



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«Βελτίωση μηχανισμών παρακολούθησης  
της ηλιακής ακτινοβολίας φωτοβολταϊκών  
πάνελ»**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΙΩΑΝΝΗΣ ΝΤΟΥΡΑΪ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Γεώργιος Καμπουρίδης**

**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΠΑΤΡΑ 2012**

*Στους Γονείς μου*

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του τμήματος Μηχανολογίας του Ανώτατου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πατρών την περίοδο 2012 και αναφέρεται στην παρουσίαση και βελτίωση μηχανισμών παρακολούθησης της ηλιακής ακτινοβολίας φωτοβολταϊκών τόξων (solar trackers/heliostats). Πιο συγκεκριμένα, η εργασία αναλύει τους υπάρχοντες μηχανισμούς και αποπειράται να δώσει κάποιες βελτιωμένες λύσεις.

Στο θεωρητικό μέρος της εργασίας δίνονται με σαφήνεια όλα εκείνα τα στοιχεία που χρειάζονται για να κατανοήσουμε τι είναι ο φωτοβολταϊκός ηλιοστάτης, ποια είναι η λειτουργία του, ποια είναι τα κύρια συστήματα που τον αποτελούν, σε ποιες περιπτώσεις εφαρμόζεται καθώς και άλλα ζητήματα γύρω από αυτόν. Στο ερευνητικό μέρος, αναλύσαμε τους φωτοβολταϊκούς ηλιοστάτες μεγάλου μεγέθους και μικρού μεγέθους και αποπειραθήκαμε να δώσουμε σχεδιαστικά (2D σχέδιο) μια ολοκληρωμένη λύση ενός φωτοβολταϊκού ηλιοστάτη.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της πτυχιακής μου εργασίας κ. Γεώργιο Καμπουρίδη για την ανάθεση της εργασίας, την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την καθοδήγηση, την πολύτιμη βοήθεια καθώς και τις χρήσιμες υποδείξεις που μου παρείχε για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας.

Ευχαριστώ θερμά την κ. Ευγενία Παπαιωάννου για την πολύτιμη βοήθεια της καθώς και για τις εξίσου πολύτιμες συμβουλές της.

Ευχαριστώ θερμά τον κ. Μιχαήλ Ε. Ζουλουφό , σύμβουλο ενεργειακών έργων, για την πολύτιμη βοήθεια του και τις πολύ σημαντικές συμβουλές του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά του γονείς μου για την ηθική και υλική υποστήριξη που μου παρείχαν όλα τα μέχρι τώρα χρόνια των σπουδών μου.

*Ιωάννης Ντούραϊ  
Ιούνιος 2012*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρεται στην παρουσίαση και βελτίωση των μηχανισμών παρακολούθησης της ηλιακής ακτινοβολίας φωτοβολταϊκών τόξων. Σκοπός της εργασίας είναι να παρουσιάσουμε τους υπάρχοντες μηχανισμούς παρακολούθησης της ηλιακής τροχιάς και να προτείνουμε μία βελτιωμένη λύση ενός ηλιοστάτη για την καλύτερη απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε δύο μέρη, θεωρητικό και ερευνητικό και συνολικά σε εννέα κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά περί της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών με μια ιστορική αναδρομή, κατόπιν δίνονται αναλυτικά τα βασικά στοιχεία και έννοιες σχετικά με την φωτοβολταϊκή τεχνολογία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι κατηγορίες των φωτοβολταϊκών συστημάτων, αυτόνομο και διασυνδεδεμένο σύστημα.

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στα συστήματα παρακολούθησης της ηλιακής κίνησης, και αναλύονται σε εκτενή βαθμό τα συστήματα ανοιχτού και κλειστού βρόγχου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η κυρίως εισαγωγή για τα συστήματα στήριξης των φ/β πλαισίων, και αναλύονται όλα τα συστήματα.

Το πέμπτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην αρχιτεκτονική συστήματος ηλιοστάτη. Σε αυτό το κεφάλαιο εξηγείται αναλυτικά κλάθε τι γύρω από τους φ/β ηλιοστάτες.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη μελέτη σε αντοχή ηλιοστάτη δύο αξόνων.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζεται το ερευνητικό μέρος της πτυχιακής, δηλαδή ένας προτεινόμενος φωτοβολταϊκός ηλιοστάτης δύο αξόνων.

Στο όγδοο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα του ερευνητικού μέρους της πτυχιακής.

## Πίνακας περιεχομένων

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	3
<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	4
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	5
<b>ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b>	
<b>1. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ</b> .....	9
1.1 Εισαγωγή .....	9
1.2 Ιστορική Ανασκόπηση .....	9
1.3 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	11
1.4 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	13
1.5 Η ηλιακή ακτινοβολία.....	18
1.5.1 Η ιδανική ακτινοβολία ενός πλήρους ηλίου .....	21
1.5.2 Η θέση του ήλιου στον ορίζοντα.....	23
1.5.3 Η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη.....	25
1.5.4 Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας .....	27
1.5.5 Η επίδραση των νεφών και της ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας .....	29
<b>2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ</b> .....	31
2.1 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων .....	31
2.2 Τα μέρη που συνιστούν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα .....	34
2.3 Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα.....	39
2.4 Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα.....	41
<b>3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ</b> .....	43
3.1 Εισαγωγή - Ανασκόπηση .....	43
3.2 Συστήματα κλειστού βρόγχου .....	45
3.3 Συστήματα ανοιχτού βρόγχου.....	57
<b>4. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ</b> .....	60
4.1 Εισαγωγή .....	60
4.2 Στήριξη με σταθερή γωνία κλίσης του συλλέκτη (σταθερή βάση) .....	60
4.3 Στήριξη με εποχιακή ρύθμιση της κλίσης του συλλέκτη.....	63
4.4 Συστήματα συνεχούς ημερήσιας παρακολούθησης.....	63
4.4.1 Στροφή γύρω από έναν άξονα .....	64
4.4.1.1 Ο αζιμουθιακός ιχνηλάτης (azimuthiac tracker).....	64
4.4.1.2 Ο πολικός ιχνηλάτης (polar tracker) .....	65
4.4.2 Στροφή γύρω από δύο άξονες .....	65

<b>5. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΙΟΣΤΑΤΗ (Solar tracker)</b> .....	68
5.1 Κίνηση και έλεγχος του ηλιοστάτη .....	68
5.1.1 Διανεμημένη – κατανεμημένη κίνηση .....	68
5.1.2 Ομαδοποιημένη κίνηση .....	68
5.2 Κατηγοριοποίηση με βάση τον τρόπο κίνησης του ηλιοστάτη.....	69
5.3 Δομή του ηλιοστάτη – ιχνηλάτη (tracker) .....	69
5.3.1 Θεμελίωση του ηλιοστάτη .....	70
5.3.2 Κορμός – σκελετός του ηλιοστάτη .....	71
5.3.3 Πλαίσιο .....	71
5.4 Στοιχεία – μέρη του ηλιοστάτη (solar tracker).....	72
5.5 Λειτουργία και τοποθέτηση .....	73
5.6 Επίδραση του ανέμου στον ηλιοστάτη .....	74
5.7 Θέση οριζοντίωσης – στοίβαξης (θέση προστασίας).....	76
5.8 Η επίδραση του βάρους των φωτοβολταϊκών στοιχείων .....	76
5.8 Κατώτερη δομή του ηλιοστάτη .....	77
<b>6. ΜΕΛΕΤΗ ΣΕ ΑΝΤΟΧΗ ΗΛΙΟΣΤΑΤΗ ΔΥΟ ΑΞΟΝΩΝ (2-axis solar tracker)</b> .....	78
6.1 Εισαγωγή .....	78
6.2 Καθορισμός ταχύτητας περιστροφής του συστήματος .....	78
6.3 Υπολογισμός δυναμικής πίεσης αέρα σύμφωνα με τον κανονισμό της Ε.Ε.....	79
6.4 Διαστασιολόγηση Κατασκευής.....	83
6.5 Επαλήθευση σωλήνα στήριξης επιφάνειας πάνελ .....	84
6.6 Επαλήθευση για τον κοίλο δοκό στήριξης του φωτοβολταϊκού πάνελ .....	88
6.7 Επαλήθευση μπράτσων στήριξης του φωτοβολταϊκού πάνελ .....	90
6.8 Μηχανισμός περιστροφής.....	90
6.9 Επαλήθευση γραμμικού εμβόλου.....	91
6.10 Επαλήθευση πυλώνα στήριξης .....	94
6.11 Στρέβλωση επιφάνειας πάνελ.....	96
6.12 Ισχύς κινητήρα για περιστροφή του συστήματος.....	97
<b>ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b>	
<b>7. ΠΡΟΤΑΣΗ ΗΛΙΟΣΤΑΤΗ ΔΥΟ ΑΞΟΝΩΝ (2-axis solar tracker)</b> .....	99
7.1 Διαξονικός φωτοβολταϊκός ηλιοστάτης μεγάλου μεγέθους (ύψος >2,5m).....	99
7.2 Διαξονικός φωτοβολταϊκός ηλιοστάτης μικρού μεγέθους ( ύψος 2,5m < ) .....	100
7.3 Σχέδιο σε Cad και ανάλυση λειτουργίας του προτεινόμενου μοντέλου (2D) ηλιοστάτη δύο αξόνων (2-axis solar tracker) .....	102

<b>8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>105</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>106</b>



# 1. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

## 1.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, διαπιστώνεται μία αυξητική τάση των κοινωνιών προς την χρησιμοποίηση των εναλλακτικών πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τόσο στον οικιακό τομέα όσο και στον βιομηχανικό τομέα. Η διαρκώς αυξανόμενη τιμή των ορυκτών καυσίμων σε συνδυασμό με την καταστροφική, για το περιβάλλον και τον άνθρωπο, κλιματική αλλαγή είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη τεχνολογιών άντλησης και αποθήκευσης ενέργειας που είναι φιλικές προς το περιβάλλον. Μια μορφή από τις ονομαζόμενες Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας είναι και η παραγωγή με χρήση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία χρησιμοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Η σταθερότητα της ηλιακής ακτινοβολίας στο σχετικό χρόνο του ανθρώπου στη Γή και το γεγονός ότι είναι ανεξάντλητη μορφή ενέργειας, αποτελούν δύο από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που ώθησαν τους επιστήμονες στην ανάπτυξη και βελτίωση μηχανισμών άντλησης της ηλιακής ενέργειας, γνωστά ως φωτοβολταϊκά τόξα.

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών τόξων βελτιώνεται σημαντικά όταν ο προσανατολισμός των τόξων παρακολουθεί σημαντικά την διεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας. Προς αυτήν την κατεύθυνση κινείται και η παρούσα εργασία. Σκοπός της είναι η παρουσίαση-ανάλυση καθώς και η βελτίωση των υπάρχοντων μηχανισμών παρακολούθησης της ηλιακής ακτινοβολίας (διεθνής ορολογία: solar tracker/heliostat) φωτοβολταϊκών τόξων. Η κύρια λειτουργία αυτών των μηχανισμών παρακολούθησης είναι η ανίχνευση της θέσης του ηλίου στον ουρανό με σκοπό τον προσανατολισμό του φωτοβολταϊκού συλλέκτη κατάλληλα ώστε να επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας. Ο τρόπος υλοποίησης της μεθόδου ανεύρεσης του ηλίου, η διαδικασία κατασκευής και η βελτιστοποίηση αυτών των μηχανισμών ακολουθούν στην συνέχεια της εργασίας. Πριν όμως είναι πολύ σημαντικό να αναφερθούν τα βασικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών συστημάτων καθώς και γενικά στοιχεία θεωρίας σχετικά με την ηλιακή ακτινοβολία, διότι η υλοποίηση του solar tracker βασίζεται πρωτίστως στη θεωρία.

## 1.2 Ιστορική Ανασκόπηση

Ο όρος φωτοβολταϊκή ενέργεια αναφέρεται στην ενέργεια που προερχόμενη από την ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται σε ηλεκτρική μορφή μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Η ιστορία της φωτοβολταϊκής ακτινοβολίας ξεκινά με την παρατήρηση του φαινομένου σε μεταλλικά ηλεκτρόδια (Pt, Ag) βυθισμένα σε ηλεκτρολύτες από τον Edmund Becquerel το 1839. Οι σημειώσεις του είχαν φανεί ενδιαφέρουσες

στην επιστημονική κοινότητα αλλά χωρίς πρακτική εφαρμογή. Το 1883 ο Charles Fritz παράγει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο με απόδοση 1-2 (%).

Περίπου είκοσι χρόνια αργότερα, το 1904 ο Albert Einstein γράφει την πληρέστερη θεωρία γύρω από το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, για την οποία η θεωρητική του εξήγηση τιμήθηκε με βραβείο Nobel το 1921. Το πρώτο στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si) κατασκευάστηκε το 1918 από τον Πολωνό Jan Czochralski ενώ λίγα χρόνια αργότερα παρατηρείται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο στο κάδμιο σελήνιο (CdS) το οποίο σήμερα αποτελεί σημαντικό υλικό παραγωγής φωτοβολταϊκών πάνελ (photovoltaic panel).

Το 1954 στα Bell Laboratories ανακαλύπτουν ότι το πυρίτιο μαζί με συγκεκριμένες ρυπαρότητες είναι πολύ ευαίσθητο στο φως, το αποτέλεσμα αυτής της παρατήρησης είναι η δημιουργία των πρώτων πρακτικών φωτοβολταϊκών στοιχείων με απόδοση 6(%). Μόλις τέσσερα χρόνια αργότερα, το 1958 κατασκευάζεται φωτοβολταϊκό στοιχείο με αυξημένη απόδοση περίπου 9 (%), ενώ τον ίδιο χρόνο στις 17 Μαρτίου εκτοξεύεται ο πρώτος δορυφόρος τροφοδοτούμενος από φωτοβολταϊκά (Vanguard I). Στον ίδιο χρόνο εκτοξεύονται άλλοι 3 δορυφόροι, ο Explorer III και ο Vanguard II από τους Αμερικάνους και ο Sputnik III από τους Σοβιετικούς.

Στα χρόνια που ακολουθούν υπάρχει συνεχής αύξηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών από 10(%) στο 14(%), ενώ μεγάλες φωτοβολταϊκές διατάξεις εγκαθίστανται στην Ιαπωνία (φωτοβολταϊκά σε φάρους) και στην Γαλλία (άμορφα CdS φωτοβολταϊκά σε σχολείο). Σημαντικό επίτευγμα θεωρήθηκαν το 1976 οι πρώτες εφαρμογές φωτοβολταϊκών για την τροφοδότηση ψυγείων, τηλεπικοινωνιακού και ιατρικού εξοπλισμού, άντλησης νερού και φωτισμού ενώ το 1977 η συνολική παραγωγή φωτοβολταϊκών είχε ξεπεράσει τα 500 kW.

Τα επόμενα χρόνια η παραγωγή των φωτοβολταϊκών συνεχώς αυξάνεται, συγκεκριμένα το 1983 η παγκόσμια παραγωγή φωτοβολταϊκών ξεπέρασε τα 21,3 MW. Το 1984 κυκλοφορούν τα άμορφα φωτοβολταϊκά ενώ λίγα χρόνια αργότερα, το 1999 η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύ σε φωτοβολταϊκά φτάνει τα 1000 MW. Το 2002 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς σε φωτοβολταϊκά ξεπέρασε τα 2000 MW.

Στις μέρες μας, οι εφαρμογές της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας είναι από τις πιο σημαντικές στον τομέα της συμπληρωματικής παραγωγής ενέργειας στον οικιακό και τον βιομηχανικό τομέα. Σήμερα νέα υλικά είναι υπό έρευνα, υλικά πολύπλοκων ενώσεων όπως ( Cadmium telluride και Copper indium diselenide) και υλικά οργανικής βάσης ενώ αναπτύσσονται τεχνικές συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως θα αναλυθεί και

### 1.3 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται από ημιαγώγιμα υλικά όπως το πυρίτιο (Si), το γερμάνιο (Ge) καθώς και από ενώσεις όπως αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) και θειούχο κάδμιο (CdS). Το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς το κατέχει το πυρίτιο (Si), όπως και στην περίπτωση των περισσότερων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων).

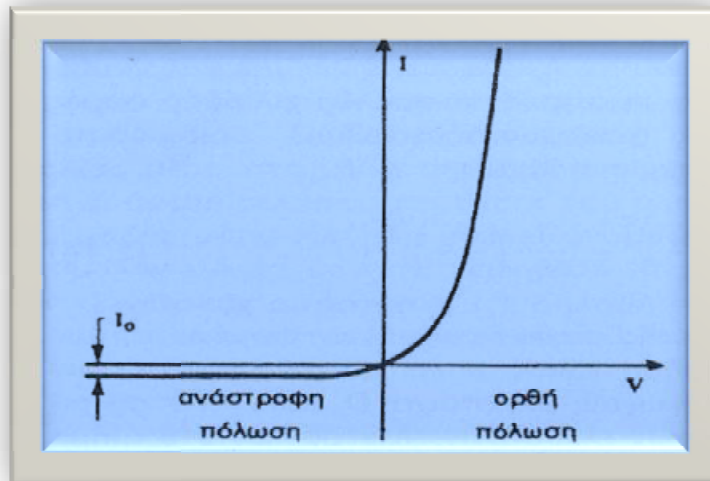
Όταν το πυρίτιο (τετρασθενές ημιαγώγιμο υλικό) απορροφήσει ενέργεια υπό μορφή θερμότητας ή ακτινοβολίας προκαλείται διάσπαση ηλεκτρονιακών δεσμών, ελευθερώνοντας έτσι ηλεκτρόνια στο σώμα του ημιαγωγού. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και σε συνθήκες δωματίου, όπου η αναλογία μεταξύ των ελεύθερων και δεσμευμένων ηλεκτρονίων είναι της τάξης του  $1/10^{13}$ .

Οπές (holes) ονομάζονται οι θέσεις από όπου φεύγουν τα ηλεκτρόνια. Οι οπές και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι υπεύθυνα για την ηλεκτρική αγωγιμότητα των ημιαγωγών.

Τα παραπάνω ισχύουν στους λεγόμενους ενδογενείς ή καθαρούς ημιαγωγούς, στους οποίους γίνεται πρόσμιξη πεντασθενών (αρσενικό) ή τρισθενών (βάριο) στοιχείων που λειτουργούν ως δότες και αποδέκτες ηλεκτρονίων αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ημιαγωγών πρόσμιξης *τύπου n*, οι οποίοι έχουν ως κύριους φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος τα αρνητικά φορτισμένα ελεύθερα ηλεκτρόνια και τους ημιαγωγούς πρόσμιξης *τύπου p*, η αγωγιμότητα των οποίων οφείλεται κυρίως στις οπές (θεωρούνται θετικά φορτισμένες). Στους φορείς που οφείλονται στην αγωγιμότητα του ημιαγωγού αναφερόμαστε ως φορείς μειονότητας, σε αντίθεση με τους κύριους φορείς όπου αναφερόμαστε ως φορείς πλειονότητας. Ο νόμος δράσης των μαζών, ο οποίος είναι βασικός νόμος για τους ημιαγωγούς, αποτυπώνεται παρακάτω:

$(\text{συγκέντρωση οπών}) \cdot (\text{συγκέντρωση ελευθέρων ηλεκτρονίων}) = (\text{ενδογενής συγκέντρωση})^2$ .

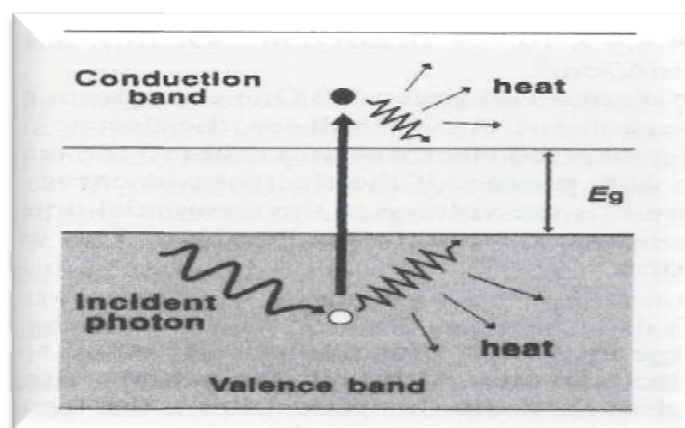
Για να επιτευχθεί η εκδήλωση των σημαντικών ιδιοτήτων των ημιαγωγών, απαραίτητη είναι η δημιουργία μίας ένωσης p-n με τα φαινόμενα διάχυσης που τη συνοδεύουν. Τότε παρατηρείται η εμφάνιση μίας περιοχής αραίωσης στην ένωση των δύο περιοχών και αναλόγως την πολικότητα της τάσης που εφαρμόζουμε στα άκρα της διάταξης παίρνουμε το παρακάτω διάγραμμα, μίας ημιαγώγιμης διόδου:



Σχήμα 1.1. Η χαρακτηριστική καμπύλη έντασης( $I$ ) – τάσης( $V$ ) μίας διόδου  $p$ - $n$ .

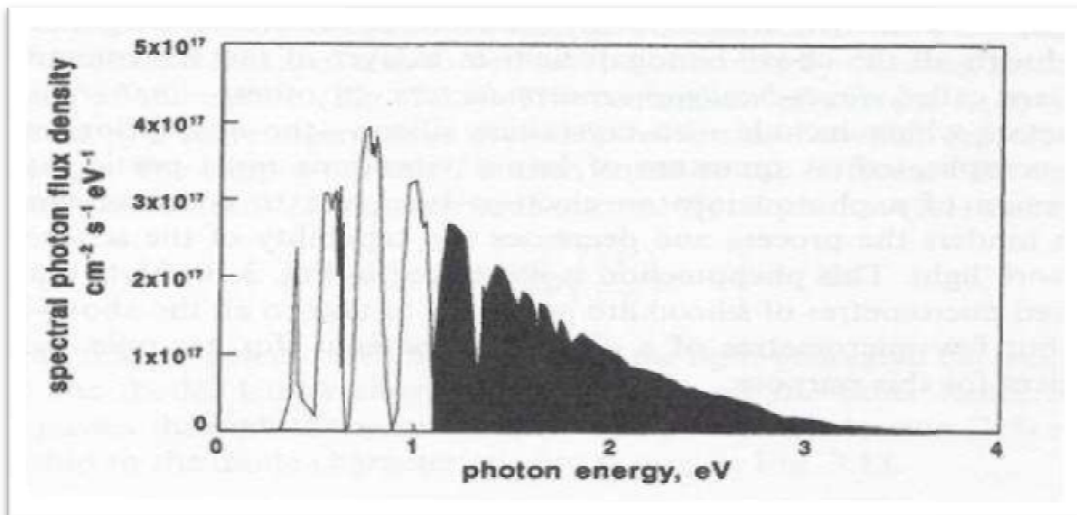
Στο παραπάνω σχήμα 1.1 διακρίνουμε τις δύο περιοχές ορθής και ανάστροφης πόλωσης καθώς και το λεγόμενο ανάστροφο ρεύμα κόρου που εμφανίζεται για αρνητικές τιμές επιβαλλόμενης τάσης.

Ας επικεντρωθούμε στην διαδικασία μετατροπής της ηλεκτρομαγνητικής (ηλιακής) ενέργειας σε ηλεκτρική (ρεύμα). Στην κβαντική φύση του φωτός βασίζεται η μετατροπή της ενέργειας: Κβάντα φωτός (φωτόνια) με ενέργεια το καθένα προσπίπτουν στην γήινη επιφάνεια με ρυθμό  $4,4 \cdot 10^{17}$  κάθε δευτερόλεπτο μίας ηλιόλουστης ημέρας. Με την πρόσπτωση των φωτονίων στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου, μπορούν να διεγείρουν ένα ηλεκτρόνιο το καθένα από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας δημιουργώντας ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και μια οπή. Στην κίνηση αυτή των φορτίων οφείλεται η δημιουργία του ηλεκτρικού ρεύματος που ουσιαστικά δεν παράγει αλλά μετατρέπει το φωτοβολταϊκό στοιχείο, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 1.2 :



Σχήμα 1.2. Η δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής από το φώς.

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δεν είναι δυνατόν να απορροφήσει όλα τα φωτόνια που προσπίπτουν σε αυτό παρά μόνο ένα μέρος του ηλιακού φάσματος. Αυτό συμβαίνει διότι δεν ταιριάζουν όλες οι ενέργειες των φωτονίων με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού. Παρατηρώντας το παρακάτω σχήμα 1.3 γίνεται κατανοητό το ποσό της ακτινοβολίας που απορροφάται:



Σχήμα 1.3. Το φασματική πυκνότητα ροής φωτονίων που εκμεταλλεύεται ένας συλλέκτης.

Το άνω όριο της τιμής της τάσης που αναπτύσσει η φ/β κυψέλη υπό συνθήκες ακτινοβολίας υπολογίζεται από την σχέση:  $V = E_g / q$ . Στην πράξη όμως εμφανίζονται μικρές διαφοροποιήσεις.

#### 1.4 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών στοιχείων

Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες φωτοβολταϊκών στοιχείων ανάλογα με τα υλικά που χρησιμοποιούνται και αντίστοιχες τεχνολογίες που αυτά κατασκευάζονται. Προτού αναφερθώ αναλυτικότερα στις κατηγορίες των φωτοβολταϊκών στοιχείων, θεωρώ σημαντικό να αναφέρω τα βασικά στάδια κατασκευής ενός φωτοβολταϊκού πάνελ τα οποία είναι τα εξής (4) τέσσερα:

- § 1<sup>ο</sup> στάδιο: Από άμμο σε καθαρό πυρίτιο (from sand to pure silicon).
- § 2<sup>ο</sup> στάδιο: Από καθαρό πυρίτιο σε δίσκους και κρυστάλλους (from silicon feedstock to crystals and wafers).
- § 3<sup>ο</sup> στάδιο: Από δίσκους σε κυψέλες (from silicon wafers to solar cells).
- § 4<sup>ο</sup> στάδιο: Από κυψέλες σε μονάδα (from cells to modules).

Τα στάδια της επεξεργασίας είναι ιδιαίτερος πολύπλοκα και απαιτούν εξεζητημένες τεχνικές που συνδυάζουν γνώση από διάφορα επιστημονικά

πεδία ( όπως ηλεκτροχημεία, ηλεκτρομαγνητισμό, δυναμική των ρευστών, χημεία) και ως εκ τούτου γίνεται μία απλή αναφορά.

Αποτέλεσμα της πληθώρας των διαφορετικών φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι τα παραχθέντα στοιχεία να παρουσιάζουν ποικιλία σε απόδοση και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Οι βασικές κατηγορίες των φ/β στοιχείων είναι:

- **Μονοκρυσταλλικά** και **πολυκρυσταλλικά** φωτοβολταϊκά στοιχεία (στα αγγλικά αποδίδεται με τον όρο: Crystalline silicon solar cell technology, single crystalline or multicrystalline). Αποτελεί την πιο διαδεδομένη τεχνική επί του παρόντος με το ποσοστό της επιτυχίας των εργαστηριακών αποδόσεων να φτάνει το 25%, αρκετά κοντά σε αυτό που είναι θεωρητικά επιτεύξιμο. Σε αυτό συνέβαλαν τα πολλά κοινά που παρουσιάζει η τεχνολογία αυτή με την επεξεργασία που γίνεται στο πυρίτιο από την βιομηχανία της μικροηλεκτρονικής. Η βιομηχανία έχει αναπτύξει τους απαραίτητους μηχανισμούς ώστε να είναι εφικτή η κατασκευή φ/β πάνελ με απόδοση 11% - 16%. Έτσι από επίσημα στοιχεία, για το έτος 1998, το 83% των φ/β συστημάτων παγκοσμίως χρησιμοποιούσαν τεχνολογία πολυκρυστάλλων (44%) και μονοκρυστάλλων (39%), ενώ την τεχνολογία άμορφου πυριτίου μόλις για το 13% (βλέπε παρακάτω σχήμα 1.4 και σχήμα 1.5) και 4% για άλλες τεχνολογίες (όπως cells based on ribbon silicon, cadmium telluride και διαφόρων τεχνικών συγκεντρωτικών συστημάτων).

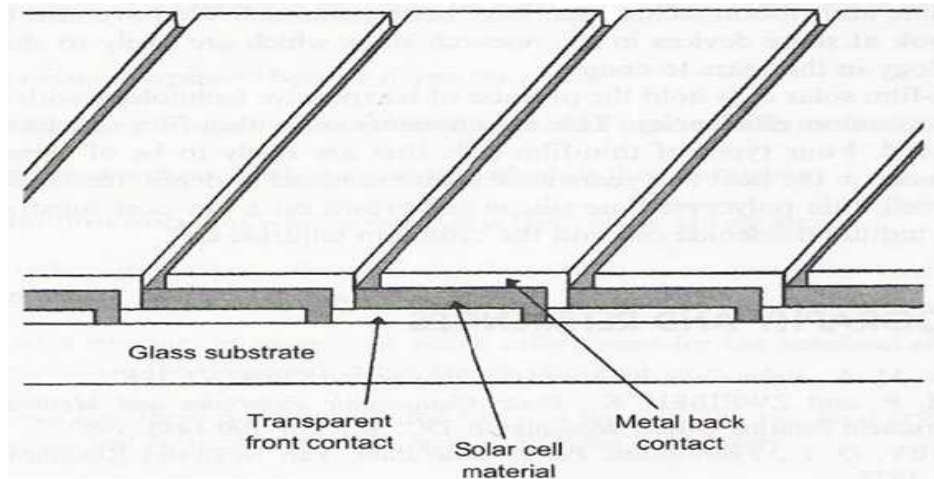


Σχήμα 1.4. Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο



Σχήμα 1.5. Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο

- **Τεχνολογία κυψελών λεπτού στρώματος** (thin film solar cell technology). Το σημαντικό πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι η κατασκευή μονάδων (modules) σε ολοκληρωμένη μορφή χωρίς να απαιτούνται οι δαπανηρές διασυνδέσεις των ανεξάρτητων κυψελών. Στο παρακάτω σχήμα 1.6 αποτυπώνεται ο τρόπος που δημιουργείται η ολοκληρωμένη διασύνδεση σε μονάδα τεχνολογίας λεπτού στρώματος :



*Σχήμα 1.6. Εσωτερικά διασυνδεδεμένη μονάδα*

Επιπλέον, η τεχνολογία κυψελών λεπτού στρώματος προσφέρει σημαντική μείωση των τιμών λόγω της χρήσης λιγότερου υλικού και ενέργειας κατά την διαδικασία κατασκευής των κυψελών. Στην κατηγορία αυτής της τεχνολογίας ανήκουν μερικές ενδιαφέρουσες τεχνικές παραγωγής φ/β στοιχείων όπως:

- § **Τελουριούχο κάδμιο (CdTe)** (Cadmium telluride cells). Αποτελούν τον ιδανικό τύπο κυψελών με τα ιδανικά χαρακτηριστικά όσον αφορά την ηλιακή απορρόφηση. Το μειονέκτημα της τεχνολογίας αυτής πηγάζει από την ιδιαίτερως δύσκολη κατασκευή των κυψελών , λόγω της εναπόθεσης του Cadmium telluride σε κενό).

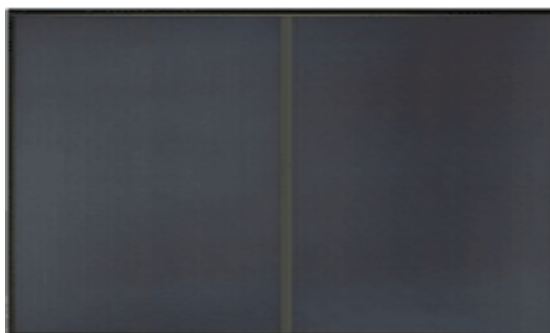


*Σχήμα 1.7. Τελουριούχο κάδμιο CdTe*

- § Χαλκού Ινδίου (Γάλλιο) di-Σεληνιούχο (CIS/CIGS) (Copper indium diselenide cells). Το υλικό από το οποίο

είναι κατασκευασμένες οι κυψέλες παρουσιάζει άμεση οπτική επαφή με υψηλό συντελεστή απορρόφησης. Ο ακριβής έλεγχος της στοιχειομετρίας στην παραγωγή και η αναλογία χαλκού ή ίνδιου αποτελούν τα δύο στοιχεία από τα οποία εξαρτώνται τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένες οι κυψέλες.

§ **Κυψέλες άμορφου πυριτίου (a-Si)** (amorphous silicon cells). Στην συγκεκριμένη τεχνική παραγωγής φ/β στοιχείων τα άτομα του πυριτίου δεν βρίσκονται σε αρκετά ακριβείς αποστάσεις μεταξύ τους και οι γωνίες των δεσμών πυριτίου δεν έχουν μοναδική τιμή αλλά παρουσιάζουν μία ποικιλία διαφορετικών τιμών σε αντίθεση με την αρκετά συγκεκριμένη δομή των κρυσταλλικών κυψελών. Συνοψίζοντας τα παραπάνω, το πυρίτιο διαφέρει από την κρυσταλλική του δομή στην συγκεκριμένη τεχνική.

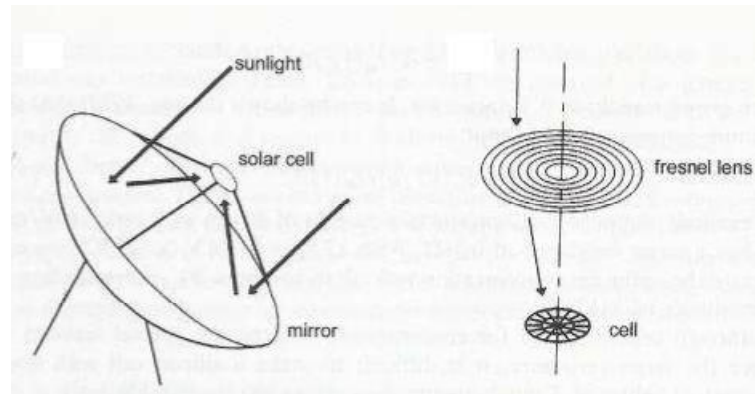


Σχήμα 1.8. Άμορφο πυρίτιο (a-Si)

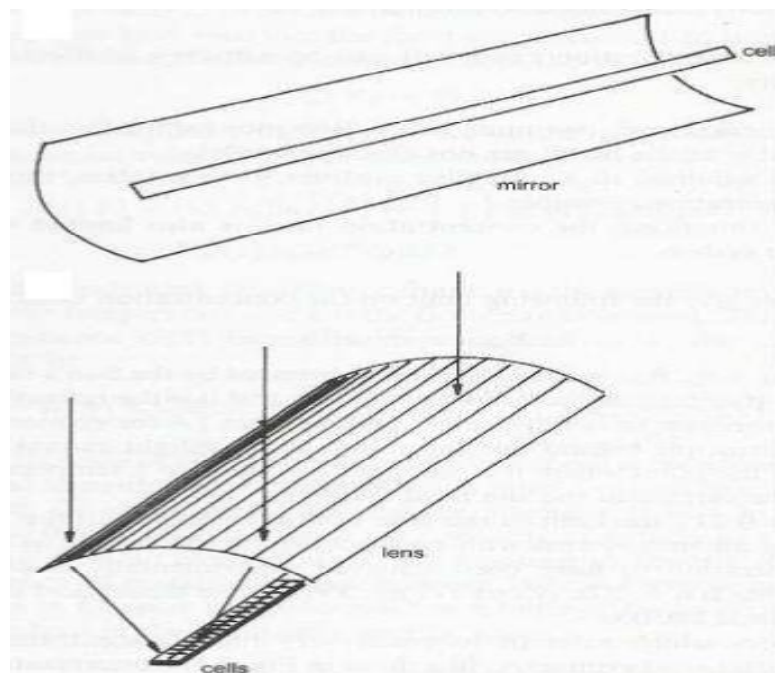
§ **Συγκεντρωτικά συστήματα της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω φ/β κυψελών** (Concentrator solar cell systems). Η διαδικασία συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στα συστήματα που χρησιμοποιούν την συγκεκριμένη τεχνική είναι η εξής: Την ηλιακή ακτινοβολία την συγκεντρώνουν παραβολικά κάτοπτρα από μια μεγάλη περιοχή σε ένα μικρό κομμάτι φ/β στοιχείου πολύ υψηλής απόδοσης (βλέπε GAs) και σαφώς υψηλότερου κόστους. Όμως ο συνδυασμός του χαμηλού κόστους των παραβολικών σε σχέση με τα φ/β στοιχεία κάνουν οικονομικά συμφέρουσα την τεχνολογία αυτή, παρόλο που ένα από τα σημαντικότερα



μειονεκτήματα αυτής της τεχνικής είναι η δυσκολία στον εντοπισμό της ακριβούς θέσης του ηλίου (tracking) σε οπτικό επίπεδο. Είναι δυνατόν να γίνει χρήση φακών Φρέσνελ (Fresnel) ή και χρήση παραβόλων. Στα παρακάτω σχήματα 1.9 και 1.10 φαίνεται ο τρόπος λειτουργίας τους:



Σχήμα 1.9. Συμμετρικά συγκεντρωτικά συστήματα: Αριστερά παραβολικός καθρέπτης, δεξιά φακός Fresnel

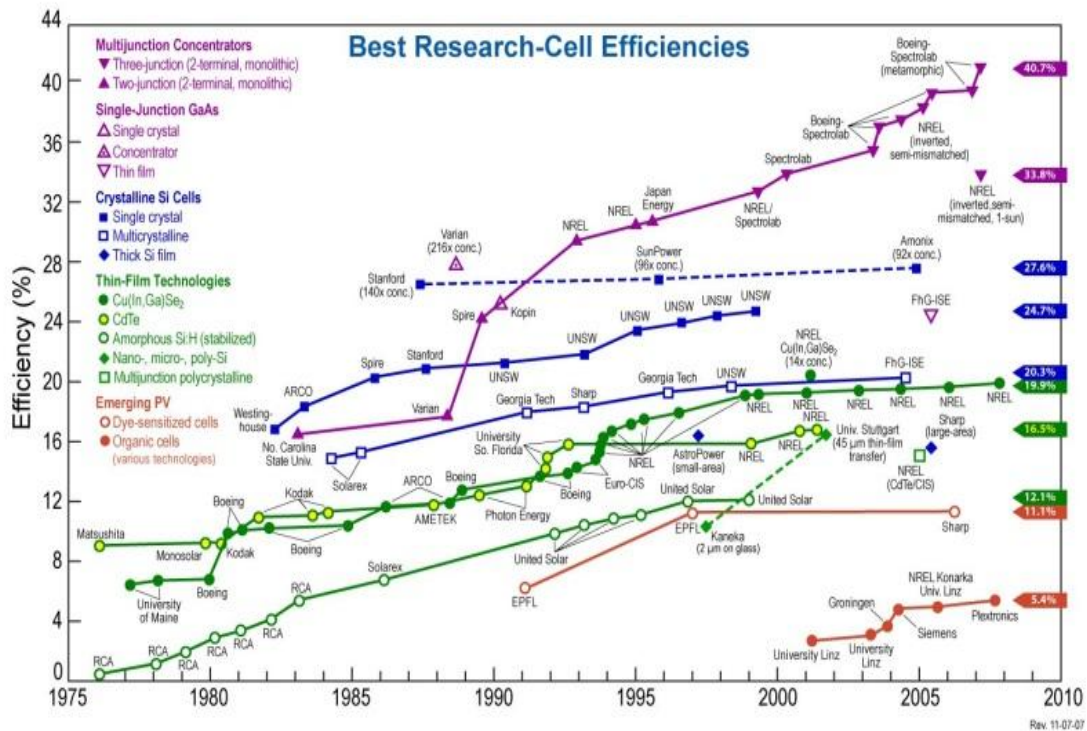


Σχήμα 1.10. Γραμμικώς συμμετρικά συγκεντρωτικά συστήματα: πάνω παραβολικός καθρέπτης, κάτω κυρτός φακός Fresnel.

- **Υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία.** Κάθε ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών. Τα πιο γνωστά εμπορικά υβριδικά

στοιχεία αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω κ' κάτω) ενώ ανάμεσα τους υπάρχει μία στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Ένα πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης που σε εμπορικές εφαρμογές φτάνει το 17,2% .

Στο παρακάτω Σχήμα 1.11 (διάγραμμα) απεικονίζεται η εξέλιξη της απόδοσης των διαφόρων φωτοβολταϊκών στοιχείων. Στον οριζόντιο άξονα x έχουμε την καταγραφή των χρονολογικών εξελίξεων, έχοντας ως αφετηρία το 1975 έως το 2010. Ενώ στον κάθετο άξονα y εμφανίζεται η αποδοτικότητα του κάθε φωτοβολταϊκού στοιχείου σε ποσοστιαίες επί τοις εκατό(%) μονάδες, έχοντας ως μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή το 44(%) .



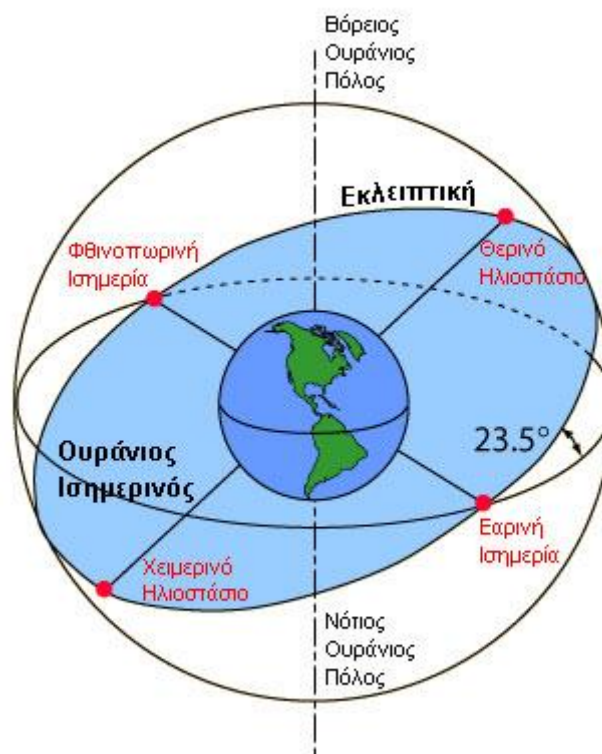
Σχήμα 1.11 Εξέλιξη της απόδοσης των διαφόρων φωτοβολταϊκών στοιχείων.

