

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ  
Τ. Ε. Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ**

**ΣΧΟΛΗ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

*Επιβλέπων: ΠΕΤΡΟΣ Γ. ΒΕΡΝΑΔΟΣ, Καθηγητής*

*Συνεπιβλέπουσα: ΕΡΙΕΤΤΑ Ι. ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΔΟΥ, Εργ. Συνεργάτης*

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΕΠΙΣΚΙΑΣΗΣ ΣΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ  
ΠΑΡΚΑ**

**CALCULATIONS OF SHADING FACTORS IN SOLAR PARKS**

**Πτυχιακή Εργασία:  
Δημητρίου Δερβίση (Α.Μ. 37459)  
Κωνσταντίνου Τζίμα (Α.Μ. 36901)**

**ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΪΟΣ 2013**

Copyright © Δημήτριος Ν. Δερβίσης, Τζίμας Κωνσταντίνος 2013

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 τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Τ.Ε.Ι. Πείραια.

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι η μελέτη των παραγόντων επισκίασης στα φωτοβολταϊκά πάρκα και ο υπολογισμός τους.

Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία, όπου παρουσιάζονται οι τομείς που βρίσκει εφαρμογή καθώς και η ιστορική εξέλιξή της .

Στο πρώτο κεφάλαιο θα γίνει η περιγραφή και η ανάλυση των στοιχείων που απαρτίζουν ένα διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα καθώς επίσης και τα στοιχεία που αποτελείται ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο θα αναλυθεί λεπτομερώς η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη γη, οι εξισώσεις που προσδιορίζουν την ενέργεια αυτή, αλλά και η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μορφή έντασης και ολικής ενέργειας στην Ελλάδα.

Στο τρίτο κεφάλαιο θα γίνει λεπτομερής ανάλυση των παραμέτρων προσδιορισμού της Ηλιακής Ακτινοβολίας. Επίσης θα αναλυθεί πως γίνεται τοπογραφική διάταξη ενός διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος αλλά και με ποιο τρόπο πρέπει να είναι προσανατολισμένος ο συλλέκτης. Παράγοντες δηλαδή που επηρεάζουν την επισκίαση σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν λεπτομερείς τρόποι υπολογισμού παραγόντων επισκίασης χρησιμοποιώντας το απαιτούμενο τυπολόγιο. Επικεντρώνεται κυρίως στις γωνίες που επηρεάζουν ένα φωτοβολταϊκό σώμα και την απόδοσή τους.

# ABSTRACT

The purpose of this work is the study of factors also in photovoltaic parks and the calculation.

Initially made an introduction in photovoltaic technology, where presented the sectors find application and the historic development .

In the first chapter becomes the description and analysis of elements forming an interconnected photovoltaic system as well as the information consists an autonomous photovoltaic system.

In the second chapter analyzed in detail the solar radiation which goes to land, the equations used to determine the energy, but also the impact of solar radiation in the form and total energy intensity in Greece.

In the third chapter contains a detailed analysis of parameters determining the solar radiation, also explained that becomes a topographical provision interconnected PV system but with how we should be oriented the collector. Factors which affect the overshadowing of a photovoltaic system.

In the fourth chapter presented detailed methods of calculation factors also using the required in the fourth chapter presented detailed methods of calculation factors also using the required solutions

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με το ζήτημα των παραγόντων επισκίασης στα φωτοβολταϊκά πάρκα και τον υπολογισμό τους. Είναι αποτέλεσμα εκτεταμένης βιβλιογραφικής έρευνας σε θέματα όπως ηλιακή ενέργεια, η ηλιακή ακτινοβολία και οι γεωμετρικές παράμετροί της, οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, τα ηλιακά θερμικά συστήματα κ.α. . Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας στην κ. Ερίεττα Ι. Ζουντουρίδου , εργαστηριακή συνεργάτη Τ.Ε.Ι. Πειραιά για τη βοήθεια, τις υποδείξεις, τις διορθώσεις και την καθοδήγησή της, καθώς επίσης και τα άτομα που μας βοήθησαν και στήριξαν για την διεκπεραίωση της εργασίας.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	σελ 4
2	<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	σελ 6
3	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	σελ 9
4	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΑΡΚΑ – ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ</b> .....	σελ12
	1.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	σελ13
	1.2 ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	σελ17
	1.2.1 ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΡΗ ΕΝΟΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	
	σελ 17	
	1.3 ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	σελ 18
5	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ</b>	σελ 19
	2.1 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΚΑΙ Η ΕΝΤΑΣΗ ΤΗΣ	σελ 19
	2.2 ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΛΑΒΗ ΑΠΟ ΤΟΝ ΗΛΙΟ	σελ 27
	2.3 ΗΛΙΟΦΑΝΕΙΑ	σελ 29
	2.4 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΤΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ	σελ 30
	2.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ	σελ 30
	2.6 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ	σελ 34
	2.7 ΤΙΜΕΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	σελ 37
	2.7.1 ΕΝΑΛΛΑΓΗ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΚΛΙΣΕΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΝΟΣ ΕΤΟΥΣ	σελ 39

6	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup></b> ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	σελ 41
	3.1 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΠΑΡΚΟΥ	σελ 48
	3.2 ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ	σελ 55
7	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup></b> ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	σελ 58
8	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	σελ 68
9	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	σελ 70

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι τελευταίες εξελίξεις στο περιβάλλον, καθιστούν το μέλλον του πλανήτη αβέβαιο. Πιο πολύ από ποτέ ο άνθρωπος έχει αρχίσει να συνειδητοποιεί ότι οι παρεμβάσεις στο περιβάλλον δεν μπορούν να συνεχίσουν να είναι ανεξέλεγκτες. Από τα μεγαλύτερα προβλήματα που καλείται να αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα σήμερα είναι η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας. Οι συμβατικές ενεργειακές τεχνολογίες αναγνωρίζονται ευρέως ως το κύριο αίτιο της καταστροφής του περιβάλλοντος, από την άποψη τόσο της εξάντλησης των φυσικών πόρων όσο και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Υπάρχουν ολοένα και ισχυρότερες ενδείξεις ότι η κλιματική αλλαγή οφείλεται στις εκπομπές του αερίου του θερμοκηπίου, οι οποίες προέρχονται σε μεγάλο βαθμό από τον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και από τις μεταφορές. Είναι επομένως επιτακτική ανάγκη, η στροφή σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας και κυρίως στις ανανεώσιμες, οι οποίες και εντελώς φιλικές προς το περιβάλλον είναι και ανεξάντλητες. Αντίθετα το πετρέλαιο και τα ορυκτά καύσιμα, αν και βραχυπρόθεσμα υπάρχουν ακόμα αρκετά αποθέματα, σε βάθος χρόνου ίσως και ενός αιώνα θα εξαντληθούν, ενώ η πλήρης εξάρτηση από αυτά δημιουργεί σοβαρά οικονομικά προβλήματα σε κάθε αύξηση των τιμών τους.[9]

Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία εμφανίζει μια ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια διεθνώς. Ταυτόχρονα γίνεται μεγάλη προσπάθεια στον τομέα της έρευνας, με σκοπό την εξεύρεση νέων υλικών, αλλά και λιγότερο ενεργοβόρων διαδικασιών παραγωγής φωτοβολταϊκών στοιχείων, γεγονότα που από την μια θα αυξήσουν την απόδοση και από την άλλη θα μειώσουν το κόστος παραγωγής. Οι δύο τελευταίες παράμετροι αποτελούν και τα κύρια μειονεκτήματα της φ/β τεχνολογίας, τα οποία εμποδίζουν την περαιτέρω ανάπτυξή της. Πρέπει όμως να τονιστεί ότι παρόλο που η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω φ/β στοιχείων τα τελευταία χρόνια είναι πολλαπλάσια αν συγκριθεί με την κατάσταση προ μερικών δεκαετιών, εντούτοις παραμένει σε πολύ χαμηλά ποσοστά, όσον αφορά τη συνεισφορά στην συνολική πρωτογενή παραγωγή.



Στην παρούσα πτυχιακή εξετάζονται οι παράγοντες επισκίασης στα φωτοβολταϊκά πάρκα και ο υπολογισμός τους. Η ηλιακή ακτινοβολία έχει ορισμένα χαρακτηριστικά τα οποία επηρεάζουν τις μεταβολές που προκαλεί στα διάφορα υλικά. Συγκεκριμένα στην Ελλάδα ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας είναι ιδανικό για την εκμετάλλευση της φ/β τεχνολογίας, μέχρι και το τέλος του 20ου αιώνα, η συνεισφορά της ηλιακής ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ήταν ουσιαστικά ανύπαρκτη. Περιοριζόταν κυρίως σε αυτόνομα φ/β συστήματα για απομακρυσμένες από το κεντρικό δίκτυο περιοχές, ενώ και σε αυτή τη περίπτωση ο αριθμός και το μέγεθος ήταν πολύ περιορισμένα.

Όμως τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια πολύ μεγάλη αλλαγή. Ο κλάδος της φ/β τεχνολογίας γνωρίζει μια έκρηξη επενδυτικού ενδιαφέροντος, απόρροια της αλλαγής της πολιτείας ως προς την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών γενικότερα και της φ/β τεχνολογίας πιο συγκεκριμένα. Οι γενναίες επιδοτήσεις σε συνδυασμό με την αυξημένη τιμή αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από φ/β συστήματα είχαν ως αποτέλεσμα αυξημένο επενδυτικό ενδιαφέρον, καθώς η φ/β τεχνολογία κατέστη όχι μόνο βιώσιμη, αλλά και κερδοφόρα επένδυση με ελάχιστο ρίσκο.[9]

Το αποτέλεσμα ήταν μια χωρίς προηγούμενο εκτίναξη του αριθμού των αιτήσεων για την χορήγηση άδειας κατασκευής φ/β πάρκων. Ο στόχος των 700MW που είχε τεθεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φ/β συστήματα, καλύφθηκε πολύ γρήγορα (τέλος του 2007). Όπως είναι φανερό, σε μια χώρα όπου η περιβαλλοντική συνείδηση των πολιτών και των επιχειρήσεων δεν είναι πολύ μεγάλη, ο κρατικός παρεμβατισμός μοιάζει ίσως ο μοναδικός τρόπος για την εκδήλωση επενδυτικού ενδιαφέροντος στη συγκεκριμένη τεχνολογία. Όμως τα πράγματα μπορούν να αλλάξουν σημαντικά, όχι μόνο με την αλλαγή της κοινής γνώμης πάνω σε περιβαλλοντικά ζητήματα, αλλά και από την εξέλιξη της τεχνολογίας, η οποία 19 μοιάζει ικανή στο άμεσο μέλλον να κάνει τα φ/β μια βιώσιμη και εφικτή λύση στο παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>0</sup>

### ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΑΡΚΑ – ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Τα διασυνδεδεμένα συστήματα ή φωτοβολταϊκά πάρκα έχουν ως βασικό χαρακτηριστικό το γεγονός ότι υπάρχει φυσική ένωση με το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για την Ελλάδα με την ΔΕΗ. Η σχέση μιας εγκατεστημένης μονάδας με το δημόσιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι αμφίδρομη. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να απορροφά ενέργεια αλλά και να διαχέει ενέργεια προς το δίκτυο. Ποιο συγκεκριμένα οι πιθανές περιπτώσεις που μπορεί να συναντήσουμε ένα διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα είναι οι παρακάτω:

A) Όταν μια εγκατάσταση έχει ως αποκλειστικό στόχο την έγχυση ενέργειας προς το δίκτυο. Σε αυτές τις περιπτώσεις στόχος είναι η μέγιστη ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η πώληση της σε κάποιον προμηθευτή (καταναλωτή). Τέτοιου είδους μονάδες ονομάζονται και Φ/Β σταθμοί, Φωτοβολταϊκά πάρκα κλπ. Η ισχύς σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να είναι από μερικά KW έως και αρκετά MW. Στην Ελλάδα η συνηθέστερη επένδυση σε αυτά τα επίπεδα είναι αυτή των 100KW γιατί συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της υψηλής επιδότησης της KWh και της ευκολότερης αδειοδότησης του Φ/Β σταθμού. [4]

B) Όταν μια εγκατάσταση χρησιμοποιεί το δίκτυο ως εναλλακτική πηγή τροφοδότησης ηλεκτρικής ενέργειας σε περίπτωση που η παραγωγή του τοπικού Φ/Β σταθμού δεν επαρκεί κάποιες ώρες της ημέρας (ή γενικότερα δεν επαρκεί) για να τροφοδοτήσει την ενεργειακές ανάγκες της εγκατάστασης.

Στις ποιο πάνω περιπτώσεις η εγκατάσταση μπορεί να απορροφά ενέργεια από το δίκτυο για να συμπληρώσει τις ενεργειακές τις ανάγκες. Επίσης μπορεί να συμβαίνει και το αντίστροφο. Δηλαδή όταν η ενέργεια που παράγεται από την

μονάδα είναι περισσότερη από αυτήν που καταναλώνεται, η περίσσεια της ενέργειας μπορεί να διοχετεύεται (πωλείται) στο δίκτυο. Ένα τέτοιο σύστημα θα πρέπει να διαθέτει δύο μετρητικά συστήματα, το ένα από τα οποία θα μετρά την εξερχόμενη ενέργεια και το άλλο την εισερχόμενη. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται και grid interactive. Χρήση του ηλεκτρικού δικτύου ως BACK-UP .

*Γ) Όταν μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχει ως αποκλειστικό στόχο την απορρόφηση ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο γιατί η ποσότητα ενέργειας που παράγει εξ ορισμού δεν καλύπτει τις ενεργειακές τις ανάγκες.*

Αυτά τα συστήματα ονομάζονται και grid back up. Ουσιαστικά σε αυτήν την περίπτωση ο σχεδιασμός του συστήματος γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται ότι το σύνολο της ενέργειας που παράγεται θα απορροφάται από τις ηλεκτρικές καταναλώσεις της εγκατάστασης.

## **1.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

### **Κατηγοριοποίηση διασυνδεδεμένων συστημάτων με κριτήριο τα συστήματα στήριξης**

- Στήριξη με σταθερό σύστημα στο έδαφος.
- Στήριξη με σταθερό σύστημα σε επικλινή στέγη.
- Στήριξη με σταθερό σύστημα σε επίπεδη οροφή κτιρίου.
- Στήριξη με σύστημα ηλιοστατών στο έδαφος (πολύ σπάνια σε οροφές αν επαρκούν τα κριτήρια στατικότητας)

## **Πλεονεκτήματα σταθερών συστημάτων**

Γενικά τα σταθερά συστήματα πλεονεκτούν σε σχέση με τα tracker στην απλότητα της κατασκευής, στο κόστος εγκατάστασης, στην ταχύτητα εγκατάστασης, στο κόστος συντήρησης, στην μεγαλύτερη ανεξάρτηση του επενδυτή από τον κατασκευαστή και σε θέματα αξιοπιστίας (reliability, availability).

