



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

## **Μελέτη Φ/Β Εγκαταστάσεων με Συστήματα Ιχνηλάτησης (Trackers)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΟΠΕΛΛΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

Επιβλέπων καθηγητής:

Μηνάς Αλεξιάδης, Επίκουρος καθηγητής Α.Π.Θ.

Θεσσαλονίκη, Ιούλιος 2022



## **Πρόλογος**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται και αναλύεται η τεχνολογία του φωτοβολταϊκού ιχνηλάτη ή Solar tracker. Περιγράφονται οι πιο κοινές τεχνολογίες κατασκευής Φ/Β ιχνηλατών και στη συνέχεια γίνονται βιβλιογραφικές αναφορές, οι οποίες αφορούν τους πιο βασικούς παράγοντες στην σχεδίαση Solar tracker Φ/Β συστημάτων.

Ακολουθεί η σχεδίαση εφτά Φ/Β εγκαταστάσεων ισχύος 114 kW, στις οποίες συγκρίνονται Φ/Β πάρκα με διαφορετικό τύπο ιχνηλατήσες έχοντας σταθερή διάσταση και αξονική απόσταση (Pitch), ώστε να φανεί πως επηρεάζεται η απόδοση ενός συστήματος από τον τύπο ιχνηλατήσες.

Λέξεις-Κλειδιά: Φωτοβολταϊκά συστήματα, Solar Trackers PV, Φωτοβολταϊκά συστήματα ιχνηλατών, ηλιοστάτης

### **Ευχαριστίες**

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας κ. Μηνά Αλεξιάδη, για την εμπιστοσύνη και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τέτοιο επίκαιρο και ενδιαφέρον θέμα.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους μου για τις πληροφορίες που μου παρείχαν.

# Περιεχόμενα

1	Ήλιος και ηλιακή ακτινοβολία .....	6
1.1	Εισαγωγή.....	6
1.2	Ήλιος .....	7
1.3	Παραγωγή ενέργειας στον ήλιο .....	7
1.4	Ηλιακή ακτινοβολία .....	8
1.5	Η κίνηση της Γης γύρω από τον Ήλιο .....	10
1.6	Γεωγραφικά στοιχεία Γης .....	11
1.7	Ηλιακός Χρόνος.....	12
1.8	Ηλιακή Γεωμετρία.....	14
1.9	Το Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο.....	20
1.10	Συλλογή του ηλιακού φωτός .....	21
2	Βέλτιστη τοποθέτηση Φ/Β πλασίων και η επίδραση της.....	22
2.1	Βέλτιστη Κλίση Ανά Εποχή και Ανά Περιοχή .....	22
2.2	Βέλτιστος Προσανατολισμός.....	25
2.3	Ιστορική Αναδρομή των ιχνηλατών .....	27
3	Σύγκριση συστημάτων ιχνηλάτησης του ηλίου .....	35
3.1	Στοιχεία Σύγκρισης .....	36
3.2	Βήματα Σχεδίου Χωροθέτησης.....	37
3.3	Τυπικό Πάρκο με Σταθερά Φ/Β Πλαίσια .....	42
3.4	Ενός Οριζόντιου Άξονα E-W.....	42
3.5	Ενός Οριζόντιου Άξονα N – S .....	43
3.6	Ενός Οριζοντίου Άξονα N – S με κλίση .....	45
3.7	Ενός Κατακόρυφου Άξονα .....	47
3.8	Δύο Αξόνων Συνδυασμός Βορρά – Νότου και Ανατολής – Δύσης.....	49
3.9	Δύο Αξόνων Συνδυασμός Κατακόρυφου και Ανατολής – Δύσης.....	51
3.10	Αποτελέσματα .....	52
3.11	Συμπεράσματα.....	53
4	Βιβλιογραφία .....	55

# 1 Ήλιος και ηλιακή ακτινοβολία

## 1.1 Εισαγωγή

Ο Ήλιος είναι η πηγή ζωής του πλανήτη μας. Κύρια πηγή ενέργειας της Γης είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που προέρχεται από τον Ήλιο. Η ποσότητα ενέργειας που παρέχει είναι εξαιρετικά μεγάλη και η αξιοποίησή της είναι πολύ σημαντική ειδικά τώρα που τα ορυκτά καύσιμα λιγοστεύουν και η χρήση τους επηρεάζει το περιβάλλον αρνητικά.

Με τον όρο ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εννοούμε την ενέργεια που εκπέμπεται στο περιβάλλον από όλα τα σώματα με θερμοκρασία άνω του απόλυτου μηδενός με μορφή 2 ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Πρόκειται για ένα διαστάτο εγκάρσιο κύμα που έχει τη δυνατότητα να κινείται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός. Η ποσότητα της ενέργειας που εκπέμπεται είναι ανάλογη της θερμοκρασίας του σώματος.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία γενικά διαχωρίζεται με βάση το μήκος κύματος, δηλαδή την απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικές κορυφές του. Το εύρος των μηκών κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι άπειρο.

Ο ήλιος εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με σωματιδιακή μορφή αλλά κυρίως κυματική μορφή μήκους κύματος από 0,1 έως 4  $\mu\text{m}$ .

Ισχύς ή Ροή Ακτινοβολίας (Radiant Power - Radiant Flux) (P) Μετριέται σε Watt και εκφράζει τη ροή ενέργειας που εκπέμπεται από μία πηγή ανά μονάδα χρόνου (ισχύ) προς όλες τις κατευθύνσεις.

$$P = d(\text{Energy})/dt \text{ (W)}$$

Ένταση (Irradiance) (G) της ηλιακής ακτινοβολίας. Είναι ο ρυθμός με τον οποίο η ισχύς

ακτινοβολίας προσπίπτει πάνω σε μια επιφάνεια, ανά μονάδα επιφάνειας. Μετριέται σε  $\text{W}/\text{m}^2$ .

$$G = dP/dS \text{ (W}/\text{m}^2\text{)}$$

Η προσπίπτουσα ενέργεια σε μία επιφάνεια ανά μονάδα επιφάνειας (Irradiation or Radiant Exposure και συγκεκριμένα στην περίπτωση της ηλιακής ενέργειας Insolation), που υπολογίζεται ολοκληρώνοντας την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, συνήθως μια ώρα (σύμβολο I) ή μιας μέρας (σύμβολο H) μετριέται σε  $\text{J}/\text{m}^2$ .

## 1.2 Ήλιος

Ο Ήλιος, που είναι ο αστέρας του ηλιακού μας συστήματος, είναι μια σχεδόν σφαιρική μάζα αερίων που αποτελείτε κατά 73,56% από υδρογόνο, κατά 24,85% από ήλιο και κατά 1,69% από άλλα βαρύτερα στοιχεία. Το υδρογόνο αποτελεί το κύριο καύσιμο για τις θερμοπυρηνικές αντιδράσεις που παράγουν την ενέργεια που ακτινοβολεί, ενώ το ήλιο προέρχεται κυρίως από τα προϊόντα της πυρηνικής σύντηξης του υδρογόνου.

Στον πυρήνα του, ο ήλιος υπολογίζεται πως έχει θερμοκρασία περίπου 15 106 K. Η πυκνότητα των αερίων μειώνεται σε συνάρτηση με την ακτίνα του Ηλίου με ένα νόμο αντιστρόφου τετραγώνου.

Η επιφάνεια του ήλιου ονομάζεται φωτόσφαιρα και είναι η πηγή της περισσότερης ορατής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Η θερμοκρασία αυτής της περιοχής είναι 4000-6000 K. Μετά τη φωτόσφαιρα υπάρχουν διάφορα ακόμη στρώματα που αποτελούνται από αέρια σε υψηλή θερμοκρασία στα οποία όμως δεν λαμβάνει χώρα η πυρηνική σύντηξη.

Καθώς ο ήλιος αποτελείται από πλάσμα, δεν έχει σαφή επιφάνεια ούτε σταθερό μέγεθος, πρακτικά όμως η ακτίνα του Ηλίου μετριέται από το κέντρο του άστρου έως τη φωτόσφαιρα, και είναι περίπου 695.980 km.

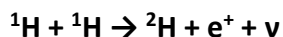
## 1.3 Παραγωγή ενέργειας στον ήλιο

Ο μηχανισμός με τον οποίο παράγεται το ήλιο ( $^4\text{He}$ ) από το υδρογόνο (p ή  $^1\text{H}$ ) στο εσωτερικό των άστρων, εξαρτάται από τη μάζα του άστρου.

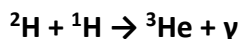
Δύο είναι τα βασικά είδη των θερμοπυρηνικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στις μάζες των άστρων. Η μία ονομάζεται κύκλος ή αλυσίδα πρωτονίου – πρωτονίου (p-p) και η άλλη κύκλος CNO. Άστρα που έχουν μάζα ίση ή μικρότερη από τη μάζα του Ήλιου μας, μετατρέπουν το υδρογόνο σε ήλιο κυρίως μέσω του **κύκλου πρωτονίου – πρωτονίου**.

Κατά τουλάχιστον 98%, λοιπόν, στο εσωτερικό του Ήλιου παράγεται ενέργεια μέσω αυτής της σειράς διαδοχικών πυρηνικών αντιδράσεων σύντηξης ενώ μόνο το 2% προέρχεται από τη δεύτερη διαδικασία πυρηνικής σύντηξης, τον κύκλο CNO (carbon – nitrogen – oxygen)

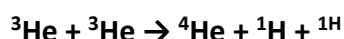
Στον κύκλο πρωτονίου – πρωτονίου αρχικά δυο πρωτόνια σχηματίζουν έναν πυρήνα δευτερίου (ισότοπο του υδρογόνου) παράγοντας ένα ποζιτρόνιο και ένα νεutrino



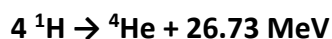
Στη συνέχεια ο πυρήνας του δευτερίου αντιδρά με άλλο πρωτόνιο σχηματίζοντας ένα ακόμη βαρύτερο πυρήνα, το  $^3\text{He}$  εκπέμποντας ταυτόχρονα ένα φωτόνιο



Και τέλος δυο πυρήνες  ${}^3\text{He}$  που έχουν σχηματιστεί με την προηγούμενη διαδικασία συντηκονται σχηματίζοντας ένα πυρήνα  ${}^4\text{He}$  και δυο πρωτόνια.



Το συνολικό αποτέλεσμα αυτών των πυρηνικών αντιδράσεων είναι η παραγωγή ενός πυρήνα ηλίου από τέσσερις πυρήνες υδρογόνου (πρωτόνια)



Στον πυρήνα του Ήλιου, που αποτελεί περίπου το 20% - 25% της ακτίνας του, συμβαίνει το σημαντικότερο ποσοστό των πυρηνικών συντήξεων ενώ πέρα από το 30% της ακτίνας του οι αντιδράσεις έχουν σταματήσει σχεδόν πλήρως. Η ενέργεια που εκλύεται από τις συντήσεις στο εσωτερικό του άστρου μεταφέρεται προς τα εξωτερικά στρώματα και τελικά διαφεύγει στο διάστημα.

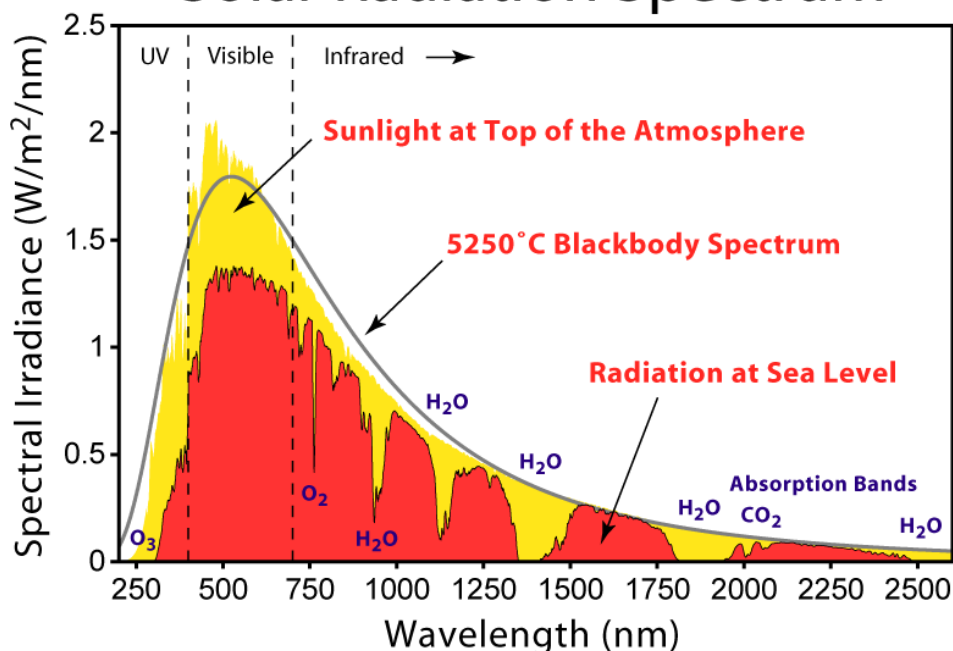
Υπολογίζεται πως κάθε δευτερόλεπτο περίπου 630 εκατομμύρια τόνοι H στον πυρήνα του Ήλιου μετατρέπονται σε 625 εκατομμύρια τόνους He και από τη διαφορά μάζας μεταξύ των δύο στοιχείων περίπου 5 εκατομμύρια τόνοι μετατρέπονται σε ενέργεια.

## 1.4 Ηλιακή ακτινοβολία

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο ήλιος εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με σωματιδιακή μορφή, που αποτελείται από ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια (πρωτόνια – νετρόνια) μικρής έντασης αλλά κυρίως κυματική μορφή μήκους κύματος 0,1 ως 4 μm. Θεωρείται πως το 99% της ηλιακής ενέργειας περιλαμβάνεται σε μήκη κύματος από 0,25 έως 4 μm.



# Solar Radiation Spectrum

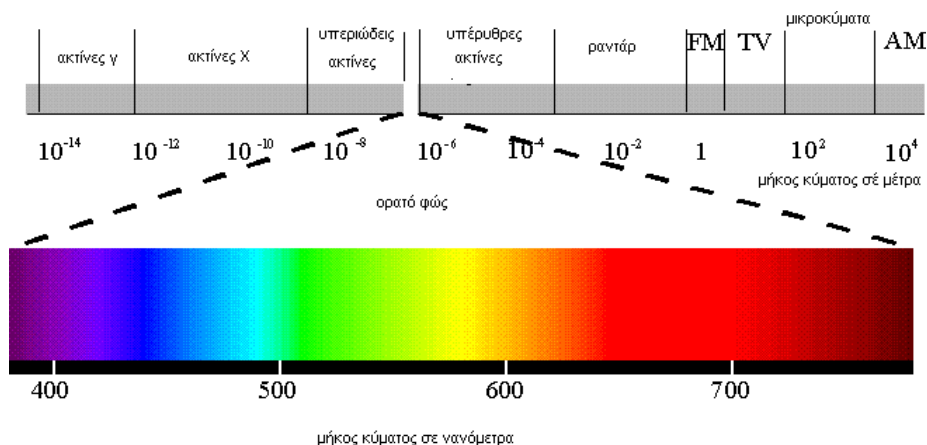


Εικόνα 1 Κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα και στην επιφάνεια της θάλασσας.

Στην Εικόνα 1 φαίνεται η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα και στην επιφάνεια της θάλασσας. Το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας βρίσκεται στα μικρά μήκη κύματος ορατής και υπεριώδους ακτινοβολίας.

Παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις ανάμεσα στο φασματικό περιεχόμενο της ακτινοβολίας στα όρια της ατμόσφαιρας και σε αυτό που έχει διαπεράσει την ατμόσφαιρα. Υπάρχει εμφανής εξασθένηση της, καθώς μόρια αερίων της ατμόσφαιρας απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία ως θερμότητα. Ενώ ένα μικρό μέρος αυτής της θερμότητας φτάνει στην επιφάνεια της Γης, η πλειοψηφία της ανακλάται πίσω στο διάστημα. Εμφανείς είναι επιπλέον οι βυθίσεις στο φάσμα της ακτινοβολίας που συμπίπτουν με την απορρόφηση από τα αέρια της ατμόσφαιρας, ιδίως στο κομμάτι της υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Ουσιαστικά όλη η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης βρίσκεται στη ζώνη μήκους κύματος 0,3-2,5  $\mu\text{m}$ . Η θερμική ακτινοβολία περιλαμβάνει μήκη κύματος μεταξύ 0,2 – 1000  $\mu\text{m}$ . Το ορατό τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μεταξύ 0,39 – 0,77  $\mu\text{m}$ .



Εικόνα 2 Μήκος κύματος στο οποίο βρίσκεται το ορατό φως (390-770 nm)

## 1.5 Η κίνηση της Γης γύρω από τον Ήλιο

Η κίνηση της Γης γύρω από τον Ήλιο μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες: την περιφορά της γύρω από τον Ήλιο σε ελλειπτική τροχιά και την περιστροφή της γύρω από τον άξονα της.

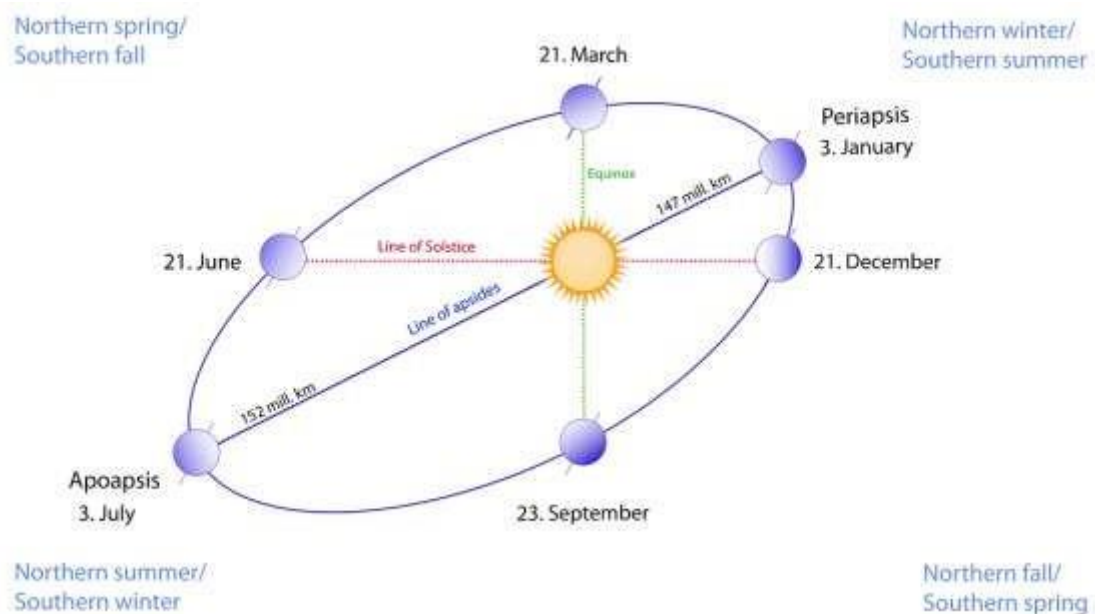
### Η περιφορά της γύρω από τον Ήλιο:

Ο Ήλιος βρίσκεται σε μέση απόσταση  $149,6 \cdot 10^6$  km από τη Γη. Το μήκος αυτό ορίζεται σαν μια αστρονομική μονάδα – 1 AU. Για να διανύσει αυτή την απόσταση το φως με την ταχύτητα των 300.000 km/s, απαιτούνται περίπου 8,5 min.

Λόγω του ότι η Γη κινείται γύρω από τον Ήλιο ακολουθώντας ελλειπτική τροχιά με μικρή εκκεντρότητα (δηλαδή μια σχεδόν κυκλική τροχιά), υπάρχει μια διακύμανση απόστασης κατά  $\pm 1,7\%$  της απόστασης Ήλιου – Γης μέσα στο έτος. Η πιο κοντινή απόσταση του από τη Γη είναι στις αρχές Ιανουαρίου ( $\approx 0,983$  AU) και ονομάζεται Περιήλιο ενώ η πιο μακρινή, στις αρχές Ιουλίου ( $\approx 1,017$  AU) ονομάζεται Αφήλιο. Η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη, λόγω αυτής της διακύμανσης απόστασης, είναι περίπου  $\pm 3,4\%$ .