### 1.5 Η ηλιακή ακτινοβολία

Η μελέτη της ισχύος της ακτινοβολίας που δέχονται στην επιφάνεια τους τα φωτοβολταϊκά στοιχεία από τον ήλιο αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα θέματα προς διερεύνηση. Είναι μείζονος σημασίας να κατανοήσουμε ότι, όσο περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει

άμεσα στο φ/β πάνελ, για όσο το δυνατόν περισσότερο χρόνο κατά την διάρκεια της ημέρας, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων και γενικότερα των φωτοβολταϊκών διατάξεων. Παρακάτω θα αναφερθούμε στη σχέση Γης-ηλίου και ηλιακής ακτινοβολίας.

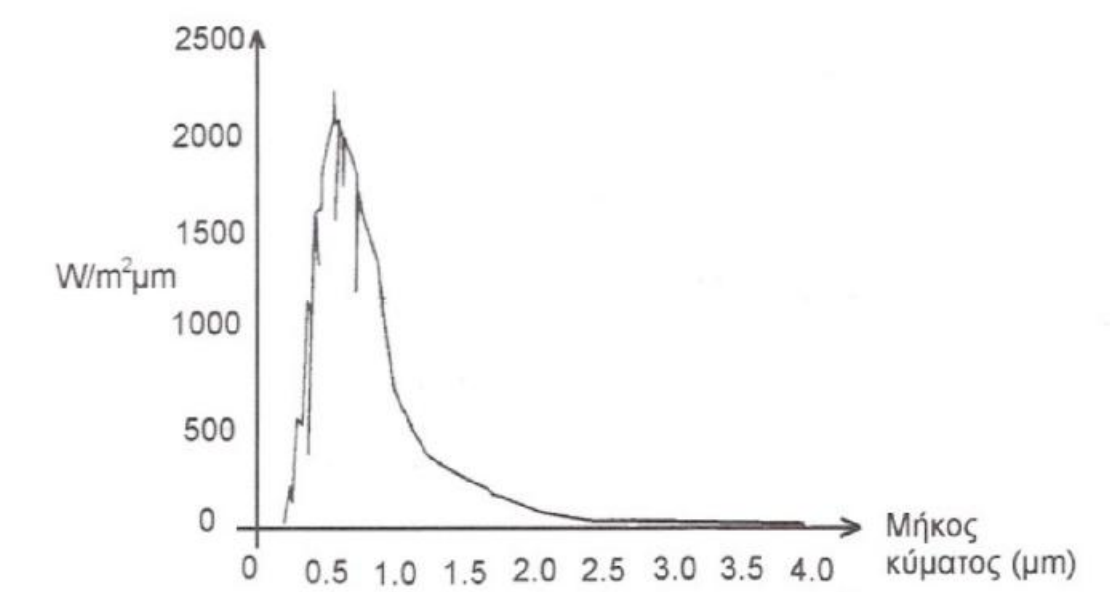
Η Γη σε σχέση με τον ήλιο γυρίζει με έναν ρυθμό της τάξεως των 15°/ώρα, γνωρίζοντας ότι κάνει μια περιστροφή την ημέρα. Το επίπεδο περιστροφής της Γης γύρω από τον ήλιο ονομάζεται εκλειπτικό επίπεδο. Η κάθετος στο εκλειπτικό επίπεδο σχηματίζει γωνία περίπου 23.5°, με τον άξονα περιστροφής της Γης. Για τις ημερήσιες μεταβολές στα επίπεδα της ηλιακής ακτινοβολίας ευθύνεται η περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονα της. Επιπλέον, η θέση του άξονα της σε σχέση με τον ήλιο προκαλεί τις εποχιακές αλλαγές στην ηλιακή ακτινοβολία.



Σχήμα 1.12

Η ηλιακή ενέργεια μεταφέρεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας από τον ήλιο, ο οποίος βρίσκεται σε μία μέση απόσταση  $149,6 \cdot 10^6 \text{ Km}$  από την γη. Η μεταβολή της απόστασης του ήλιου σε σχέση με την γη ανά έτος είναι  $\pm 1,7\%$ , λόγω της ελλειπτικής μορφής της τροχιάς της γης γύρω από τον ήλιο, και επαναλαμβάνεται από χρόνο σε χρόνο με μικρές μεταβολές. Αντιστοίχως, η διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια του πλανήτη μας εκτιμάται στα επίπεδα του  $\pm 3,4\%$ .

Από διάφορες αναλύσεις ερευνών υπολογίζεται ότι η ενέργεια που εκπέμπει ο ήλιος (ανά μονάδα χρόνου) υπό μορφή ακτινοβολίας ισχύος είναι  $3.72 \cdot 10^{23} \text{KW}$ . Ηλιακή σταθερά ( $G_{SC}$ ) ονομάζεται η ποσότητα εκπεμπόμενης ενέργειας ανά μονάδα χρόνου, που φτάνει σε μοναδιαία επιφάνεια κάθετη στην διεύθυνση της ακτινοβολίας, στη μέση ετήσια απόσταση Γης-ήλιου και ισούται με  $1367 \text{ W/m}^2$ . Τα φάσμα του μήκους κύματος στο οποίο κατανέμεται η ηλιακή ακτινοβολία είναι από 2500 έως 40000 Angstrom (ισχύει ότι  $1 \text{ Angstrom} = 10^{-10} \text{m}$ ). Στο παρακάτω 1.13 σχήμα απεικονίζεται η φασματική κατανομή της ηλιακή ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα.



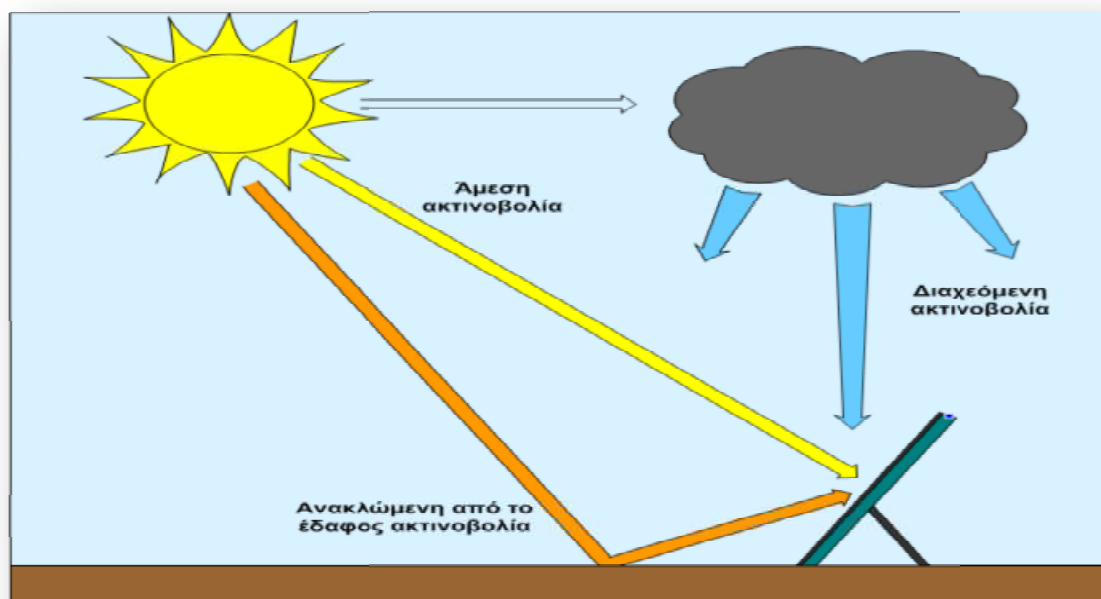
Σχήμα 1.13. Φασματική κατανομή της ηλιακή ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα.

Οι σύγχρονες αναλύσεις της φασματικής κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας δείχνουν ότι το μεγαλύτερο μέρος αυτής βρίσκεται σε μικρά μήκη κύματος, δηλαδή έως 3 με 4 μm. Μεγάλου μήκους κύματος ονομάζεται η ακτινοβολία άνω των 4μm. Έχοντας υπόψη τα διαθέσιμα στοιχεία προκύπτει ότι το 99% της ηλιακής ενέργειας περιλαμβάνεται σε μήκη κύματος από 0.25 έως 4μm. Στο ορατό τμήμα της ακτινοβολίας, δηλαδή με μήκη κύματος από 0.39-0.77 μm, περιέχεται το 46,41% της ενέργειας. Ενώ στο υπεριώδες τμήμα της ακτινοβολίας, δηλαδή με μήκη κύματος <0.4 μm, περιέχεται το 8.03% της ενέργειας. Τέλος το υπόλοιπο 45.56% της ενέργειας της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας περιέχεται στην φασματική περιοχή με μήκος κύματος >0.77μm.

Η ολική ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης χωρίζεται σε άμεση και διάχυτη, ενώ το άθροισμα αυτών είναι η ολική ενέργεια. **Άμεση** ονομάζεται η ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης χωρίς σκέδαση κατά την διαδρομή της. **Διάχυτη** ονομάζεται η ακτινοβολία όπου φτάνει στην επιφάνεια της Γης αφού λόγω ανάκλασης ή σκέδασης έχει αλλάξει διεύθυνση μέσα στην ατμόσφαιρα.

**Ανακλώμενη** καλείται η ακτινοβολία που ανακλάται σε αντικείμενα όπως ο φωτοβολταϊκός συλλέκτης.

Ο σωστός προσανατολισμός της φωτοβολταϊκής μονάδας σχετίζεται με το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας, τη θέση ως προς τον ορίζοντα, το υψόμετρο, η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υγρασία, οι μετεωρολογικές συνθήκες κ.α. Είναι γνωστό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση που διανύει μία ηλιακή ακτίνα μέσα στην ατμόσφαιρα τόσο μικρότερο είναι το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης. Επίσης, όσο πιο κάθετα προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία σε μία επιφάνεια τόσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της.

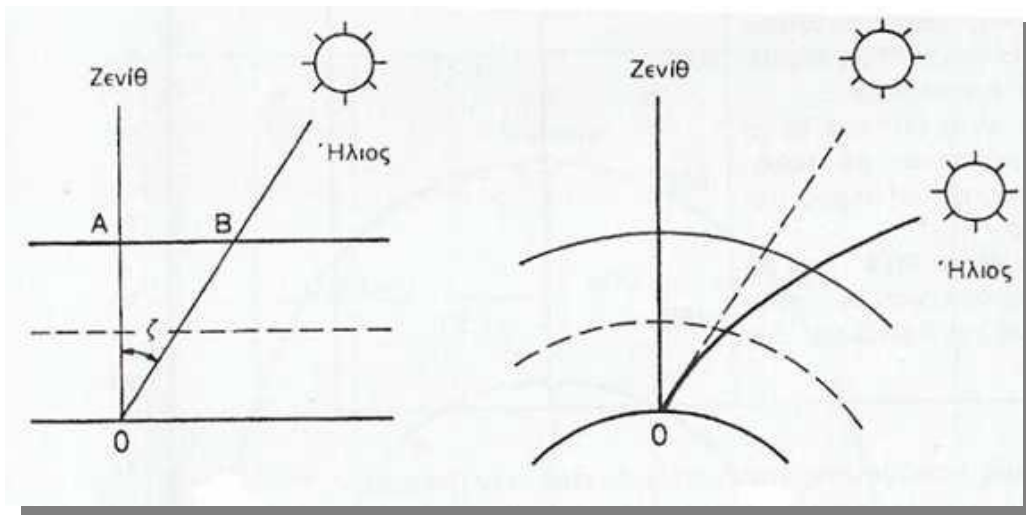


Σχήμα 1.14. Άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία.

### 1.5.1 Η ιδανική ακτινοβολία ενός πλήρους ηλίου.

Το μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην γήινη ατμόσφαιρα μέχρι την στάθμη της θάλασσας χαρακτηρίζεται από μια κλίμακα μάζας αέρα AM (air mass, ονομάζεται επίσης οπτική αέρια μάζα)

βαθμολογημένης με την γωνία ανάμεσα στη θέση του ηλίου και στην κατακόρυφο, δηλαδή την τέμνουσα της ζενιθιακής απόστασης. Με την βοήθεια αυτής της κλίμακας μπορούμε να κατανοήσουμε την ποσοτική αύξηση της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα συγκρινόμενη με την κατακόρυφη διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας. Στο παρακάτω σχήμα 1.15 απεικονίζεται αυτή η εξάρτηση της κλίμακας μάζας αέρα από την θέση του ηλίου:



Σχήμα 1.15.

Η Αέρια μάζα AM (Air Mass) ορίζεται ως η αναλογία της διαδρομής του φωτός μέσα στην ατμόσφαιρα προς το συνολικό πάχος της ατμόσφαιρας. Η Αέρια μάζα δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$AM = \frac{1}{\cos\theta_z}, \quad 0 \leq \theta_z \leq 70^\circ$$

Στον παρακάτω Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται οι πρότυπες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στην κλίμακα μάζας αέρα (air mass).

Τιμή μάζας αέρα	Συμβατικές συνθήκες	Ισχύς (W/m <sup>2</sup> )	Μέση ενέργεια των φωτονίων (eV)
AM0	Στο διάστημα, έξω από την ατμόσφαιρα.	1350	1,48
AM1	Ο ήλιος στο ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στην στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	1060	1,32

<b>AM2</b>	Απόσταση του ήλιου 60° από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στην στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	880	1,38
<b>AM3</b>	Απόσταση του ήλιου 70,5° από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στην στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	750	1,21

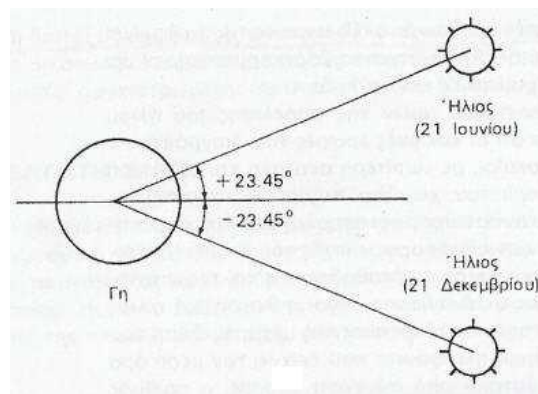
*Πίνακας 1.1. Πρότυπες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στην κλίμακα αέρα μάζας (air mass).*

Ας αναφερθούμε ειδικότερα στον παραπάνω Πίνακα 1.1 δίνοντας έμφαση στην πιο κατανοητή επεξήγηση του. Στον παραπάνω Πίνακα παρουσιάζονται οι πυκνότητες ισχύος και η μέση ενέργεια των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες πρότυπες συνθήκες στην κλίμακα μάζα αέρα. Ως AM1 συμβολίζεται η συνθήκη για την θέση του ηλίου στην κατακόρυφο, δηλαδή στο ζενίθ που αντιστοιχεί στο ελάχιστο μήκος διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα. Ως AM1.5 συμβολίζεται η διαδρομή της ακτινοβολίας με τον ήλιο σε γωνία 45°(μοίρες) από το ζενίθ. Όμοια ως AM2 συμβολίζεται η διαδρομή της ακτινοβολίας με τον ήλιο σε γωνία 60°(μοίρες) από το ζενίθ κτλ. Πρέπει να σημειώσουμε ότι το μηδέν της κλίμακας που ταυτίζεται με την ηλιακή σταθερά συμβολίζει την πλήρη απουσία της ατμοσφαιρικής παρεμβολής, δηλαδή την ηλιακή ακτινοβολία στο διάστημα, σε θέση που να απέχει όση είναι η μέση απόσταση της Γής με τον ήλιο. Μία αντιπροσωπευτική προσέγγιση της μέσης μέγιστης ισχύος που δέχεται μια επιφάνεια κάθετη προς τον ήλιο το καλοκαίρι με ευνοϊκές – ιδανικές συνθήκες (μεσημέρι, χωρίς συννεφιά, χαμηλή ατμοσφαιρική υγρασία κτλ) είναι η ηλιακή ακτινοβολία με Air mass 1.5 , η οποία έχει πυκνότητα ισχύος 935 W/m<sup>2</sup>. Σε αυτή την ιδανική κατηγορία με τις ευνοϊκές συνθήκες που αναφέρθηκαν παραπάνω ανήκει και η Ελλάδα. Αξίζει να σημειωθεί ότι για λόγους ευκολίας των μετρήσεων η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας Air mass 1.5 στρογγυλοποιείται στα 100 W/m<sup>2</sup> και ονομάζεται συμβατικά ακτινοβολία ενός πλήρους ηλίου(επισημαίνετε το πλήρης ως προαιρετικό).

### **1.5.2 Η θέση του ήλιου στον ορίζοντα.**

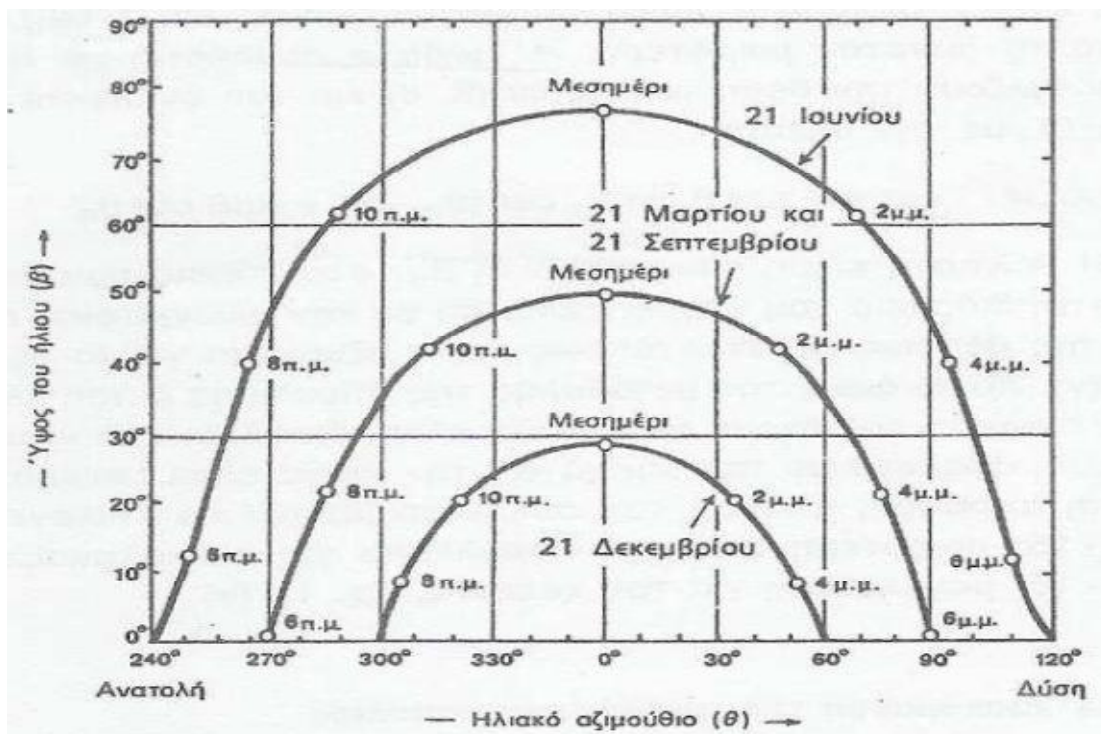
Η θέση του ηλίου αναφορικά με την τοποθεσία που βρισκόμαστε στη γη αποτελεί τον πλέον σημαντικότερο και πλήρως προβλεπόμενο παράγοντα που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα φωτοβολταϊκό πάνελ. Παρατηρώντας τα παρακάτω σχήματα που ακολουθούν συμπεραίνουμε ότι κατά την διάρκεια του έτους η θέση του ηλίου αποκλίνει σημαντικά από το διάκεντρο της γης – ήλιου.

Στο παρακάτω σχήμα 1.16 φαίνεται η ακραία απόκλιση του ήλιου κατά το θερινό και το χειμερινό ηλιοστάσιο:



Σχήμα 1.16. η ακραία απόκλιση του ήλιου κατά το θερινό και το χειμερινό ηλιοστάσιο.

Ακολουθεί ένα πολύ σημαντικό διάγραμμα (σχήμα 1.17) της τροχιάς του ήλιου στον ουρανό κατά την διάρκεια της ημέρας για διάφορες εποχές, το οποίο αποτελεί ένα παράδειγμα, που αναφέρεται σε τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος  $38^\circ$  βόρεια, πλάτος που αντιστοιχεί και στην περιοχή των Αθηνών. Πρέπει να λάβουμε υπόψη μας ότι η αναφορά της ώρας δεν είναι το ωρολογιακό αλλά το ηλιακό μεσημέρι:



Σχήμα 1.17. Οι τροχιάς του ήλιου για τα ηλιοστάσια και τις ισημερίες σε γεωγραφικό πλάτος βόρειο  $38^\circ$  (Αθήνα). Οι ενδείξεις της ώρας είναι σε ηλιακές τιμές.



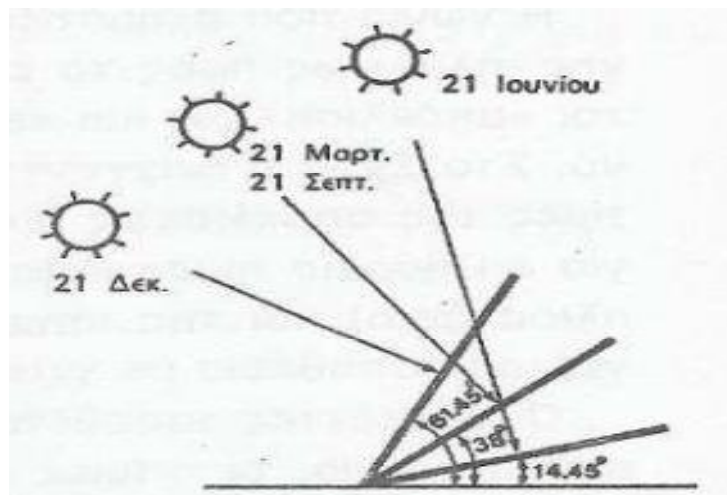
### 1.5.3 Η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη.

Η απορροφούμενη ακτινοβολία είναι μέγιστη όταν οι ακτίνες του ηλίου προσπίπτουν κάθετα στο επίπεδο του συλλέκτη. Συνεπώς για να επιτευχθεί η λήψη της μέγιστης ποσότητας της ηλιακής ενέργειας θα έπρεπε ο συλλέκτης να στρέφεται συνεχώς ώστε να παρακολουθεί την πορεία του ήλιου.

Λόγω της μεταβολής της απόκλισης του ηλίου κατά την διάρκεια του έτους, η βέλτιστη κλίση των συλλεκτών είναι διαφορετική για κάθε εποχή και κατ' επέκταση για κάθε μήνα.

Στη γενικότερη περίπτωση, η θέση του συλλέκτη προσδιορίζεται από τη γωνία  $\beta$  που σχηματίζει με το οριζόντιο επίπεδο (κλίση συλλέκτη), και την γωνία  $\gamma$  που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια του και την κατεύθυνση προς το νότο (αζιμούθια γωνία του συλλέκτη). Για την Ελλάδα η βέλτιστη γωνία τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πάνελ (PV panel) είναι η γωνία των  $30^\circ$  (μοιρών).

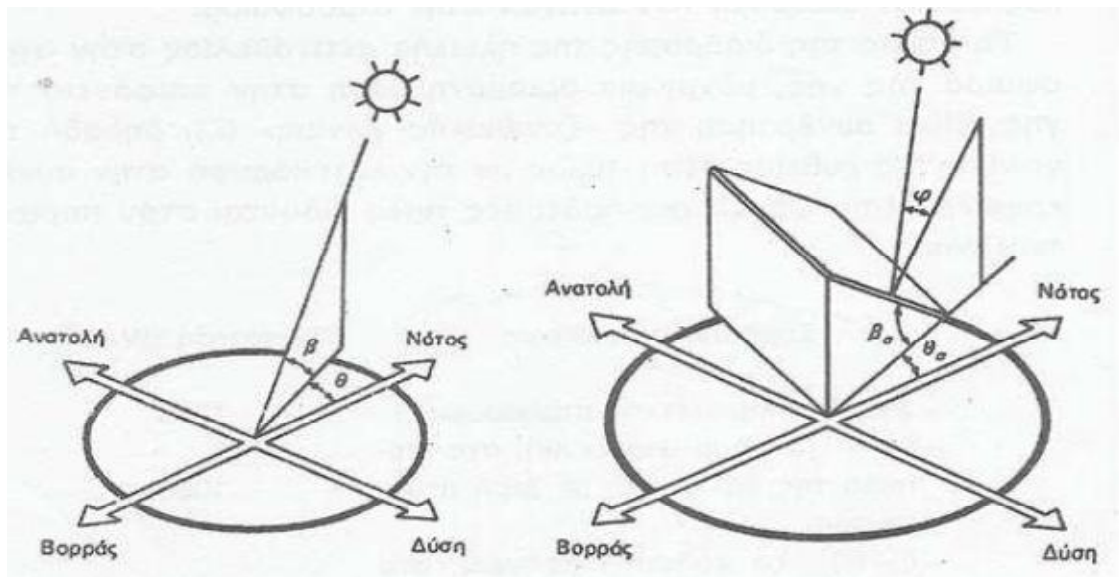
Στο παρακάτω σχήμα 1.18 απεικονίζεται η βέλτιστη κλίση του φωτοβολταϊκού συλλέκτη ως προς τον ορίζοντα, για διάφορες ημερομηνίες:



Σχήμα 1.18. Η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη κατά τις αντίστοιχες ημερομηνίες.

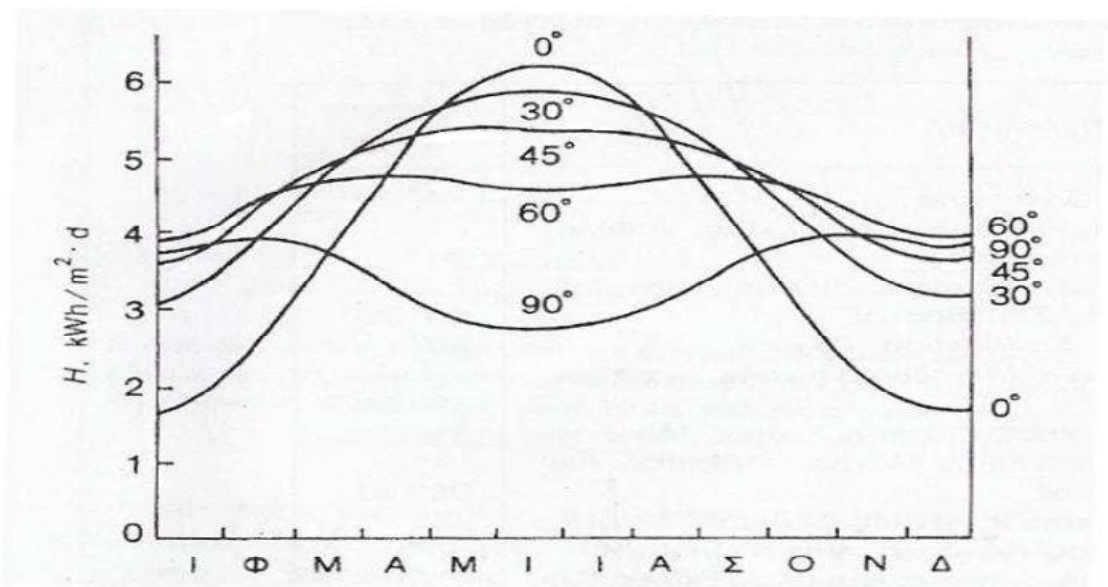
Η συνέπεια της απόκλισης αυτής του ηλίου είναι να διαγράφονται ηλιακές τροχιές βορειότερα στον ουρανό το καλοκαίρι, με νωρίτερη ανατολή και αργότερη δύση στο βόρειο ημισφαίριο, ενώ αντίθετα συμβαίνει το χειμώνα. Για την πιο σωστή αναφορά της θέσης του ηλίου μας βοηθάνε η δύο βασικότερες γωνίες: το ύψος ( $\beta$ ) και το αζιμούθιο ( $\theta$ ), όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 1.19, όπου παρουσιάζεται και ο προσανατολισμός του

φωτοβολταϊκού συλλέκτη με τις χαρακτηριστικές του γωνίες: κλίση ( $\beta_{\sigma}$ ) και αζιμούθια γωνία συλλέκτη ( $\theta_{\sigma}$ ).



Σχήμα 1.19. Η θέση του ηλίου και του συλλέκτη ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα 1.19, η βέλτιστη κλίση του φωτοβολταϊκού συλλέκτη ( $\beta_{\sigma}$ ) στο βόρειο ημισφαίριο, για όλη τη διάρκεια του έτους είναι ίση με τον γεωγραφικό παράλληλο της τοποθεσίας, ενώ η βέλτιστη αζιμούθια γωνία είναι ίση με μηδέν. Παρατήρηση: Η άνω βέλτιστη κλίση του φωτοβολταϊκού συλλέκτη ( $\beta_{\sigma}$ ) αναφέρεται καθ' όλη την διάρκεια του έτους και εφαρμόζεται σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, σαφώς όπου είναι εφικτό, να είναι ρυθμιζόμενη αυτή η κλίση.



Σχήμα 1.20. Η εξάρτηση της μέσης ημερήσιας ακτινοβολίας για διάφορες κλίσεις σε περιοχή γεωγραφικού πλάτους  $45^{\circ}$ .

Στο παραπάνω σχήμα 1.20 παρατηρούμε ότι μια κλίση με το γεωγραφικό πλάτος είναι βέλτιστη για σταθερούς συλλέκτες, αλλά από την άλλη πλευρά αξίζει τον κόπο να ρυθμίζουμε την κλίση ανάλογα με την εποχή.

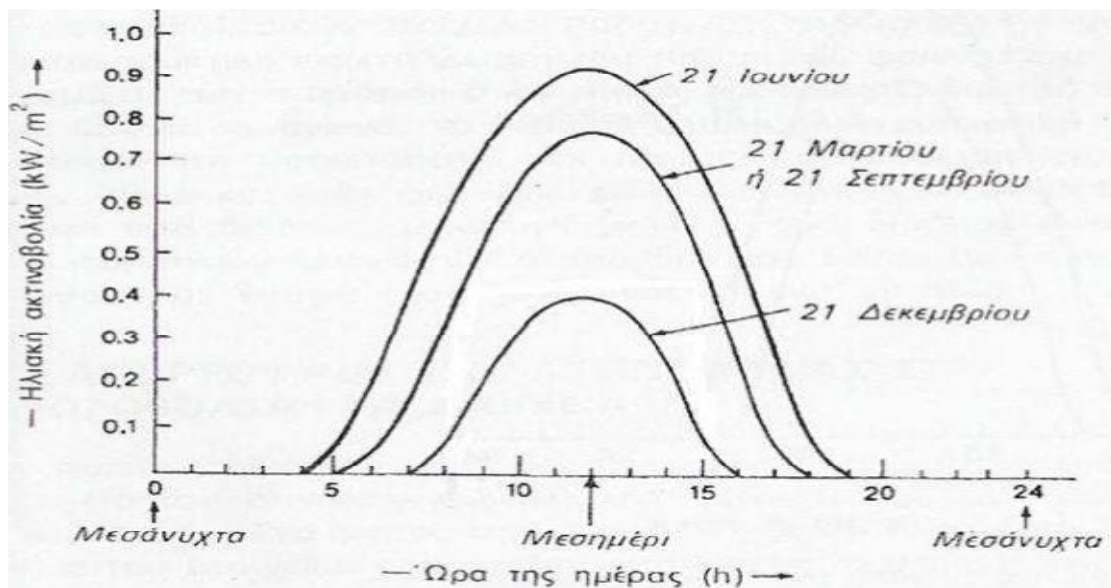
Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η ακτινοβολία που τίθεται υπό συζήτηση μέχρι στιγμής είναι η άμεση από τον ήλιο (σαν δέσμη) και όχι το διάχυτο φως της ατμόσφαιρας. Και εξηγούμαι, για παράδειγμα σε περιοχές με πολύ υγρό κλίμα( τροπική ζώνη) λόγω της υψηλής συγκέντρωσης σταγονιδίων νερού στην ατμόσφαιρα, σημαντικό μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαχέεται στην ατμόσφαιρα, σημαντικό μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαχέεται στην ατμόσφαιρα. Για αυτόν τον λόγο εφαρμόζουμε μικρότερη κλίση των φωτοβολταϊκών συλλεκτών , ώστε να αντικρίζουν περισσότερο τον ουρανό και να δέχονται αφθονότερα την διάχυτη ακτινοβολία.

#### 1.5.4 Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Ένα σημαντικό πρόβλημα της χρήσης της ηλιακής ακτινοβολίας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ότι παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις και απρόβλεπτες, απότομες μεταβολές στην εξέλιξη του χρόνου σε σχέση με άλλα συστήματα μετατροπής ενέργειας.

Είναι απαραίτητο να αναφέρουμε, μιλώντας σε αυστηρότερη ορολογία, ότι η ροή της ακτινοβολίας ( $H$ ) είναι το μέγεθος που χαρακτηρίζει την ποσότητα της μεταφερόμενης ενέργειας από μια ακτινοβολία και εκφράζεται σε μονάδες  $Kw/m^2$  ,  $mW/cm^2$ . Λόγω ,όμως, του ότι η ηλιακή ακτινοβολία είναι διάχυτη και μεταδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις χρησιμοποιούμε περισσότερο τον όρο *ένταση της ακτινοβολίας*, ως το μέτρο του ποσού της ενέργειας που περνά στη μονάδα του χρόνου από τη μονάδα της επιφάνειας. Θα μπορούσε να αναφερθεί, επίσης, ότι συνώνυμος όρος είναι και η *πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας*.

Παρακάτω βλέπουμε ένα διάγραμμα (σχήμα 1.21) όπου αποτυπώνονται τα στοιχεία της διακύμανσης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια υπό καθαρό ουρανό για διαφορετικές ενδεικτικές ημερομηνίες (ηλιοστάσια και ισημερίες):



Σχήμα 1.21. Διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στο χρόνο (ο συλλέκτης είναι στο οριζόντιο επίπεδο).

Όταν τεθεί υπό κλίση η επιφάνεια που δέχεται την ακτινοβολία, παρατηρείται αύξηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Ένας άλλος τρόπος βελτίωσης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μία φωτοβολταϊκή μονάδα είναι η τοποθέτηση της πάνω σε μία διάταξη κινητού πλαισίου που περιστρέφεται κατά διαστήματα, παρακολουθώντας κατ' αυτόν τον τρόπο την πορεία του ήλιου στον ουρανό. Με την εφαρμογή αυτού του τρόπου εξασφαλίζουμε την κάθετη πρόσπτωση της ακτινοβολίας στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού (με σχετική ακρίβεια), με αποτέλεσμα την αύξηση (και πολλές φορές μεγιστοποίηση, σε σχέση με την υπάρχουσα μέγιστη τιμή της) της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Οι διατάξεις στις οποίες αναφερθήκαμε ονομάζονται *φωτοβολταϊκοί ηλιοστάτες* ( διεθνής όρος: *sun/solar trackers* ή *heliostates*). Και για να είμαστε απόλυτα ακριβής αναφέρω ότι η ακριβής απόδοση του διεθνούς όρου είναι *παρακολουθητής του ήλιου*.

Χρησιμοποιώντας τους φωτοβολταϊκούς ηλιοστάτες (solar trackers) επιτυγχάνουμε την αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, από την άλλη όμως καταναλώνουμε ισχύ για την κίνηση της παρακολουθήσεως. Οπότε ο υπολογισμός των ισχύων αυτών είναι που δείχνει αν η χρήση των φωτοβολταϊκών ηλιοστατών (solar trackers) είναι ενεργειακά αποδοτική. Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημάνουμε ότι υπάρχουν κι άλλες σημαντικές παράμετροι για το αν πρέπει να επιλέξουμε ένα σύστημα φωτοβολταϊκού ηλιοστάτη όπως: το κόστος αυτού, η ανάγκη συντήρησης ανά διαστήματα (ανάλογα με την ποσοτική και περιοδική καταπόνηση του συστήματος) και η δυνατότητα απόσβεσης του επιπλέον

κόστους που αυτό επιφέρει στο φωτοβολταϊκό σύστημα. Είναι δε πολύ σημαντικό να τονίσουμε ότι με αυτά τα θέματα δεν ασχολείται η εργασία αυτή.

### **1.5.5 Η επίδραση των νεφών και της ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας.**

Η παρουσία αραιών νεφώσεων εξασθενεί την απευθείας ακτινοβολία και αυξάνει μερικώς την διάχυτη, οπότε έχει άμεση επίδραση στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης. Στην περίπτωση που έχουμε πυκνή νέφωση μπορεί να αποκοπεί το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας.

Στο παρακάτω σχεδιάγραμμα που απεικονίζεται στο Σχήμα 1.22, διακρίνουμε την επίπτωση των νεφών στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας:

*Σχήμα 1.22. Διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας φωτεινής ημέρας με μερική νέφωση. Η ασυνεχής καμπύλη δείχνει την αντίστοιχη με καθαρό ουρανό.*

Σχετικά με την ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας ισχύει ότι όσο η κλίση του φωτοβολταϊκού συλλέκτη απέχει περισσότερο από το οριζόντιο, τόσο μεγαλύτερο ποσό ανακλώμενης ακτινοβολίας από το έδαφος δέχεται ο συλλέκτης, αλλά και τόσο μικρότερο ποσό διάχυτης ακτινοβολίας από τον ουρανό. Έτσι, για παράδειγμα, σε περιοχές με υγρό κλίμα όπου λόγω των σταγονιδίων του νερού στην ατμόσφαιρα, ένα μεγάλο μέρος απορροφάται, η βέλτιστη θέση του φωτοβολταϊκού συλλέκτη για την διάρκεια του έτους είναι περίπου 10-15% μικρότερη από την γωνία του τοπικού γεωγραφικού πλάτους. Έτσι ο συλλέκτης αντικρίζει περισσότερο τον ουρανό και δέχεται αφθονότερη την ηλιακή ακτινοβολία.

Το υλικό που καλύπτει την επιφάνεια που δέχεται την ακτινοβολία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ποσότητα της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Στον παρακάτω Πίνακα 1.2 παρατίθενται μερικές ενδεικτικές τιμές του συντελεστή ανάκλασης για διάφορα είδη επιφανειών, τα οποία είναι συνιθισμένο να υπάρχουν στο περιβάλλον στις περιοχές όπου τοποθετούνται οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες.

Είδος Επιφάνειας	Συντελεστής Ανάκλασης
Επιφάνεια νερού, θάλασσα	0,05
Ασφαλτόστρωμα	0,07
Αγρός με σκοτεινό χρώμα	0,08
Πράσινος αγρός	0,15
Βραχώδης επιφάνεια	0,20
Επιφάνεια παλαιού τσιμέντου	0,24
Επιφάνεια νέου τσιμέντου, χαλίκια	0,30
Χιόνι	0,60

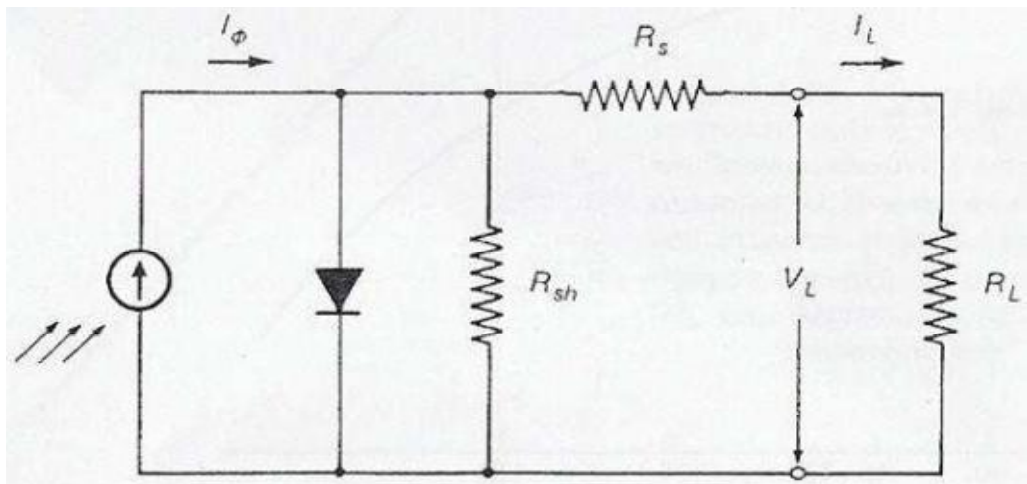
Πίνακας 1.2

Όσον αφορά τον παραπάνω Πίνακα 1.2 είναι αναγκαίο να αναφερθεί ότι η ικανότητα της ανάκλασης, εκφράζεται από έναν συντελεστή που κυμαίνεται για πλήρη απορρόφηση της ακτινοβολίας. Όταν ο συντελεστής ανάκλασης κάποιας οποιασδήποτε επιφάνειας πάρει την μέγιστη τιμή (ανώτερη) 1, τότε λέμε ότι έχουμε πλήρη ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας.

