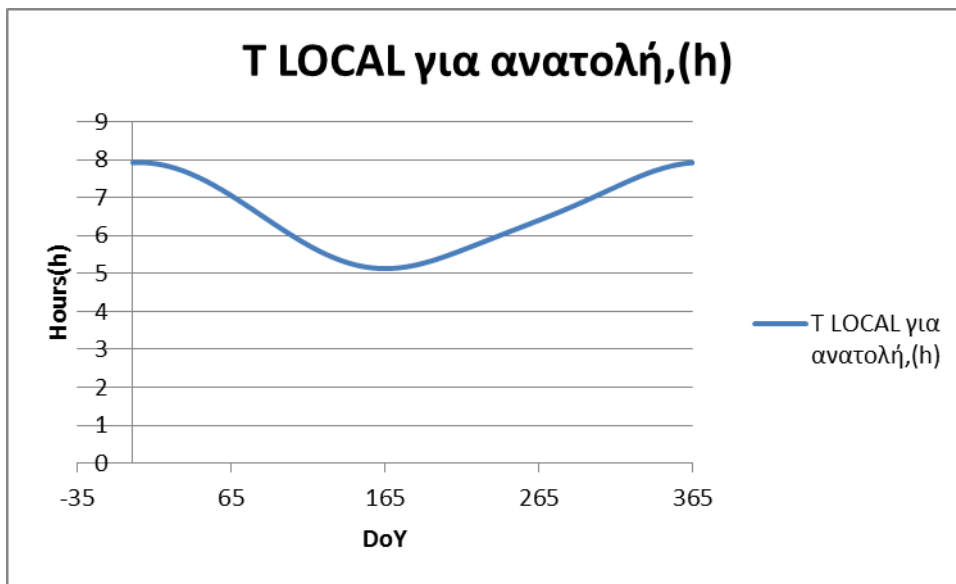
Τέλος για το ηλιακό ύψος  $\beta$  θα χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση

$$\sin \beta = \sin \delta * \sin \varphi + \cos \delta * \cos \varphi * \cos \omega.$$

Για να βρούμε τις ώρες ανατολής και δύσης, όπως και στο πρώτο κεφάλαιο θα μηδενίσουμε το ύψος ηλίου  $\beta$  και θα βρούμε το  $T_{\text{local}}$ .

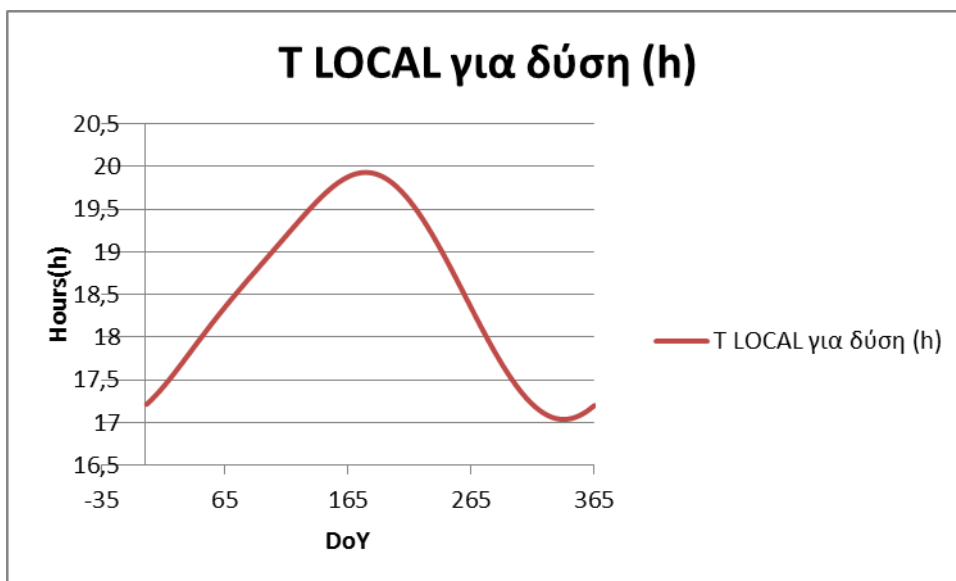
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν δίνονται παρακάτω με τη μορφή κατανοητών διαγραμμάτων.

Για τις ώρες ανατολής:



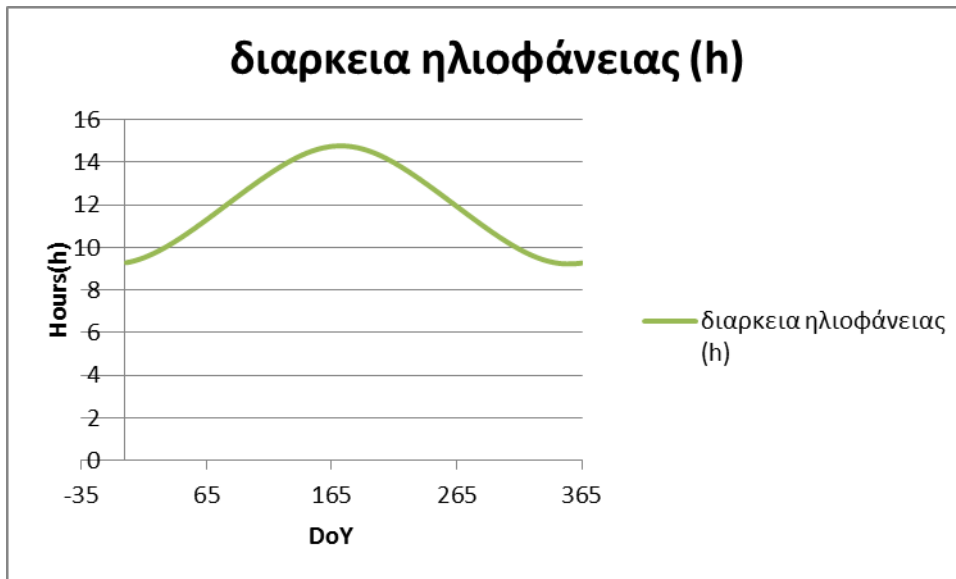
Σχ. 3.2 : Γραφική παράσταση τοπικών ωρών Ανατολής για τις συντεταγμένες των Φαρσάλων

Για τις ώρες δύσης:



Σχ. 3.3 : Γραφική παράσταση τοπικών ωρών Δύσης για τις συντεταγμένες των Φαρσάλων

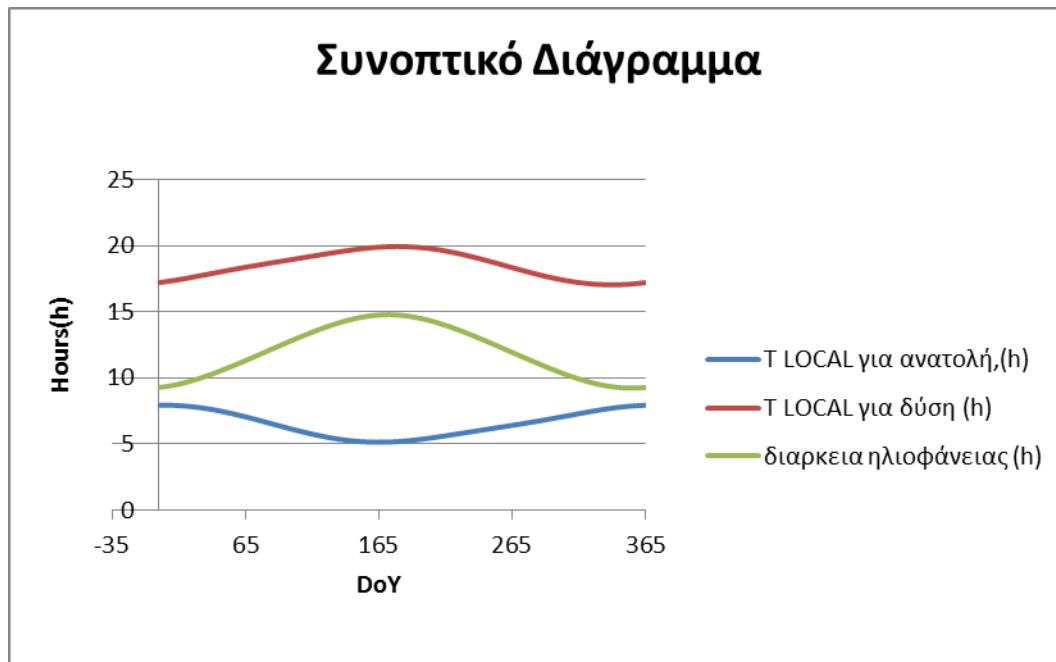
Για τις ώρες ηλιοφάνειας:



Σχ. 3.4 : Γραφική παράσταση ωρών ηλιοφάνειας για τις συντεταγμένες των Φαρσάλων

Παρατηρούμε ότι τα διαγράμματα δίνουν τα αναμενόμενα αποτελέσματα αφού οι ώρες ανατολής μειώνονται όσο πλησιάζουμε προς το καλοκαίρι και αυξάνονται όσο πλησιάζουμε στο χειμερινό ηλιοστάσιο. Αντίστοιχα, οι ώρες δύσης αυξάνονται την περίοδο κοντά στο θερινό ηλιοστάσιο ενώ μειώνονται προς το χειμερινό. Τέλος, η ηλιοφάνεια φτάνει στο μέγιστο στις 21 Ιουνίου, προσεγγίζει το ελάχιστο στις 21 Δεκεμβρίου, ενώ στις ισημερίες έχουμε την ίδια διάρκεια ημέρας.

Συνοπτικά παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα:



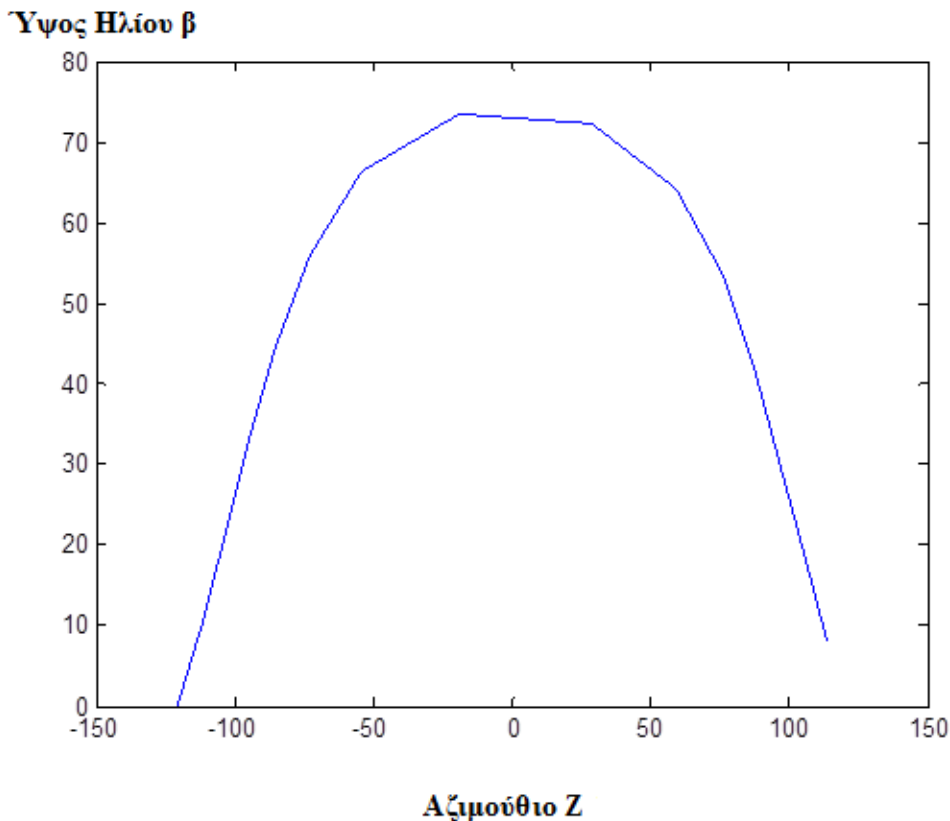
Σχ. 3.5 : Συνοπτικό διάγραμμα ωρών ηλιοφάνειας, τοπικών ωρών Δύσης και Ανατολής για τις συντεταγμένες των Φαρσάλων

Τα αποτελέσματα είναι ελαφρώς διαφορετικά από αυτά της Αθήνας και αυτό οφείλεται στην αλλαγή των συντεταγμένων.

Το μόνο που μένει για να τρέξουμε το πρόγραμμα είναι να επιλέξουμε το βήμα και την ημέρα για την οποία θέλουμε τη γραφική παράσταση των β-Z.

Αυτή τη φορά θα εισάγουμε βήμα υπολογισμών τη μία ώρα για να δούμε τις διαφορές που θα παρουσιάσει το γράφημα. Επίσης θα επιλέξουμε το χειμερινό ηλιοστάσιο στις 21 Ιουνίου σαν ημερομηνία για ανάλυση. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται παρακάτω:





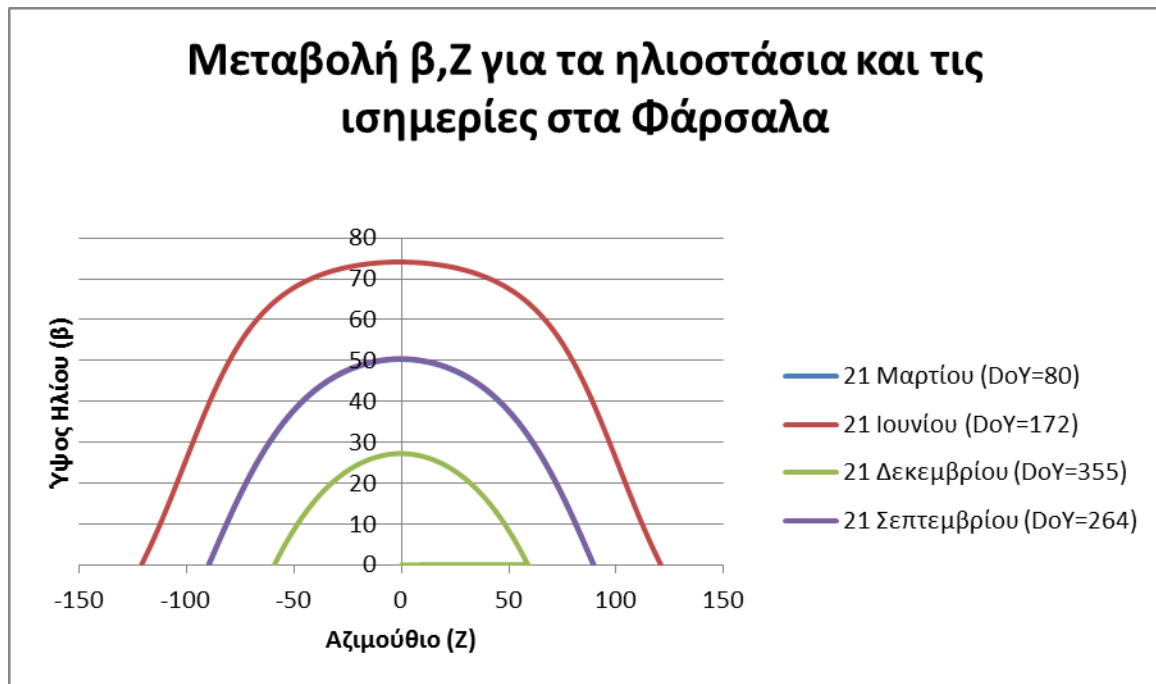
Σχ.3.6 : Γραφική παράσταση matlab για τις συντεταγμένες των Φαρσάλων

Παρατηρούμε ότι το διάγραμμα παρουσιάζει διαφορές με το προηγούμενο αφού έχει αρκετές κορυφές και στο τέλος σταματά απότομα. Αυτό οφείλεται στο βήμα το οποίο είναι αρκετά μεγάλο και γι' αυτό πολλές σημαντικές μετρήσεις δεν συνυπολογίζονται. Ακόμα, η καμπύλη έχει μεγαλύτερο μέγιστο από την προηγούμενη πράγμα φυσιολογικό αφού στο θερινό ηλιοστάσιο, ο ήλιος προσεγγίζει το μέγιστο ύψος του.