### Η περιστροφή της γύρω από τον άξονα της:

Η Γη εκτελεί επίσης μια πλήρη περιστροφή γύρω από τον άξονά της με ρυθμό  $15^\circ$  ανά ώρα. Αυτή η περιστροφή προκαλεί τις ημερήσιες μεταβολές στα επίπεδα της ηλιακής ακτινοβολίας.



Εικόνα 3: Μεταβολή απόστασης Γης - Ήλιου σε ένα έτος

## 1.6 Γεωγραφικά στοιχεία Γης

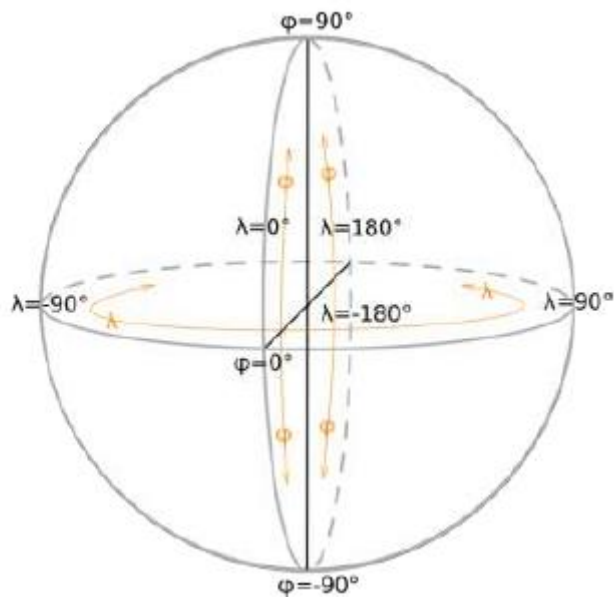
Ο σημαντικότερος παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει τελικά στην επιφάνεια της Γης είναι η θέση του ήλιου σε σχέση με το σημείο που δέχεται την ακτινοβολία.

Με βάση αυτή την αρχή διακρίνουμε τα παρακάτω γεωμετρικά στοιχεία.

### Γεωγραφικές συντεταγμένες

**Γεωγραφικό πλάτος** (latitude) ( $\phi$ ) ενός σημείου που βρίσκεται στην επιφάνεια της γης είναι η γωνία που σχηματίζει η κατακόρυφος του τόπου με το επίπεδο του ισημερινού. Χαρακτηρίζεται ως Βόρειο Β (North N) από  $0^\circ - 90^\circ$  ή Νότιο Ν (South S) ή  $0^\circ - 90^\circ$  Ν ανάλογα με το ημισφαίριο στο οποίο βρίσκεται το σημείο, με αρχή μέτρησης τον ισημερινό του οποίου το γεωγραφικό πλάτος είναι  $0^\circ$ .

**Γεωγραφικό μήκος** (longitude) ( $\lambda$ ) ενός σημείου στην επιφάνεια της γης είναι η γωνία που σχηματίζεται από το επίπεδο του μεσημβρινού που διέρχεται από το εν λόγω σημείο με το επίπεδο του πρώτου μεσημβρινού που διέρχεται από το Αστεροσκοπείο του Γκρήνουιτς στην Μεγάλη Βρετανία. Το γεωγραφικό μήκος χαρακτηρίζεται Ανατολικό Α (East E)  $0^\circ - 180^\circ$  Α ή Δυτικό Δ (West W)  $0^\circ - 180^\circ$  Δ ανάλογα σε ποιο ημισφαίριο βρίσκεται το σημείο.



Εικόνα 4: Γεωγραφικές συντεταγμένες

## 1.7 Ηλιακός Χρόνος

Σε όλους τους υπολογισμούς που σχετίζονται με την ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται ο πραγματικός ηλιακός χρόνος (ΗΧ), ο χρόνος δηλαδή του οποίου ο προσδιορισμός βασίζεται στη γωνιακή μετακίνηση του ήλιου σε σχέση με το μεσημβρινό στον οποίο βρίσκεται ο παρατηρητής.

Η Γη χωρίζεται σε 24 ζώνες, κάθε μία από τις οποίες έχει γεωγραφικό μήκος  $15^\circ$  (δηλαδή μία ώρα). Για κάθε μία από αυτές τις ζώνες χρησιμοποιείται ο ίδιος τοπικός χρόνος (ΤΧ)



Εικόνα 5: Ζώνες ώρας

Γενικά, ο πραγματικός ηλιακός χρόνος δε συμπίπτει με τον τοπικό χρόνο και είναι απαραίτητο να γίνουν οι παρακάτω δύο διορθώσεις.

1. Η σταθερή διόρθωση εξαιτίας της διαφοράς στο γεωγραφικό μήκος μεταξύ του τοπικού μεσημβρινού του παρατηρητή ( $L_t$ ) και του μεσημβρινού στον οποίο είναι βασισμένη η ζώνη χρόνου της περιοχής ( $L_{στ}$ ). Αυτή η διόρθωση είναι της τάξης των 4 λεπτών ανά μοίρα απόκλισης από τον σταθερό μεσημβρινό αφού ο Ήλιος χρειάζεται αυτόν τον χρόνο για να διανύσει  $1^\circ$  γεωγραφικού μήκους. Επίσης μπορεί να χρειαστεί και μία ακόμα διόρθωση για τη θερινή ώρα.

$$HX = TX \pm 4(\lambda_{στ} - \lambda_t) + E_t$$

Όλοι οι όροι στην παραπάνω εξίσωση πρέπει να μετατραπούν σε λεπτά. Το γεωγραφικό μήκος υπολογίζεται σε μοίρες  $0^\circ < \lambda < 180^\circ$ . Το θετικό πρόσημο (+) είναι για περιοχές δυτικά του Greenwich (δυτικό ημισφαίριο) ενώ το αρνητικό πρόσημο (-) είναι για περιοχές ανατολικά του Greenwich (ανατολικό ημισφαίριο).



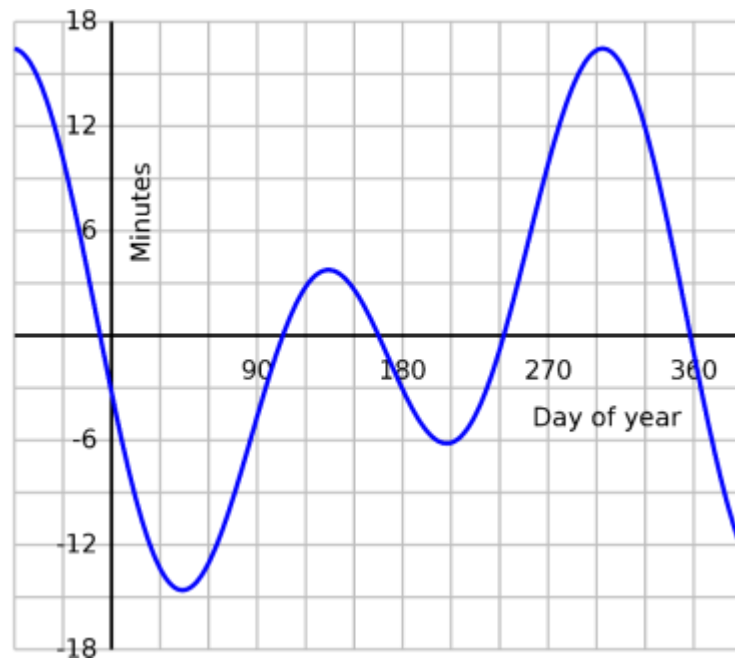
Εικόνα 6: Θερινή ζώνη ώρας

2. Η δεύτερη διόρθωση υπολογίζεται επίσης σε λεπτά από την εξίσωση του χρόνου  $E_t$  με την οποία λαμβάνονται υπόψιν οι διαταραχές στον ρυθμό περιστροφής της Γης λόγω της ελλειπτικής τροχιάς και της εκκεντρότητας της τροχιάς της Γης γύρω από τον Ήλιο (δηλαδή το κατά πόσο η πραγματική ελλειπτική τροχιά της Γης γύρω από τον Ήλιο διαφέρει από την θεωρητική κυκλική τροχιά)

$$E_t = 9,87 \sin 2B - 7,53 \cos B - 1,5 \sin B$$

$$\text{Όπου } B = \frac{360(D-81)}{364} \text{ και } 1 \leq D \leq 365.$$

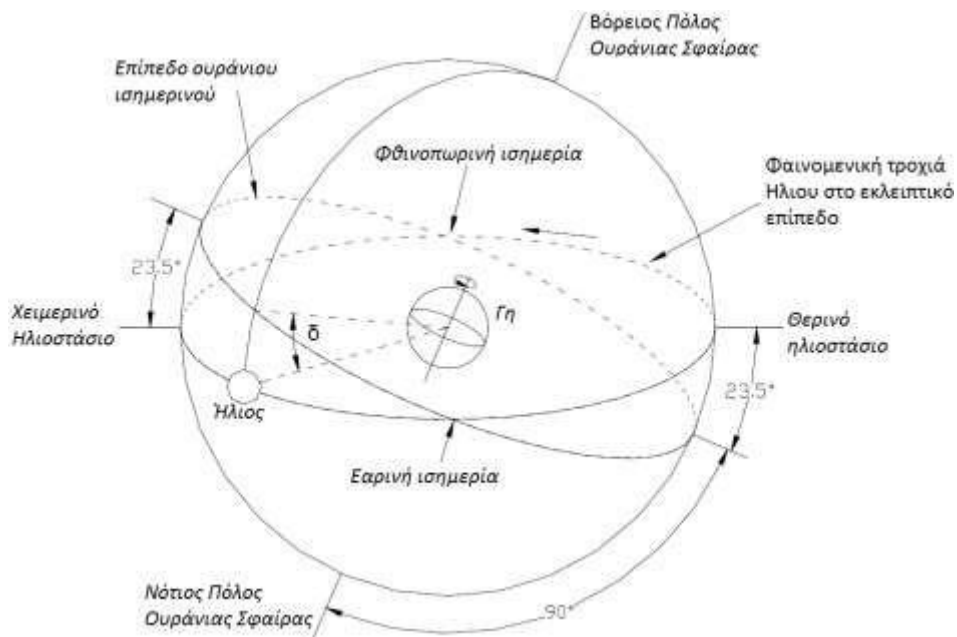
Η μεταβολή αυτή δεν είναι σταθερή και η ετήσια διακύμανση του  $E_t$  κατά τη διάρκεια του χρόνου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η παράμετρος μηδενίζεται 4 φορές στην περίοδο αυτή.



Εικόνα 7: Ετήσια διακύμανση εξίσωσης του χρόνου  $E_t$

## 1.8 Ηλιακή Γεωμετρία

Ονομάζουμε ουράνια σφαίρα την ιδεατή σφαίρα που περιβάλλει τη Γη επί της οποίας φέρονται να είναι καθηλωμένοι οι αστέρες. Εκλειπτικό είναι το νοητό επίπεδο περιφοράς του Ηλίου γύρω από τη Γη στην ουράνια σφαίρα, καθώς αυτός αλλάζει θέση στον ουρανό κατά τη διάρκεια ενός έτους. Ο άξονας περιστροφής της Γης σχηματίζει γωνία περίπου  $23,5^\circ$  με το εκλειπτικό επίπεδο. Η θέση αυτή του άξονα σε σχέση με το εκλειπτικό επίπεδο του ήλιου προκαλεί τις εποχιακές αλλαγές στην ηλιακή ακτινοβολία.



Εικόνα 8: Ουράνια σφαίρα



Ενώ η γωνία ανάμεσα στον άξονα περιστροφής και την εκλειπτική γραμμή παραμένει σταθερή, μεταβάλλεται συνεχώς η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της νοητής ευθείας που ενώνει τα κέντρα Γης και Ήλιου και της προβολής της στο επίπεδο του ισημερινού της Γης, δηλαδή στο επίπεδο που είναι κάθετο στον άξονα περιστροφής της. Αυτή η γωνία ονομάζεται ηλιακή απόκλιση και συμβολίζεται με  $\delta$ .

Είναι  $0^\circ$  στην εαρινή και φθινοπωρινή ισημερία που είναι στις 21 Μαρτίου και 23 Σεπτεμβρίου αντίστοιχα όπου δηλ. η διάρκεια της μέρας είναι ίση με τη διάρκεια της νύχτας.

Παίρνει μέγιστη τιμή  $+23,5^\circ$  στις 21 Ιουνίου όποτε έχουμε τη μεγαλύτερη ημέρα του έτους (θερινό ηλιοστάσιο), ενώ την ελάχιστη  $-23,5^\circ$  στις 21 Δεκεμβρίου που έχουμε τη μικρότερη ημέρα του έτους (χειμερινό ηλιοστάσιο) στο βόρειο ημισφαίριο της γης.

Κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου η μεταβολή της γωνίας  $\delta$  είναι μικρότερη από  $0,5^\circ$ . Συνεπώς εάν η ηλιακή απόκλιση θεωρηθεί σταθερή για 24 ώρες, έχουμε ένα μέγιστο σφάλμα στους υπολογισμούς των άλλων γωνιών που παρουσιάζονται στη συνέχεια της τάξης της  $0,5^\circ$ .

Η απλούστερη σχέση υπολογισμού της ηλιακής απόκλισης με ικανοποιητική ακρίβεια είναι η εξίσωση Cooper:

$$\delta = 23.5 * \sin \left( 360 \frac{(D + 284)}{365} \right)$$

όπου D η ημέρα του χρόνου (1-365)

### **Ωριαία γωνία ( $\omega$ )**

Η γωνιακή μετατόπιση του Ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού (Θέση του Ήλιου στις 12 το μεσημέρι είναι η μεσημβρία δηλαδή το μέσο της ημέρας σε πραγματικό ηλιακό χρόνο) εκφράζεται με την ωριαία γωνία ( $\omega$ )

Εξαιτίας της περιστροφής της Γης περί τον άξονα της κατά  $15^\circ$  ανά ώρα, κάθε χρονική στιγμή πριν και μετά τη μεσημβρία μπορεί να εκφραστεί είτε μέσω του ηλιακού χρόνου είτε μέσω της ωριαίας γωνίας για τους μαθηματικούς υπολογισμούς.

$$\omega = 15(HX - 12) [^\circ]$$

Η ωραία γωνία είναι  $0^\circ$  την μεσημβρία, έχει αρνητικές τιμές το πρωί και θετικές το απόγευμα.

### **Ζενιθιανή γωνία ( $\theta_z$ )**

Η ζενιθιανή γωνία ( $\theta_z$ ) ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που συνδέει την επιφάνεια με τον ήλιο και το ζενίθ. Υπολογίζεται από την σχέση

$$\cos \theta_z = (\sin \delta * \sin \phi) + (\cos \delta * \cos \phi * \cos \omega) = \sin \alpha$$

Όπου  $\phi$  = γεωγραφικό πλάτος της περιοχής,  $\omega$  = ωριαία γωνία για τη δεδομένη χρονική στιγμή,  $\delta$  = ηλιακή απόκλιση που υπολογίζεται για κάθε μέρα του χρόνου (D) και  $\alpha$  = ηλιακό ύψος.

### Ηλιακό ύψος ( $\alpha$ )

Ηλιακό ύψος ( $\alpha$ ) είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ευθείας που συνδέει τον ήλιο με τον παρατηρητή και το οριζόντιο επίπεδο ( $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ ). Ισχύει ότι  $\alpha = 90 - \theta_z$ , δηλαδή η γωνία είναι συμπληρωματική της ζενιθιανής.

Το ηλιακό ύψος μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια ενός έτους. Η θέση του Ήλιου και η ημερήσια πορεία του τον χειμώνα είναι χαμηλά στον ορίζοντα οπότε το ηλιακό ύψος έχει χαμηλές τιμές. Η φαινομενική εποχιακή διαφοροποίηση της θέσης του ήλιου στον ορίζοντα είναι αποτέλεσμα της ηλιακής απόκλισης, δηλαδή της μετατόπισης του άξονα περιστροφής της Γης σε σχέση με το επίπεδο πάνω στο οποίο κινείται η Γη γύρω από τον Ήλιο.

### Αζιμούθια γωνία ( $\gamma_s$ )

Η αζιμούθια γωνία ( $\gamma_s$ ) του Ήλιου ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ ( $\alpha$ ) της προβολής στο οριζόντιο επίπεδο της ευθείας που συνδέει τον ήλιο με την επιφάνεια και ( $\beta$ ) του μεσημβρινού του παρατηρητή ( $0^\circ \leq \gamma_s \leq 180^\circ$ ) με αρνητικές τιμές στα ανατολικά και θετικές στα δυτικά, ενώ ισούται με  $0^\circ$  όταν ο Ήλιος βρίσκεται ακριβώς στον νότο. Συνεπώς η αζιμούθια γωνία του Ήλιου περιγράφει τον προσανατολισμό (θέση) του Ήλιου σε σχέση με τον παρατηρητή που στρέφεται στο Νότο και δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma = \text{sign}(\omega) * |\cos^{-1} \frac{\cos\theta_z * \sin\phi - \sin\delta}{\sin\theta_z * \cos\phi}|$$

Όπου  $\text{sign}(\omega)$  είναι συνάρτηση πρόσημου της ωριαίας γωνίας  $\omega$ , που λαμβάνει τιμή +1 αν  $\omega > 0^\circ$ , τιμή -1 αν  $\omega < 0^\circ$  και 0 αν  $\omega = 0^\circ$ .

### Ωριαία γωνία δύσης ( $\omega_{ss}$ ) και ανατολής ( $\omega_{sr}$ )

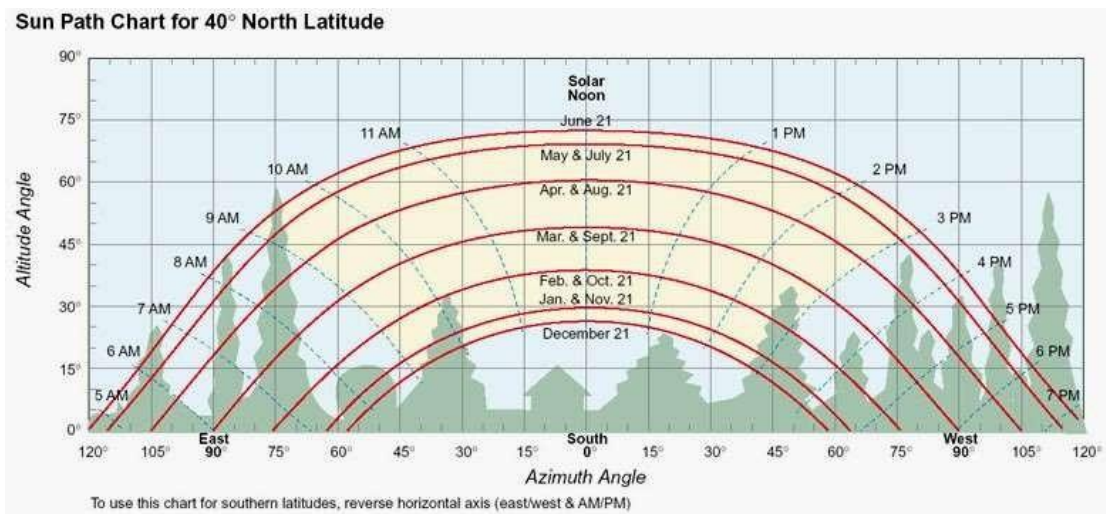
Η ωριαία γωνία δύσης ( $\omega_{ss}$ ) είναι η τιμή της ωριαίας γωνίας όταν ο Ήλιος δύει και δίνεται από τη σχέση

$$\omega_{ss} = \cos^{-1}(-\tan\phi * \tan\delta)$$

Η ωριαία γωνία ανατολής ( $\omega_{sr}$ ) αντίστοιχα, είναι η τιμή της ωριαίας γωνίας όταν ο Ήλιος ανατέλλει και έχει την ίδια απόλυτη τιμή με την ωριαία γωνία δύσης αλλά αντίθετο πρόσημο.

Συνεπώς, θεωρητικά οι συνολικές ώρες ηλιοφάνειας (N), μεταξύ ανατολής και δύσης του Ήλιου υπολογίζονται από τη σχέση  $N = 2 * \omega_{ss}/15$ .