## 2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

### 2.1 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο σε μία πρώτη προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί ως μια πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από δίοδο. Αν προσθέσουμε όμως τις αναπόφευκτες αντιστάσεις  $R_s$  που παρεμβάλλονται στην κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό και την παράλληλη αντίσταση  $R_{sh}$  λόγω διαρροών ρεύματος της διόδου, καταλήγουμε στο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου:

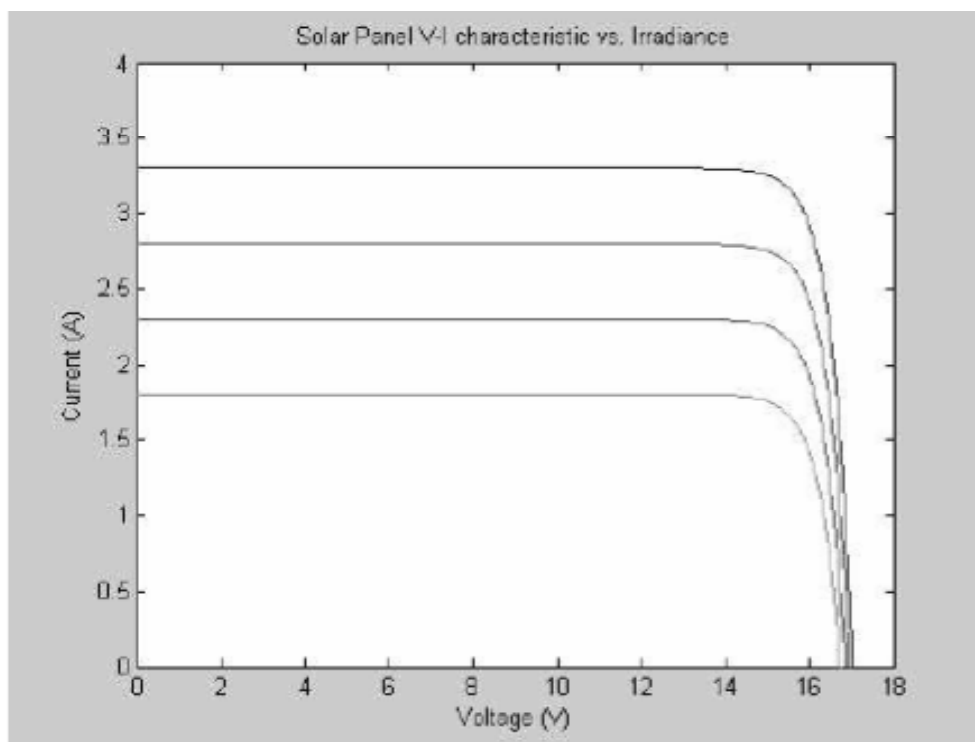


Σχήμα 2.1. Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι τα εξής παρακάτω:

- Η τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$ , όταν το ρεύμα που διαρρέει το φωτοβολταϊκό είναι μηδενικό.
- Το ρεύμα και η τάση υπό φορτίο ( $I_{LOAD}, V_{LOAD}$ ).
- Ο συντελεστής της θερμοκρασιακής διόρθωσης της απόδοσης ( $\sigma_\theta$ ).
- Το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ , όταν η τάση στα άκρα του φωτοβολταϊκού μηδενιστεί.

Για να μπορέσουμε να εκμεταλλευτούμε την ισχύ που μπορεί να παρέχει το φωτοβολταϊκό στοιχείο μας πρέπει να έχουμε φορτίο με αντίσταση  $R_{LOAD} = V_m / I_m$ . Σε αυτό το σημείο, μια σημαντική ερώτηση που θα μπορούσε να διατυπωθεί είναι η εξής: Πως αλλάζει το διάγραμμα I-V υπό διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας; Η απάντηση απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 2.3 :



Σχήμα 2.3. Διάγραμμα I-V για μεταβαλλόμενες συνθήκες ακτινοβολίας.

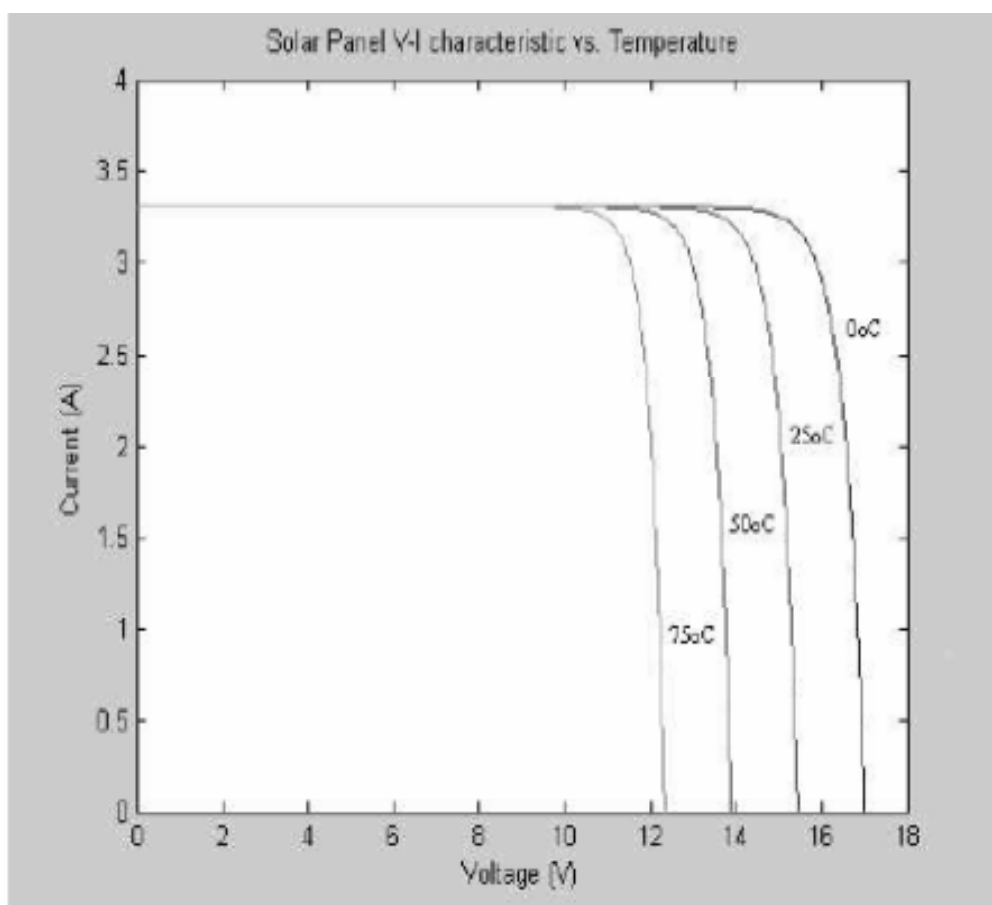
Ένα από τα σημαντικά προβλήματα που κατανοούμε βλέποντας το παραπάνω σχήμα είναι ότι τα σημεία μέγιστης ισχύος δεν μπορούν να ικανοποιηθούν από ένα δεδομένο φορτίο για κυμαινόμενη ακτινοβολία. Η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος γίνεται με τη χρήση ρυθμιστικών διατάξεων που φέρνουν συνεχώς την τάση και το ρεύμα σε ευνοϊκές τιμές για τις συνθήκες κάθε χρονικής στιγμής, τέτοιες διατάξεις καλούνται MPPT (Maximum Power Point Trackers δηλαδή παρακολουθητές σημείου μέγιστης ισχύος). Επιπλέον, βλέποντας το παραπάνω σχήμα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι με την αύξηση της ακτινοβολίας αυξάνεται η τάση ανοικτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ ) και το ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{sc}$ ), αν και το ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{sc}$ ) είναι πιο ευαίσθητο στις μεταβολές της ακτινοβολίας από την τάση ανοικτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ ). Επιπροσθέτως παρατηρούμε ότι η ένταση του ρεύματος παραμένει περίπου σταθερή για το μεγαλύτερο τμήμα του διαγράμματος (υπό συνθήκες σταθερής ακτινοβολίας) λειτουργώντας περίπου ως πηγή ρεύματος.



Από την ηλεκτρική ανάλυση της φωτοβολταϊκής μονάδας, το τελικό συμπέρασμα είναι η σημαντική εξάρτηση της λειτουργίας από τους εξής τρεις παράγοντες:

- ∅ Την θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου.
- ∅ Την αντίσταση του κυκλώματος που λειτουργεί ως φορτίο του φωτοβολταϊκού στοιχείου.
- ∅ Την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Σχετικά με την θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου, θα περίμενε κανείς, από διαίσθηση και μόνο, ότι με την αύξηση της περιβάλλουσας θερμοκρασίας λειτουργούν καλύτερα τα φωτοβολταϊκά. Όμως, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 2.4, αυτό δεν ισχύει σε καμία περίπτωση.



Σχήμα 2.4. Διάγραμμα I-V για αυξανόμενη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

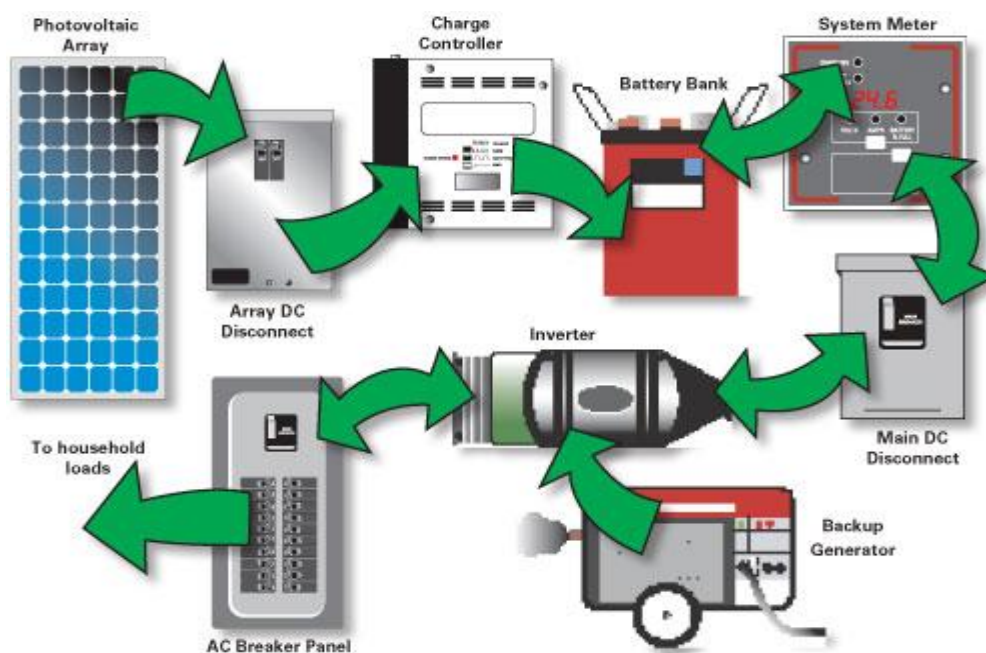
Με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται η κινητικότητα των φορέων του ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος που εξηγεί γιατί δεν λειτουργούν καλύτερα τα στοιχεία όταν υπάρχει αύξηση της περιβάλλουσας θερμοκρασίας.

## 2.2 Τα μέρη που συνιστούν ένα φ/β σύστημα.

Τα μέρη που συνιστούν ένα πλήρες φωτοβολταϊκό σύστημα είναι τα παρακάτω υποσυστήματα:

- Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια (πάνελ) με την μηχανική στήριξη της και ίσως ένα σύστημα παρακολούθησης της ηλιακής τροχιάς(solar tracker).
- Το υποσύστημα αποθήκευσης-συσσώρευσης την ηλεκτρικής ενέργειας( διάταξη μπαταριών).
- Το υποσύστημα του εξοπλισμού ελέγχου και προσαρμογής ισχύος, όπως και υποσυστήματα μετρήσεων και παρακολούθησης αν είναι αναγκαία.
- Το βοηθητικό σύστημα παροχής ισχύος για περίπτωση ανάγκης (όπως για παράδειγμα γεννήτρια πετρελαίου), δημιουργώντας έτσι ένα υβριδικό αυτόνομο σύστημα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στα διάφορα υποσυστήματα (όπως το σύστημα του solar tracker).

Στο παρακάτω σχήμα 2.5 απεικονίζεται ένα πλήρες φωτοβολταϊκό σύστημα για εφαρμογή σε οικιακό δίκτυο. Θα αναλυθούν, εκτενέστερα τα παραπάνω υπόσυστήματα που συνιστούν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα.



Σχήμα 2.5. Ένα πλήρες φωτοβολταϊκό σύστημα για εφαρμογή σε οικιακό δίκτυο.

Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια: Τα *φωτοβολταϊκά στοιχεία* (ή αλλιώς φωτοβολταϊκές κυψέλες - solar cells) παράγουν πολύ μικρή ισχύ, γι αυτό οι κατασκευαστές τα συνενώνουν φτιάχνοντας τις *φωτοβολταϊκές μονάδες (PV modules)*. Συνδεόμενες φωτοβολταϊκές μονάδες δημιουργούν το ονομαζόμενο *φωτοβολταϊκό πάνελ (PV panel)*. Επιπλέον, στις μεγάλες εγκαταστάσεις παροχής ρεύματος από φωτοβολταϊκή ενέργεια εμφανίζονται πάνελ συνδεδεμένα μεταξύ τους και πάνω σε μεγάλες μεταλλικές κατασκευές που καλούνται *φωτοβολταϊκές συστοιχίες (PV arrays)*. Παρακάτω αναφέρονται μερικά τυπικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών κυψελών (solar cells) και πάνελ (PV panel):

- Κάθε φωτοβολταϊκή κυψέλη παρέχει τάση 0,5-0,6 Volt.
- Σε κάθε φωτοβολταϊκό πάνελ τοποθετούνται περίπου 12-42 κυψέλες.
- Για την παραγωγή  $1\text{kW}_p$  απαιτείται έκταση περίπου  $8-10\text{m}^2$  για κάθε φωτοβολταϊκό πάνελ(PV panel).
- Για κάθε  $\text{m}^2$  εγκατεστημένου φωτοβολταϊκού πάνελ απαιτούνται περίπου  $2\text{m}^2$  επιφάνειας εγκατάστασης.
- Στην Ελλάδα, τα φωτοβολταϊκά πάνελ (PV panel) λόγω της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, μπορούν να παράγουν περίπου  $1300\text{kWh/kW}_p$ .

Το υποσύστημα αποθήκευσης της ενέργειας: Απαραίτητη είναι η αποθήκευση της ενέργειας για τα φωτοβολταϊκά συστήματα λόγω της έντονης διακύμανσης της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ημέρας και συνεπώς κατά την διάρκεια του χρόνου.

Ωστόσο στα περισσότερα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούν ηλεκτροχημικούς συσσωρευτές (*γενικός ορισμός:* μπαταρίες) για την αποθήκευση της ενέργειας. Οι περισσότεροι συσσωρευτές συγκροτούνται από ένα ή περισσότερα κελιά τα οποία είναι συνδεδεμένα εν σειρά, έτσι ώστε να παράγουν το υψηλότερο δυνατό δυναμικό. Η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή, δηλαδή η ισχύς του, μετράται σε *αμπερώρες (Ah)* (όπου ισχύει  $\text{αμπερώρες} = \text{χρόνος εκφόρτισης} \times \text{ένταση ρεύματος εκφόρτισης}$ ). Υπολογίζουμε την μέγιστη δυνατή αποθήκευση ενέργειας του συσσωρευτή (χωρητικότητα μπαταρίας), με γνώμονα την ονομαστική του τάση, με τον παρακάτω τύπο:  $V_{ON} * (Ah)$  . Για παράδειγμα, αν έχουμε μια μπαταρία των 12Volts και 100Ah, τότε η ικανότητα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι  $1,2\text{kWh}$ .

Επιπλέον, οι συσσωρευτές κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον ελάχιστο χρόνο κατανάλωσης ισχύος. Δηλαδή, όταν έχουμε ένδειξη

κατάταξης  $C_{10}, C_{20}, C_{100}$  τότε είναι αντίστοιχα για 10, 20 και 100 ώρες συνεχόμενης κατανάλωσης ισχύος.

Επιπρόσθετα οι παράγοντες που επηρεάζουν τη χωρητικότητα των συσσωρευτών είναι η θερμοκρασία και ο χρόνος χρήσης τους. Συγκεκριμένα η αποδοτικότητα φόρτισης συσσωρευτών εκφράζεται μέσω του πηλίκου:

$$n_{Ah} = \frac{\text{Χρόνος εκφόρτισης} \times \text{Ένταση ρεύματος εκφόρτισης}}{\text{Χρόνος φόρτισης} \times \text{Ένταση ρεύματος φόρτισης}} \text{ (Ah)}, \text{ όταν την μετράμε}$$

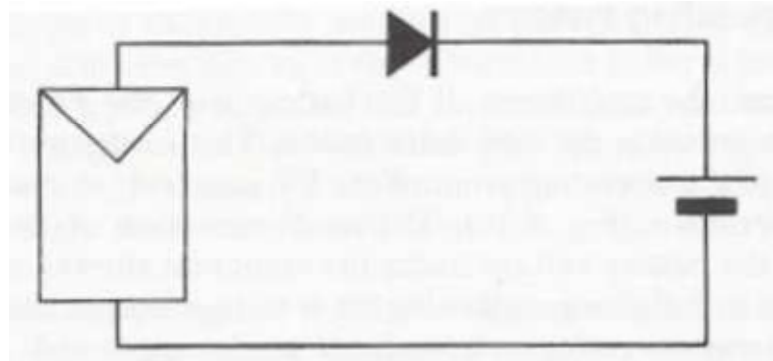
σε αμπερώρες (Ah), ενώ όταν θέλουμε να την μετρήσουμε σε βατώρες (Wh) τότε χρησιμοποιούμε την παρακάτω σχέση:

$$n_{Wh} = \frac{\text{Χρόνος εκφόρτισης} \times \text{Ένταση ρεύματος εκφόρτισης} \times \text{Τάση εκφόρτισης}}{\text{Χρόνος φόρτισης} \times \text{Ένταση ρεύματος φόρτισης} \times \text{Τάση φόρτισης}} \text{ (Wh)}.$$

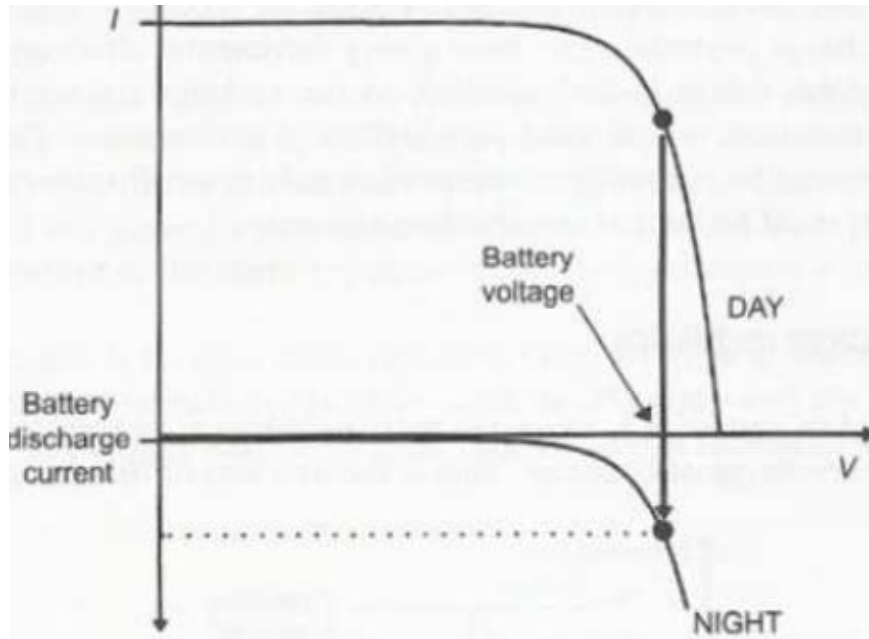
Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι οι φορτισμένοι συσσωρευτές που χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις αυτοεκφορτίζονται με ρυθμό που δεν ξεπερνά το 5-10% τον μήνα. Σημαντικό είναι να αναφέρουμε ότι η διάρκεια της χρήσιμης ζωής του συσσωρευτή εξαρτάται από το βάθος της εκφόρτωσης του. Και εξηγούμε, ένας συσσωρευτής με βάθος εκφόρτισης 10% , για να αποφευχθεί η πρόωρη καταστροφή του, πρέπει να χρησιμοποιεί μόνο το 10% της ονομαστικής του χωρητικότητας.

#### Το υποσύστημα του εξοπλισμού ελέγχου και προσαρμογής ισχύος:

- Δίοδος φραγής (Blocking diode): Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συμπεριφέρονται ως δίοδοι στο σκοτάδι (τη νύκτα), για αυτόν το λόγο τοποθετούμε μία δίοδο φραγής ανάμεσα σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο και τον συσσωρευτή για να αποτρέψουμε την αποφόρτιση του τελευταίου. Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζεται η λειτουργία της διόδου φραγής, που μόλις αναλύσαμε:

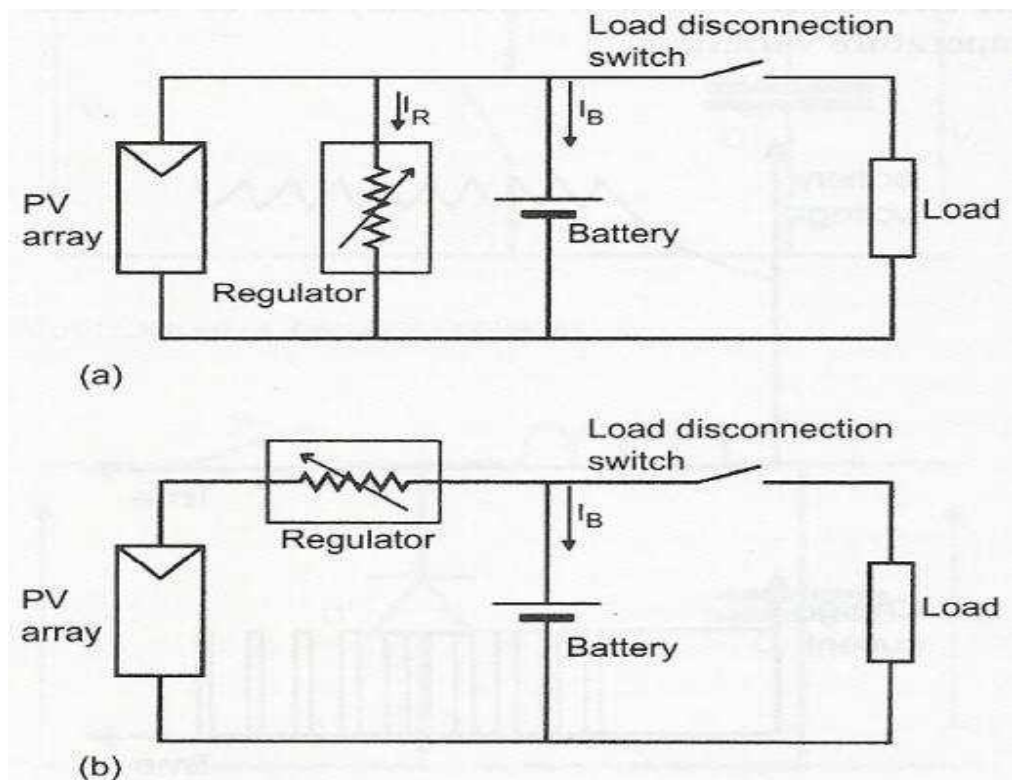


Σχήμα 2.6. Η λειτουργία της διόδου φραγής



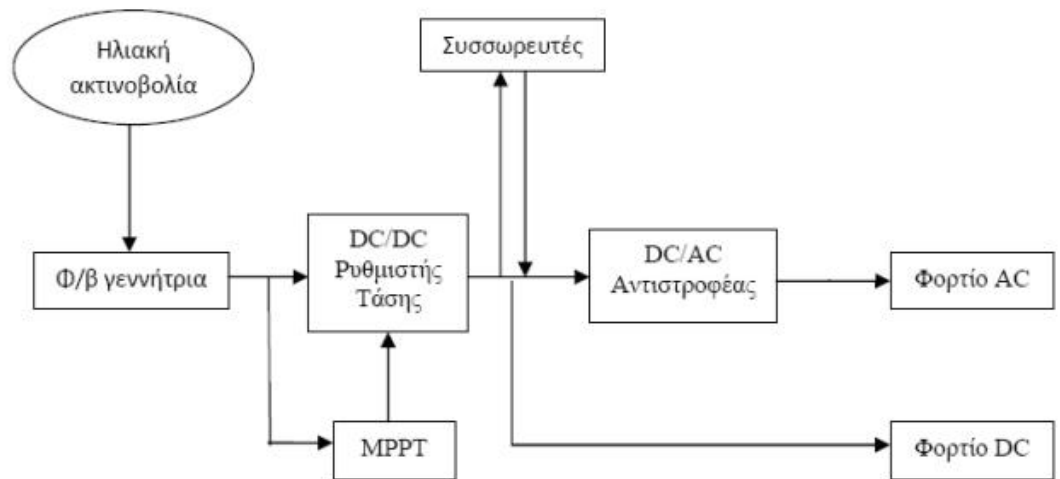
Σχήμα 2.7. Διάγραμμα λειτουργίας διόδου φραγής

- Ρυθμιστής φόρτισης (Charge regulator) : Ο ρυθμιστής φόρτισης αποτρέπει την υπερφόρτωση της μπαταρίας με το να περιορίσει την μέγιστη τάση της. Οι βασικοί τύποι ρυθμιστών είναι δύο, ο εν σειρά και ο εν παραλλήλω όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 2.8 :



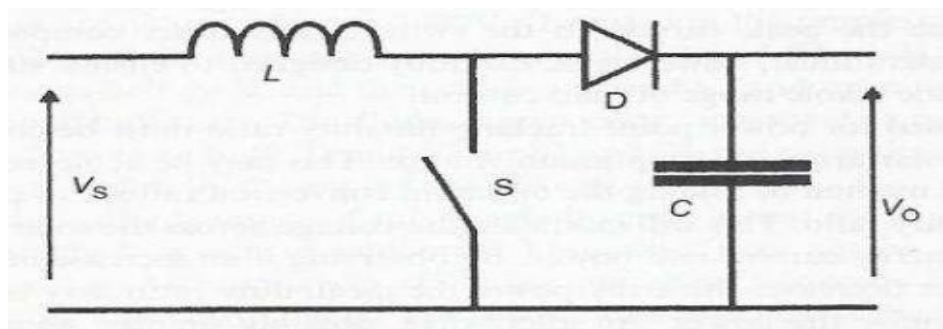
Σχήμα 2.8. Ρυθμιστές φόρτισης (a) εν παραλλήλω (b) εν σειρά

- Οι διατάξεις MPPT (Maximum Power Point Trackers) : Μας δίνουν την δυνατότητα , για μεταβαλλόμενες συνθήκες ακτινοβολίας, με δεδομένο φορτίο να είμαστε στη θέση μέγιστης ισχύος. Πιο αναλυτικά, έχοντας συνεχώς σταθερό φορτίο ο MPPT ξεγελά το φωτοβολταϊκό στοιχείο ότι μεταβάλλεται το φορτίο συνεχώς στην τιμή που αντιστοιχεί το σημείο της μέγιστης ισχύος για την λαμβανόμενη ακτινοβολία κάθε χρονικής στιγμής. Για το σκοπό αυτό υπολογίζεται κάθε χρονική στιγμή η τάση και το ρεύμα του κυκλώματος, ενώ ένας υπολογιστής υπολογίζει τις αλλαγές των παραμέτρων ενός μετατροπέα τάσης (boost converter, dc/dc converter βλέπε στα παρακάτω σχήματα) για να πετύχει την παρακολούθηση του μεγίστου. Η λειτουργία της παραπάνω διατάξεις που μόλις αναφέραμε, παρουσιάζεται στο παρακάτω μπλοκ διάγραμμα:

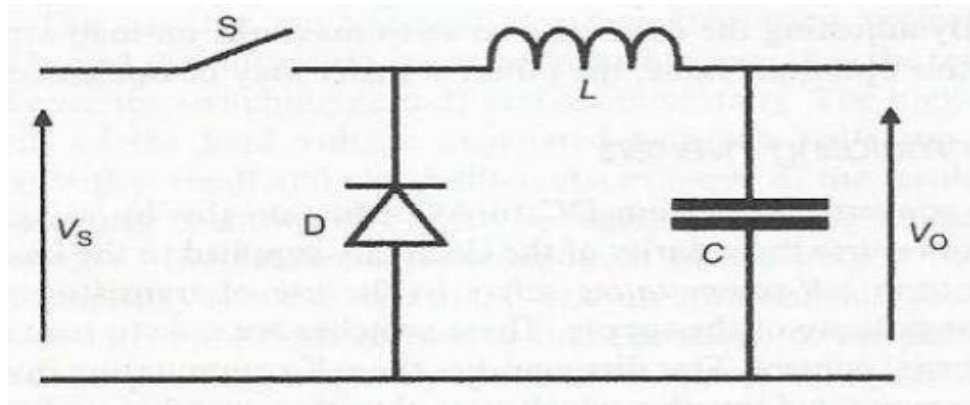


Σχήμα 2.9. Μπλοκ διάγραμμα ενός Maximum Power Point Tracker (διάγραμμα ενός αυτόνομου συστήματος)

- DC/DC Converters (μετατροπείς συνεχούς/συνεχούς): Μετατρέπουν την ισχύ του φωτοβολταϊκού πάνελ σε συνεχή άλλης στάθμης. Κατά κύριο λόγο, οι βασικότερες τοπολογίες είναι οι buck και boost converters που φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:



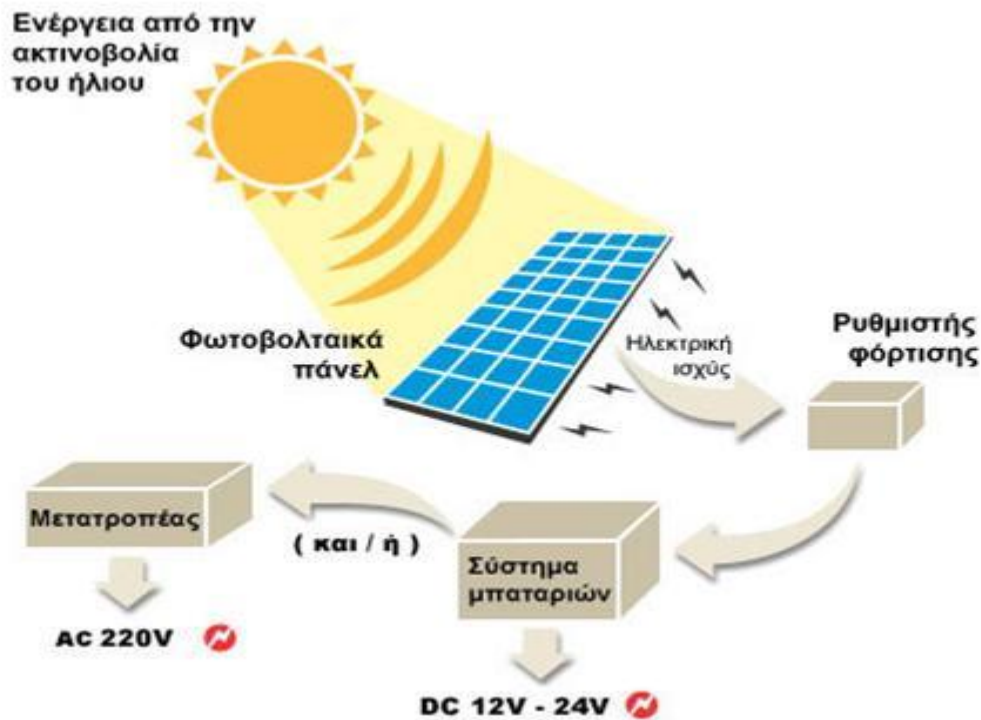
Σχήμα 2.10. Buck converter



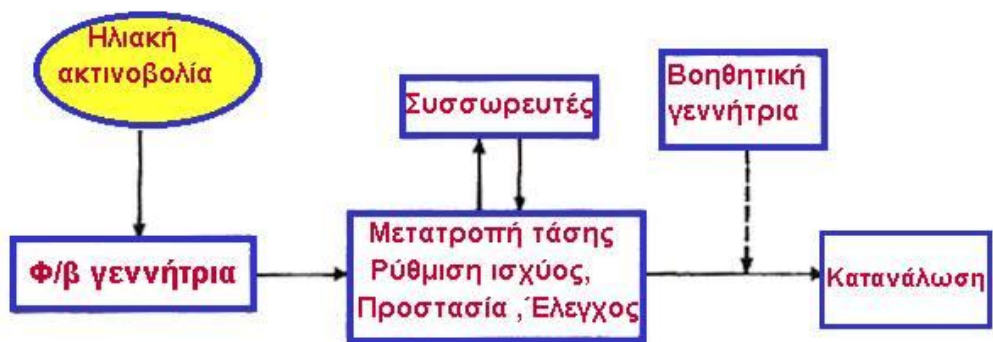
Σχήμα 2.11. Boost converter

- DC/AC Converters-inverters (μετατροπείς-αντιστροφείς συνεχούς /εναλλασσομένου): Συνίσταται απαραίτητη η χρήση τους όταν απαιτείται η σύνδεση εναλλασσόμενου φορτίου στο φωτοβολταϊκό σύστημα. Αν ο μετατροπέας-αντιστροφέας λειτουργεί στην ονομαστική του ισχύ τότε η απόδοση του μπορεί να φτάσει μέχρι και το 97%, ενώ αν λειτουργεί υπό μερικό φορτίο η απόδοση του μπορεί να μειωθεί.

### 2.3 Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα



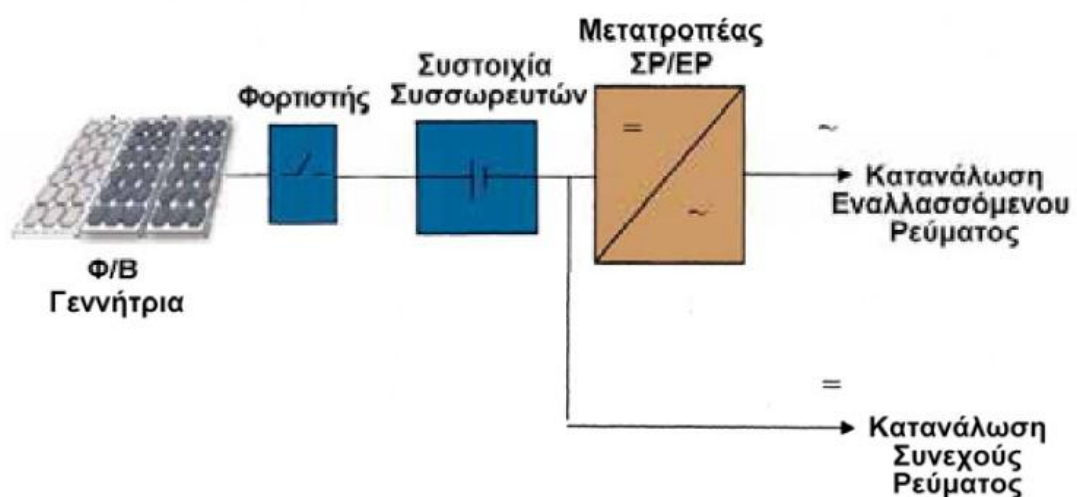
Σχήμα 2.12. Παράδειγμα αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.



**Παράδειγμα γενικού διαγράμματος ενός αυτόνομου Φ/β συστήματος**

*Σχήμα 2.13. Παράδειγμα ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.*

Στα παραπάνω σχήματα απεικονίζονται δύο παραδείγματα ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται κυρίως σε κατοικίες ή και σε επιχειρήσεις όπου θέλουν να ωφεληθούν από την ηλιακή ενέργεια, με σκοπό την άμεση χρησιμοποίηση τις παραγόμενης από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ενέργειας και όχι την πώληση ή διάθεση της στο διασυνδεδεμένο δημόσιο δίκτυο. Με λίγα λόγια, στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα οι ιδιοκτήτες αυτών θέλουν να χρησιμοποιήσουν όλη την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια για τις δικές τους ανάγκες. Άλλο ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 2.14 :



*Σχήμα 2.14. Διάγραμμα αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος*



Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να εξηγήσουμε την διαδικασία που ακολουθείτε για την τελική χρησιμοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια (ή αλλιώς φωτοβολταϊκό στοιχείο) μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια και αφού γίνει η ρύθμιση της τάσης και αποθηκευτεί μέρος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στον συσσωρευτή αποφασίζεται από τον χρήστη εάν θέλει να καταναλώσει απευθείας το συνεχές ρεύμα ή εάν θέλει να καταναλώσει εναλλασσόμενο ρεύμα αφού πρώτα έχει γίνει η μετατροπή από συνεχές σε εναλλασσόμενο μέσω του μετατροπέα τάσης (inverter).

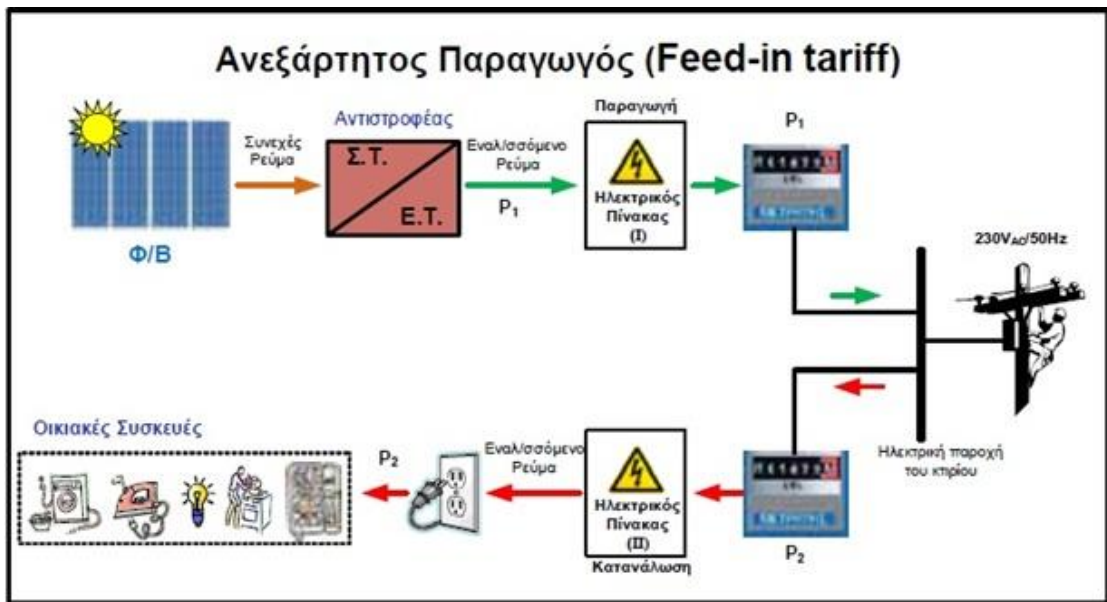
#### **2.4 Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα**

Υπάρχουν δύο διατάξεις συστημάτων που χρησιμοποιούνται στα διασυνδεδεμένα ,με το δημόσιο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, φωτοβολταϊκά συστήματα, και είναι τα εξής δύο:

- Παράλληλα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, *μόνο για την τροφοδοσία του δικτύου*, και
- Παράλληλα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, *με τροφοδοσία του δικτύου με το πλεόνασμα παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος*.

Για την πρώτη περίπτωση, όπου έχουμε παράλληλο διασυνδεδεμένο μόνο για την τροφοδοσία του δικτύου, το φωτοβολταϊκό αυτό σύστημα χρησιμοποιείται κατά κόρον στην Ελλάδα κυρίως από επιχειρηματίες μέσω φωτοβολταϊκών πάρκων μεγάλης ισχύς καθώς και από ιδιώτες μέσω εγκαταστάσεων χαμηλής ισχύς (ταράτσες κατοικιών, οικόπεδα λίγων τετραγωνικών μέτρων κ.τ.λ.).

Η φιλοσοφία αυτού του συστήματος στηρίζεται στην άμεση διάθεση του παραγόμενου, από τις φωτοβολταϊκές γεννήτριες, ηλεκτρικού ρεύματος στο δημόσιο δίκτυο διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας και μέσω αυτού θα φτάνει η ηλεκτρική ενέργεια στα σπίτια προς κατανάλωση. Ένα τέτοιο διασυνδεδεμένο σύστημα απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 2.15 :



Σχήμα 2.15. Παράλληλα διασυνδεδεμένο στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, μόνο για την τροφοδοσία του δικτύου.

Για την δεύτερη περίπτωση, όπου έχουμε παράλληλο διασυνδεδεμένο για την τροφοδοσία του δικτύου με το πλεόνασμα της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, το φωτοβολταϊκό αυτό σύστημα αποτελεί την μοναδική επιλογή ενός Γερμανού ιδιώτη ο οποίος έχει εγκατεστημένο φωτοβολταϊκό σύστημα στην οικία του. Πιο συγκεκριμένα η φιλοσοφία αυτού του, κατά τα άλλα παράλληλα διασυνδεδεμένου στο δημόσιο δίκτυο διανομής, φωτοβολταϊκού συστήματος είναι η κατανάλωση της ημερήσιας ζητούμενης ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται από τον ιδιώτη από την παραγόμενη, μέσω της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, ηλεκτρική ενέργεια και το ποσό της ενέργειας που απομένει προωθείται στο δημόσιο δίκτυο διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι στην προκειμένη περίπτωση υπάρχει και παραλαβή ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο όπως και προώθηση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο από την εγκατάσταση, σε ημερήσια βάση ανάλογα με τις ανάγκες σε ηλεκτρικό ρεύμα.

### 3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

#### 3.1 Εισαγωγή – Ανασκόπηση

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των συστημάτων παρακολούθησης ικανών να ακολουθούν με μεγάλη ακρίβεια την τροχιά του ηλίου καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας έχει ερευνηθεί εκτενώς. Έρευνες έδειξαν ότι με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων για τη βελτιστοποίηση της γωνίας κλίσης και του προσανατολισμού του ηλιακού συλλέκτη, μπορεί να επιτευχθεί μια ετήσια αύξηση 5% της λαμβανόμενης ακτινοβολίας σε σχέση με τα συστήματα όπου ο συλλέκτης είναι σταθερός σε μια οριζόντια επιφάνεια.

Ιστορικά, το 1975 ο McFee παρουσίασε ένα από τα πρώτα ηλιακά συστήματα αυτόματου εντοπισμού. Συγκεκριμένα, αφού αναπτύχθηκε αλγόριθμος για τον υπολογισμό της συνολικής ηλιακής ενέργειας, που λαμβανόταν από έναν κεντρικό συλλέκτη, χωρίζοντας κάθε κάτοπτρο σε 484 στοιχεία και αθροίζοντας τη συμβολή όλων των στοιχείων, η θέση του ηλίου μπορούσε να υπολογιστεί με περιθώριο λάθους  $0.5^{\circ}$ - $1^{\circ}$  (μοίρες). Αρκετά χρόνια αργότερα, οι Semma και Imamru χρησιμοποίησαν ένα απλό μικροεπεξεργαστή για να προσαρμόσουν τις θέσεις ηλιακών συλλεκτών και να δείχνουν προς τον ήλιο ανά πάσα στιγμή. Σήμερα, έχουν αναπτυχθεί μαθηματικοί μέθοδοι για τον υπολογισμό του σφάλματος και την βελτίωση των αλγόριθμων εντοπισμού της θέσης του ηλίου.