Παρ' όλες τις διαφορές τα αποτελέσματα είναι τα αναμενόμενα. Παρατηρούμε ότι με μία απλή αλλαγή δεδομένων το πρόγραμμα έδωσε τα ζητούμενα δεδομένα πράγμα που αποδεικνύει την ευελιξία του και τη φιλικότητά του προς το χρήστη.

Κάνοντας μία απλή μεταφορά δεδομένων σε περιβάλλον excel μπορούμε να λάβουμε την αντίστοιχη γραφική παράσταση στη μορφή που έχουν δημιουργηθεί και όλες οι υπόλοιπες γραφικές παραστάσεις της εργασίας.

Στο παρακάτω διάγραμμα έχουν γίνει οι γραφικές παραστάσεις β-Z για τέσσερις πολύ σημαντικές ημέρες του έτους τις ισημερίες και τα ηλιοστάσια.



Σχ. 3.7 : Γραφική παράσταση μεταβολής αζιμούθιου  $Z$  και ύψους Ηλίου  $\beta$  για τις συντεταγμένες των Φαρσάλων

Παρατηρούμε ότι το θερινό ηλιοστάσιο που αναλύθηκε και προηγουμένως έχει τη μεγαλύτερη διάρκεια και το υψηλότερο ζενίθ, σε αντίθεση με το χειμερινό ηλιοστάσιο που έχει τη μικρότερη διάρκεια ηλιοφάνειας και το χαμηλότερο ζενίθ. Οι ισημερίες όπως είναι φυσικό έχουν την ίδια διάρκεια ηλιοφάνειας και οι συντεταγμένες του ηλίου συμπίπτουν μεταξύ τους σε κάθε στιγμή της διάρκειάς τους γι' αυτό το λόγο και οι γραφικές τους παραστάσεις ταυτίζονται πλήρως. Τέλος, όλες οι γραφικές παραστάσεις έχουν την προαναφερθείσα συμμετρική μορφή.

Κλείνοντας, το προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab μας δίνει πολλές δυνατότητες και ευελιξία και μας βοηθά να επεξεργαστούμε και να κατανοήσουμε αυτόν τον τεράστιο όγκο δεδομένων.

Έχοντας πλέον αναφερθεί στην κίνηση του ήλιου και τα συστήματα που μπορούν να απορροφήσουν στο μέγιστο την ακτινοβολία του, είναι καιρός να αναφερθούμε και να αναλύσουμε τα χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας που καταφέρει τελικά να φτάσει στους συλλέκτες.

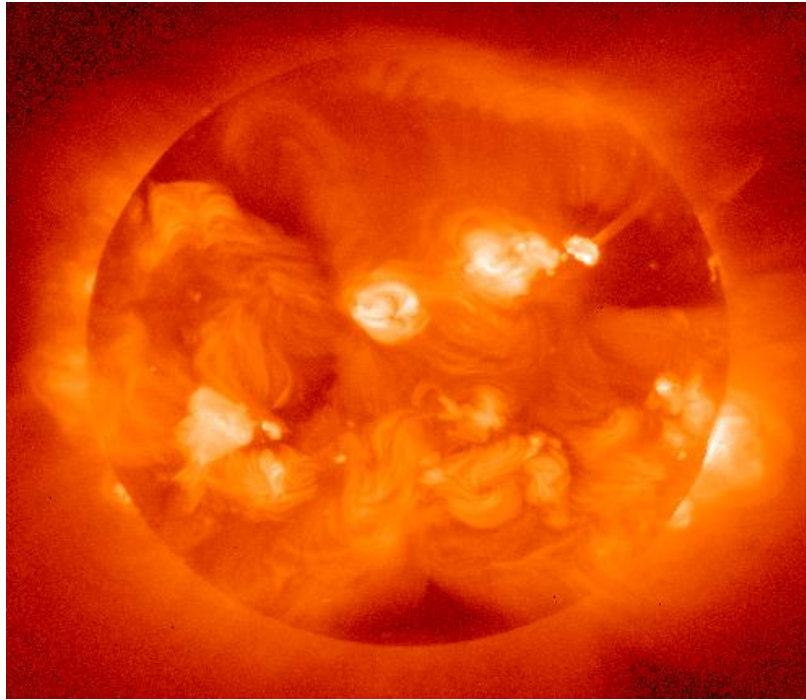
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ : ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

### *4.1. Εισαγωγή*

Στη Γη, τον τρίτο πλανήτη του ηλιακού μας συστήματος, καταναλώνονται καθημερινά τεράστια ποσά ενέργειας. Η ενέργεια αυτή προέρχεται στην πραγματικότητα σε μεγάλο ποσοστό από την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνειά της. Η μελέτη της πορείας αυτής της ενέργειας είναι πολύ σημαντική και άμεσα συνδεδεμένη με το αντικείμενο μελέτης της εργασίας αφού συνδέεται άρρηκτα τόσο με τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων, όσο και με την απόδοσή τους.

### *4.2. Η πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας από τη δημιουργία της μέχρι το έδαφος*

Η πηγή των τεράστιων ποσών ηλιακής ενέργειας, θερμότητας και φωτός, ο Ήλιος, αποτελείται από μία τεράστια μάζα θερμής αέριας ύλης. Η μάζα του Ήλιου, πολλές χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από αυτή της Γης, δεν είναι στάσιμη αλλά όπως είναι γνωστό στον πυρήνα του Ήλιου γίνονται συνεχώς χημικές αντιδράσεις, πιο σημαντική από τις οποίες είναι η διαρκής πυρηνική σύντηξη. Ο πυρήνας του καταλαμβάνει μια έκταση από το κέντρο του Ήλιου μέχρι περίπου το ένα τέταρτο της ακτίνας του αστεριού. Στο επίκεντρο, η βαρύτητα τραβά όλη τη μάζα του Ήλιου προς τα μέσα και δημιουργεί πολύ έντονη πίεση. Αυτή η πίεση είναι αρκετά υψηλή ώστε να προκαλέσει τη σύντηξη των ατομικών μαζών. Οι θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται γι' αυτό το λόγο στον Ήλιο είναι τεράστιες.

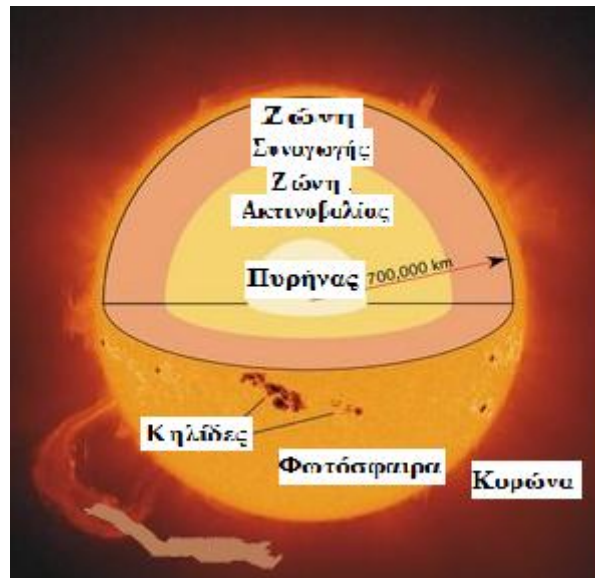


Σχ. 4.1 : Ο Ήλιος

Η ακριβής διαδικασία που συμβαίνει στο εσωτερικό του Ηλίου είναι μία αλυσωτή αντίδραση σύντηξης πρωτονίων που έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή ατόμων ηλίου  $He$  και ταυτόχρονα την έκλυση τεράστιων ποσών ενέργειας υπό τη μορφή ακτίνων  $X$ , ακτίνων  $\gamma$  και νετρίνων.

Οι ακτίνες αυτές μεταφέρονται στην επιφάνεια του Ηλίου είτε με τη μορφή ακτινοβολίας, είτε μέσω θερμού υλικού συναγωγικά. Στην πρώτη περίπτωση κάθε φωτόνιο που δημιουργείται ταξιδεύει περίπου ένα μικρόμετρο πριν απορροφηθεί από κάποιο παρακείμενο μόριο φυσικού αερίου. Αυτή η απορρόφηση στη συνέχεια προκαλεί τη θέρμανση των γειτονικών ατόμων και εκ νέου εκπέμπει ένα άλλο φωτόνιο που ταξιδεύει και πάλι σε μικρή απόσταση πριν απορροφηθεί από κάποιο άλλο άτομο. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται συνέχεια, πολλές φορές πριν το φωτόνιο να μπορέσει τελικά να εκπεμφθεί στην επιφάνεια του ήλιου. Παίρνει σε ένα φωτόνιο περίπου 100.000 χρόνια ή περίπου 10 εις την 25 απορροφήσεις και εκ νέου εκπομπές για να κάνει το ταξίδι από τον πυρήνα του ήλιου στην επιφάνειά του. Το ταξίδι από την επιφάνεια του ήλιου στη Γη διαρκεί περίπου 8 λεπτά. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας το μήκος κύματός της ακτινοβολίας το οποίο είναι αρχικά πολύ μικρό, αυξάνεται, μειώνοντας έτσι την ενέργεια που μεταφέρεται μέσω αυτής. Στη δεύτερη περίπτωση λαμβάνει χώρα ο “κύκλος συναγωγής” ο οποίος περιλαμβάνει τη μεταφορά θερμού υλικού στην επιφάνεια του Ήλιου μέσω θερμών διαύλων. Το

θερμό υλικό ψύχεται μεταφέροντας τη θερμότητα στην επιφάνεια και στη συνέχεια επιστρέφει πίσω στον πυρήνα ώστε να επαναθερμανθεί. Μέσα από όλη αυτή τη διαδικασία ο Ήλιος παράγει τα τεράστια ποσά ενέργειας, μέρος των οποίων φτάνουν στη Γη.



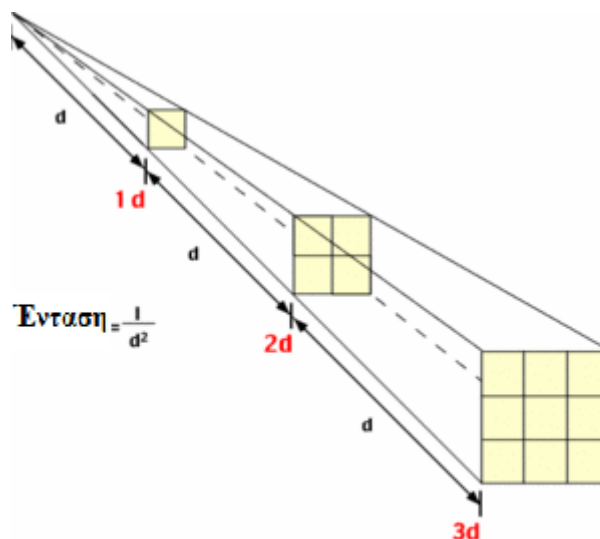
Σχ. 4.2: Τα στρώματα του Ηλίου

Η ηλιακή ακτινοβολία λοιπόν απελευθερώνεται από την επιφάνεια του Ήλιου, διασχίζει τα ανώτερα στρώματά του και στη συνέχεια μεταδίδεται στο κενό ώσπου να φτάσει στη γήινη ατμόσφαιρα. Θεωρούμε ότι η ακτινοβολία που προσπίπτει στην ατμόσφαιρα καθημερινά είναι σχετικά σταθερή και ότι οι μικρές διακυμάνσεις που παρουσιάζει οφείλονται στην ελλειπτική τροχιά της Γης. Επειδή δηλαδή κατά τη διάρκεια του έτους η απόσταση Ήλιου-Γης αυξομειώνεται, λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή της στο αφήλιο μετά το θερινό ηλιοστάσιο και την ελάχιστη στο περιήλιο μετά το χειμερινό ηλιοστάσιο, αντίστοιχα και η ακτινοβολία παρουσιάζει μέγιστα και ελάχιστα τα οποία όμως δεν διαφέρουν πολύ μεταξύ τους. Για να προσδιοριστούν οι μεταβολές της ακτινοβολίας χρησιμοποιούμε την πυκνότητα ισχύος στη μέση απόσταση των δύο ουράνιων σωμάτων. Το μέγεθος αυτό ονομάζεται πυκνότητα ισχύος της ηλιακής σταθεράς  $G_{\text{solar\_constant}}$  και θεωρούμε ότι είναι ίση με  $1367 \text{ W/m}^2$ . Με βάση αυτή τη σταθερά υπολογίζουμε τελικά την πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην ατμόσφαιρα της Γης καθημερινά η οποία ονομάζεται  $G_{\text{extra\_terrestrial}}$  και δίνεται από τον τύπο:

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

Στη συνέχεια η ακτινοβολία αυτή εισέρχεται στην ατμόσφαιρα και βαθμιαία χάνει μέρος της ενέργειάς της.

Εξαιρετικό ενδιαφέρον έχει λοιπόν να γνωρίσουμε πως η ηλιακή ακτινοβολία χάνει μέρος της ενέργειάς της στη διάρκεια του ταξιδιού της μέχρι το γήινο έδαφος. Όπως είδαμε κατά την παραγωγή της η ακτινοβολία αυτή είναι πολύ μικρού μήκους κύματος και κατά τη διάρκεια της εκπομπής της στην επιφάνεια του Ήλιου το μήκος αυτό αυξάνεται χάνοντας ταυτόχρονα μέρος της ηλιακής ενέργειας. Παρ' όλα αυτά η ακτινοβολία εξακολουθεί να έχει μικρό μήκος κύματος καθώς εκπέμπεται στο κενό. Στη διάρκεια του ταξιδιού της ως την επιφάνεια της ατμόσφαιρας, η ακτινοβολία χάνει κι άλλη ενέργεια, ενώ το μήκος κύματός της αυξάνεται ακόμα περισσότερο μειώνοντας την πυκνότητα ισχύος της. Αυτό έχει να κάνει με την ισχύ ενός φυσικού νόμου γνωστού και ως Inverse Square Law. Με βάση αυτό το νόμο η ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τον ήλιο μειώνεται ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, εφόσον η ένταση της ακτινοβολίας σε μία συγκεκριμένη απόσταση είναι μια μονάδα, σε διπλάσια απόσταση θα μειωθεί στο ένα τέταρτο. Αντίστοιχα σε τριπλάσια απόσταση θα μειωθεί στο ένα ένατο κ.ο.κ.



Σχ.4.3 : Η μείωση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας

Από τη στιγμή που τα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας θα εισέλθουν στην ατμόσφαιρα, θα επηρεαστούν από την ανομοιογενή κατανομή σωματιδίων οξυγόνου, διοξειδίου του άνθρακα, όζοντος, νερού, μονοξειδίου του άνθρακα, εξαθφοριούχου θείου και σκόνης και θα χάσουν κι άλλο μέρος της ενέργειάς τους, ενώ το μήκος κύματός τους θα εξακολουθήσει να αυξάνεται όσο αυτά διασχίζουν την ατμόσφαιρα και μέχρι να φτάσουν στο έδαφος. Τέλος, το ποσοστό της ακτινοβολίας που προσπίπτει και τελικά ανακλάται από το έδαφος είναι μεγάλου μήκους κύματος.

#### *4.3. Οι μηχανισμοί εξασθένησης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στη γήινη ατμόσφαιρα*

Παρατηρούμε πως σταδιακά η ηλιακή ενέργεια εξασθενεί τόσο λόγω της απόστασης που διανύει η ακτινοβολία όσο και λόγω των εμποδίων που συναντά. Τελικά στο έδαφος, δηλαδή στο επίπεδο της θάλασσας, καταφέρνει να φτάσει κατά μέσο όρο σε πέντε ώρες καθημερινά  $1\text{kW}/\text{m}^2$ , ποσότητα που είναι γνωστή και ως ισχύς ενός ηλίου και αποτελεί πρότυπη ηλιακή ακτινοβολία για τις εφαρμογές των επίγειων ηλιακών μέσων.