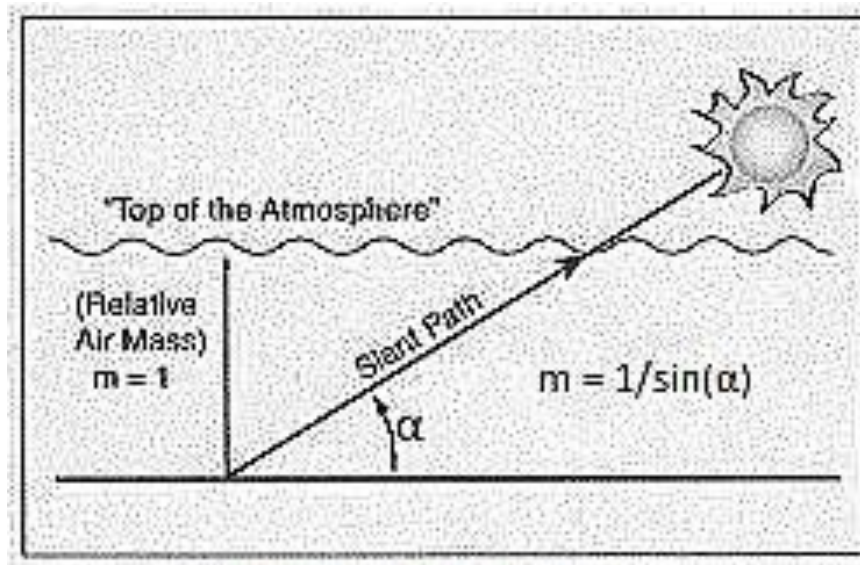
Εικόνα 9: Ηλιακό Ύψος και αζιμούθια γωνία στη διάρκεια ενός έτους

### Αέρια μάζα (m)

Η αέρια μάζα της ατμόσφαιρας την οποία πρέπει να διατρέξει η ηλιακή ακτινοβολία κατά την πορεία της μέσα από την ατμόσφαιρα είναι μία βασική παράμετρος που καθορίζει την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης. Η αέρια μάζα (m) είναι το πηλίκο του οπτικού πάχους της ατμόσφαιρας διαμέσου του οποίου περνά η άμεση ακτινοβολία ως προς το οπτικό πάχος της ατμόσφαιρας όταν ο Ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ. Αν υποθέσουμε πως η Γη είναι μια επίπεδη επιφάνεια με ομογενή και χωρίς διάθλαση ατμόσφαιρα, τότε η σχέση που δίνει την αέρια μάζα είναι

$$m = \frac{1}{\sin a} = \frac{1}{\cos \theta_z}$$

ενώ προφανώς εκτός της ατμόσφαιρας έχει τιμή 0.



Εικόνα 10: Αέρια μάζα

Το σφάλμα υπολογισμού της αέριας μάζας με την παραπάνω σχέση είναι 0,25% μέχρι  $\theta_z < 60^\circ$  και φτάνει το 10% για  $\theta_z = 85^\circ$ . Όταν η καμπυλότητα της ατμόσφαιρας είναι σημαντική δηλαδή σε χαμηλά ηλιακά ύψη, προτιμάται ο υπολογισμός της  $m$  να γίνεται με χρήση πινάκων.

Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος της ατμόσφαιρας διαμέσου της οποίας πρέπει να περάσει η ηλιακή ακτινοβολία, τόσο μεγαλύτερες οι απώλειες λόγω της εξασθένησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Όταν ο Ήλιος είναι χαμηλά στον ορίζοντα, όπως στην ανατολή και τη δύση του Ήλιου, το πάχος της ατμόσφαιρας είναι μεγαλύτερο συνεπώς η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μικρότερη.

### Κλίση ( $\beta$ )

Η κλίση της επιφάνειας σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο ορίζεται με τη γωνία κλίσης ( $\beta$ ), δηλαδή με τη γωνία μεταξύ του επιπέδου αναφοράς και του οριζοντίου επιπέδου. Η γωνία αυτή μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ  $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ .

### Αζιμούθιο ( $\gamma$ ) του επιπέδου

Ο προσανατολισμός της επιφάνειας καθορίζεται με το αζιμούθιο ( $\gamma$ ) που είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της προβολής της καθέτου στην κεκλιμένη επιφάνεια και του τοπικού μεσημβρινού πάνω στο οριζόντιο επίπεδο. Το αζιμούθιο είναι  $0^\circ$  όταν η προβολή της καθέτου στο οριζόντιο επίπεδο συμπίπτει με το Νότο, ενώ έχει αρνητικές τιμές προς την ανατολή και θετικές προς τη δύση ( $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ ). Η τριγωνομετρική σχέση μεταξύ του αζιμούθιου και των άλλων παραμέτρων δίνεται από τις σχέσεις:

$$\cos \gamma = \frac{\sin \alpha \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \varphi}$$

$$\sin \gamma = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha}$$

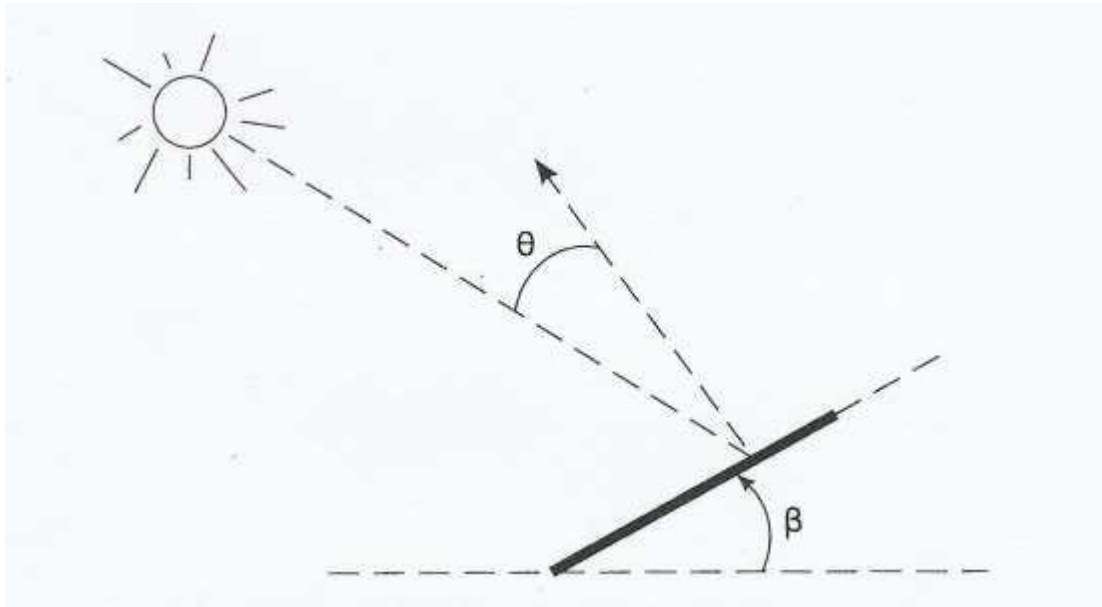
### Γωνία πρόσπτωσης ( $\theta$ )

Η γωνία πρόσπτωσης ( $\theta$ ) της ηλιακής ακτινοβολίας, πάνω σε μία κεκλιμένη επιφάνεια καθορίζει και την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η γωνία πρόσπτωσης είναι η γωνία που ορίζεται μεταξύ της καθέτου στην επιφάνεια και της διεύθυνσης της ακτινοβολίας. Υπολογίζεται από τις σχέσεις:

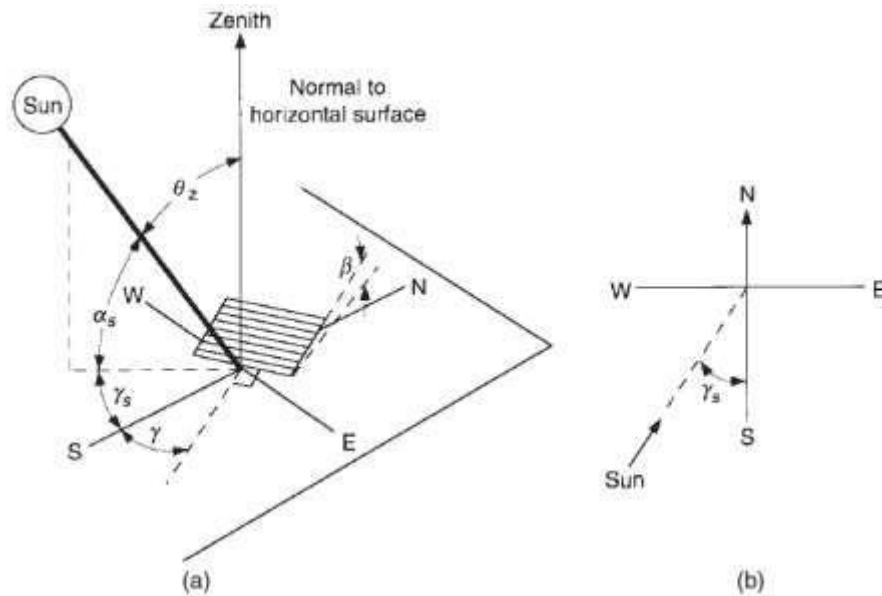
$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned}$$

και

$$\sin \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma)$$



Εικόνα 11: Γωνία πρόσπτωσης



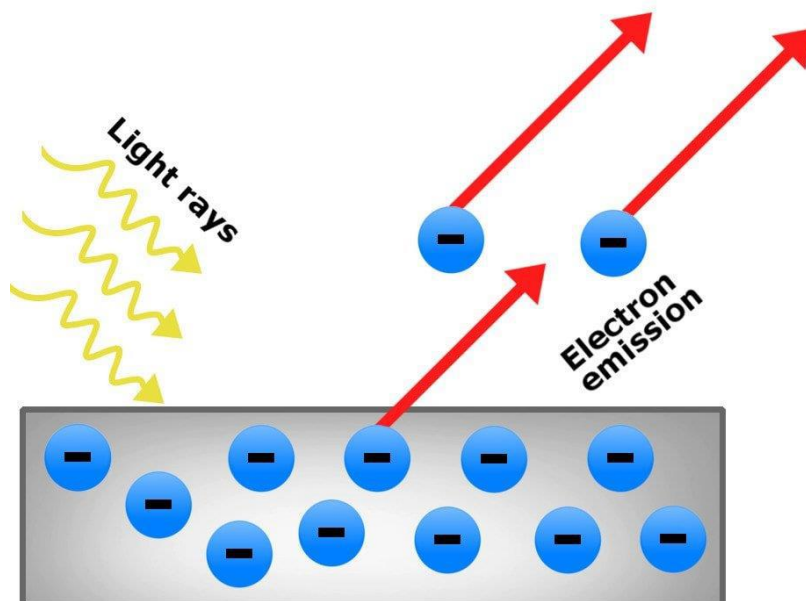
Εικόνα 12: Σύνοψη γωνιών

Συνοψίζοντας, η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια κεκλιμένη επιφάνεια αναφέρεται ως ( $\theta$ ) ενώ αντίστοιχα σε μία οριζόντια, η γωνία πρόσπτωσης ταυτίζεται με τη ζενιθιακή γωνία ( $\theta_z$ ). Για τον υπολογισμό της γωνίας πρόσπτωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν, πέρα από τις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν και αν δεν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια, γραφικές μέθοδοι προσδιορισμού των τιμών των γωνιών  $\theta$  και  $\theta_z$ .<sup>[1]</sup>

## 1.9 Το Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι μια διαδικασία κατά την οποία, όταν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, υπό ορισμένες συνθήκες, προσπέσει σε ένα σώμα, τότε απελευθερώνονται από το σώμα ηλεκτρόνια, τα λεγόμενα φωτοηλεκτρόνια. Πιο συγκεκριμένα, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο συνίσταται στην παρακάτω συμπεριφορά ενός φωτιζόμενου σώματος:

- Το σώμα φορτίζεται μόνο όταν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έχει συχνότητα μεγαλύτερη ή ίση από μια ορισμένη τιμή. Η τιμή αυτή ονομάζεται οριακή συχνότητα ή διαφορετικά Συχνότητα κατωφλίου  $f_0$ .
- Αν η συχνότητα της ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη ή ίση της συχνότητας κατωφλίου ο αριθμός των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται είναι ανάλογος της έντασης  $J$  της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.
- Η εκπομπή φωτοηλεκτρονίων από το μέταλλο γίνεται σχεδόν ταυτόχρονα με το φωτισμό της επιφάνειάς του. Το φαινόμενο αυτό είναι και η βασική αρχή λειτουργίας για παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, καθώς τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που παράγονται προσδίδουν την ηλεκτρική ενέργεια στο εκάστοτε συνδεδεμένο φορτίο.<sup>[2]</sup>



Εικόνα 13: Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

### 1.10 Συλλογή του ηλιακού φωτός

Ένα σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει ο σχεδιαστής μιας διάταξης ηλιακών συλλεκτών (οποιοδήποτε είδους) είναι το πού θα στερεωθούν οι βασικές μονάδες, αν θα στερεωθούν σε σταθερές θέσεις ή οι προσανατολισμοί τους θα ακολουθούν (ιχνηλατούν) την κίνηση του ήλιου.

Στις περισσότερες διατάξεις οι βασικές μονάδες στερεώνονται σ' ένα σταθερό κεκλιμένο επίπεδο με την πρόσοψη προς τον ισημερινό. Αυτό έχει το πλεονέκτημα της απλότητας, δηλαδή κανένα κινούμενο τμήμα και χαμηλό κόστος. Η άριστη γωνία κλίσης εξαρτάται κυρίως από το γεωγραφικό πλάτος, την αναλογία της διάχυτης ακτινοβολίας στην τοποθεσία και το είδος του φορτίου που πρέπει να εξυπηρετηθεί.

Στερεώνοντας τη διάταξη πάνω σε σύστημα με δύο άξονες παρακολούθησης του Ηλίου, μπορεί να συλλεχθεί μέχρι 25% περισσότερη ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια ενός έτους, σε σύγκριση με την εγκατάσταση σταθερής κλίσης. Κάτι τέτοιο όμως αυξάνει την πολυπλοκότητα και έχει ως αποτέλεσμα μια χαμηλότερης αξιοπιστίας και υψηλότερου κόστους συντήρησης. Η μονού άξονα παρακολούθηση (ιχνηλάτηση) είναι λιγότερο σύνθετη αλλά παρουσιάζει μικρότερο κέρδος. Ο προσανατολισμός μπορεί να ρυθμίζεται χειροκίνητα, όπου είναι εφικτό, αυξάνοντας έτσι τις όποιες απολαβές.

Έχει υπολογιστεί ότι σε κλίματα με μεγάλη ηλιοφάνεια μια διάταξη επίπεδης κινούμενης πλάκας που έχει κατάλληλη ρύθμιση ώστε να στρέφεται προς τον ήλιο δυο φορές την ημέρα και να παίρνει την κατάλληλη κλίση τέσσερις φορές το χρόνο, μπορεί να συλλαμβάνει το 95% της ενέργειας, που συλλέγεται με ένα σύστημα δυο αξόνων παρακολούθησης πλήρως αυτοματοποιημένο.

Το σύστημα παρακολούθησης είναι ιδιαίτερα σημαντικό στα συστήματα, που λειτουργούν με σκοπό τη συγκέντρωση του ηλιακού φωτός. Η δομή αυτών των

συστημάτων ξεκινά από έναν απλό σχεδιασμό (βασισμένο σε πλευρικούς ενισχυτικούς καθρέπτες) και φτάνει μέχρι τα συγκεντρωτικά συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούν υπερσύγχρονες οπτικές τεχνικές, για να αυξήσουν την είσοδο φωτός προς τα ηλιακά στοιχεία κατά μερικές τάξεις του μεγέθους. Αυτά τα συστήματα πρέπει να προνοούν για ένα σημαντικό γεγονός, ότι δηλαδή συγκεντρώνοντας το ηλιακό φως ελαττώνουν το γωνιακό άνοιγμα των ακτίνων, που το σύστημα μπορεί να δεχθεί. Η παρακολούθηση γίνεται απαραίτητη από τη στιγμή που ο λόγος συγκέντρωσης υπερβαίνει το 10 περίπου και το σύστημα μπορεί να μετατρέψει μόνο την άμεση συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας. <sup>[3] [4]</sup>

## 2 Βέλτιστη τοποθέτηση Φ/Β πλαισίων και η επίδραση της

### 2.1 Βέλτιστη Κλίση Ανά Εποχή και Ανά Περιοχή

Λόγω του ότι αλλάζει το ύψος του ηλίου κατά τη διάρκεια της χρονιάς, υπάρχει ερώτημα για το ποια είναι η βέλτιστη κλίση και ποιος ο βέλτιστος προσανατολισμός ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.

Η κλίση ενός Φ/Β πλαισίου (ή της επιφάνειας κάθε ηλιακού συλλέκτη) εξαρτάται καταρχάς από τις γεωγραφικές συντεταγμένες, δηλ. από το σε ποια χώρα του κόσμου βρισκόμαστε. Τα Φ/Β πλαίσια φυσικά δίνουν την υψηλότερη απόδοση ενέργειας όταν είναι στραμμένα προς στον ήλιο, ώστε οι ηλιακές να προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια των πλαισίων. Ο ήλιος είναι χαμηλός ή ψηλός ανάλογα με την ώρα της ημέρας και την εποχή. Για το λόγο αυτό η ιδανική γωνία δεν είναι ποτέ σταθερή. Για να απορροφά τη μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία το πλαίσιο καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, πρέπει να καθορίζεται σε ποια κατεύθυνση πρέπει να κοιτούν τα πλαίσια, και επίσης να υπολογίζεται η βέλτιστη γωνία κλίσης. Αυτό θα εξαρτάται από τα εξής:

- Σε ποια γεωγραφική τοποθεσία βρισκόμαστε
- Σε ποια ώρα/εποχή του χρόνου χρειαζόμαστε περισσότερη ενέργεια

Τα ηλιακά πλαίσια θα πρέπει να είναι πιο ανασηκωμένα κατά τη διάρκεια του χειμώνα για να κερδίσουν το μεγαλύτερο μέρος του χαμηλού χειμερινού ήλιου και πιο κεκλιμένα το καλοκαίρι για να μεγιστοποιήσουν την απόδοση. Ακολουθούν δύο απλές μέθοδοι για τον υπολογισμό της κατά προσέγγιση γωνίας κλίσης του πλαισίου ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος.

#### Πρώτη Μέθοδος Υπολογισμού

Η βέλτιστη γωνία κλίσης υπολογίζεται προσθέτοντας 15 μοίρες στο γεωγραφικό πλάτος κατά τη διάρκεια του χειμώνα και αφαιρώντας 15 μοίρες από το γεωγραφικό πλάτος κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Για παράδειγμα, εάν το γεωγραφικό πλάτος είναι 34° (στην Ελλάδα το γεωγραφικό πλάτος είναι 36°... 41°) , η βέλτιστη γωνία κλίσης για τα ηλιακά πλαίσια κατά τη διάρκεια του χειμώνα θα



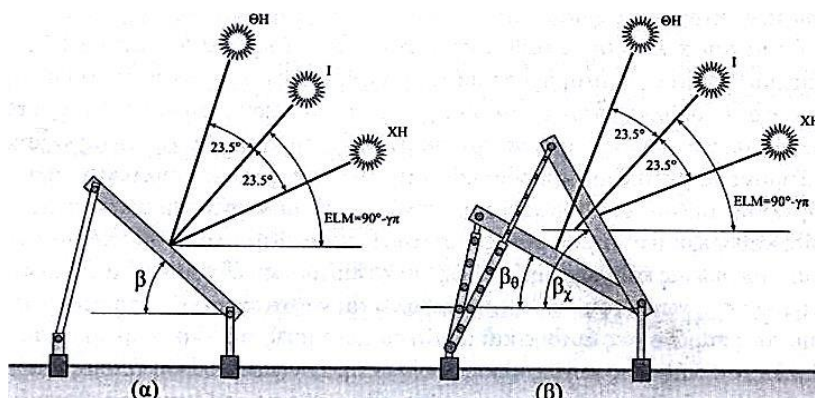
είναι  $34 + 15 = 49^\circ$ . Η καλοκαιρινή βέλτιστη γωνία κλίσης από την άλλη πλευρά θα είναι  $34 - 15 = 19^\circ$ .