Λόγω της ταχείας πρόοδος της τεχνολογίας των υπολογιστών και των συστημάτων ελέγχου, η βιβλιογραφία περιλαμβάνει πλέον πολλά εξελιγμένα συστήματα παρακολούθησης ηλίου, σχεδιασμένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιούν την αποτελεσματικότητα των θερμικών ηλιακών και φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Σε γενικές γραμμές τα συστήματα που αναφέραμε παραπάνω είτε χρησιμοποιούν αλγόριθμο για την παρακολούθηση του ηλίου είτε χρησιμοποιούν άμεσα συστήματα σε πραγματικού χρόνου (real time) έλεγχο της θέσης του, μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες:

- Συστήματα Κλειστού Βρόγχου
- Συστήματα Ανοιχτού Βρόγχου

, όπως φαίνονται και στον παρακάτω Πίνακα 3.1 και Πίνακα 3.2 :

Κλειστού Βρόγχου	Ανοιχτού Βρόγχου
Akhmedyarov (1986)	McFee (1975)
Maish (1990)	Bianco-Muriel (2001)
Brown(1993)	Abdallah (2004)
Kalogirou (1996)	Reda (2004)
Khalifa (1998)	Grena (2008)
Falbel (2002)	Chong (2009)
Al-Mohamad (2004)	
Abdallah (2004)	
Aiuchi (2004)	

Πίνακας 3.1. Τα σημαντικότερα συστήματα παρακολούθησης ηλιακής κίνησης

Algorithm References		Error	Gain in Energy Production Compared with a Non-tracking System
Closed-loop Control	Akhmedyarov <i>et al.</i> (1986)	-	40%
	Maish (1990)	1°	-
	Enslin (1992)	-	10-15%
	Brown <i>et al.</i> (1993)	< 0.01°	-
	Kalogirou (1996)	0.05-0.2°	-
	Khalifa <i>et al.</i> (1998)	-	75%
	Falbel <i>et al.</i> (2002)	0.05°	-
	Al-Mohamad (2004)	-	20%
	Abdallah (2004)	-	15-44%
	Aiuchi <i>et al.</i> (2004)	0.1°	-
Open-loop Control	McFee (1975)	0.5-1°	-
	Blanco-Muriel <i>et al.</i> (2001)	0.08°	-
	Abdallah <i>et al.</i> (2004)	-	41%
	Reda <i>et al.</i> (2004)	0.0003°	-
	Chen F. <i>et al.</i> (2006)	0.02°	-
	Chen F. <i>et al.</i> (2007)	0.2°	-
	Grena (2008)	0.0027°	-
	Chong <i>et al.</i> (2009)	-	-

Πίνακας 3.2. Τα σημαντικότερα συστήματα παρακολούθησης ηλιακής κίνησης

Αφού αναλύσουμε μερικά από τα κυριότερα συστήματα παρακολούθησης της κίνησης του ηλίου, είτε είναι κλειστού βρόγχου είτε ανοιχτού βρόγχου, θα παρουσιάσουμε και τα πλεονεκτήματα καθώς και τα μειονεκτήματα των παραπάνω συστημάτων προς ανάλυση.

### 3.2 Συστήματα Κλειστού Βρόγχου

Τα συστήματα παρακολούθησης της πορείας του ηλίου, που είναι κλειστού βρόγχου βασίζονται στην αρχή επίβλεψης και της ανατροφοδότησης. Σε αυτά τα συστήματα υπάρχει ένα σύνολο από αισθητήρες οι οποίοι μετράνε κάποιες ποσότητες, όπως την φωτεινότητα, και μεταδίδουν τα δεδομένα αυτά σε έναν ελεγκτή, ο οποίος τα επεξεργάζεται και αποφασίζει για την επόμενη κίνηση που θα πραγματοποιήσουν οι κινητήρες που αλλάζουν την κλίση στους φωτοβολταϊκούς συλλέκτες.

Η αρχή σε τέτοιου είδους συστήματα έγινε το 1986 από τον Akhmedyarov, όταν αύξησε την παραγόμενη ενέργεια σε ένα φωτοβολταϊκό σταθμό από 357Watt σε 500Watt, ενσωματώνοντας ένα αυτόματο σύστημα παρακολούθησης της κίνησης του ηλίου.

Αρκετά χρόνια αργότερα, ο Maish ανέπτυξε ένα σύστημα ελέγχου που ονομαζόταν SolarTrak, και πρόσφερε τη δυνατότητα παρακολούθησης του ηλίου. Υποστήριζε μηχανικό τρόπο οδήγησης όπως επίσης είχε τη δυνατότητα να ελέγχεται από μακριά και, επιπλέον, διέθετε ένα σύστημα εξοικονόμησης ενέργειας έτσι ώστε να είναι εφικτή η λειτουργία του στη διάρκεια της νύχτας και μιας κακοκαιρίας. Η παρακολούθηση που πρόσφερε ήταν σε ένα ή δύο άξονες κίνησης και ήταν πολύ εύκολο στην εγκατάσταση του. Το σύστημα πρόσφερε τη δυνατότητα αυτόματης ρύθμισης των κινητήρων, έτσι ώστε να βελτιώνεται η ακρίβεια και η αξιοπιστία του. Πειράματα έδειξαν ότι σε μία πλήρη μέρα η ακρίβεια που είχε ήταν μεγαλύτερη από 0,1 μοίρες.

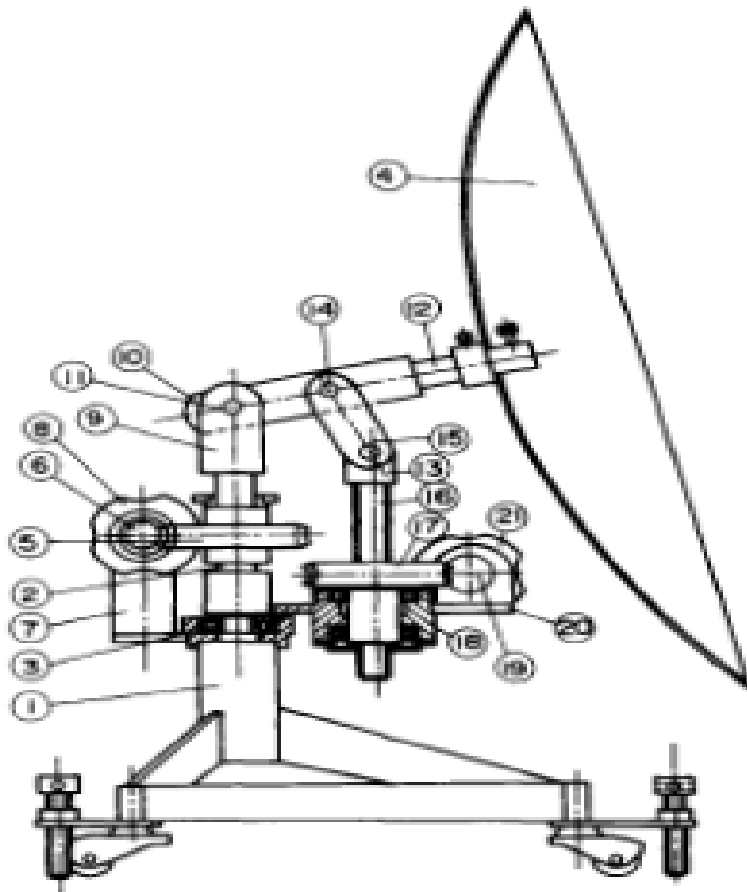
Το SolarTrakTM ήταν ένας ελεγκτής, που πρόσφερε σε φωτοβολταϊκά συστήματα δυνατότητες παρακολούθησης του ηλίου και αναπτύχθηκε αρχικά από την Sandia National Laboratories. Ο αρχικός στόχος ήταν να είναι ένας εξαιρετικά ακριβής, αξιόπιστος και χαμηλού κόστους ελεγκτής για φωτοβολταϊκά συστήματα ανοιχτού βρόγχου. Χρησιμοποιήθηκε για αρκετά χρόνια, χωρίς πρόβλημα, από το Alpha Solarco σε μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση 1,5 KW στη Νεβάδα. Λόγω όμως των απαιτήσεων της αγοράς δέχτηκε σημαντικές βελτιώσεις, έτσι ώστε να έχει ευρύτερη αποδοχή στην φωτοβολταϊκή βιομηχανία. Αποτέλεσε έναν ελεγκτή παρακολούθησης εξαιρετικά χαμηλού κόστους και παράλληλα μεγάλης αξιοπιστίας, ο οποίος έκανε εφικτή οικονομικά την μαζική παραγωγή μικρών, κάτω από 1 KW, περιστρεφόμενων φωτοβολταϊκών συστημάτων. Επιπρόσθετα, ήταν ιδανικός για την χρησιμοποίηση του σε επίπεδα φωτοβολταϊκά συστήματα, διότι τους πρόσφερε ανίχνευση της νύχτας, της κατεύθυνσης και της έντασης του ανέμου, όπως επίσης ρύθμιζε τις γωνίες κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μην επηρεάζεται η φωτεινότητα σε γειτονικές γραμμές από φωτοβολταϊκά. Παράλληλα

πρόσφερε σημαντική εξοικονόμηση πόρων χάρης στον περιορισμό της καλωδίωσης.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετώπιζαν ορισμένοι κατασκευαστές φωτοβολταϊκών συστημάτων, ήταν η κατανάλωση ενέργειας από τους ελεγκτές παρακολούθησης. Λόγω αυτού, εξελίχθηκαν τα ήδη υπάρχοντα συστήματα σε χαμηλότερης κατανάλωσης, αλλά και ακόμα μεγαλύτερης ακρίβειας. Η ακρίβεια είναι σημαντική διότι έτσι γίνεται εφικτή η μετατροπή ενός αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, ώστε οι ελεγκτές να λαμβάνουν τις ενδείξεις από διάφορους αισθητήρες θέσεων, όπως ποτενσιόμετρα και ψηφιακούς αισθητήρες κλίσης (inclinationometers). Τέτοιοι αισθητήρες μπορούσαν να πετύχουν ακρίβεια μέχρι και 0,05 μοίρες.

Ένα ίσως από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των συστημάτων παρακολούθησης του ηλίου είναι η δυνατότητα ακινητοποίησης τους ολόκληρου του συστήματος και η σύνδεση με αισθητήρες ανίχνευσης ισχυρών ανέμων. Είναι σημαντικό να επισημάνουμε ότι η ικανότητα ακινητοποίησης του συστήματος, μπορεί να μειώσει αισθητά το κόστος κατασκευής της βάσης του συστήματος.

Το 1992 Agarwal παρουσίασε μία βάση δύο αξόνων, που περιλάμβανε κιβώτια ταχυτήτων και μπορούσε να συγκεντρώνει με ακρίβεια αντανάκλασεις καθρεφτών σε ένα ηλιακό σύστημα. Παρακάτω, στο Σχήμα 3.1, θα παρουσιάσουμε την βάση δύο αξόνων Agarwal και θα επεξηγήσουμε συνοπτικά τα επιμέρους υποσυστήματα του ηλιοστάτη (heliostat/solar tracker).



Σχήμα 3.1. Βάση με δύο άξονες κίνησης Agarwal

Συνοπτικά τα τμήματα της παραπάνω βάσης είναι τα ακόλουθα:

1. Βάση στην οποία στηρίζεται ολόκληρη η κατασκευή.
2. Κεντρικός άξονας περιστροφής.
3. Ρουλεμάν – εξασφαλίζει την ομαλή και απρόσκοπτη κίνηση του άξονα περιστροφής.
4. Ο συλλέκτης.
5. Κιβώτιο ταχυτήτων – κινείται με κοχλία και περιστρέφει τον κατακόρυφο άξονα.
6. Κοχλίας – συνδέεται με το κιβώτιο 5.
7. Βάση στήριξης για τον κοχλία 6.
8. Μοχλός που διαθέτει ο κοχλίας 6, βοηθάει στην εύκολη περιστροφή του.
9. Βραχίονας τύπου U.
10. Βραχίονας – στηρίζει τον άξονα 12.
11. Η σύνδεση των βραχιόνων 9 και 10.
12. Άξονας στον οποίο στηρίζεται ο συλλέκτης και ο οποίος έχει τη δυνατότητα να επιμηκύνεται.

13. Βραχίονας τύπου U – υποστηρίζει την κίνηση του συλλέκτη κατά τον οριζόντιο άξονα.
14. Ένωση του βραχίονα 13 με τον βραχίονα 10.
15. Συνδετικός σύνδεσμος του βραχίονα 13 με τον 10.
16. Κοχλίας στον οποίο συνδέεται ο βραχίονας 13.
17. Κιβώτιο ταχυτήτων το οποίο συνδέεται με τον κοχλία 16.
18. Βάση στην οποία συνδέεται το κιβώτιο 17 είναι στεριωμένη πάνω στον άξονα 2 και μπορεί να περιστρέφεται με αυτόν.
19. Κοχλίας – συνδέεται με το κιβώτιο 17.
20. Βραχίονας στον οποίο στηρίζεται ο κοχλίας 19.
21. Μοχλός με τον οποίο είναι η εφικτή η κίνηση του κιβωτίου ταχυτήτων 17, και μέσω του βραχίονα 13 είναι εφικτή η κίνηση του συλλέκτη πάνω και κάτω.

*Σημείωση:* Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η βάση έχει σχεδιαστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε η κίνηση στον μοχλό 8 να μειώνεται σημαντικά από το κιβώτιο ταχυτήτων 5 και κατ' επέκταση ο άξονας 2 να κινείται πολύ αργά. Για παράδειγμα, αν το κιβώτιο είναι 1:20, τότε αν ο μοχλός περιστραφεί κατά 10 μοίρες τότε ο κεντρικός άξονας θα περιστραφεί κατά μισή μοίρα. Με αυτόν τον τρόπο η κίνηση του συλλέκτη είναι πολύ ομαλή.

Με την παραπάνω συσκευή Agarwal μπορούσε κάποιος εύκολα κινώντας τους μοχλούς 8 και 21 να κινήσει τον συλλέκτη 4 και να παρακολουθήσει την πορεία του ήλιου.

Ο Stone και ο Brown ανέπτυξαν σύστημα παρακολούθησης για ηλιακούς συλλέκτες, στους οποίους με στόχο τον περιορισμό του λάθους παρακολούθησης εφαρμόζονταν ένα νευρωνικό δίκτυο. Ύστερα από πειράματα, το λάθος του συστήματος ήταν της τάξης των τιμών μικρότερων από 0,01 μοίρες.

Ένα ακόμα σύστημα παρακολούθησης ενός άξονα παρουσιάστηκε το 1996 από τον Καλογύρου. Το σύστημα χρησιμοποιούσε τρεις (3) φωτοαντιστάσεις(LDRs):

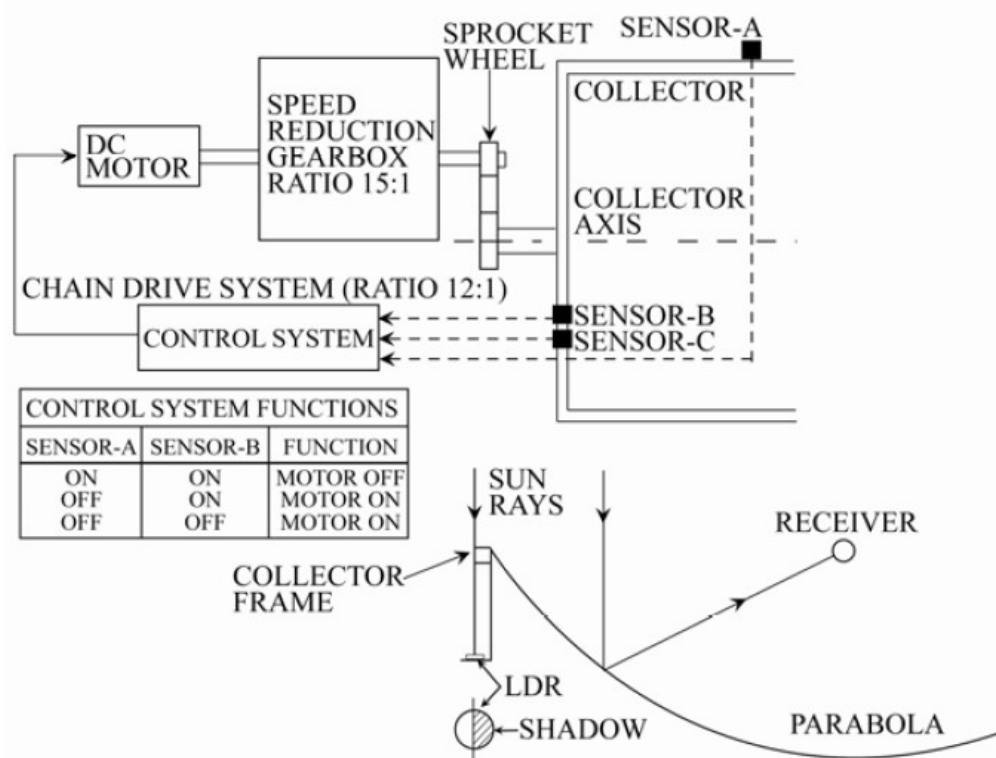
- § Η πρώτη φωτοαντίσταση ανίχνευε την κατάσταση εστίασης του συλλέκτη.
- § Η δεύτερη είχε σχεδιαστεί για την ανίχνευση της παρουσίας ή της απουσίας σύννεφων.
- § Η τρίτη διαχώριζε την μέρα με την νύχτα.

Οι έξοδοι των τριών , όπως αναφέρθηκαν παραπάνω, αντιστάσεων τροφοδοτούσαν ένα ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου, το οποίο οδηγούσε ένα 12 V DC κινητήρα χαμηλών στροφών κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο κινητήρας δεχόταν σήματα τέτοια ώστε να στρέφει τον συλλέκτη πάντα



προς τον ήλιο. Ανάλογα με την ηλιοφάνεια, το σύστημα παρακολούθησης του ήλιου του Καλογύρου είχε σφάλμα από 0,05 έως 0,2 . Οι τιμές αυτές θεωρούνται ικανοποιητικές για την δημιουργία ενός συστήματος με συλλέκτες συγκέντρωσης, οι οποίοι προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους επίπεδους ειδικά σε εφαρμογές που είναι μεσαίας ή υψηλής θερμοκρασίας. Από την άλλη, τέτοια συστήματα απαιτούν πολύ ακριβή παρακολούθηση του ήλιου.

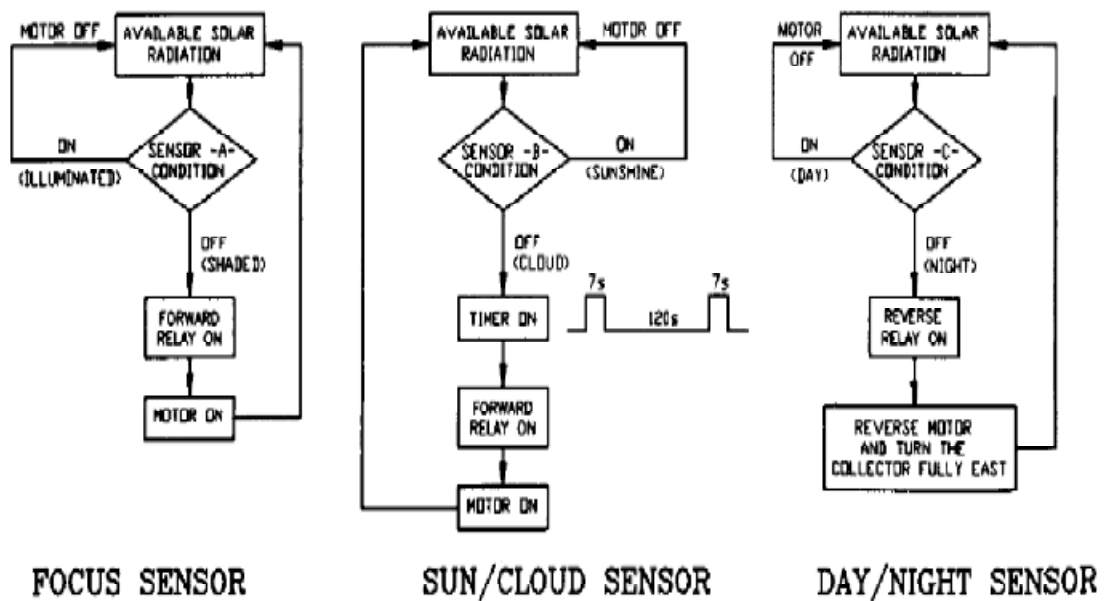
Το σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου του Καλογύρου αποτελείτο από ένα μικρό κινητήρα συνεχούς ρεύματος, ο οποίος ήταν υπεύθυνος για την περιστροφή του συλλέκτη με την βοήθεια ενός μειωτήρα. Επιπλέον, ένα σύστημα ελέγχου χρησιμοποιούνταν για να ανιχνεύει τη θέση του ηλίου και για να ενεργοποιεί κατάλληλα τον κινητήρα. Παρακάτω, στο σχήμα 3.2, απεικονίζεται το σχεδιάγραμμα του συστήματος και ο πίνακας με τις λειτουργίες του.



Σχήμα 3.2. Σύστημα παρακολούθησης ενός άξονα του Καλογύρου

Όπως αναφέραμε και πιο πάνω, το σύστημα του Καλογύρου διέθετε τρεις αισθητήρες. Ο πρώτος αισθητήρας (A) ήταν τοποθετημένος στην ανατολική περιοχή του συλλέκτη και σκιαζόταν από το πλαίσιο του, ενώ οι άλλοι δύο αισθητήρες (B) ΚΑΙ (C) ήταν πάνω στο πλαίσιο του συλλέκτη. Ο αισθητήρας (A) λάμβανε απευθείας φως μόνο όταν ο συλλέκτης ήταν

εστιασμένος , δηλαδή λειτουργούσε σαν αισθητήρας εστίασης. Ενώ, όταν άλλαζε θέση ο ήλιος ο αισθητήρας σκιαζόταν με αποτέλεσμα να ενεργοποιείται ο κινητήρας. Ο αισθητήρας (B) ήταν για τα σύννεφα, δηλαδή θεωρούσε ότι υπήρχε συννεφιά όταν η φωτεινότητα του έπεφτε κάτω από ένα όριο. Τέλος, ο αισθητήρας (C) ήταν ο αισθητήρας της ημέρας, πιο συγκεκριμένα όταν όλοι οι αισθητήρας λάμβαναν φως θεωρείτο από την μονάδα ελέγχου ότι ήταν ημέρα, χωρίς συννεφιά και με τον ήλιο εστιασμένο στον συλλέκτη. Στο παρακάτω σχήμα 3.3, παρουσιάζεται αναλυτικότερα το διάγραμμα ροής για τους αισθητήρες του συστήματος Καλογύρου:



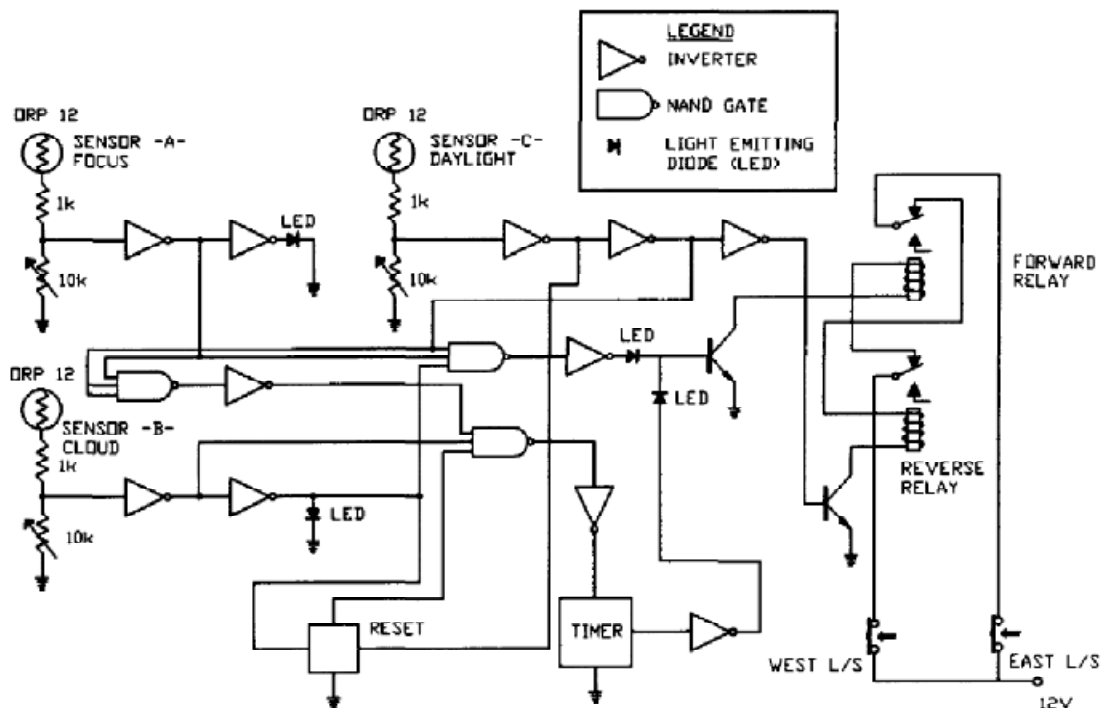
Σχήμα 3.3. Διάγραμμα ροής για τους αισθητήρες του συστήματος Καλογύρου.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα ροής, ο αισθητήρας (A) είναι πάντα μερικώς σκιασμένος. Επομένως, όταν η σκίαση μεγαλώνει λόγω της κίνησης του ηλίου, ο αισθητήρας λαμβάνει μια τέτοια τιμή που ενεργοποιεί τον ηλεκτρονόμο (relay). Σαν αποτέλεσμα αυτού, έχουμε την εκκίνηση του κινητήρα και την μετακίνηση του συλλέκτη προς την κατεύθυνση του ηλίου. Όσον αφορά την ανίχνευση της συννεφιάς, όταν ο αισθητήρας (B) δεν λάμβανε απευθείας φως από τον ήλιο, τότε ένας χρονιστής συνδεόταν αυτόματα με το σύστημα και εκκινούσε τον κινητήρα κάθε 2 λεπτά και 7 δευτερόλεπτα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την παρακολούθηση της πορείας του ηλίου από το σύστημα και όταν έφευγε η συννεφιά τότε η διαδικασία της επανεστίασης πραγματοποιούνταν από τον αισθητήρα (A).

Το σύστημα διέθετε επίσης αισθητήρες ανίχνευσης ορίων οι οποίοι ήταν εγκατεστημένοι σε δύο σημεία, τέτοιοι ώστε να σταματούν τον κινητήρα πριν ξεπεράσει τα καθορισμένα όρια και στα δύο όρια κίνησης.

Συγκεκριμένα, ο συλλέκτης παρακολουθούσε την πορεία του ήλιου προς τα δυτικά. Οπότε, όταν έδυε ο ήλιος, ο αισθητήρας (C) το καταλάβαινε και ευθύς άλλαζε την κατεύθυνση της κίνησης προς τα ανατολικά. Τη στιγμή όπου ενεργοποιούνταν ο αισθητήρας ανίχνευσης ορίων η κίνηση σταμάταγε.

Στο παρακάτω σχήμα 3.4 που ακολουθεί απεικονίζεται το σύστημα ελέγχου μαζί με το τσιπ του χρονισμού, τους ηλεκτρονόμους, τους αισθητήρες και τους αισθητήρες ανίχνευσης ορίων.



Σχήμα 3.4. Μονάδα ελέγχου συστήματος Καλογύρου

Το σύστημα ελέγχου του Καλογύρου χρησιμοποιούσε έναν συνδυασμό από αντιστροφείς και πύλες nand, έτσι ώστε να μεταφράσει την αντίσταση των φωτοαντιστάσεων σε σήματα που ενεργοποιούσαν τους ηλεκτρονόμους. Επιπλέον, για να δείχνει την κατάσταση των αισθητήρων και του κινητήρα, το σύστημα χρησιμοποιούσε ψηφιακούς λαμπτήρες (Led). Ο κινητήρας ήταν συνεχούς ρεύματος διότι έτσι υπήρχε η δυνατότητα τροφοδότησης του από την μπαταρία ή από κάποιο φωτοκύτταρο. Κατά αυτόν τον τρόπο το σύστημα ήταν αυτόνομο. Με την αλλαγή της πολικότητας στην τάση τροφοδοσίας του κινητήρα, μπορούσε εύκολα να αλλάξει η κατεύθυνση της κίνησης του. Ο κινητήρας συνδεόταν με τον συλλέκτη μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων. Συγκεκριμένα, ο

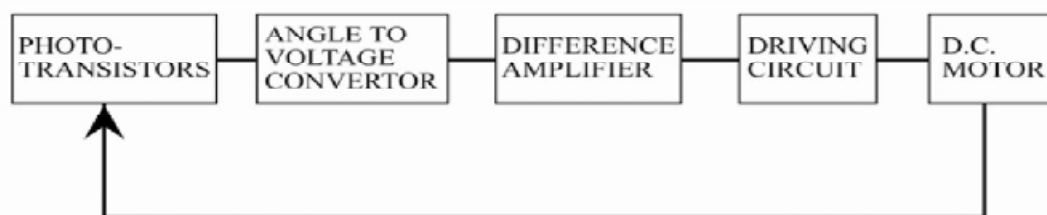
συλλέκτης για να μετακινηθεί από την ανατολή προς την δύση ήθελε 38 λεπτά.

Σε αυτό το σημείο είναι ιδιαίτερα σημαντικό να αναφέρουμε ότι ο μηχανισμός παρακολούθησης της ηλιακής τροχιάς του Καλογύρου είχε δοκιμαστεί για περισσότερα από τέσσερα χρόνια και είχε αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικός. Επιπροσθέτως να αναφέρουμε ότι όλες οι συναρτήσεις του συστήματος ελέγχου ήταν ιδιαίτερα αποτελεσματικές. Πιο αναλυτικά, η συνάρτηση η οποία επέτρεπε την παρακολούθηση του ηλίου κατά την συννεφιά ήταν αποτελεσματική, εκτός από την περίπτωση όπου η σκίαση που υπήρχε διαρκούσε λιγότερο από 30 δευτερόλεπτα, τότε υπήρχε πρόβλημα.

Η ακρίβεια του συστήματος του Καλογύρου εξαρτιόταν από την φωτεινότητα του ήλιου, δηλαδή στην χειρότερη περίπτωση όπου ήταν περίπου 100 Watt ,η ηλιακή ακτινοβολία, ανά τετραγωνικό μέτρο τότε η ακρίβεια ήταν περίπου 0,2 μοίρες. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία ήταν περίπου 600 Watt τότε το σφάλμα έπεφτε στις 0,05 μοίρες. Με την αλλαγή των μεταβλητών αντιστάσεων θα μπορούσαμε να έχουμε βελτίωση της ακρίβειας του συστήματος. Από την άλλη μεριά, με αυτήν την ενέργεια, θα είχαμε αύξηση της κίνησης του κινητήρα και επομένως μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Τέλος, ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του συστήματος του Καλογύρου ήταν ότι το κόστος του συστήματος ήταν πολύ μικρό και δεν εξαρτιόταν από το μέγεθος του συλλέκτη.

Ο Stone και ο Sutherland παρουσίασαν το 1997 ένα σύστημα παρακολούθησης της ηλιακής τροχιάς αποτελούμενο από 100 ηλιοστάτες (solar trackers).

Το 1998, ο Khalifa και ο Al-Mutawalli για να αυξήσουν την απόδοση ενός παραβολοειδούς συλλέκτη ανέπτυξαν ένα σύστημα παρακολούθησης δύο αξόνων, της θέσης του ηλίου. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά το σύστημα, ήταν ικανό να παρακολουθεί την θέση του ηλίου κάθε πέντε λεπτά στο κατακόρυφο επίπεδο και κάθε τρία ή τέσσερα λεπτά στο οριζόντιο επίπεδο. Παρακάτω στο σχήμα 3.5 παρουσιάζεται το σύστημα με ένα απλό διάγραμμα ροής.



Σχήμα 3.5 Σύστημα παρακολούθησης δύο αξόνων Khalifa και Al-Mutawalli.

Το παραπάνω σύστημα των Khalifa και Al-Mutawalli, αποτελείτο από δύο όμοια υποσυστήματα, ένα για κάθε άξονα. Το κάθε υποσύστημα αποτελούνταν από φωτοαντιστάσεις, την μία δίπλα στην άλλη και ανάμεσα τους υπήρχε ένα διαχωριστικό συγκεκριμένου ύψους. Κατά την διάρκεια της παρακολούθησης το σύστημα έβρισκε την διαφορά τάσης ανάμεσα στις δύο αντιστάσεις και οδηγούσε κατάλληλα τον συλλέκτη μέχρι η διαφορά αυτή να γινόταν μηδέν. Αυτό σήμαινε ότι οι ακτίνες του ήλιου, ήταν και πάλι κάθετες ως προς την επιφάνεια. Μετά από διάφορες εφαρμογές και δοκιμές του συστήματος αυτού παρατηρήθηκε ότι το σύστημα αυτό είχε κατανάλωση μόλις 0,5 Whr και αύξανε την απόδοση κατά 75% σε σχέση με έναν ακίνητο συλλέκτη ίδιων διαστάσεων.

Ο Yousef ήταν αυτός που ανέπτυξε ένα σύστημα παρακολούθησης ,στο οποίο , τα μη γραμμικά στοιχεία της διαδικασίας, ελέγχονταν από έναν αλγόριθμο ασαφούς λογικής (fuzzy logic) που υλοποιήθηκε σε ένα προσωπικό υπολογιστή. Συγκεκριμένα, το σύστημα συμπεριλάμβανε μία κάρτα διεπαφής που επέτρεπε την λήψη των μετρήσεων από τους αισθητήρες καθώς και τον έλεγχο των κινητήρων.

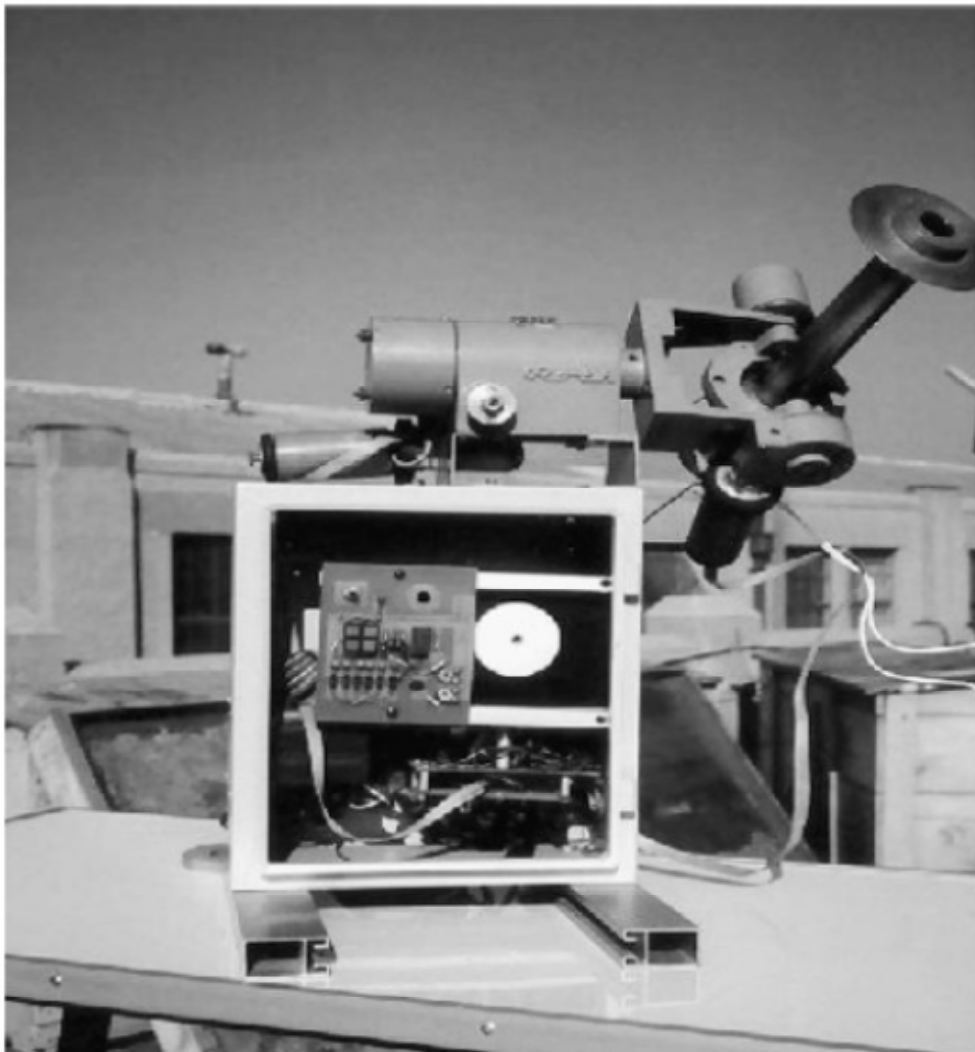
Ο Falbel παρουσίασε ένα σύστημα ελέγχου ύψους δορυφόρων, το οποίο περιλάμβανε έναν συλλέκτη ηλιακής ενέργειας (type: CubeSat). Ο αισθητήρας ήλιου είχε την μορφή μίας δισδιάστατης αναλογικής συσκευής, η οποία μετρούσε την θέση του ηλίου σε σχέση με τον οπτικό της άξονα. Με βάση τις διαφορετικές μετρήσεις που λαμβάνονταν από τις διαφορετικές περιοχές του ανιχνευτή καθοριζόταν η θέση του ηλίου. Από πειράματα που διεξήχθησαν κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο αισθητήρας μπορούσε να αντιληφθεί την θέση του ηλίου με ακρίβεια 0,05 μοίρες.

Ο Urbano παρουσίασε μια αυτόνομη συσκευή των 5 Watt που επέτρεπε την παρακολούθηση του ηλίου σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα με ισχύ 2,6 KWatt. Το σύστημα σχεδιάστηκε για να παρακολουθεί την πορεία του ηλίου αυτόνομα στην κατεύθυνση του αζιμούθιου και του ύψους. Η κίνηση πραγματοποιούνταν με την βοήθεια δύο 12 V DC κινητήρων, καθένας από τους οποίους είχε κατανάλωση 36 Watt και οι οποίοι λάμβαναν ρεύμα από μια μπαταρία η οποία φορτιζόταν από το φωτοβολταϊκό σύστημα.

Ο Jiang και ο Cao κατασκεύασαν έναν τεχνικό ηλιάνθο βασισμένο σε ένα σφαιρικό χωρισμένο σε τεταρτημόρια αισθητήρα. Ο ηλιάνθος ήταν κατασκευασμένος με τέτοιο τρόπο ώστε όταν ο ήλιος έπεφτε κάθετα προς την επιφάνεια του, τότε τα τεταρτημόρια παρήγαγαν την ίδια τάση. Όταν όμως υπήρχε μία αλλαγή στη θέση του ηλίου τότε το κάθε τεταρτημόριο παρήγαγε διαφορετική τάση. Με κατάλληλη επεξεργασία των εξόδων του κάθε τεταρτημορίου, μπορούσε να παραχθεί ένα σήμα ελέγχου, με το οποίο οι τάσεις σε κάθε ένα από αυτά θα γίνονταν και πάλι ίσες.

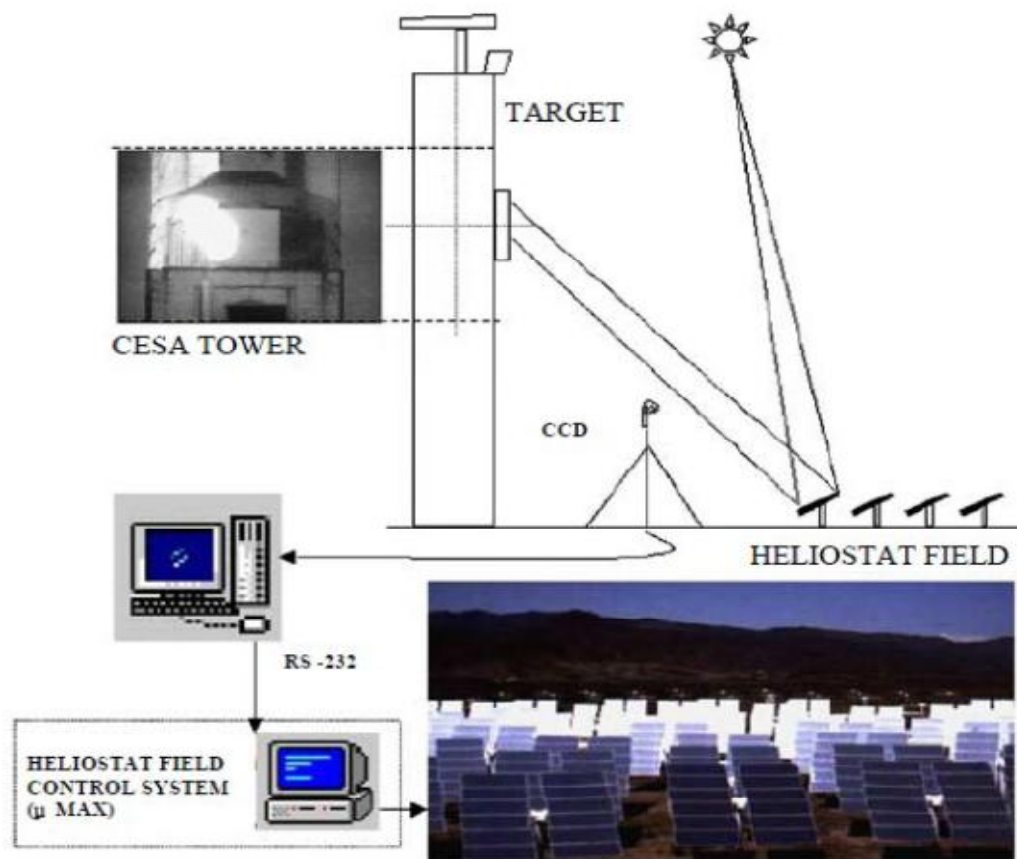
Οι Luque-Heredia παρουσίασαν ένα σύστημα παρακολούθησης του ηλίου, το οποίο μπορούσε να κατευθύνει 1000 μικρο-συλλέκτες. Το σύστημα αποτελείτο από μία ελαφριά κατασκευή σχεδιασμένη κατάλληλα, ώστε να αντέχει σε ισχυρούς ανέμους και ένα σύστημα ελέγχου το οποίο βασιζόταν σε έναν προσαρμοζόμενο αλγόριθμο για την διόρθωση των λαθών.