Αν μπούμε στη διαδικασία να μετρήσουμε ετησίως την ισχύ αυτή κατά μέσο όρο φτάνουμε στα  $102.000\text{TW}$ , ποσότητα τεράστια που είναι ικανή να μοιράζεται και να καλύπτει την πλειοψηφία των ενεργειακών αναγκών του πλανήτη.

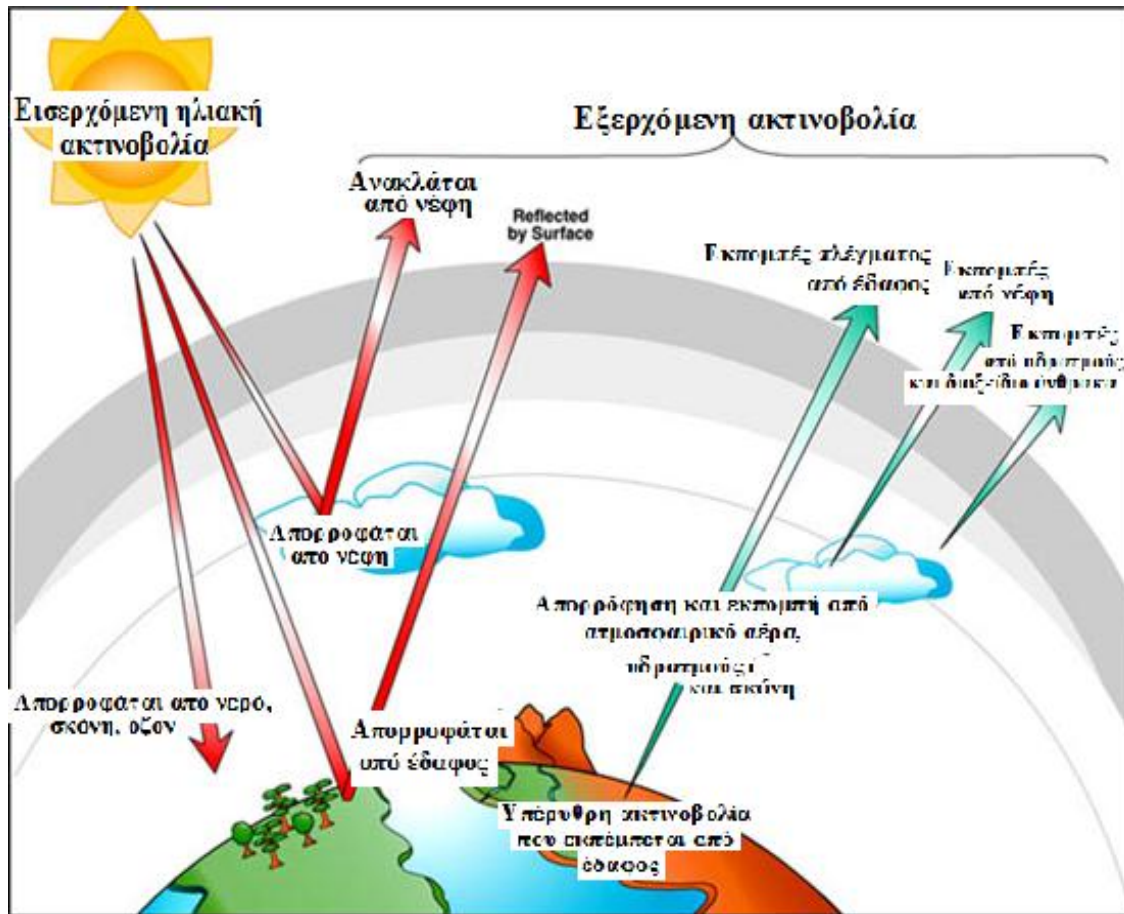
Η ποσότητα αυτή, όπως ειπώθηκε, είναι κατά πολύ μειωμένη λόγω διάφορων μηχανισμών που εκδηλώνονται στην ατμόσφαιρα και αξίζει να αναλυθούν.

Ο πρώτος μηχανισμός ονομάζεται απορρόφηση. Σε αυτή την περίπτωση η ακτινοβολία απορροφάται από τις διάφορες ενώσεις που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα, μετατρέπεται σε θερμότητα και ένα μικρό μέρος της επανεκπέμπεται στην ατμόσφαιρα σαν ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος. Πιο συγκεκριμένα το όζον απορροφά την υπεριώδη ακτινοβολία, ενώ το διοξείδιο του άνθρακα, οι υδρατμοί και το εξαθφοριούχο θείο απορροφούν την υπέρυθη.

Ο δεύτερος μηχανισμός ονομάζεται σκέδαση. Σε αυτή την περίπτωση οι υδρατμοί, η σκόνη και τα σωματίδια της ατμόσφαιρας εμποδίζουν την ακτινοβολία να διέλθει και την υποχρεώνουν να αλλάξει κατεύθυνση διάδοσης.

Ο τρίτος μηχανισμός ονομάζεται ανάκλαση. Σε αυτή την περίπτωση η

ακτινοβολία ανακλάται σε διεπιφάνειες διαφορετικής οπτικής πυκνότητας.  
 Η πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ.4.4: Οι μηχανισμοί απορρόφησης σκέδασης και ανάκλασης

#### 4.4. Αέρια Μάζα

Οι μηχανισμοί απορρόφησης, ανάκλασης και σκέδασης, επιδρούν στη διάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας και στην ποσότητα ενέργειας που μεταφέρει. Υπάρχουν όμως και άλλοι παράγοντες που καθορίζουν το πόσο έντονα ή λιγότερο έντονα θα επιδράσουν αυτοί οι μηχανισμοί. Για παράδειγμα όταν ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ του ύψους του, η ακτινοβολία έχει πολύ μικρότερη απόσταση να διανύσει από ότι όταν κοντεύει να δύσει. Για να λάβουμε υπόψην μας αυτόν τον παράγοντα της σχετικής απόστασης χρησιμοποιούμε το μέγεθος της Αέριας Μάζας AM (Air Mass). Η Αέρια Μάζα ορίζεται ως η αναλογία της διαδρομής του φωτός μέσα στην ατμόσφαιρα προς το συνολικό πάχος της ατμόσφαιρας. Σημαντικό μέγεθος είναι και η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής



δέσμης σε ηλιακό συλλέκτη  $\gamma_s$  η οποία συμπίπτει με το ύψος ηλίου  $\beta$  όταν ο συλλέκτης θεωρείται οριζόντιος.

Η Αέρια Μάζα δίνεται από τον τύπο:

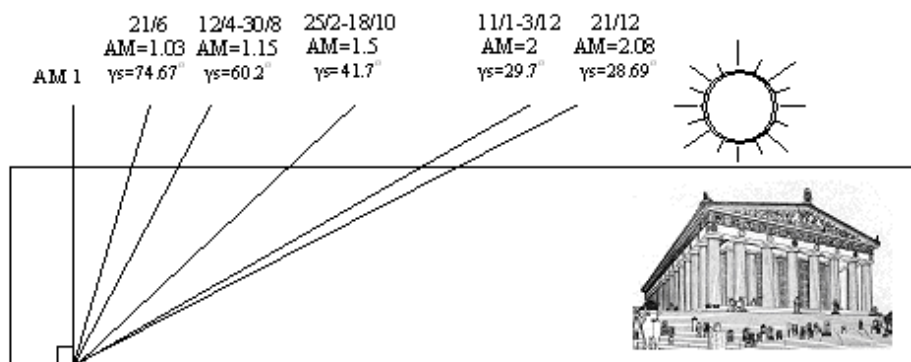
$$AM = 1/(\cos(90-\gamma_s))$$

Θεωρούμε σαν AM0 την Αέρια Μάζα που αντιστοιχεί σε περιοχή ακριβώς έξω από την ατμόσφαιρα της Γης, ενώ σαν AM1 την Αέρια Μάζα Που αντιστοιχεί σε περιοχή στην οποία ο ήλιος προσπίπτει κατακόρυφα με  $\gamma_s = 90^\circ$ .

#### 4.5. Μεταβολή των Αερίων Μαζών για την Αθήνα στη διάρκεια του έτους

Παρακάτω υπολογίζονται διάφορες Αέριες Μάζες για την περιοχή της Αθήνας. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια των ηλιακών εξισώσεων του πρώτου κεφαλαίου αφού έχουμε θεωρήσει το  $\gamma_s$  ίσο με  $\beta$ .

Ο υπολογισμός έχει γίνει για το θερινό ηλιοστάσιο στις 21 Ιουνίου, για το χειμερινό ηλιοστάσιο στις 21 Δεκεμβρίου για τις οποίες έχει βρεθεί η γωνία πρόσπτωσης. Ακόμα έχουμε βρει σε ποιες ημέρες του έτους αντιστοιχούν συγκεκριμένες τιμές των Αερίων Μαζών και συγκεκριμένα το  $AM = 1,15$ ,  $AM = 1,5$  και  $AM = 2$ . Οι υπολογισμοί οι οποίοι αναφέρονται σε τοπική ώρα 12.00μ.μ., συνοψίζονται στο παρακάτω σχήμα:



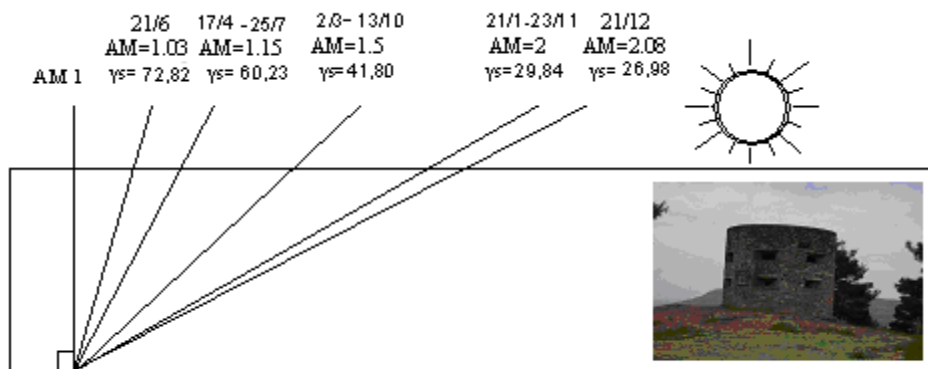
Σχ.4.5 : Αέριες Μάζες για την Αθήνα

Παρατηρούμε ότι η μέγιστη γωνία πρόσπτωσης που επιτυγχάνεται στο θερινό

ηλιοστάσιο είναι ίση με  $74,76^\circ$  και θεωρείται σχετικά μεγάλη. Αυτό οφείλεται στη θέση της Ελλάδας σχετικά κοντά στον ισημερινό. Οι υπόλοιπες γωνίες πρόσπτωσης είναι, όπως είναι φυσικό, μικρότερες και εμφανίζονται η κάθε μία για δύο ημέρες του χρόνου για συμμετρικές θέσεις ήλιου και Γης. Η μικρότερη γωνία εμφανίζεται το χειμερινό ηλιοστάσιο, όμως ακόμα και τότε δεν είναι ιδιαίτερα μικρή λόγω και πάλι των γεωγραφικών συντεταγμένων της Αθήνας.

#### 4.6. Μεταβολή των Αερίων Μάζων για τα Φάρσαλα στη διάρκεια του έτους

Στη συνέχεια οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται για διαφορετική τοποθεσία ώστε να γίνει σύγκριση των δεδομένων. Επιλέγονται τα Φάρσαλα και οι υπολογισμοί που έγιναν συνοψίζονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχ.4.6 : Αέριες Μάζες για τα Φάρσαλα

Παρατηρούμε πολύ μικρές διαφορές με τα αποτελέσματα τις Αθήνας λόγω του ελαφρώς διαφορετικού γεωγραφικού μήκους και πλάτους της τοποθεσίας. Τα Φάρσαλα ως σχετικώς βορειότερη πόλη παρουσιάζουν ελαφρώς μικρότερες γωνίες πρόσπτωσης. Η διαφορές συνοψίζονται στις 2 περίπου μοίρες για τα ηλιοστάσια, ενώ για τις  $AM = 1,15$ ,  $AM = 1,5$  και  $AM = 2$  εμφανίζονται για αντίστοιχες ημέρες με μικρές διαφορές 5 με 10 ημερών στις ημερομηνίες.

#### 4.7. Εποχιακή Μεταβολή Αερίων Μαζών

Θέλοντας να αναφέρουμε άλλον έναν τελευταίο παράγοντα που κάνει την επίδραση της ατμόσφαιρας στη φασματική ακτινοβολία περισσότερο ή λιγότερο έντονη θα πρέπει να αναφέρουμε τις διάφορες εποχικές μεταβολές. Πιο συγκεκριμένα η χαμηλότερη θέση του Ηλίου τις χειμωνιάτικες ημέρες υποχρεώνει το φως να ταξιδέψει περισσότερο στην ατμόσφαιρα και γι' αυτό το λόγο να είναι πιθανότερο μέρος της ενέργειάς του να χαθεί. Αντίθετα τους καλοκαιρινούς μήνες η θέση του Ηλίου είναι γενικά υψηλότερη οπότε η διαδρομή του φωτός και επομένως οι απώλειές του μειώνονται. Αυτό φυσικά έχει πιο σημαντική επίδραση σε βορειότερες περιοχές που επηρεάζονται περισσότερο από την κίνηση της Γης κατά τη διάρκεια του έτους.

#### 4.8. Συμπεράσματα

Αφού μελετήσαμε την πορεία της ακτινοβολίας από τον πυρήνα του Ηλίου ως το γήινο έδαφος, είναι σημαντικό να κατηγοριοποιήσουμε την ακτινοβολία αυτή στα διάφορα είδη της. Συνηθίζεται δηλαδή αυτή η συνολική ακτινοβολία που προσπίπτει στους συλλέκτες μας να την ξεχωρίζουμε σε άμεση και έμμεση με τη βοήθεια διάφορων οργάνων και επιστημονικών μεθόδων. Τα δεδομένα αυτά αποδεικνύονται πολύ χρήσιμα στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία και ιδιαίτερα στην περίπτωση συστημάτων solar tracker.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ : ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

### 5.1. Εισαγωγή

Η μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας αποτελεί διαχρονικά ένα ζητούμενο για μελετητές και μετεωρολόγους και για το λόγο αυτό έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για την εύρεση των κατάλληλων οργάνων, προκειμένου να καταλήγουμε σε σωστά συμπεράσματα με σχετικά απλούς και εύχρηστους μηχανισμούς.

Οι περισσότεροι από αυτούς τους μηχανισμούς χρησιμοποιούν όργανα και αισθητήρες που βασίζουν τη λειτουργία τους σε σύγκριση θερμοκρασίας αλλά και καταγραφή ροής θερμότητας. Αυτό κυρίως εφαρμόζεται με τα θερμοστοιχεία στους αισθητήρες ροής θερμότητας .

### 5.2. Το πυρανόμετρο

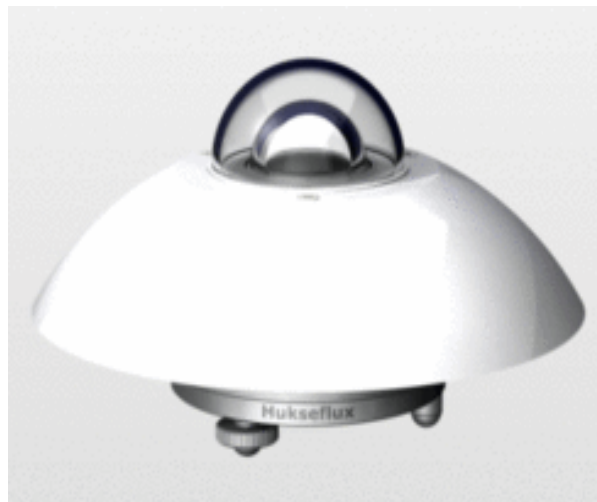
Στην αρχή λειτουργίας των αισθητήρων ροής θερμότητας βασίζει τη λειτουργία του και το πιο διαδεδομένο και αξιόπιστο όργανο μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας, το πυρανόμετρο. Το πυρανόμετρο μετρά τη **συνολική ηλιακή ακτινοβολία** που φτάνει σε οριζόντια επιφάνεια ( $G_{global}$ ) .