## **Φωτοβολταϊκά πάρκα με ηλιοστάτες (solar tracker)**

Στα φωτοβολταϊκά πάρκα πολλές φορές συνηθίζεται η χρήση συστημάτων παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται ηλιοστάτες ή trackers. Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι η άμεση ακτινοβολία (direct irradiation) προσπίπτει στα πάνελ κάθετα με αποτέλεσμα την αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν τρία βασικά είδη τέτοιων συστημάτων. [4]

- Παρακολούθηση της τροχιάς στον κάθετο άξονα (vertical one axis tracker)  
=>(Μικρή αύξηση απόδοσης)
- Παρακολούθηση της τροχιάς στον οριζόντιο άξονα (horizontal one axis tracker)=>(Μεσαία αύξηση απόδοσης)
- Παρακολούθηση της τροχιάς και στους δύο άξονες (dual axis tracker)  
=>(Μέγιστη αύξηση απόδοσης)

Επίσης ανάλογα με την μέθοδο που δίνει κίνηση στους άξονες τα συστήματος διακρίνονται σε:

- Υδραυλικά συστήματα κίνησης
- Ηλεκτρικά συστήματα κίνησης

### **Πλεονεκτήματα κινητών συστημάτων (ηλιοστατών)**

Τα tracker πλεονεκτούν συνολικά στην απόδοση της επένδυσης του φωτοβολταϊκού συστήματος και αποδίδουν μεγαλύτερα οικονομικά οφέλη (όταν όμως ισχύουν και αρκετοί άλλοι παράμετροι) Υπάρχει ένα αυξημένο κόστος γενικότερα στην κατασκευή και την εγκατάσταση αλλά οι ηλιοστάτες 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 επένδυση τους. Η αύξηση αυτή μπορεί ξεκινάει από 10% (για συστήματα μονού άξονα) 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 tracker πάντως συστήνεται μόνο σε περιοχές που έχουν υψηλό ποσοστό άμεσης ακτινοβολίας (όπως στην Ελλάδα). Για αυτόν ακριβώς τον λόγο μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι στην Ισπανία και την Γερμανία (οι 2 περισσότερο ώριμες αγορές του κόσμου) όπου έχουν τοποθετηθεί πολλά φωτοβολταϊκά πάρκα χρησιμοποιούνται διαφορετικές πρακτικές όσον αφορά τα συστήματα στήριξης. Στην μεν συννεφιασμένη Γερμανία τα συντριπτικά περισσότερα εγκατεστημένα συστήματα είναι σταθερά, ενώ στην Ισπανία τα trackers έχουν κατακτήσει ένα πολύ σημαντικό μερίδιο της αγοράς. Συμπερασματικά υπάρχουν αρκετοί παράμετροι που θα πρέπει κανείς να σταθμίσει για να προχωρήσει στην επιλογή ενός σταθερού συστήματος στήριξης σε σχέση με ένα σταθερό. [4]

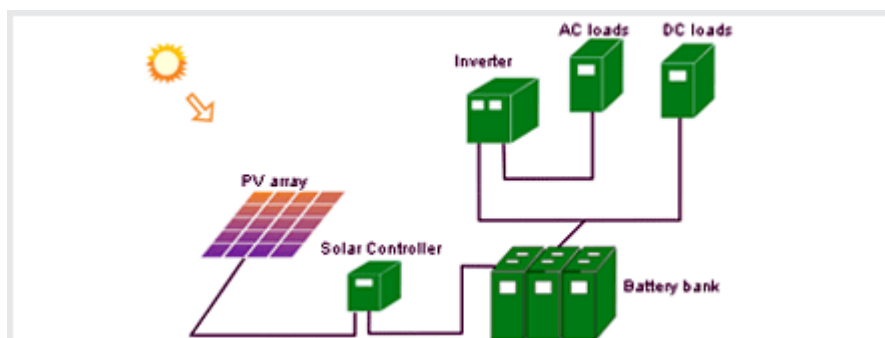
### **Μειονεκτήματα κινητών συστημάτων (ηλιοστατών)**

Στα μειονεκτήματα των κινητών συστημάτων μπορούν να αναφερθούν:

- Το αυξημένο κόστος της επένδυσης.
- Η ύπαρξη κινητών μερών η οποία και αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος.
- Η ανάγκη για αυτοκατανάλωση κάποιας ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας για την περιστροφή (κίνηση) των συστημάτων.
- Το αυξημένο κόστος συντήρησης.
- Η μεγαλύτερη ανάγκη για απομακρυσμένο (τηλεπικοινωνιακά) έλεγχο του συστήματος μιας και η πιθανότητα αστοχίας είναι μεγαλύτερη.
- Μεγαλύτερος κίνδυνος καταστροφής σε περίπτωση ακραίων καιρικών φαινομένων.

### **1.2 ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ**

Σε ένα απομακρυσμένο από το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο σύστημα οι ενεργειακές ανάγκες μιας εγκατάστασης μπορούν να τροφοδοτούνται από ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα. Παρόλα αυτά θα μπορούσαμε να διακρίνουμε και μια ακόμη κατηγορία τα υβριδικά συστήματα στα οποία συνεισφέρουν ενέργεια, τα φωτοβολταϊκά και άλλες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας όπως η αιολική ή κάποια γεννήτρια πετρελαίου. [8]



Ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα είναι μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποκλειστικά από φωτοβολταϊκές γεννήτριες. Παραπέρα τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αυτά που έχουν κάποια αποθηκευτική διάταξη ενέργειας (συνήθως μπαταρίες) και σε αυτά που είναι άμεσα συνδεδεμένα μόνο με τα φορτία που τροφοδοτούν χωρίς αποθηκευτική διάταξη (παράδειγμα: εξοχικό σπίτι με μια μικρή dc αντλία νερού συνδεδεμένη απ' ευθείας με ένα φωτοβολταϊκό πάνελ).

### 1.2.1 Τα βασικά μέρη ενός αυτόνομου συστήματος :

- Τα φωτοβολταϊκά πάνελ
- Οι συσσωρευτές
- Ο ρυθμιστής φόρτισης
- ο αντίστροφες dc/ ac (για τις καταναλώσεις των 230Volt)
- οι ασφάλειες, διακόπτες όργανα μέτρησης χωρητικότητας συσσωρευτών

Το κύκλωμα dc συνήθως έχει τάση λειτουργίας 12,24 ή 48 volt.

### 1.3 ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Συνήθως ένα τέτοιο σύστημα επιβάλλεται από το κόστος. Τα φωτοβολταϊκά μπορούν να τροφοδοτήσουν οποιαδήποτε εγκατάσταση αλλά το κόστος μπορεί να είναι μεγάλο. Για τον λόγο αυτό τα φωτοβολταϊκά μπορούν να συνδυαστούν και με άλλες πηγές ενέργειας. [4]

Για παράδειγμα υπάρχουν περιοχές με καλό αιολικό δυναμικό και μάλιστα συνήθως όταν υπάρχει συννεφιά ο αέρας είναι ισχυρότερος. Έτσι μπορεί μια ανεμογεννήτρια και μια φωτοβολταϊκή συστοιχία να αλληλοσυμπληρώνονται σε μια εγκατάσταση.

Σε αυτήν την περίπτωση οι δύο πηγές ενέργειας τροφοδοτούν τις συστοιχίες των συσσωρευτών μέσω ρυθμιστών φόρτισης και από εκεί η ενέργεια διοχετεύεται στις καταναλώσεις της εγκατάστασης.

Γενικότερα οι τεχνολογίες που μπορεί να συμμετέχουν σε μια υβριδική εγκατάσταση είναι συνήθως οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες, οι ανεμογεννήτριες, και οι πετρελαιοκινητήρες H/Z. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι ενεργειακές πηγές μπαίνουν παράλληλα στο τοπικό δίκτυο με σκοπό την αδιάκοπη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Η επιλογή ενός τέτοιου συστήματος προέρχεται από έναν συγκερασμό μετεωρολογικών και οικονομοτεχνικών δεδομένων. [8]



## 2.7 ΤΙΜΕΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια τοποθετημένη στην αρχή της ατμόσφαιρας της γης κάθετα στις ακτίνες θα είναι γύρω στα  $1350 \text{ W/m}^2$ . Με την ύπαρξη όμως της ατμόσφαιρας υπάρχει απορρόφηση και ανάκλαση και έτσι η ακτινοβολία μέχρι να φτάσει στην επιφάνεια της γης διαμέσου της ατμόσφαιρας έχει ένταση γύρω στα  $1000 \text{ W/m}^2$  σε επιφάνεια κάθετη στην ακτινοβολία. Επειδή μάλιστα η ακτινοβολία διανύει μεγαλύτερο διάστημα στην ατμόσφαιρα για να φτάσει στην επιφάνεια της γης τις πρωινές και τις απογευματινές ώρες, παθαίνει περισσότερη απορρόφηση και έτσι η τιμή της έντασης είναι μικρότερη των  $1000 \text{ W/m}^2$  κατά τις ώρες αυτές.

Σε περίπτωση που η ακτινοβολία δεν προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια, τότε η ένταση στην επιφάνεια είναι μικρότερη διότι οι ακτίνες πέφτουν πλάγια. Επειδή η ίδια ισχύς  $P$  προσπίπτει και στις δύο επιφάνειες  $S_K$  και  $S_{\Pi}$  τότε .

$$B_{\Pi} = \frac{P}{S_{\Pi}} \quad \text{και} \quad B_K = \frac{P}{S_K}$$

και επειδή

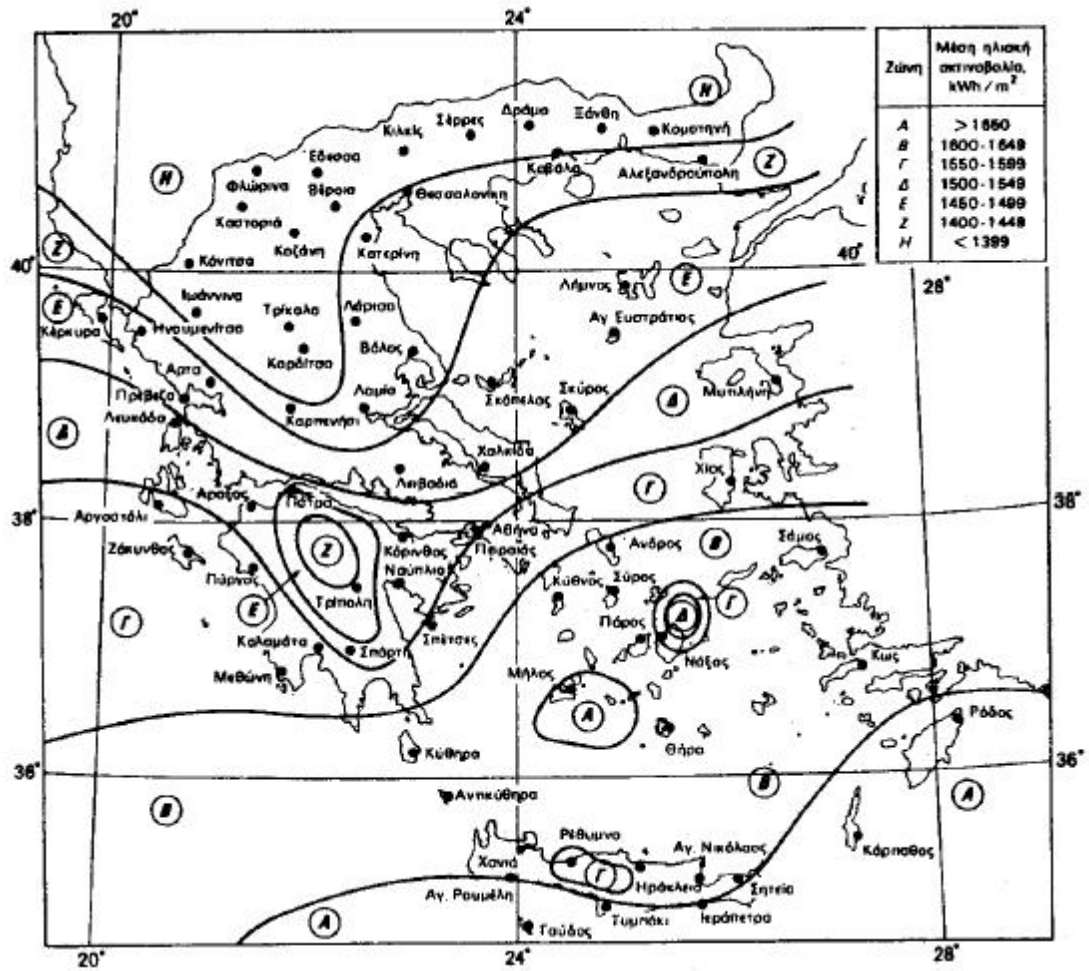
$$S_K = S_{\Pi} \sin \varphi$$

θα έχουμε τελικά

$$B_K = \frac{B_{\Pi}}{\sin \varphi}$$

Για να βρούμε δηλαδή την ένταση στην κάθετη επιφάνεια διαιρούμε την τιμή της στη πλάγια επιφάνεια με το συνημίτονο της γωνίας που σχηματίζεται μεταξύ των δύο επιφανειών.

Η τοποθεσία ενός φωτοβολταϊκού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζει την παραγόμενη ισχύ, λόγω των καιρικών φαινομένων της συγκεκριμένης περιοχής και της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται. Το ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας θεωρείται από τα υψηλότερα της Ευρώπης, κάνοντας τα Φ/Β ελκυστικά για αξιοποίηση. Όμως δεν μπορούν να εξαχθούν ανάλογα συμπεράσματα για όλες τις περιοχές τις χώρας, καθώς κάποια σημεία δέχονται υψηλά ποσά ηλιακής ακτινοβολίας (π.χ. νησιά νοτιοανατολικού Αιγαίου), ενώ άλλα πολύ χαμηλότερα (π.χ. βόρεια Ελλάδα). Για αυτό το λόγο ακολουθεί η παρακάτω ανάλυση, που σκοπό έχει να δείξει τις περιοχές μεγάλου ηλιακού δυναμικού, αλλά και την εύρεση της βέλτιστης κλίσης ανά τοποθεσία. Ο Ελλαδικός χώρος μπορεί να χωριστεί σε 7 ζώνες ανάλογα με το ποσό της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται (Σχήμα 2.3). Από τον παρακάτω χάρτη είναι εμφανή τα σημεία που έχουν υψηλές τιμές ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας και είναι τα νησιά του νότιου, νοτιοανατολικού Αιγαίου και η Κρήτη. Αν συγκρίνουμε την ετήσια ηλιακή ακτινοβολία στις περιοχές με υψηλό δυναμικό με αυτές που έχουν το χαμηλότερο, τότε οι πρώτες εμφανίζονται να έχουν ετήσια ηλιακή ακτινοβολία κατά 25% περίπου υψηλότερο.



Σχήμα 2.3

Κατανομή της μέσης συνολικής ετήσιας έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, σε οριζόντιο επίπεδο, στις διάφορες περιοχές της Ελλάδας.

### 2.7.1 ΕΝΑΛΛΑΓΗ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΚΛΙΣΕΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΝΟΣ ΕΤΟΥΣ

Η επιλογή δύο κλίσεων στη διάρκεια ενός έτους γίνεται με σκοπό τη βελτίωση της ηλιακής ακτινοβολίας. Στηρίζεται στο γεγονός ότι το καλοκαίρι ευνουούνται μικρές τιμές της κλίσης (συνήθως 10o-25o), ενώ το χειμώνα μεγαλύτερες τιμές (45o-60o). Επομένως η κλίση των συστοιχιών θα αλλάζει μεταξύ δύο θέσεων κάθε 6 μήνες. Ως καλοκαιρινούς μήνες θεωρούμε τους 6 μήνες με τις μεγαλύτερες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας και ως χειμερινούς τους 6 με τις μικρότερες. Επομένως καλοκαιρινοί μήνες θεωρούνται οι μήνες από τον Απρίλιο μέχρι το Σεπτέμβριο, ενώ χειμερινοί από το Οκτώβριο μέχρι το Μάρτιο. Στους πίνακες υπολογίζεται η συνολική ηλιακή ακτινοβολία για τους καλοκαιρινούς και τους χειμερινούς μήνες, σε σχέση με την κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο έτσι ώστε να βρεθεί η βέλτιστη τιμή της κλίσης για τις δύο περιόδους του χρόνου. Παρατηρούμε ότι η βέλτιστη κλίση για τους καλοκαιρινούς μήνες είναι 11o και η ηλιακή ακτινοβολία που προκύπτει 1113,32kWh/m<sup>2</sup>, ενώ για χειμερινούς είναι 52° και 708,79kWh/m<sup>2</sup> τα αντίστοιχα μεγέθη. Επομένως η συνολική ετήσια ακτινοβολία που προκύπτει με την εναλλαγή μεταξύ των δύο παραπάνω κλίσεων είναι 1822,1132kWh/m<sup>2</sup>. Το κέρδος σε σχέση με την σταθερή ετήσια κλίση είναι 81,28kWh/m<sup>2</sup> ή περίπου 4,7%. Ακόμα στο σχήμα 6.10 φαίνονται οι μηνιαίες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας για σταθερή ετήσια κλίση και για εναλλαγή της κλίσης μεταξύ δύο θέσεων στη διάρκεια του έτους. Παρόλο που τους περισσότερους μήνες η σταθερή ετήσια γωνία υστερεί, υπάρχουν και δύο μήνες (Μάρτιος-Σεπτέμβριος), που συμβαίνει το αντίθετο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### 2.1 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΚΑΙ Η ΕΝΤΑΣΗ ΤΗΣ

Η ηλιακή ακτινοβολία έχει ορισμένα χαρακτηριστικά τα οποία επηρεάζουν τις μεταβολές που προκαλεί στα διάφορα υλικά.

Γενικά η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας προέρχεται από τις θερμοπυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του ήλιου. Σαν αποτέλεσμα των αντιδράσεων αυτών μεγάλες ποσότητες υδρογόνου μετατρέπονται σε ήλιο με τη σύγχρονη ελευθέρωση μεγάλων ποσών ενέργειας και με συνέπεια την ελάττωση της μάζας του ήλιου που συντελείται με ρυθμό 4.000.000 τόνους το δευτερόλεπτο. Σε αυτά τα ποσά ενέργειας που έφτασαν στη γη κατά το παρελθόν, οφείλεται και η δημιουργία όλων των ποσοτήτων πετρελαίου και άνθρακα που υπάρχουν στο εσωτερικό της γης.[2]

Η ηλιακή ακτινοβολία ταξιδεύει προς τη γη με ταχύτητα 300.000 χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο και μεταφέρει ενέργεια με τα κύματα (ή φωτόνια) της. Όταν γίνει φασματοσκοπική ανάλυση της ακτινοβολίας, εμφανίζονται τα διάφορα χρώματα που περιέχονται σε αυτή. Το σύνολο αυτών των χρωμάτων αποτελεί το ηλιακό φάσμα. Σε κάθε χρώμα αντιστοιχεί μια συχνότητα. Στο ένα άκρο του φάσματος υπάρχει το κόκκινο χρώμα με συχνότητα  $4,3 \cdot 10^{14}$  ταλαντώσεις το δευτερόλεπτο και στο άλλο άκρο το ιώδες χρώμα με συχνότητα  $7,5 \cdot 10^{14}$  ταλαντώσεις το δευτερόλεπτο.