### Δεύτερη Μέθοδος Υπολογισμού:

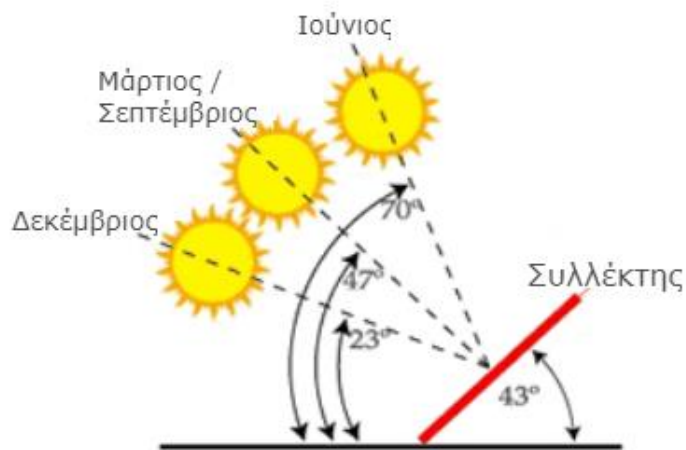
Η δεύτερη μέθοδος είναι μια βελτίωση της γενικής μεθόδου που δίνει καλύτερα αποτελέσματα. Σε αυτή τη μέθοδο, η βέλτιστη γωνία κλίσης για τα ηλιακά πλαίσια κατά τη διάρκεια του χειμώνα υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το γεωγραφικό πλάτος επί 0,9 και στη συνέχεια προσθέτοντας  $29^\circ$ . Στο παραπάνω παράδειγμα περίπτωσης γεωγραφικού πλάτους  $34^\circ$ , η γωνία κλίσης θα είναι  $(34 * 0,9) + 29 = 59,6^\circ$ . Αυτή η γωνία είναι  $10^\circ$  πιο απότομη από ό,τι στη γενική μέθοδο, αλλά πολύ αποτελεσματική στην αξιοποίηση του μεσημεριανού ήλιου που είναι ο πιο σημαντικός τις σύντομες μέρες του χειμώνα. Για το καλοκαίρι, η γωνία κλίσης υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το γεωγραφικό πλάτος επί 0,9 και αφαιρώντας  $23,5^\circ$ . Στο παραπάνω παράδειγμα περίπτωσης, αυτή η γωνία θα ήταν  $(34 * 0,9) - 23,5 = 7,1^\circ$ .

Για βέλτιστες γωνίες κλίσης κατά την άνοιξη και το φθινόπωρο, αφαιρούνται  $2,5^\circ$  από το γεωγραφικό πλάτος.

Ένα φωτοβολταϊκό σταθερής βάσης με ρυθμιζόμενη κλίση θα μπορούσε να εκμεταλλευτεί αυτό το γεγονός έχοντας μία κλίση για το καλοκαίρι και μία για το χειμώνα.



Εικόνα 14:(α) Βάση με σταθερή κλίση, (β) Βάση με ρυθμιζόμενη κλίση



Εικόνα 15: Ηλιακό Ύψος για διάφορους μήνες του χρόνου

Ημέρα/μήνας	Μοίρες
01/12 έως 10/01	40
10/01 έως 30/01	35
30/01 έως 10/03	30
10/03 έως 10/04	25
10/04 έως 01/05	20
01/05 έως 20/05	15
20/05 έως 10/06	10
10/06 έως 30/06	5
30/06 έως 20/07	10
20/07 έως 10/08	15
10/08 έως 30/08	20
30/08 έως 30/09	25
30/09 έως 10/11	30
10/11 έως 01/12	35

Πίνακας 1: Ιδανική ρύθμιση κλίσης για κάθε χρονική περίοδο ανά 40 μέρες



Περιοχή	Κλίση β
Ηράκλειο	25
Ρόδος	25
Νάξος	25
Τρίπολη	25
Ζάκυνθος	30
Χίος	25
Κέρκυρα	25
Λάρισα	25
Λήμνος	25
Καστοριά	30
Αλεξανδρούπολη	30
Σέρρες	30

Πίνακας 2 : Ιδανική σταθερή ρύθμιση κλίσης κατά τοποθεσία, από το νότο προς το βορρά. Αξίζει να σημειωθεί ότι μόνο το ένα τρίτο των τοποθεσιών χρησιμοποιούν  $\beta = 30^\circ$ .

Στον Πίνακα 1 φαίνεται, αν θα μπορούσε να αλλάξει η κλίση, ποια θα μπορούσε να ήταν η βέλτιστη κλίση ανά μήνα. Συνολικά εντός του έτους θα κυμαίνεται από 5 έως 40 μοίρες και θα έπρεπε να προσαρμόζεται περίπου κάθε 40 μέρες.


Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται η βέλτιστες σταθερή κλίση ανά πόλη όπως υπολογίστηκε μέσω κάποιου προγράμματος το οποίο δε λαμβάνει υπόψη αποκλειστικά το γεωγραφικό πλάτος κάθε πόλης, αλλά και τα ιδιαίτερα κλιματικά χαρακτηριστικά της, δηλ. το πόση ηλιοφάνεια ή συννεφιά εμφανίζεται σε κάθε μήνα στις συγκεκριμένη πόλη. <sup>[5] [6]</sup>

## 2.2 Βέλτιστος Προσανατολισμός

Ο βέλτιστος προσανατολισμός για της περιοχές που βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο (όπως και η Ελλάδα) είναι προς τον νότο.

Κανονικά ένα σύστημα στην Ελλάδα έχει νότιο προσανατολισμό και κλίση 25-30 μοίρες. Αν δεν έχει τον βέλτιστο αυτό συνδυασμό πέφτει η συνολική απόδοση του. Αυτό αναδεικνύεται στον Πίνακα 3.

Ένα οριζόντιο σύστημα δεν έχει προσανατολισμό και έχει πάντοτε 90% απόδοση σε σχέση με το βέλτιστο. Αντιθέτως η χειρότερη περίπτωση είναι ένα σύστημα το οποίο είναι κατακόρυφο. Ο χειρότερος συνδυασμός είναι να είναι κατακόρυφο και να είναι προσανατολισμένο προς το βορρά.

Προσανατολισμός	Κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο		
	0 °	30 °	90 °
			
Ανατολικός - Δυτικός	90	85	50
Νοτιοανατολικός- Νοτιοδυτικός	90	95	60
Νότιος	90	100	60
Βορειοανατολικός- Βορειοδυτικός	90	67	30
Βόρειος	90	60	20

Πίνακας 3 : Πτώση της απόδοσης ανάλογα με την κλίση και τον προσανατολισμό του συλλέκτη

Οι απώλειες λόγω κακής ευθυγράμμισης σε σχέση με τη βέλτιστη κλίση φαίνονται στον Πίνακα 4. Επίσης φαίνεται το πόσο κοστίζει μία απόκλιση από τη βέλτιστη κλίση. Είναι φανερό ότι για μία μικρή απόκλιση στην κλίση υπάρχει μία ελάχιστη απώλεια. Για παράδειγμα μια αστοχία 8° δίνει μία απώλεια μόλις 1%. <sup>[7]</sup>

Γωνία i	Ώρες <sup>[a]</sup>	Απώλειες
0°		0%
1°		0.015%
3°		0.14%
8°		1%
15°	1	3.4%
23.4° <sup>[b]</sup>		8.3%
30°	2	13.4%
45°	3	30%
60°	4	>50% <sup>[c]</sup>
75°	5	>75% <sup>[c]</sup>

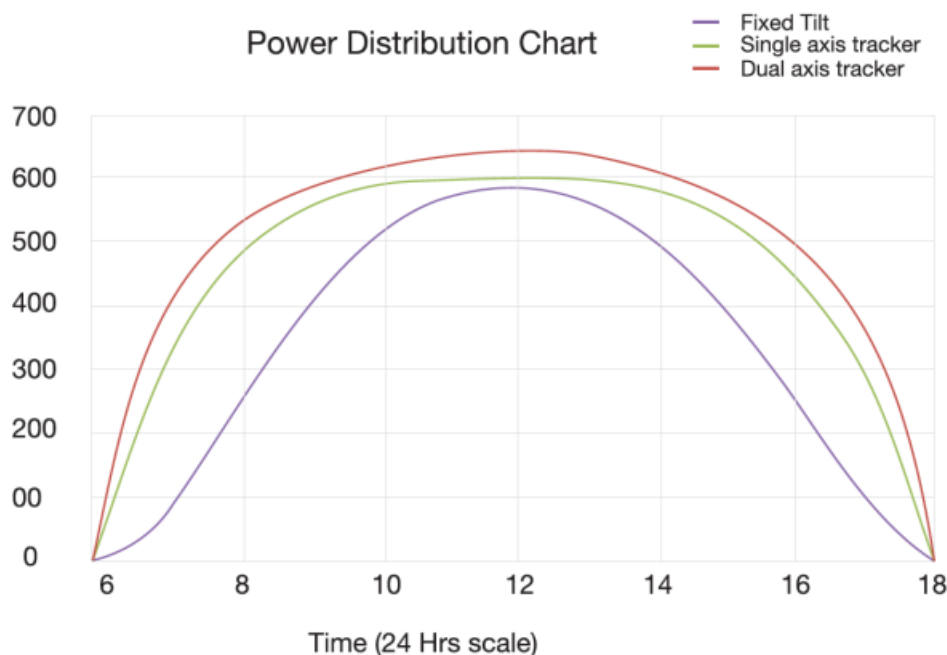
Πίνακας 4 : Απώλειες παραγωγής ενέργειας λόγω κακής ευθυγράμμισης

- a. Ώρες περιστροφής μακριά από μια ώρα (π.χ. μεσημέρι) κατά την οποία ο συλλέκτης είναι ευθυγραμμισμένος με ακρίβεια.
- b. Μέγιστη εποχιακή διακύμανση (στο θερινό ή χειμερινό ηλιοστάσιο), σε σύγκριση με την ακριβή ευθυγράμμιση στην ισημερία.
- c. Μεγαλύτερο λόγω της υψηλότερης ανάκλασης σε υψηλές γωνίες πρόσπτωσης.

## 2.3 Ιστορική Αναδρομή των ιχνηλατών

Είναι κατανοητό το πόση σημασία έχει τα φωτοβολταϊκά με σταθερή βάση να έχουν την βέλτιστη κλίση και τον βέλτιστο προσανατολισμό. Η τεχνολογία ιχνηλατών προσφέρει τη δυνατότητα παρακολούθησης του ήλιου, δηλαδή το φωτοβολταϊκό πλαίσιο να είναι κάθετο στην ηλιακή ακτινοβολία, για περισσότερο διάστημα στη διάρκεια της ημέρας.

Στην Εικόνα 16 φαίνεται πώς θα ήταν η ισχύς που θα απορροφούσε ένα φωτοβολταϊκό σταθερής βάσης αν μπορούσε να παρακολουθήσει τον ήλιο. Η κάποτε παραβολική καμπύλη αρχίζει και γίνεται πιο τραπεζοειδής.



Εικόνα 16 : Ημερήσια σύγκριση προσπίπτουσας ακτινοβολίας ( $W/m^2$ ) για σύστημα με σταθερή θέση (μπλε) και για σύστημα ιχνηλάτησης 1 (πράσινο) και 2 αξόνων (κόκκινο).

Η τεχνολογία ιχνηλάτησης ενός άξονα πρωτοπαρουσιάστηκε από την Array Technologies Inc. (ATI). Η Array ιδρύθηκε από τον Διευθύνοντα Σύμβουλο Ron Corio στην Αλμπουκέρκη της Αμερικής το 1989 για να επιδιώξει τις ευκαιρίες που παρουσιάστηκαν από τον τότε εκκολαπτόμενο τομέα της ηλιακής ενέργειας. Νωρίς,

ο Corio και η ομάδα του είχαν αναπτύξει μια καινοτόμο προσέγγιση στα συστήματα φωτοβολταϊκών μονάδων που ελαχιστοποιούσε την εξάρτηση από το ακριβό πυρίτιο. Αυτές οι πρώτες προσπάθειες προσέλκυσαν το ενδιαφέρον πολλών επενδυτών, συμπεριλαμβανομένου του Υπουργείου Ενέργειας των ΗΠΑ, για την ανάπτυξη ενός συστήματος παρακολούθησης υψηλής ακρίβειας για τον ηλιακό συλλέκτη. Προέκυψε το πρωτότυπο 1 kW ενός συλλέκτη σε έναν ιχνηλάτη της ΑΤΙ, έλαβε υψηλές βαθμολογίες σε μια αξιολόγηση του Υπουργείου, αλλά η πολιτική γραφειοκρατία εμπόδισε την απαραίτητη χρηματοδότηση για τη μετάβαση στην πιλοτική παραγωγή.

Η ΑΤΙ έκανε μια νέα πιλοτική διάταξη και παρουσίασε τον πανκατευθυντικό ανιχνευτή διπλού άξονα ως μια αποτελεσματική λύση για την τροφοδοσία απομακρυσμένων κατοικιών με ηλιακή ενέργεια. Αυτή τη φορά, η αναγνώριση για το προϊόν της ΑΤΙ ήρθε από το περιοδικό Home Power το 1991, το οποίο δοκίμασε τις λύσεις της ΑΤΙ και τις κάλυψε σε ένα άρθρο «Things That Work». Η συνεχής καινοτομία της εταιρείας οδήγησε σε μια σειρά από μοναδικές εφαρμογές.

Η τεχνολογία ιχνηλάτη συνέχισε να αναπτύσσεται ως βιώσιμη εναλλακτική λύση στη σταθερή κλίση για μεγάλους Φ/Β σταθμούς (της τάξης των MW), αν και υπήρξε μεγάλη συζήτηση στις αρχές της δεκαετίας του 2000 σχετικά με το εάν ήταν καλύτερο για τις επιχειρήσεις κοινής ωφελείας να ακολουθούν την τυπική επιλογή σταθερής κλίσης ή να εμπιστευθούν μια λιγότερο γνωστή τεχνολογία που υπόσχεται αύξηση παραγωγής. Ένα από τα μεγάλα ζητήματα σχετικά με την εφαρμογή ανιχνευτών αφορούσε τη συντήρηση: Πόσο συχνά αποτυγχάνουν αυτά τα κινούμενα μέρη; Πόσο κοστίζει ανά watt η συντήρηση αυτών των συστημάτων για 30 χρόνια;

Σήμερα, υπάρχει ομοφωνία σχετικά με τα οφέλη των ηλιακών ανιχνευτών για έργα μεγάλης κλίμακας—γι' αυτό ο κλάδος των ιχνηλατών βλέπει τέτοια ταχεία ανάπτυξη σε εγχώριο και διεθνές επίπεδο. Εμφανίζεται αρκετά και στην Ελλάδα σε επίπεδο αγοράς. <sup>[8] [9]</sup>

## 2.4. Τύποι συστημάτων παρακολούθησης του ήλιου

Ο τρόπος με τον οποίο κινείται μία Φ/Β επιφάνεια με σύστημα ιχνηλάτησης εξαρτάται από τον αντίστοιχο τύπο του συστήματος παρακολούθησης του ήλιου:

**Χειροκίνητοι φωτοβολταϊκοί ιχνηλάτες.** Προφανώς δεν είναι δυνατόν ανθρώπινο προσωπικό στην τοποθεσία της εγκατάστασης να ρυθμίζει σταδιακά τον προσανατολισμό και την κλίση του πλαισίου κατά τη διάρκεια της ημέρας έτσι ώστε να ακολουθεί την πορεία του ήλιου από ανατολή προς δύση, προκειμένου να αυξηθεί η συλλογή της ηλιακής ενέργειας.

Αντιθέτως είναι απολύτως εφικτό να ρυθμίζεται η κλίση των συλλεκτών πχ μια φορά το μήνα στην αντίστοιχη βέλτιστη τιμή της. Κάτι τέτοιο συμβαίνει διότι η βέλτιστη κλίση ενός φωτοβολταϊκού ως προς το οριζόντιο επίπεδο με κατεύθυνση προς το νότο διαφοροποιείται κατά τη διάρκεια του έτους. Σε αυτήν την περίπτωση οι βάσεις στήριξης είναι αρθρωτές και έχουν δυνατότητα ρύθμισης της γωνίας ως προς το οριζόντιο επίπεδο ανά πέντε ή και ανά μία μοίρα σε ένα εύρος 25-75 μοίρες.

Σε ορισμένες περιπτώσεις η ρύθμιση γίνεται εποχιακά με βάση την εποχιακή βέλτιστη κλίση της συγκεκριμένης περιοχής.



Εικόνα 17: Παράδειγμα Χειροκίνητου φωτοβολταϊκού ιχνηλάτη

**Παθητικοί φωτοβολταϊκοί ιχνηλάτες.** Στην κατηγορία των φωτοβολταϊκών με παθητική κίνηση του πλαισίου, αξιοποιείται κάποιο υγρό με χαμηλό σημείο βρασμού το οποίο όταν εκτίθεται σε ηλιακή ακτινοβολία εξατμίζεται και προκαλεί μια ανισορροπία με αποτέλεσμα η βάση να κλίνει προς την κατεύθυνση των ακτίνων του ήλιου. Τα πλεονέκτημα αυτών των φωτοβολταϊκών είναι ότι αποτελούνται από λιγότερα κινούμενα μέρη σε σύγκριση με τα ενεργά και έχουν χαμηλότερο κόστος συντήρησης καθώς δεν είναι επιρρεπή σε βλάβες σε ηλεκτρονικά εξαρτήματα και στο σύστημα ελέγχου.

Η πιο συνηθισμένη εφαρμογή βασίζεται σε ένα σετ δύο ενεργοποιητών γεμάτων με διογκώσιμο αέριο και μία διμεταλλική λωρίδα. Όταν φωτίζονται το ίδιο οι δύο ενεργοποιητές βρίσκονται σε ισορροπία μεταξύ τους. Διαφορετικός φωτισμός μεταξύ των ενεργοποιητών οδηγεί σε ανισορροπία δυνάμεων στο σύστημα και αυτό το οδηγεί σε μία νέα θέση όπου υπάρχει εξίσωση του φωτισμού και ισορροπία πλέον των δυνάμεων.

Οι καλύτερες γεωγραφικές τοποθεσίες για να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα με παθητικά τράκερ είναι κοντά στον ισημερινό λόγω της ελάχιστης μεταβολής της αζιμούθιας και ζενιθιακής γωνίας, της υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας και μπορεί να φανεί χρήσιμο σε παραγωγή μεγάλης ισχύος και απομονωμένες εφαρμογές. Ωστόσο, μερικά από τα μειονεκτήματα είναι ότι έχει χαμηλή απόδοση και μικρή σχετικά ακρίβεια καθώς το σύστημα βασίζεται σε διαδικασία θερμικής διαστολής. Επίσης σε κακοκαιρία και δυσμενείς καιρικές συνθήκες το συγκεκριμένο σύστημα δεν ενδείκνυται.

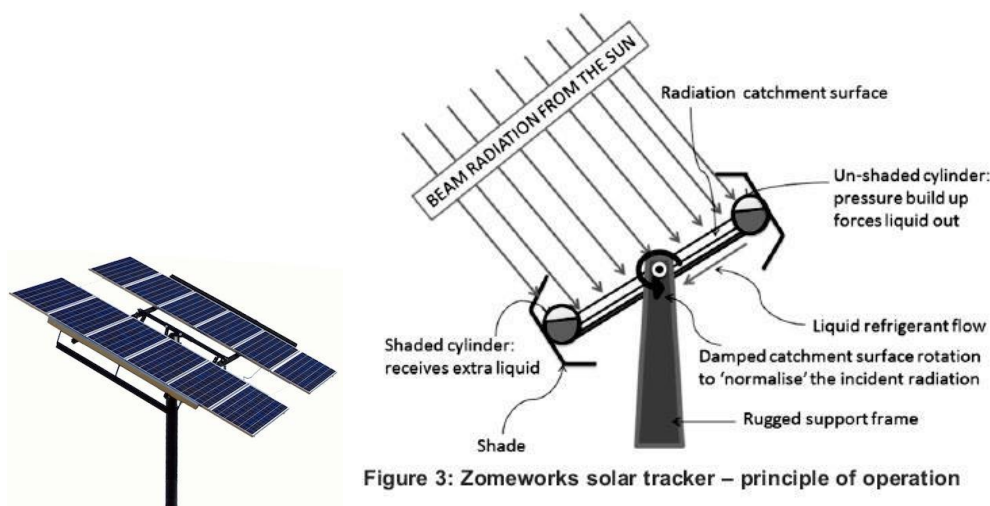


Figure 3: Zomeworks solar tracker – principle of operation

Εικόνα 18: Φωτοβολταϊκά πλαίσια παθητικής ανίχνευσης ακτινοβολίας

**Ενεργοί φωτοβολταϊκοί ιχνηλάτες.** Σε αυτή την κατηγορία τα φωτοβολταϊκά βασίζονται σε κινητήριους μηχανισμούς όπως ηλεκτρικούς κινητήρες ή υδραυλικούς κυλίνδρους προκειμένου να αλλάξει η θέση του πλαισίου. Ο προσδιορισμός της θέσης του ήλιου όταν κινείται κατά τη διάρκεια της ημέρας γίνεται με αισθητήρες. Αυτοί οι αισθητήρες ενεργοποιούν τον κινητήριο μηχανισμό έτσι ώστε ο συλλέκτης να κινείται προς την πορεία του ήλιου. Σε περίπτωση που η ακτινοβολία δεν είναι κάθετη στο πλαίσιο, τότε υπάρχει διαφοροποίηση ως προς την ένταση του φωτός ανάμεσα στους αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι και έτσι μέσω του συστήματος θα διορθωθεί η θέση του συλλέκτη προκειμένου η ακτινοβολία να είναι κάθετη. Επιπλέον, διακρίνονται διαφορετικοί τύποι ελέγχου όπως βασιζόμενοι σε μικροεπεξεργαστή, βασιζόμενοι σε φωτοηλεκτρικό αισθητήρα και με βοηθητικές φωτοβολταϊκές κυψέλες.