Κατά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί διάφοροι τύποι πυρανομέτρων. Οι σημαντικότεροι εκπρόσωποί τους αναλύονται παρακάτω:

Το **πυρανόμετρο του** Σουηδού Φυσικού **Angstrom** (1814-1874), ο οποίος είναι γνωστός κυρίως για τις έρευνές του στη φασματομετρία , αποτελείται από τέσσερις ταινίες μαγγανίου, από τις οποίες οι δυο είναι μαυρισμένες με πλατινούχο ουσία και οι άλλες δυο είναι επιστρωμένες με οξείδιο του μαγνησίου ή οξείδιο του ψευδαργύρου. Οι δυο τελευταίες ταινίες θερμαίνονται, ώσπου η διαφορά θερμοκρασίας να εξισωθεί με την θερμοκρασία των μαυρισμένων ταινιών. Η μέτρηση της διαφοράς θερμοκρασίας γίνεται με θερμοστοιχεία.

Τα **σύγχρονα πυρανόμετρα** αποτελούνται από έναν ή δύο ομόκεντρους γυάλινους θόλους που κατασκευάζονται από γυαλί ή ακριλικό πλαστικό και στο εσωτερικό τους, υπάρχει μία μαύρη επιφάνεια με κεραμικό υπόστρωμα κάτω από την οποία υπάρχουν εκατοντάδες θερμοστοιχεία . Η διαφορά της θερμότητας που παράγει η μαύρη επιφάνεια σε σχέση με μία άσπρη που ανακλά το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας δημιουργεί ηλεκτρικό σήμα. Το σήμα του πυρανομέτρου είναι της τάξης mV και οδηγείται σε κατάλληλη συσκευή μέτρησης.

Ο γυάλινος θόλος που αναφέραμε παραπάνω είναι πολύ σημαντικός για την σωστή χρήση του πυρανόμετρου. Πρώτα φροντίζει να μονώνονται θερμικά οι αισθητήρες αποκλείοντας τις θερμικές διαδικασίες συναγωγής για τη μεταφορά (απώλεια) θερμότητας προς την άνω όψη της διάταξης. Επιπλέον αποκλείει ρεύματα αέρα να προσεγγίσουν τους αισθητήρες καθώς και άλλους σωματιδιακούς ρύπους πχ. σκόνη που θα μπορούσαν να αλλοιώσουν τη λειτουργία τους. Ακόμα αποτελεί το χώρο εναπόθεσης του φίλτρου απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ώστε να προσδιορίζεται η φασματική απόκριση της ακτινοβολίας που εισέρχεται στο εσωτερικό της διάταξης. Ο θόλος αυτοκαθαρίζεται με την απλή βροχή.



Σχ.5.1 : Σύγχρονο Πυρανόμετρο

Προκειμένου να γίνει μέτρηση της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας τα πυρανόμετρα εφοδιάζονται και με ένα δαχτυλίδι το οποίο τοποθετείται στην διεύθυνση του ήλιου για όλο το γεωγραφικό πλάτος των  $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$  Βορά και Νότου έτσι ώστε να σκιάζεται ο γυάλινος θόλος συνεχώς κατά τη διάρκεια της ημέρας . Σκοπός του δαχτυλιδιού είναι να συλλάβει την απ' ευθείας ακτινοβολία του ήλιου κατά τη διάρκεια όλης της ημέρας χωρίς επαναρίθμηση. Κάθε λίγες ημέρες η θέση του δαχτυλιδιού πρέπει να επαναπροσαρμόζεται στην κλίση του ήλιου.

Όπως αναφέρεται και παραπάνω τα πυρανόμετρα χρησιμοποιούν 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

Τυπικό παράδειγμα πυρανόμετρου κατηγορίας second class είναι όργανα όπως τα **ηλιακά στοιχεία** που βασίζουν τη λειτουργία τους σε φωτοδιόδους (που λειτουργούν σε διαφορετική φασματική απόκριση) και όχι σε αισθητήρες ροής θερμότητας.

Τα ηλιακά στοιχεία είναι φτηνές διατάξεις που μετράνε τη συνολική ακτινοβολία  $G_{\text{global}}$ . Με τη χρήση ενός τέτοιου στοιχείου έγινε και η μέτρηση της ακτινοβολίας για την Αθήνα που έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Βασικό χαρακτηριστικό ενός ηλιακού στοιχείου είναι ο πραγματικά αμελητέος χρόνος απόκρισης που είναι της τάξης των ms σε αντίθεση με τα πυρανόμετρα που χρησιμοποιούν αισθητήρες ροής θερμότητας και χρειάζονται 20-30s για να αποκριθούν. Από αυτή τους την ιδιότητα γίνεται σαφές ότι τα ηλιακά στοιχεία είναι τα μόνα κατάλληλα για γρήγορες λήψεις δεδομένων (χρόνος δειγματοληψίας μικρότερος από 30s)

Από την άλλη πλευρά τα ηλιακά στοιχεία είναι κατάλληλα για πολύ συγκεκριμένες θερμοκρασίες κοντά στους 25°C και άρα μπορούν να καταγράφουν μικρού εύρους ηλιακό φάσμα (300nm-1100nm) σε αντίθεση με τα άλλα πυρανόμετρα που δεν έχουν μεγάλη θερμοκρασιακή εξάρτηση μέχρι τους 70 °C και μπορούν να καταγράφουν όλο το ηλιακό φάσμα (300nm-2800nm).

### 5.3. Το πυρηλιόμετρο

Όταν το πεδίο ενδιαφέροντος είναι η μέτρηση της άμεσης συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας ( $G_{\text{beam}}$ ), το όργανο μέτρησης που είναι καταλληλότερο και αποδοτικότερο είναι το **πυρηλιόμετρο**.

Το πρώτο πυρηλιόμετρο προέρχεται από το Γάλλο Φυσικό Claude Pouillet(1837), που παρατήρησε με αυτό την αύξηση της θερμοκρασίας μιας ορισμένης ποσότητας νερού υπό την επίδραση του ηλιακού φωτός σε ορισμένο χρόνο. Αυτή η μέθοδος χρειάστηκε πολύ χρόνο και υπομονή. Σημαντική βελτίωση αποτελεί το πυρηλιόμετρο αντιστάθμισης του Angstrom. Το πυρηλιόμετρό του αποτελείται από δυο μαύρα φύλλα μαγγανίου. Στο ένα φύλλο επιδρά η ηλιακή ακτινοβολία, ενώ το άλλο παραμένει στη σκιά. Αυτό το δεύτερο φύλλο θερμαίνεται με ηλεκτρικό ρεύμα, ώσπου να φθάσει τη θερμοκρασία του άλλου που ακτινοβολείται από τον ήλιο. Αρκεί και εδώ να μετρηθεί η ποσότητα του ρεύματος που χρειάζεται για να φθάσουν τα δυο φύλλα στην ίδια θερμοκρασία. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας βρίσκεται αν διαιρεθεί η ποσότητα αυτή με την επιφάνεια ανά  $\text{cm}^2$ .

Ο Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός διοργανώνει διεθνείς συγκρίσεις πυρηλιομέτρων κατά μεγάλα χρονικά διαστήματα. Γι' αυτόν το σκοπό γίνονται μετρήσεις της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας ταυτόχρονα στο πρότυπο πυρηλιόμετρο (πυρηλιόμετρο αντιστάθμισης φύλλων αργύρου) και γίνεται σύγκριση με τις τιμές των πυρηλιομέτρων που διαθέτουν οι άλλες χώρες. Καθοριστικά είναι τα όργανα αναφοράς στο αστεροσκοπείο του Davos (στην Ελβετία) και στο Μετεωρολογικό και Υδρολογικό Ινστιτούτο στο Norrköping.



#### 5.4. Το ακτινόμετρο

Αντίστοιχα με το πυριλιόμετρο, ένα άλλο όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της άμεσης συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας είναι **το ακτινόμετρο** που χρησιμοποιείται κυρίως στη μετεωρολογία.

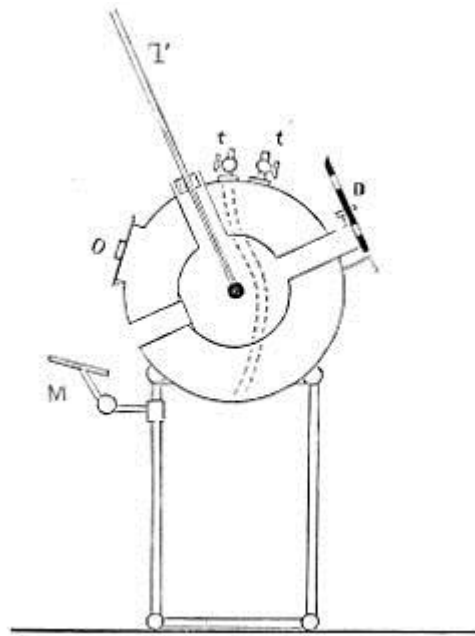
Και εδώ κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη συστήματος σκόπευσης του ήλιου προκειμένου να αποκλειστεί η περίπτωση να συμπεριληφθεί συνιστώσα ανακλώμενης ή διάχυτης ακτινοβολίας. Μπορεί να χρησιμοποιεί είτε **φυσικές διατάξεις** όπως φωτοδιόδους(thermopiles) ή ένα **χημικό σύστημα** όπως περιγράφεται παρακάτω.

Ο τρόπος λειτουργίας του χημικού ακτινομέτρου βασίζεται στο σχηματισμό γέφυρας Wheatstone από δυο λεπτές ταινίες πλατίνας που έχουν μαυριστεί ηλεκτρολυτικά. Η μια ταινία προστατεύεται από την ηλιακή ακτινοβολία και η άλλη εκτίθεται σε αυτή. Η ακτινοβολία προκαλεί στη δεύτερη ταινία άνοδο της θερμοκρασίας της και αύξηση της ηλεκτρικής της αντίστασης. Για να μετρηθεί η ενέργεια ακτινοβολίας που δέχεται το ακτινόμετρο, διοχετεύεται ρεύμα μέσα από την ταινία που δεν δέχεται ακτινοβολία και θεωρείται σαν ταινία αναφοράς, ώσπου εκείνη να δείξει την ίδια απόκλιση, όπως η ταινία που ακτινοβολείται. Η ένταση αυτού του βοηθητικού ρεύματος μετράται από ένα ευαίσθητο γαλβανόμετρο. Στα πιο σύγχρονα όργανα μέτρησης αυτού του είδους χρησιμοποιούνται, αντί των φύλλων πλατίνας, λεπτά στρώματα ημιαγωγών, μίγματα οξειδίων του νιοβίου, του μαγγανίου και του κοβαλτίου ή υπεραγωγοί, όπως το νιτρικό νιόβιο. Ανάλογα με τα υλικά που χρησιμοποιούνται, το ακτινόμετρο εφαρμόζεται αποδοτικότερα ή όχι, σε διαφορετικά μήκη κύματος ακτινοβολίας.

Ως προς το χημικό ακτινόμετρο υπάρχουν προβληματισμοί για την τοξικότητα των προϊόντων ορισμένων χημικών αντιδράσεων αλλά και για την δυνατότητα πραγματοποίησης χημικών αντιδράσεων ακόμη και σε συνθήκες σκότους.

Η καταγραφή του ακτινομέτρου αποτελεί το *ακτινόγραμμα* που δείχνει την ένταση της ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την ώρα της ημέρας, δηλαδή δεδομένα μετρήσεων που αντιστοιχούν στις διάφορες θέσεις του ήλιου. Καταγράφεται πάντα η ίδια επιφάνεια της γης. Οι συντεταγμένες των καμπυλών που

αντιστοιχούν σε κάθε μέτρηση, καθορίζουν το ποσό της ηλιακής ενέργειας, που απορροφάται από τη γήινη ατμόσφαιρα.



Σχ.5.2 : Το ακτινόμετρο

### 5.5. Ο ηλιογράφος – καταγραφικό Campbell-Stokes

Ένα ακόμα όργανο που έπαιξε καθοριστικό ρόλο στη μελέτη του ήλιου ήταν τα **καταγραφικό Campbell – Stokes** που έκανε εφικτή την εύρεση της ηλιοφάνειας με την αποτύπωση σε θερμικό χαρτόνι της άμεσης δέσμης  $G_{\text{beam}}$ .

Το **καταγραφικό Campbell – Stokes** (μερικές φορές ονομάζεται **σφαίρα Stokes**) είναι ένα είδος ηλιογράφου. Εφευρέθηκε από τον John Francis Campbell το 1853 και τροποποιήθηκε μεταγενέστερα το 1879 από τον George Gabriel Stokes. Ο αρχικός σχεδιασμός του Campbell αποτελούνταν από ένα ποτήρι (σφαίρα) που με τον ήλιο να καίει άφηνε ένα ίχνος σε ένα ξύλινο μπολ. Η παρέμβαση Stokes είχε σαν αποτέλεσμα τη στέγαση του από μέταλλο και την εισαγωγή θερμικού χαρτονιού σε ειδική προθήκη.



Σχ.5.3 : Ο ηλιογράφος Campbell-Stokes

Αυτή η βασική μονάδα είναι ακόμα σε χρήση σήμερα με πολύ μικρή αλλαγή. Είναι ίσως ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος ηλιογράφος σήμερα. Η μονάδα έχει σχεδιαστεί για να καταγράφει τις ώρες της ηλιοφάνειας που φαίνονται από το πόσο θα καεί η κάρτα και πόσο μεγάλη τρύπα θα δημιουργήσει. Καθώς μεταφέρεται ο ήλιος στην ουράνια σφαίρα η άμεση συνιστώσα της ακτινοβολίας του καίει το θερμικό χαρτί και δημιουργεί μία γραμμή, το μήκος της οποίας αποτελεί τις ώρες ηλιοφάνειας. Η έμμεση δέσμη δεν επαρκεί προκειμένου να δημιουργηθεί οπή στο χαρτί. Έτσι γενικά μπορούμε να πούμε ότι η συγκεκριμένη διάταξη αναδεικνύει την άμεση και όχι τη συνολική ακτινοβολία.

Η γυάλινη σφαίρα - συνήθως 10 εκατοστά (4 ίντσες) σε διάμετρο - έχει σχεδιαστεί για να επικεντρωθεί η ηλιακή ακτινοβολία σε μια κάρτα τοποθετημένη στο πίσω μέρος που βρίσκεται πάνω σε ένα βάθρο. Η κάρτα συγκρατείται από ειδικά ρυθμιζόμενες εγκοπές που μπορούν να μετατοπιστούν σε πλευρικές θέσεις ανάλογα με την εποχή του έτους ώστε να συνεκτιμάται η μεταβολή στο ύψος του ήλιου. Για το βόρειο ημισφαίριο, η θέση «χειμώνα» χρησιμοποιείται από 15 Οκτωβρίου έως 29 Φεβρουαρίου, η θέση «ισημερίες» από 1ης Μαρτίου έως 11 Απριλίου και από τις 3 Σεπτεμβρίου-14 Οκτωβρίου. Η θέση «καλοκαίρι» χρησιμοποιείται από το 12 Απριλίου - 2 Σεπτεμβρίου. Κάθε κάρτα φέρει ωριαίες διαγραμμίσεις με δεκαδικές υποδιαίρεσεις στο εσωτερικό της κάθε ώρας, ενώ το ηλιακό μεσημέρι αντιστοιχεί στο κέντρο της θερμικής ταινίας. Η μονάδα τοποθετείται σε οριζόντιο επίπεδο αναφοράς με τον συγκεκριμένο δείκτη προσανατολισμού της στο νότο και ρύθμιση πλαισίου συγκράτησης του θερμικού χαρτιού ως προς το γεωγραφικό πλάτος της

περιοχής. Φυσικά είναι πολύ σημαντικό να εγκατασταθεί η μονάδα σε μια περιοχή όπου ο ήλιος δεν θα παρεμποδίζεται από δέντρα κτίρια, ή άλλα εμπόδια.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτού του τύπου εγγραφής είναι η απλότητά του και η ευκολία χρήσης. Δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη και απαιτεί, συνεπώς, πολύ λίγη συντήρηση. Η μονάδα μπορεί να χρησιμοποιηθεί οπουδήποτε στον κόσμο με μικρή ή καθόλου τροποποίηση και είναι σχετικά ανέξοδη αφού μπορεί να αγοραστεί για περίπου 1500 ευρώ.