Ο χρόνος μιας ταλάντωσης ενός σημείου που βρίσκεται στη διεύθυνση μετάδοσης του κύματος ονομάζεται περίοδος (T). Η περίοδος για το ιώδες, είναι  $1,3 \cdot 10^{-15}$  δευτερόλεπτα και για το κόκκινο  $2,3 \cdot 10^{-15}$  δευτερόλεπτα. Η σχέση μεταξύ συχνότητας και περιόδου είναι:

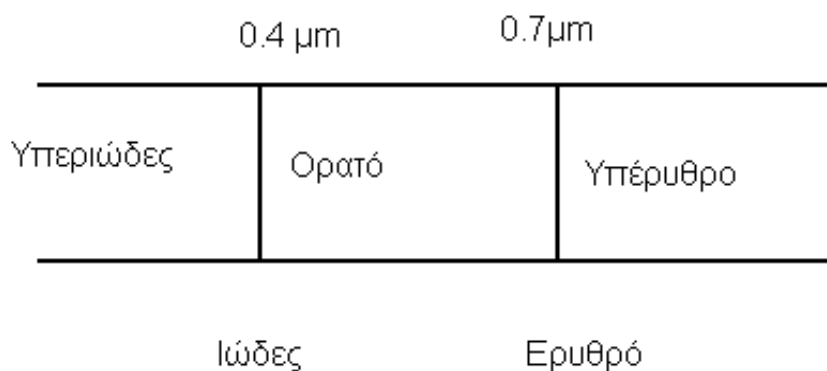
$$T=1/\nu$$

Το μήκος κύματος  $\lambda$  είναι η απόσταση που διανύει το κύμα μέσα στο χρόνο της περιόδου και βρίσκεται από τον τύπο  $\lambda = \nu \cdot T$  (Απόσταση = Ταχύτητα x Χρόνο).

Ωστε το μήκος κύματος για το ιώδες είναι  $4 \cdot 10^{-7} \mu\text{m} = 0,4 \mu\text{m}$  και το μήκος κύματος για το κόκκινο είναι  $7 \cdot 10^{-7} \mu\text{m}$  ( $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$ ).

Μεταξύ του κόκκινου και του ιώδους χρώματος περιλαμβάνεται το ορατό ηλιακό φάσμα που αποτελείται από όλα τα γνωστά χρώματα και περιλαμβάνει μόνο τα 44% περίπου της ηλιακής ακτινοβολίας. [2]

Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας δεν περιορίζεται μεταξύ του κόκκινου και ιώδους άκρου. Αυτό σημαίνει ότι εκτός από τις ακτινοβολίες της ορατής περιοχής υπάρχουν και ακτινοβολίες αόρατες. Έτσι μετά το άκρο που βρίσκεται το κόκκινο, υπάρχει η αόρατη υπέρυθη ακτινοβολία με μήκος κύματος μεγαλύτερο των  $0,7 \mu\text{m}$ , που αποτελεί τα 50% περίπου της ηλιακής ακτινοβολίας. Τέλος μετά το άκρο του ιώδους χρώματος υπάρχει η αόρατη υπεριώδης ακτινοβολία, με μήκος κύματος μικρότερο των  $0,4 \mu\text{m}$ , που αποτελεί τα 6% περίπου της ηλιακής ακτινοβολίας (σχήμα 2.2)



Σχήμα 2.2

Η υπέρυθη ακτινοβολία βρίσκεται στην περιοχή με μήκη κύματος μεγαλύτερα του  $0,7 \mu\text{m}$ . Η υπεριώδης ακτινοβολία βρίσκεται στην περιοχή με μήκη κύματος μικρότερα του  $0,4 \mu\text{m}$ .

Η ενέργεια  $E_{\phi}$  κάθε φωτονίου βρίσκεται, από τον τύπο  $E_{\phi} = h \cdot \nu$ . Η σταθερά του Planck  $h$  έχει την τιμή  $6,63 \cdot 10^{-34}$  (J.s). Το  $\nu$  είναι η συχνότητα του κύματος στο οποίο ανήκει το φωτόνιο.

Εφαρμόζοντας τον τύπο βρίσκεται ότι η ενέργεια κάθε φωτονίου του ορατού ηλιακού φάσματος κυμαίνεται μεταξύ της τιμής  $2,85 \cdot 10^{-19}$  J που έχει το φωτόνιο του κόκκινου χρώματος και της τιμής  $4,97 \cdot 10^{-19}$  J που έχει το φωτόνιο του ιώδους χρώματος.

Από όλες τις συχνότητες του ηλιακού φάσματος μόνο οι μεγάλες συχνότητες στις οποίες αντιστοιχούν φωτόνια μεγάλης ενέργειας είναι δυνατό να προκαλέσουν ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Οι συχνότητες αυτές αποτελούν το 75% του φάσματος περίπου ενώ οι υπόλοιπες δεν προκαλούν αξιοσημείωτα αποτελέσματα στα φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Ένα μέγεθος που έχει μεγάλη σημασία για την αποτελεσματικότητα των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι η **ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας**.

Σαν **ένταση B** της ηλιακής ακτινοβολίας ορίζεται το ποσό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει σε  $1 \text{ m}^2$  επιφάνειας σε 1 δευτερόλεπτο (s) με βάση τον τύπο:

$$B = \frac{E}{S \cdot t} = P / S$$

όπου E είναι ενέργεια και P η ισχύς που προσπίπτει στην επιφάνεια S σε χρόνο t. Η ένταση της B μετράται σε: J/s  $\text{m}^2$  ή W/  $\text{m}^2$

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στα διάφορα σημεία μεταξύ του ήλιου και της επιφάνειας της γης βρίσκεται από τον τύπο:

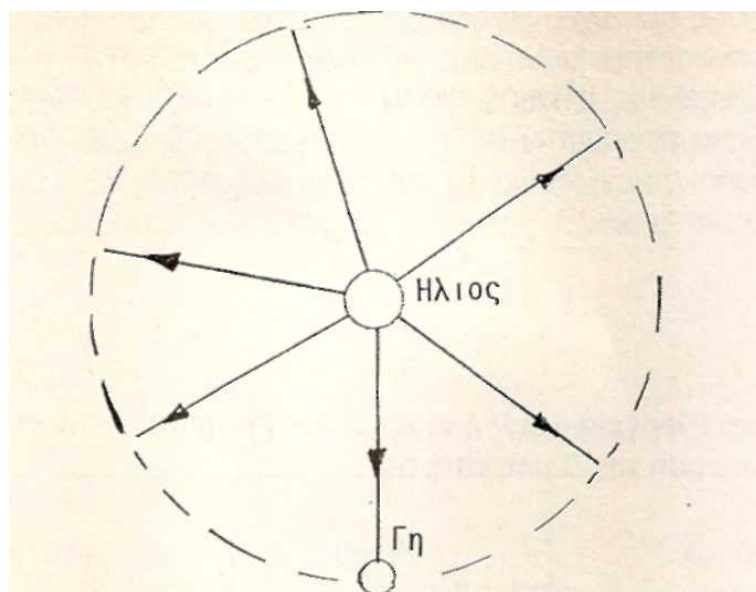
$$B_0 = E_0 / 4\pi r^2 t = P_0 / 4\pi r^2$$

όπου  $E_0$  είναι η ολική ενέργεια που εκπέμπεται από τον ήλιο σε χρόνο t και φτάνει στην εσωτερική επιφάνεια  $4\pi r^2$  νοητής σφαίρας που έχει ακτίνα r.[2]

Η ένταση δηλαδή ελαττώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση από τον ήλιο. Στην αρχή της ατμόσφαιρας της γης η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι:

$$B_o = E_o/4\pi R^2 t = P_o/4\pi R^2$$

όπου R η απόσταση ήλιου - γης (σχήμα 2.3)



Η ολική ενέργεια  $E_Q$  που εκπέμπεται από τον ήλιο φθάνει την εσωτερική επιφάνεια  $4\pi R^2$  νοητής σφαίρας που έχει ακτίνα R την απόσταση ήλιου - γης.

Σχήμα 2.3

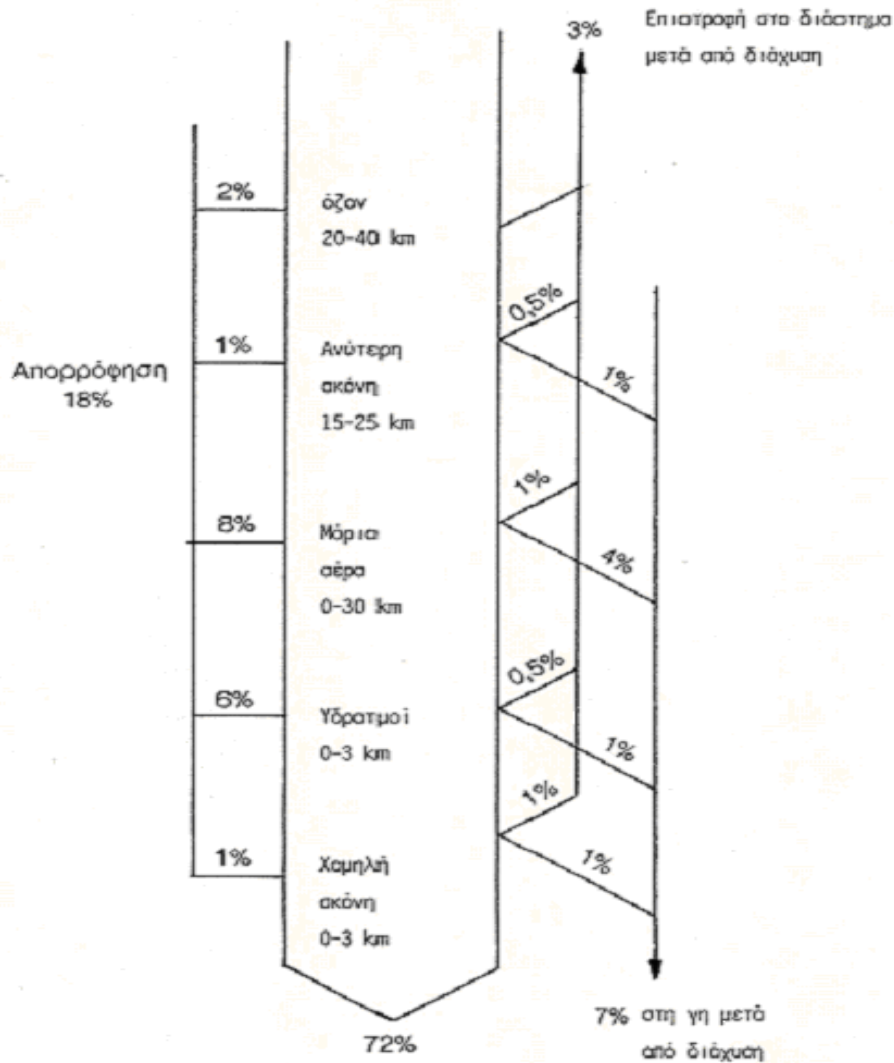
Ελάττωση της έντασης συμβαίνει σε όλη τη διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα της γης λόγω απορρόφησης.

Όταν η ατμόσφαιρα είναι καθαρή και ο ήλιος αρκετά ψηλά ώστε οι ακτίνες να προσπίπτουν σχεδόν κάθετα στην επιφάνεια της γης, το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια απ' ευθείας είναι γύρω στα 72%. Εκτός από το ποσοστό αυτό αλλά 7% φτάνουν στην επιφάνεια μετά από διάχυση στα σωματίδια



της ατμόσφαιρας. Τα υπόλοιπα 18% απορροφούνται από το όζον, τους υδρατμούς, τον αέρα και την σκόνη ενώ 3% επιστρέφει πίσω στο διάστημα (σχήμα 2.4). [2]

Φυσικά σε περίπτωση που οι ποσότητες των υδρατμών και της σκόνης είναι περισσότερες, η απορρόφηση είναι μεγαλύτερη και έτσι φτάνει μικρότερο ποσοστό από το 79% στην επιφάνεια της γης. Επίσης η απορρόφηση εξαρτάται από τη μάζα αέρα που συναντά η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διαδρομή της προς την επιφάνεια της γης. Αυτό έχει σχέση με το μήκος της διαδρομής της μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα που είναι άμεση συνέπεια της θέσης του ήλιου.



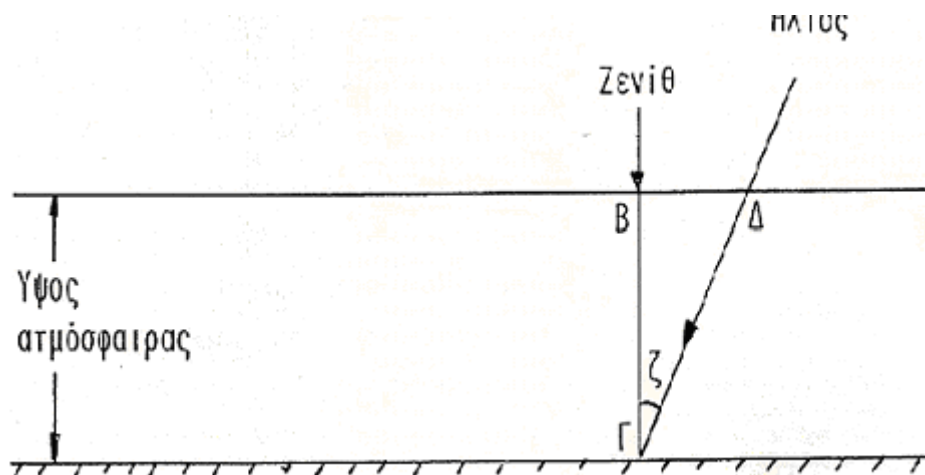
Σχήμα 2.4

Το μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα δίνεται συμβατικά από την κλίμακα μάζας αέρα MA. Μέτρο της μάζας αέρα είναι η τέμνουσα της ζενιθιακής απόστασης  $\zeta$  και ανάλογα με τη θέση του ήλιου εκφράζεται σαν  $MA_{\text{τεμζ}}$ . Ζενιθιακή απόσταση  $\zeta$  είναι η γωνία μεταξύ της θέσης του ήλιου και της κατακόρυφου. Δηλαδή η  $MA_{\text{τεμζ}}$  ουσιαστικά εκφράζει πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα σε σύγκριση με την κατακόρυφη διαδρομή της. Αυτό φαίνεται από την γεωμετρία του σχήματος 2.5. [2]

$$(B\Gamma) = (\Gamma\Delta) \text{ συν}\zeta$$

$$(\Gamma\Delta) = (B\Gamma)/\text{συν}\zeta$$

$$(\Gamma\Delta) = (B\Gamma) \text{ τεμ}\zeta$$



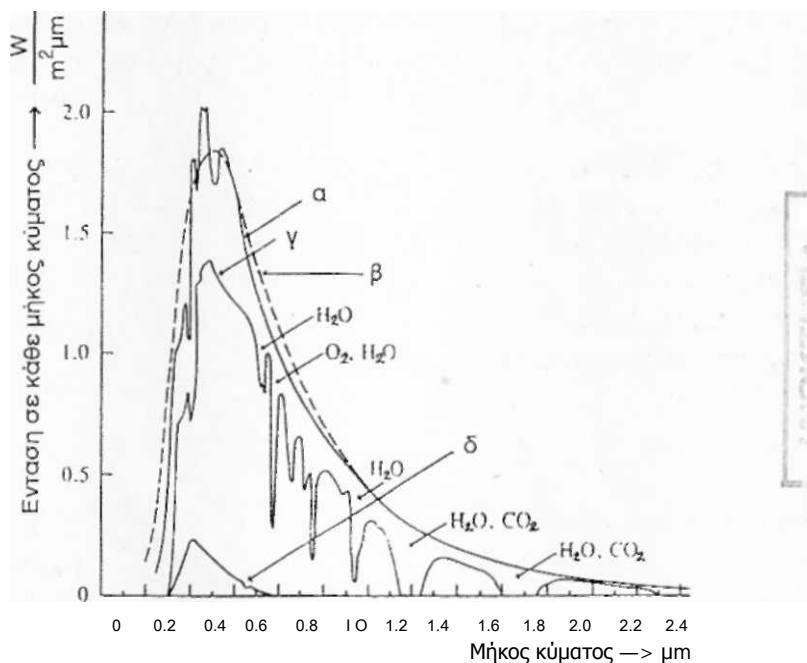
Σχήμα 2.5

Συγκεκριμένα, όταν οι ακτίνες πέφτουν κάθετα (η θέση του ήλιου στο ζενίθ) η μάζα αέρα εκφράζεται σαν MA1 επειδή στη θέση αυτή έχουμε  $\text{τεμ}\zeta = 1$ . Το MA1.5 δείχνει ότι ο ήλιος βρίσκεται σε γωνία  $45^\circ$  από το ζενίθ ( $\zeta = 45^\circ$ ) και το MA2 όταν  $\zeta = 60^\circ$ . Το μηδέν της κλίμακας (MA0) δείχνει την πλήρη απουσία ατμοσφαιρικής παρεμβολής δηλαδή την ηλιακή ακτινοβολία στην αρχή της ατμόσφαιρας της γης.