Ο Roth ,το 2004, κατασκεύασε ένα σύστημα το οποίο χρησιμοποιούσε πυρηλιόμετρο (pyrheliometer) για την μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Το σύστημα διέθετε έναν αισθητήρα τεταρτημορίων, καθώς και δύο κινητήρες που οδηγούσαν τον συλλέκτη, έτσι ώστε η εικόνα του ήλιου να παραμένει στο κέντρο. Στο παρακάτω σχήμα 3.6 απεικονίζεται ένα τέτιο σύστημα με πυλιόμετρο.



Σχήμα 3.6. Σύστημα με πυλιόμετρο Roth.

Το ίδιο έτος με τον Roth, δηλαδή το 2004, ο Berenguel σχεδίασε ένα σύστημα διορθώσεων των λαθών σε ένα αυτόματο σύστημα ηλιοστάτη (solar tracker), που βασιζόταν σε μηχανική όραση και λήψη εικόνων από ψηφιακούς αισθητήρες εικόνας (CCD). Στο παρακάτω σχήμα 3.7 απεικονίζεται ένα τέτοιο σύστημα ηλιοστάτη (solar tracker) Berenguel.



Σχήμα 3.7. Σύστημα ηλιοστάτη (solar tracker) Berenguel.

Η λειτουργία του παραπάνω συστήματος ήταν η εξής: Μία ασπρόμαυρη ψηφιακή φωτογραφική λάμβανε εικόνες από την ανάκλαση του ηλίου, με ανάλυση 640 x 380 pixel, και μετέδιδε τις εικόνες αυτές σε έναν προσωπικό υπολογιστή. Κατόπιν οι εικόνες συγκρίνονταν με άλλες, οι οποίες είχαν τις ακτίνες του ηλίου κάθετα προς τους ηλιοστάτες (solar trackers). Η διαφορά ανάμεσα στις φωτογραφίες μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την κίνηση των ηλιοστατών, ώστε οι ακτίνες του ηλίου να γίνουν κάθετες προς την επιφάνεια τους.

Η ανάπτυξη και οι δοκιμές του συστήματος Berenguel έγιναν στην ηλιακή πλατφόρμα Αλμέρα στην ανατολική Ισπανία. Η πλατφόρμα αυτή διέθετε έναν ψηλό πύργο, όπου γύρω του υπήρχαν πολλές σειρές από ηλιοστάτες οι οποίοι συγκέντρωναν τον ήλιο σε συγκεκριμένα σημεία του , έτσι ώστε με την παραγόμενη θερμότητα να κινείται μία ηλεκτρική γεννήτρια.

Ο Abdallah ερεύνησε την απόδοση τεσσάρων διαφορετικών ηλεκτρομηχανικών συστημάτων παρακολούθησης του ηλίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα συστήματα με δύο άξονες κίνησης, αυτά με τον ακίνητο άξονα στην κατεύθυνση ανατολή δύση και αυτά με κατεύθυνση νότο βορρά, έχουν καλύτερη απόδοση από αυτά που είναι σταθερά με τιμές 43,87% και 34,43% αντίστοιχα.

Ο Al-Mohamad χρησιμοποίησε έναν ελεγκτή προγραμματιζόμενης λογικής (PLC) για τον έλεγχο ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Το σύστημα παρακολουθούσε την πορεία του ήλιου, έτσι ώστε να εξασφαλίζει μεγαλύτερη απόδοση. Ύστερα από έρευνες που έγιναν κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι αν συλλέγονται τα δεδομένα σχετικά με την ακτινοβολία του ήλιου και η πληροφορία αυτή χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της κίνησης των συλλεκτών τότε η ενέργεια που παράγεται από το φωτοβολταϊκό μπορεί να βελτιωθεί περισσότερο από 20% σε σχέση με συστήματα που ο συλλέκτης είναι ακίνητος.

Ο Aiuchi παρουσίασε έναν απλό αισθητήρα που σχεδιάστηκε με στόχο την διατήρηση της κατεύθυνσης της συσκευής προσανατολισμένης πάντα προς τον ήλιο. Πιο συγκεκριμένα, στην προτεινόμενη συσκευή δύο φωτοκύτταρα τοποθετήθηκαν το ένα δίπλα στο άλλο στον πυθμένα ενός κουτιού με μία εγκοπή, έτσι ώστε όταν η ηλιακή ακτινοβολία περνούσε από το στενό άνοιγμα τότε τα φωτοκύτταρα φωτίζονταν μερικώς και παρήγαγαν ρεύμα ανάλογο με την φωτιζόμενη επιφάνεια. Η διατήρηση του προσανατολισμού προς τον ήλιο πραγματοποιούνταν με την παρακολούθηση των εξόδων των φωτοκυττάρων. Η συσκευή διόρθωνε την θέση της έτσι ώστε τα δύο σήματα να είναι ίσα. Τα πειράματα έδειξαν ότι το σφάλμα παρακολούθησης μπορούσε να περιοριστεί στις 0,6 μοίρες όταν η μέρα ήταν φωτεινή.

Ο Alata το 2005, σχεδίασε και προσωμείωσε τρία συστήματα παρακολούθησης. Το ένα ήταν ενός άξονα με την γωνία κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος, το δεύτερο μπορούσε να παρακολουθήσει τον ήλιο και στους δύο άξονες και το τρίτο μπορούσε να μετατοπιστεί ως προς το ύψος. Για κάθε σύστημα ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας πρώτης τάξης ασαφή λογική Sugeno (Sugeno fuzzy logic). Με τα στοιχεία που παρήγαγε το κάθε σύστημα και εφαρμόζοντας έναν αφαιρετικό αλγόριθμο ομαδοποίησης, παράχθηκαν ένα σύνολο από κανόνες ασαφούς λογικής με τους οποίους ήταν εφικτή η πρόβλεψη των γωνιών του κάθε άξονα, δίνοντας την τρέχουσα ώρα. Οι κανόνες αυτοί βελτιστοποιήθηκαν με ένα προσαρμοζόμενο νευρωνικό συμπερασματικό σύστημα ασαφούς λογικής (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System ANFIS).



### 3.3 Συστήματα Ανοιχτού Βρόγχου

Τα συστήματα ανοιχτού βρόγχου υπολογίζουν την ενέργεια που θα πραγματοποιήσουν με βάση μόνο την παρούσα κατάσταση και κάποιον αλγόριθμο, χωρίς την χρήση ανατροφοδότησης για να διαπιστώσουν αν έχουν πετύχει τον επιθυμητό στόχο. Τα συστήματα αυτά είναι φθηνότερα και πιο απλά σε σχέση με τα συστήματα κλειστού βρόγχου. Επιπλέον, τα συστήματα ανοιχτού βρόγχου δεν παρατηρούν το αποτέλεσμα της ενέργειας τους, οπότε δεν μπορούν να αντιληφθούν πιθανά λάθη που συμβαίνουν κατά την λειτουργία τους. Τα συστήματα ανοιχτού βρόγχου χρησιμοποιούν κάποιο μοντέλο υπολογισμού της κίνησης του ήλιου.

Ο Al-Naima και ο Yaghobian κατασκεύασαν ,το 1983, ένα σύστημα παρακολούθησης του ήλιου, το οποίο μπορούσε να κινηθεί και στους δύο άξονες (dual-axis solar tracker) και με έναν μικροεπεξεργαστή μπορούσε να παρακολουθήσει την πορεία του, με βάση ένα αστρονομικό μοντέλο υπολογισμού της θέσης του. Ύστερα από πειράματα που διεξήχθησαν το προτεινόμενο σύστημα πετύχαινε καλύτερα αποτελέσματα από ένα συμβατικό σύστημα με αισθητήρες.

Ο Lorenz , αρκετά χρόνια αργότερα, πρότεινε ένα σύνολο από σχεδιαστικές αρχές για παράθυρα τα οποία θα αντανάκλουν την ηλιακή ακτινοβολία το καλοκαίρι και θα την απορροφούν τον χειμώνα. Το σχέδιο αποτύπωνε ένα πλήρες παθητικό σύστημα βασισμένο στην αλλαγή των εποχών και της γωνίας με την οποία πέφτουν οι ακτίνες του ήλιου.

Ο Blanco-Muriel υποστήριζε ότι τα ανοιχτού βρόγχου συστήματα παρακολούθησης του ήλιου θα πρέπει να έχουν πολύ μεγάλη ακρίβεια υπολογισμού, έτσι ώστε να αυξάνεται η απόδοση τους καθώς επίσης οι αλγόριθμοι θα έπρεπε να είναι υπολογιστικά απλοί ώστε να είναι μικρό το κόστος τους. Έχοντας αναλύσει υπάρχοντες αλγόριθμους υπολογισμού του ανύσματος του ήλιου, δημιούργησαν έναν νέο αλγόριθμο με βάση τον καθολικό χρόνο και την τοποθεσία. Η απόδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου πιστοποιήθηκε υπολογίζοντας την θέση του ήλιου για 447.048 σημεία για την χρονική περίοδο 1999-2015. Διαπιστώθηκε ότι ο αλγόριθμος επέτρεπε τον υπολογισμό του ανύσματος του ήλιου με λάθος μικρότερο από 0,008 μοίρες. Ο πίνακας 3.3 δείχνει τα λάθη στον υπολογισμό της θέσης του ήλιου από τον αλγόριθμο του Blanco-Muriel (PSA) και του Michalsky που είχε προταθεί το 1988.

	<b>Average</b>	<b>Standard Deviation</b>	<b>Mean Deviation</b>
Error in Zenith Distance			
Michalsky	-0.128	0.137	0.109
PSA Algorithm	-0.008	0.107	0.084
Error in Azimuth			
Michalsky	-0.065	0.206	0.150
PSA Algorithm	0.000	0.177	0.127
Sun Vector Deviation			
Michalsky	0.208	0.110	0.086
PSA Algorithm	0.136	0.079	0.063

Πίνακας 3.3. Λάθη υπολογισμού θέσης ηλίου

Όπως δείχνουν τα αποτελέσματα, όσον αφορά τις γωνίες του αζιμούθιου και του ζενίθ, οι οποίες λαμβάνονται από τον αλγόριθμο Blanco-Muriel, είναι αντίστοιχα περίπου 15% και 22% καλύτερες από αυτές που λαμβάνονται από τον αλγόριθμο του Michalsky.

Το 2003 Beshears παρουσίασε ένα σύστημα που βασιζόταν σε ένα μικροελεγκτή για τον υπολογισμό της θέσης του ήλιου. Ήταν ένα υβριδικό σύστημα φωτισμού και η ουράνια θέση του ήλιου υπολογιζόταν με βάση την τοπική ώρα, την ημερομηνία, το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος της περιοχής.

Οι Abdallah και Nijmeh, το 2004, σχεδίασαν ένα ηλεκτρομηχανικό σύστημα παρακολούθησης του ήλιου δύο αξόνων το οποίο ελεγχόταν από έναν αλγόριθμο ανοιχτού βρόγχου, υλοποιημένο σε ελεγκτή προγραμματισμένης λογικής (PLC). Το προτεινόμενο σύστημα αποτελείται από δύο αυτόνομους κινητήρες. Ο ένας παρακολουθούσε την πορεία του ήλιου στον οριζόντιο άξονα και ο άλλος στον κατακόρυφο. Ύστερα από πειράματα τα δεδομένα έδειξαν ότι το σύστημα αυτό αύξανε την ημερήσια συλλογή ενέργειας κατά 41,34% σε σχέση με ένα ακίνητο σύστημα τοποθετημένο με κλίση 32 μοίρες προς το νότο.

Την ίδια χρονιά οι Reda και Andreas παρουσίασαν μία απλή, βήμα προς βήμα, διαδικασία για τον υπολογισμό της θέσης του ηλίου. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούσαν, ήταν μεταξύ άλλων το ελλειπτικό γεωγραφικό μήκος και πλάτος και κατάφεραν να πετύχουν σφάλμα της τάξεως του 0,0003 μοίρες.

Σε μία πρόσφατη μελέτη από τον Grena παρουσιάστηκε ένας νέος αλγόριθμος για τον υπολογισμό της θέσης του ηλίου με μεγάλη ακρίβεια. Λαμβάνοντας υπόψη τον καθολικό χρόνο (Universal Time) την ημερομηνία και την διαφορά μεταξύ καθολικού χρόνου και τοπικού ο αλγόριθμος

υπολόγιζε την γωνία που σχηματίζει η γης σε σχέση με τον ήλιο, ως προς το ελλειπτικό της επίπεδο και χρησιμοποιούσε την γωνία αυτή μαζί με άλλα δεδομένα για να υπολογίσει την θέση του ήλιου. Το μεγαλύτερο λάθος αυτού του αλγόριθμου ήταν περίπου 0,0027 μοίρες. Το λάθος αυτό είναι μεγαλύτερο από αυτό του αλγορίθμου των Reda και Andreas, αλλά ο αλγόριθμος έχει πολύ μικρότερο υπολογιστικό κόστος.

Πρόσφατα ο Chen και ο Chong παρουσίασαν μία γενική φόρμουλα υπολογισμού της θέσης του ήλιου για συστήματα ανοιχτού βρόγχου. Με την φόρμουλα αυτή λύνεται το πρόβλημα της ακριβούς τοποθέτησης των αξόνων της βάσης κατά την εγκατάσταση των συστημάτων αυτών.

:

## 4. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΩΝ

### 4.1 Εισαγωγή

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει ο σχεδιαστής ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, εκτός από την επιλογή του τρόπου διασύνδεσης(αυτόνομο ή διασυνδεδεμένο με το δίκτυο) και την επιλογή των επιμέρους υλικών είναι το που θα στερεωθούν οι βασικές μονάδες, αν θα στερεωθούν σε σταθερές θέσεις ή οι προσανατολισμοί τους θα ιχνηλατούν(ακολουθούν) την κίνηση του ηλίου. Όσον αφορά το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται οι βάσεις είναι τα εξής που αναφέρονται παρακάτω: γαλβανισμένος εν θερμό χάλυβας, αλουμίνιο, χάλυβας, ανοξείδωτος χάλυβας (νικελιούχος, νικελιοχρωμιούχος, μολυβδαινιούχος κ.α) και το ξύλο.

Οι κυριότεροι τρόποι στήριξης των πλαισίων διακρίνονται ανάλογα με την ενεργειακή απολαβή, και είναι οι παρακάτω τρείς:

- § Στήριξη με σταθερή γωνία κλίσης του συλλέκτη
- § Στήριξη με εποχιακή ρύθμιση της κλίσης του συλλέκτη
- § Συνεχούς ημερήσιας παρακολούθησης ηλιοτρόπιου – sun tracker

Στα παρακάτω υποκεφάλαια θα αναλυθούν σε εκτενή βαθμό καθένας από τους παραπάνω τρόπους στήριξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

### 4.2 Στήριξη με σταθερή γωνία κλίσης του συλλέκτη (σταθερή βάση)

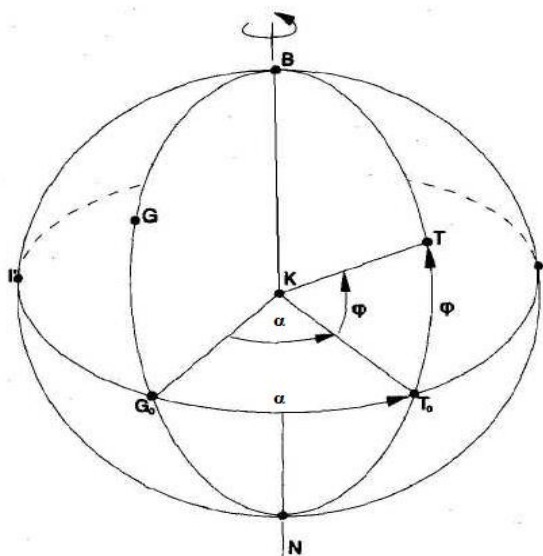
Αποτελεί τον απλούστερο και οικονομικότερο τρόπο στήριξης που είναι δυνατόν να εφαρμοστεί για την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών συλλεκτών. Ο σχεδιασμός του συστήματος είναι απλός διότι στο μόνο που πρέπει να δοθεί προσοχή είναι ο προσανατολισμός των συλλεκτών και η γωνία κλίσης τους. Πιο συγκεκριμένα η αρχή σχεδιασμού τους είναι ότι οι ακτίνες του ηλίου θα πρέπει να προσπίπτουν κάθετα το μεσημέρι. Οπότε οι βάσεις πρέπει να κατασκευάζονται ώστε να επιτρέπουν την τοποθέτηση των πάνελ σε σταθερή κλίση, περί τις 30 μοίρες. Η κλίση αυτή θεωρείται ως μια ικανοποιητική μέση τιμή για τα Ελληνικά δεδομένα. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η ιδανική κλίση είναι αρκετά μικρότερη κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και αρκετά μεγαλύτερη κατά τους χειμερινούς μήνες. Λόγω του ότι δεν έχει κινητά μέρη αποτελεί έναν αρκετά αξιόπιστο τρόπο στήριξης των συλλεκτών. Προτείνεται η εφαρμογή του σε μέρη όπου υπάρχουν ισχυροί άνεμοι, για παράδειγμα στα βουνά, καθώς επίσης όταν

θέλουμε να ενσωματώσουμε σε κτήρια (π.χ. προσόψεις, στέγες) φωτοβολταϊκούς συλλέκτες.

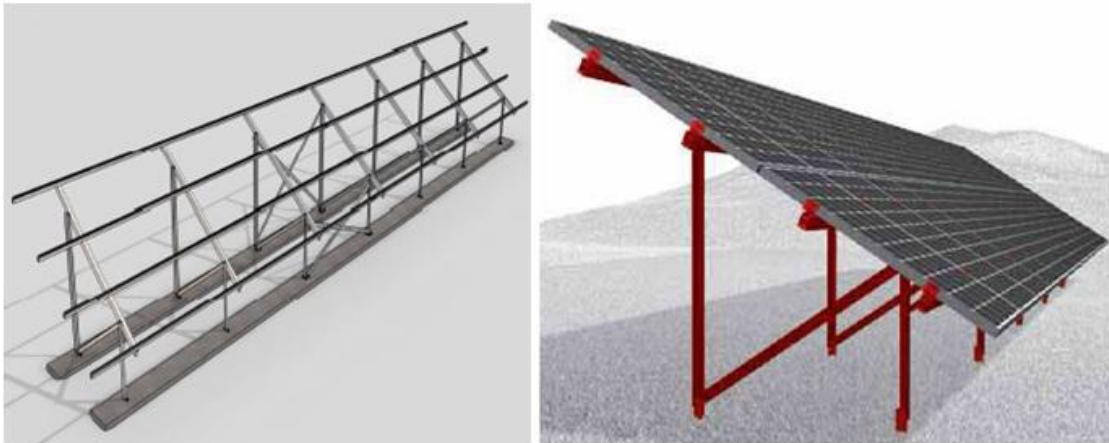


Σχήμα 4.1. Ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά σε στέγες κτιρίων.

Η σωστή τοποθέτηση των συλλεκτών προϋποθέτει την επιλογή της καταλληλότερης γωνίας της κλίσης και του προσανατολισμού τους, έτσι ώστε να έχουμε την όσο το δυνατόν καλύτερη απόδοση των φωτοβολταϊκών συλλεκτών. Την καταλληλότερη γωνία κλίσης αποτελεί το γεωγραφικό πλάτος  $\phi$  και ο καταλληλότερος προσανατολισμός είναι ο νότος αν βρισκόμαστε στο βόρειο ημισφαίριο ενώ αντίθετα, ο βορράς αν βρισκόμαστε στο νότιο ημισφαίριο. Είναι απαραίτητο να διευκρινιστεί ότι λόγω της σταθερής γωνίας κλίσης των συλλεκτών, η εγκατάσταση αποδίδει πολύ λιγότερο από της πραγματικές της δυνατότητες. Επιπλέον πρέπει να αναφερθεί ότι οι σταθερές βάσεις κατασκευάζονται συνήθως από αλουμίνιο ή ανοξείδωτο χάλυβα (χάλυβα γαλβανισμένο εν θερμώ). Το σύνηθες είναι να κατασκευάζονται μετά από τεχνική μελέτη ώστε να διαπιστωθεί η στατική τους επάρκεια και η αντοχή τους σε ανεμοπιέσεις ή φορτία χιονιού.



Σχήμα 4.2. Προσδιορισμός γεωγραφικών συντεταγμένων.



*Σχήμα 4.3 Σταθερές βάσεις στήριξης φωτοβολταϊκών πλαισίων.*

Οι βάσεις τοποθετούνται επί του εδάφους είτε με σκυροδέτηση είτε απευθείας με εδαφόμπτυξη. Η σκυροδέτηση των βάσεων γίνεται συνήθως σε δοκάρι (δηλαδή σε όλη τη σειρά των βάσεων) από οπλισμένο σκυρόδεμα, είτε σε πέλματα από σκυρόδεμα, τοποθετημένα κατάλληλα ώστε να επιτρέπουν το βίδωμα των υποδοχών των βάσεων. Η εδαφόμπτυξη γίνεται συνήθως σε βάθη τυπικά του 0,5-1,5(m) μέτρα, όπου τοποθετούνται πάσσαλοι, επί των οποίων στη συνέχεια εδράζεται η βάση. Η σκυροδέτηση των βάσεων αυξάνει το κόστος εγκατάστασης σε σχέση με την απλή εδαφόμπτυξη. Ωστόσο, συστήνεται να διενεργείται αυτοψία και γεωτεχνική μελέτη για να διαπιστωθεί κατά πόσο ο τύπος του εδάφους επιτρέπει την εδαφόμπτυξη χωρίς να δημιουργούνται θέματα στατικής επάρκειας των βάσεων.

Επιπλέον, ο μελετητής μηχανικός θα πρέπει να είναι προσεκτικός στη χρήση παρελκόμενων υλικών όπως βίδες ή σύνδεσμοι φ/β πάνελ, καθώς θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την αποφυγή οξειδώσεων ή ηλεκτρόλυσης. Θα πρέπει επίσης να λαμβάνεται μέριμνα για την δυνατότητα όδευσης καλωδίων καθώς και για τη στήριξη πινάκων ή αντιστροφών, σε περίπτωση που τεχνικά διαπιστωθεί ότι αυτή είναι η βέλτιστη λύση.

Οι σταθερές βάσεις αποτελούνται συνήθως από τεμάχια τα οποία συναρμολογούνται επί το έργω. Κάθε τεμάχιο χαρακτηρίζεται από τη μέγιστη επιφάνεια τοποθέτησης, η οποία συνήθως υπολογίζεται λαμβάνοντας κάποιες μέσες τιμές διαστάσεων πάνελ (τυπικά 1,6(m)x1(m) για κρυσταλλικά πάνελ). Τα πάνελ μπορούν να τοποθετηθούν ανά απλή (μονή) σειρά ή συνηθέστερα σε διπλή σειρά ή ακόμη και σε τριπλή ή τετραπλή σειρά. Επίσης είναι δυνατή η τοποθέτηση τους είτε κατά τη μικρή διάσταση (portrait) είτε κατά τη μεγάλη διάσταση (landscape). Η ακριβής χωροθέτηση εξαρτάται από τη μορφολογία του διαθέσιμου χώρου εγκατάστασης και τις διαστάσεις αυτού.

## **Στήριξη με εποχιακή ρύθμιση της κλίσης του συλλέκτη**

Για να επιτευχθεί αύξηση στην απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων κατασκευάζονται βάσεις με δυνατότητα ρύθμισης της κλίσης τους, στις οποίες τοποθετούνται οι συλλέκτες. Η μηχανολογική κατασκευή είναι σχετικά φθηνή και απλή ώστε όλοι οι χρήστες να μπορούν να κάνουν την εποχιακή ρύθμιση.

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

Απαραίτητα είναι τα μετεωρολογικά δεδομένα του τόπου για τον προσδιορισμό της σωστής γωνίας του συλλέκτη, όπως για παράδειγμα η ηλιοφάνεια, η θερμοκρασία και η ταχύτητα του ανέμου.

Έχοντας ως γνώμονα τα παραπάνω καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για τη χειμερινή περίοδο η καταλληλότερη γωνία κλίσης είναι το γεωγραφικό πλάτος του τόπου αυξημένο κατά  $10^\circ$  έως  $15^\circ$ , ενώ για τη θερινή περίοδο η καταλληλότερη γωνία κλίσης είναι το γεωγραφικό πλάτος του τόπου μειωμένο κατά  $10^\circ$  έως  $15^\circ$ .

Με τα συστήματα της εποχιακή ρύθμισης της κλίσης των συλλεκτών πετυχαίνουμε μία βελτίωση στην απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων αρκετά σημαντική, σε σχέση με τα συστήματα στήριξης με σταθερή γωνία κλίσης. Δεν παύουν όμως να υπάρχουν ακόμα περιθώρια για περαιτέρω βελτιστοποίηση της απόδοσης τέτοιων συστημάτων. Για παράδειγμα, η αλλαγή γωνίας κλίσης τρεις φορές το χρόνο αλλά με μικρότερες αλλαγές στη γωνία κλίσης θα μπορούσε να αποτελέσει μια πρόταση για περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης του συστήματος.

### **4.3 Συστήματα συνεχούς ημερήσιας παρακολούθησης**

Σε αντίθεση με τα δύο προηγούμενα συστήματα στήριξης και παρακολούθησης του ηλίου είτε με σταθερή κλίση είτε με την εποχιακή ρύθμιση της κλίσης όπου είχαμε μικρή απολαβή της ηλιακής ενέργειας, τα συστήματα διαρκούς παρακολούθησης της πορείας του ηλίου (sun trackers) αποφέρουν υψηλότερη απολαβή ισχύος. Οι συσκευές αυτές ακολουθούν τα «ίχνη» του ηλίου και γι' αυτό ονομάστηκαν ιχνηλάτες (trackers). Η κύρια λειτουργία των ιχνηλατών (trackers) είναι να στρέφουν τους φωτοβολταϊκούς συλλέκτες έτσι ώστε οι ακτίνες του ηλίου να προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια του συλλέκτη. Η εφαρμογή της

τεχνολογίας των ιχνηλατών (trackers) γίνεται τόσο σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές όσο και σε θερμικά συστήματα. Έχει παρατηρηθεί ότι με την χρήση των ιχνηλατών υπάρχει μία αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος κατά 30% έως 50% σε σχέση με την απόδοση ισχύος των σταθερών τρόπων στήριξης.

Τα συστήματα συνεχούς ημερήσιας παρακολούθησης ή αλλιώς ιχνηλάτες του ηλίου (solar or sun trackers) τα διαχωρίζουμε σε δύο κύριες κατηγορίες, ανάλογα με το είδος της κίνησης που εκτελούν:

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

#### **4.3.1 Στροφή γύρω από έναν άξονα**

Η συστοιχία περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα με κατάλληλο μηχανισμό, ξεκινώντας από την ανατολή και παρακολουθώντας την πορεία του ήλιου καθ' όλη την ημέρα καταλήγοντας στη δύση. Σε αυτά τα συστήματα διακρίνουμε τις εξής δύο περιπτώσεις ιχνηλατών:

- § Ο αζιμουθιακός ιχνηλάτης
- § Ο πολικός ιχνηλάτης

##### **4.3.1.1 Ο αζιμουθιακός ιχνηλάτης**

Η λειτουργία του αζιμουθιακού ιχνηλάτη έγκειται στο ότι παρακολουθεί την αζιμουθιακή κίνηση του ήλιου. Πιο αναλυτικά, το σύστημα περιστρέφεται ως προς τον κατακόρυφο άξονα κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι ακτίνες του ήλιου να πέφτουν κάθετα στο συλλέκτη. Όσον αφορά την γωνία κλίσης των συλλεκτών ακολουθείτε η ίδια λογική με τις προηγούμενες μεθόδους, δηλαδή τοποθετούνται με σταθερή γωνία η οποία επιλέγεται βάσει του γεωγραφικού πλάτους.

Οι αζιμουθιακοί ιχνηλάτες χρησιμοποιούνται κυρίως σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διότι αυξάνουν την παραγωγή ενέργειας. Η αύξηση της ισχύος με την χρήση του αζιμουθιακού ιχνηλάτη είναι περίπου 25% έως 35% και εξαρτάται βέβαια από την τοποθεσία, τον τρόπο ελέγχου της κίνησης και την ποιότητα του συστήματος.





Σχήμα 4.3. Αζιμουθιακοί ιχνηλάτες.

#### 4.3.1.2 Πολικός ιχνηλάτης (polar tracker)

Όσον αφορά την λειτουργία του πολικού ιχνηλάτη (polar tracker), το σύστημα περιστρέφεται ως προς άξονα τοποθετημένο σε γωνία ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου παράλληλα ,με τον πολικό άξονα της γης. Με αυτόν τον τρόπο ο ήλιος βρίσκεται συνεχώς στο επίπεδο που είναι κάθετο στο συλλέκτη. Κατά τη διάρκεια του έτους η γωνία μεταξύ των ακτινών του ηλίου και της κάθετης στο συλλέκτη κυμαίνεται από  $-23,45^{\circ}$  έως  $+23,45^{\circ}$ .

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

#### 4.3.2 Στροφή γύρω από δύο άξονες



Σχήμα 4.4. Ιχνηλάτης(tracker) δύο αξόνων.

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

Το παρόν σύστημα στήριξης και παρακολούθησης του ηλίου είναι πιο αποδοτικό απ' όλα τα προηγούμενα αφού, λόγω της συνεχής παρακολούθησης του ηλίου και στους δύο άξονες, οι ακτίνες του ηλίου προσπίπτουν κάθετα στους συλλέκτες καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας αλλά και για όλο το χρόνο. Έτσι έχουμε αύξηση της παραγόμενης ισχύος που φτάνει και το 50% σε σχέση με την σταθερή στήριξη και η απόδοση του φτάνει και το 99,9%. Βεβαίως το κόστος του είναι αρκετά ψηλότερο λόγω της χρήσης διπλών ηλεκτρονικών συστημάτων καθώς και της πιο περίπλοκης μηχανολογικής κατασκευής.



Σχήμα 4.5 Ιχνηλάτης(tracker) δύο αξόνων.

Υπάρχουν δύο τρόποι ελέγχου της κίνησης του ιχνηλάτη που κινείται σε δύο άξονες, είτε με τη χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή είτε με τη χρήση αισθητήρων. Η μέθοδος ελέγχου μέσω αισθητήρων βασίζεται στη σκίαση των αισθητήρων σε δύο άξονες. Πιο αναλυτικά, τοποθετούνται δύο ή περισσότεροι αισθητήρες για τον έλεγχο της αζιμουθιακής κίνησης του ιχνηλάτη και αντίστοιχα δύο ή περισσότεροι αισθητήρες για τον έλεγχο της γωνίας του ύψους. Από την άλλη μεριά, όταν ο έλεγχος

πραγματοποιείται με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή τότε χρησιμοποιούνται εξισώσεις που για κάθε χρονική στιγμή υπολογίζουν τις συντεταγμένες του ηλίου, δηλαδή δίνουν τις τιμές που έχουν οι γωνίες αζιμούθιου και ύψους ηλίου. Η περεταίρω ανάλυση των υποσυστημάτων που συνιστούν ένα σύστημα παρακολούθησης του ηλίου (ιχνηλάτη) και η λειτουργία αυτών, θα γίνει στα επόμενα κεφάλαια που ακολουθούν.

## 5. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΙΟΣΤΑΤΗ (Solar tracker)

### 5.1 Κίνηση και έλεγχος του ηλιοστάτη

Υπάρχουν δύο συνήθεις αρχιτεκτονικές κίνησης και ελέγχου ενός ηλιοστάτη (solar tracker) :

- Η διανεμημένη κίνηση, και
- Η ομαδοποιημένη κίνηση.

Αυτές μπορούν να εφαρμοστούν με διάφορους τρόπους.

#### 5.1.1 Διανεμημένη – κατανεμημένη κίνηση

Η διανεμημένη ώθηση εξαλείφει τους συνδέσμους και τους μηχανισμούς μετάδοσης κίνησης μεταξύ αξόνων ιχνηλατών και σειρών. Αυτό αποβάλλει την ανάγκη να ευθυγραμμιστούν οι σειρές ή μία με την άλλη κατά την εγκατάσταση και εξαλείφει τους συνδέσμους που καταλαμβάνουν και δεσμεύουν χώρο. Η εξάλειψη των συνδέσμων και των αξόνων κίνησης μεταξύ των ηλιοστατών επιτρέπει στα συνεργεία εγκατάστασης και συντήρησης να κινούνται με άνεση στο χώρο.

Επιπροσθέτως, η διανεμημένη ώθηση μηδενίζει την πιθανότητα να αποτύχει μια ολόκληρη σειρά φωτοβολταϊκών, λόγω βλάβης ενός κινητήρα ή αστοχίας ενός συνδέσμου. Αντίθετα, μειώνει τα φορτία που φέρει ο κινητήρας, επιτρέποντας τους να είναι μικρότεροι και να αποβάλλεται η ανάγκη χρήσης βαρέων μηχανημάτων κατά την εγκατάσταση και τη συντήρηση.

Η κίνηση και ο έλεγχος κάθε ιχνηλάτη ή άξονα ανεξάρτητα μηδενίζει τους περιορισμούς ενός συγκεκριμένου χώρου τοποθέτησης με σεβασμό σε άλλους ιχνηλάτες (trackers). Αποτέλεσμα αυτού είναι οι ιχνηλάτες (trackers) να συμπληρώνουν τους μη ορθογώνιους χώρους αποτελεσματικότερα.

#### 5.1.2 Ομαδοποιημένη κίνηση

Η αρχιτεκτονική μιας ομαδοποιημένης κίνησης είναι η εξής: πολλοί άξονες κίνησης είναι όμοια κινούμενοι με ένα μόνο σύστημα κίνησης. Δύο είναι οι περιπτώσεις, είτε να είναι πολλαπλοί άξονες σε έναν ιχνηλάτη είτε να είναι πολλαπλοί ιχνηλάτες σε μία σειρά.

Η ομαδοποιημένη κίνηση (ώθηση) χρησιμοποιείται τυπικά για να καταπολεμήσει το κόστος των μεγάλων ακριβών κινητήρων. Πιο αναλυτικά, αντικαθιστώντας τους ακριβούς κινητήρες με συνδέσμους ή με

έναν κοινό μηχανισμό μετάδοσης κίνησης μπορεί να μειωθεί το κόστος κίνησης με αντάλλαγμα την πολυπλοκότητα. Συχνά καθολικές ενώσεις και κιβώτια ταχυτήτων χρειάζονται σε κάθε άξονα κίνησης για να υποστηρίξουν τη λύση.

## 5.2 Κατηγοριοποίηση με βάση τον τρόπο κίνησης του ηλιοστάτη.

Η ηλιοστάτες (solar trackers) με βάση τον τρόπο κίνησης τους μπορούν να διακριθούν στις παρακάτω τρεις (3) κατηγορίες:

- a) Ενεργός – ενεργητικός ηλιοστάτης
- b) Παθητικός ηλιοστάτης, και
- c) Χρονολογικός ηλιοστάτης.

Παρακάτω θα αναλύσουμε ξεχωριστά κάθε μία από τις παραπάνω τρεις κατηγορίες. Δηλαδή,

*A. Ενεργός – ενεργητικός ηλιοστάτης:* Οι ενεργοί ιχνηλάτες κάνουν χρήση κινητήρων και γραναζιών για να κατευθυνθούν προς τον ήλιο ύστερα από εντολή ενός ελεγκτή αισθητήρα.

*B. Παθητικός ηλιοστάτης:* Οι παθητικοί ηλιοστάτες χρησιμοποιούν ένα συμπυκνωμένο ρευστό με χαμηλό σημείο βρασμού για το σωστό προσανατολισμό των φωτοβολταϊκών. Η ηλιακή θερμότητα δημιουργεί αύξηση της πίεσης στο χώρο του ρευστού με αποτέλεσμα τη μετατόπιση του συστήματος μέχρι να αποκατασταθεί ξανά η ισορροπία. Καθώς ο ήλιος κινείται ο ηλιοστάτης μετατοπίζεται κατά 15° (μοίρες) την ώρα αναζητώντας το σωστό σημείο ισορροπίας. Αυτός είναι ένας μη ακριβής τρόπος κίνησης του ηλιοστάτη.

*C. Χρονολογικός ηλιοστάτης:* Ο χρονολογικός ηλιοστάτης αλληλεπιδρά με την περιστροφή της γης, καθώς στρέφεται μαζί με τη γη αλλά σε αντίθετη φορά. Για την ακρίβεια ο ρυθμός περιστροφής του δεν είναι ίδιος με της γης. Ο χρονολογικός ιχνηλάτης είναι ένας αρκετά ακριβής ιχνηλάτης, ειδικά όταν έχει πολική τοποθέτηση.

## 5.3 Δομή του ηλιοστάτη – ιχνηλάτη (tracker)

Είναι σύνηθες ο ηλιοστάτης να αποτελείται από τρία (3) βασικά τμήματα:

- Την βάση
- Τον κορμό, και
- Το πλαίσιο, πάνω στο οποίο στηρίζονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Υπάρχουν βέβαια και άλλα συστήματα πιο πολύπλοκα, όπου ο πρωταρχικός τους σκοπός είναι να εξοικονομήσουν πρώτες ύλες και μηχανισμούς καθώς και να μειώσουν το ύψος και μέγεθος της κατασκευής.

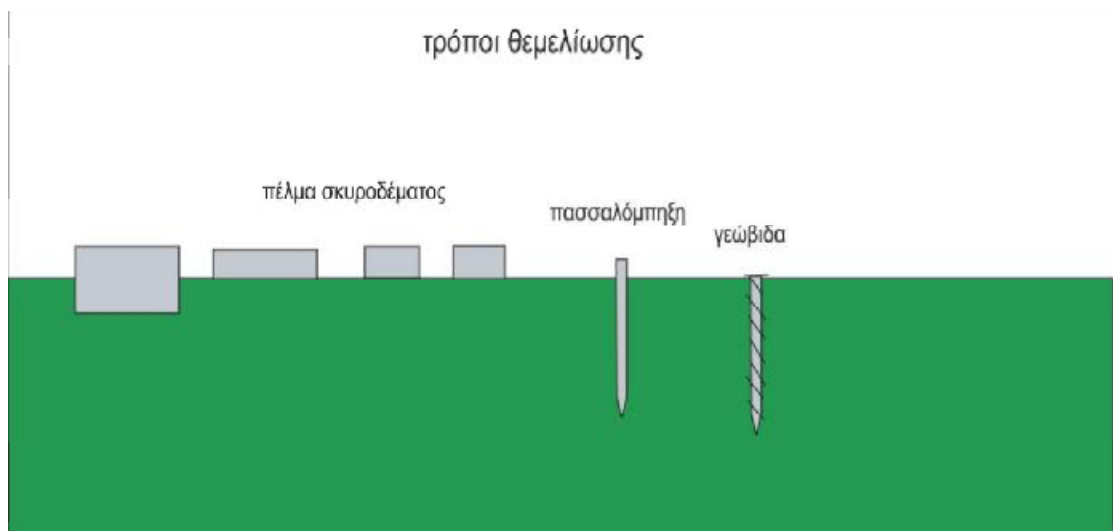
### 5.3.1 Θεμελίωση του ηλιοστάτη

Όταν λέμε θεμελίωση του ηλιοστάτη εννοούμε την κατασκευή που δημιουργείται για τη στήριξη του κορμού του στο έδαφος.

Οι βάσεις για την θεμελίωση των ηλιοστατών είναι συνήθως κατασκευασμένες από οπλισμένο σκυρόδεμα. Αυτές οι βάσεις μπορεί να βρίσκονται μέσα στο έδαφος ή να προεξέχουν του εδάφους, Ένα άλλο είδος βάσης που χρησιμοποιείται είναι ο πάσσαλος με ελικοειδές σπείρωμα στην επιφάνεια ( ή αλλιώς γεωβίδα), ο οποίος βιδώνεται στο έδαφος καθώς και ο απλός πάσσαλος που τοποθετείται με πασσαλόμπηξη.

Οπότε, όπως φαίνεται και παρακάτω σχήμα 5.1, συνοπτικά οι τρόποι θεμελίωσης είναι η εξής:

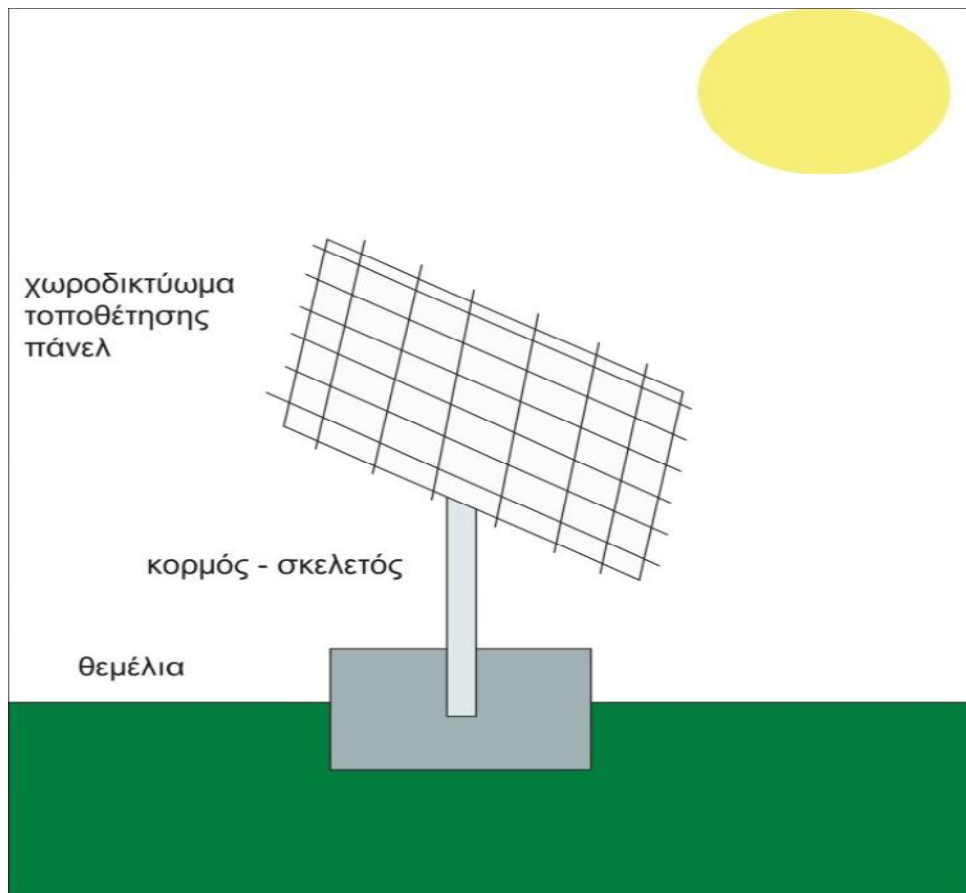
- Πασσαλόμπηξη
- Βίδα θεμελίωσης
- Μπετόμπηξη
- Βάση σκυροδέματος



Σχήμα 5.1. Τρόποι θεμελίωσης ηλιοστάτη – ιχνηλάτη (tracker)

Θεωρείται απαραίτητο και συνάμα απόλυτα λογικό, τα θεμέλια των πάνελ – ιχνηλατών (tracker) πρέπει να είναι σχεδιασμένα ώστε να αντέχουν τις μέγιστες ανεμοπιέσεις στην εκάστοτε περιοχή με έναν λογικό συντελεστή

ασφαλείας. Όσο μεγαλύτερη η επιφάνεια του πάνελ και η γωνία του ως προς το οριζόντιο επίπεδο τόσο μεγαλύτερες δυνάμεις αναπτύσσονται.