Από την άλλη όταν ο ήλιος είναι χαμηλά στον ουρανό μπορεί να μην έχει αρκετή δύναμη για να κάψει σωστά την κάρτα. Ακόμα η βροχή μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα η κάρτα να σχιστεί κατά την αφαίρεσή της και να είναι δύσκολο να διαβαστεί. Σε περιοχές με εξαιρετικά δύσκολες καιρικές συνθήκες όπως υψηλό παγετό, η σφαίρα μπορεί να είναι δύσκολο να καθαριστεί αλλά είναι πιθανό και η κάρτα καταγραφής να μην είναι εφικτό να απομακρυνθεί πριν ο ήλιος λάμψει ξανά. Ωστόσο, το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι η ανάγνωση των καρτών αφού ο κάθε αναγνώστης μπορεί να καταλήξει σε διαφορετικά συμπεράσματα.

#### 5.6. Συμπεράσματα

Χρησιμοποιώντας όλα τα παραπάνω όργανα είναι αρκετά απλό να συγκεντρώσουμε στοιχεία και μετρήσεις για την ηλιακή ακτινοβολία και κίνηση. Αυτές είναι απαραίτητες για πολλές δραστηριότητες που αφορούν από την καθημερινότητά μας (μετεωρολογία και καιρικές προγνώσεις), μέχρι και την γνώση για την «σοφότερη» επιλογή φωτοβολταϊκού συστήματος που θα αξιοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία. Η επιλογή του κατάλληλου οργάνου γίνεται ανάλογα με τη συνιστώσα της ακτινοβολίας που ζητάμε, την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που θέλουμε και την οικονομική δυνατότητα που έχουμε.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ : ΕΙΔΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ERBS-KLEIN-DUFFIE

### 6.1. Εισαγωγή

Στο παρακάτω κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα διάφορα είδη της ηλιακής ακτινοβολίας στην γήινη ατμόσφαιρα και θα παρουσιαστεί μία μέθοδος υπολογισμού τους. Επίσης θα γίνει εφαρμογή του μοντέλου για διάφορες ημέρες του έτους για τις συντεταγμένες της Αθήνας και θα παρατεθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα και η ανάλυσή τους.

### 6.2. Τα είδη της ηλιακής ακτινοβολίας

Όπως γνωρίσαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η ηλιακή ακτινοβολία που δημιουργείται στον πυρήνα του Ηλίου ταξιδεύει ως την ατμόσφαιρα της Γης, εισέρχεται σε αυτή και αφότου τη διασχίσει προσπίπτει στο έδαφος. Η ακτινοβολία που προσπίπτει καθημερινά στην ατμόσφαιρα και διαφοροποιείται με βάση τη θέση της Γης ονομάζεται  $G_{\text{extra\_terrestrial}}$ . Η ακτινοβολία αυτή υπολογίζεται όπως είδαμε για AM0 αφού η ατμόσφαιρα δεν επιδρά επάνω της, και δεν διαφοροποιείται πολύ στη διάρκεια του έτους.

Η φωτεινή ισχύς  $G_{\text{extra\_terrestrial}}$  αφότου εισέλθει στην ατμόσφαιρα και ξεπεράσει διάφορα εμπόδια όπως σκόνη, σωματίδια και υδρατμούς, υπόκειται στους μηχανισμούς της απορρόφησης, της σκέδασης και της ανάκλασης και έτσι χάνει ένα σημαντικό μέρος της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στο έδαφος να φτάνει ένα ποσοστό της αρχικής ακτινοβολίας που ονομάζουμε συνολική ηλιακή ακτινοβολία  $G_{\text{global}}$ . Η ακτινοβολία αυτή είναι που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε και να αξιοποιήσουμε με τη βοήθεια φωτοβολταϊκών πανέλων και κατ' επέκταση αποτελεί πεδίο μελέτης, μέτρησης και πειραματισμών.

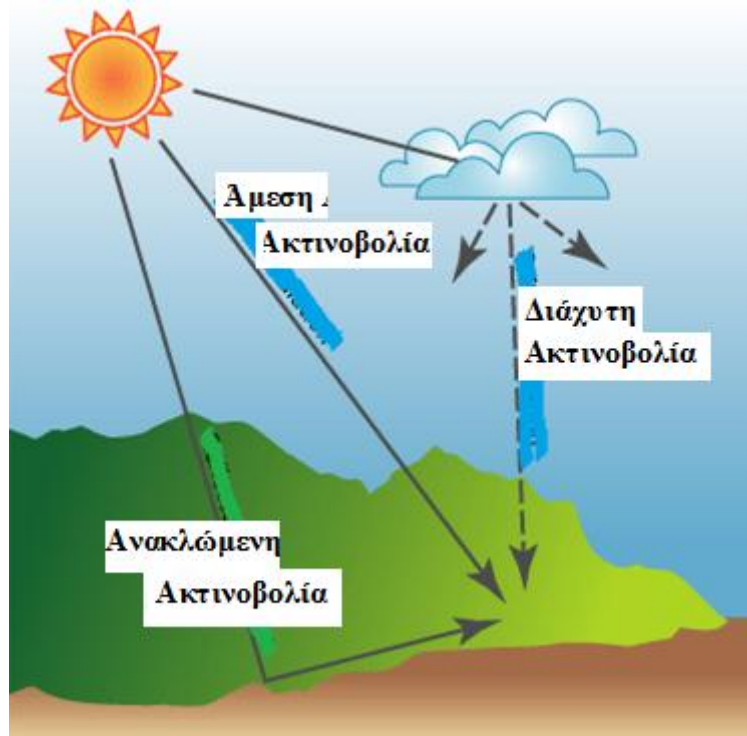
Αυτή η συνολική ακτινοβολία που προσπίπτει σε κάποιο σημείο μέτρησης ή σε κάποιο ηλιακό συλλέκτη αποτελείται από διάφορες συνιστώσες οι οποίες προέρχονται έμμεσα ή άμεσα από τον Ήλιο.

Μία από αυτές είναι η άμεση δέσμη  $G_{\text{beam}}$  η οποία εμφανίζεται όταν δεν υπάρχουν ιδιαίτερα εμπόδια, όπως π.χ. νέφη, ανάμεσα στον Ήλιο και το συλλέκτη. Η  $G_{\text{beam}}$  είναι ισχυρή τις ηλιόλουστες ημέρες, ενώ σε μία ημέρα με

έντονη συννεφιά μπορεί να ελαχιστοποιηθεί έως και να μηδενιστεί.

Η δεύτερη συνιστώσα που συνεισφέρει στη συνολική ακτινοβολία είναι η διάχυτη ακτινοβολία  $G_{diff}$ . Η συνιστώσα αυτή προέρχεται από ανακλάσεις και διαθλάσεις της ακτινοβολίας στα σωματίδια της ατμόσφαιρας. Το ποσοστό δηλαδή της ακτινοβολίας που επηρεάζεται από κάποιον από τους μηχανισμούς απορρόφησης, σκέδασης ή ανάκλασης και καταφέρει τελικά να φτάσει στο συλλέκτη αποτελεί τη διάχυτη ακτινοβολία. Η ισχύς της είναι υψηλή τις συννεφιασμένες ημέρες όπου τα προαναφερθέντα φαινόμενα είναι πιο έντονα. Τις ηλιόλουστες ημέρες η  $G_{diff}$  μειώνεται αλλά δεν μηδενίζεται όπως η  $G_{beam}$  αφού ανακλάσεις μπορούν να συμβούν ακόμα και στους υδρατμούς της ατμόσφαιρας.

Τέλος, η ακτινοβολία που προσπίπτει και ανακλάται στο έδαφος γύρω από το συλλέκτη καταλήγοντας τελικά στην επιφάνειά του είναι η **albedo** συνιστώσα. Η ισχύς της albedo εξαρτάται σημαντικά από το είδος του εδάφους που υπάρχει στην περιοχή γύρω από το συλλέκτη. Κάποιες επιφάνειες, δηλαδή, όπως το χιόνι ανακλούν μεγάλο ποσοστό της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτές με αποτέλεσμα να ενισχύουν την albedo, ενώ κάποιες άλλες όπως η άσφαλτος ή το φυτικό χώμα απορροφούν το μεγαλύτερο μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με αποτέλεσμα η albedo συνιστώσα που εμφανίζεται να είναι μικρή. Το ποσοστό στο οποίο κάθε επιφάνεια δύναται να ενισχύσει την albedo είναι συγκεκριμένο και καθορίζεται από έναν συντελεστή. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συνιστώσα αυτή δεν αποτελεί μελέτη της συγκεκριμένης εργασίας.



Σχ. 6.1: Άμεση, διάχυτη και albedo ακτινοβολία

### 6.3. Σκοπός του υπολογισμού των συνιστωσών της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας

Ο διαχωρισμός της συνολικής ακτινοβολίας στις συνιστώσες της είναι ιδιαίτερα σημαντικός αφού κάθε τύπος συλλέκτη επωφελείται διαφορετικά από την κάθε μία. Για παράδειγμα οι σταθεροί συλλέκτες δεν καταφέρνουν να απορροφήσουν μεγάλο μέρος της άμεσης συνιστώσας αφού προσπίπτει στην επιφάνειά τους για περιορισμένη χρονική διάρκεια της ημέρας. Η ακτινοβολία που απορροφούν είναι κατά κύριο λόγο κομμάτι της διάχυτης συνιστώσας. Από την άλλη οι ηλιακοί ιχνηλάτες που ακολουθούν την κίνηση του ήλιου στην ουράνια σφαίρα, επιδιώκουν να απορροφήσουν την άμεση ηλιακή δέσμη, ενώ επωφελούνται ταυτόχρονα και από ποσοστό της  $G_{diff}$  πράγμα που τους κάνει συνολικά αρκετά αποδοτικούς τις ηλιόλουστες ημέρες όπου η  $G_{beam}$  μεγιστοποιείται. Τις συνεφιασμένες βέβαια ημέρες όπου η άμεση δέσμη παρεμποδίζεται από νέφη, ένας σταθερός συλλέκτης που είναι προσανατολισμένος στο νότο μπορεί να εμφανίσει μεγαλύτερη απόδοση από έναν ιχνηλάτη. Ξεχωριστή περίπτωση αποτελούν οι κινητοί συλλέκτες που προσανατολίζονται με τη βοήθεια αισθητήρων και μπορούν ανά πάσα στιγμή να στραφούν στην πιο αποδοτική θέση ανάλογα με το ποιά από τις δύο συνιστώσες υπερισχύει. Σε αυτή την

περίπτωση βέβαια τα κόστη συντήρησης που προκύπτουν μπορεί να ξεπερνούν τελικά την απόδοση του συλλέκτη.

Συνοψίζοντας κρίνεται εξαιρετικά σημαντικό να γίνει μελέτη στην οποία να προσδιοριστεί το ποσοστό της κάθε συνιστώσας σε κάποιον τόπο πριν να παρθεί η τελική απόφαση για την τοποθέτηση κάποιου συγκεκριμένου είδους ηλιακού συλλέκτη.

Απαραίτητη για αυτή τη διαδικασία είναι κατ' αρχάς η μέτρηση της συνολικής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε κάποιον τόπο με τη βοήθεια πυρανόμετρου ή θερμοαισθητήρων.

Με τη βοήθεια των μετρήσεων αυτών και μετά από κατάλληλη επεξεργασία, μπορεί να προσδιοριστεί με σχετική ακρίβεια το ποσοστό της  $G_{\text{beam}}$  και της  $G_{\text{diff}}$  που περιέχονται στην  $G_{\text{global}}$ . Η επεξεργασία αυτή μπορεί να γίνει μέσω μοντέλων πρόβλεψης για τις μέσες ωριαίες τιμές των διάφορων συνιστωσών της ηλιακής ακτινοβολίας.

#### 6.4. Μοντέλα υπολογισμού των συνιστωσών της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας

Τα μοντέλα που υπολογίζουν τις συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, στα **παραμετρικά μοντέλα** και στα **μοντέλα κατάτμησης**.

Τα παραμετρικά μοντέλα (π.χ. Παραμετρικό μοντέλο ASHRAE) χρησιμοποιούν διάφορα δεδομένα για την περιοχή την οποία μελετάμε όπως ο τύπος και η κατανομή των νεφών και το ποσοστό της τμηματικής ηλιοφάνειας. Στη συνέχεια με βάση αυτές τις παραμέτρους προβλέπουν τα ποσοστά της κάθε συνιστώσας.

Τα μοντέλα κατάτμησης (π.χ. Μοντέλο Erbs-Klein-Duffie) χρησιμοποιούν τις μετρήσεις της συνολικής ακτινοβολίας και στη συνέχεια με βάση κάποιες συναρτήσεις υπολογίζουν τα ποσοστά των ακτινοβολιών.

#### 6.5. Ανάλυση του μοντέλου Erbs – Klein – Duffie

Στη συγκεκριμένη εργασία θα αναλυθεί και θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο κατάτμησης Erbs-Klein-Duffie. Ο λόγος που επιλέχθηκε το συγκεκριμένο μοντέλο είναι πως αποδίδει καλύτερα για γεωγραφικά πλάτη μεταξύ  $31^\circ$  και  $42^\circ$  στα οποία ανήκουν και οι συντεταγμένες της Αθήνας για την οποία έχουμε



διαθέσιμες μετρήσεις και μελετάμε. Φυσικά κάθε μοντέλο περιλαμβάνει σφάλματα τα οποία μπορούν να προσδιοριστούν εκ του αποτελέσματος, αφότου δηλαδή παρθούν μετρήσεις για κάθε συνιστώσα. Βέβαια, το κάθε μοντέλο ενδείκνυται και για συγκεκριμένες περιοχές στις οποίες αποδίδει καλύτερα και δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα με λιγότερα σφάλματα, οπότε δεν είναι δυνατόν να κατατάξουμε αντικειμενικά τα μοντέλα με σειρά ακρίβειας. Το μόνο για το οποίο μπορούμε να αποφανθούμε είναι να υποδείξουμε το μοντέλο που ταιριάζει σε κάθε περιοχή.

Το μοντέλο που επιλέξαμε απαιτεί τον υπολογισμό κάποιων δεικτών ώστε να υπολογιστεί η άμεση συνιστώσα και στη συνέχεια η έμμεση μέσω της χρήσης των μετρήσεων για τη συνολική ακτινοβολία  $G_{global,h}$ . Οι μετρήσεις αυτές πάρθηκαν από το εργαστήριο Φωτοβολταϊκών του Ε.Μ.Π. το οποίο παρέχει ένα μεγάλο αρχείο καθημερινών μετρήσεων της  $G_{global}$  μέσω θερμοαισθητήρων στην ταράτσα του κτιρίου ΗΜΜΥ.

Πρώτο βήμα στη μελέτη μας είναι να υπολογίσουμε τη γωνία ημέρας  $\Gamma$  μέσα από τον παρακάτω τύπο:

$$\Gamma = (360\alpha/365) \cdot (DoY - 1)$$

Η γωνία ημέρας εκφράζει την εξάρτηση του μοντέλου από τη θέση της γης για την κάθε ημέρα του έτους. Δεδομένης της γωνίας ημέρας υπολογίζουμε την εκκεντρότητα του ηλίου μέσα από την παρακάτω χρονοσειρά:

$$E_o = 1,0001 + 0,034221 \cdot \cos\Gamma + 0,00128 \cdot \sin\Gamma + 0,000719 \cdot \cos 2\Gamma + 0,000077 \cdot \sin 2\Gamma$$

Η εκκεντρότητα εκφράζει τις μεταβολές στην απόσταση μεταξύ Ήλιου και Γης και βασίζεται στις σειρές Fourier του Spencer.