Τα συστήματα με τράκερς που χρησιμοποιούν μικροεπεξεργαστή και φωτοηλεκτρικούς αισθητήρες χρησιμοποιούν τουλάχιστον δύο φωτοαντιστάσεις ή ΦΒ κυψέλες. Διεξάγεται μία σύγκριση μεταξύ των σημάτων εξόδου από τις μεταβλητές των παραμέτρων και τελικά η διαφορά των δύο σημάτων αποστέλλεται στον κινητήριο μηχανισμό. Σε συστήματα παρακολούθησης με βοηθητικά Φ/Β στοιχεία διπλής όψης, αυτά ενεργοποιούν το σύστημα οδήγησης να μετακινηθεί προς την επιθυμητή θέση. Σε αυτόν τον τύπο τράκερ τα βοηθητικά στοιχεία τοποθετούνται ανά ζεύγη σε γωνία  $170^\circ$  και συνδέονται με κύκλωμα ανόρθωσης με γέφυρα, και όταν η τάση εξόδου από τα στοιχεία δεν είναι ίδια, τότε η εφαρμοζόμενη τάση στον DC κινητήρα δεν είναι μηδέν και αυτός αρχίζει να κινείται. Τα βοηθητικά Φ/Β στοιχεία δηλαδή χρησιμεύουν για να ανιχνεύσουν την θέση του ήλιου και να παρέχουν την απαιτούμενη ενέργεια ανίχνευσης. Αυτό το σύστημα τις συννεφιασμένες μέρες δεν είναι ακριβές καθώς οι αισθητήρες δεν μπορούν να πάρουν κάποια απόφαση λόγω της χαμηλής διαφοράς της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας ανάμεσα στους αισθητήρες. Η κατανάλωση του κινητήριου μηχανισμού υπολογίζεται περίπου ότι είναι λιγότερο από 3% της παραγωγής.





α) 1 Άξονα

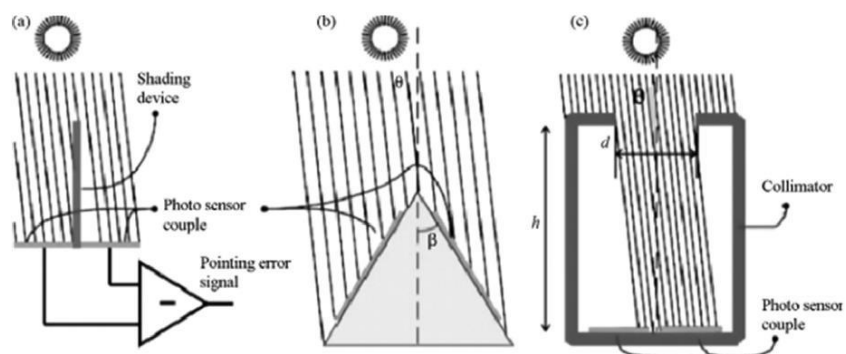


β) 2 Αξόνων

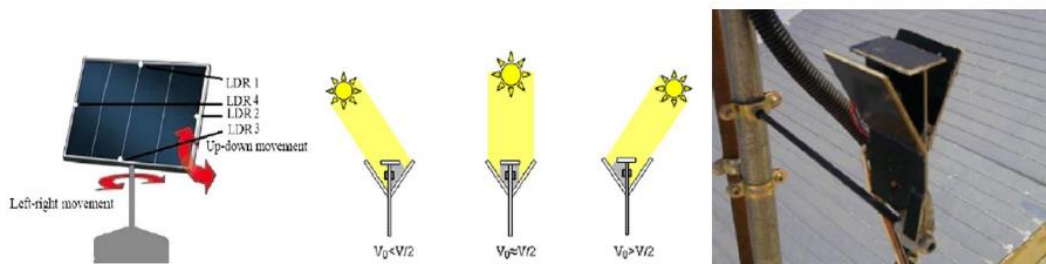
Εικόνα 19: Παράδειγμα Ενεργού φωτοβολταϊκού ιχνηλάτη



Εικόνα 20: Κινούμενο πλαίσιο από ηλεκτρικό σερβοκινητήρα



Εικόνα 21: Σύστημα ανίχνευσης τράκερ μονού άξονα με τρεις φωτοεξαρτημένες αντιστάσεις (LDR)



Εικόνα 22: Αισθητήρας εντοπισμού της θέσης του ήλιου

Χαρακτηριστικό παράδειγμα στην αγορά αυτού του τύπου ιχνηλάτησης είναι η τεχνολογία MLD (Maximum Light Detection) της γερμανικής εταιρίας Deger, η οποία είναι πιστοποιημένη με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας. Η ειδοποιός διαφορά σε σχέση με τους ιχνηλάτες που εκτελούν παρακολούθηση του ήλιου με αστρονομικά δεδομένα και PLC (χρονολογικού τύπου τράκερς), είναι ακριβώς η χρήση του MLD που δίνει τη δυνατότητα στους ιχνηλάτες να εκμεταλλεύονται την άμεσα προσπίπτουσα ακτινοβολία αλλά και την ακτινοβολία διάχυσης.

Ο αισθητήρας MLD μετράει διαρκώς την ένταση και την γωνία της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και προσανατολίζει ανάλογα τον κάθε ιχνηλάτη ξεχωριστά. Κατά τη διαδικασία αυτή ο αισθητήρας MLD δεν λαμβάνει απλά υπόψη την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, αλλά και το φως, το οποίο αντανακλάται από το χιόνι ή/και το διάχυτο φως που περνά μέσα από τα σύννεφα.

Αυτό το πλεονέκτημα και η εξαιρετικά υψηλή ακρίβεια του αισθητήρα οδηγούν τις στοιχειοσειρές των φωτοβολταϊκών πλαισίων στο να συλλέγουν πάντα τη μέγιστη δυνατή ποσότητα ενέργειας. Έτσι επιτυγχάνεται αύξηση απόδοσης έως 45% σε σύγκριση με τα σταθερά συστήματα εγκατάστασης.

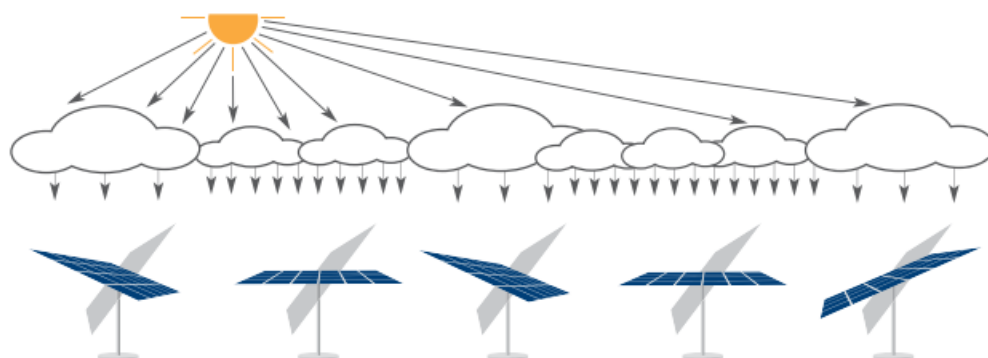
Η τεχνολογία αυτή προσφέρει επίσης 7% – 8% περισσότερη ενέργεια για τους ηλιακούς συλλέκτες σε σύγκριση με αστρονομικά καθοδηγούμενους ιχνηλάτες.



Εικόνα 23: Εγκατεστημένο φωτοβολταϊκό της Deger με τεχνολογία MLD



Διαφορετικές συνθήκες φωτισμού: Λόγω των διαφορετικών επιπέδων νέφωσης, οι συνθήκες φωτός στα ηλιακά πάρκα μπορεί να ποικίλλουν για κάθε tracker. Ο ατομικός έλεγχος διασφαλίζει ότι κάθε tracker είναι βέλτιστος προσανατολισμένος στην πιο φωτεινή πηγή ακτινοβολίας. Αυτό εγγυάται την υψηλότερη δυνατή ενεργειακή απόδοση.

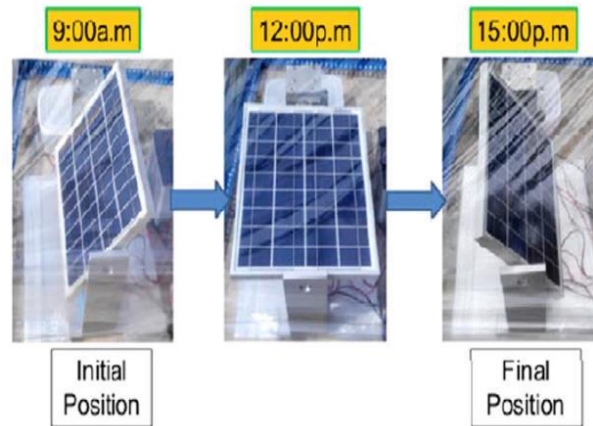


Εικόνα 24: Διαφορετικός προσανατολισμός συλλεκτών λόγω διαφορετικών συνθηκών φωτισμού

**Χρονολογικά Συστήματα Ιχνηλάτησης.** Το σύστημα χρονολογικής ηλιακής ανίχνευσης είναι ένα σύστημα βασιζόμενο στο χρόνο κατά το οποίο ο συλλέκτης κινείται με συγκεκριμένο ρυθμό κατά κάποια καθορισμένη γωνία κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτό το σύστημα είναι ένας τυπικός ελεγκτής ανίχνευσης ανοικτού βρόχου που βασίζεται σε ένα χρονολογικό μοντέλο της κίνησής του. Ο κινητήριος μηχανισμός αποτελείται, όπως και στου ενεργητικού τύπου, από ηλεκτρικούς κινητήρες ή υδραυλικούς κυλίνδρους και ελέγχεται έτσι ώστε να περιστρέφεται με χαμηλό ρυθμό (περίπου  $15^\circ$  την ώρα).

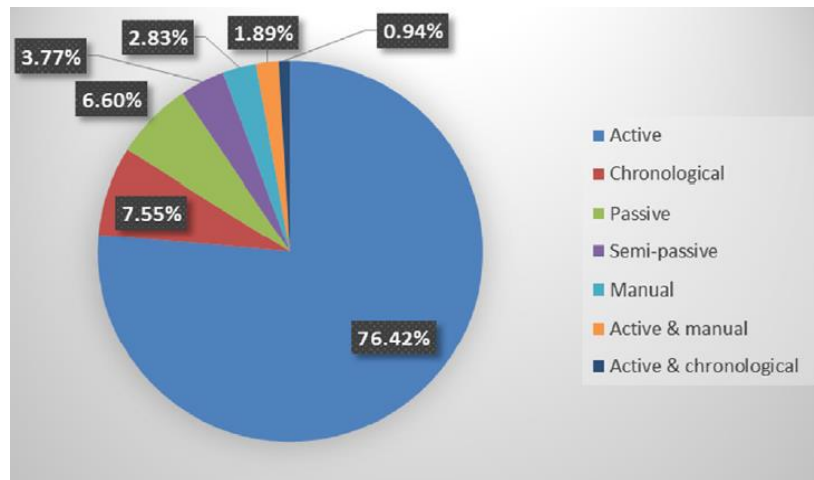
Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα αυτής της κατηγορίας τράκερ είναι ότι έχει καλύτερη ενεργειακή απόδοση καθώς δεν υπάρχουν απώλειες ενέργειας κατά την κίνηση, οι οποίες οφείλονται σε σφάλματα ανίχνευσης. Το σύστημα ανίχνευσης βασίζεται κυρίως στα χρονολογικά, γεωγραφικά και αστρονομικά δεδομένα που εισάγονται στο σύστημα προκειμένου να προσδιοριστεί η σχετική πορεία του ήλιου για κάποια συγκεκριμένη χρονική περίοδο (ημέρα και μήνας) με τη βοήθεια μαθηματικών μοντέλων και αλγορίθμων.

Στην αγορά συνηθίζεται η χρήση αυτού του τύπου ιχνηλάτησης από τις εταιρίες για την εγκατάσταση των κινούμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων.



Εικόνα 25: Θέση του πλαισίου από τις 9.00 π.μ. μέχρι τις 3 μ.μ.

Όπως βλέπουμε στην Εικόνα 26 τα περισσότερα συστήματα σε πρόσφατες μελέτες είναι των ενεργών ιχνηλατών. <sup>[10] [11]</sup>



Εικόνα 26: Ποσοστό χρήσης κάθε τύπου για πρόσφατες μελέτες

### 3 Σύγκριση συστημάτων ιχνηλάτησης του ηλίου

Στη συνέχεια θα μελετηθούν και θα συγκριθούν 6 τύποι συστημάτων. Οι οποίοι φαίνονται συνοπτικά παρακάτω. Οι τέσσερις είναι του μονού άξονα ενώ οι δύο του διπλού άξονα.

#### Κατηγορίες Μονού Άξονα

Άξονας Ανατολής – Δύσης (Χειροκίνητου)

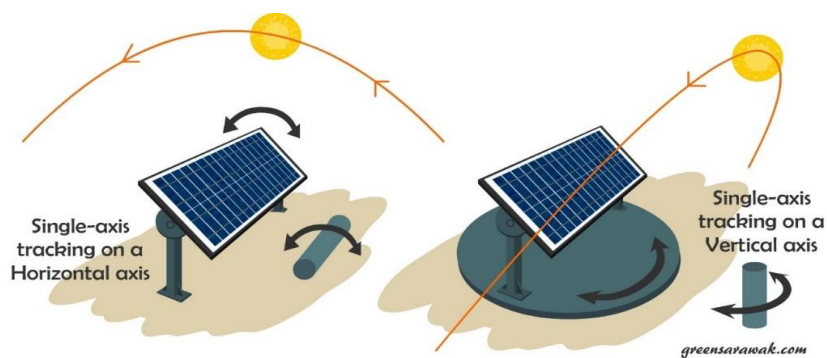
Άξονας Βορρά – Νότου (Ενεργού)

Άξονας Βορρά - Νότου με κλίση (Ενεργού)

Κατακόρυφος Άξονας (Ενεργού)



Εικόνα 27: Άξονας Ανατολής – Δύσης



Εικόνα 28: α) Άξονας Βορρά – Νότου

β) Κατακόρυφος Άξονας

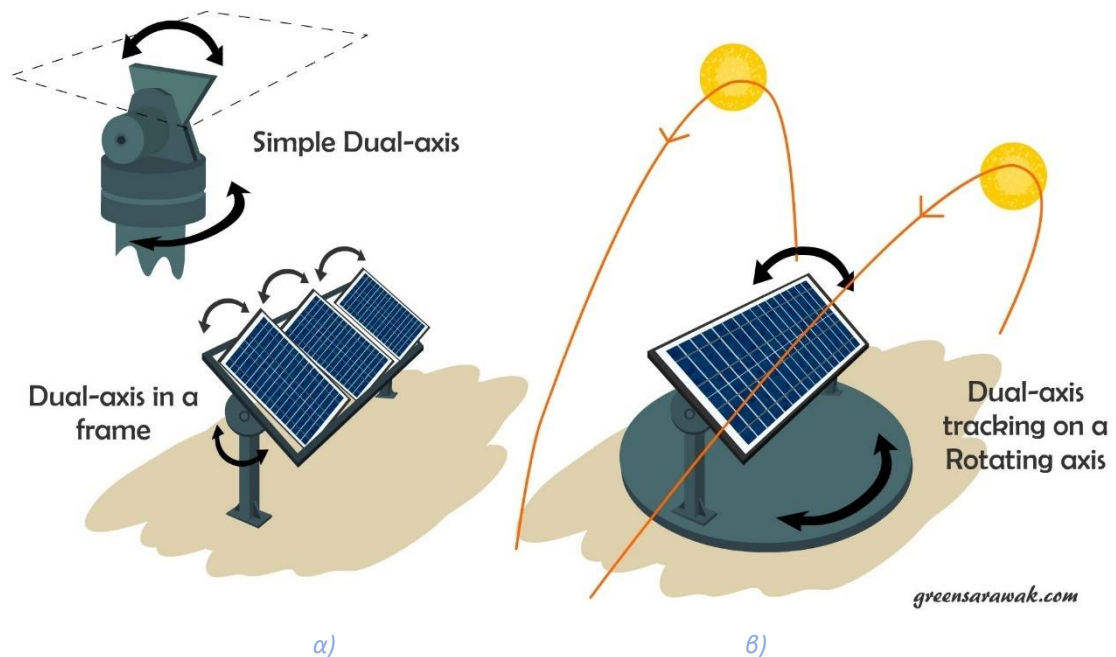


Εικόνα 29: Άξονας Βορρά - Νότου με κλίση

### Κατηγορίες Δύο Αξόνων

Συνδυασμός Βορρά – Νότου με Ανατολής - Δύσης (Ενεργού)

Συνδυασμός Κατακόρυφου με Ανατολής - Δύσης (Ενεργού)



Εικόνα 30: α) Συνδυασμός Βορρά – Νότου με Ανατολής – Δύσης  
β) Συνδυασμός Κατακόρυφου με Ανατολής – Δύσης

### 3.1 Στοιχεία Σύγκρισης

Στη μελέτη μας συγκρίθηκαν οι 6 παραπάνω τύποι φωτοβολταϊκών ιχνηλατών έναντι ενός φωτοβολταϊκού πάρκου με σταθερή βάση.

Όλοι οι υπολογισμοί έγιναν με την ίδια εφαρμογή και αφορούν την ίδια εγκατάσταση, ένα φωτοβολταϊκό πάρκο μεγέθους 114 kW. Η πεδιάδα στην οποία τοποθετήθηκαν τα Φ/Β πλαίσια είναι η ίδια σε όλες τις περιπτώσεις και έχει τετραγωνική διάσταση, ώστε να είναι πιο δίκαιη η σύγκριση. Ωστόσο θα σχολιαστεί σε ποιες περιπτώσεις θα ήταν συμφέρουσα μια περιοχή, πχ. με μακρόστενο ή διαφορετικό σχήμα και τότε εμφανίζονται απώλειες λόγω μεγάλων σκιάσεων.

Κατά τη σύγκριση των διαφόρων τύπων εγκατάστασης φωτοβολταϊκών κρατήθηκαν σταθερά:

- Η αξονική απόσταση στα 10m
- Τα τ.μ. του χωραφίου 1156 m<sup>2</sup> (34m X 34m)
- Η ισχύς του πάρκου στα 114 (kW)

Σαν μέτρο σύγκρισης λήφθηκαν υπόψιν

- Η Ετήσια Παραγόμενη Ενέργεια (kWh)
- Ο Λόγος Απόδοσης (Performance Ratio) (%)

Η **αξονική απόσταση** είναι η απόσταση, από το πρώτο (ή τελευταίο) σημείο του ενός panel μέχρι το πρώτο (ή τελευταίο) σημείο του panel της επόμενης σειράς.