Σχήμα 5.2. Θεμελίωση πάνελ

### 5.3.2 Κορμός – σκελετός ηλιοστάτη.

Με τον όρο κορμό ορίζουμε την κατασκευή πάνω στην οποία στηρίζεται το πλαίσιο τοποθέτησης των πάνελ. Υπάρχουν διάφορα είδη κορμών που κυκλοφορούν στην αγορά όπως, ο κυλινδρικός κορμός, ο κορμός σε σχήμα τριπόδου και ο κορμός σε σχήμα V.

Ο κορμός είναι κατασκευασμένος συνήθως από εν θερμώ γαλβανισμένο ατσάλι, αλουμίνιο ή ενισχυμένο σκυρόδεμα. Σε πολλούς ιχνηλάτες ο κορμός παίρνει και ο ίδιος μέρος στην περιστροφική κίνηση του ιχνηλάτη. Αυτό δεν ισχύει για τους κορμούς από ενισχυμένο σκυρόδεμα. Άλλες φορές ο κορμός μένει ακίνητος και οι κινήσεις γίνονται όλες πάνω στο πλαίσιο στήριξης των φωτοβολταϊκών πάνελ. Ο κορμός πολλές φορές φέρει πάνω του και άλλα στοιχεία του συστήματος όπως κινητήρες, inverters, αποσβεστήρες, ηλεκτρικούς πίνακες, PLC και καλωδιώσεις.

### 5.3.3 Πλαίσιο

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ τοποθετούνται και στηρίζονται επάνω στο πλαίσιο. Κάθετοι και οριζόντιοι μεταλλικοί δοκοί που δημιουργούν ένα δικτύωμα αποτελούν το πλαίσιο, πάνω στο οποίο αγκιστρώνονται ή βιδώνονται τα πάνελ. Το πλαίσιο δέχεται συνήθως όλων των ειδών τα πάνελ (μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά). Μπορεί να είναι κατασκευασμένο από εν θερμώ γαλβανισμένο ατσάλι ή αλουμίνιο. Το πλαίσιο – χωροδικτύωμα πρέπει να είναι στιβαρό ώστε να αντέχει στις ανεμοπιέσεις και να μην ταλαντώνεται.

#### 5.4 Στοιχεία – μέρη του ηλιοστάτη (solar tracker)

- § *Αλγόριθμος εντοπισμού ηλίου:* Υπολογίζει τις ηλιακές γωνίες του ήλιου. Αυτές οι γωνίες χρησιμοποιούνται για να κατευθύνουν το πάνελ απευθείας στον ήλιο. Μερικοί αλγόριθμοι είναι καθαρά μαθηματικά βασισμένοι σε αστρονομικές αναφορές ενώ άλλοι χρησιμοποιούν πραγματικού χρόνου αναγνώσεις εντάσεως φωτός.
- § *Μονάδα ελέγχου:* Εκτελεί τον αλγόριθμο εντοπισμού και συντονίζει την κίνηση του συστήματος τοποθέτησης του πάνελ.
- § *Σύστημα τοποθέτησης:* Μετακινεί το πάνελ προς τον ήλιο στις βέλτιστες γωνίες. Κάποια συστήματα τοποθέτησης είναι ηλεκτρικά και κάποια υδραυλικά. Τα ηλεκτρικά συστήματα χρησιμοποιούν κωδικοποιητές και συστήματα ελέγχου περιστροφής κινητήρα ή γραμμικούς ενεργοποιητές για να ελέγχουν την τρέχουσα θέση του πάνελ και να το μετακινούν στις επιθυμητές θέσεις.
- § *Μηχανισμός κίνησης – μετάδοσης:* Ο μηχανισμός κίνησης περιλαμβάνει γραμμικούς ενεργοποιητές, γραμμικούς οδηγούς, υδραυλικούς κυλίνδρους, περιστροφικούς οδηγούς, ατέρμονες κοχλίες, πλανητικό σύστημα γραναζιών και άξονες με σπείρωμα.
- § *Γραμμικοί ενεργοποιητές – κινητήρες:* Ο γραμμικός ενεργοποιητής είναι ένα είδος μοτέρ που χρησιμοποιείται σε συστήματα ιχνηλατών (tracker) για φωτοβολταϊκά πάρκα. Υπάρχουν διάφορα μοντέλα και μήκη ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Είναι κατασκευασμένα από ανθεκτικά και αντιοξειδωτικά υλικά και διατίθενται μαζί με καλύμματα καουτσούκ για προστασία από την υγρασία και τη βροχή.
- § *Στατικό φορτίο γραμμικού ενεργοποιητή:* Οι γραμμικοί ενεργοποιητές μπορούν να έχουν την ικανότητα της στατικής φόρτωσης, δηλαδή όταν τελειώνει η κίνηση του κινητήρα ο ενεργοποιητής ουσιαστικά κλειδώνει στο σημείο και έχει την



ικανότητα να στηρίξει το φορτίο που είτε τραβά, είτε ωθεί. Η δύναμη φρεναρίσματος του ενεργοποιητή ποικίλει ανάλογα με την γωνιακή κλίση και το συγκεκριμένο σχέδιο του σπειρώματος. Οι ακμές των σπειρωμάτων έχουν μια πολύ υψηλή στατική χωρητικότητα φορτίων, ενώ οι σφαιρικοί κοχλίες έχουν εξαιρετικά χαμηλή χωρητικότητα φορτίων.

- § *Μηχανισμοί οριοθέτησης κίνησης του ιχνηλάτη (tracker):* Ελέγχουν την ταχύτητα κίνησης του ιχνηλάτη (tracker) και αποτρέπουν την παραπάνω κίνηση του. Επιπλέον, προστατεύουν τον tracker από ζημιές. Η ανατροφοδότηση της ανύψωσης επιτυγχάνεται είτε με συνδυασμό μηχανισμών οριοθέτησης και motor encoder counts, ή με αισθητήρα που παρέχει τη γωνία κλίσης.

## 5.5 Λειτουργία και τοποθέτηση

Ο άνεμος αποτελεί ίσως τον μοναδικό εχθρό των ηλιοτροπίων. Λόγω των κινούμενων μερών παρουσιάζεται ο κίνδυνος καταστροφής τους από δυνατό άνεμο. Οπότε κατά την τοποθέτηση τους πρέπει να προβλέπεται κατάλληλη στερέωση. Σε αρκετές περιπτώσεις γίνεται χρήση ανεμομέτρου έτσι ώστε σε περίπτωση ισχυρών ανέμων το ηλιοτρόπιο να βρίσκεται σε οριζόντια θέση (για ηλιοτρόπια δύο αξόνων) ή σε θέση όπου παρουσιάζεται η μικρότερη μετώπη με τον αέρα. Η θέση αυτή, κατά κανόνα, είναι η νότια θέση αναφοράς. Σε αυτή τη θέση βρίσκεται και κατά τη διάρκεια την νύχτας.

Για τα ηλιοτρόπια η θέση αναφοράς είναι ο αληθής νότος (για τα ηλιοτρόπια δύο αξόνων εκτός από τον αληθή νότο, ορίζουμε και μια γωνία αναφοράς π.χ.  $20^\circ$ ). Οπότε, για την αποφυγή σφαλμάτων κατά την λειτουργία της συσκευής, κατά την τοποθέτηση πρέπει να προσδιοριστεί σωστά ο νότος. Σε ηλιοτρόπια που ελέγχονται μέσω υπολογιστή πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή. Διότι σε περίπτωση λανθασμένου προσανατολισμού θα υπάρχει μειωμένη απόδοση κατά την λειτουργία, λόγω του ότι ο προσανατολισμός αποτελεί το σημείο αναφοράς για τον υπολογισμό της κατάλληλης γωνίας. Ο προσδιορισμός του αληθούς νότου μπορεί να γίνει με ηλεκτρονικά όργανα (GPS), με μαγνητική ή γυροσκοπική ή ηλεκτρονική πυξίδα και με προσδιορισμό του ηλιακού μεσημερίου.

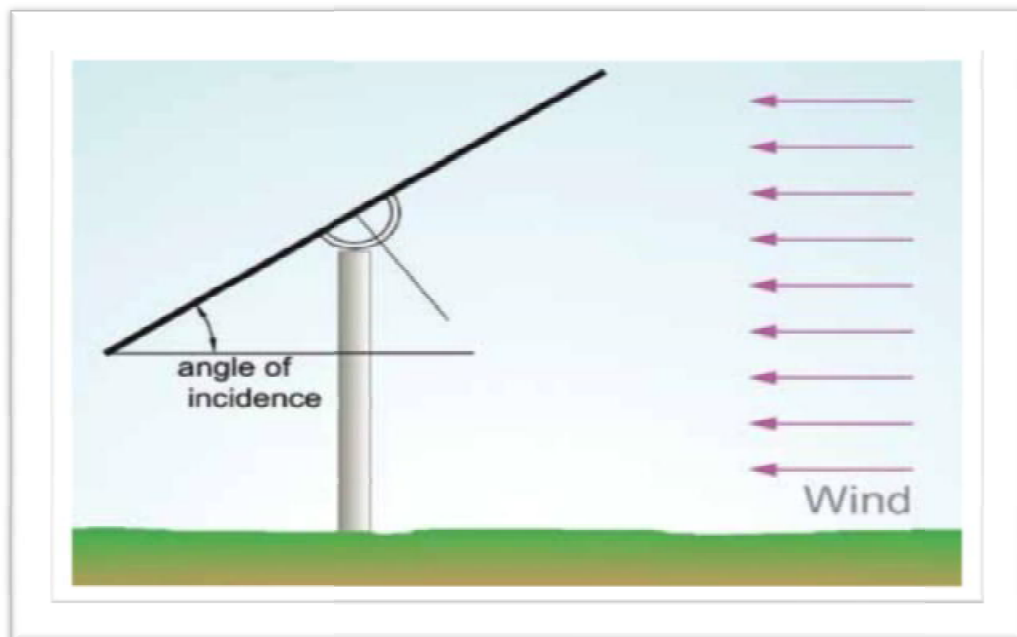
Από τη θέση αναφοράς γίνεται ο υπολογισμός της θέσης στην οποία πρέπει να βρίσκεται το ηλιοτρόπιο κατά την ανατολή για να ξεκινήσει η παρακολούθηση του ηλίου. Για να αντιληφθεί το σύστημα την θέση αναφοράς χρησιμοποιείται διακόπτης ο οποίος ενεργοποιείται με την κίνηση του ηλιοτροπίου. Διακόπτες τοποθετούνται επίσης στις οριακές

θέσεις που παίρνει το σύστημα, για την προστασία του, διότι κατά την λειτουργία του μπορεί να παρουσιαστεί βλάβη και να κινηθεί πέρα από τα όρια του. Αυτό το φαινόμενο παρουσιάζεται συχνά στην περίπτωση του ελέγχου μέσω αισθητήρων φωτός, λόγω των ανακλώμενων ακτίνων.

Ο προσδιορισμός της σωστής γωνίας του συλλέκτη γίνεται με αισθητήρες θέσης ή περιστροφής (encoders). Υπάρχουν αρκετά είδη αισθητήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις ανάγκες μας. Κατατάσσονται σε κατηγορίες ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους: οπτικοί, μαγνητικοί και ηλεκτρικής τάσης (δηλ. ποτενσιόμετρα). Τελευταία έχουν εμφανιστεί αισθητήρες οι οποίοι αντιλαμβάνονται την αλλαγή του μαγνητικού πεδίου της γης όταν αλλάζουν θέση. Μεγάλο πλεονέκτημα είναι η υψηλή ευαισθησία και η ακρίβεια των συγκεκριμένων αισθητήρων ενώ μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος αγοράς και η επίδραση τους με χαλύβδινα αντικείμενα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται στην κατασκευή υλικά από ανοξείδωτο χάλυβα και αλουμίνιο.

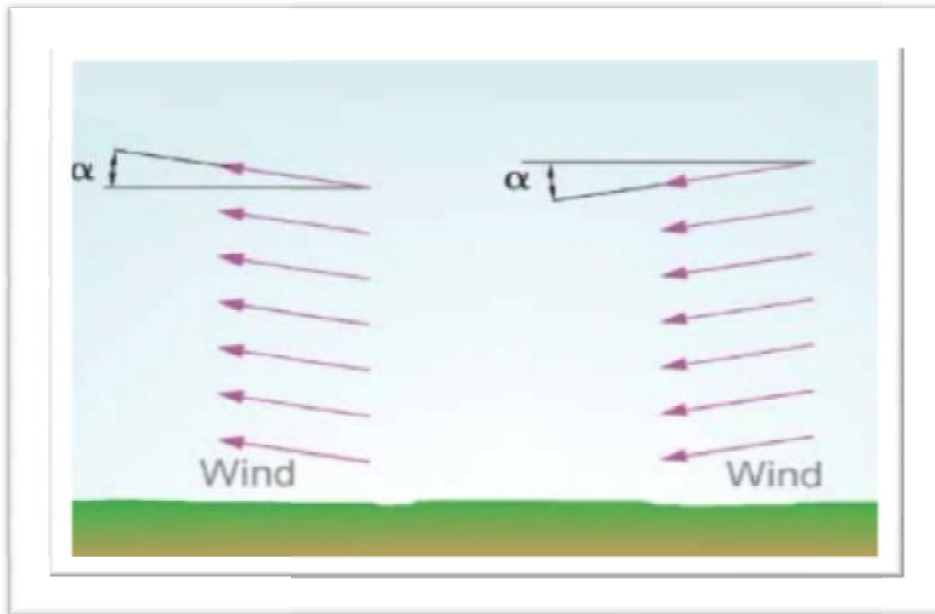
### 5.6 Επίδραση του ανέμου στον ηλιοστάτη

Η δομή στήριξης των ηλιοστατών (solar trackers) και τα πλαίσια στήριξης των πάνελ συνεχίζουν να υφίστανται τις συνέπιες των φορτίων αέρα που επέρχονται στον ηλιοστάτη, ακόμα και όταν το πλαίσιο βρίσκεται σε οριζόντια θέση. Τα φορτία ανέμου μπορούν να δημιουργήσουν δυναμικά αποτελέσματα ώστε να ενισχύσουν τα υπάρχοντα βάρη. Αυτό το λάθος οφείλεται στο γεγονός ότι η κατασκευή δεν έχει επαρκή αντοχή στα ενισχυμένα φαινόμενα και η επιβίωση του ηλιοστάτη (solar tracker) βασίζεται στην οριζόντια τοποθέτηση του πάνελ ως μόνος τρόπος άμυνας.



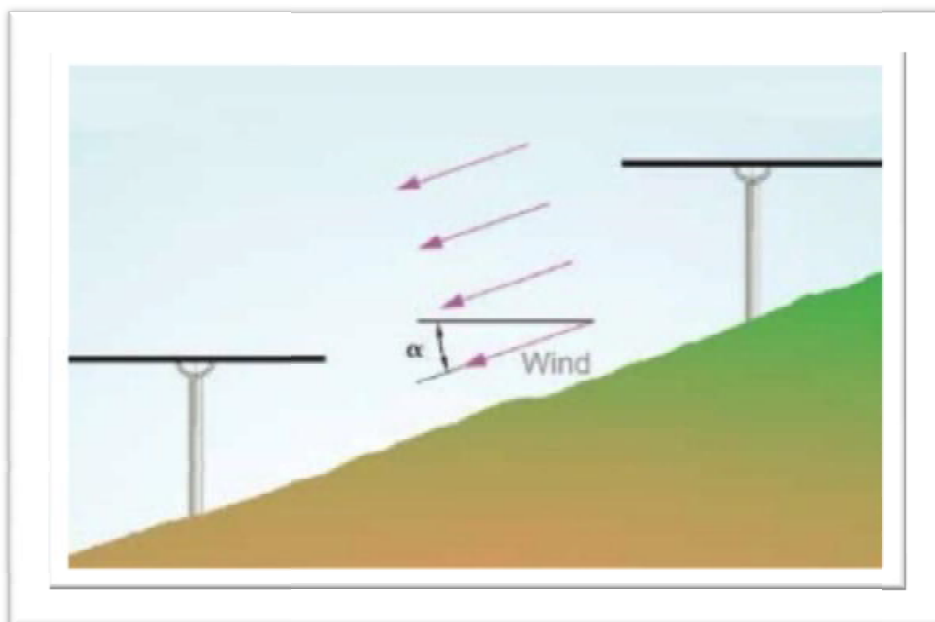
Σχήμα 5.3. Η επίδραση του ανέμου στον ηλιοστάτη (solar tracker).

Η επίδραση του ανέμου σε ένα ελεύθερο επίπεδο εξαρτάται από τη γωνία που σχηματίζεται από τον άνεμο και το επίπεδο, όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 5.4 .



Σχήμα 5.4. Η επίδραση του ανέμου σε ένα ελεύθερο επίπεδο.

Από το παραπάνω σχήμα 5.4 παρατηρούμε ότι η επίδραση του ανέμου μπορεί να είναι ομοιόμορφη και μπορεί να έχει μια ποικίλη επίδραση στην κορυφή ή στη βάση του ηλιοστάτη (solar tracker) δημιουργώντας δυσαναλογία. Ο βαθμός αυτής της δυσαναλογίας παραμένει στο μηδέν στα κάθετα επίπεδα και αυξάνει όταν η γωνία πλησιάζει οριζόντια.



Σχήμα 5.5. Η επίδραση του ανέμου σε κεκλιμένο έδαφος.

Δεδομένης της μεταβλητότητας των χαρακτηριστικών του ανέμου στην ανάλυση που ακολουθεί, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ο χαρακτηριστικός άξονας δεν θα είναι πάντα παράλληλος με το έδαφος, αλλά τείνει να κυμαίνεται από  $-10^\circ$  στις  $+10^\circ$  (μοίρες) παίρνοντας το παράλληλο επίπεδο του εδάφους σαν οδηγό (βλέπε παραπάνω σχήμα 5.5). Επίσης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη πως όλα τα εδάφη δεν είναι επίπεδα, σε πολλές περιπτώσεις το πλαίσιο είναι παράλληλο με το έδαφος ενώ ο άνεμος δεν είναι. Σε αυτή την περίπτωση η οριζόντια δεν είναι παράλληλη στο έδαφος. Επιπροσθέτως, πολλά μοναδικά στοιχεία πρέπει να ληφθούν υπόψη όπως το κάτω μέρος του αναχώματος, το κάτω μέρος μιας κοιλάδας, εμπόδια καθώς και άλλα που μπορούν να αλλάξουν την κατεύθυνση και ως εκ τούτου και την γωνία προσβολής του ανέμου.

### 5.7 Θέση οριζοντίωσης – στοίβαξης (θέση προστασίας)

Η θεωρητική επεξήγηση της θέσης οριζοντίωσης είναι ότι η επίδραση του αέρα σε ένα παράλληλο επίπεδο είναι μηδενική και η λογική εφαρμογή του πλαισίου βρίσκεται σε οριζόντια θέση. Όμως, λόγω του ότι η κατεύθυνση του ανέμου δεν είναι πάντα οριζόντια, υπάρχουν κάποια προβλήματα κατά την οριζοντίωση των πλαισίων. Είναι ξεκάθαρο πως η επίδραση του ανέμου απέχει πολύ από το μηδέν όταν το πλαίσιο που φέρει τα πάνελ είναι σε οριζόντια θέση. Η συνδυασμένη επίδραση του ανέμου βρίσκεται σε μία συνολική γωνία που συνυπολογίζει την προκύπτουσα μεταβλητή γωνία της ριπής του αέρα, την γωνία που αντιστοιχεί στην κλίση του εδάφους και τη γωνία που προκαλείται από την επίδραση μεμονωμένων στοιχείων της κάθε περίπτωσης. Η τοποθέτηση του πλαισίου σε οριζόντια θέση είναι θεωρητικά ασφαλής και υπάγεται συνήθως σε μία γωνία μεταξύ των 20 και των 30 μοιρών.

### 5.8 Η επίδραση του βάρους των φωτοβολταϊκών στοιχείων



Σχήμα 5.6. Η επίδραση του βάρους των φ/β στοιχείων.

Σε ένα οριζόντια εγκατεστημένο πλαίσιο, το ίδιο βάρος των πάνελ όπως και της ίδιας της κατασκευής στήριξης συνδυάζουν και ενισχύουν την επίδραση του αέρα που το διαπερνά. Εάν το πλαίσιο βρίσκεται σε μια πιο κάθετη θέση, το βάρος των πάνελ δεν δημιουργεί κάποιο πρόβλημα καθώς το πλαίσιο έχει μεγαλύτερη αντίσταση στον αέρα σε αυτό το επίπεδο. Αντίθετα, τα αποτελέσματα των δυνάμεων που είναι κάθετες στο επίπεδο όταν το πλαίσιο βρίσκεται σε οριζόντια θέση, μπορούν να οδηγήσουν σε εγκάρσια κάμψη, κάτι που θα μπορούσε να δημιουργήσει σοβαρό πρόβλημα. Ο άνεμος είναι ένα δυναμικό φορτίο που συνήθως μελετάται ως σταθερό για να γίνεται ευκολότερη η ανάλυση. Αυτή η απλούστευση ισχύει μόνο για κατασκευές υψηλής ακαμψίας, αλλά δεν αντιπροσωπεύει τα κύρια χαρακτηριστικά των στοιχείων σε εγκάρσια επίπεδα.

### **5.9 Κατώτερη δομή του ηλιοστάτη**

Ως κατώτερη δομή (κορμός – σκελετός) ενός ηλιοστάτη (solar tracker) έχει χαρακτηριστεί ως η δομή μεταξύ του πλαισίου και του εδάφους, και είναι καταλληλότερη να έχει οριζόντια στηρίγματα σε σημεία έτσι ώστε να δέχεται μικρότερες εντάσεις η κάτω δομή. Αντίθετα, όταν το πλαίσιο είναι σε θέση να πλησιάζει την οριζόντια θέση εκτίθεται σε φορτία που φτάνουν το 144% της μέγιστης τιμής που αποκτά στην οριζόντια ή κοντά στην οριζόντια θέση. Έχοντας ως γνώμονα τα παραπάνω, η πιο αυστηρή προσέγγιση στον σωστό σχεδιασμό και κατασκευή ενός ηλιοστάτη (solar tracker) για μια αναμενόμενη διάρκεια ζωής 25 με 30 χρόνια πρέπει να λαμβάνει υπόψη το κάτω μέρος της κατασκευής. Τα κατώτερα στηρίγματα είναι απαραίτητο να κατασκευάζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αντέχουν τον άνεμο έχοντας το πλαίσιο των πάνελ σε κάθετη θέση και να μπορούν να αντέχουν τα ανομοιογενή φορτία αέρα, καθώς και το βάρος της ίδιας της κάτω κατασκευής και των πάνελ. Υπάρχουν μερικοί ηλιοστάτες (solar trackers) που δεν έχουν την δυνατότητα να φτάσουν σε κάθετη θέση, ένα σοβαρό ελάττωμα που εμποδίζει την πλήρη παρακολούθηση του ήλιου και σαν αποτέλεσμα έχει χαμηλές οικονομικές απολαβές.

## 6. ΜΕΛΕΤΗ ΣΕ ΑΝΤΟΧΗ ΗΛΙΟΣΤΑΤΗ (Solar Tracker) ΔΥΟ ΑΞΟΝΩΝ.

### 6.1 Εισαγωγή

Οι κατασκευές του συστήματος προσανατολισμού ή αλλιώς παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου, υπόκεινται στους παρακάτω δύο τρόπους φόρτισης:

- § Δύναμη που οφείλεται στην πίεση που ασκεί η κίνηση του αέρα
- § Βάρος των διαφόρων εξαρτημάτων που αποτελούν την κατασκευή.

Οι ροπές και εντάσεις που οφείλονται στην κίνηση του αέρα είναι οι πιο σημαντικές. Για να αποφύγουμε πιθανότητα ζημίας στις επιφάνειες των πάνελ και στις φέρουσες δομές το σύστημα είναι εφοδιασμένο με ένα μηχανισμό προστασίας με τις ακόλουθες λειτουργίες:

- Όταν η ταχύτητα του αέρα ξεπερνά τα 60 Km/h, ένας αισθητήρας (ανεμόμετρο) στέλνει ένα σήμα συναγερμού στο PLC χειρισμού. Το PLC ενεργοποιεί τον γραμμικό μηχανισμό κίνησης που ρυθμίζει-περιστρέφει τις επιφάνειες των πάνελ σε οριζόντια θέση, έτσι ώστε να ελαχιστοποιεί την δύναμη που το σύστημα δέχεται από την πίεση του αέρα. Το σύστημα μπορεί να συνοδεύεται και από δεύτερο αισθητήρας για μέγιστη ασφάλεια.

Οι υπολογισμοί επαλήθευσης που έγιναν, με κριτήριο την μεγαλύτερη ασφάλεια, υποθέτουν την χειρότερη περίπτωση, έτσι υποθέτουμε:

- Ø Ταχύτητα αέρα  $V=80$  Km/h (παράδειγμα αναπάντεχη ριπή του αέρα) που επιβεβαιώνει την αρχή της τοποθέτησης με ασφάλεια των φωτοβολταϊκών επιφανειών και ως εκ τούτου την maximum έκθεση του αέρα.

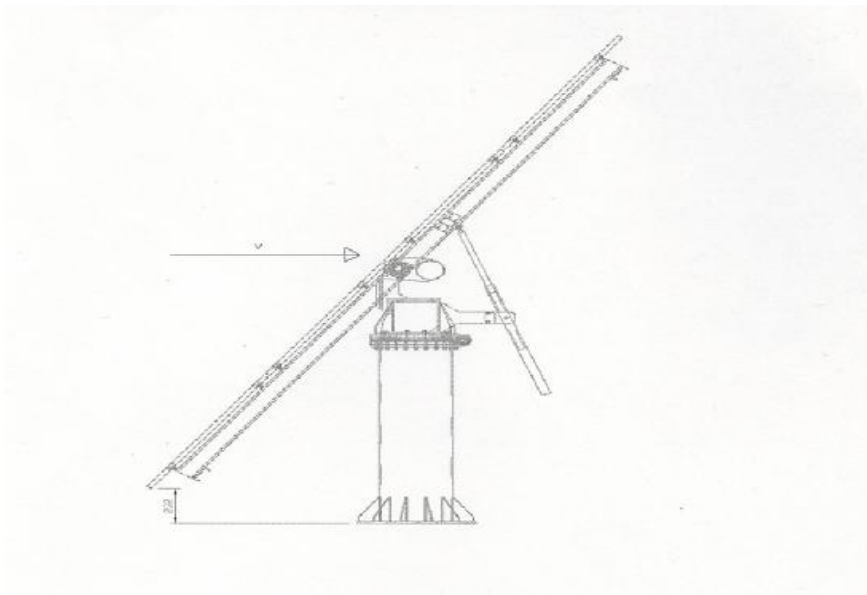
Είναι δε εμφανής η υπέρ-διαστασιολόγηση της κατασκευής με ιδανικά φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή  $V=30-60$  Km/h.

### 6.2 Καθορισμός ταχύτητας περιστροφής του συστήματος

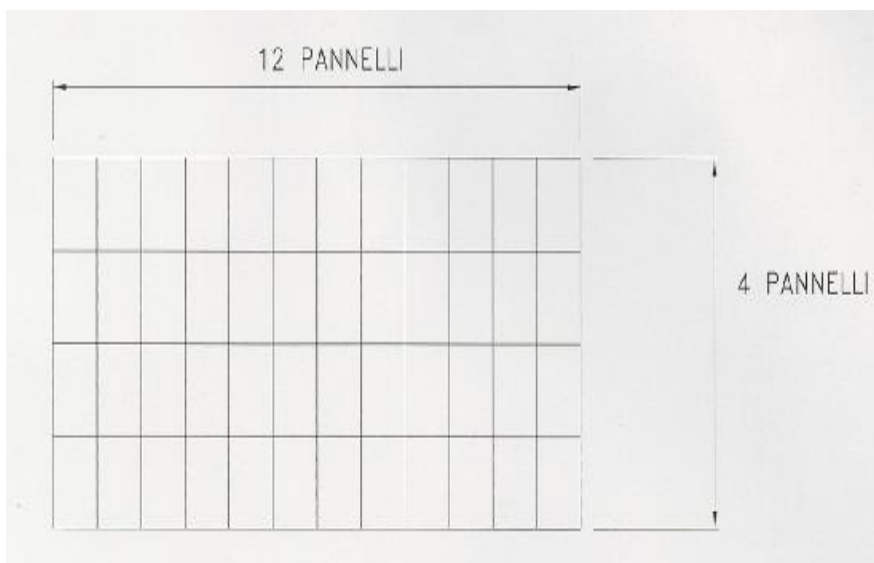
- i. Θεωρούμε ελάχιστο χρόνο ανά ημέρα 10 ώρες
- ii. Θεωρούμε μέγιστο χρόνο λειτουργίας ανά ημέρα 14 ώρες άρα μέσο όρο λειτουργίας 12 ώρες
- iii. Θεωρούμε επιθυμητή αναπροσαρμογή της γωνίας του αζιμούθιου κάθε 5 λεπτά ήτοι 12 κινήσεις ανά ώρα. Έτσι έχουμε  $12 \cdot 12 = 144$  κινήσεις ανά ημέρα.

- iv. Μέγιστη περιστροφή 270 μοίρες άρα  $270^{\circ}/144=1,875^{\circ}$  (μοίρες) ανά κίνηση
- v. Υποθέτουν μία ταχύτητα 0,05 rpm και προκύπτει χρόνος λειτουργίας  $T = (0,0052/0,05)*60 = 6,25$  (sec/κίνηση).  
Εύρεση του χρόνου λειτουργίας του μηχανισμού περιστροφής (tracker) δηλ:  $6,25/ [(60*5)-6,25] = 0,021$  . Το αποτέλεσμα μεταφράζεται σε λειτουργία του μηχανισμού περιστροφής μόνο κατά 2% του συνολικού χρόνου λειτουργίας του tracker.

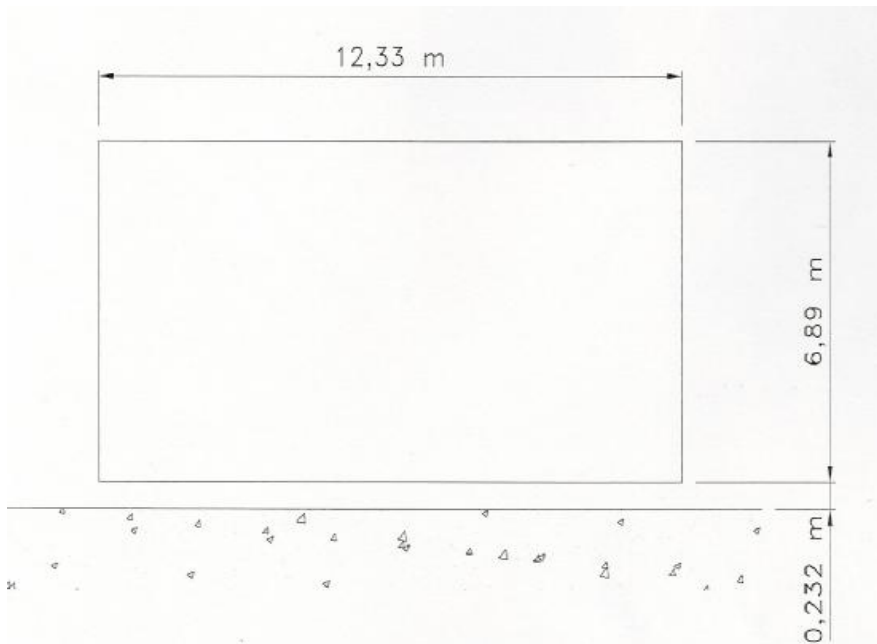
### 6.3 Υπολογισμός δυναμικής πίεσης αέρα σύμφωνα με τον κανονισμό της Ε.Ε



Σχήμα 6.1. Υποθετική διεύθυνση της δυναμικής πίεσης του αέρα πάνω στο φ/β σύστημα αναφοράς.



Σχήμα 6.2. Διάταξη των φ/β στοιχείων στο πάνελ αναφοράς.



Σχήμα 6.3 Διαστασιολόγηση του φ/β πάνελ στο πάνελ αναφοράς.

Υποθετική ταχύτητα ανέμου  $V_{b(considerata)}=22,2\text{m/sec}=80\text{km/h}$  δηλαδή περίπου 9 beau fort. Θεωρούμε ότι δεν υπάρχει κανένας συντελεστής βελτίωσης ή επιδείνωσης και λαμβάνουμε τους παρακάτω συντελεστές που προτείνει ο κανονισμός:

$$\emptyset C_{air} = 1$$

$$\emptyset C_{season} = 1$$

Έτσι έχουμε,

$$V_b = V_{b\text{ con}} * C_{air} * C_{season} = 22,1 * 1 * 1 \left(\frac{m}{sec}\right) = 22,2 \left(\frac{m}{sec}\right) \cong 80\text{km}$$

Στην συνέχεια, υπολογίζουμε την μέση ταχύτητα του αέρα στον άξονα Z [Vm(z)] πάνω από το έδαφος, δηλαδή:

$V_{m(z)} = V_b * Co(z) * Cr(z)$  , όπου  $Co(z)=1$  είναι ο συντελεστής ανάγλυφου για επίπεδο έδαφος βάσει του κανονισμού (για έδαφος σχεδόν επίπεδο χωρίς ανωμαλίες που να μπορούν να επιταχύνουν τον αέρα που χτυπάει την κατασκευή) και όπου  $Cr(z)=(\text{συντελεστής τραχύτητας})$  που υπολογίζεται  $Z=(\text{μέγιστο ύψος της κατασκευής από το έδαφος})=6,49\text{m}$ .

Υποθέτουμε ότι ο χώρος που τοποθετείτε η κατασκευή είναι περιοχή με χαμηλή βλάστηση, λιβάδι, αγροτική περιοχή με απομονωμένα εμπόδια και με απόσταση τουλάχιστον 20 φορές το ύψος τους. Έχοντας σαν δεδομένα τα εξής :



$$\emptyset Z_0 = 0,05 \text{ m}$$

$$\emptyset Z_{\min} = 2 \text{ m}$$

Όπου ισχύει η παρακάτω συνθήκη:

$$Z_{\min} \leq Z \leq Z_{\max}, \text{ όπου } Z_{\max} = 200 \text{ m.}$$

Έτσι για την περίπτωση που εξετάζουμε έχουμε ότι,

$$2\text{m} \leq 6,49\text{m} \leq 200\text{m}, \text{ άρα } \underline{\text{αληθής}}.$$

Επίσης πρέπει να εφαρμόσουμε την σχέση:

$$Cr_{(z)} = Kr * \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) \quad (1), \text{ και } Kr = 0,19 * \left(\frac{Z_0}{Z_{02}}\right)^{0,07} \quad (2)$$

Όπου  $Z_{02} = 0,05$  (βάσει του κανονισμού περί αναγλύφου), άρα

Από σχέση (2) έχουμε:

$$Kr = 0,19 * \left(\frac{0,05}{0,05}\right)^{0,07} = 0,19, \text{ οπότε η σχέση (1) γίνεται:}$$

$Cr_{(z)} = 0,19 * \ln\left(\frac{6,49}{0,05}\right) = 0,92$ , έτσι η μέση ταχύτητα  $V_m$  του αέρα στη διάσταση  $Z=6,49\text{m}$  είναι:

$$Vm_{(z)} = Vb * Co_{(z)} * Cr_{(z)} \Rightarrow Vm_{(z)} = 22,2 \left(\frac{\text{m}}{\text{sec}}\right) * 1 * 0,92 = 20,4 \left(\frac{\text{m}}{\text{sec}}\right)$$

Τιμή αποκορύφωσης της δυναμικής πίεσης( $Qp_{(z)}$ ):

$$Q_b = \frac{1}{2} * \rho * (V^2)m(z) = 260 \text{ N/m}^2$$

$$Qp_{(z)} = Q_b * Ce_{(z)} = \frac{1}{2} * \rho * V^2m(z) = \left(\frac{1}{2} * 1,25 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) * V_b^2\right) * Ce_{(z)},$$

Όπου  $Ce_{(z)}$  = συντελεστής έκθεσης δεδομένου(στοιχείου) από την ταμπέλα σε σχέση με το ύψος από το έδαφος και από την κατηγορία του οικοπέδου:

$$\emptyset \text{ Ύψος από το έδαφος} = 6,49 \text{ (m)}$$

$$\emptyset P = 1,25 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$\emptyset Ce_{(z)} \sim 2,05$$

$$\text{Άρα, } Qp_{(z)} = 260 \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right) * 2,05 = 533 \text{ N/m}^2$$

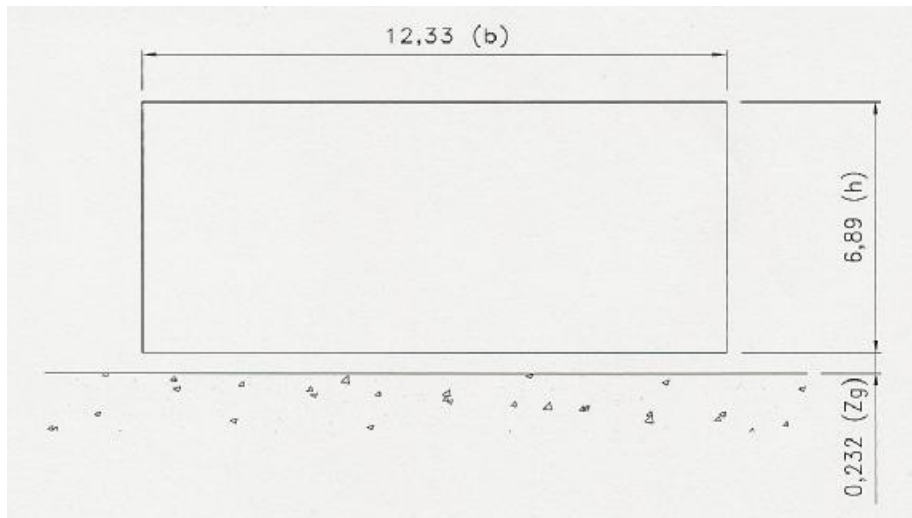
Πίεση αέρα στην επιφάνεια ( $We$ ):

$$\emptyset \text{ Όπου } Cr = \text{συντελεστής πίεσης}$$

$$\emptyset Qp_{(z)} = 533 \text{ N/m}^2$$

$$\emptyset We = Qp_{(z)} * Cp$$

Θεωρώντας τις απεικονιζόμενες στο παρακάτω σχήμα 6.4 γεωγραφικές διαστάσεις:



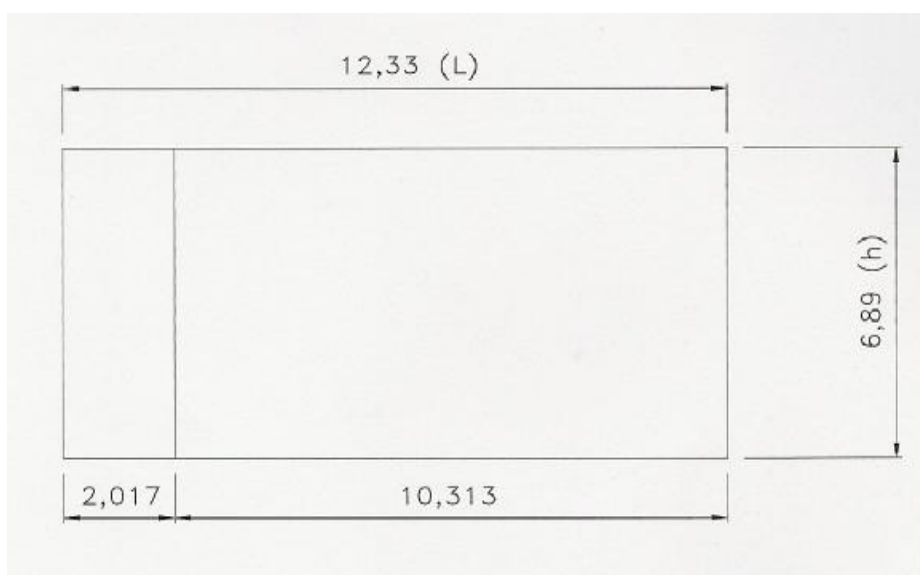
Σχήμα 6.4. Γεωγραφικές διαστάσεις

Πρέπει,

$$Zg = 0,232 < \frac{h}{4} = \frac{6,89}{4} \quad \text{και} \quad \frac{b}{h} = \frac{12,33}{6,89} > 1$$

Για τον υπολογισμό του  $Cp$  πρέπει να εφαρμόσουμε την μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για τα τοιχώματα και τα παραπέτα.

Τα δεδομένα που έχουμε είναι ότι  $l=12,33\text{m}$  και  $h=6,89\text{m}$ .