Η MA  $\text{τεμ}\zeta$  εκφράζει πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα ΓΔ από την κατακόρυφη διαδρομή της BΓ. Η γωνία  $\zeta$  είναι η ζενιθιακή απόσταση Εκτός από την ένταση της ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια και η κατανομή της ενέργειας κατά μήκος κύματος επηρεάζεται από την ατμόσφαιρα. Το γεγονός αυτό είναι πολύ βασικό στη μετατροπή της ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια διότι η απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων εξαρτάται από τα μήκη κύματος (χρώματα) που υπάρχουν μέσα στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.

Στο σχήμα 2.6 φαίνεται η κατανομή στο ηλιακό φάσμα έξω από την ατμόσφαιρα (MA0) που είναι παρόμοια με την κατανομή της ακτινοβολίας που

προέρχεται από μαύρο σώμα θερμοκρασίας 6016°C (ασυνεχής γραμμή). Επίσης φαίνεται η κατανομή αφού η ακτινοβολία διαπεράσει την ατμόσφαιρα και πέσει κάθετα στην επιφάνεια της γης (MAI). Στο σχήμα επίσης φαίνεται



Σχήμα 2.6

Καμπύλες φασματικής κατανομής.  
 α. ηλιακό φάσμα έξω από την ατμόσφαιρα MAO.  
 β. κατανομή ακτινοβολίας από μαύρο σώμα 6016° C.  
 γ. MAI η ακτινοβολία έχει διαπεράσει την ατμόσφαιρα κάθετα προς την επιφάνεια της γης.  
 δ. διάχυτη ακτινοβολία.

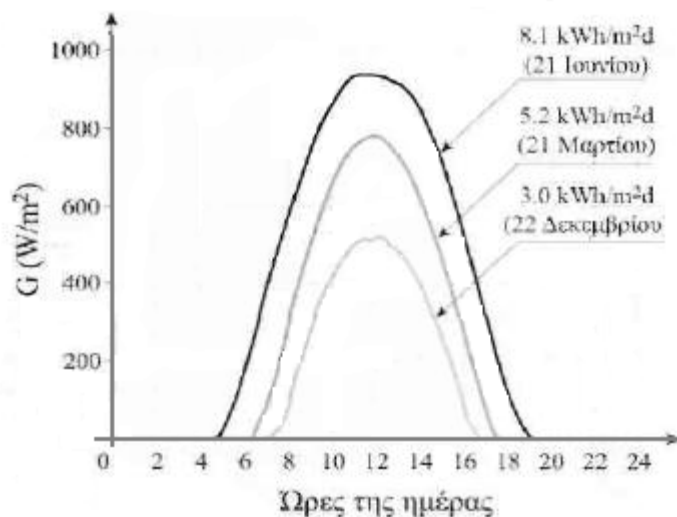
και η κατανομή της διάχυτης ακτινοβολίας με μεγαλύτερη διάχυση στο μπλε χρώμα πράγμα που εξηγεί και το μπλε χρώμα του ουρανού.

Παρατηρείται ότι η απορρόφηση που προκάλεσε το όζον κάλυψε όλα τα μήκη κύματος μικρότερα του 0,3  $\mu m$  που αποτελούν μεγάλο μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας. Σε περίπτωση που ο ουρανός καλύπτεται με νέφη επηρεάζεται πολύ η δίοδος και η διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας. Παρά το γεγονός ότι η ποσότητα υδρατμών στα σύννεφα αποτελεί μικρό ποσοστό της ολικής ποσότητας υδρατμών στην ατμόσφαιρα, η υγροποιημένη κρυσταλλική μορφή του νερού που υπάρχει στα σύννεφα προκαλεί πολύ μεγάλη απορρόφηση.

## 2.2 ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΛΑΒΗ ΑΠΟ ΤΟΝ ΗΛΙΟ

Η ενέργεια ανά  $m^2$  που φτάνει στην επιφάνεια της Γης μέσα σε μια μέρα εξαρτάται από την κλίση της συλλεκτικής επίπεδης επιφάνειας, το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, τη μέρα του χρόνου και από τις συγκεντρώσεις των διαφόρων αερίων, υγρών και στερεών συστατικών και αιωρημάτων της ατμόσφαιρας κατά την ημέρα εκείνη.

Προκειμένου, όμως, να υπάρχουν συγκρίσιμα στοιχεία σε διεθνή κλίμακα αναφερόμαστε σε μετρήσεις με αισθητήρες, οι οποίοι τοποθετούνται με τη συλλεκτική τους επιφάνεια *οριζόντια*. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μέσες ημερήσιες τιμές της πυκνότητας ισχύος και της πυκνότητας ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας, σε οριζόντια επιφάνεια, μέσα σε κάθε μήνα και μέσα στο έτος. Τυπικές μορφές εξέλιξης μέσα στην ημέρα της πυκνότητας ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο ( $G$  σε  $W/m^2$ ), απεικονίζονται στην εικόνα 2.7 Στο ίδιο σχήμα σημειώνονται και οι αντίστοιχες ενεργειακές πυκνότητες  $H$  (σε  $kWh/m^2d$ ), οι οποίες προκύπτουν ως ολοκλήρωμα ή εμβαδόν κάτω απ' την αντίστοιχη καμπύλη. Σημειώνεται πάντως ότι κατά τη διάρκεια μερικής παρουσίας σύννεφων, γύρω απ' την κατεύθυνση του ήλιου, μπορεί να παρατηρηθούν τιμές της πυκνότητας ισχύος μεγαλύτερες των τιμών που θα καταγράφονταν χωρίς την παρουσία τους. Οι συγκεκριμένες γραφικές παραστάσεις προέρχονται από μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο "Φωτοβολταϊκό Πάρκο", στο Ηράκλειο της Κρήτης, με γεωγραφικό πλάτος  $35,5^\circ$  και γεωγραφικό μήκος  $25^\circ$ . [1]



Σχήμα 2.7

Καταγραφή της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, σε πυρανόμετρο με οριζόντια επιφάνεια, στο Ηράκλειο της Κρήτης

Στον τόπο αυτό η μέση, καθ' όλο το έτος, ημερήσια τιμή της ηλιακής ενέργειας, σε οριζόντιο επίπεδο, για μια σειρά πέντε ετών, έχει προκύψει ίση με  $H=5 \text{ kWh/m}^2\text{d}$  (εκφρασμένο π.χ. σε  $\text{kWh/m}^2\text{d}$ ), δια των 24 h ( $G = H/T$ , όπου  $T=24 \text{ h}$ ). Η μέση τιμή της πυκνότητας ισχύος αντιπροσωπεύει την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, με την οποία αν ο τόπος φωτιζόταν όλο το εικοσιτετράωρο, η συνολική πυκνότητα ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας θα ήταν ίση με την πραγματικά αποδοθείσα κατά τη συγκεκριμένη μέρα. Αποτελεί τυπικό συγκριτικό στοιχείο ηλιακής ακτινοβολίας, για διαφορετικούς τόπους.

Σε περιοχές κοντά στον Ισημερινό, η μέση ετησίως τιμή της είναι μεγαλύτερη (μέχρι και  $7 \text{ kWh/m}^2\text{d}$ ) και αντίστοιχα, σε περιοχές στα όρια των Εύκρατων ζωνών, είναι μικρότερη ( $<3 \text{ kWh/m}^2\text{d}$ ). Άξιο παρατήρησης είναι η ελαττωμένη τιμή της σε περιοχές της Τροπικής ζώνης (γύρω από τον Ισημερινό). Η υψηλή υγρασία των περιοχών αυτών, με την έντονη βλάστηση, έχει ως αποτέλεσμα την ισχυρή ελάττωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

### 2.3 ΗΛΙΟΦΑΝΕΙΑ

Εκτός από τη μέση ημερήσια ενέργεια από το ήλιο σε μηνιαία και ετήσια βάση, σε οριζόντιο επίπεδο, χαρακτηριστικό στοιχείο μιας περιοχής είναι η ηλιοφάνεια της. Αυτή εξαρτάται βεβαίως από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου και από την θέση και την διαμόρφωση της περιοχής. Τα χαρακτηριστικά αυτά πιθανόν να ευνοούν την ανάπτυξη νεφώσεων, με αποτέλεσμα την μείωση των ηλιόλουστων ημερών. Η ηλιοφάνεια εκφράζεται σε πλήθος ωρών ανά μήνα και ανά έτος, κατά τις οποίες ο ήλιος είναι ορατός στον ουρανό. Στην Ελλάδα, η περιοχή με τη μεγαλύτερη ηλιοφάνεια είναι η περιοχή της Ιεράπετρας στο νοτιοανατολικό μέρος της Κρήτης (3108 ώρες ετησίως). [5]

## 2.4 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΤΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ

Η ηλιακή ακτινοβολία "G<sub>0n</sub>" (W/m<sup>2</sup>) που δέχεται μια επιφάνεια κάθετη στις ηλιακές ακτίνες στο όριο της ατμόσφαιρας, εξαρτάται από την απόσταση γης-ηλίου και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$G_{0n} = G_{sc} \cdot E_0 \quad 2.1$$

όπου "G<sub>sc</sub>" η ηλιακή σταθερά ίση με 1367 W/m<sup>2</sup> και "E<sub>0</sub>" ο διορθωτικός συντελεστής απόστασης γης-ηλίου που δίνεται από την εξίσωση 2.1. Η αντίστοιχη εξίσωση ηλιακής ακτινοβολίας "G<sub>0</sub>" σε (W/m<sup>2</sup>) για μια οριζόντια επιφάνεια στα όρια της ατμόσφαιρας, δίνεται από την εξίσωση:

$$G_0 = G_{sc} \cdot E_0 \cdot \cos \theta_z = G_{sc} \cdot E_0 \cdot ((\eta \mu \phi \cdot \eta \mu \delta) + (\sigma \nu \phi \cdot \sigma \nu \delta - \sigma \nu \omega)) \quad (2.2)$$

Ολοκληρώνοντας τις στιγμιαίες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας "G<sub>0</sub>" για μια ορισμένη χρονική περίοδο (π.χ. από την ανατολή έως τη δύση του ηλίου), υπολογίζεται η κατάλληλη (π.χ. ημερήσια) τιμή της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο στο όριο της ατμόσφαιρας. Για τον προσδιορισμό της αντίστοιχης τιμής σε κεκλιμένο επίπεδο χρησιμοποιούνται οι γεωμετρικές παράμετροι που συνδέονται με την κλίση και τον προσανατολισμό της επιφάνειας. [10]

## 2.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Η έλλειψη λεπτομερών πειραματικών μετρήσεων ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε περιοχή, κατέστησε αναγκαία τη δημιουργία αναλυτικών υπολογιστικών μοντέλων, που βασίζονται σε εμπειρικές ή ατμοσφαιρικές πληροφορίες.

Τα εμπειρικά μοντέλα προέρχονται από επεξεργασία μετρήσεων ηλιακής ακτινοβολίας για μια ορισμένη περιοχή και προσαρμόζονται κατάλληλα, ώστε να



μπορούν χρησιμοποιηθούν και για άλλες περιοχές με παρόμοια χαρακτηριστικά, όπως το γεωγραφικό πλάτος.

Τα ατμοσφαιρικά μοντέλα βασίζονται στις κλιματολογικές συνθήκες μιας περιοχής και στους κατάλληλους σχετικούς φυσικούς νόμους που περιγράφουν τη συμπεριφορά της ατμόσφαιρας. [10]

Ένα από τα πλέον γνωστά εμπειρικά μοντέλα που αναφέρεται σε συνθήκες καθαρού ουρανού είναι το μοντέλο του "Hottel" , του οποίου οι αριθμητικές τιμές των αποτελεσμάτων πλησιάζουν αρκετά τις πραγματικές τιμές. Βάσει του παραπάνω μοντέλου, η άμεση ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο  $G_{cb}$ , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$G_{cb} = G_{on} \cdot \tau_b \cdot \sin\theta_z \quad (2.3)$$

όπου "  $G_{on}$  " είναι η ένταση της ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας, σε επίπεδο κάθετο στις ακτίνες του ήλιου,

" $\tau_b$ " είναι ο δείκτης ακτινικής μεταφοράς, που εκφράζει το λόγο της άμεσης ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της γης ως προς την αντίστοιχη τιμή στο όριο της ατμόσφαιρας και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\tau_b = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \exp(-k / \sin\theta_z) \quad (2.3)$$

$$\text{με } \alpha_0 = r_0 \cdot \alpha_2, \quad \alpha_1 = r_1 \cdot \alpha_3, \quad k = r_k \cdot k_1$$

$$\alpha_2 = 0.4237 - 0.00821 \cdot (6-z)^2$$

$$\alpha_3 = 0.5055 + 0.00595 \cdot (6.5 - z)^2$$

$$k_1 = 0.2711 + 0.01858 \cdot (2.5-z)^2$$

όπου "z" το υψόμετρο του τόπου σε (km), (π.χ. για την ΑΣΠΑΙΤΕ ισχύει z=0.135 km).

Οι διορθωτικοί συντελεστές που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς επιλέγονται ανάλογα την εποχή και το γεωγραφικό πλάτος μιας περιοχής, Πίνακας 2.1.

Πίνακας 2.1 :Διορθωτικοί συντελεστές άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας

Κλιματολογικές συνθήκες	$\Gamma_o$	$\Gamma_1$	$\Gamma_k$
τροπικό κλίμα	0.95	0.98	1.02
μέσα γεωγραφικά πλάτη-καλοκαίρι	0.97	0.99	1.02
βόρεια πλάτη - καλοκαίρι	0.99	0.99	1.01
μέσα γεωγραφικά πλάτη - χειμώνα	1.03	1.01	1.00

Αντίστοιχα, η διάχυτη ακτινοβολία μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (2.4), η οποία εκφράζει το λόγο " $\tau_d$ " της διάχυτης ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο " $G_{cd}$ " προς την αντίστοιχη τιμή σε οριζόντιο επίπεδο στο όριο της ατμόσφαιρας " $G_o$ ":

$$\tau_d = G_{cd} / G_o = (0.2710 - 0.2939 \cdot \tau_b) \quad (2.4)$$

Οι εξισώσεις (2.3) και (2.4), προσδιορίζουν τις στιγμιαίες τιμές έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας ( $W/m^2$ ), ενώ με παρόμοια διαδικασία μπορούν να γίνουν αντίστοιχοι υπολογισμοί για περίοδο μιας ώρας, δηλαδή κατ' επέκταση μπορούν να χρησιμοποιηθούν με σχετική ακρίβεια οι εξισώσεις (2.3) και (2.4) αντικαθιστώντας τα σύμβολα  $G_{cb}$  και  $G_{cd}$  με  $I_{cb}$  και  $I_{cd}$

$$\text{οπότε } I_c = I_{cb} + I_{cd}$$

Παράλληλα για τον υπολογισμό της διάχυτης ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, βάσει της αντίστοιχης ολικής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί τα ημιεμπειρικό μοντέλο των "Orgille" και "Hollands", . Για την εφαρμογή του εν λόγω μοντέλου απαιτείται ο προσδιορισμός του ποσοστού διάχυτης ακτινοβολίας " $k_d$ " και του δείκτη αιθριότητας " $k_t$ " .[1]

Πιο συγκεκριμένα, δείκτης αιθριότητας " $k_t$ ", ορίζεται το πηλίκο της ωριαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας " $I$ " σε οριζόντιο επίπεδο, προς την αντίστοιχη τιμή στο όριο της ατμόσφαιρας " $I_o$ ", και υπολογίζεται από την εξίσωση (2.5):

$$k_t = I / I_o \quad (2.5)$$

Ακολούθως το ποσοστό διάχυτης ακτινοβολίας " $k_d$ " ισούται με το λόγο της ωριαίας διάχυτης ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο προς την αντίστοιχη ολική ακτινοβολία, δηλαδή:

$$k_d = I_d / I \quad (2.6)$$

Χρησιμοποιώντας δεδομένα από μετρητικούς σταθμούς στον Καναδά, εκτιμάται η τιμή του δείκτη αιθριότητας από την εξίσωση (2.7):

$$k_d - I_d / I = \begin{cases} 1.00 - 0.249 \cdot k_t & k_t < 0.35 \\ 1.557 - 1.84 \cdot k_t & 0.35 < k_t < 0.75 \\ 0.177 & k_t > 0.75 \end{cases}$$

οπότε με εφαρμογή της εξίσωσης (2.6) προσδιορίζεται η τιμή του " $I_d$ "

Τέλος είναι δυνατή και η χρησιμοποίηση του ημιεμπειρικού μοντέλου των "Stauter – Klein". Το δεδομένο αυτό βασίζεται σε δεδομένα από πέντε περιοχές των ΗΠΑ, δίνει δε τη δυνατότητα εκτίμησης του λόγου διάχυτης προς την ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο, σε συνάρτηση με το λόγο της ολικής ακτινοβολίας στο οριζόντιο προς την αντίστοιχη σε συνθήκες καθαρού ουρανού  $I / I_c$  .

$$k_d = I_d / I = \begin{cases} 1.00 - 0.1 \cdot (I / I_c) & 0 < (I / I_c) < 0.48 \\ 1.11 + 0.0396 \cdot (I / I_c) - 0.789 \cdot (I / I_c)^2 & 0.48 < (I / I_c) < 1.1 \\ 0.2 & (I / I_c) > 1.1 \end{cases}$$

## 2.6 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Η γνώση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται ένα κεκλιμένο επίπεδο είναι απαραίτητη στις περισσότερες εφαρμογές και μελέτες των ηλιακών συστημάτων, όπως βέβαια και στα φωτοβολταϊκά.

