

# Πίνακας Περιεχομένων

<b>Κεφάλαιο 1.....</b>	<b>3</b>
1.1. Εισαγωγή .....	3
1.2. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο .....	3
1.3. Εφαρμογές και κόστος .....	5
1.4. Ηλιακή Ενέργεια .....	6
1.5. Από τι αποτελείται ένα φωτοβολταϊκό σύστημα .....	15
1.6. Τεχνολογίες Αντιστροφών .....	17
1.6.1.Τεχνικά χαρακτηριστικά Αντιστροφών .....	17
1.6.2. Ισχύς αντιστροφήα .....	18
1.6.3. Όρια τάσης, παράθυρο MPPT και μέγιστο ρεύμα .....	19
1.6.4. ACC έξοδος του αντιστροφήα.....	20
1.6.5. Αποδόσεις.....	21
1.6.6. Διαστασιολόγηση Μετατροπέων.....	21
1.6.7. Επιλογή αντιστροφών.....	21
1.6.8. Μονοφασικός ή τριφασικός.....	22
1.6.9. String Inverter - Central Inverter .....	22
1.6.10. Με Μετασχηματιστή ή Χωρίς (TL) .....	23
<b>Κεφάλαιο 2.....</b>	<b>24</b>
2.1. Ηλιακοί Ιχνηλάτες.....	24
2.2. Ταξινόμηση Ηλιακών Ιχνηλατών .....	24
2.3. Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα Ηλιακών Ιχνηλατών .....	25
2.4. Χωροθέτηση Ηλιακών Ιχνηλατών .....	27
2.5. Τεχνολογίες Ηλιακών Ιχνηλατών.....	28
2.6. Τεχνικά Στοιχεία εγκαταστάσεων Ηλιακών Ιχνηλατών.....	29
<b>Κεφάλαιο 3.....</b>	<b>32</b>
3.1. Κατασκευή Solar Tracker πάνω σε κινούμενο όχημα .....	32
3.2. Από τι αποτελείται .....	32
3.2.1. Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο μέγιστης Ισχύος 5Wp .....	33
3.2.2. Ρυθμιστής φόρτισης 4A.....	34
3.2.3. Βηματικός κινητήρας.....	35

3.3. Ηλεκτρονικό Κύκλωμα βαθμίδες και σχέδιο .....	42
3.4. Σχεδίαση - Τύπωση Πλακέτας.....	45
3.5. Προγραμματισμός VB.....	48
<b>Κεφάλαιο 4.....</b>	<b>60</b>
4.1. Βελτιώσεις συστήματος .....	60
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>61</b>

# Κεφάλαιο 1

## 1.1. Εισαγωγή

Η συνεχής εξέλιξη των ανθρώπων και των κοινωνιών καθώς και ο σύγχρονος τρόπος ζωής τους, οδήγησαν σε μεγαλύτερες απαιτήσεις ενεργειακής κατανάλωσης από αυτές που υπήρχαν στο παρελθόν. Μέχρι τον 19ο αιώνα ο άνθρωπος στηριζόταν στις μορφές ενέργειας που υπήρχαν ελεύθερες στη φύση όπως ο ήλιος ο αέρας και το νερό. Μετά την βιομηχανική επανάσταση και την πρόοδο της οικονομίας οι ενεργειακές ανάγκες πολλαπλασιάστηκαν με αποτέλεσμα οι φυσικοί πόροι να μην επαρκούν για την κάλυψη αυτών των αναγκών. Έτσι, συμβατικές πηγές ενέργειας, όπως το πετρέλαιο, η βενζίνη και ο άνθρακας ξεκίνησαν να στηρίζουν με μεγάλη επιτυχία την οικονομία και τις ανάγκες των κοινωνιών. Με το πέρασμα των χρόνων όμως αυτοί οι ορυκτοί πόροι αρχίζουν να εξαντλούνται, να γίνονται πολύ ακριβός τρόπος κάλυψης ενεργειακών αναγκών και να θέτουν προς σκέψη το τεράστιο ζήτημα της μόλυνσης του περιβάλλοντος.