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της ακτινοβολίας  $G_{extra\_terrestrial}$  μέσα από τον παρακάτω τύπο:

$$G_{extra\_terrestrial} = E_o \cdot G_{sc}$$

όπου  $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$  η ηλιακή σταθερά.

Στο συγκεκριμένο σημείο θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τα αποτελέσματα του Matlab από το οποίο προέκυψαν τα δεδομένα για το ύψος ηλίου  $\beta$  ώστε να υπολογιστεί η ακτινοβολία  $G_{h,oa}$  που προσπίπτει στην ατμόσφαιρα σε οριζόντιο επίπεδο παράλληλο με αυτό που έχει τοποθετηθεί ο συλλέκτης. Έτσι μέσα από τον παρακάτω τύπο θα προκύψει:

$$G_{h,oa} = E_o * G_{sc} * \sin\beta$$

Μετά από αυτούς τους υπολογισμούς είμαστε έτοιμοι να υπολογίσουμε τον πρώτο σημαντικό δείκτη που ονομάζεται δείκτης καθαρότητας και προκύπτει ως εξής:

$$k_t = G_{global,h} / G_{h,oa}$$

Ο δείκτης αυτός εκφράζει το κατά πόσο ο ουρανός είναι καθαρός ή συννεφιασμένος αφού ουσιαστικά συγκρίνει την ακτινοβολία που προσπίπτει στην ατμόσφαιρα με αυτή που τελικά καταφέρνει να φτάσει στο έδαφος και να μετρηθεί. Χαρακτηριστικά αν  $k_t \geq 0,8$  τότε πρόκειται για μία ημέρα χωρίς σύννεφα, αν  $0,22 < k_t < 0,8$  πρόκειται για μία ημέρα με μέτρια συννεφιά ενώ αν  $k_t \leq 0,22$  τότε πρόκειται για μια πολύ συννεφιασμένη ημέρα.

Με βάση το δείκτη αυτό υπολογίζουμε το κλάσμα διάχυσης  $K_d$  μέσα από μια εμπειρική συνάρτηση η οποία έχει ως εξής:

$$K_d = 1 - 0,09 * k_t, \text{ αν } k_t \leq 0,22$$

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

$$K_d = 0,165, \text{ αν } k_t \leq 0,8$$

Το κλάσμα αυτό εκφράζει τη σχέση της άμεσης συνιστώσας με τη συνολική γι' αυτό και το χρησιμοποιούμε για να υπολογίσουμε τη  $G_{beam}$  ως εξής:

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

Αφού υπολογίσαμε και την άμεση συνιστώσα δεν έχουμε παρά να υπολογίσουμε τη διάχυτη ακτινοβολία ως διαφορά μεταξύ της συνολικής και της διάχυτης:

$$G_{\text{diff}} = G_{\text{global,h}} - G_{\text{beam}}$$

Το μοντέλο περιέχει και άλλους δύο δείκτες τους οποίους δεν θα χρησιμοποιήσουμε αλλά αξίζει να αναφερθούν και είναι οι εξής:  
ο συντελεστής διάχυσης

$$k_d = G_{\text{diff}} / G_{\text{extra\_terrestrial}}$$

ο οποίος συγκρίνει τη διάχυτη συνιστώσα με αυτή που προσπίπτει στη γήινη ατμόσφαιρα και εκφράζει το πόσο ισχυρή είναι η διάχυτη ακτινοβολία τη συγκεκριμένη ημέρα και  
ο δείκτης άμεσης διάδοσης

$$k_b = G_{\text{beam}} / G_{\text{extra\_terrestrial}}$$

ο οποίος συγκρίνει την άμεση συνιστώσα με αυτή που προσπίπτει στη γήινη ατμόσφαιρα και εκφράζει το πόσο ισχυρή είναι η άμεση δέσμη τη συγκεκριμένη ημέρα.

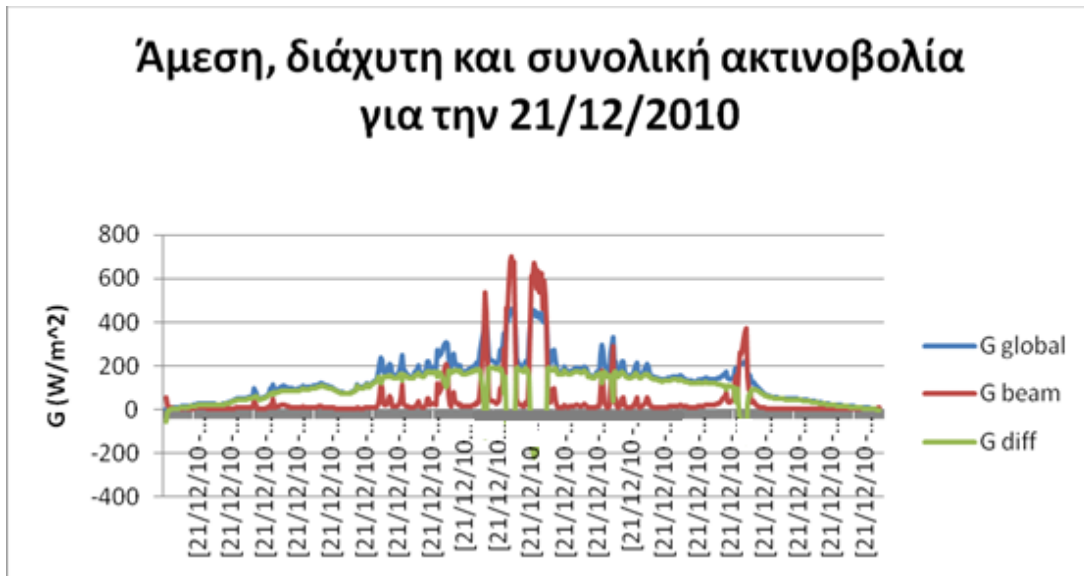
Αξίζει να σημειωθεί ότι το μοντέλο Ebers-Klein-Duffie που χρησιμοποιήσαμε παρουσιάζει κάποια σχετικά σφάλματα για ακραίου εύρους γωνίες ηλιακού ζενίθ, ενώ είναι ακριβές για γωνίες μεταξύ 50° και 65°. Σε αυτές τις αποκλίσεις οφείλονται και τα σφάλματα των διαγραμμάτων στη διάρκεια της πρώτων ωρών μετά την ανατολή του ηλίου καθώς και κάποιων ωρών πριν τη δύση του.

#### 6.6. Εφαρμογή του μοντέλου Erbs – Klein – Duffie για μετρήσεις που πάρθηκαν στην Αθήνα για διάφορες ημέρες του έτους

Με βάση όσα ειπώθηκαν δοκιμάστηκε να εφαρμοστεί το μοντέλο για διάφορες ημέρες του έτους. Χρησιμοποιήθηκαν οι γεωγραφικές συντεταγμένες του μετρητή της συνολικής ακτινοβολίας στην ταράτσα του κτιρίου HMMY Ε.Μ.Π.

Οι υπολογισμοί που ακολουθούν και που δεν περιλαμβάνουν την albedo ακτινοβολία έχουν γίνει για το θερινό και το χειμερινό ηλιοστάσιο καθώς και για κάποιες ενδεικτικές ημέρες έντονης συννεφιάς ή έντονης ηλιοφάνειας . Οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις φαίνονται παρακάτω:

- *Χειμερινό Ηλιοστάσιο 21 Δεκεμβρίου 2010*

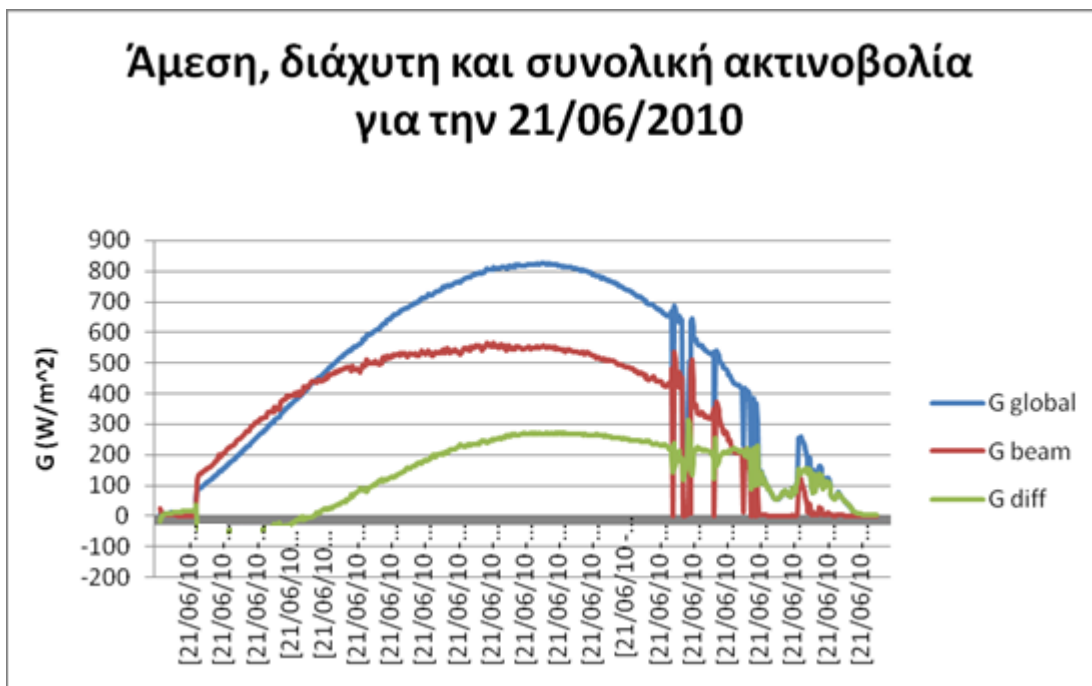


Σχ. 6.2: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 21/12/2010 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

Στη συγκεκριμένη ημέρα παρατηρούμε μεγάλες αποκλίσεις για τη διάχυτη και την άμεση ακτινοβολία ακόμα και τις μεσημεριανές ώρες. Αυτό οφείλεται στο ότι το ύψος ηλίου δεν ξεπερνά τις  $30^\circ$ , περιοχή που δεν ενδείκνυται για μελέτη με το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie. Για την Ελλάδα εκτός από τη συγκεκριμένη ημερομηνία αντίστοιχα αποτελέσματα θα λάβουμε και για τις περισσότερες ημέρες του χειμώνα όπου το ηλιακό ζενίθ παραμένει χαμηλό.

Παρ' όλα αυτά, το μοντέλο μας προσφέρει μία σχετική αντίληψη της ποσόστωσης της ακτινοβολίας για τις 21/12 όπου στο μεγαλύτερο μέρος της ημέρας, η διάχυτη συνιστώσα υπερिσχύει κατά πολύ της άμεσης. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως επρόκειτο για μια έντονα συννεφιασμένη ημέρα.

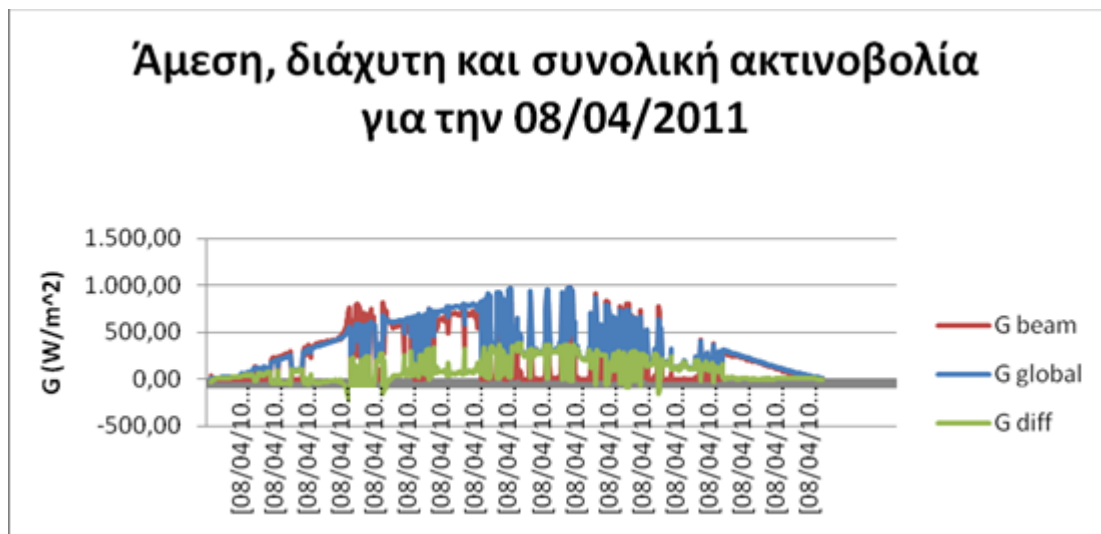
- *Εαρινό ηλιοστάσιο στις 21 Ιουνίου 2010*



Σχ. 6.3: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 21/06/2010 με βάση το μοντέλο *Erbs-Klein-Duffie*

Στη συγκεκριμένη καλοκαιρινή ημέρα παρατηρούμε ότι το μοντέλο προσομοιώνει ικανοποιητικά την άμεση καθώς και τη διάχυτη ακτινοβολία δεδομένης της συνολικής. Λαμβάνοντας υπ' όψιν την αποδοτικότητα του μοντέλου για την καλοκαιρινή περίοδο-αφού το ηλιακό ύψος κυμαίνεται ως επί το πλείστον στις ιδανικές για το μοντέλο γωνίες  $50^\circ$  με  $65^\circ$ - αυτό είναι κάτι αναμενόμενο. Βεβαίως ακόμα και στις 21/6 παρουσιάζονται σφάλματα κατά τη διάρκεια των πρωινών ωρών που οφείλονται στο χαμηλό ηλιακό ύψος (δεδομένης της ώρας). Μετά τις 16:00 παρατηρούμε αυξομειώσεις στο διάγραμμα, κάτι που οφείλεται σε παροδικά φαινόμενα συννεφιάς. Επιπλέον είναι προφανές όσο και αναμενόμενο ότι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μία καλοκαιρινή μέρα όπως αυτή είναι υψηλή.