Η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ένα κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια του εδάφους αποτελείται από τρεις συνιστώσες :

- την άμεση που προέρχεται από τον ηλιακό δίσκο
- τη διάχυτη που προέρχεται από τον ουράνιο θόλο
- την ανακλώμενη που προέρχεται από το έδαφος της γύρω περιοχής

Η άμεση ακτινοβολία που θα δεχθεί το επίπεδο εξαρτάται από την γωνία

πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών. Η διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία που δέχεται το κεκλιμένο επίπεδο δεν εξαρτώνται από τον προσανατολισμό του επιπέδου και ούτε προέρχονται απ' όλο τον ουράνιο θόλο ή το έδαφος της γύρω περιοχής. Έτσι η διάχυτη ακτινοβολία που δέχεται το κεκλιμένο επίπεδο θα προέρχεται μόνο από το τμήμα του ουρανού που " βλέπει " το επίπεδο. [1]

Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο  $I_b$  συνδέεται με την αντίστοιχη ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο  $I_{b\beta}$  μέσω του γεωμετρικού παράγοντα " $r_b$ ", που δίνεται από την εξίσωση:

$$r_b = I_{b,\beta} / I_b = I_{bn} \cdot \sigma_{\nu\theta} / I_{bn} \cdot \sigma_{\nu\theta_z} = \sigma_{\nu\theta} / \sigma_{\nu\theta_z} \quad (2.8)$$

Για κεκλιμένη επιφάνεια με νότιο προσανατολισμό το " $r_b$ " δίνεται από την εξίσωση (2.9)

$$r_b = [(\sigma_{\nu(\varphi-\beta)} \cdot \sigma_{\nu\delta} \cdot \sigma_{\nu\omega}) + (\eta_{\mu(\varphi-\beta)} \cdot \eta_{\mu\delta})] / [(\sigma_{\nu\varphi} \cdot \sigma_{\nu\delta} \cdot \sigma_{\nu\omega}) + (\eta_{\mu\varphi} \cdot \eta_{\mu\delta})] \quad (2.9)$$

Ομοίως για κεκλιμένες επιφάνειες με τυχαίο προσανατολισμό χρησιμοποιείται η εξίσωση (2.2).

Ακολούθως για τον προσδιορισμό της διάχυτης ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο βάσει των τιμών της διάχυτης και ολικής στο οριζόντιο επίπεδο, χρησιμοποιείται το ιστροπικό μοντέλο.

Πιο συγκεκριμένα, η ανακλώμενη από το έδαφος ακτινοβολία υπολογίζεται βάσει του ιστροπικού μοντέλου υποθέτοντας ότι η διάχυτη ακτινοβολία είναι ιστροπική. Η ανακλώμενη διάχυτη ακτινοβολία  $I_r$  υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$I_r = 0.5 \cdot I \cdot \rho \cdot (1 - \text{συν}\beta) \quad (2.10)$$

όπου " $\rho$ " είναι η αντανακλαστικότητα του εδάφους (π.χ.  $\rho=0.2$  για έδαφος και  $\rho=0.7$  για χιόνι).

Για τη διάχυτη συνιστώσα της ακτινοβολίας  $I_s$ , που προέρχεται από τον ουράνιο θόλο, το ιστροπικό μοντέλο θεωρεί ότι προέρχεται ομοιόμορφα από τον ουράνιο θόλο και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$I_s = 0.5 \cdot I_d \cdot (1 + \text{συν}\beta) \quad (2.11)$$

Συνεπώς η συνολική διάχυτη ακτινοβολία σε μια κεκλιμένη επιφάνεια,  $I_{d,\beta}$  είναι το άθροισμα των επιμέρους συνιστωσών και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$I_{d,\beta} = I_s + I_r \quad (2.12)$$

Συμπερασματικά, η ολική ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο υπολογίζεται κατά προσέγγιση από την εξίσωση:

$$I_\beta = I_{b,\beta} + I_{s,\beta} + I_{r,\beta} = I_b \cdot r_b + 0.5 \cdot I_d \cdot (1 + \text{συν}\beta) + 0.5 \cdot I \cdot \rho \cdot (1 - \text{συν}\beta)$$

### 3.2 ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

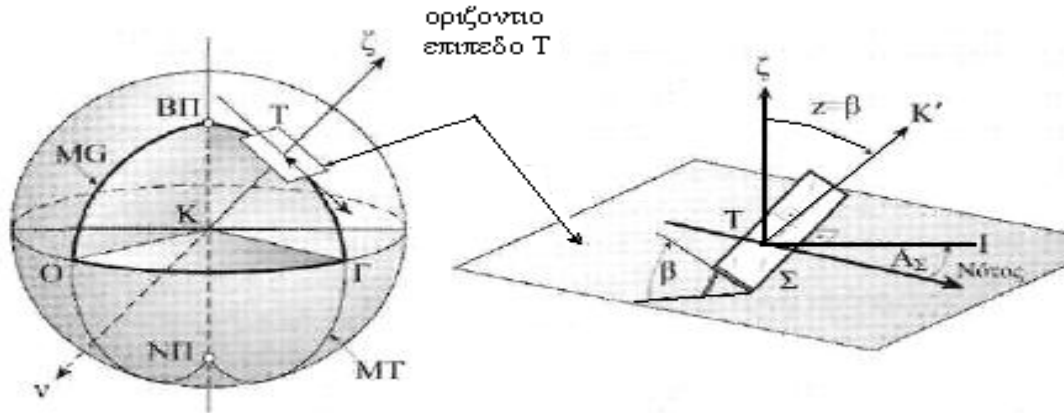
Σημαντικό ρόλο στην αποδοτικότερη συλλογή ηλιακής ακτινοβολίας από ένα συλλέκτη παίζει ο προσανατολισμός του ως προς τον ηλιακό νότο, ο οποίος αντιστοιχεί στη στιγμή που ο ήλιος βρίσκεται στο μεσημβρινό του συγκεκριμένου τόπου. Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούμε, κατ' αρχήν, σε μια απλή μέθοδο προσδιορισμού του αληθούς νότου, ως προς τον οποίο προσανατολίζουμε συνήθως το συλλέκτη και στη συνέχεια θα εξετάσουμε σε συντομία, τους διάφορους τρόπους τοποθέτησης των συλλεκτών με βασική απαίτηση τη μεγιστοποίηση της ημερησίως συλλεγόμενης ηλιακής ενέργειας, από το συλλέκτη, σε συνδυασμό με μια αξιόπιστη και οικονομική κατασκευή. [4]

Κάθε τόπος όπως ο τόπος T, της εικόνας [3.12α], πάνω στην επιφάνεια της γης, προσδιορίζεται από τις σφαιρικές συντεταγμένες του:

i. Το γεωγραφικό μήκος, (L), που καθορίζεται από το τόξο ΟΓ, πάνω στον Ισημερινό ή σε άλλο παράλληλο, με αναφορά το μεσημβρινό του Greenwich (MG), από 0-180° Ανατολικά (ή με αναφορά μόνο της γωνίας αλλά με αρνητικό πρόσημο, π.χ. για την Αθήνα: γ.μ.=-23.5°) και από 0-180° Δυτικά (ή η γωνία με θετικό πρόσημο).

ii. Το γεωγραφικό πλάτος, ( $\lambda$ ), που καθορίζεται από το τόξο ΓΤ, πάνω στον μεσημβρινό του τόπου ΜΤ, με αναφορά τον Ισημερινό, από 0-90° Βόρεια και 0-90° Νότια.

Ας θεωρήσουμε ένα επίπεδο συλλέκτη, Σ, τοποθετημένο έτσι ώστε το επίπεδο του να σχηματίζει γωνία β ως προς τον ορίζοντα εικόνα [3.12β]. Η γωνία κλίσης του συλλέκτη β ισούται με τη ζενιθία γωνία ζ της καθέτου στο επίπεδο του συλλέκτη (TK'), η οποία μπορεί να πάρει τιμές από 0° (Ζενίθ) έως 180° (Ναδίρ).



Σχήμα 3.12

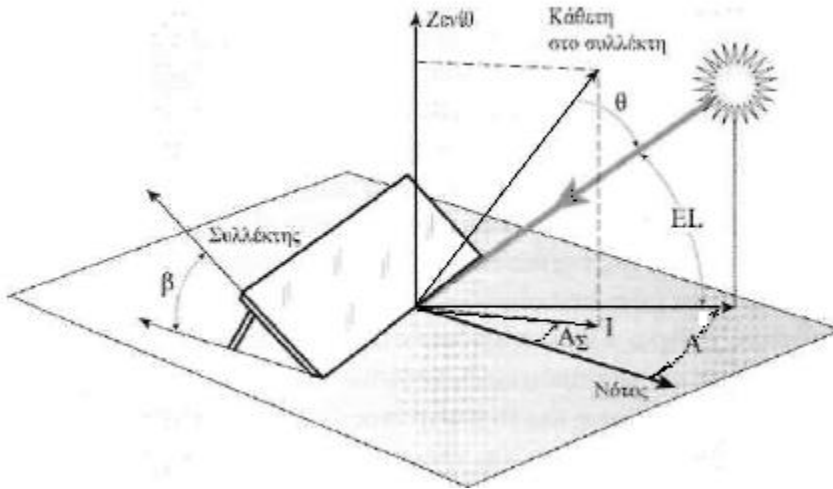
Σφαιρικές συντεταγμένες του τόπου T και του συλλέκτη Σ.

Η γωνία ΑΣ, μεταξύ της κατακόρυφης προβολής TI, της καθέτου στο συλλέκτη, TK' πάνω στο οριζόντιο επίπεδο, με τη διεύθυνση του νότου, ονομάζεται αζιμουθιακή ή αζιμουθιακή γωνία του συλλέκτη και παίρνει τιμές από  $+180^\circ$  μέχρι  $-180^\circ$ . Χαρακτηριστικές θέσεις:  $+180^\circ$  (βορράς),  $+90^\circ$  (Ανατολή),  $0^\circ$  (Νότος),  $-90^\circ$  (Δύση) και  $-180^\circ$  (Βορράς). Όταν ο συλλέκτης στραφεί ώστε οι ακτίνες του ήλιου (απευθείας ακτινοβολία), να προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια του, τότε το ύψος του ήλιου EL και η γωνία κλίσης β, του συλλέκτη δίδουν άθροισμα  $90^\circ$  ( $EL + \beta = 90^\circ$ ). [4]

Η στροφή του συλλέκτη, ώστε αυτός να παρακολουθεί ανά πάσα στιγμή τον ήλιο, γίνεται με μηχανισμούς οι οποίοι οδηγούνται από κατάλληλες ηλεκτρονικές διατάξεις με βάση τις εξισώσεις κίνησης του ήλιου στην ουράνια σφαίρα. Η γωνία θ που σχηματίζουν μια δεδομένη χρονική στιγμή οι ηλιακές ακτίνες (απευθείας ακτινοβολία) με την κάθετη σ' ένα επίπεδο συλλέκτη εικόνα[ 3.13] γωνίας κλίσης β και αζιμουθιακής γωνίας ΑΣ, δίδεται από τη σχέση

$$\sin\theta = \sin EL \cdot \eta\mu\beta \cdot \sin(A - A\Sigma) + \eta\mu EL \cdot \sin\beta \quad (3.13)$$

όπου  $A$ , η αζιμούθια γωνία και  $EL$  το ύψος του ήλιου την ίδια χρονική στιγμή.

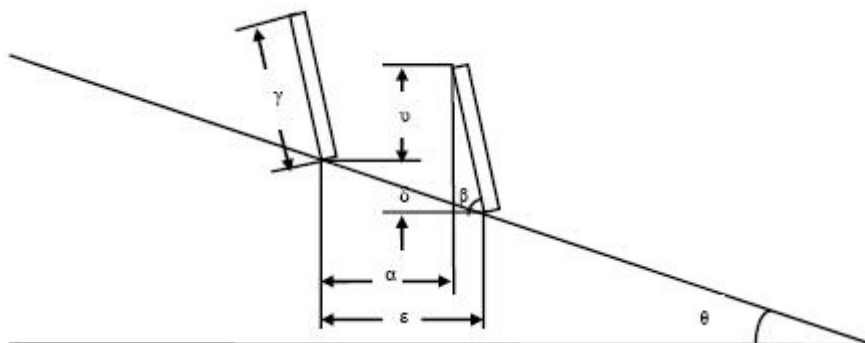


Σχήμα 3.13

Ο προσανατολισμός του συλλέκτη



### 3.1 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΠΑΡΚΟΥ



Σχήμα 3.7

Διάταξη φ/β συστοιχιών σε πλαγία κλίσης  $\kappa = \tan\theta$ , με απόλυτα νότιο προσανατολισμό.

Ένα πολύ σημαντικό γεγονός στις φ/β εγκαταστάσεις είναι η τοπογραφική διάταξη να είναι βέλτιστη. Γεγονός που εξασφαλίζεται αν έχει επιτευχθεί:

- Η βέλτιστη τοποθέτηση των πλαισίων όσον αφορά την κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο και τον προσανατολισμό προς τον νότο (αζιμούθιο 180°).
- Η ελάχιστη δυνατή χρησιμοποίηση των επιφανειών που θα τοποθετηθούν τα πλαίσια, χωρίς σε καμία περίπτωση να επηρεάζεται η προσλαμβανόμενη ηλιακή ενέργεια (αποφυγή φαινομένων σκίασης μεταξύ γειτονικών συστοιχιών).
- Η ελάχιστη χρησιμοποίηση καλωδίων για τις ενώσεις μεταξύ των πλαισίων, των συστοιχιών, των αντιστροφών κτλ.

Αρχικά υπολογίζεται η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο συνεχόμενων συστοιχιών  $\epsilon$  κατά μήκος του άξονα B-N, που εξασφαλίζει ότι η μία συστοιχία δεν θα σκιάζει την επόμενη. Στο σχήμα 3.7 φαίνεται η διάταξη δύο συνεχόμενων συστοιχιών στη πλαγία.[3]

Γνωρίζουμε ότι:

- Η κλίση της πλαγιάς που θα τοποθετηθούν τα φ/β πλαίσια είναι 8% κατά τη διεύθυνση B-N με υπερύψωση στον Βορρά. Άρα  $\kappa = \tan\theta = 0,08$ .
- Η κλίση  $\beta$  των πλαισίων επιλέχτηκε ίση με 28ο που είναι και η βέλτιστη τιμή. Άρα  $\beta = 28\text{o}$ .
- Το ύψος  $\gamma$  της συστοιχίας προέκυψε περίπου 4,3m. Άρα  $\gamma = 4,3\text{m}$ .
- Το γεωγραφικό πλάτος είναι 37,03ο, επομένως σύμφωνα με το διάγραμμα της εταιρίας Monogon προκύπτει ο λόγος της ελεύθερης απόστασης  $a$  προς το ύψος  $v$ ,  $a/v = 2,45$ .

Από τη σχέση (3.11) προκύπτει η απόσταση  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \gamma \times \frac{\frac{a}{v} \times \sin\beta + \cos\beta}{1 + \frac{a}{v} \times \kappa} = 4,3 \times \frac{2,4 \times \sin 28 + \cos 28}{1 + 2,45 \times 0,08} = 7,31\text{m}$$

τιμή την οποία στρογγυλεύουμε στα 8m. Μέχρι στιγμής έχει υπολογιστεί η απόσταση των συστοιχιών στη διεύθυνση B-N. Απομένει διερεύνηση όσον αφορά τη διεύθυνση A-Δ. Στη διεύθυνση αυτή παρατηρούμε μια μικρή κλίση του εδάφους ίση με 3%, που σημαίνει ότι η οριζοντίωση μιας συστοιχίας απαιτεί μια υπερύψωση του άκρου της συστοιχίας που βρίσκεται στη Δύση. Συγκεκριμένα η διαφορά ύψους κατά μήκος της συστοιχίας προκύπτει 0,42m ( $0,03 \times 14\text{m}$ ).