Η πρόοδος της τεχνολογίας επαναφέρει στην επιφάνεια της Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας οι οποίες είναι και ανεξάντλητες και φιλικές προς το περιβάλλον. Μία από τις Ανανεώσιμες Πηγές ενέργειας είναι ο ήλιος στον οποίο στηρίζεται και η φωτοβολταϊκή τεχνολογία που γνωρίζει τεράστια ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια με πολλά πλεονεκτήματα και ωφέλη τόσο για την κοινωνία όσο και για το περιβάλλον.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η κατασκευή ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, γνωστό ως ηλιακός ιχνηλάτης, το οποίο θα κινείται ανάλογα με την θέση του ήλιου. Έτσι το σύστημα μπορεί να αποθηκεύσει και να εκμεταλλευτεί στο μέγιστο την ηλιακή ενέργεια καθ'όλη τη διάρκεια της ημέρας μετατρέποντάς την σε ηλεκτρική.

## 1.2. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζουν την αρχή λειτουργίας τους στην φωτοβολταϊκή ενέργεια η οποία ορίζεται ως η ενέργεια που προέρχεται από

τον ήλιο και μετατρέπεται σε ηλεκτρική μορφή μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

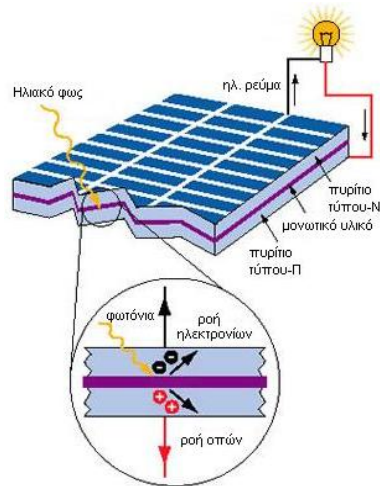
Το ηλιακό φως αποτελείται από πακέτα ενέργειας, τα φωτόνια που αντιστοιχούν στα διάφορα μύκη κύματος του ηλιακού φάσματος. Όταν φωτόνια προσκρούουν πάνω σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, το οποίο λειτουργεί ως ημιαγωγός, τότε κάποια από αυτά θα ανακλαστούν άλλα θα το διαπεράσουν και κάποια θα απορροφηθούν. Τα τελευταία είναι υπεύθυνα για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Το πλέον χρησιμοποιούμενο από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ημιαγωγίμο υλικό είναι το πυρίτιο. Όταν το πυρίτιο απορροφήσει, υπό τη μορφή ακτινοβολίας ή θερμότητας, ενέργεια τότε προκαλείται διάσπαση ηλεκτρονιακών δεσμών με αποτέλεσμα να ελευθερώνονται ηλεκτρόνια στον ημιαγωγό. Τα σημεία από τα οποία φεύγουν ηλεκτρόνια λέγονται οπές. Η κίνηση αυτή των ηλεκτρονίων συνεπάγεται την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Υπάρχουν ημιαγωγοί τύπου-n στους οποίους φορείς ρεύματος είναι τα πολλά ελεύθερα ηλεκτρόνια (αρνητικά φορτισμένα) και ημιαγωγοί τύπου-p στους οποίους φορείς ρεύματος είναι οι οπές (θετικά φορτισμένες). Προκειμένου να εμφανιστούν οι ιδιότητες των ημιαγωγών πρέπει να δημιουργηθεί μία ένωση p-n.

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μπορεί να απορροφήσει μόνο κάποια από τα φωτόνια του ηλιακού φάσματος. Όταν ένα φωτόνιο προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια ενός φ/β στοιχείου τύπου-n, διεγείρει ένα ηλεκτρόνιο το οποίο έλκεται από την θετικά φορτισμένη περιοχή του ημιαγωγού p. Το αποτέλεσμα αυτής της κίνησης φορτίων, από τη δημιουργία του ελεύθερου ηλεκτρονίου και της οπής, είναι η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Το ποσοστό της φωτεινής ακτινοβολίας που μπορεί να αξιοποιηθεί από ένα φωτοβολταϊκό σώμα εξαρτάται από την πιθανότητα σύγκρουσης φωτονίων και ηλεκτρονίων καθώς και από την διαθεσιμότητα και την ικανότητα των ηλεκτρονίων να μετακινηθούν.