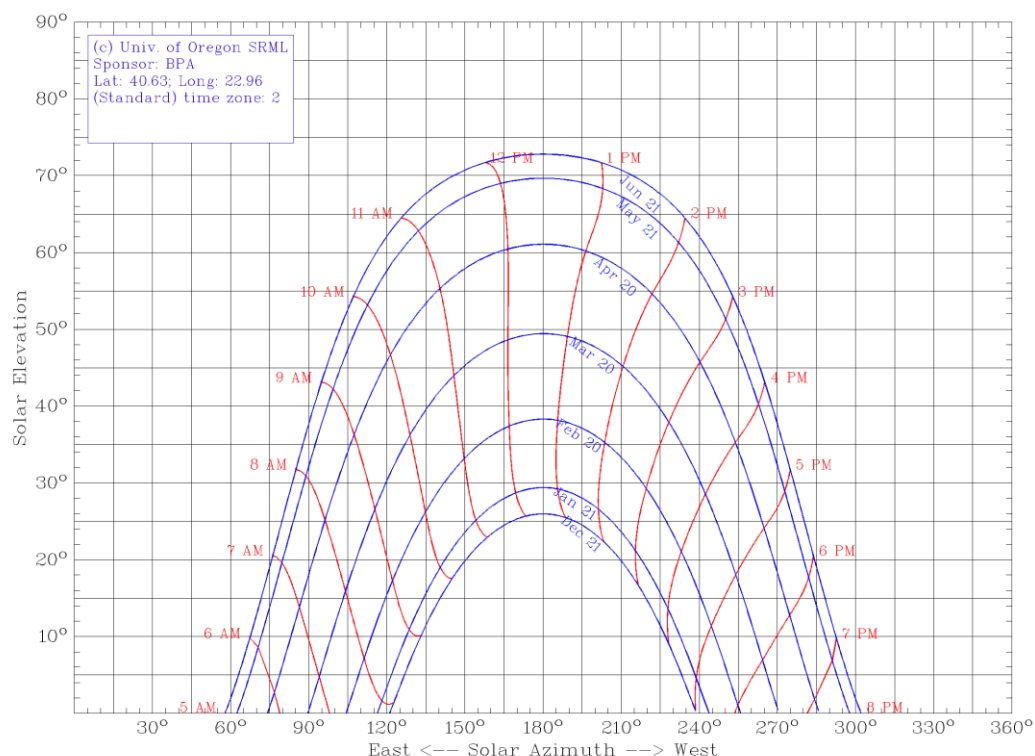
Ο **λόγος απόδοσης** (Performance Ratio) είναι ο λόγος της ενέργειας που παράγεται, σε σχέση με την ενέργεια που θα παραγόταν εάν το σύστημα λειτουργούσε συνεχώς στις ονομαστικές του συνθήκες STC. Δηλ. Εμπεριέχει τις διαφοροποιήσεις λόγω ανακλαστικών απωλειών, οπτικών απωλειών και κυρίως απωλειών λόγω σκίασης.

### 3.2 Βήματα Σχεδίου Χωροθέτησης

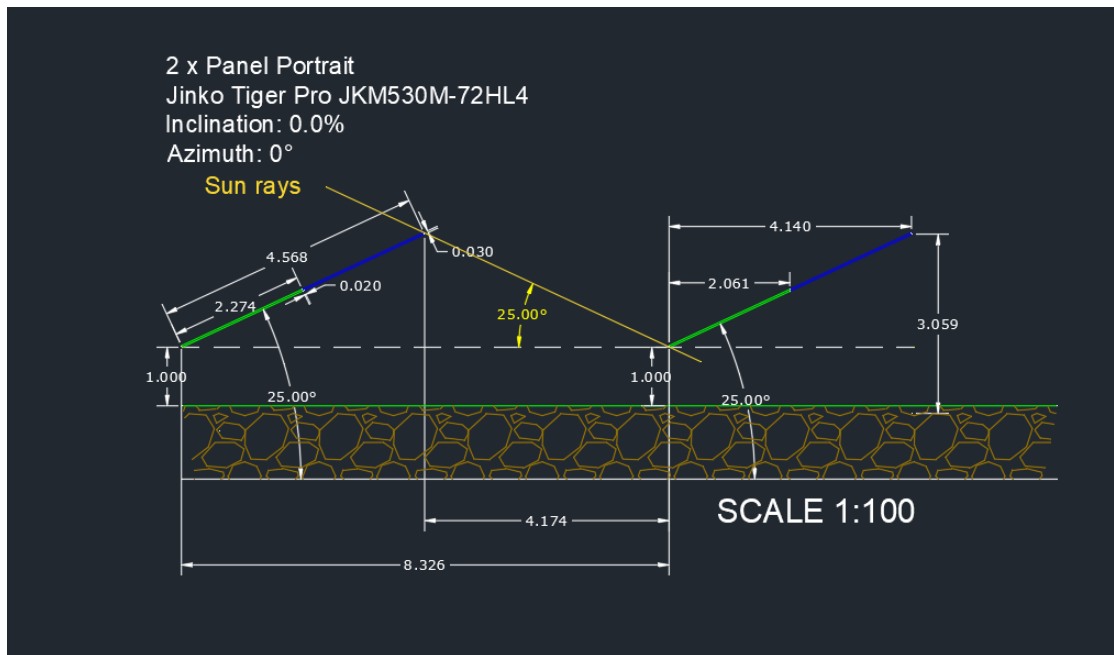
**Χωράφι.** Σχεδιασμός ενός τετράγωνου construction line μέσα στο οποίο θα τοποθετηθεί η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση. Η κλίση του επιπέδου θεωρείται 0°. Θεωρείται επίσης ότι δεν υπάρχουν αντικείμενα σε κοντινή απόσταση τα οποία θα μπορούσαν να επισκιάσουν τα φωτοβολταϊκά, όπως δέντρα, κτίρια, εναέρια ηλεκτρικά καλώδια και κολώνες.

**Αξονική απόσταση.** Η αξονική απόσταση πρέπει να είναι τουλάχιστον τόση ώστε να μη σκιάζει το ένα Φ/Β πλαίσιο το άλλο μέσα σε μία καθορισμένη ώρα της ημέρας. Στη συγκεκριμένη προσομοίωση είναι επιθυμητό να μην σκιάζονται από τις 11 το πρωί έως τις 2 το μεσημέρι. Το ηλιακό διάγραμμα το οποίο απεικονίζει το ηλιακό ύψος φαίνεται στην Εικόνα 31.

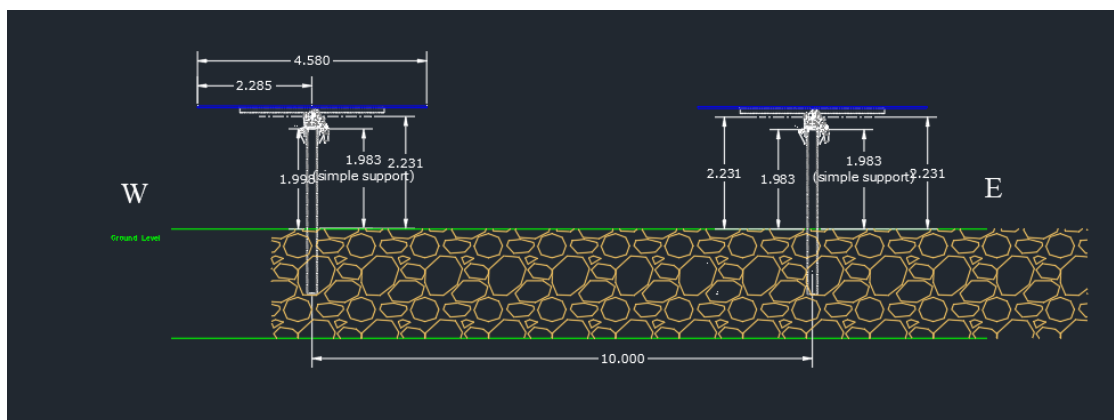
Από τις 11:00 έως τις 2:00 το ηλιακό ύψος έχει ως ελάχιστη τιμή περίπου 22 μοίρες. Οπότε για τα Φ/Β πλαίσια που έχουμε θα πρέπει η αξονική απόσταση να είναι τουλάχιστον 8.3 μέτρα. Επιλέχθηκε ως τελική τιμή τα 10 μέτρα. [12]



Εικόνα 31: Το ηλιακό διάγραμμα που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση

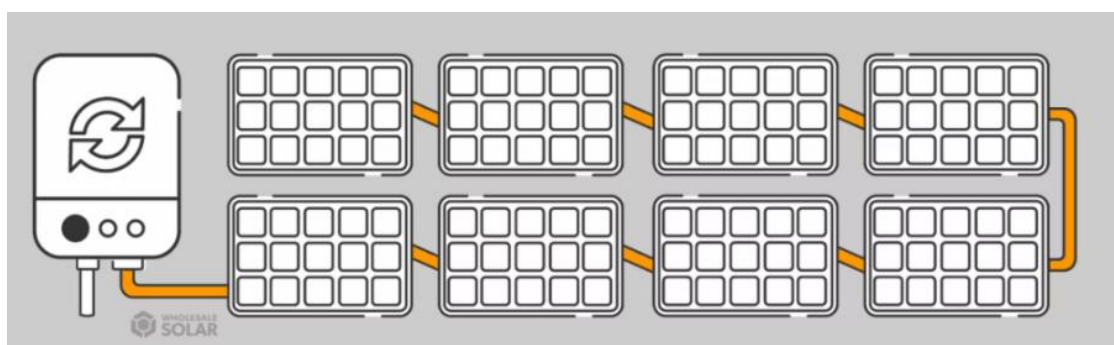


Εικόνα 32: Πλάγια όψη Φβ με σταθερή βάση



Εικόνα 33: Πλάγια όψη Φβ με Tracker μονού άξονα

**Προσδιορισμός αριθμού φωτοβολταϊκών πλαισίων ανά στοιχειοσειρά.** Μία στοιχειοσειρά είναι ένα γκρουπ από πλαίσια που συνδέονται σε σειρά με μία είσοδο προς τον αντιστροφέα.



Εικόνα 34: Οχτώ στοιχειοσειρές από πάνελς συνδεδεμένες σε έναν αντιστροφέα



Οι αντιστροφείς λειτουργούν εντός ενός συγκεκριμένου εύρους τάσης εισόδου, που ονομάζεται εύρος λειτουργίας. Οι στοιχειοσειρές του συστήματος θα πρέπει να εξάγουν μια τάση που να εμπίπτει σε αυτό το εύρος. Εάν τα πλαίσια δεν παρέχουν αρκετή τάση, ο αντιστροφέας δεν θα έχει αρκετή ισχύ για να ενεργοποιηθεί. Εάν παρέχεται υπερβολική τάση, μπορεί να καταστραφεί ο αντιστροφέας και να ακυρωθεί η εγγύηση του.

Το εύρος λειτουργίας είναι απλώς το εύρος στο οποίο ο αντιστροφέας θα λειτουργεί σωστά. Σε αυτό το εύρος, ο μετατροπέας θα ενεργοποιηθεί και θα παρέχει ρεύμα στις συσκευές. Ωστόσο, εάν πέσει εντός του εύρους λειτουργίας σημαίνει απλώς ότι ο μετατροπέας λειτουργεί - δεν εγγυάται ότι παίρνει τη μεγαλύτερη δυνατή ισχύ από αυτόν.

Για να βελτιστοποιηθεί πραγματικά η έξοδος, πρέπει να εμπίπτει σε ένα πιο στενό εύρος τάσης που ονομάζεται εύρος σημείου μέγιστης ισχύος (MPP). Αυτό είναι το κατάλληλο σημείο στο οποίο ο μετατροπέας λειτουργεί με τη μέγιστη απόδοση.

Οι υπολογισμοί μεγέθους στοιχειοσειράς εξαρτώνται από τη συγκεκριμένη τάση των πλαισίων και του αντιστροφέα, καθώς και από εξωτερικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία.

Κάθε πλαίσιο έχει μια τάση εξόδου. Αυτή είναι η τάση που στέλνει το πλαίσιο στον αντιστροφέα.

**Τάση ανοιχτού κυκλώματος (Voc):** Η τάση που παρέχεται όταν το κύκλωμα είναι ανοιχτό—δηλαδή όταν το ρεύμα δεν διέρχεται από το κύκλωμα. Αυτή η κατάσταση εμφανίζεται όταν ο αντιστροφέας δεν είναι ενεργοποιημένος.

**Μέγιστη τάση ισχύος (Vmp):** Η τάση του πλαισίου μετά την ενεργοποίηση και τη λειτουργία του κανονικά υπό φορτίο (το ρεύμα ρέει μέσα από το κύκλωμα).

Η μέγιστη τάση εισόδου συνεχούς ρεύματος του μετατροπέα είναι ιδιαίτερα ανησυχητική, γιατί εάν κάποιος την υπερβεί, θα υπερφορτώσει τον αντιστροφέα και ενδεχομένως θα κάψει τον εξοπλισμό.

Υπάρχει επίσης μια ελάχιστη τάση DC και μια απαίτηση τάσης εκκίνησης που πρέπει να πληρούνται για την ενεργοποίηση του αντιστροφέα. Συνήθως αυτό δεν είναι πρόβλημα, καθώς είναι επιθυμητό οι στοιχειοσειρές να λειτουργούν πολύ πιο πάνω από το ελάχιστο, μέχρι το εύρος MPP όπου λειτουργεί με υψηλότερη απόδοση.

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο έχει τάση ανοιχτού κυκλώματος στα 49.26 V. Όμως αυτή η τάση μειώνεται όσο ανεβαίνει η θερμοκρασία. Το πλαίσιο που επιλέχθηκε έχει συντελεστή θερμοκρασίας τάσης ανοιχτού κυκλώματος  $-0.28\%/^{\circ}\text{C}$ . Η τάση 49.26 V έχει παρθεί σε τυπικές συνθήκες δοκιμής στους  $25^{\circ}\text{C}$ . Παίρνοντας δεδομένο ότι η θερμοκρασία στην Ελλάδα μέσα στη μέρα δε φτάνει κάτω από  $5^{\circ}\text{C}$ , φτάνουμε στο συμπέρασμα ότι ένα πλαίσιο μπορεί να δώσει μέγιστη τάση έως 54.86 V.

τάση ανοιχτού κυκλώματος+ συντελεστής θερμοκρασίας τάσης ανοιχτού κυκλώματος\*(ελάχιστη θερμοκρασία – θερμοκρασία δοκιμαστικών συνθηκών) = μέγιστη τάση στην ελάχιστη θερμοκρασία.

$$(49.26 + (-0.28 * (5 - 25))) = 54.86 \text{ V}$$

Καθώς ο αντιστροφέας έχει μέγιστη τάση εισόδου 1500 V αυτό σημαίνει ότι μία στοιχειοσειρά θα αποτελείται το μέγιστο από 27 πλαίσια σε σειρά.

Η ελάχιστη τάση του αντιστροφέα είναι 250 V. Αυτό σημαίνει ότι σε STC χρειάζονται τουλάχιστον  $250/49.26 = 6$  πλαίσια σε σειρά για να εκκινήσει ο αντιστροφέας.

Το κάθε πλαίσιο έχει επίσης ισχύ 530 Watt. Στη συγκεκριμένη προσομοίωση θα έχουμε 27 πλαίσια για κάθε στοιχειοσειρά. <sup>[13]</sup>

**Μέγεθος πάρκου.** Το κάθε πλαίσιο έχει μέγεθος 2274×1134×35mm. Για τις ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ πλαισίων ισχύει:

**Για fixed :**

Οριζόντια απόσταση panel 2.4 εκατοστά,

Καθετή απόσταση panel 2 εκατοστά ,

Οριζόντια απόσταση τραπεζιών 40 εκατοστά .

**Για trackers :**

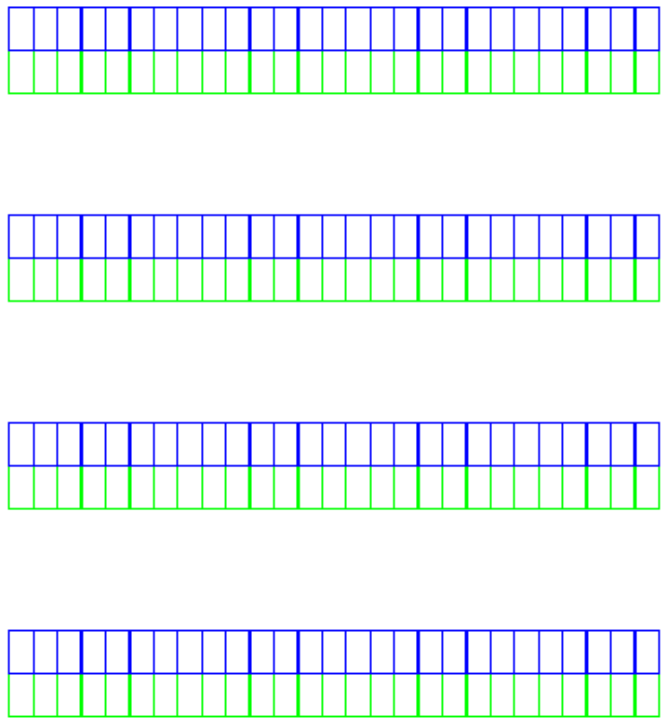
Οριζόντια απόσταση panel 1.2 εκατοστά,

Καθετή απόσταση panel 1 εκατοστό ,

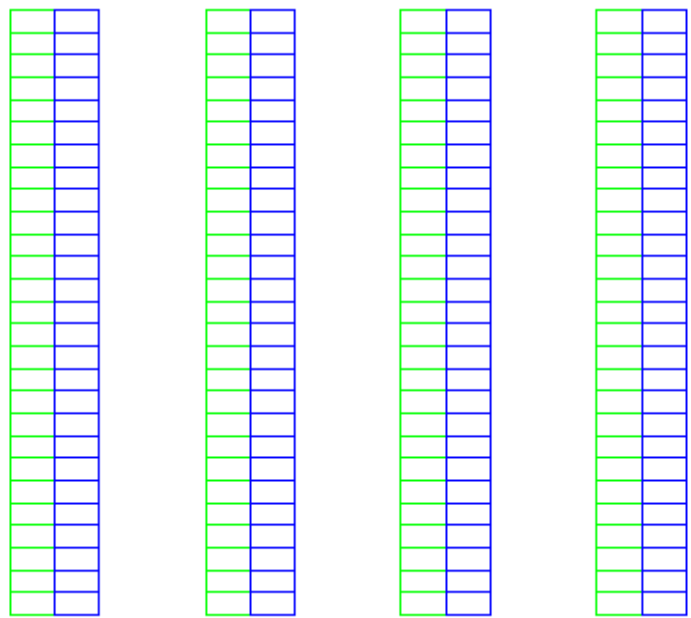
Οριζόντια απόσταση τραπεζιών 40 εκατοστά .

Επίσης έχει αποφασισθεί ότι το πάρκο θα έχει ισχύ 114 kW. Έτσι φτάνουμε σε ένα πάρκο μεγέθους 1156 m<sup>2</sup> (34m X 34m). Έγιναν επιπλέον προσομοιώσεις σε περίπτωση όπου θα είχαμε άπλετο χώρο για να δειχθεί πως θα επηρεαζόταν η παραγωγή από τις σκιάσεις που υπάρχουν σε ένα περιορισμένο τετραγωνικού σχήματος χωράφι. <sup>[14] [15] [16] [17]</sup>





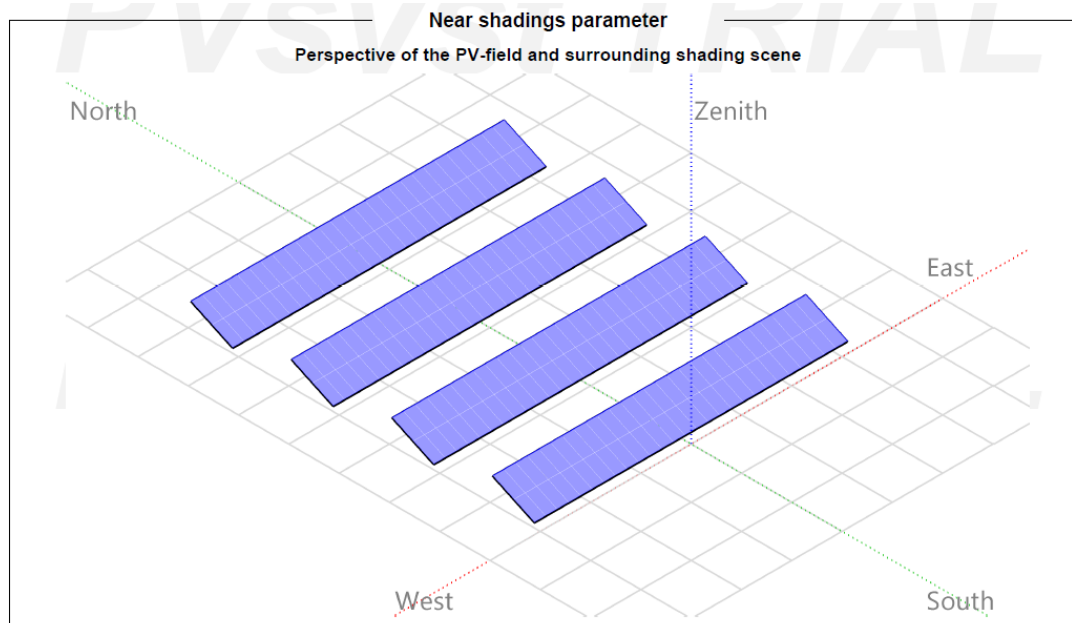
Εικόνα 35: Φωτοβολταϊκό πάρκο για σταθερές βάσεις



Εικόνα 36: Φωτοβολταϊκό πάρκο για βάσεις μονού άξονα

### 3.3 Τυπικό Πάρκο με Σταθερά Φ/Β Πλαίσια

Ένα τυπικό πάρκο με φωτοβολταϊκά με σταθερή βάση απεικονίζεται στην Εικόνα 37. Τα πλαίσια έχουν την τυπική βέλτιστη διάταξη, δηλ. προσανατολισμό προς τον νότο, κλίση  $25^\circ$  και αξονική απόσταση 10 m.