- 8 Απριλίου 2011-μια τυχαία συννεφιασμένη ημέρα

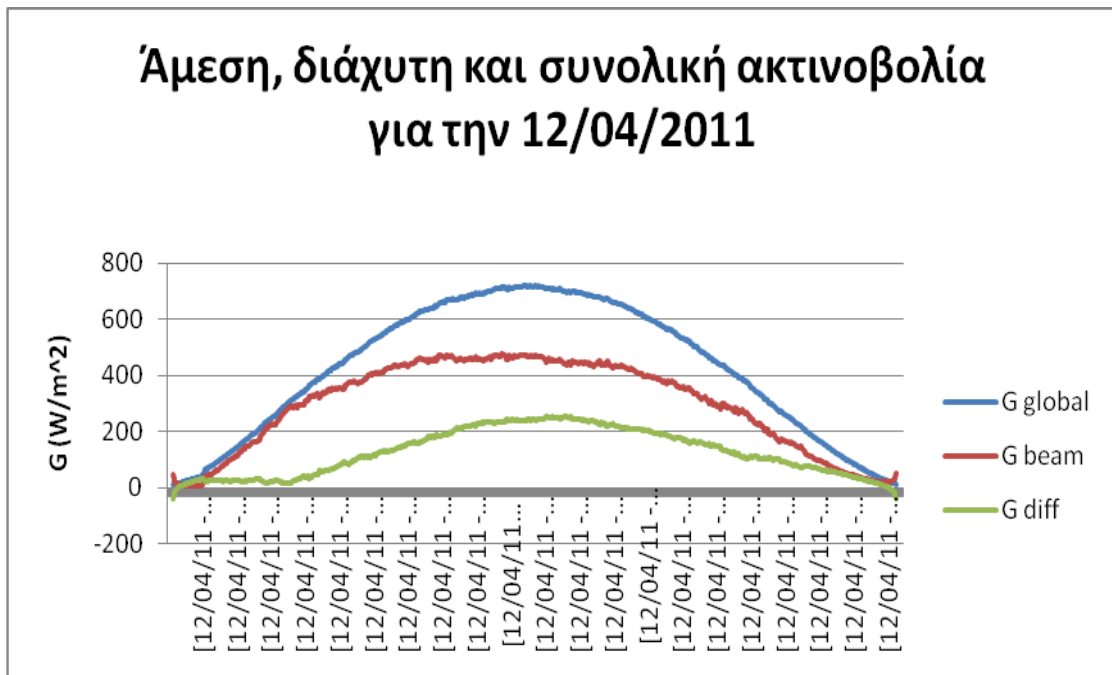


Σχ. 6.4: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 08/04/2011 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

Σε αυτή την ανοιξιάτικη μέρα παρατηρούμε πλήθος αυξομειώσεων τόσο στη συνολική όσο και στη διάχυτη και την άμεση ακτινοβολία. Σε αντίθεση με το επίσης συννεφιασμένο χειμερινό ηλιοστάσιο το διάγραμμα της άμεσης ακτινοβολίας ακολουθεί τις μεταβολές του διαγράμματος της συνολικής, γεγονός το οποίο μας προδίδει την ύπαρξη αραιής συννεφιάς όπως επίσης και μία συνεχή εναλλαγή συννεφιάς και ηλιοφάνειας. Επιπλέον η διάχυτη ακτινοβολία γίνεται πιο έντονη τις μεσημεριανές ώρες στις οποίες συμπεραίνουμε ότι εμφανίζεται πυκνή συννεφιά.

Όπως και στις προηγούμενες παραστάσεις παρουσιάζονται σφάλματα τις πρώτες πρωινές ώρες όπου το ύψος του ηλίου κυμαίνεται κοντά στις  $30^\circ$ . Παρόλη τη συννεφιά και τις διακυμάνσεις των διαγραμμάτων τα επίπεδα ακτινοβολίας παραμένουν υψηλά λόγω της εποχής.

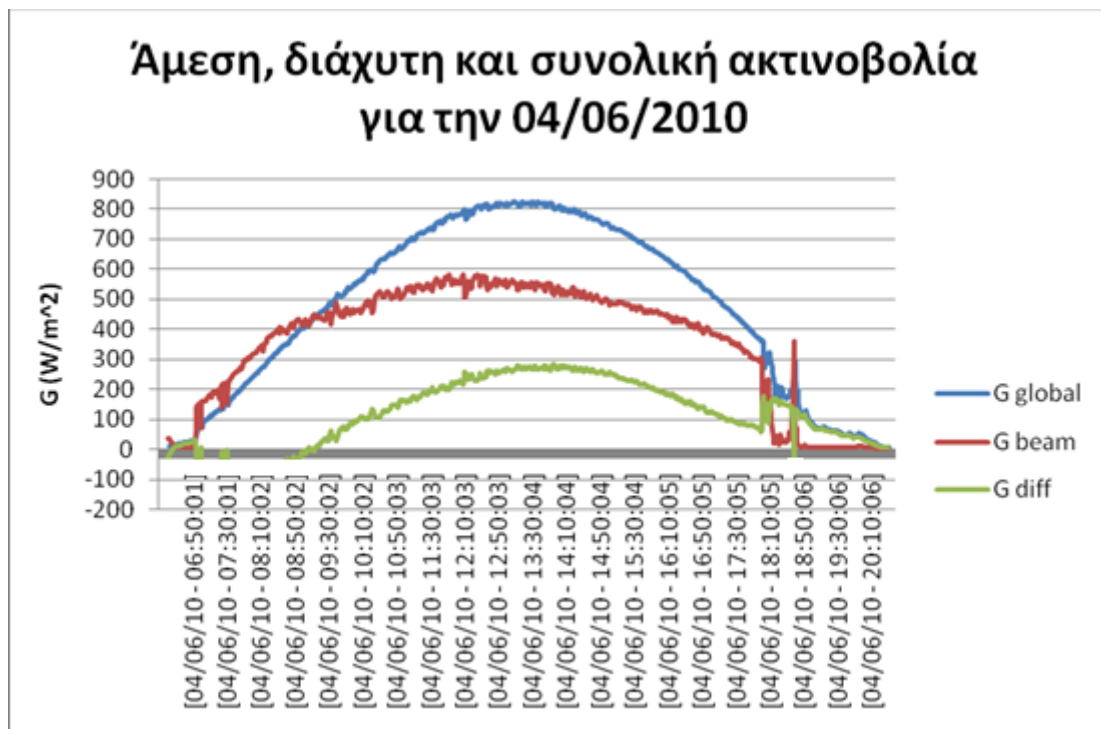
- 12 Απριλίου 2011 – μία τυχαία ηλιόλουστη ημέρα



Σχ. 6.5: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 21/04/2011 με βάση το μοντέλο *Erbs-Klein-Duffie*

Η 12η Απριλίου του 2011 είναι μία καθαρά ηλιόλουστη ημέρα αφού τα διαγράμματα τόσο της συνολικής όσο και της άμεσης ακτινοβολίας εξελίσσονται ομαλά χωρίς ιδιαίτερες διακυμάνσεις. Διακυμάνσεις επίσης δεν εμφανίζονται ούτε στη γραφική παράσταση της διάχυτης ακτινοβολίας, η οποία προκύπτει μόνο από την ανάκλαση σε υδρατμούς της ατμόσφαιρας. Όπως και στη συνεφιασμένη ημέρα τα επίπεδα ακτινοβολίας είναι σχετικά υψηλά λόγω της εποχής, ενώ τα σφάλματα εμφανίζονται πάλι στη διάρκεια των πρώτων δύο ωρών μετά την ανατολή.

- 4 Ιουνίου 2010 - Γενέθλια Ευαγγελίας Κοντοπούλου



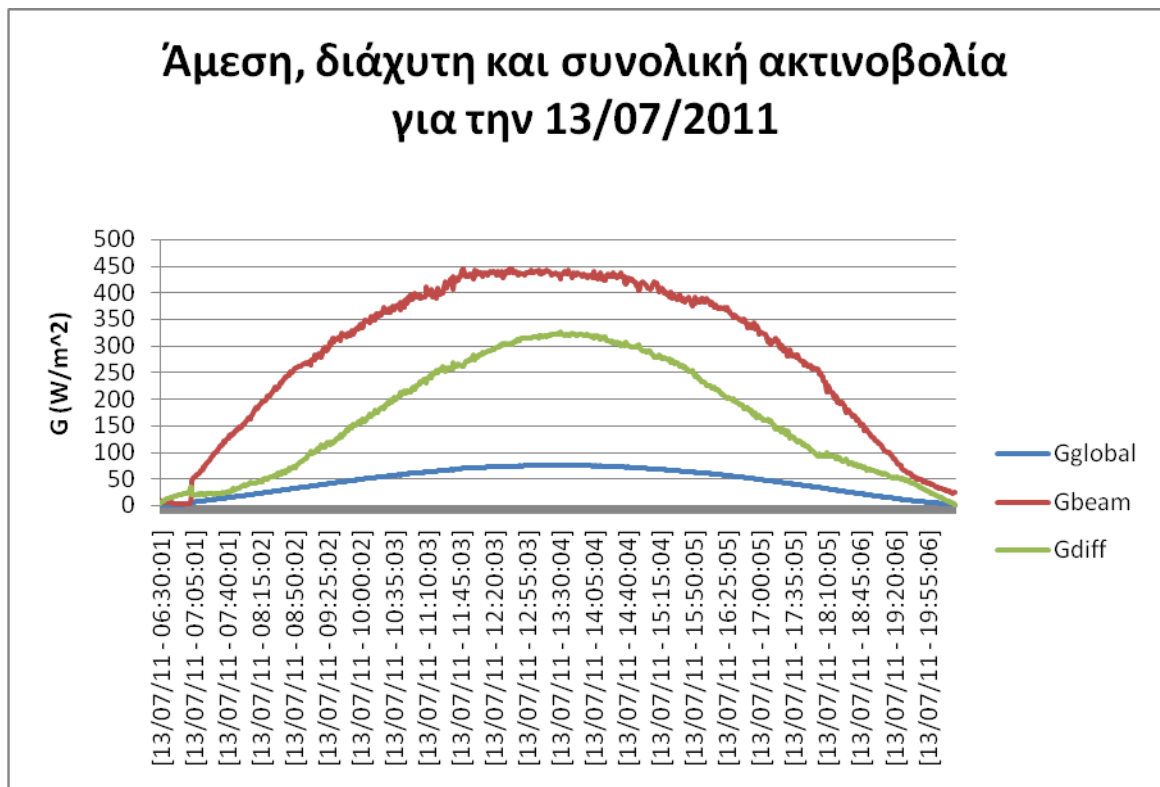
Σχ. 6.6: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 04/06/2010 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

Η 4 Ιουνίου παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με το θερινό ηλιοστάσιο. Πρόκειται για μία ηλιόλουστη μέρα με μικρές διακυμάνσεις κυρίως το απόγευμα λόγω πιθανής συννεφιάς, στην οποία όμως τα επίπεδα ακτινοβολίας είναι ελάχιστα μικρότερα. Η ηλιακή γωνία στη μεγαλύτερη διάρκεια της ημέρας κυμαίνεται ανάμεσα στις αποδοτικές για το μοντέλο τιμές και γι' αυτό υπάρχει αρκετή ακρίβεια.

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα της άμεσης, της διάχυτης και της συνολικής ακτινοβολίας για πέντε διαφορετικές ημερομηνίας. Οι μέρες επιλέχθηκαν έτσι ώστε το μοντέλο να αποδίδει όσο το δυνατόν καλύτερα. Πρόκειται για ηλιόλουστες ημέρες στις οποίες το ύψος ηλίου να βρίσκεται στα επιτρεπόμενα όρια.

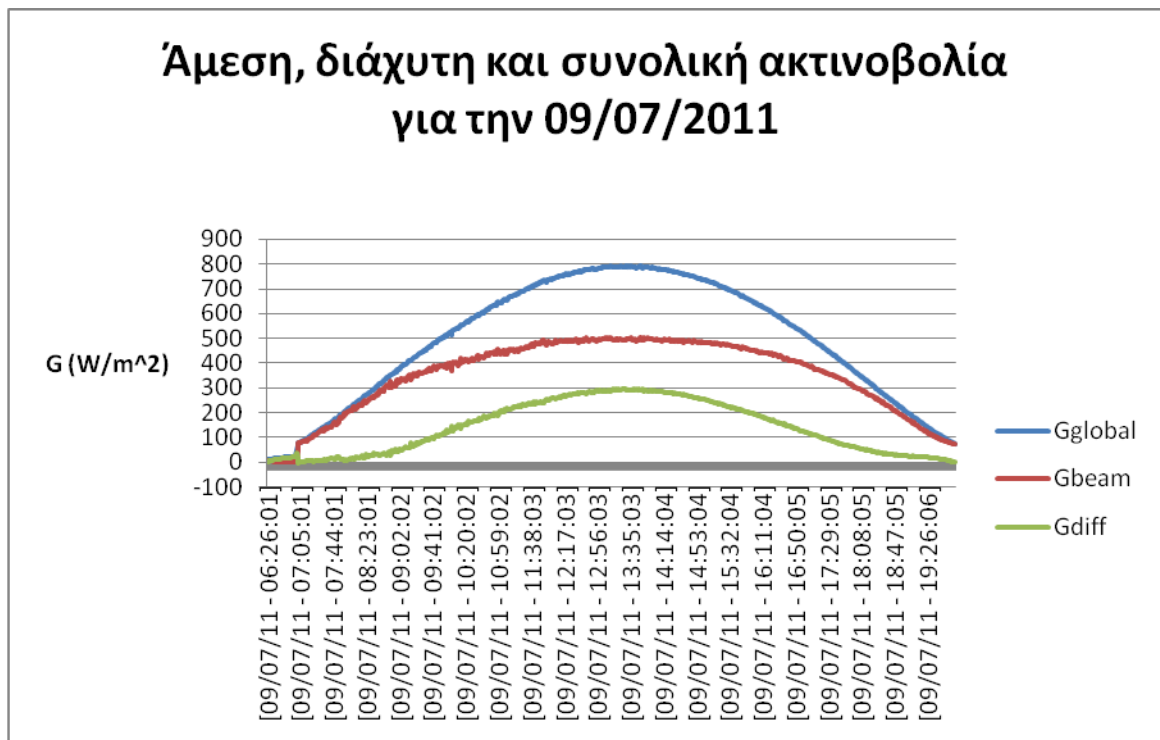


- 13 Ιουλίου 2011 – 1<sup>η</sup> ηλιόλουστη ημέρα



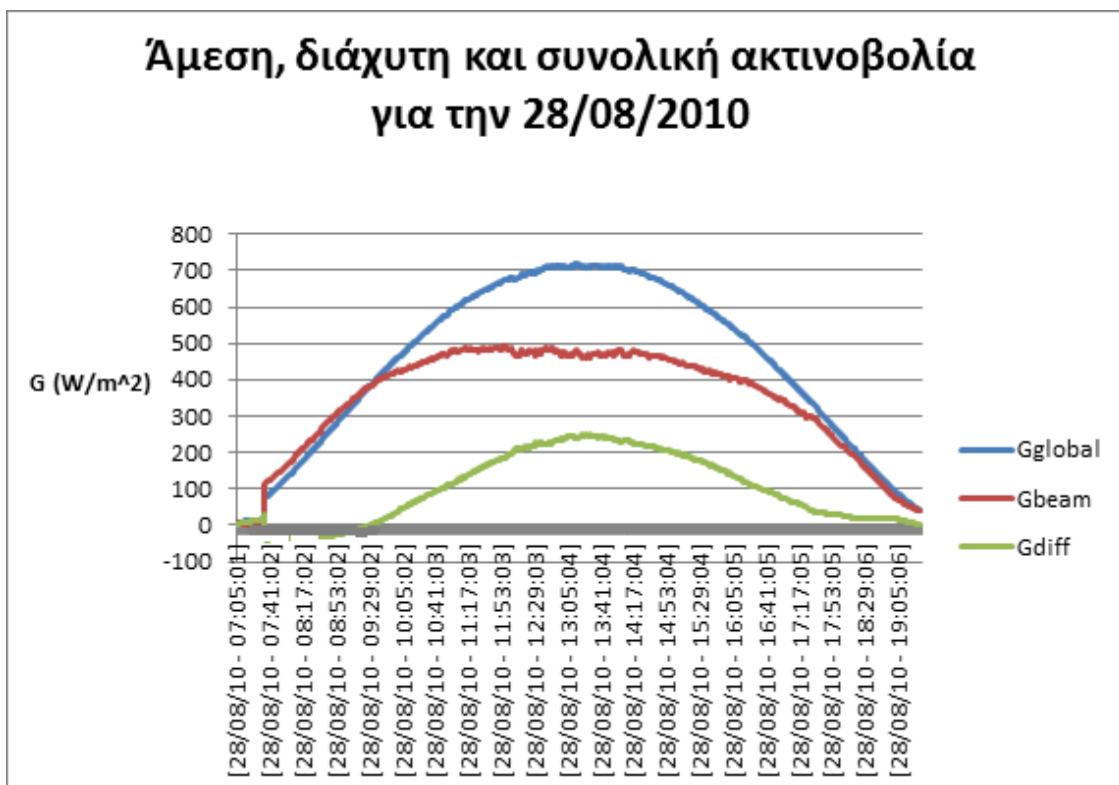
Σχ. 6.7: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 13/07/2011 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