Δημιουργία ρεύματος από την μετακίνηση ηλεκτρονίων

### 1.3. Εφαρμογές και κόστος

Τα σημαντικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα καθώς και η βελτίωση των τεχνολογιών με την πάροδο του χρόνου, οδήγησαν στην εμφάνισή τους σε πλήθος εφαρμογών.

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο παρατηρήθηκε για πρώτη φορά το 1839 από τον Γάλλο φυσικό Edmond Becquerel κατά την διάρκεια πειραμάτων του με μια ηλεκτρολυτική επαφή φτιαγμένη από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια. Παρατήρησε ότι παραγόταν ηλεκτρικό ρεύμα όταν έπεφτε φως πάνω σε ένα ηλεκτρόδιο που ήταν βυθισμένο σε ένα ηλεκτρολύτη. Το 1941 κατασκευάστηκε από τον Αμερικανό Russell Ohl το πρώτο φωτοβολταϊκό στοιχείο από πυρίτιο το οποίο βρίσκεται σε αφθονία στη φύση. Όμως το πρώτο στοιχείο από πυρίτιο ένωσης p-n το οποίο μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στην πράξη κατασκευάστηκε το 1954 στα εργαστήρια Bell Laboratories με απόδοση 6%. Στη συνέχεια τα φωτοβολταϊκά συστήματα γνωρίζουν ραγδαία εξέλιξη. Το 1958 οι ΗΠΑ εκτόξευσαν τον πρώτο δορυφόρο που σαν παροχή βοηθητικής ενέργειας είχε φωτοβολταϊκά πάνελ. Το 1962 φωτοβολταϊκά ισχύος 242Wp (μονάδα μέτρησης ισχύος φ/β συστημάτων) χρησιμοποιήθηκαν από την Sharp για την ηλεκτροδότηση ενός φάρου στην Ιαπωνία.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας συνεπάγεται μείωση του κόστους ανά Wp. Ενδεικτικά, τη δεκαετία του 50 το κόστος ανά Wp ήταν περίπου 500\$, τη

δεκαετία του 70 το κόστος πέφτει στα 50\$/Wp για να φτάσει σήμερα τα 5\$/Wp, τιμή προσιτή για την παροχή λύσεων σε περιοχές απομακρυσμένες που δεν έχουν πρόσβαση στο δίκτυο ηλεκτροδότησης. Μερικές από τις εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι:

-Τηλεπικοινωνίες (κεραίες κινητής τηλεφωνίας, κεραίες τηλεόρασης/ραδιοφώνου, φάροι)

-Ηλεκτροδότηση απομακρυσμένων περιοχών, δρόμων, φωτεινών σηματοδότηων

-Αγροτικές εφαρμογές όπως αφαλάτωση, υδροδότηση, άντληση και καθαρισμός νερού, ιχθυοκαλλιέργειες, ψύξη/θέρμανση αγροτικών προϊόντων

Το βασικό πλεονέκτημα της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας είναι ότι μπορεί να καλύψει μεγάλες ανάγκες σε ενέργεια χωρίς να αποτελέσει κίνδυνο για το περιβάλλον. Η ηλιακή ενέργεια, που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, διατίθεται σχεδόν παντού σε μεγάλες ποσότητες χωρίς να στοιχίζει και χωρίς να προκαλεί εκπομπή ρύπων. Έτσι απομακρυσμένες περιοχές μπορούν να απεξαρτηθούν από την ανάγκη για τροφοδοσία καυσίμων. Ένα ακόμα πλεονέκτημα των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής τους, γεγονός που αντισταθμίζει το μεγάλο κόστος εγκατάστασης. Τέλος, η αθόρυβη λειτουργία τους, η εύκολη επέκταση του συστήματος που πιθανόν να ζητηθεί καθώς και οι μικρές απαιτήσεις σε θέματα συντήρησης αποτελούν βασικά επιχειρήματα για να γίνει στροφή προς αυτήν την τεχνολογία.