Η τοποθέτηση των συστοιχιών μπορεί να γίνει με σύμφωνα με τους παρακάτω τρόπους:

A. Τοποθέτηση των συστοιχιών χωρίς να γίνει οριζοντίωσή τους ακολουθώντας την φυσική κλίση.

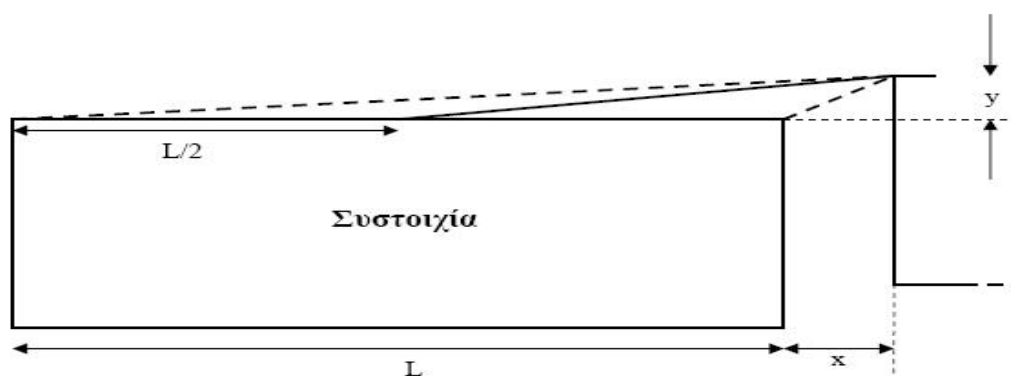
B. Οριζοντίωση κάθε συστοιχίας κατά τον άξονα A-Δ, ακολουθώντας κλιμακωτά τη φυσική κλίση.

---

*Πτυχιακή εργασία: Δημήτριου Δερβίση & Κωνσταντίνου Τζίμα*

C. Οριζοντίωση όλων των συστοιχιών που θα τοποθετηθούν στη διεύθυνση A-Δ.

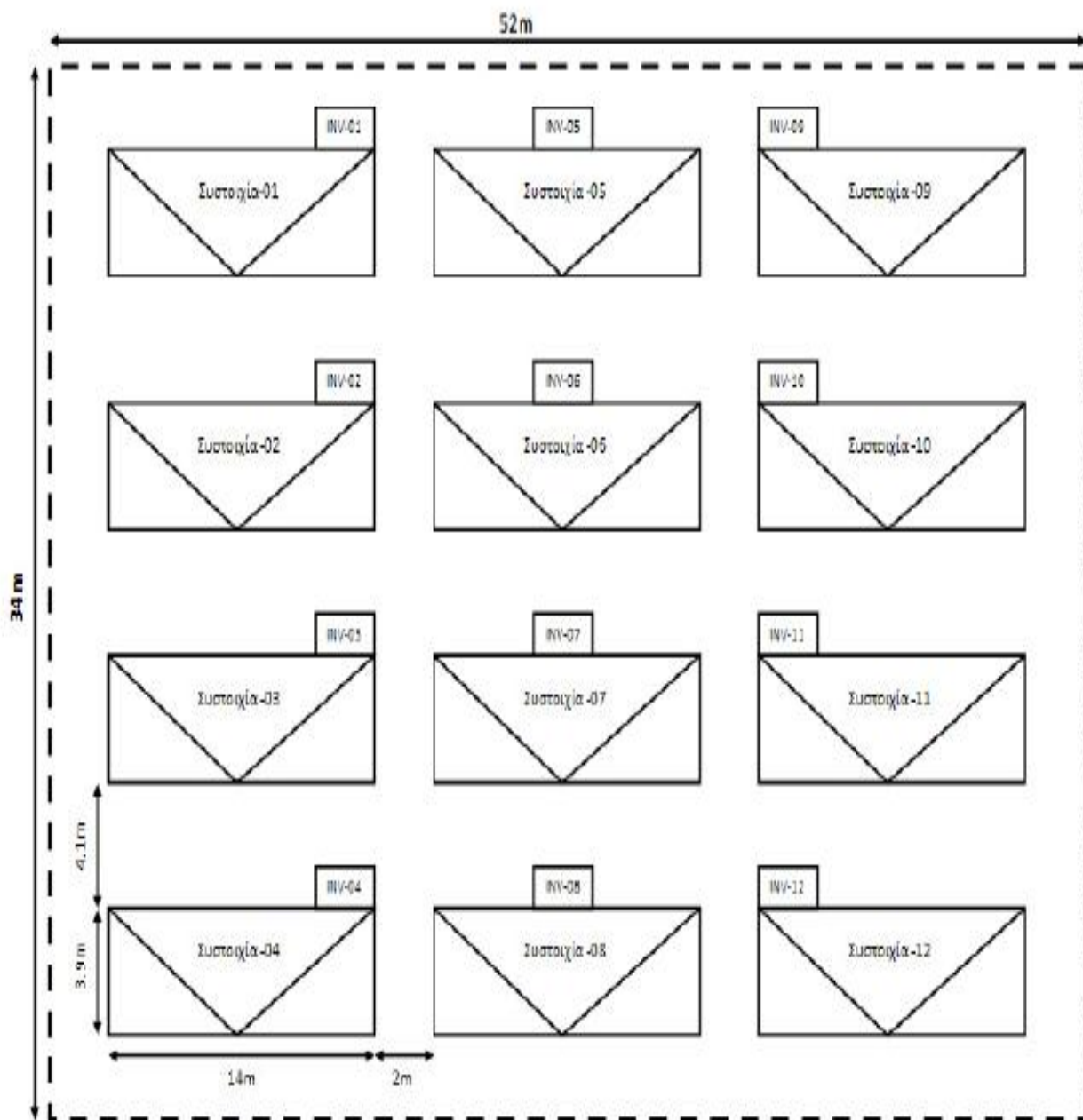
Η επιλογή του τρίτου τρόπου τοποθέτησης, δηλαδή η οριζοντίωση όλων των συστοιχιών μπορεί να δημιουργήσει κατασκευαστικά προβλήματα και προβλήματα αντοχής των βάσεων στήριξης, ειδικά στη περίπτωση που επιλεγεί να τοποθετηθούν πολλές συστοιχίες κατά τη διεύθυνση A-Δ. Μια τέτοια επιλογή θα σήμαινε ότι η ανατολικότερη συστοιχία θα απαιτούσε μια μεγάλη υπερύψωση, η οποία θα ήταν τελείως μη πρακτική, αντιοικονομική και αντιαισθητική. Όσον αφορά τους άλλους δύο τρόπους θα μπορούσαν να υλοποιηθούν χωρίς μεγάλα προβλήματα. Η επιλογή του πρώτου τρόπου τοποθέτησης, δηλαδή ακολουθώντας την κλίση του εδάφους συνεπάγεται καταρχήν ότι όλες οι συστοιχίες θα σκιάζονται κατά τη δύση του ήλιου και για όσο χρονικό διάστημα το ύψος του γίνεται μικρότερο από τη γωνία κλίσης. Βέβαια στη περίπτωση που μελετάται, η κλίση είναι μικρή και η επίδραση της σκίασης τελείως αμελητέα. Επιπλέον η τοποθέτηση σύμφωνα με αυτόν τον τρόπο μπορεί να συναντήσει και κατασκευαστικές δυσκολίες ειδικά εάν η κλίση δεν είναι ομαλή κατά μήκος του άξονα A-Δ, καθώς και δυσκολίες κατά την τοποθέτηση των πλαισίων στις βάσεις. Τέλος ο δεύτερος τρόπος τοποθέτησης, εξασφαλίζει ότι οι δυτικότερες συστοιχίες δεν θα σκιάζονται καθόλου, αλλά προκύπτουν προβλήματα σκίασης μεταξύ των άλλων συστοιχιών (Σχήμα 3.8).[6]



Σχήμα 3.8

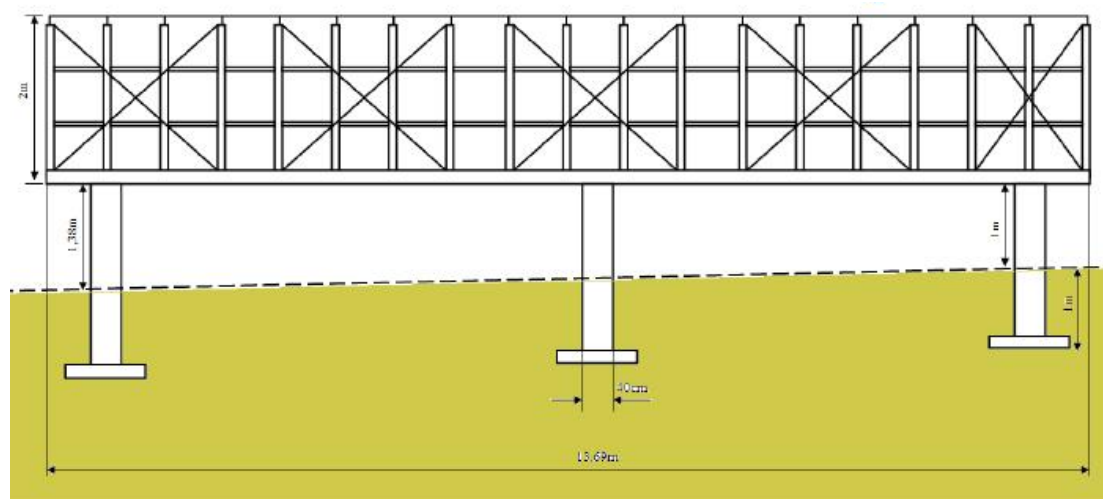
Σκίαση από διπλανή συστοιχία κατά τη διεύθυνση A-Δ.

Αν επιλεγεί η ελεύθερη ζώνη μεταξύ δύο συνεχόμενων συστοιχιών κατά τον άξονα Α-Δ να είναι 2m, τότε οι συνολικές απώλειες λόγω σκίασης είναι μόλις 0,21%. Τελικά επιλέγεται ο δεύτερος τρόπος τοποθέτησης καθώς εμφανίζει τις λιγότερες κατασκευαστικές απαιτήσεις, οι απώλειες λόγω σκίασης είναι πολύ μικρές και αισθητικά είναι ο πιο άρτιος. Οι 12 συστοιχίες επιλέγονται να τοποθετηθούν σε τρεις σειρές των τεσσάρων συστοιχιών η κάθε μια.



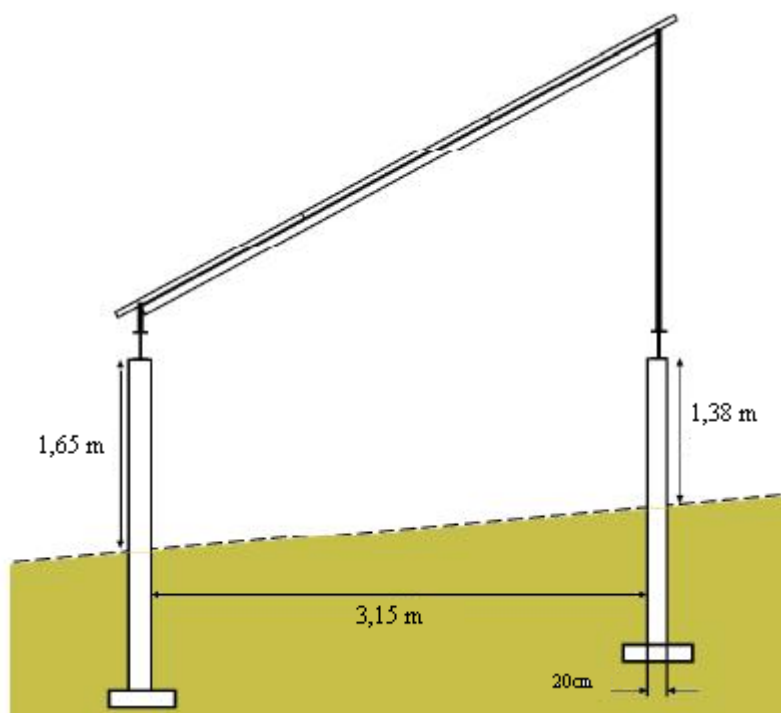
Σχήμα 3.9

Τοπογραφική διάταξη του φ/β σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 3.10

Διάταξη συστοιχίας, βάσεων στήριξης και στύλων στον χώρο (πίσω όψη).



Σχήμα 3.11

Διάταξη συστοιχίας, βάσεων στήριξης και στύλων στον χώρο (πλάγια όψη).

Η τοπογραφική διάσταση της εγκατάστασης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.9 (κάτοψη), στο οποίο μπορεί κανείς να διακρίνει και τα όρια της περιοχής που απαιτείται και τη θέση των αντιστροφών. Η περιοχή οριοθετείται από μια περίφραξη του χώρου με συρματόπλεγμα, το οποίο είναι απαραίτητο για να διαφυλάξει την εγκατάσταση ανέπαφη από τυχόν κινδύνους (π.χ. από οικόσιτα και άγρια ζώα).[6]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

#### Εφαρμογή 1

Υπολογίστε την ωριαία γωνία δύσης και τη διάρκεια της ημέρας στην Αθήνα ( $\varphi=37.97^\circ$ ), στις 18 Ιανουαρίου, 12 Μαΐου και 20 Δεκεμβρίου για ένα μη δίσεκτο έτος, για τις περιπτώσεις που αφορούν μια οριζόντια επιφάνεια καθώς και μια επιφάνεια με νότιο προσανατολισμό ( $\gamma=0^\circ$ ) και γωνία κλίσης  $\beta=30^\circ$ . [1]

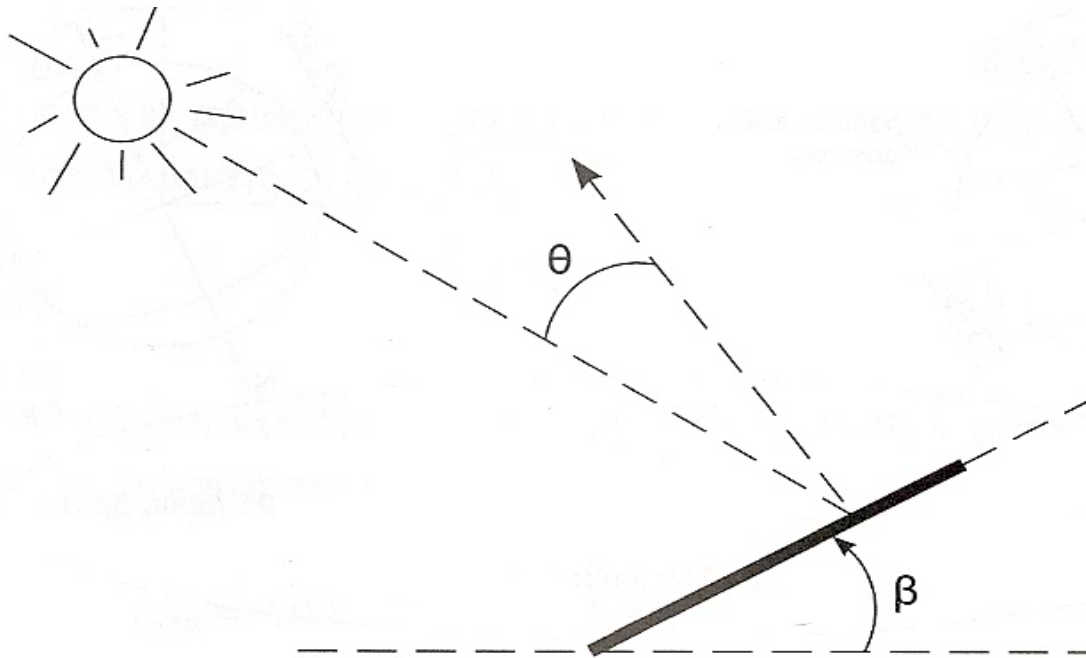
#### Απάντηση

Η διάρκεια της ημέρας "N" υπολογίζεται από τον αριθμό των θεωρητικών ωρών ηλιοφάνειας και δίνεται σε ώρες από την εξίσωση :

$$N = (2/15) * \omega_{ss} \quad (4.1)$$

όπου " $\omega_{ss}$ " είναι η ωριαία γωνία δύσης, υπολογίζεται και εξαρτάται από διάφορους γεωμετρικούς συντελεστές, όπως την κλίση της επιφάνειας αναφοράς " $\beta$ " (σχήμα 4.1), η οποία είναι η γωνία μεταξύ του επιπέδου της επιφάνειας αναφοράς και του οριζόντιου επιπέδου, το γεωγραφικό πλάτος " $\varphi$ " της εκάστοτε υπό εξέταση περιοχής και την ηλιακή απόκλιση " $\delta$ " (σχήμα 1.2), δηλαδή τη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ευθείας που ενώνει τα κέντρα γης-ηλίου με το ελλειπτικό επίπεδο, μεταβάλλοντας τη γωνιακή θέση του ηλίου σε σχέση με το επίπεδο του ισημερινού κατά το ηλιακό μεσημέρι και μεταβάλλεται από  $23.45^\circ$  (θερινό ηλιοστάσιο) μέχρι  $-23.45^\circ$  (χειμερινό ηλιοστάσιο).