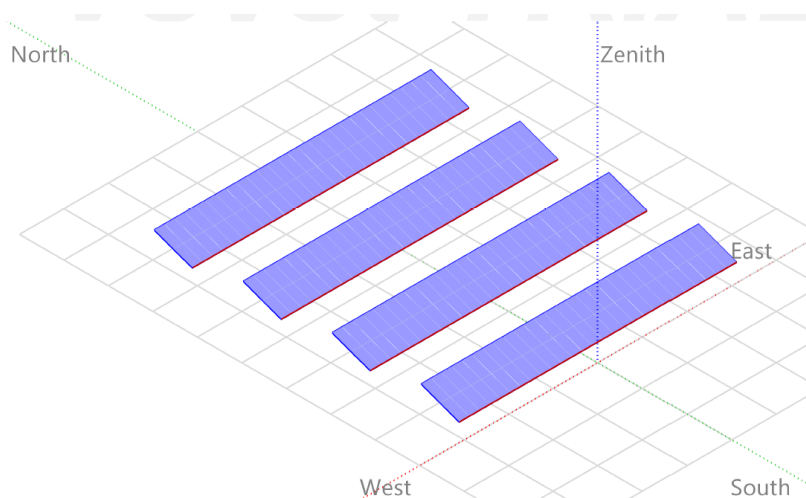


Εικόνα 37: Ένα τυπικό πάρκο με φωτοβολταϊκά με σταθερή βάση

### 3.4 Ιχνηλάτες Ενός Οριζόντιου Άξονα E-W

Η πρώτη και η απλούστερη περίπτωση ηλιακών ιχνηλατών είναι της βάσης στήριξης η οποία περιστρέφεται γύρω από έναν οριζόντιο άξονα Ανατολής – Δύσης. Έχει, από όλα τα συστήματα ηλιακών ιχνηλατών, την πλησιέστερη μορφή σε αυτά με των σταθερών βάσεων.

Χειροκίνητα, με μια μανιβέλα, μπορεί κάποιος να προσαρμόζει την κλίση σε τακτά χρονικά διαστήματα (όπως μία φορά τον μήνα).



Εικόνα 38: Ένα τυπικό πάρκο με φωτοβολταϊκά βάσεις ιχνηλάτησης ενός οριζόντιου άξονα E-W

Όπως είναι φανερό στην Εικόνα 38 το σύστημα διαθέτει μία ένδειξη από την οποία διακρίνεται το πόσο πρέπει να προσαρμόζεται. Τα πλαίσια έχουν προσανατολισμό πάλι προς τον Νότο. Η κλίση ρυθμίζεται κάπου μεταξύ των 10°-40°. Σε σχέση με το σταθερό παρουσιάζει ήδη μία βελτίωση της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας της τάξης του 3.07%.



Εικόνα 39 : Μία βάση στήριξης με ιχνηλάτη E – W



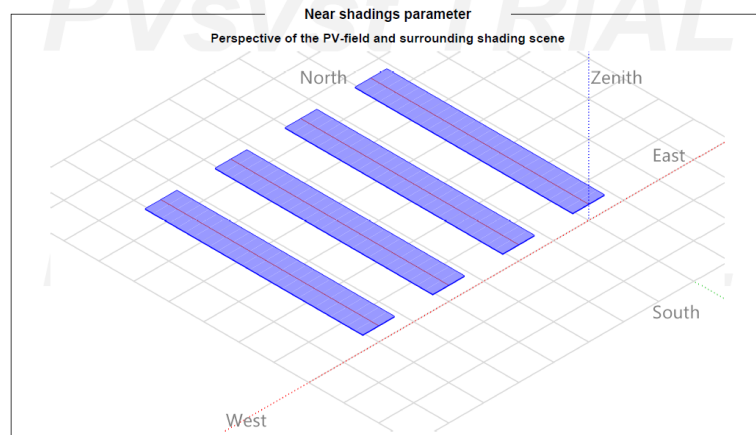
Εικόνα 40: Η μανιβέλα που χάρηξ σε αυτήν αλλάζει κλίση το πάνελ

### 3.5 Ιχνηλάτης Ενός Οριζόντιου Άξονα N – S

Στη δεύτερη κατηγορία μονού άξονα το σύστημα περιστρέφεται γύρω από τον άξονα Βορρά – Νότου. Αυτά δεν έχουν κλίση και το μεσημέρι είναι τελείως οριζοντιωμένα. Αυτό σημαίνει ότι το μεσημέρι ο ήλιος δεν βρίσκεται ακριβώς από πάνω τους αλλά στο Νότο και η προσπίπτουσα ακτινοβολία δεν είναι κάθετη.

Περιστρέφονται από  $+60^\circ$  κατά τη διάρκεια της ημέρας για να ακολουθούν τον ήλιο από την ανατολή ως τη δύση. Όπως παρατηρείτε η διάταξη των στοιχειοσειρών είναι τώρα τελείως διαφορετική, πάνω στον άξονα Βορρά-Νότου και όχι Ανατολής-Δύσης όπως στα δύο προηγούμενα.

Σε σχέση με το σταθερό σύστημα παρουσιάζει μία βελτίωση της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας κατά 11.55%.



Εικόνα 41: Ένα τυπικό πάρκο με φωτοβολταϊκά βάσεις Ιχνηλάτησης ενός οριζόντιου άξονα N-S



Εικόνα 42: Μία αληθινή βάση στήριξης Ιχνηλάτη με άξονα N-S



Εικόνα 43: Η συσκευή που περιστρέφει τον άξονα

### 3.6 Ιχνηλάτης Ενός Οριζοντίου Άξονα N – S με κλίση

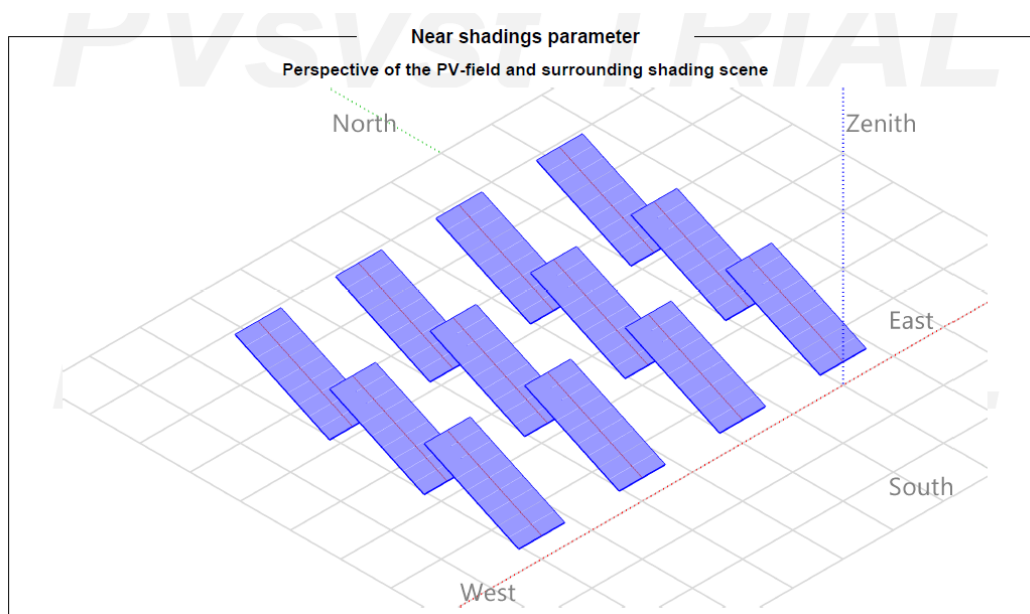
Στην Τρίτη κατηγορία οι βάσεις περιστρέφονται γύρω από τον άξονα βορρά νότου αλλά σε αντίθεση με την προηγούμενη κατηγορία έχουν μία κλίση, η οποία είναι  $25^\circ$ .

Λόγω αυτής της κλίσης η συστοιχία δε θα μπορούσε να είναι εξίσου μακριά σε μέγεθος, μιας και το ύψος της εγκαταστάσεις θα έφτανε σε απαγορευτικό μέγεθος. Έτσι, έχουμε περισσότερες στοιχειοσειρές μικρότερου μήκους και μια διαφορετική τοπολογία που φαίνεται στην Εικόνα 44. Στο συγκεκριμένο πείραμα μία συστάδα έχει ισχύ 9.5 kW.

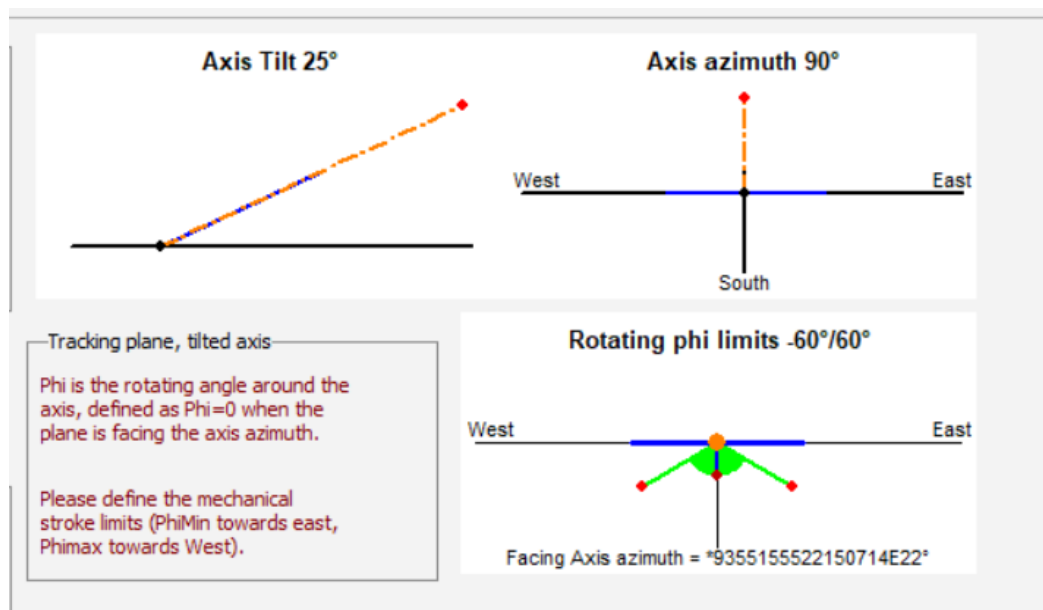
Οι στοιχειοσειρές και πάλι περιστρέφονται  $\pm 60^\circ$  κατά τη διάρκεια της ημέρας για να ακολουθούν τον ήλιο από την ανατολή στη δύση. Την νύχτα επιστρέφουν αυτόματα στην αρχική τους θέση για να ξαναβρούν τον ήλιο στην ανατολή. Η αξονική απόσταση παραμένει 10 μέτρα.

Προκύπτει ετήσια παραγόμενη ενέργεια  $+9.48\%$  αυξημένη σε σχέση με το σταθερό. Παραδόξως, η βελτίωση μειώθηκε σε σχέση με την προηγούμενη κατηγορία. Αυτό συμβαίνει λόγω της σκίασης που προκαλούν τα φ/β σε αυτά που βρίσκονται πιο βόρεια. Συμπεραίνουμε ότι μια τέτοιου είδους εγκατάστασης θα ήταν πιο αποδοτική αν υπήρχε μεγαλύτερη έκταση ή αν άλλαζε το σχήμα του χωραφίου σε ένα πιο ορθογώνιο σχήμα.

Σε περίπτωση που υπήρχε ο άπλετος χώρος θα είχαμε έως  $+24.21\%$  ετήσια παραγόμενη ενέργεια σε σχέση με το σταθερό.



Εικόνα 44: Ένα τυπικό πάρκο με φωτοβολταϊκά βάσεις Ιχνηλάτησης ενός οριζόντιου άξονα N-S με κλίση



Εικόνα 45: Διάγραμμα Ιχνηλατών N-S με κλίση στο PVsyst





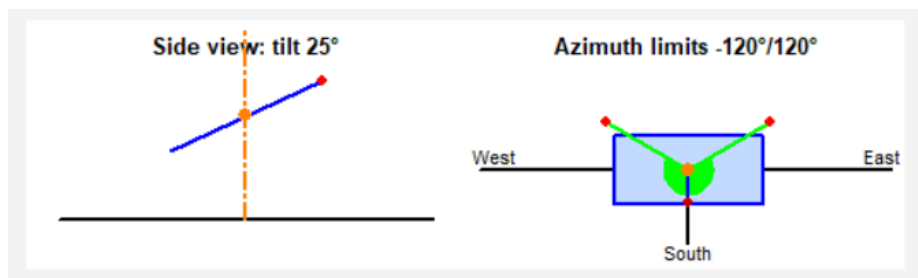
Εικόνα 46: Βάσεις στήριξης Ιχνηλάτη με άξονα N-S με κλίση

### 3.7 Ιχνηλάτες Ενός Κατακόρυφου Άξονα

Περιστρέφονται γύρω από έναν κατακόρυφο άξονα από  $-120^\circ$  έως  $+120^\circ$ , κατά τη διάρκεια της ημέρας έτσι ώστε να ακολουθούν τον ήλιο. Έχουν σταθερή κλίση  $25^\circ$ . Λόγω της κλίσης και πάλι το μέγεθος κάθε στοιχειοσειράς θα χρειαστεί να περιοριστεί. Η τελική τοπολογία είναι σαν αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 48. Στο συγκεκριμένο πείραμα μία συστάδα έχει πάλι ισχύ 9.5 kW.

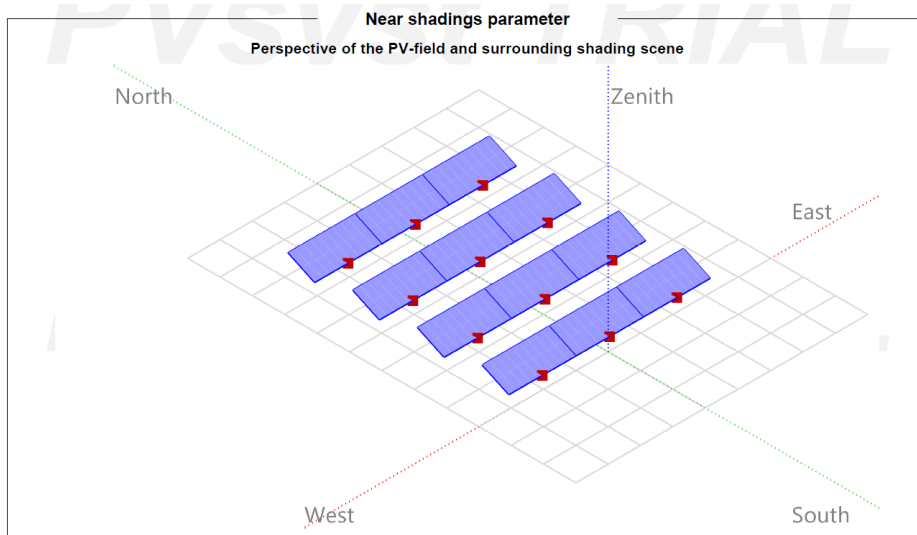
Το σύστημα αυτό παρουσιάζει ετήσια παραγόμενη ενέργεια αυξημένη κατά 14.56% σε σχέση με το σταθερό. Άρα, και εδώ οι συστάδες επηρεάζονται από την υψηλή πυκνωση και σκιάζουν η μία την άλλη.

Σε περίπτωση που είχαμε άπλετο χώρο για τη σωστή αραίωση των συστάδων θα είχαμε ετήσια παραγόμενη ενέργεια +18.0% σε σχέση με το σταθερό σύστημα αναφοράς.



Εικόνα 47: Διάγραμμα Ιχνηλατών κατακόρυφου άξονα στο PVSyst

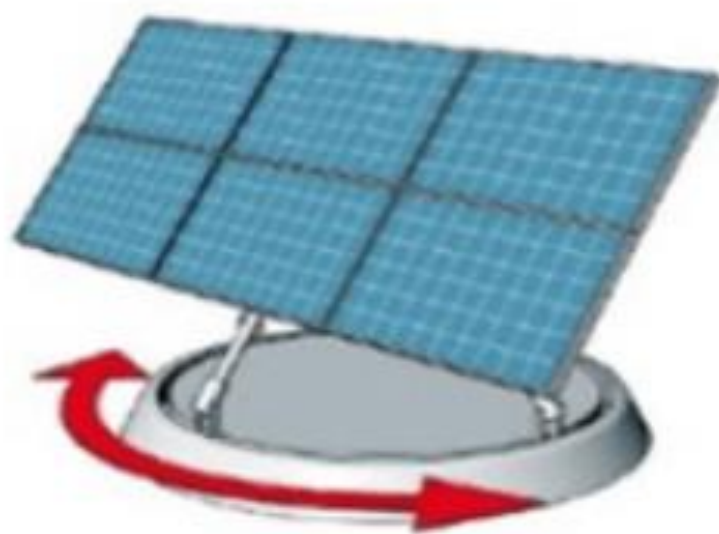




Εικόνα 48: Τοπολογία ιχνηλατών κατακόρυφου άξονα στο PVSyst



Εικόνα 49: Βάσεις στήριξης Ιχνηλάτη με κατακόρυφο άξονα



Εικόνα 50: Διάγραμμα βάσεις στήριξης Ιχνηλάτη με κατακόρυφο άξονα, που δείχνει την κατακόρυφη του κίνηση

### 3.8 Ιχνηλάτης Δύο Αξόνων (Συνδυασμός Βορρά – Νότου και Ανατολής – Δύσης)

Τώρα περνάμε στα λεγόμενα συστήματα δύο αξόνων τα οποία παρακολουθούν τον ήλιο ακόμα καλύτερα καθώς έχουν δύο άξονες περιστροφής.

Η πρώτη περίπτωση έχει έναν άξονα βορρά – νότου που περιστρέφεται γύρω από αυτόν από  $-60^\circ$  έως  $+60^\circ$ . Μια σειρά από πλαίσια βρίσκεται πάνω σε αυτόν τον άξονα και περιστρέφονται όλα μαζί. Έχει επίσης και έναν άξονα ανατολής – δύσης. Αυτός βρίσκεται ένας πίσω από κάθε πλαίσιο και ρυθμίζει την κλίση του πλαισίου μεταξύ  $10-40^\circ$ .

Στην Εικόνα 51 φαίνεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα Φ/Β πλαισίων τα οποία είναι στραμμένα προς την ανατολή. Όπως και στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις πρέπει να σπάσουμε τις στοιχειοσειρές σε μικρότερες συστάδες.

Το σύστημα παρουσιάζει ετήσια παραγόμενη ενέργεια αυξημένη κατά 17.83 % σε σχέση με το σταθερό ενώ εμφανίζονται και πάλι προβλήματα μεγάλων απωλειών σκίασης. Συγκεκριμένα, σε περίπτωση που είχαμε άπλετο χώρο και η διάταξη ήταν πιο αραιή θα είχαμε συνολική αύξηση παραγόμενης ενέργειας +31.8% σε σχέση με το σταθερό σύστημα.