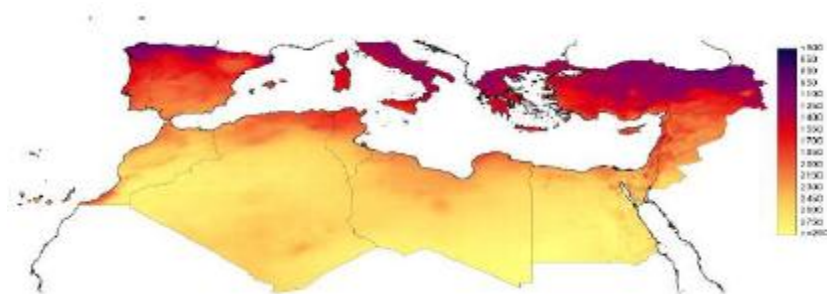
#### **1.4. Ηλιακή Ενέργεια**

Τόσο ο υπολογισμός της απόδοσης των φωτοβολταϊκών όσο και ο υπολογισμός της βέλτιστης θέσης των σκιάσεων που προκαλούν τυχόν εμπόδια γίνεται με τη βοήθεια εξισώσεων της ηλιακής ακτινοβολίας.

Για να υπολογίσουμε την απόδοση ενός συλλέκτη στο σύστημα μας, θα πρέπει κατ'αρχάς να βρούμε έναν τρόπο να προσδιορίσουμε την εισερχόμενη ενέργεια σε αυτόν. Με άλλα λόγια, θα πρέπει να βρούμε μια χρονοσειρά της

προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο γεωγραφικό σημείο όπου είναι εγκατεστημένος ο συλλέκτης και κατόπιν συνδυάζοντας και τα υπόλοιπα γεωγραφικά δεδομένα (κλίση εδάφους, άνεμος, μέση θερμοκρασία) να προβλέψουμε με ικανοποιητική ακρίβεια την ωριαία απόδοση θερμότητας του συλλέκτη στο σύστημα για τη διάρκεια ενός έτους.

Συνολικά στατιστικά στοιχεία έχουν πραγματοποιηθεί για το χώρο της Μεσογείου και όχι μόνο. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένας τέτοιος χοντρικός υπολογισμός της μέσης άμεσης ετήσιας προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε επίπεδη επιφάνεια για τον γεωγραφικό χώρο της Μεσογείου. Βλέπουμε για την Ελλάδα μια μέση αναμενόμενη τιμή στις 1700KWh θερμικές ανά τετραγωνικό μέτρο και έτος.



Μέση άμεση ετήσια προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο χώρο της Μεσογείου σε μονάδες KWh/m

Για να υπολογίσουμε την ωριαία απόδοση, έχουμε την ετήσια χρονοσειρά της παγκόσμιας οριζόντιας προσπίπτουσας ακτινοβολίας, που είναι ένα μέγεθος εύκολα εντοπίσιμο από μετεωρολογικούς οργανισμούς ή τη NASA.

Το γεωγραφικό πλάτος παίζει μεγάλο ρόλο στον υπολογισμό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο σημείο. Είναι άμεσα συνδεδεμένο με την τοπική ώρα ανατολής του ηλίου που με τη σειρά της επηρεάζει την ημερήσια και συνεπώς την ετήσια χρονοσειρά τιμών προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο σημείο.

Η ηλιακή ημέρα λοιπόν ορίζει μία απόκλιση της ηλιακής ακτινοβολίας και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

---

όπου  $n$ , η μέρα του χρόνου (ένας αριθμός από 1 έως 356).