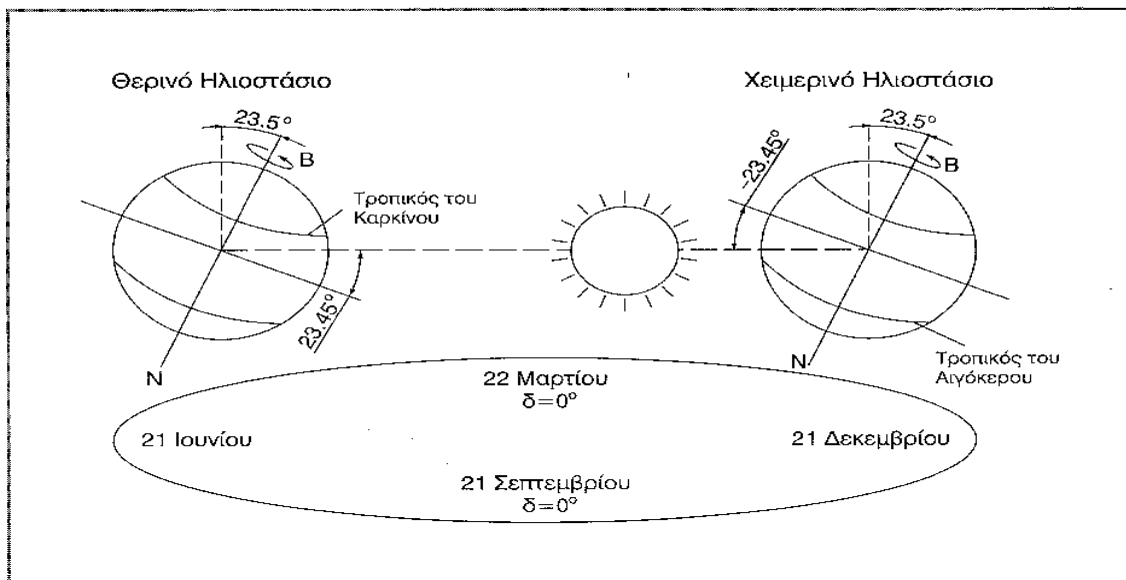


Σχήμα 4.1

Για τις 18 Ιανουαρίου υπολογίζεται ο αριθμός της ημέρας του έτους ως:  $D = 18$

Με αριθμητική αντικατάσταση για τον υπολογισμό της ηλιακής απόκλισης προκύπτει:

$$\delta = 23.45 \cdot \eta\mu \left( 360 \cdot \frac{18 + 284}{365} \right) = -20.731^\circ \quad (1.2.3)$$



Σχήμα 4.2: Ελλειπτική τροχιά της γης γύρω από τον ήλιο

Με αριθμητική αντικατάσταση στην εξίσωση για την ωριαία γωνία δύσης του ηλίου στο οριζόντιο επίπεδο προκύπτει ότι:

$$\text{για } \beta=0^\circ \quad \omega_{ss}=\cos^{-1}(-\tan 37.97 \cdot \tan(-20.731)) = 72.82^\circ \quad (4.2)$$

Αντίστοιχα, για  $\beta=30^\circ$  προκύπτει:

$$\omega_{ss}=\min[72.82^\circ, \cos^{-1}(-\tan(37.97-30) * \tan(-20.731))] \Rightarrow \omega_{ss}=\min [72.82^\circ, 86.96^\circ] \\ \Rightarrow \omega_{ss}=72.82^\circ \quad (4.3)$$

Άρα, η διάρκεια της ημέρας με αριθμητική αντικατάσταση στην (4.1) προκύπτει:

$$\text{για } \beta=0^\circ \text{ ή } \beta=30^\circ \quad N = (2/15)*72.82=9.709 \quad \text{ή} \quad N=9\text{h}43\text{min} \\ (4.4)$$

Αντίστοιχα, εφαρμόζοντας τις παραπάνω σχέσεις για τις 12 Μαΐου ενός μη δίσεκτου έτους, υπολογίζεται ο αριθμός ημέρας του έτους, οπότε και προκύπτει:

$$D = 31+28+31+30+12= 132 \quad (4.5)$$

Στη συνέχεια με αριθμητική αντικατάσταση στην εξίσωση (1.2.3) για τον υπολογισμό της ηλιακής απόκλισης προκύπτει:

$$\delta=18.043^\circ \quad (4.6)$$

Με αριθμητική αντικατάσταση στην εξίσωση (4.1) για την ωριαία γωνία δύσης του ηλίου προκύπτει ότι:

$$\text{για } \beta=0^\circ \quad \omega_{ss}=104.73^\circ \quad (4.7)$$

$$\text{για } \beta=30^\circ \quad \omega_{ss} = \min[104.73^\circ, 92.61^\circ] \Rightarrow$$

$$\omega_{ss}=92.61^\circ \quad (4.8)$$

Άρα, η διάρκεια της ημέρας με αριθμητική αντικατάσταση στην (4.1) προκύπτει:

$$\text{Για } \beta=0^\circ \quad N=13.96 \quad \text{ή} \quad N=13\text{h}58\text{min} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} \text{Για } \beta=30^\circ \quad N &= 12.349 \\ N &= 12\text{h}21\text{min} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Τέλος, εφαρμόζοντας τις παραπάνω σχέσεις και για τις 20 Δεκεμβρίου, υπολογίζεται ο αριθμός ημέρας του έτους, οπότε και προκύπτει:

$$\begin{aligned} D &= 31 + 28 + 31 + 30 + 31 + 30 + 31 + 31 + 30 + 31 + 30 + 20 \\ \Rightarrow D &= 354 \end{aligned} \quad (4.11)$$

Στη συνέχεια με αριθμητική αντικατάσταση στην εξίσωση (1.2.3) για τον υπολογισμό της ηλιακής απόκλισης προκύπτει:

$$\delta = -23.448^\circ \quad (4.12)$$

Με αριθμητική αντικατάσταση στην εξίσωση για την ωριαία γωνία δύσης του ηλίου προκύπτει ότι:

$$\text{για } \beta=0^\circ \quad \omega_{ss} = 70.21^\circ \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} \text{για } \beta=30^\circ \quad \omega_{ss} &= \min[70.21^\circ, 86.52^\circ] \Rightarrow \omega_{ss} = 70.21^\circ \\ (4.14) \end{aligned}$$

Άρα, η διάρκεια της ημέρας με αριθμητική αντικατάσταση στην (4.1) προκύπτει: Για  $\beta=0^\circ$  ή για  $\beta=30^\circ$   $N=9.362$  ή  $N=9\text{h}22\text{min}$

Πίνακας 4.1 : Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εφαρμογής

Ημερομηνία	Ωριαία γωνία δύσης		Διάρκεια ημέρας	
	$\beta=0^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=0^\circ$	$\beta=30^\circ$
18 Ιανουαρίου	72.82°	72.82°	9h 43min	9h 43min
12 Μαΐου	104.73°	92.61°	13h 58min	12h 21min
20 Δεκεμβρίου	70.21°	70.21°	9h 22min	9h 22min

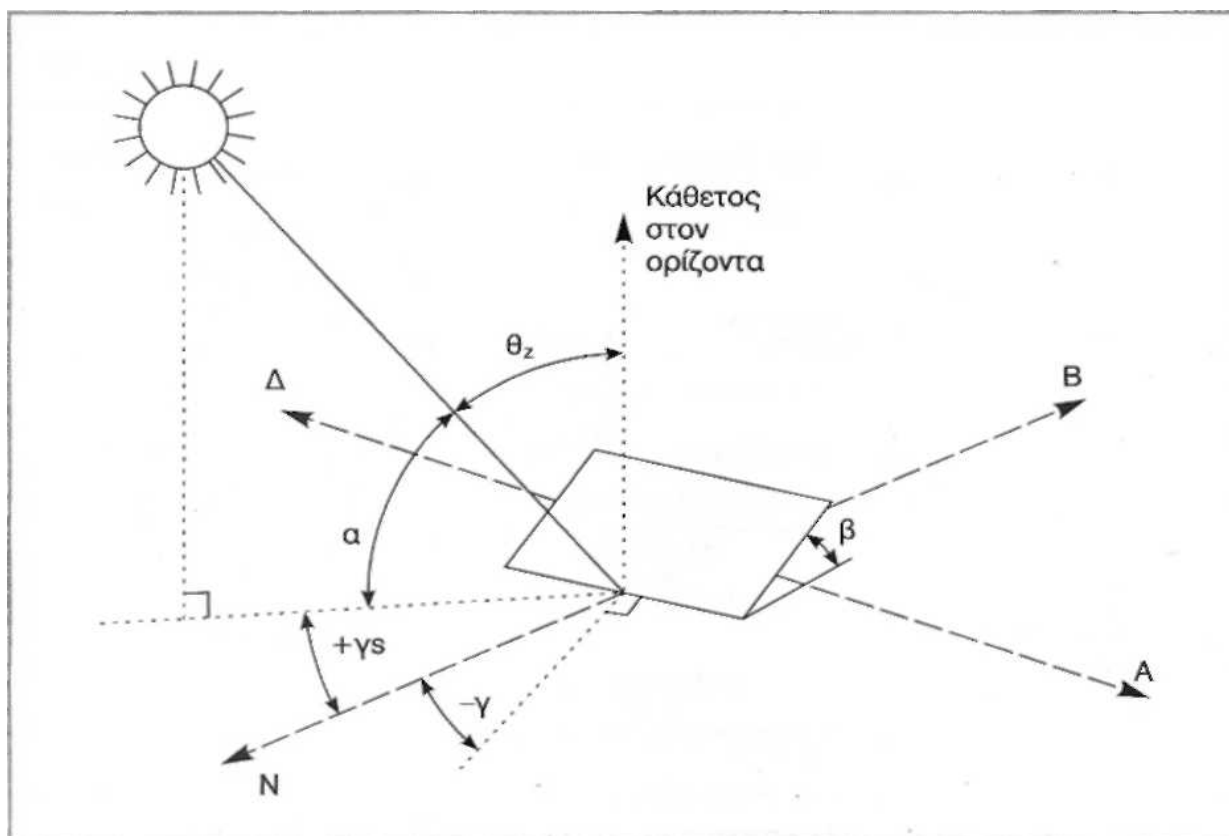
Συνοψίζοντας τις αριθμητικές τιμές των μεγεθών «ωριαία γωνία δύσης» και «διάρκεια ημέρας», προκύπτει ο Πίνακας 4.1:

### Εφαρμογή 2

Υπολογίστε τη ζενιθιακή γωνία στην Αθήνα ( $L = 23.75^\circ$ ,  $\varphi = 37.97^\circ$ ) στις 10:00 και στις 13:30 ενός μη δίσεκτου έτους για τις ημέρες: α) 10 Απριλίου β) 1 Νοεμβρίου.[1]

### Απάντηση

α) Ο νοητός άξονας, που τέμνει κάθετα τον ορίζοντα μιας περιοχής και εκτείνεται μέχρι τον ουράνιο θόλο, ονομάζεται τοπικό ζενίθ. Η γωνία μεταξύ του τοπικού ζενίθ και της ευθείας που ενώνει τη θέση του παρατηρητή ή μιας επιφάνειας



Σχήμα 4.3: Γωνιακές παράμετροι θέσης ήλιου – κεκλιμένης επιφάνειας

με τον ήλιο καλείται ζενιθιακή γωνία " $\theta_2$ ", σχήμα (4.3).

Η γωνία αυτή παίρνει τιμές μεταξύ  $0^\circ$ -  $90^\circ$  και υπολογίζεται συναρτήσει της ηλιακής απόκλισης, του γεωγραφικού πλάτους της περιοχής μελέτης και της ωριαίας γωνίας απόκλισης του ηλίου. Συνεπώς για τον υπολογισμό του " $\theta_2$ " θα πρέπει αρχικά να υπολογισθεί η ηλιακή απόκλιση και ο ηλιακός χρόνος.

$$\delta = 23.45 \eta \mu [360 * ((18 + 284) / 365)]$$

$$H.X. = T.X. \pm 4(L_{\sigma\tau} - L) + E_t$$

$$\sin \theta_2 = \sin \varphi * \sin \delta + \sin \omega * \eta \mu \delta$$

Όπου:

$E_t$  διορθωτική εξίσωση του χρόνου με τύπο  $E_t = 9.87 \cdot \sin(2 \cdot B) - 7.53 \cdot \cos 1.5 \cdot \sin B$

" $\varphi$ " είναι το γεωγραφικό πλάτος της εκάστοτε περιοχής

$L_{\sigma\tau}$  η τοπική ώρα

$L$  ο τοπικός μεσημβρινός

$T.X$  τοπικός χρόνος

$\omega$  ωριαία γωνία απόκλισης του ηλίου με τύπο  $\omega = 15^\circ \cdot (HX - 12:00)$

$HX$  ο αληθής ηλιακός χρόνος

$\delta$  η ηλιακή απόκλιση

$$\cos \theta = \sin \delta \cdot \sin \varphi - \cos \beta \cdot \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \quad (2.15)$$

$$E_t = 9.87 \sin(2(-70.220^\circ)) - 7.53 \cos(-70.220^\circ) - 1.5 \sin(-70.220^\circ) \Rightarrow$$

$$E_t = -7.423 \text{ min}$$

Αντικαθιστώντας τις αριθμητικές τιμές των μεγεθών στην εξίσωση (2.18), μετατρέποντας τις ώρες σε λεπτά, προκύπτει για την Αθήνα, που βρίσκεται στο ανατολικό ημισφαίριο, ότι:

$$H.X. = (11 - 60) - 4 \cdot (30 - 23.75) - 7.423 \Rightarrow$$

$$H.X. = 627.577 \text{min ή}$$

$$H.X. = 10\text{h}28\text{min} \quad (2.21)$$

Μετατρέποντας στη συνέχεια τον ηλιακό χρόνο σε ώρες, υπολογίζεται η ωριαία γωνία απόκλισης του ηλίου " $\omega$ " οπότε και προκύπτει

$$\omega = 15^\circ \cdot (10.46 - 12) \Rightarrow$$

$$\omega = -23.10^\circ \quad (2.22)$$

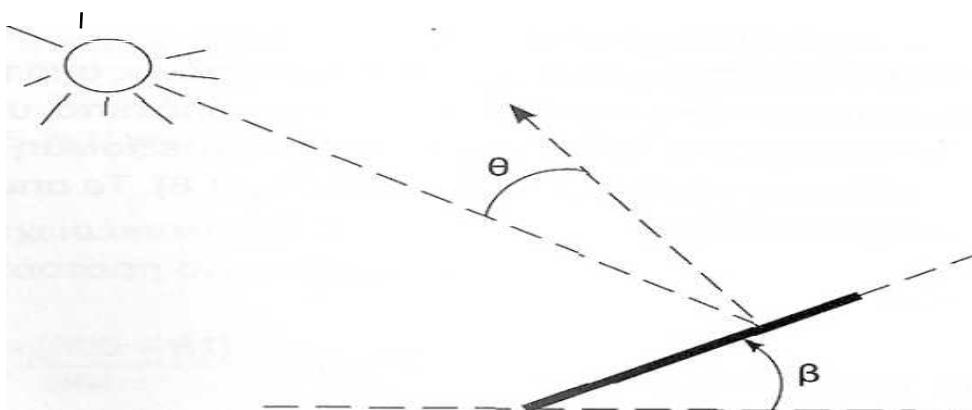
Συνεπώς, αντικαθιστώντας τις αριθμητικές τιμές των μεγεθών στην εξίσωση (1.4.1), προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \sin(-22.040) \cdot \sin 37.97 \cdot \cos 30 - \sin(-22.040) \cdot \cos 37.97 \cdot \sin 30 \cos (- \\ &10) + \cos(-22.040) \cdot \cos 37.97 - \cos 30 \cdot \cos(-23.10) + \cos(-22.040) \sin 30 \sin(-10) \\ &\sin(-23.10) + \cos(-22.040) \sin 37.97 \sin 30 \cos(-10) \cos(-23.10) \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\cos\theta = 0.818, \text{ άρα } \theta = 35.15^\circ$$

Εφαρμογή 3

Υπολογίστε τη γωνία πρόσπτωσης " $\theta$ " της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (σχήμα 1.4.1) σε μια επιφάνεια με κλίση  $\beta=30^\circ$  μοίρες και με προσανατολισμό  $70^\circ$  Ανατολικά



Σχήμα 4.4: Γωνίες κλίσης-πρόσπτωσης

από το Νότο, στην Αθήνα ( $\varphi=37.97^\circ$ ) στις 10 Ιανουαρίου και 10 Ιουλίου δίσεκτου έτους και ώρα 11:00. [1]