Σχήμα 6.5. Γεωγραφικές διαστάσεις

$$l=12,33(\text{m}) \leq 2 \cdot h(\text{m}) =13,78 (\text{m})$$

Όντας επιβεβαιωμένη η συνθήκη και όντας γωνία επιστροφής (κατασκευή δισδιάστατη) και έχοντας συντελεστή εγκυροτητας=1 επειδή είναι επίπεδη επιφάνεια και γεμάτη επιφάνεια:

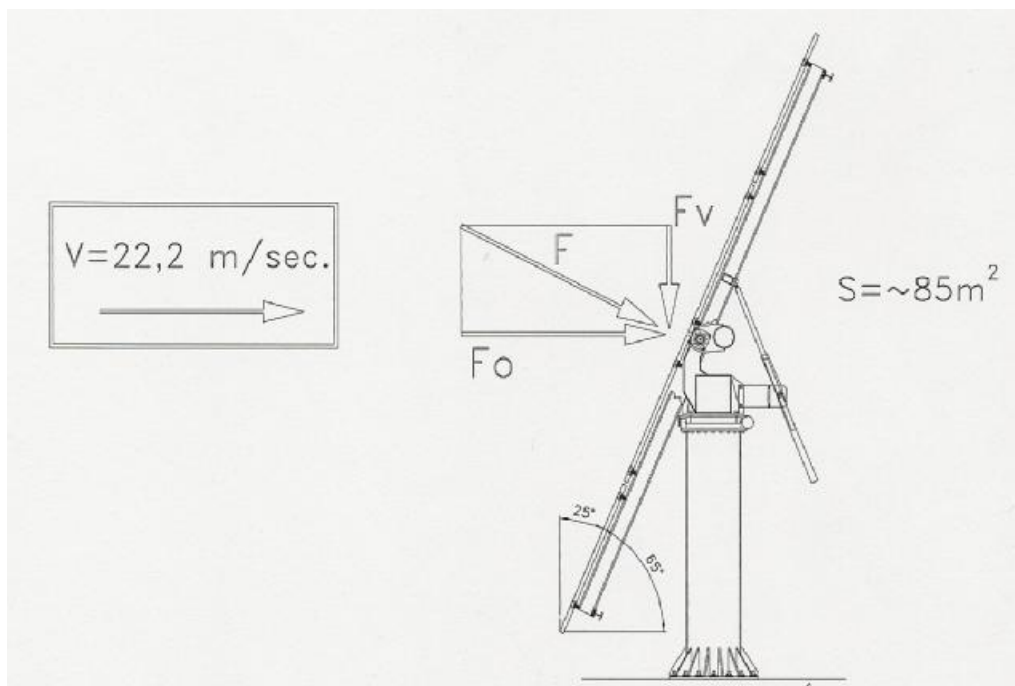
- Ø Ισχύει η συνθήκη όπου για μια περιοχή  $A=0,3 \cdot h \cdot h=0,3 \cdot 6,89(\text{m}) \cdot 6,89(\text{m})=14,24(\text{m}^2)$
- Ø τιμή  $C_p=2,3$  και,
- Ø Ισχύει για μια περιοχή  $B=1,7 \cdot h \cdot h=1,7 \cdot 6,89(\text{m}) \cdot 6,89(\text{m})=80,7(\text{m}^2)$

Μέση τιμή  $C_p$ :

$$C_p = \frac{[14,24(\text{m}^2) \cdot (2,3+80,7(\text{m}^2)) \cdot 1,4]}{[14,24(\text{m}^2)+80,7(\text{m}^2)]} = 1,53$$

$$\text{Άρα, } We = Qp_{(z)} * Cp = 533 \left( \frac{N}{\text{m}^2} \right) * 1,53 = 815,5 \text{ N/m}^2$$

#### 6.4 Διαστασιολόγηση Κατασκευής



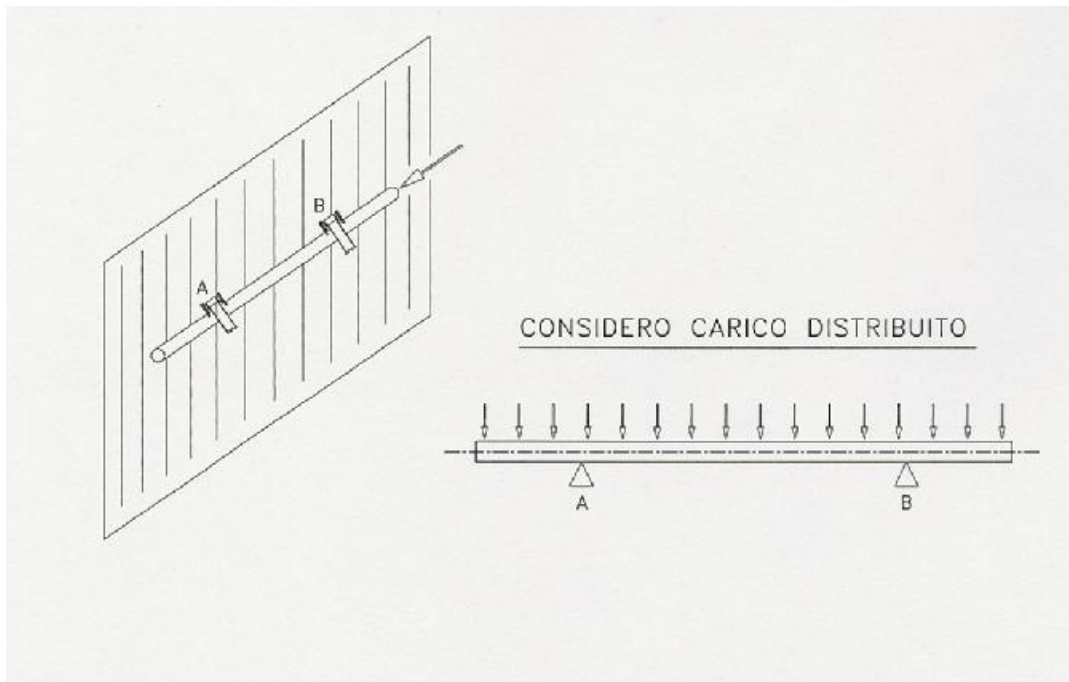
Σχήμα 6.6. Διαστασιολόγηση Κατασκευής

$$F_o = 815,5 \left( \frac{N}{\text{m}^2} \right) * \cos 25^\circ = 63,3 \text{ KN} = 6.452 \text{ Kgr f}$$

$$F_v = 815,5 \left( \frac{N}{\text{m}^2} \right) * \sin 25^\circ = 29,5 \text{ KN} = 3.007 \text{ Kgr f}$$

$$F = 815,5 \left( \frac{N}{m^2} \right) * 85,6 m^2 = 69,8 KN = 7.118 Kgr f$$

## 6.5 Επαλήθευση Σωλήνα Στήριξης Επιφάνειας Πάνελ



Σχήμα 6.7. Σωλήνας στήριξης επιφάνειας πάνελ

Η φόρτιση αποτελείται από: α) την ώθηση αέρα και β) το ακριβές βάρος.

Ωθηση αέρα : 6.452(kg)

Βάρος επιφανείας με στοιχειά στήριξης :

Πάνελ: n 12\*4 = 48 πάνελ διαστάσεως 1,7 (m<sup>2</sup>)

Βάρος= 48\*1,7\*14 (kg/m<sup>2</sup>) = 1.143(kg)

Προφίλ στήριξης από αλουμίνιο:

Βάρος : n 8\*12,4(m)\*2,4(kg/m) ~ 240(kg)

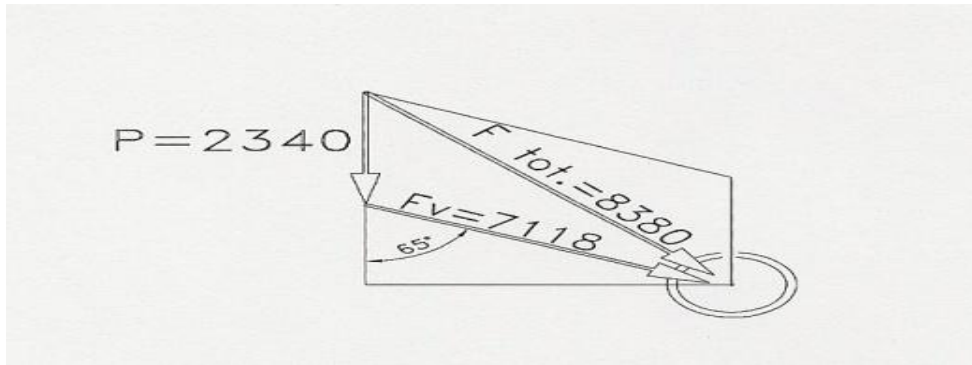
Υλικά , βίδες: 50(kg)

Δοκάρια στήριξης: βάρος 8\*6,29m\*8,5kg/m=428Kg

Αρχικό τουμπο στήριξης: 244,5 sp 7.1

Βάρος=11,5\*41,6kg/m=479kg

**Συνολικό βάρος =2.340 kg**

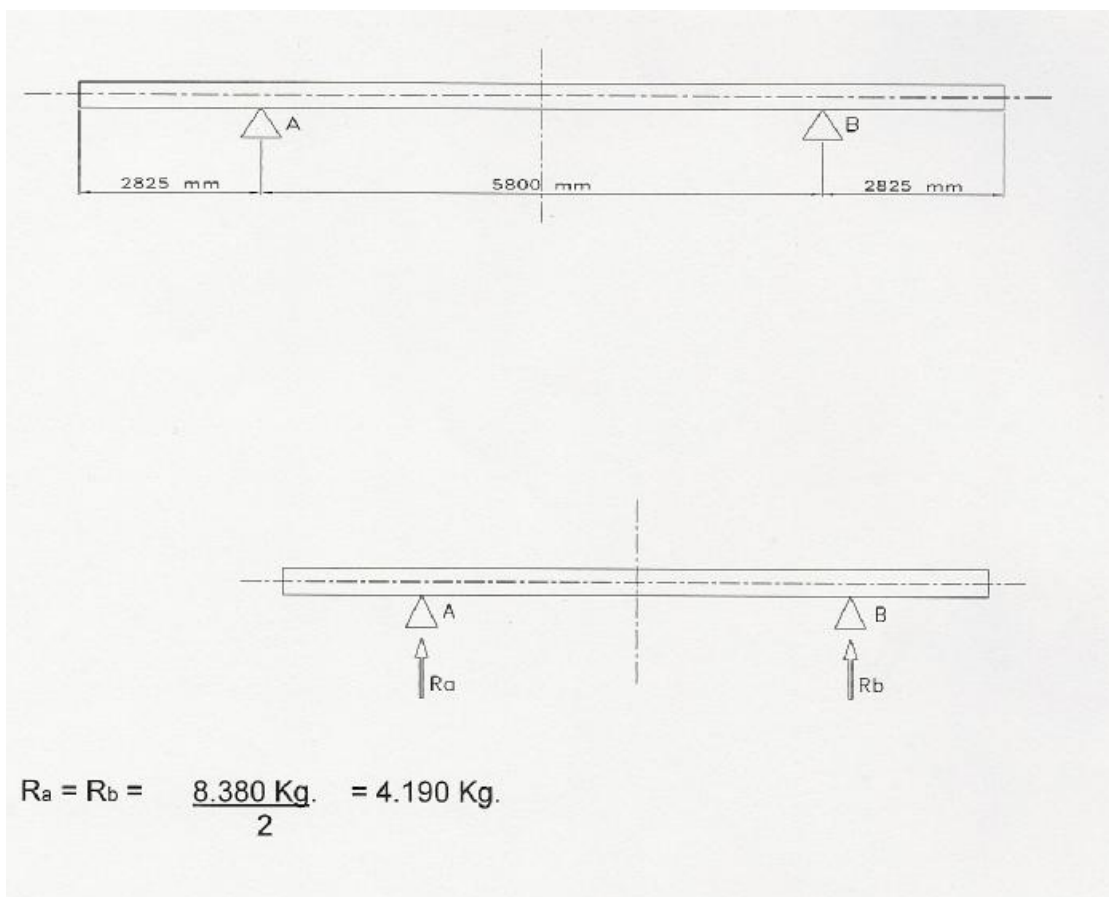


Σχήμα 6.8. Συνολικό βάρος

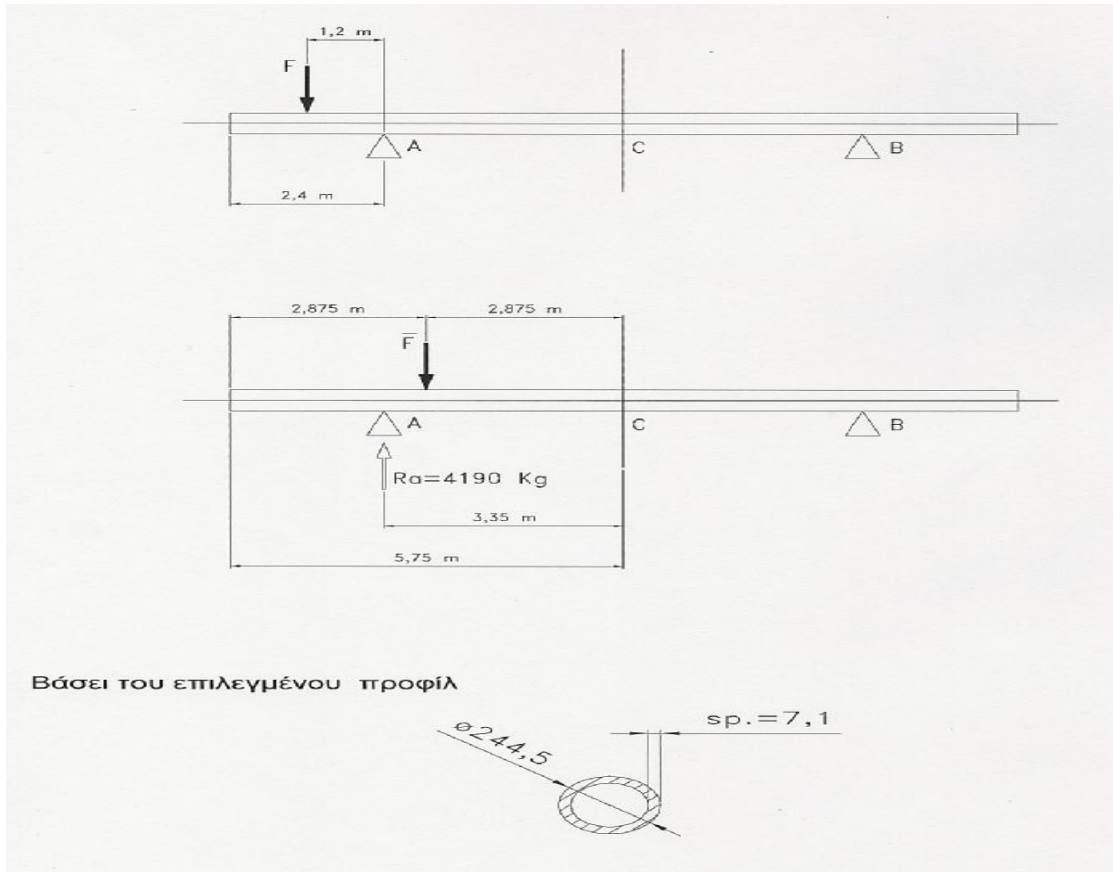
$$\phi = \tan^{-1}[(2340 + 3007) \setminus 6452] = 39,65^\circ$$

$$F_{tot} = \sqrt{(5347 * 5347) + (6452)^2} =$$

$$= \sqrt{(5347 * 5347)[\text{καθετο}] + (6452)^2[\text{οριζοντιο}]} = 8380 \text{ kg}$$



Σχήμα 6.9. Σημείωση τιμών στις στηρίξεις Ra και Rb.



Σχήμα 6.10. Ανάλυση τιμών και αποστάσεων στην στήριξη  $R_a$  (επιλογή βάσει του επιλεγμένου προφίλ).

$$F = [8380(\text{kg}) \cdot 2,825(\text{m})] / 11,5(\text{m}) = 2.058(\text{kg})$$

$$M_a = F \cdot 1,4(\text{m}) = 2.058(\text{kg}) \cdot 1,4(\text{m}) = 2.881(\text{kg} \cdot \text{m})$$

$$F = [8.380(\text{kg}) \cdot 5,8] / 11,5 = 4.227(\text{kg})$$

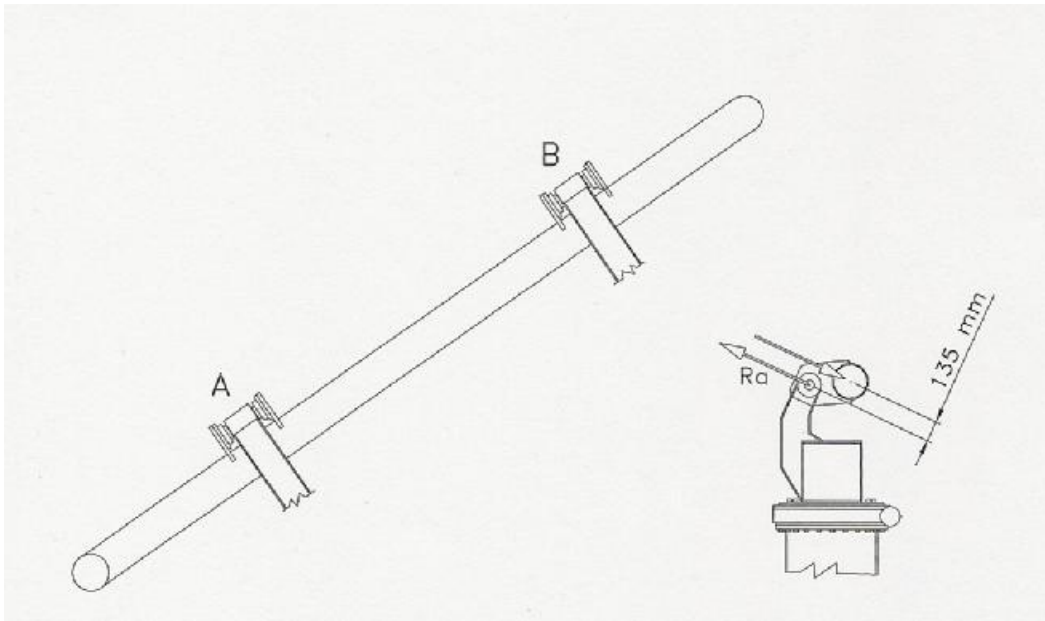
$$M_c = 4.227 \cdot (3,35 - 2,875)(\text{kg} \cdot \text{m}) = 2.008(\text{kg} \cdot \text{m})$$

$$I = 0,0491 \cdot (D^4 - d^4) = 3.734,7 \text{ cm}^4$$

$$W = I / (D/2) = 305 \text{ cm}^3$$

$$\Delta(\text{κάμψης στο A}) = (2099/305) = 6,9(\text{kg}/\text{m}^3) \text{ στο σημείο A και στο σημείο B}$$

## ΡΟΠΗ

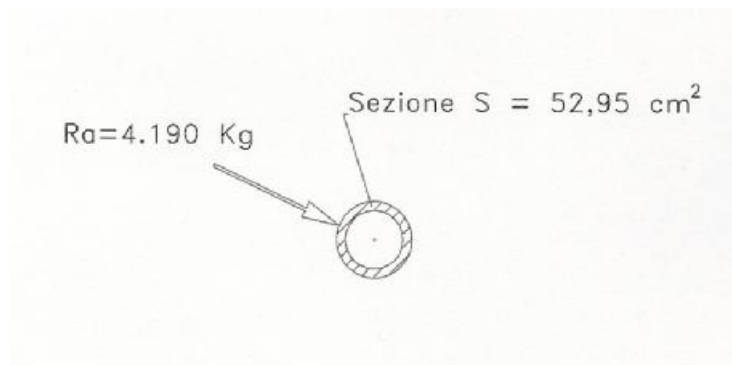


Σχήμα 6.11. Ανάλυση σε ροπή στον σωλήνα στήριξης του φ/β πάνελ

$$M \text{ (στο A)} = Ra \cdot 0,135(m) = 4.227(Kg) \cdot 0,135(m) = 571(kg \cdot m)$$

$$T \text{ (στο A)} = 571 \cdot (16/\pi) \cdot (D/(D^4 - d^4)) = 0,935 (m^3)$$

## ΔΙΑΤΜΗΣΗ



Σχήμα 6.12. Ανάλυση σε διάτμηση στον σωλήνα στήριξης του φ/β πάνελ

$$T_{inA} = 4.190 \cdot (52,95 \times 10^2) = 0,791(kg \cdot m^3)$$

$$T_{totA} = 0,791 + 0,935(kg \cdot m^3) = 1,726(kg \cdot m^3)$$

$$\delta_{Ald} = \sqrt{\delta^2 + 3T^2_{tot}} = \sqrt{(6,9^2 + 3 \times 1,726^2)} = 7,5 \text{ Kg/mm}^2 \approx 73,6 \text{ MPa}$$

### ΣΗΜΕΙΩΣΗ:

Για κοινό ατσάλι κατασκευής(Fe 360) η φόρτωση αποδυνάμωσης  $R_s$  ποικίλει σε σχέση με το πάχος ανάμεσα στις τιμές:

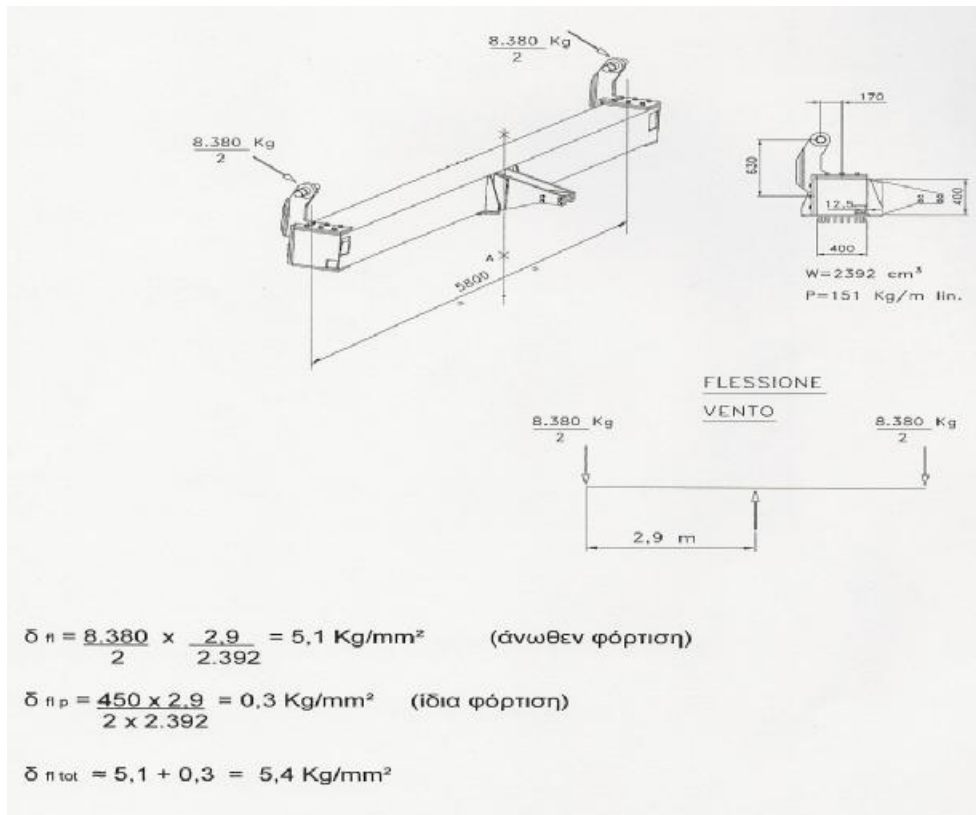
$$205\text{MPa} \leq R_s \leq 235\text{MPa}$$

Για πιάστρες και στοιχεία από λαμαρίνα είναι σκόπιμο να χρησιμοποιούμε υλικά τύπου Fe 510B δεδομένου ότι για τέτοια υλικά:

$$315\text{MPa} \leq R_s \leq 335\text{MPa}. \text{ Άρα επαληθεύεται.}$$

## 6.6 Επαλήθευση για τον κοίλο δοκό στήριξης

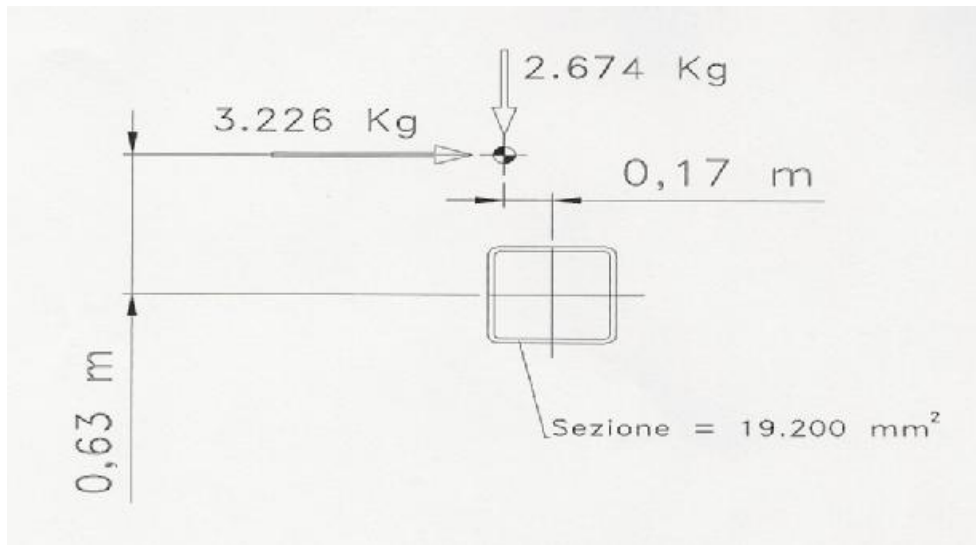
### ΚΑΜΨΗ



Σχήμα 6.13. Ανάλυση σε κάμψη στον κοίλο δοκό στήριξης



## ΡΟΠΗ



Σχήμα 6.14. Ανάλυση σε ροπή στον κοίλο δοκό στήριξης

$$M = [3.226(\text{kg}) \cdot 0,63(\text{m})] - [2.674(\text{kg}) \cdot 0,17(\text{m})] = 1.578 (\text{Kg} \cdot \text{m})$$

$$\tau_{\text{prc}} = [1.578(\text{Kg} \cdot \text{m}) \cdot 1.000] / [(400^4 - 376^4) / 12] = 0,00337(\text{kg}/\text{m}^3)$$

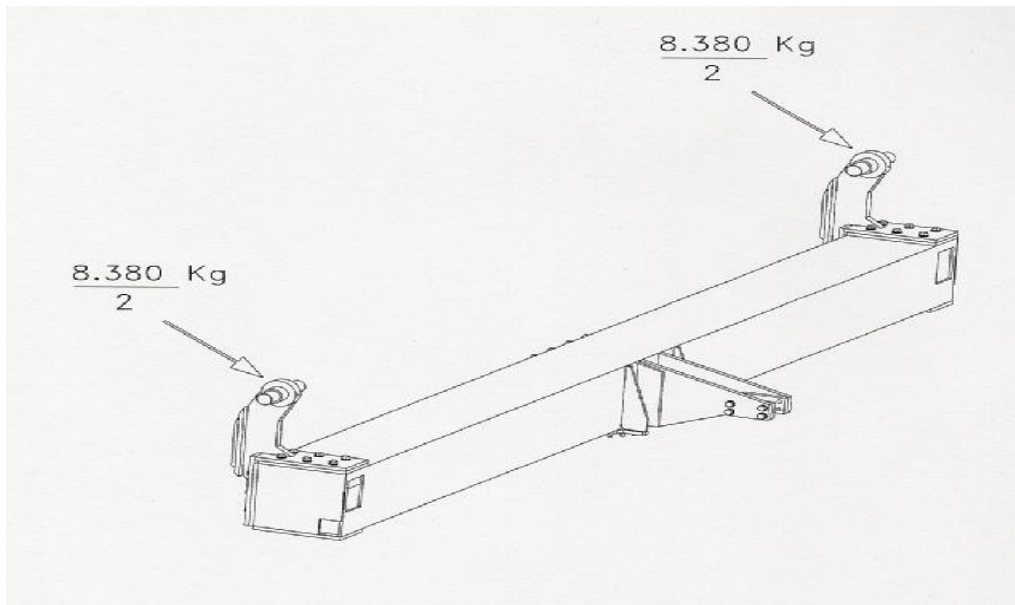
## ΔΙΑΤΜΗΣΗ

$$\tau_t \sim [8.380(\text{kg}) / 2] \cdot [2 / 19.200(\text{mm}^2)] = 0,436 (\text{kg}/\text{m}^3)$$

$$\tau_{\text{tot}} \sim 0,00337(\text{kg}/\text{m}^3) + 0,436(\text{kg}/\text{m}^3) = 0,439 (\text{kg}/\text{m}^3)$$

$$\Delta id = \sqrt{\left(5,4^2 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) + 3 * 0,439^2 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)\right)} = 5,45 (\text{kg}/\text{m}^3)$$

## 6.7 Επαλήθευση μπράτσων στήριξης

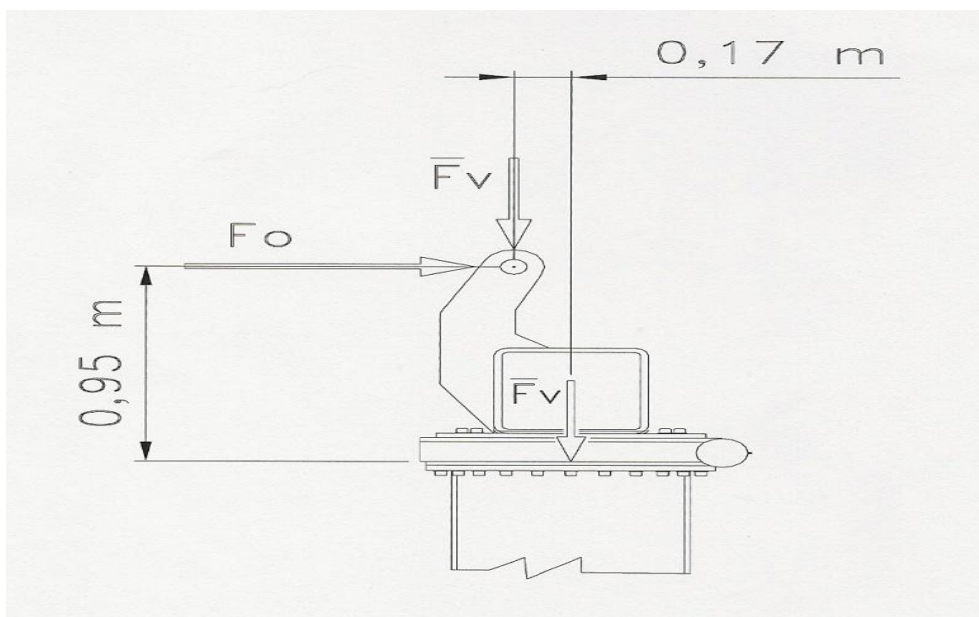


Σχήμα 6.15. Μπρατσα στήριξης του φ/β πάνελ

Σε κάθε στήριγμα βαραίνει φόρτωση  $8.380/2=4.190\text{kg}$  .

## 6.8 Μηχανισμός Περιστροφής

Δύναμη ανατροπής στην στήριξη του μηχανισμού περιστροφής Mrib



Σχήμα 6.16. Δύναμη ανατροπής στην στήριξη του μηχανισμού περιστροφής Mrib.

$F_o = 6.452(\text{Kg}) \sim 63(\text{KN})$  (οριζόντια δύναμη από την πίεση του ανέμου)

$F_v' = 2.340 \text{ kg}$  (κατασκευή οριζόντια περιστρεφόμενη)

= 3007 kg (κάθετη από ώθηση αέρα)

= 906 Kg (βάρος του μπτο)

= 150 kg ράλλα και το ηλεκτροέμβολο

$M_{rib} = 6452 * 0,95 (\text{Kg} * \text{m}) - 6403 * 0,17 (\text{Kg} * \text{m}) = 5041 (\text{Kg} * \text{m}) \sim 49,5 (\text{KN} * \text{m})$

Στον συγκεκριμένο τύπο φωτοβολταϊκών χρησιμοποιούνται τα κατάλληλα τύπου ράλλα και μπουλόνια στήριξης τα οποία θα μας εξασφαλίσουν ότι η οριζόντια  $F_{max}$  οριζόντια θα ισούται με 90(KN) .

Επιβεβαιώνεται ότι:

$F_o = 63 \text{KN} \leq F_{o \max} = 90 (\text{KN})$

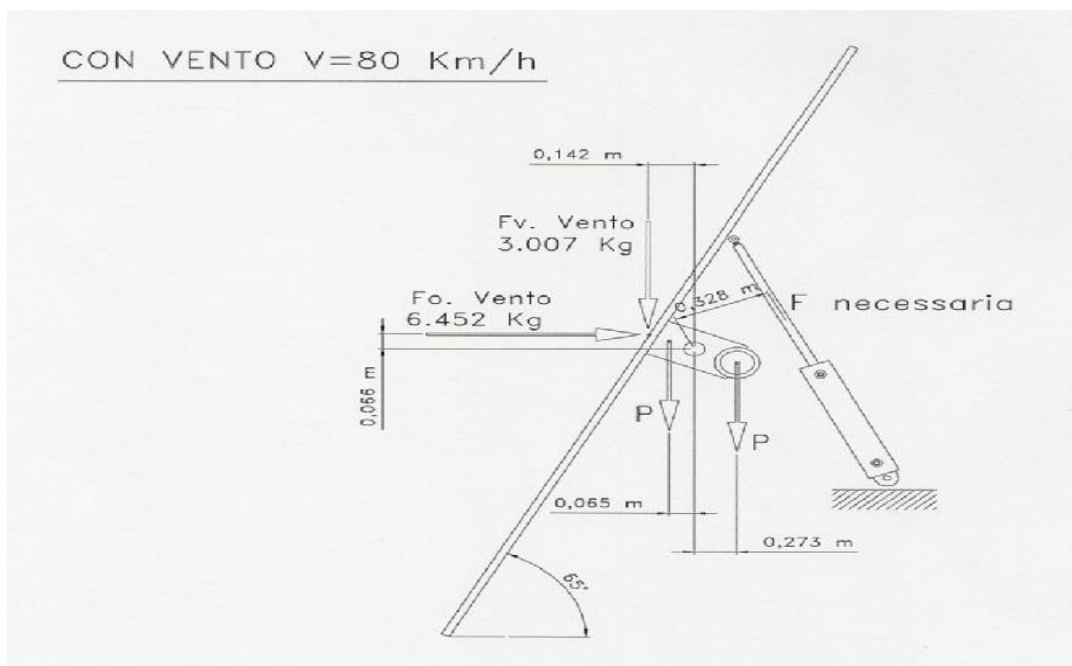
Για  $F_{καθετη} = 63 \text{KN}$   $M$  ανατροπής  $\max = 75 \text{KNm}$

Επιβεβαιώνεται επίσης :

$M_{rib} = 49.5 (\text{KN} * \text{m}) < M_{rib \max} = 75 (\text{KN} * \text{m})$  (μέγιστη ανατροπής ράλλας)

## 6.9 Επαλήθευση Γραμμικού Εμβόλου

**Με άνεμο από την επιφάνεια συλλογής:** Με ταχύτητα  $V = 80 \text{ km/h}$  .



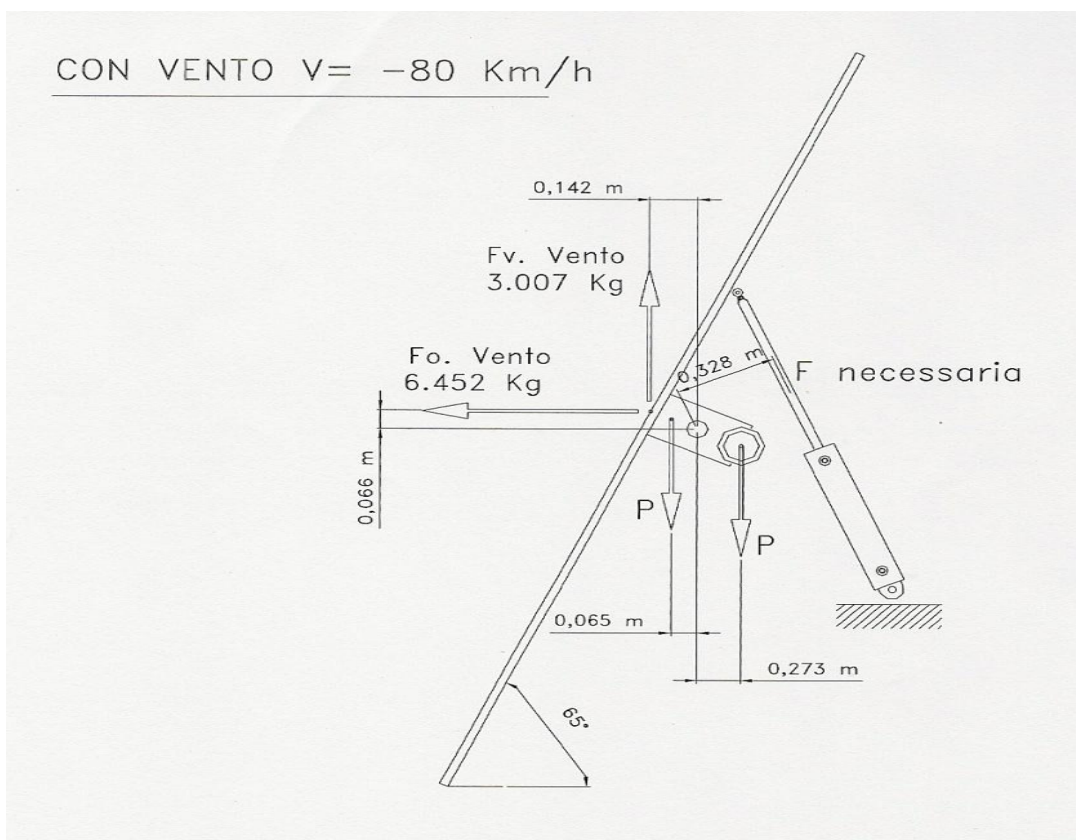
Σχήμα 6.17. Με άνεμο από την επιφάνεια συλλογής

$P=1.900\text{kg}$ (πάνελ και τελάρο)

$P'=720\text{kg}$ (κύρια κατασκευή και κοιλοδοκοί)

$$F_{nec} \geq [((6.452(\text{kg}) * 0,066(\text{m}) + 720(\text{kg}) * 0,273(\text{m})) - 3.007(\text{kg}) * 0,142(\text{m}) + 1.900(\text{kg}) * 0,065(\text{m})) ] / 0,328(\text{m}) = 220 \text{ kg}$$

**Με άνεμο από την οπίσθια επιφάνεια:** Για ταχύτητα  $V= - 80\text{km/h}$  .



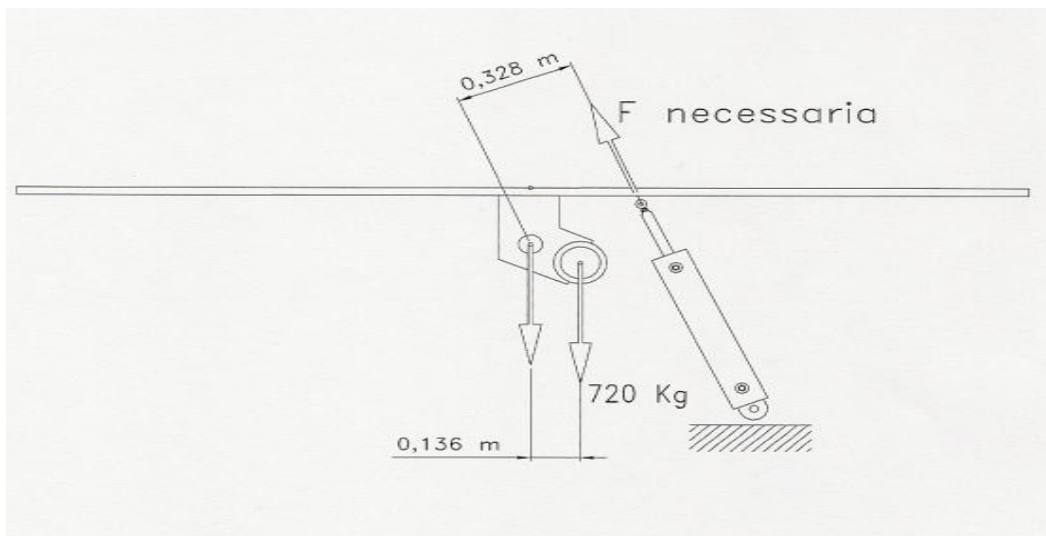
Σχήμα 6.18. Με άνεμο από την οπίσθια επιφάνεια.

$$F_{nec} \geq [((6.452(\text{kg}) * 0,066(\text{m}) + 1.900(\text{kg}) * 0,065(\text{m})) - (3.007(\text{kg}) * 1,142(\text{m}) + 720(\text{kg}) * 0,273(\text{m}))) ] / 0,328(\text{m}) = 226 \text{ kg}$$

**Με απουσία ανέμου:**

$$F_{nec} \geq ((720(\text{kg}) * 0,273(\text{m}) - 1.900(\text{kg}) * 0,065(\text{m})) / 0,328(\text{m})) = 220 \text{ kg}$$

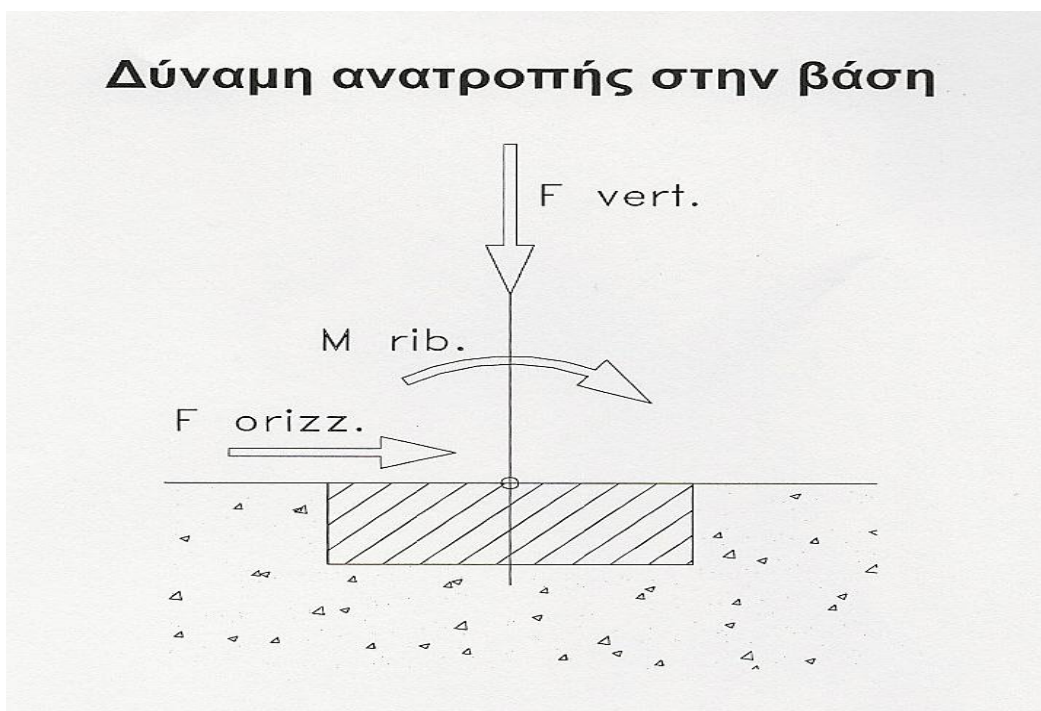
**Με την επιφάνεια σε οριζόντια θέση:**



Σχήμα 6.19. Με την επιφάνεια σε οριζόντια θέση

$$F_{nec} \geq 720(kg) * \frac{0,136(m)}{0,328(m)} = 299 kg$$

Για τον κύλινδρο  $V=2m/sec$  max ώθηση μπρος/πίσω=1.000kg , ο κύλινδρος είναι κατάλληλος για πάνελ 85 τετραγωνικών μέτρων.