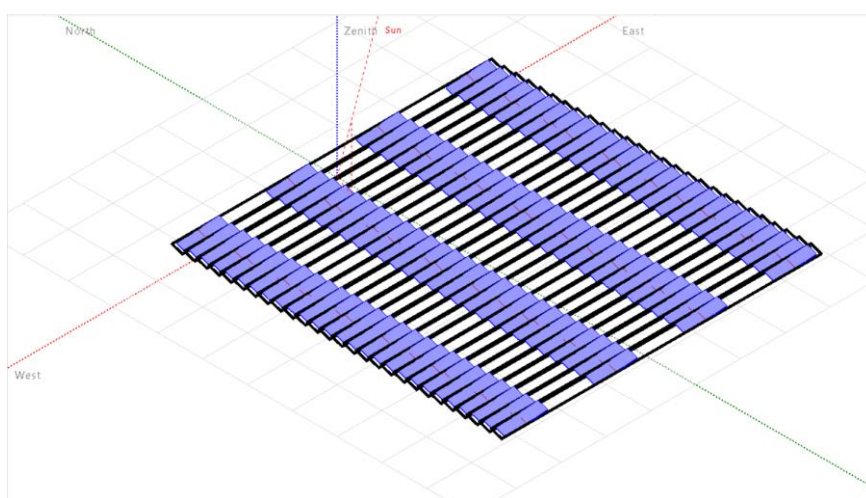
Εικόνα 51: Βάσεις στήριξης Ιχνηλάτη Δύο Αξόνων (Συνδυασμός Βορρά – Νότου και Ανατολής – Δύσης)



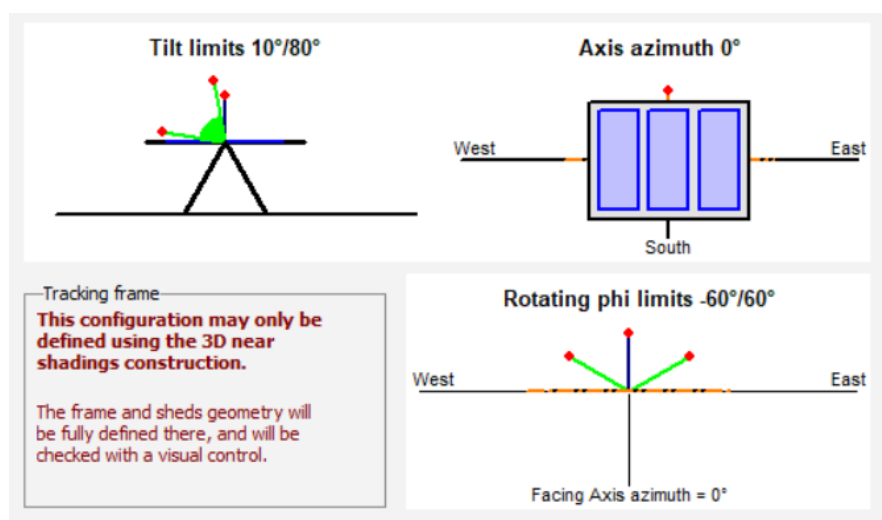
Εικόνα 52: Ενδείκνυται ο άξονας N – S



Εικόνα 53: Ενδείκνυται ο άξονας E – W



Εικόνα 54: Τοπολογία ιχνηλατών Δύο Αξόνων (Συνδυασμός Βορρά – Νότου και Ανατολής – Δύσης) στο PVSyst

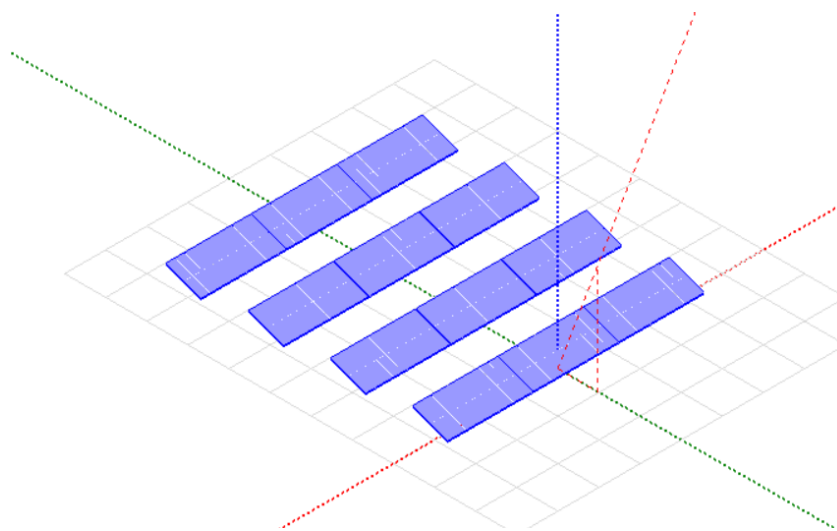


Εικόνα 55: Διάγραμμα ιχνηλατών Δύο Αξόνων (Συνδυασμός Βορρά – Νότου και Ανατολής – Δύσης) στο PVSyst

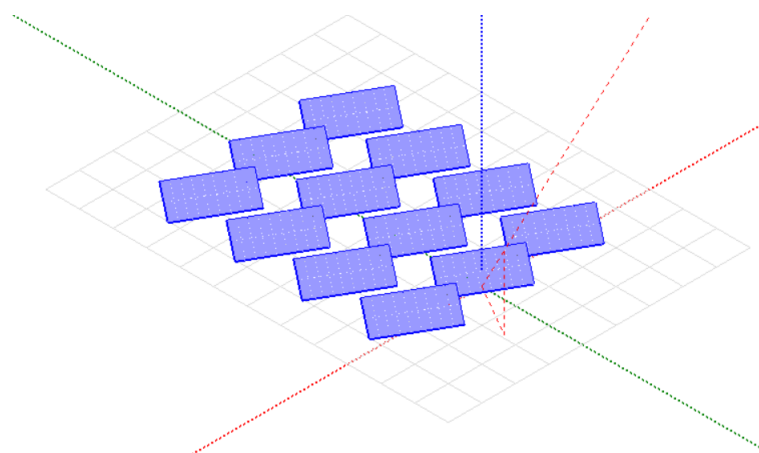
### 3.9 Ιχνηλάτες Δύο Αξόνων (Συνδυασμός Κατακόρυφου και Ανατολής – Δύσης)

Το τελευταίο σύστημα που θα μελετηθεί είναι επίσης διπλού άξονα. Έχει έναν κατακόρυφο άξονα γύρω από τον οποίο περιστρέφονται τα Φ/Β αλλάζοντας την αζιμούθια γωνία από  $-120^\circ$  ως  $+120^\circ$ . Επίσης, έχει έναν άξονα ανατολής – δύσης στον που ρυθμίζει την κλίση των πλαισίων από  $10^\circ$  έως  $80^\circ$  μοίρες ανάλογα με την εποχή του έτους.

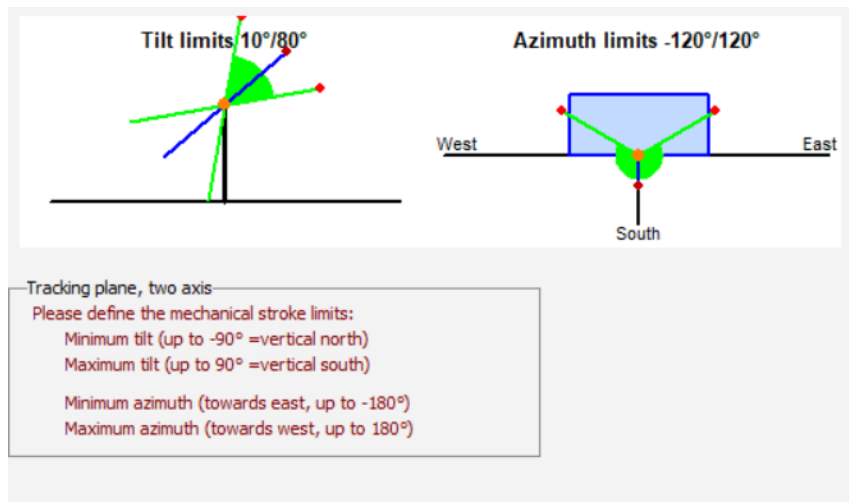
Λόγω του μεγάλους μεγέθους του κατακόρυφου άξονα θα πρέπει και πάλι να έχουμε μικρότερες συστάδες ισχύος 9.5 kW η καθεμία. Το σύστημα παρουσιάζει ετήσια παραγόμενη ενέργεια αυξημένη  $+20.06\%$  σε σχέση με το σταθερό, δηλ. εμφανίζει πάλι μεγάλες απώλειες σκίασης. Σε περίπτωση που είχαμε άπλετο χώρο και κατάλληλη αραιώση των συστάδων θα είχαμε τελική αύξηση παραγόμενης ενέργειας στο  $+26\%$  σε σχέση με το σταθερό.



Εικόνα 56: Τοπολογία ιχνηλατών Δύο Αξόνων (Συνδυασμός Κατακόρυφου και Ανατολής – Δύσης) στο PVsyst Το μεσημέρι



Εικόνα 57: Τοπολογία ιχνηλατών Δύο Αξόνων (Συνδυασμός Κατακόρυφου και Ανατολής – Δύσης) στο PVsyst Προς το απόγευμα όταν ο ήλιος δύει



Εικόνα 58: Διάγραμμα ιχνηλατών Δύο Αξόνων (Συνδυασμός Κατακόρυφου και Ανατολής – Δύσης) στο PVSyst

### 3.10 Αποτελέσματα

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα απόδοσης από την προσομοίωση ετήσιας λειτουργίας ενός σταθερού Φ/Β συστήματος και 6 διαφορετικών συστημάτων με ιχνηλάτες. Με μαύρο χρώμα παρουσιάζεται η αύξηση στη συνολική παραγόμενη ετήσια ενέργεια σε σχέση με το Φ/Β πάρκο αναφοράς καθώς και το performance ratio της κάθε περίπτωσης. Το τελευταίο μαρτυρεί ότι σε τουλάχιστον τρεις περιπτώσεις ιχνηλατών, παρά την φαινομενική αύξηση παραγωγής ο λόγος απόδοσης πέφτει υπερβολικά από μια τιμή της τάξης 85% στο 75%. Η αιτία είναι κυρίως αυξημένες απώλειες σκίασης καθώς τα συγκεκριμένα συστήματα για να αποδώσουν πλήρως τις δυνατότητές τους απαιτούν περισσότερο χώρο.

Με κόκκινο φαίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα αν ακολουθούσαμε την απαιτούμενη αραιώση ανά σύστημα και δεν μας δέσμευαν οι αρχικές διαστάσεις που ορίσαμε για το Φ/Β πάρκο. Σε αυτήν την περίπτωση όλες οι διατάξεις έχουν περίπου τον ίδιο λόγο απόδοσης (83-86%) και αποτυπώνονται στην παραγόμενη ενέργεια οι πραγματικές τους δυνατότητες που οφείλονται στην εκάστοτε βελτιωμένη παρακολούθηση του ήλιου.

Τύπος	Ετήσια Παραγόμενη Ενέργεια (MWh/year)	Αύξηση Παραγόμενης Ενέργειας (%)	Performance Ratio (%)
Σταθερά	171.4	-	85.08
1 Οριζοντίου Άξονα E-W	176.6 (178.6)	+ 3.03 (+4.2)	84.50 (85.5)
1 Οριζοντίου Άξονα N-S	191.2 (199.9)	+11.55 (+16.6)	84.25 (82.95)
1 Οριζοντίου Άξονα N-S με κλίση	187.7 (212.9)	+9.48 (+24.21)	76.45 (83.65)
1 Κατακόρυφου Άξονα	196.3 (202.3)	+14.56 (+18.0)	82.45 (84.98)
2 Αξόνων Συνδυασμός N-S και E-W	201.9 (226.0)	+17.83(+31.8)	75.73 (84.18)
2 Αξόνων Συνδυασμός Κατακόρυφου και E-W	206.7 (216.5)	+20.06 (+26%)	76.71 (84.01)

Πίνακας 5 : Συνοπτικά Αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Με μαύρο τα αποτελέσματα σε περίπτωση ενός τετραγώνου χωραφιού. Με κόκκινο τα αποτελέσματα σε περίπτωση άπλετου χώρου

### 3.11 Συμπεράσματα

Εδώ συνοψίζονται κάποια από τα βασικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας:

Όπως αναμένεται, τα συστήματα ιχνηλάτησης (χάριν στην κατάλληλη συνεχή παρακολούθηση του ηλίου) μπορούν να αυξήσουν την ετήσια παραγόμενη ενέργεια έως και 31,8% σε σχέση με ένα τυπικό σταθερό Φ/Β σύστημα της ίδιας εγκατεστημένης ισχύος.



Τα συστήματα ιχνηλατών ενός άξονα Ανατολής-Δύσης προσφέρουν μια ισχυρή βελτίωση (πχ 3%) και βρίσκονται πολύ κοντά στα σταθερά. Η κίνηση των ιχνηλατών (που γίνεται μια φορά το μήνα χειροκίνητα) είναι ελάχιστη.

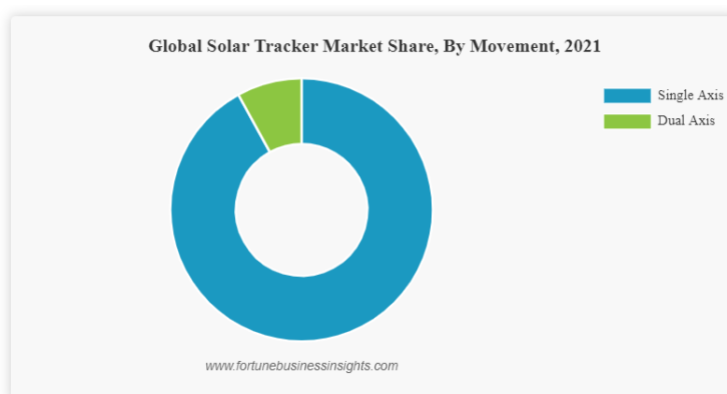
Τα υπόλοιπα συστήματα ενός άξονα κάνουν μια πλήρη κίνηση καθημερινά (ακολουθώντας τον ήλιο από την ανατολή έως τη δύση) και προσφέρουν μεγαλύτερη απόδοση ενέργειας (15-25%).

Τέλος, τα συστήματα δύο αξόνων, που προσαρμόζουν κατάλληλα και την κλίση και τον προσανατολισμό κάθε ώρα της ημέρας αυξάνουν την απόδοση στο 25-32%.

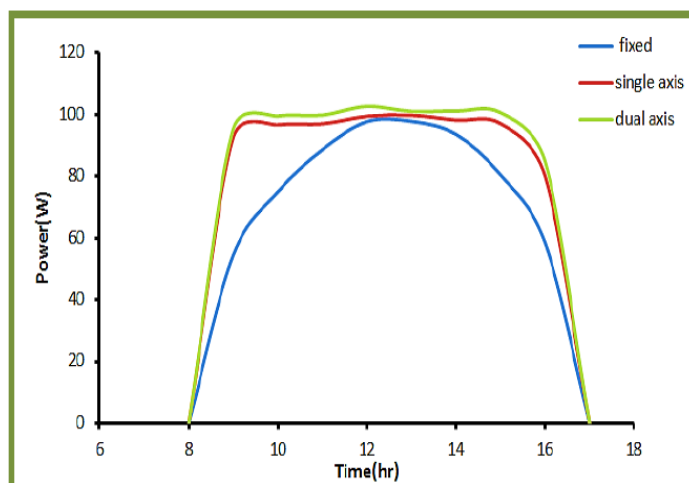
Σε πολλές από τις παραπάνω κατηγορίες απαιτείται μια διαφορετική διάταξη των στοιχειοσειρών ή συστάδων του συστήματος και ενίοτε απαιτείται μεγαλύτερος χώρος για την πλήρη αξιοποίησή τους.

Η σημερινή εικόνα της αγοράς δεν είναι ακριβώς σαφής. Είναι πιο διαδεδομένοι οι ιχνηλάτες μονού άξονα. Επίσης, δεν υπάρχει σαφής εικόνα για το τελικό κόστος καθενός από τους τύπους ιχνηλατών που παρουσιάστηκαν. Μπορεί να γίνει αποτίμηση της συμφέρουσας τιμής με βάση τις ενεργειακές αποδόσεις του Πίνακα 5.

Λόγω του αυξημένου κόστους εγκατάστασης και συντήρησης οι ιχνηλάτες προτείνονται για συστήματα μεγάλης κλίμακας (της τάξης των MW).



Εικόνα 59: Παγκόσμια αγορά ιχνηλατών. Είναι προφανές ότι προτιμάται του μονού άξονα



Εικόνα 60: Διαφορά στην ισχύ μεταξύ βάσεις σταθερή, ιχνηλάτη μονού ή διπλού άξονα



## 4 Βιβλιογραφία

- [1] Μελέτη Ηλιοθερμικής Μονάδας Παραβολικών Κατόπτρων 50MW - Χατζηαθανασίου Λώρα.
- [2] Βέλτιστη Σχεδίαση Bifacial Φ/Β Εγκαταστάσεων - Κουρκουραϊδης Θεόδωρος
- [3] «Ηλιοθερμικά συστήματα vs. Φωτοβολταϊκά» Source:Stanford  
<https://web.archive.org/web/20120514173056/http://www.solarthermalmagazine.com/2010/08/03/solar-thermal-and-pv-efficiency-breakthrough-standford-solar-energy-researchers-make-big-claims/>
- [4] «Ηλιοθερμικά συστήματα και οι διαφορές τους με τα Φωτοβολταϊκά»  
[https://web.archive.org/web/20111106004154/http://www.solar-thermal.com/solar\\_vs\\_pv.html](https://web.archive.org/web/20111106004154/http://www.solar-thermal.com/solar_vs_pv.html)
- [5] Solar Panel Angle: how to calculate solar panel tilt angle? - Dricus De Rooij
- [6] Ιδανική Ρύθμιση Μοιρών κατά χρονική περίοδο - Σταυρίδης  
<https://www.clamps.gr/dat/EF102208/file.pdf>
- [7] Bio-mimetic nanostructured surfaces for near-zero reflection sunrise to sunset, Stuart A. Boden, Darren M. Bagnall, University of Southampton, retrieved 5-June-2011
- [8] Following the sun: A brief history of solar trackers Utility Dive - 2016  
<https://www.utilitydive.com/spons/following-the-sun-a-brief-history-of-solar-trackers/431189/>
- [9] Solar Photovoltaic (PV) tracking System for Large Scale Solar Power Plants Mahindra Susten Pvt Ltd, Marol- Maroshi Road, Andheri (E), Mumbai 400058  
<https://www.mahindrasusten.com/images/pdf/MSAT100.pdf>
- [10] Hafez, A. Z., Yousef, A. M., & Harag, N. M. (2018). Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 91, 754-782.
- [11] What is a solar tracker and is it worth the investment? – 2022  
<https://www.solarreviews.com/blog/are-solar-axis-trackers-worth-the-additional-investment>
- [12] Βάσεις Στήριξης Φωτοβολταϊκών Συστημάτων  
<https://www.clamps.gr/vaseis-fotovoltaikon.el.aspx>

- [13] String Sizing Guide: How Many Solar Panels Can I String into My Inverter? Published on February 19, 2019, [unboundsolar.com/blog/string-sizing-guide](https://unboundsolar.com/blog/string-sizing-guide)
- [14] DataSheet Φωτοβολταϊκού πάνελ που χρησιμοποιήθηκε JKM530-550M-72HL4-(V)-F1-EN  
[https://www.jinkosolar.com/uploads/5ff587a0/JKM530-550M-72HL4-\(V\)-F1-EN.pdf](https://www.jinkosolar.com/uploads/5ff587a0/JKM530-550M-72HL4-(V)-F1-EN.pdf)
- [15] DataSheet Inverter που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση SG250HX-IN-20  
[https://en.sungrowpower.com/upload/file/20210108/DS\\_20201121\\_SG250HX%20Datasheet\\_V1.5.4\\_EN.pdf.pdf](https://en.sungrowpower.com/upload/file/20210108/DS_20201121_SG250HX%20Datasheet_V1.5.4_EN.pdf.pdf)
- [16] Electrical Contractors' Association ECA - Guide to the installation of Photovoltaic Systems - 2012
- [17] Κέντρο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ΚΑΠΕ - Οδηγίες για την εγκατάσταση ΦΒ συστημάτων σε κτίρια - 2009