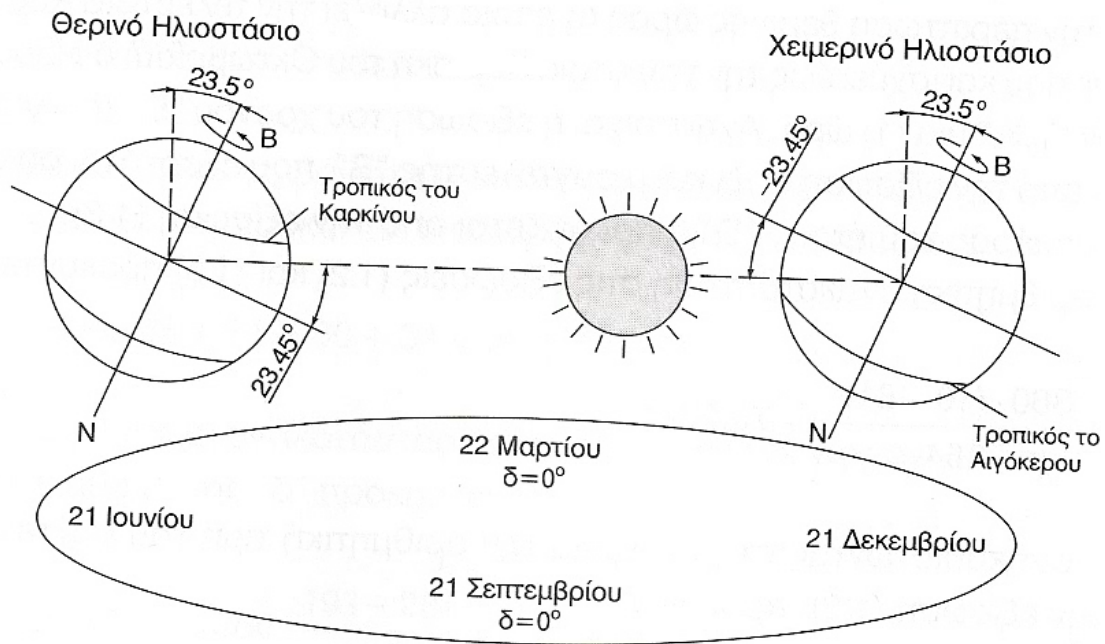
Απάντηση

Η γωνία πρόσπτωσης " $\theta$ " της ηλιακής ακτινοβολίας (σχήμα 1.4) είναι η γωνία που ορίζεται μεταξύ της καθέτου στην επιφάνεια και της διεύθυνσης της ακτινοβολίας. Η εν λόγω γωνία καθορίζει την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης " $\theta$ " υπολογίζεται από την εξίσωση :

$$\cos\theta = \sin\delta \cdot \sin\varphi - \cos\beta \cdot \sin\delta \cdot \cos\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega + \cos\delta \cdot \sin\varphi \cdot \sin\beta \cos\gamma \cos\omega \quad (3.15)$$

Η αριθμητική τιμή της γωνίας πρόσπτωσης εξαρτάται από την ηλιακή απόκλιση " $\delta$ ", το γεωγραφικό πλάτος " $\varphi$ ", την ωριαία γωνία απόκλισης του ηλίου " $\omega$ ", την κλίση " $\beta$ " και το αζιμούθιο " $\gamma=-10^\circ$ " της επιφάνειας μελέτης.

Η ηλιακή απόκλιση "δ" είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ευθείας που ενώνει τα κέντρα της γης-ηλίου με το ελλειπτικό επίπεδο μεταβάλλοντας τη γωνιακή θέση του ηλίου σε σχέση με το επίπεδο του ισημερινού κατά το ηλιακό μεσημέρι, αυτή μεταβάλλεται από 23.45° (θερινό ηλιοστάσιο) μέχρι -23.45° (χειμερινό ηλιοστάσιο) και υπολογίζεται βάσει της εξίσωσης (3.15) σχήμα(4.5)



Σχήμα 3.5

Πιο συγκεκριμένα, για τις 10 Ιανουαρίου, υπολογίζεται ο αριθμός της ημέρας του έτους ως:

$$D=10 \quad (3.16)$$

Με αριθμητική αντικατάσταση για τον υπολογισμό της ηλιακής απόκλισης προκύπτει:

$$d = 23,45 * \eta\mu [ 360 (10+284) / 365 ] = -22.040^\circ \quad (3.17)$$

Για τον υπολογισμό της ωριαίας γωνίας απόκλισης υπολογίζεται αρχικά ο αληθής ηλιακός χρόνος "H.X." από την εξίσωση ως:



$$H.X. = T.X. \pm 4(L_{\sigma\tau} - L) + E_t \quad (3.18)$$

Ο αληθής ηλιακός χρόνος "H.X." εξαρτάται από τον τοπικό χρόνο T.X.", το μεσημβρινό στον οποίο αναφέρεται η τοπική ώρα  $L_{\sigma\tau}$  τον τοπικό μεσημβρινό "L" και τη διορθωτική εξίσωση του χρόνου "E<sub>t</sub>". Στην εξίσωση (3.18) χρησιμοποιείται πρόσημο (-) στο ανατολικό ημισφαίριο και πρόσημο (+) στο δυτικό ημισφαίριο.

Για την περίπτωση θερινής ώρας (η οποία αλλάζει την τελευταία Κυριακή του Μαρτίου και ισχύει έως την τελευταία Κυριακή του Οκτωβρίου) αφαιρούμε από τον "T.X." μία (1) ώρα. Αντίστοιχα, η εξίσωση του χρόνου "E<sub>t</sub>" (σε λεπτά) και ο συντελεστής "B", που εξαρτάται από τον αριθμό ημέρας του έτους "D".

Με αριθμητική αντικατάσταση στις εξισώσεις προκύπτει ότι:

$$B = 360 * (10-81)/364 = -70.220^\circ \quad (3.19)$$

οπότε, αντικαθιστώντας στη συνέχεια την αριθμητική τιμή του συντελεστή "B" προκύπτει:

$$E_t = 9.87 \sin(2(-70.220^\circ)) - 7.53 \cos(-70.220^\circ) - 1.5 \sin(-70.220^\circ) \Rightarrow$$

$$E_t = -7.423 \text{ min} \quad (3.20)$$

Αντικαθιστώντας τις αριθμητικές τιμές των μεγεθών στην εξίσωση (3.18), μετατρέποντας τις ώρες σε λεπτά, προκύπτει για την Αθήνα, που βρίσκεται στο ανατολικό ημισφαίριο, ότι:

$$H.X. = (11 - 60) - 4 \cdot (30 - 23.75) - 7.423 \Rightarrow$$

$$H.X. = 627.577 \text{ min ή}$$

$$H.X. = 10\text{h}28\text{min} \quad (3.21)$$

Μετατρέποντας στη συνέχεια τον ηλιακό χρόνο σε ώρες, υπολογίζεται η ωριαία γωνία απόκλισης του ηλίου "ω" οπότε και προκύπτει:

$$\omega = 15^\circ \cdot (10.46 - 12) \Rightarrow$$

$$\omega = -23.10^\circ \quad (3.22)$$

Συνεπώς, αντικαθιστώντας τις αριθμητικές τιμές των μεγεθών στην εξίσωση (1.4.1), προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \sin(-22.040) \cdot \sin 37.97 \cdot \cos 30 - \sin(-22.040) \cdot \cos 37.97 \cdot \sin 30 \cos (-10) \\ &+ \cos (-22.040) \cdot \cos 37.97 - \cos 30 \cdot \cos(-23.10) + \cos(-22.040) \sin 30 \sin(-10) \\ &\sin(-23.10) + \cos(-22.040) \sin 37.97 \sin 30 \cos(-10) \cos(-23.10) \Rightarrow \\ \cos\theta &= 0.818, \text{ \acute{a}\rho\alpha } \theta = 35.15^\circ \end{aligned} \quad (3.23)$$

Ομοίως επαναλαμβάνεται ο υπολογισμός για τις 10 Ιουλίου ενός μη δίσεκτου έτους και προκύπτει ο αριθμός ημέρας του έτους ως:

$$D = 31 + 28 + 31 + 30 + 31 + 30 + 10 = 191 \quad (3.24)$$

Με αριθμητική αντικατάσταση για τον υπολογισμό της ηλιακής απόκλισης "δ" προκύπτει ότι:

$$\delta = 23.45 \cdot \eta\mu [360 \cdot (191 + 284)/365] = 22.239^\circ \quad (3.25)$$

Με αριθμητική αντικατάσταση για το συντελεστή "B" προκύπτει:

$$B = 360 \cdot (191 - 81)/364 = 108.791^\circ \quad (3.26)$$

Χρησιμοποιώντας ακολούθως τη διορθωτική εξίσωση του χρόνου "E<sub>t</sub>", μετά από αντικατάσταση του συντελεστή "B" προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} E_t &= 9.87 \cdot \sin(2 \cdot 108.791) - 7.53 \cdot \cos 108.791 - 1.5 \cdot \sin 108.791 \Rightarrow \\ E_t &= -5.014 \text{ min} \end{aligned} \quad (3.27)$$

Αντικαθιστώντας τις αριθμητικές τιμές των μεγεθών για T.X. = 11:00, μετατρέποντας τις ώρες σε λεπτά και αφαιρώντας 1 ώρα από τον τοπικό χρόνο λόγω θερινής ώρας, προκύπτει για την Αθήνα που βρίσκεται στο ανατολικό ημισφαίριο ότι:

$$H.X. = (11 \cdot 60 - 1 \cdot 60) - 4 \cdot (30 - 23.75) - 5.014 \Rightarrow$$

---

Πτυχιακή εργασία: Δημήτριου Δερβίση & Κωνσταντίνου Τζίμα

$$H.X. = 569.986 \text{ min ή}$$

$$H.X.=9h30min \quad (3.28)$$

Μετατρέποντας στη συνέχεια τον ηλιακό χρόνο σε ώρες, υπολογίζεται η ωριαία γωνία απόκλισης του ηλίου " $\omega$ " οπότε και προκύπτει:

$$\omega = 15^\circ \cdot (9.50-12) \Rightarrow$$

$$\omega = -37.50^\circ \quad (3.29)$$

Τέλος, για τον υπολογισμό της γωνίας πρόσπτωσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια με κλίση ( $\beta=30^\circ$ ) και αζιμούθια γωνία ( $\gamma=-10^\circ$ ) και με αριθμητική αντικατάσταση προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \sin(22.239) \sin 37.97 \cos 30 - \sin(22.239) * \cos 37.97 * \sin 30 \cos(-10) + \\ &\cos(22.239) \cos 37.97 * \cos 30 * \cos(-37.50) + \cos(22.239) \sin 30 * \sin(-10) \\ &* \sin(37.50) + \cos(22.239) \sin 37.97 * \sin 30 * \cos(10) \cos(37.50) \Rightarrow \cos\theta = 0.827 \end{aligned}$$

$$\text{άρα } \theta = 34.16^\circ \quad (3.30)$$



## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο σχεδιασμός ενός τεχνικού έργου είναι ένα σύνθετο πρόβλημα. Βασική παράμετρος για όλα τα τεχνικά έργα υποδομής είναι ο υπολογισμός τους σε βάθος χρόνου. Ειδικότερα για ένα έργο υποδομής ενέργειας ο τρόπος τοποθέτησής του πρέπει να αξιολογείται σε βάθος χρόνου και όχι στιγμιαία. Αυτό οφείλεται στο ότι οι παράγοντες επισκίασης, οι οποίοι και επηρεάζουν την απόδοση των διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων, δεν προβλέπονται στιγμιαία αλλά αποτελούνται από πολλούς επιμέρους παραμέτρους. Οι παράμετροι αυτοί εξαρτούνται από μέρη όπως τη γεωγραφική τοποθεσία που είναι εγκαταστημένο ένα φωτοβολταϊκό πάρκο, τις καιρικές συνθήκες της περιοχής αυτής κ.α. Τους διάφορους τρόπους τοποθέτησης των συλλεκτών με βασική απαίτηση τη μεγιστοποίηση της ημερησίως συλλεγόμενης ηλιακής ενέργειας, από το συλλέκτη και την μέγιστη απόσβεση των παραγόντων επισκίασης που τον επηρεάζουν, προσδιορίζονται κατά αρχήν από τις σφαιρικές συντεταγμένες του, δηλαδή το γεωγραφικό πλάτος και μήκος της περιοχής που είναι τοποθετημένοι. Επιπλέον πρέπει να εξεταστούν οι εποχιακές αλλαγές της ηλιακής ακτινοβολίας της περιοχής, οι οποίες οφείλονται στη γωνία που σχηματίζει ο άξονας της γης με τον κάθετο στην ελλειπτική τροχιά της άξονα. Η γωνία αυτή καλείται ηλιακή απόκλιση, συμβολίζεται με "δ" και μεταβάλλεται από  $23.5^\circ$  (θερινό ηλιοστάσιο) μέχρι  $-23.5^\circ$  (χειμερινό ηλιοστάσιο). Σημαντικός παράγοντας για τη βελτιστοποίηση της συλλογής ηλιακής ενέργειας και απόσβεσης των παραγόντων επισκίασης είναι η αζιμούθια γωνία, που είναι η γωνία μεταξύ του τοπικού μεσημβρινού (νότος) και της προβολής της καθέτου ευθείας μιας επιφάνειας πάνω στον ορίζοντα και καθορίζει τον προσανατολισμό της επιφάνειας του φωτοβολταϊκού σώματος. Επιπλέον πρέπει να λάβουμε υπόψη την γωνία πρόσπτωσης, όπου είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία που ενώνει ένα σημείο μιας κεκλιμένης επιφάνειας με τον ήλιο και από την κάθετη ευθεία στην κεκλιμένη επιφάνεια. Η γνώση βέβαια της γωνίας πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών είναι σημαντική στις εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας, διότι από την τιμή της γωνίας αυτής θα εξαρτηθεί το μέγεθος της ηλιακής ακτινοβολίας που θα δεχθεί η αντίστοιχη επιφάνεια. Έτσι όσο δηλαδή μικρότερη είναι η γωνία αυτή τόσο μεγαλύτερη είναι η ακτινοβολία που θα δεχθεί η επιφάνεια. Επιπλέον υπολογίζοντας και παράγοντες όπως η κλίση της πλαγιάς, η κλίση των πλαισίων, το ύψος της συστοιχίας των διασυνδεδεμένων

φωτοβολταϊκών και σε συνδυασμό με τη βέλτιστη τοποθέτηση των πλαισίων όσον αφορά την κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο και τον προσανατολισμό προς τον νότο, την ελάχιστη χρησιμοποίηση καλωδίων για τις ενώσεις μεταξύ των πλαισίων, των συστοιχιών των αντιστροφών και την αποφυγή φαινομένων σκίασης μεταξύ γειτονικών συστοιχιών καταφέρνουμε να επιτύχουμε το βέλτιστο βαθμό απόδοσης συλλογής ηλιακής ενέργειας από το φωτοβολταϊκό σώμα αλλά και την καλύτερη απόσβεση των παραμέτρων επισκίασης σε αυτό.

Έτσι πραγματοποιώντας τους παραπάνω υπολογισμούς είμαστε σε θέση να κατασκευάσουμε μηχανισμούς οι οποίοι οδηγούνται από κατάλληλες ηλεκτρονικές διατάξεις με βάση τις εξισώσεις κίνησης του ήλιου στην ουράνια σφαίρα, έτσι ώστε ο συλλέκτης να παρακολουθεί ανά πάσα στιγμή τον ήλιο επιτυγχάνοντας το καλύτερο δυνατόν βαθμό απόδοσης συλλογής της ηλιακής ενέργειας στην περιοχή όπου βρίσκεται, αλλά και τον μετριασμό του βαθμού επισκίασης που επιδρά σε αυτόν.

Τέλος περιοχές που εμφανίζουν αρνητική κλίση μεγαλύτερη από 10% κρίνονται ακατάλληλες, καθώς η απαιτούμενη απόσταση για την αποφυγή σκίασης από διπλανές συστοιχίες μεγαλώνει δραματικά για τέτοιες τιμές.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Υπολογιστικές εφαρμογές ήπιων μορφών ενέργειας, Καλδέλλης Ι. ,Σπυρόπουλος Γ. , Καββαδίας Κ. , εκδόσεις ΑΘ. ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ, Αθήνα 2007

[2] Μετατροπή της Ηλιακής Ενέργειας σε Ηλεκτρική με Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Νεοκλέους Α. ,Κωνσταντινίδη Σ., εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα 1991

[3] Σύγχρονες Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις, Μπιτζιώνης Β. ,εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη 2008

[4] Φωτοβολταϊκά Συστήματα, 2η Έκδοση, Φραγκιαδάκης Ι.Ε., Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη 2006

[5] Ηλεκτρισμός από Ηλιακή Ενέργεια, Thomas Markvart, Επιμέλεια Ελληνικής, Έκδοσης Παναγιώτης Σκούτζος, Εκδόσεις ΙΩΝ