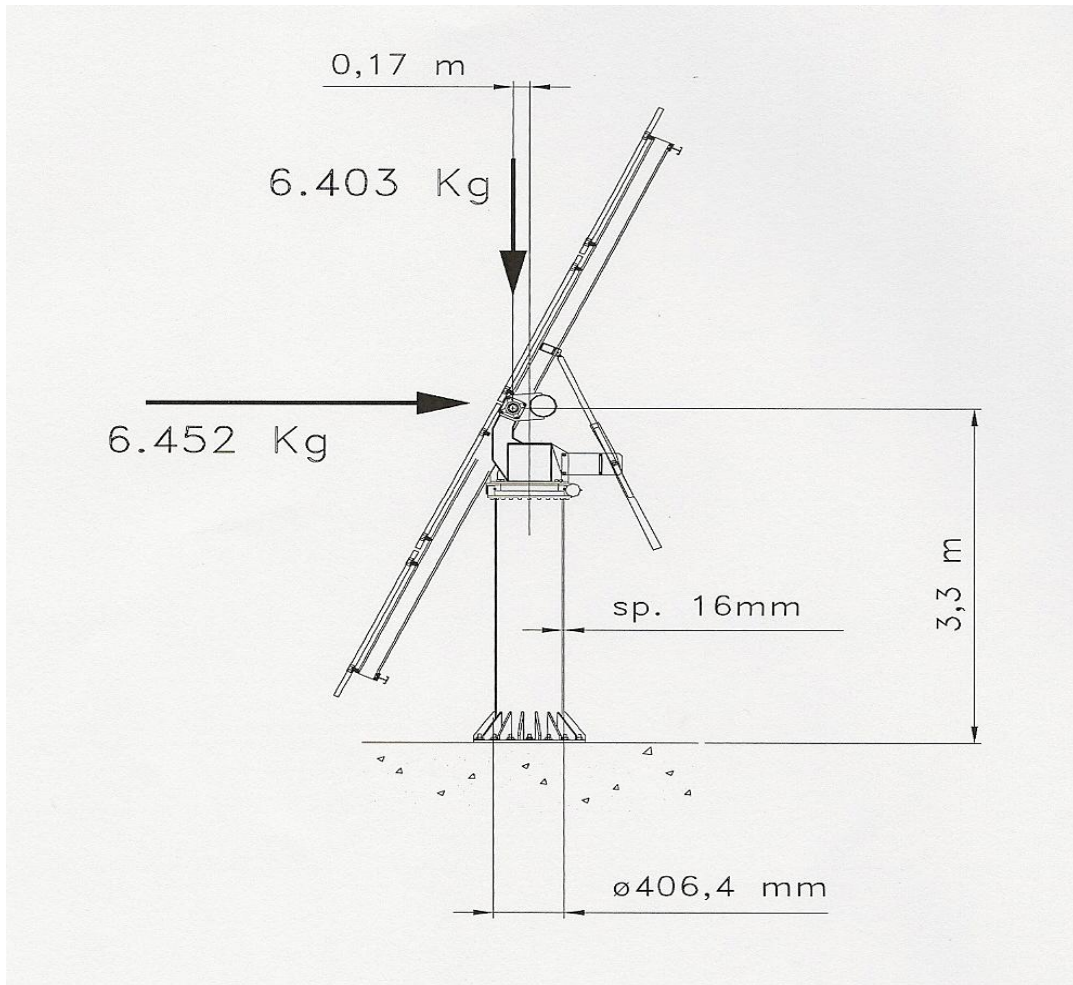
Σχήμα 6.20. Δύναμη ανατροπής στην βάση

$$F_{\text{vert}} = F_{\text{v}'} + \text{βάρους κολώνας} = 6403(\text{kg}) + 486(\text{kg}) = 6889 \text{ kg}$$

$$F_{\text{or}} = 6452 \text{ kg}$$

$$M_{\text{rib}} = 20.331 \text{ kg}$$

### 6.10 Επαλήθευση Πυλώνα Στήριξης



Σχήμα 6.21. Πυλώνας στήριξης

$$P = 154 \text{ (Kg/m)}$$

$$W = 0,0491 * \frac{D^4 - D^4}{\frac{D}{2}} = 1,844 \text{ cm}^3$$

$$S = 196 \text{ cm}^2$$

### ΚΑΜΨΗ

$$\Delta f l = \frac{M_{rib}}{W} = \frac{[6.452(kg) * 3,3(m) - 6.403(kg) * 0,15(m)]}{1,844(cm^3)}$$
$$= \frac{20.331(kg * m)}{1,844(cm^3)} = 11 kg/m^3$$

### ΠΙΕΣΗ ΚΑΘΕΤΗ

$$\Delta compressione = \frac{P}{S} = \frac{Fv' + P}{S} = \frac{[6.403(kg) + 486(kg)]}{19.600(m^3)} = 0,35 kg/m^3$$

### ΔΙΑΤΜΗΣΗ

$$T = 2 * \frac{6.452(kg)}{19.600(m^3)} = 0,658 kg/m^3$$

$$\Delta id = \sqrt{(11 + 0,35)^2 + 3 * 0,6 * 0,6} \left( \frac{kg}{m^3} \right) = 11,4 \frac{kg}{m^3} = 114 MPa$$

#### ΚΑΜΨΗ

$$\delta \pi = \frac{M_{rib}}{W} = \frac{6.452 * 3,3 - 6.403 * 0,15}{1.844} = \frac{20.331}{1.844} = 11 \text{ Kg/mm}^2$$

#### ΠΙΕΣΗ ΚΑΘΕΤΗ

$$\delta_{compressione} = \frac{P}{S} = \frac{Fv + \text{Peso proprio}}{S} = \frac{6.403 \text{ Kg.} + 486 \text{ Kg.}}{19.600 \text{ mm}^2} = 0,35 \text{ Kg/mm}^2$$

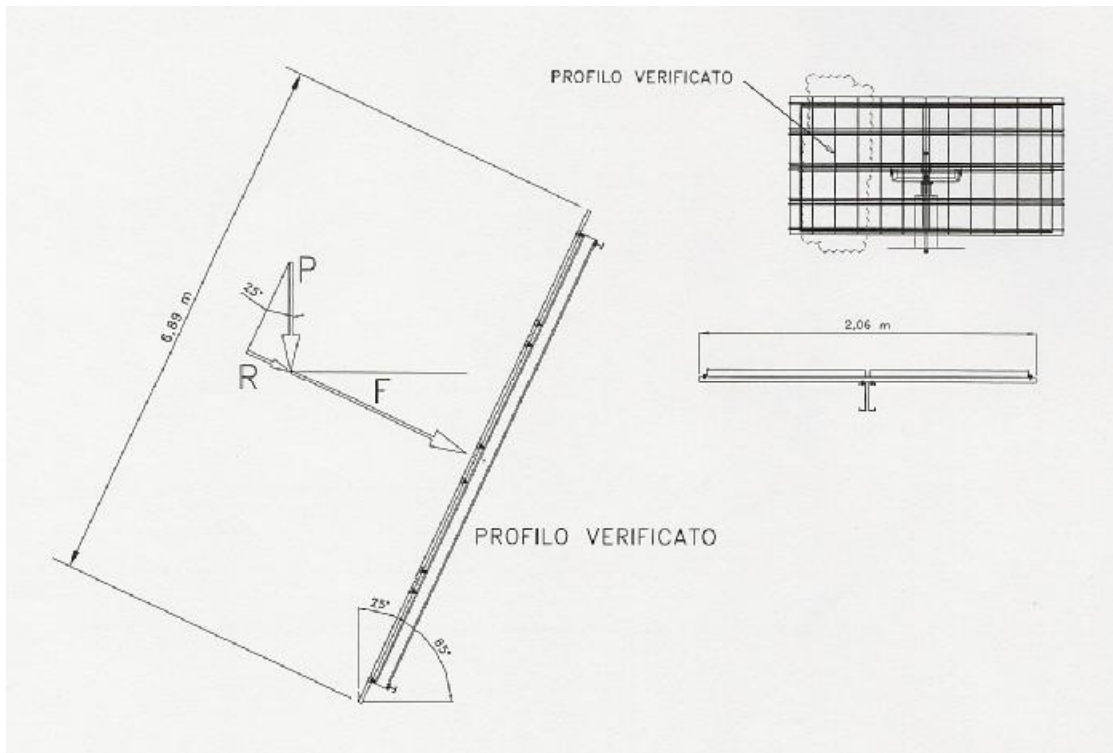
#### ΔΙΑΤΜΗΣΗ

$$T = \frac{2 * 6.452 \text{ Kg.}}{19.600 \text{ mm}^2} = 0,658 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\delta_{id} = \sqrt{(11 + 0,35)^2 + 3 * 0,6^2} = 11,4 \text{ Kg/mm}^2 = 114 \text{ MPa}$$

Σχήμα 6.22. Επαλήθευση Πυλώνων στήριξης – Σύγκριση των πρότυπων αποτελεσμάτων με τα παραπάνω αποτελέσματα που βρήκαμε.

## 6.11 Στρέβλωση Επιφάνειας Πάνελ



Σχήμα 6.23. Δυνάμεις που ασκούνται σε μια επιφάνεια πάνελ οι οποίες οδηγούν σε στρέβλωση της επιφάνειας του πάνελ.

Το πιο στρεσαρισμένο στοιχείο είναι αυτό που κρατεί την επιφάνεια του πάνελ:

- $S = 2,06 \cdot 6,89 (m^2) = 14,2 m^2$

Συνολικό βάρος επιφορτισμένο στο προφίλ:

- Βάρος προφίλ =  $41 (kg) \cdot 2 = 82 \text{ kg}$
- Βάρος πάνελ =  $8 \cdot 1,7 \cdot 14 = 190 \text{ kg}$
- Βάρος δοκών αλουμινίου =  $44 \text{ kg}$
- Βάρος εξαρτημάτων =  $5 \text{ kg}$      $P = 321 \text{ kg}$

Ωθηση αέρα  $S = 815,5 (N/m^2) \cdot 14,2 (m^2) = 11.580 (N) = 1.158 \text{ kg}$

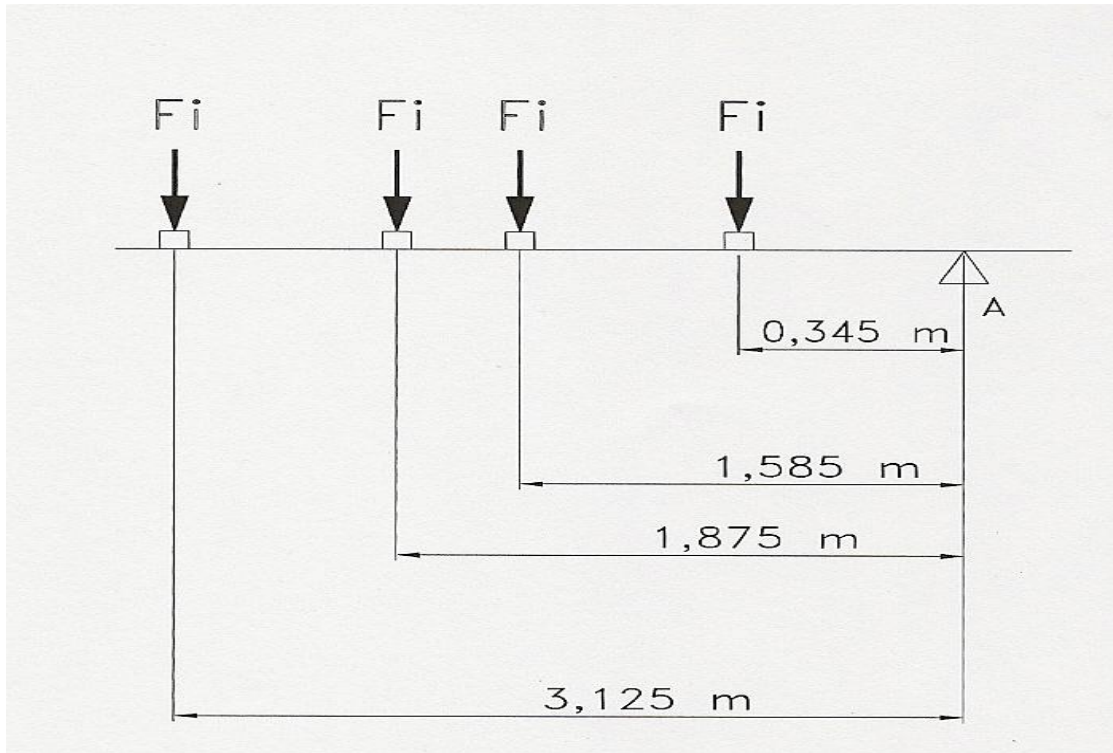
Το βάρος σε κατακόρυφη κατεύθυνση στο προφίλ έχει τιμή:

- $R = P \cdot \sin 25 = 135 \text{ kg}$

Υποθέτω την παρακάτω σχηματοποίηση φόρτωσης:

- $F_i = (S+R)/8 = (1.158+135)/8 = 162 \text{ kg}$





Σχήμα 6.24. Σχηματοποίηση φόρτισης της επιφάνειας του πάνελ

$$Ma = 162(\text{kg}) \cdot (3,125 + 1,875 + 1,585 + 0,345)(\text{m}) = 1.123 \text{ kgm}$$

$$W_{\text{tot}} = 44,98 \text{ cm}^3 \cdot 2 = 89.96 \text{ cm}^3$$

$$\Delta = Ma/W = 1.143,5/89,96 = 12,7(\text{kg/m}^3) = 127 \text{ MPa}$$

## 6.12 Ισχύς Κινητήρα για Περιστροφή του Συστήματος

Για την μέγιστη ισχύ που μπορεί να δεχθεί η ράλλα έχω  $T_{2\text{max}} = 14.600(\text{Nm})$

$$Mt = 9500 \cdot \frac{N}{nr} \Rightarrow N = nr \cdot \frac{Mt}{9500} \Rightarrow N = 0,05 \cdot \frac{14600}{9550} = 0,0764 \text{ kWatt} \\ = 76,4 \text{ Watt}$$

Όπου  $Mt$  η ροπή αδρανείας σε  $(\text{Nm})$  και  $nr$  ο αριθμός στροφών ανά λεπτό (rpm) και  $N$  η απαιτούμενη ισχύς του κινητήρα.

Η σχέση μείωσης της ράλλας είναι  $i=104$  άρα οι απαιτούμενες στροφές στην είσοδο της ράλλας είναι  $5.2$  (rpm).

Με σχέση  $i=167$ ,  $n_2=4,3$ ,  $T_2=180(\text{Nm})$  στην έξοδο κλάσης και επαληθεύω  $180(\text{Nm})/167=1,077(\text{Nm})$  στην είσοδο του μειωτήρα,  $4,3\text{rpm} \cdot 167 = 718\text{rpm}$

του κινητήρα ήτοι  $N=718 \cdot 1,07/9550(\text{KW})=0,08(\text{KWatt})=80(\text{Watt})$ .

**ΟΡΙΣΜΟΙ:**

- Με τον όρο **Ροπή** (torque) χαρακτηρίζεται το μέτρο της επίδρασης που ασκεί μία δύναμη κατά την διάρκεια της περιστροφής του σώματος. Συνεπώς η **ροπή** της δύναμης είναι το μέτρο της επίδρασης της στη περιστροφή του σώματος. Η ροπή είναι ανάλογη της ασκούμενης δύναμης και της απόστασης του σημείου εφαρμογής από τον άξονα περιστροφής. Δηλαδή το γινόμενο δύναμης επί την απόσταση.

## 7. ΠΡΟΤΑΣΗ ΗΛΙΟΣΤΑΤΗ ΔΥΟ ΑΞΟΝΩΝ (2 – axis solar tracker)

### 7.1 Διαξονικός φωτοβολταϊκός ηλιοστάτης μεγάλου μεγέθους (ύψος >2,5 m)



Σχήμα 7.1. Διαξονικός ηλιοστάτης μεγάλου ύψους (>2,5 μέτρα)

Η διαξονικοί φ/β ηλιοστάτες που το ύψος τους ξεπερνά τα 2,5 μέτρα ονομάζονται ηλιοτρόπια μεγάλων διαστάσεων. Οι διαξονικοί ηλιοστάτες με αυτό τα χαρακτηριστικό, τοποθετούνται κυρίως σε αγρούς λόγω του μεγέθους τους. Συνήθως, λόγω του βάρους και του μεγάλου τους μεγέθους, χρειάζονται γεραμούς και άλλα συνεργεία για να εγκατασταθούν. Επιπλέον, το μέγεθος τους πολλές φορές καθιστά δύσκολη και χρονοβόρα τη συντήρησή τους.

Η επιφάνεια των πάνελ που φέρουν μπορεί να φτάσει και τα 150 (m<sup>2</sup>) τμ και σε ύψος μπορούν να φτάσουν τα 10 (m) μέτρα.

Αποτελούνται από τη βάση και τα θεμέλια, τον κορμό και το πλαίσιο ή χωροδικτύωμα πάνω στο οποίο τοποθετούνται τα φ/β πάνελ. Η βάση τους είναι συνήθως οπλισμένο σκυρόδεμα και μπορεί να έχει πολύ μεγάλες διαστάσεις ανάλογα με το μέγεθος του ηλιοστάτη. Για παράδειγμα, ηλιοτρόπιο με επιφάνεια πάνελ 150 τμ έχει βάση 25 τμ . Ο κορμός τους τις περισσότερες φορές είναι μεταλλικός αλλά μπορεί να είναι κατασκευασμένος από οπλισμένο σκυρόδεμα. Ο κορμός ανάλογα με το που βρίσκεται ο κινητήρας περιστροφής μπορεί να είναι σταθερός ή και να περιστρέφεται και αυτός μαζί με το πλαίσιο τοποθέτησης των πάνελ. Αν ο

κινητήρας είναι πάνω στη βάση ο κορμός περιστρέφεται. Η περιστροφή γίνεται με υδραυλικό κύλινδρο και υδραυλική αρπαγή, με ατέρμονα κοχλία ή με ηλεκτρικό μοτέρ.

Η ανυψωτική κίνηση γίνεται με γραμμικό ενεργοποιητή, ατέρμονα κοχλία ή υδραυλικό κύλινδρο. Το πλαίσιο πάνω στο οποίο τοποθετούνται τα πάνελ είναι στηριγμένο πάνω στον κορμό. Είναι σημαντικό το πλαίσιο στους ηλιοστάτες μεγάλου μεγέθους να είναι στιβαρό, έτσι ώστε να μην υπάρχουν μεγάλες ταλαντώσεις.

Λόγω της μεγάλης επιφάνειας των πάνελ έχουμε μεγάλη αντίσταση του αέρα με αποτέλεσμα να υπάρχει ταλάντωση στον ηλιοστάτη και να φθείρονται τα διάφορα μέρη του. Οπότε, για να μειωθεί η αντίσταση του αέρα αφήνονται κενά ή χαραμάδες μεταξύ των πάνελ ώστε να διαφεύγει ο αέρας.

Ένα ακόμα μειονέκτημα που παρουσιάζουν οι μεγάλοι σε ύψος ηλιοστάτες είναι η ενέργεια που καταναλώνουν από την παραγόμενη, για να επιτευχθεί η παρακολούθηση του ηλίου μέσω της κίνησης τους.

Ακόμα, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι λόγω του σημαντικού τους ύψους είναι απαραίτητη η έκδοση οικονομικής άδειας και όχι έγκρισης εργασιών μικρής κλίμακας, όπως ισχύει για τα συστήματα σταθερών βάσεων. Αυτό σαν γεγονός αυξάνει το κόστος εγκατάστασης και επηρεάζει τον χρόνο υλοποίησης της κατασκευής του σταθμού.

## **7.2 Διαξονικός φωτοβολταϊκός ηλιοστάτης μικρού μεγέθους ( ύψος 2,5m < )**

Η διαξονικοί ηλιοστάτες μικρού και μεγέθους, δηλαδή με ύψος κάτω των 2,5 μέτρων, απευθύνονται σε μικρά φωτοβολταϊκά πάρκα, μικρών οικοπέδων ή και ταρατσών. Η εγκατάσταση και η συντήρησή τους είναι ευκολότερη λόγω του μεγέθους τους και του ύψους τους δημιουργώντας το πλεονέκτημα της ευκολότερης και σε μικρότερο βάθος θεμελίωσης.

Κατά βάση, είναι ένα σύστημα διασυνδεδεμένων ιχνηλατών. Πιο αναλυτικά, κάθε πλαίσιο του συστήματος φέρει έναν μικρό αριθμό από πάνελ ή ακόμα και ένα μοναδικό πάνελ και στηρίζεται σε έναν διαμήκη άξονα – δοκό. Η άξονας είναι πακτωμένος στο έδαφος ανά διαστήματα.

Η βασική κατασκευή είναι από εν θερμώ γαλβανισμένο ατσάλι ή αλουμίνιο, το ίδιο ισχύει και για τα πλαίσια χωροδικτυώματα πάνω στα οποία είναι τοποθετημένα τα πάνελ.

Επιπλέον, κάθε μονάδα συστήματος έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με έναν μεμονωμένο ιχνηλάτη (tracker). Σε αυτή την περίπτωση όμως οι ιχνηλάτες έχουν μικρότερο μέγεθος και μικρότερη επιφάνεια πάνελ. Απόρροια αυτού είναι να έχουμε μείωση στην αντίσταση του αέρα οπότε και ελαφρύτερη κατασκευή.



*Σχήμα 7.2. Διαξονικός ηλιοστάτης μικρού ύψους (<2,5 μέτρα)*

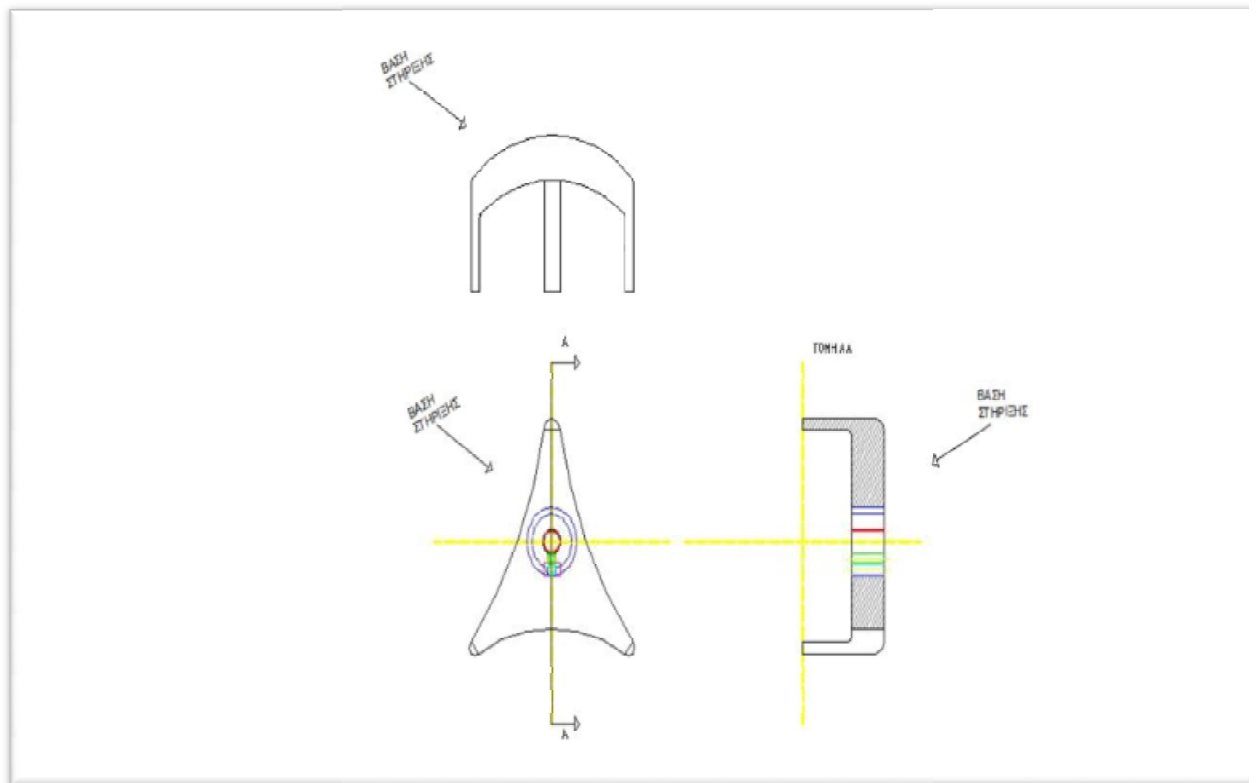
Κύριο πλεονέκτημα των ηλιοστατών μικρού μεγέθους είναι ότι κάνουν κοινή χρήση κάποιων πόρων του συστήματος, όπως για παράδειγμα τους κινητήρες, και ελαττώνουν το ύψος και την επιφάνεια του συστήματος.

Από την άλλη, ίσως το κύριο μειονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι χρησιμοποιούν ένα αρκετά έως πολύ πολύπλοκο σύστημα μερών και βραχιόνων για να μεταδώσουν την κίνηση στην κάθε μονάδα. Το πολύπλοκο αυτό σύστημα βραχιόνων και μετάδοσης της κίνησης αυξάνει την πιθανότητα δημιουργίας εμπλοκής του συστήματος σε περίπτωση αστοχίας κάποιου υλικού, με αποτέλεσμα να μην λειτουργεί ολόκληρη σειρά πάνελ αν τελικώς έχουμε αστοχία σε κάποιο υλικό.

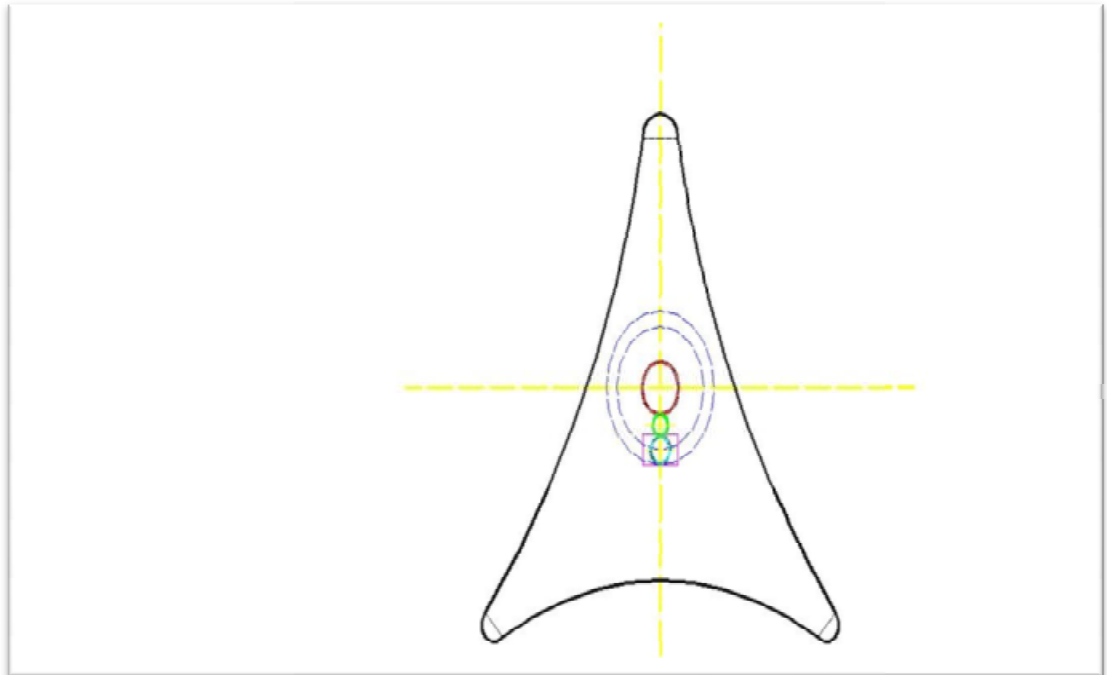
Συγκριτικά με τους ηλιοστάτες (solar trackers) μεγάλου μεγέθους και ύψους (>2,5 μέτρα) χρειάζονται μεγαλύτερη επιφάνεια γηπέδου για να εγκατασταθούν διότι μικραίνει το ύψος και αυξάνεται η έκταση που καταλαμβάνουν. Τέλος, αν συνυπολογιστούν και τα προβλήματα σκίασης η επιφάνεια μεγαλώνει αρκετά.

### 7.3 Σχέδιο σε Cad και ανάλυση λειτουργίας του προτεινόμενου μοντέλου (2D) ηλιοστάτη δύο αξόνων (2-axis solar tracker)

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζεται μία δική μου πρόταση ενός ηλιοστάτη δύο αξόνων, ο οποίος θα μπορούσε να αποτελέσει μία νέα πρόταση προς περαιτέρω διερεύνηση στον τομέα των φωτοβολταϊκών ηλιοστατών (solar trackers). Θα ήθελα να επισημάνω ότι στα πλαίσια της έρευνας δεν ήταν εφικτή η κατασκευή του προτεινόμενου φ/β ηλιοστάτη παρά μόνο η σχεδίαση του σε Autocad και σε μορφή δισδιάστατη (2D) καθώς και τρισδιάστατη(3D). Στα παρακάτω σχήματα που ακολουθούν απεικονίζεται (πρόωψη, κάτοψη, πλάγια αριστερή σε τομή) ο προτεινόμενος ηλιοστάτης και διάφορα μέρη – στοιχεία αυτού.

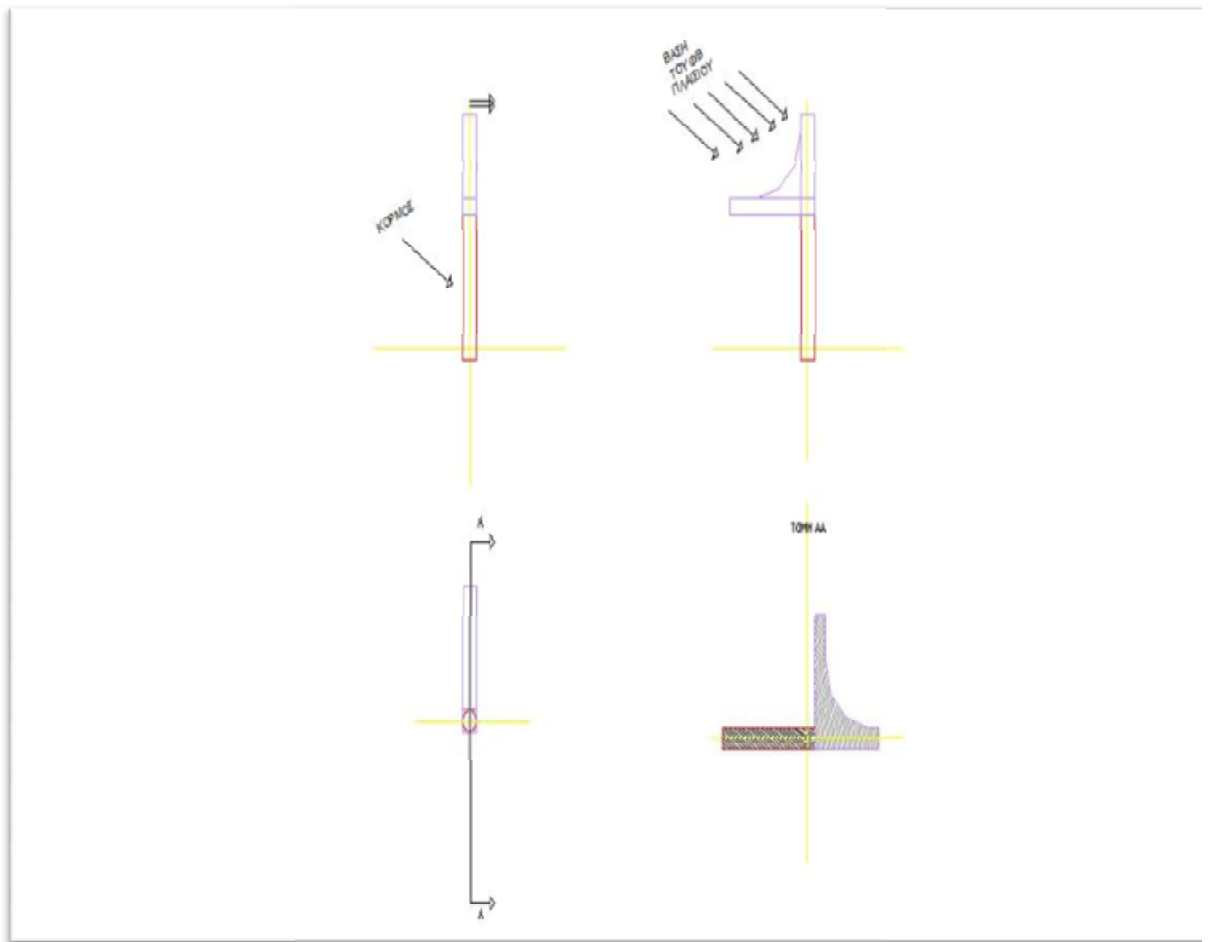


Σχήμα 7.3. Η βάση στήριξης του προτεινόμενου φ/β διαξονικού ηλιοστάτη.



Σχήμα 7.3. Η βάση στήριξης του προτεινόμενου φ/β διαξονικού ηλιοστάτη.

Η βάση στήριξης του διαξονικού φ/β ηλιοστάτη φαίνεται στο παραπάνω σχήμα 7.3. Στο κέντρο, περίπου, της βάσης στήριξης θα στηρίζεται ο κυλινδρικού σχήματος κορμός της βάσης συγκράτησης του φ/β πλαισίου. Ο κορμός θα μπορεί να περιστρέφεται 360 μοίρες, καθώς θα ενώνεται με κινητήρα που θα υπάρχει κάτω από την βάση στήριξης, συνεπώς και το φ/β πλαίσιο θα μπορεί να περιστρέφεται 360 μοίρες. Στην βάση στήριξης θα μπορούσαν να τοποθετηθούν αισθητήρες φωτός (ή και αισθητήρες άλλων τεχνολογιών) τέτοιοι ώστε με την βοήθεια των PLC να μπορούν να περιστρέφουν το πάνελ από την σωστή διεύθυνση του ήλιου.



Σχήμα 7.4. Ο κορμός και η βάση κύλισης του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Όπως αναφέραμε και παραπάνω ο κορμός θα περιστρέφεται 360 μοίρες (δηλαδή περιστροφή κατά Ανατολή και Δύση) και συνεπώς και το φ/β πλαίσιο, πάνω στο οποίο είναι τοποθετημένοι οι φ/β συλλέκτες. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο θα κυλιέται μέσω ενός κινητήρα (ή ηλεκτρικό μοτέρ) πάνω στη βάση του φ/β πλαισίου όπως αυτή απεικονίζεται στο σχήμα 7.4. Η βάση του φωτοβολταϊκού πλαισίου θα είναι έτσι σχεδιασμένη ώστε να καλύπτει όλο το φάσμα της επιθυμητής ηλιακής ακτινοβολίας όταν κινείται.

Οι συγχρονισμένες κινήσεις και στους δύο άξονες κίνησης του παραπάνω προτεινόμενου φ/β ηλιοστάτη θα γίνεται μέσω ενός συστήματος ελέγχου και την βοήθεια των κατάλληλων αισθητήρων.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να επισημάνω ότι τα σχέδια του προτεινόμενου φ/β ηλιοστάτη δύο αξόνων δεν έχουν πραγματοποιηθεί με πραγματικές διαστάσεις. Αντίθετα, οι διαστάσεις των σχεδίων είναι κατά προσέγγιση πραγματικές.



Στο παρακάτω 7.5 τρισδιάστατο (3D) σχήμα απεικονίζεται ο προτεινόμενος φωτοβολταϊκός ηλιοστάτης δύο αξόνων. (Το σχέδιο δημιουργήθηκε μέσω του σχεδιαστικού προγράμματος solidworks 2010)



*Σχήμα 7.4. Ο προτεινόμενος φωτοβολταϊκός ηλιοστάτης δύο αξόνων.*

## 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γενικότερα ο προτεινόμενος φωτοβολταϊκός ηλιοστάτης θα μπορούσε να αποτελέσει μία λύση για την αύξηση της παραγόμενης ενέργειας από τις φ/β γεννήτριες που είναι τοποθετημένες στο φ/β πλαίσιο. Επιπλέον, είναι έτσι σχεδιασμένος ώστε να μπορεί να κατασκευαστεί είτε σαν ηλιοστάτη μεγάλου μεγέθους ( ύψος πάνω από 2,5 μέτρα) είτε σαν ηλιοστάτης μικρού μεγέθους (ύψος κάτω από 2,5 μέτρα).

Όσον αφορά την χώρα μας, από την εφαρμογή του νόμου περί μεγίστου ύψους 2,5 μέτρων στα φωτοβολταϊκά συστήματα, άρχισαν να εμφανίζονται και να κατασκευάζονται στην ελληνική αγορά ηλιοστάτες – ιχνηλάτες με ύψος δράσης κάτω από τα 2,5 μέτρα. Τέτοιου ύψους δράσης ιχνηλάτες κατασκευάζονται και από κατασκευαστές του εξωτερικού. Τα περισσότερα συστήματα παρακολούθησης της ηλιακής ακτινοβολίας χαμηλού ύψους λειτουργούν με ένα σύστημα διασυνδεδεμένων ιχνηλατών. Αυτό συμβαίνει με σκοπό την μείωση του μεγέθους μοιράζοντας τα πάνελ σε μικρότερου μεγέθους ιχνηλάτες (trackers) και για να εξοικονομηθούν πόροι του συστήματος.

## 9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### (i) Από Βιβλία:

1. Σ.Ν. Καπλάνης, Ήπιες Μορφές Ενέργειας II , Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα
2. Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, Φωτοβολταϊκά Συστήματα (3<sup>η</sup> έκδοση), εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 2009
3. O. Wasynczuk, "Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems," IEEE Trans. Power App.Syst. , vol.PAS-102, pp3031-3037, Sept .1983.
4. Μ.Π. Παπαδόπουλος, Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας Από Ανανεώσιμες Πηγές, Εκδόσεις ΕΜΠ (1997)
5. Ι.Ν. Αβαρισιώτης, Τεχνολογία αισθητήρων και μικροσυστημάτων (2003)
6. Γαλανάκης Γιώργος, Βέρδος Παναγιώτης, «Μοντελοποίηση, προσομοίωση και μελέτη σκίασης φωτοβολταϊκής συστοιχίας στο λογισμικό Matlab», Πτυχιακή εργασία, Τ.Ε.Ι Κρήτης, 2009
7. Cooper B-Line, « Panel Orientation Landscape vs. Portait», October 2010
8. Juan Pablo Cabanillas, «The Wind and the Panacea of the Stow Position in the Solar Trackers», 2010 , Διαθέσιμο στο [www.titantracker.es](http://www.titantracker.es)
9. Ζήκος Σπυρίδων, « Διασυνδεδεμένος φωτοβολταϊκός σταθμός 1MW. Ανάλυση λειτουργίας και συγκριτική μελέτη απόδοσης με χρήση ιχνηλάτη», Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών (2011)
10. Σταματόπουλος Αθανάσιος, «Μελέτη και κατασκευή μονάδας ανύψωσης τάσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος δύο βαθμίδων», Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών (2011)

### (ii) Από ιστοσελίδες:

1. [www.igsolarpower.com/pvpanels.htm](http://www.igsolarpower.com/pvpanels.htm)
2. [www.sharppusa.com/SolarElectricity.aspx](http://www.sharppusa.com/SolarElectricity.aspx)
3. [www.astronergy.com](http://www.astronergy.com)
4. [www.lg-solar.com/en/products/products02.php](http://www.lg-solar.com/en/products/products02.php)
5. [am.suntech-power.com/products-and-services.html](http://am.suntech-power.com/products-and-services.html)
6. [www.kyocerasolar.com/residential-solutions/solar-panels/current-products.htm](http://www.kyocerasolar.com/residential-solutions/solar-panels/current-products.htm)
7. [www.mitsubishielectricsolar.com/pv-modules.php](http://www.mitsubishielectricsolar.com/pv-modules.php)
8. [www.bosch-solarenergy.com/products/solar-modules/crystalline-solar-modules/](http://www.bosch-solarenergy.com/products/solar-modules/crystalline-solar-modules/)

9. [www.phonosolar.com/product\\_solar.php](http://www.phonosolar.com/product_solar.php)
10. [www.exelgroup.gr/structures/galvanisma.html](http://www.exelgroup.gr/structures/galvanisma.html)
11. [www.hyperionee.gr/mounting-structures/](http://www.hyperionee.gr/mounting-structures/)
12. <http://learnhowtobuildsolarpanels.com/solar-panel-ground-mounts>
13. [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)
14. <http://www.sbia.gr/solar-photovoltaic-systems-equipment-gr.html>
15. <http://greenenergia.gr>
16. [http://www.atlasolar.com/index.php?option=com\\_frontpage&Itemid=1](http://www.atlasolar.com/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1)
17. [www.pvtrackers.com/](http://www.pvtrackers.com/)
18. [www.texnometaliki.com/Proionta/Vaseis-Fotovoltaikon/2-AXIS-GTR.html](http://www.texnometaliki.com/Proionta/Vaseis-Fotovoltaikon/2-AXIS-GTR.html)
19. <http://en.wikipedia.org/wiki/Heliostat>
20. <http://www.guardian.co.uk/environment/2010/jul/13/spain-solar-power>
21. <http://www.mdpi.com/1424-8220/9/5/3875/pdf>
22. <http://el.wikipedia.org/wiki/Ανάκλαση>