- 9 Ιουλίου 2011 – 2<sup>η</sup> ηλιόλουστη ημέρα



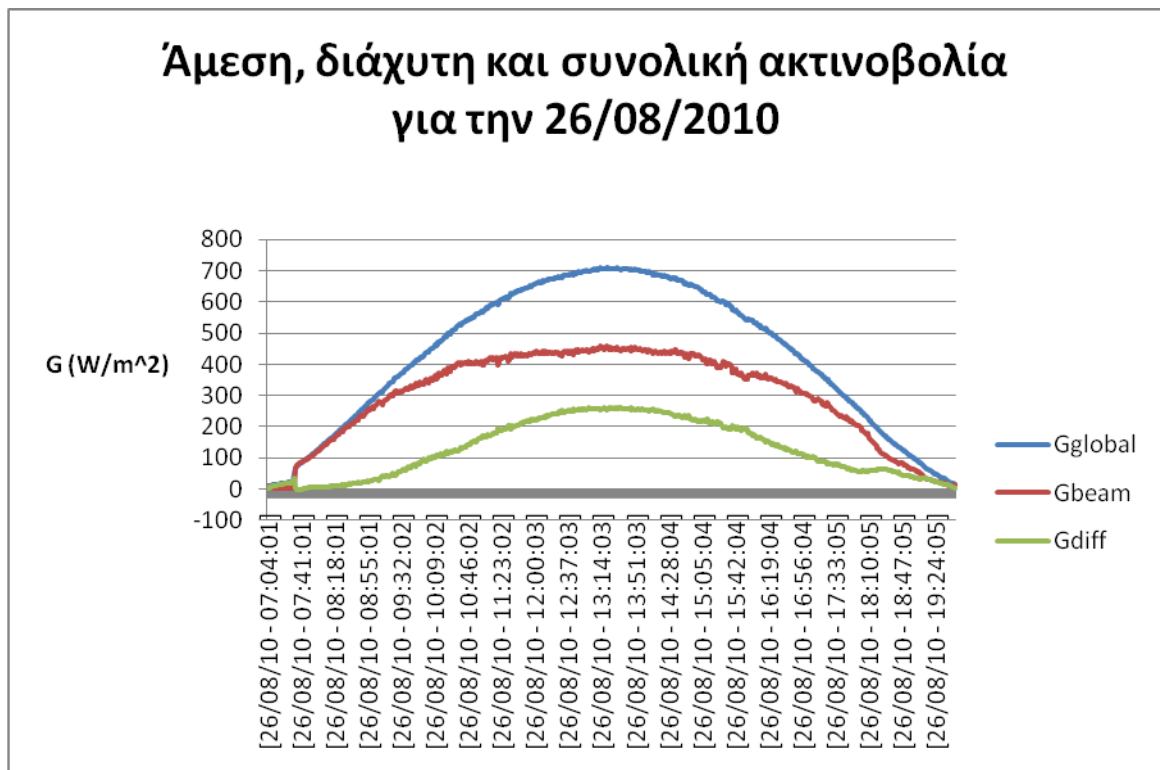
Σχ. 6.8: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 09/07/2011 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

- 28 Αυγούστου 2010 – 3<sup>η</sup> ηλιόλουστη ημέρα



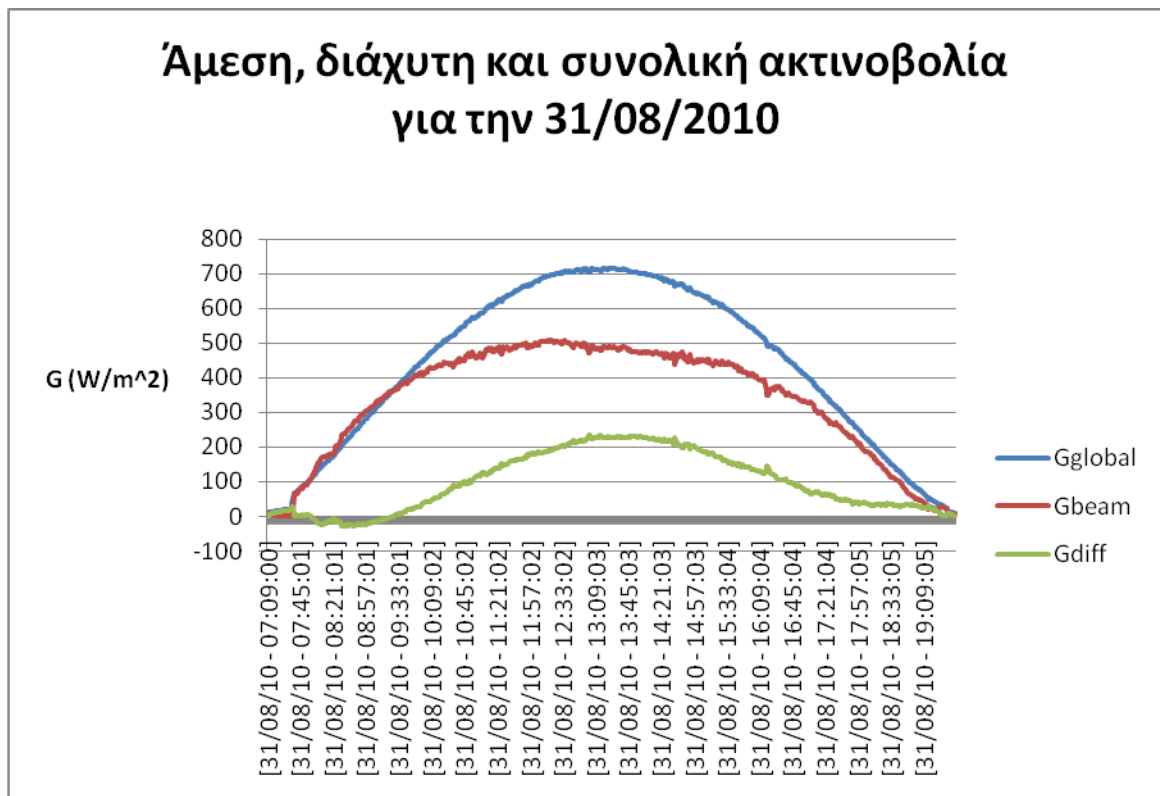
Σχ. 6.9: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 28/08/2010 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

- 26 Αυγούστου 2010 – 4<sup>η</sup> ηλιόλουστη ημέρα



Σχ. 6.10: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 26/08/2010 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

- 31 Αυγούστου 2010 – 5<sup>η</sup> ηλιόλουστη ημέρα



Σχ. 6.11: Γραφική παράσταση συνιστωσών ηλιακής ακτινοβολίας για την 31/08/2010 με βάση το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie

Παρατηρούμε ότι τα παραπάνω διαγράμματα εξελίσσονται αρκετά ομαλά περιγράφοντας με ακρίβεια τα ποσοστά της άμεσης και της διάχυτης συνιστώσας που αποτελούν τη συνολική ακτινοβολία, ενώ παράλληλα δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερα σφάλματα.

Κλείνοντας την ανάλυση αξίζει να αναφερθεί πως η απουσία ηλιακής ακτινοβολίας στα πρώτα λεπτά μετά την ανατολή του ηλίου, η οποία παρατηρείται σε κάθε διάγραμμα, οφείλεται στη θέση του μετρητή ο οποίος βρίσκεται στην ταράτσα του κτιρίου ΣΗΜΜΥ. Η εγκατάσταση βρίσκεται κοντά στους πρόποδες του Υμηττού και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το βουνό να στέκεται εμπόδιο στην άμεση πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σκιάζοντας το μετρητή. Μόλις η ηλιακή γωνία ξεπεράσει τις 9° ο Υμηττός δεν αποτελεί πια εμπόδιο αφού η άμεση ακτινοβολία προσπίπτει στον μετρητή και η τιμή της αυξάνεται κατακόρυφα. Ακόμα αξίζει να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα για το

ύψος ηλίου  $\beta$  υπολογίστηκαν σε περιβάλλον Matlab για το αντίστοιχο βήμα με το οποίο είχαν παρθεί και οι μετρήσεις της συνολικής ακτινοβολίας.

Συνοψίζοντας το μοντέλο παρουσιάζει κάποια σφάλματα κυρίως για τις χειμωνιάτικες ημέρες ενώ η αποδοτικότητά του στις καλοκαιρινές ημέρες είναι ικανοποιητική. Μέσα από αυτό και μία ευρύτερη μελέτη για σημαντικό χρονικό διάστημα μπορεί να αποφασιστεί ο τύπος του συλλέκτη που είναι καταλληλότερο να τοποθετηθεί στη συγκεκριμένη περιοχή.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ

Από την παρούσα διπλωματική εργασία μπορούμε να βγάλουμε πολλά χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων. Επίσης σε αρκετά σημεία της εργασίας υπάρχει περιθώριο για παραπάνω μελέτη και εφαρμογές.

Πιο συγκεκριμένα όσον αφορά τις ηλιακές εξισώσεις χρησιμοποιώντας το μοντέλο που παρουσιάζεται διεξοδικά στο δεύτερο κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκε με λειτουργικό τρόπο το Microsoft Excel για τον ακριβή υπολογισμό των τοπικών ωρών ανατολής, δύσης και ηλιοφάνειας για κάθε περιοχή. Με αυτό το χρήσιμο εργαλείο ο χρήστης μπορεί εισάγοντας απλώς τις συντεταγμένες του τόπου για τον οποίο ενδιαφέρεται καθώς επίσης και την αντίστοιχη διαφορά ώρας μπορεί να εξάγει τα παραπάνω αποτελέσματα με ακρίβεια δευτερολέπτου. Τα αποτελέσματα αυτά είναι εξαιρετικά χρήσιμα για τον υπολογισμό της εκάστοτε θέσης του ηλίου. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε ένας κώδικας σε περιβάλλον Matlab.

Το πρόγραμμα αυτό προσδιορίζει τις ηλιακές συντεταγμένες  $B$ ,  $Z$  χρησιμοποιώντας μόνο τις συντεταγμένες του τόπου για τον οποίο ενδιαφερόμαστε σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας (υπολογισμός ώρας ανατολής και ώρας δύσης). Η απλότητα αυτή των εισόδων κάνει το πρόγραμμα φιλικό προς τον οποιονδήποτε χρήστη, ενώ ταυτόχρονα η εφαρμογή του δεν απαιτεί ιδιαίτερα εξειδικευμένο υπολογιστικό σύστημα. Τέλος στην περίπτωση που ο χρήστης έχει πρόσβαση στις ώρες ανατολής δύσης και ηλιοφάνειας του τόπου για τον οποίο ενδιαφέρεται, έχει τη δυνατότητα να τις εισάγει κατευθείαν στο πρόγραμμα χωρίς να χρειάζεται να τις υπολογίσει.

Στη συνέχεια μέσα από την ανάλυση της έννοιας της αέριας μάζας και την εύρεσή της για διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη γίνεται κατανοητή η εξάρτηση μεταξύ του γεωγραφικού πλάτους κάποιου τόπου στον οποίο σχεδιάζεται να τοποθετηθεί κάποιος μηχανισμός και της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτόν. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε ένα επιπλέον κριτήριο που μπορεί να μας βοηθήσει στο να

αποφανθούμε για το αν μια περιοχή είναι κατάλληλη για τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πινέλων όπως επίσης και για το είδος στήριξης που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί.

Επιπλέον κατά την εφαρμογή του μοντέλου Erbs-Klein-Duffie προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα τόσο για το μοντέλο όσο και για την εφαρμογή του. Από τη μία το μοντέλο παρουσιάζει σφάλματα σε δύο περιπτώσεις: σε ημέρες με έντονα νέφη και σε ώρες όπου το ύψος ηλίου παίρνει κάποιες συγκεκριμένες τιμές. Από την άλλη στις υπόλοιπες περιπτώσεις το μοντέλο αποδίδει καλά και προσδιορίζει σωστά τις συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας. Με τη βοήθειά του και μελετώντας διαχρονικά την ηλιοφάνεια ενός τόπου μπορούμε να αποφανθούμε για το είδος στήριξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων που πρόκειται να τοποθετηθούν.

Άμεση προέκταση των παραπάνω συμπερασμάτων θα μπορούσε να είναι η κατασκευή ενός ηλιακού ιχνηλάτη και η επεξεργασία των αντίστοιχων δεδομένων που θα προέκυπταν. Αυτή η διαδικασία θα μπορούσε να συμπεριλάβει την κατασκευή ενός κινητήρα ο οποίος θα κινούσε το πάνελ, όπως και την τοποθέτησή του.

Πεδίο για επιπλέον μελέτη μπορεί να αποτελέσει η εύρεση του κατάλληλου χρονικού βήματος μετακίνησης ενός μηχανισμού solar tracker. Δηλαδή μπορεί να εκπονηθεί οικονομικοτεχνική μελέτη στην οποία ένας μηχανισμός tracker θα δοκιμαστεί να κινείται ανά διαφορετικά χρονικά διαστήματα και θα υπολογίζεται συγκριτικά το κόστος που προκύπτει από τη χρήση και τη συντήρηση λόγω της μετακίνησης του μηχανισμού σε σχέση με το κέρδος που προκύπτει από την αύξηση της απόδοσης του μηχανισμού. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούσε να βρεθεί η «χρυσή τομή» για το βήμα έτσι ώστε να μεγιστοποιείται το συνολικό κέρδος από την εγκατάσταση. Προφανώς τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής θα αφορούν τις συγκεκριμένες συντεταγμένες του τόπου για τον οποίο εκπονήθηκε.

Τέλος, όσον αφορά το μοντέλο Erbs-Klein-Duffie, ένας τρόπος για να αποφανθούμε για την εγκυρότητά του με ακρίβεια θα περιελάμβανε τη χρήση ενός πυρηλιομέτρου σε συνδιασμό με ένα πυρανόμετρο ή έναν θερμοαισθητήρα. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε πειραματικά τις συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας και στη συνέχεια να τις συγκρίνουμε με τα θεωρητικά αποτελέσματα του μοντέλου έτσι ώστε να προσδιορίσουμε απόλυτα την εγκυρότητά του.



## **Βιβλιογραφία**

- [1] Κ.Θ.Δέρβος " Εισαγωγή στα Ημιαγώγιμα Υλικά και Φωτοβολταϊκές Διατάξεις",  
Αθήνα 2008
- [2] Erbs, D; Klein, S. and Duffie, J.: ‘Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation’
- [3] Holland, P. and Mayer, I.: ‘On calculating the position of the Sun’
- [4] Liu, B. and Jordan, R.: ‘The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation’
- [5] Perez, R.; Seals, R.; Zelenka, A. and Ineichen, P.: ‘ Climatic Evaluation of Models that predict Hourly Global Irradiance: Prospects for Performance Improvements’
- [6] <http://el.wikipedia.org>
- [7] <http://eml.ece.ntua.gr>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πρόγραμμα υπολογισμού των συντεταγμένων β-Z του Ηλίου σε περιβάλλον Matlab

```
function [ GB, GZ ] = diplwmatikh( anat, dush, a, f, lst, dt, p1 )

GB=[];

GZ=[];

for i=(1:length(anat))

    hour=anat(i);

    kb=1;

    kz=1;

    while hour<dush(i)

        b=asind(sind(23.45*sind((360/365)*(i+284)))*sind(f)+cosd(23.45*sind((360/365)*(
i+284)))*cosd(f)*cosd(15*(hour+(1/60)*(9.87*sind((720/365)*(i-81))-
7.53*cosd((360/365)*(i-81))-1.5*sind((360/365)*(i-81))+4*(lst-a)-12)));

        z=-acosd((sind(b)*sind(f)-
sind(23.45*sind((360/365)*(i+284)))/(cosd(b)*cosd(f)));

        GB(i,kb)=b;

        if kz>1

            if GZ(i
```

```
,kz-1)>z
    GZ(i,kz)=-z;
else
    GZ(i,kz)=z;
end
else GZ(i,kz)=z;
end
hour=hour+dt;
kb=kb+1;
kz=kz+1;
end
switch i
    case p1
        figure(1)
        plot(GZ(p1,:),GB(p1,:),'b')
    end
end
end
```