Η κάθε ώρα σχετίζεται ουσιαστικά με τη θέση του ήλιου στον ουρανό. Το φαινόμενο μπορεί να περιγραφεί με μια ωριαία γωνία της θέσης του ήλιου. Θεωρώντας πως η γωνία είναι μηδενική το μεσημέρι, ορίζουμε θετικές και αρνητικές γωνίες ως προς αυτό. Η ωριαία γωνία δίνεται από τον τύπο:

όπου  $t_s$  η ηλιακή ώρα (se hr)

Η τιμή της μεταβλητής  $t_s$  είναι 12hr το μεσημέρι και 13,5hr ενενήντα λεπτά αργότερα. Η πιο πάνω εξίσωση προκύπτει από το γεγονός πως ο ήλιος κινείται στον ορίζοντα με ταχύτητα 15 μοίρες την ώρα.

Η χρονοσειρά κάθετης προσπίπτουσας ακτινοβολίας δεν αναφέρεται στην τοπική ώρα αλλά στην ηλιακή. Για να κάνουμε αναγωγή σε τοπικό χρονικό σύστημα χρησιμοποιούμε την πιο κάτω σχέση:

---

Όπου:

$t_c$ : τοπική ώρα

$\lambda$ : γεωγραφικό πλάτος

$Z_c$ : χρονική ζώνη σε σχέση με τον μεσημβρινό Γκρήνουιτς (GMT)

$E$ : εξίσωση αναγωγής της ώρας.

Η εξίσωση  $E$  σχετίζεται με την κλίση του άξονα της γης και το έκκεντρο του κέντρου βάρους της. Η εξίσωση  $E$  ορίζεται ως:

Όπου το  $B$  δίνεται από τη σχέση:

---



Όπου  $n$  η μέρα του χρόνου με πρώτη την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου.

Για επιφάνεια με οποιοδήποτε προσανατολισμό μπορούμε να υπολογίσουμε την γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια με τη σχέση:

Όπου:

$\theta$ : γωνία πρόσπτωσης

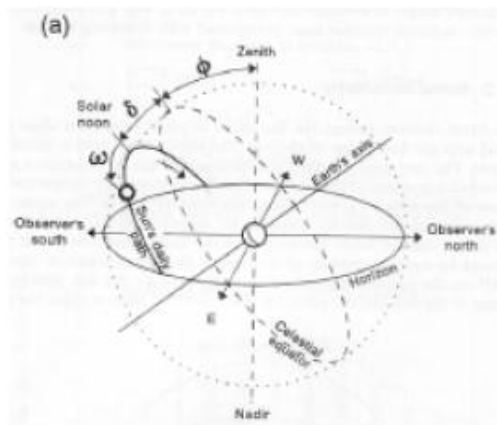
$\beta$ : κλίση επιφάνειας

$\gamma$ : αζιμούθιο της επιφάνειας

$\varphi$ : γεωγραφικό πλάτος

$\delta$ : απόκλιση ηλιακής ακτινοβολίας

$\omega$ : ωριαία γωνία

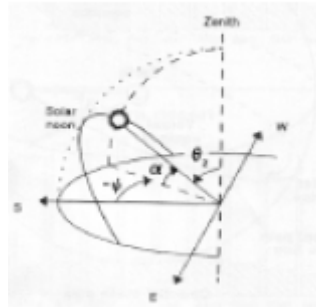


Η ουράνια σφαίρα με την φαινόμενη ετήσια κίνηση του ήλιου

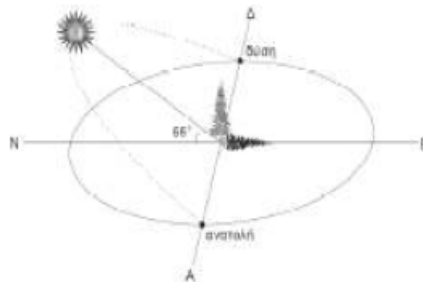
Ένα ακόμα μέγεθος που χρειάζεται στην προσπάθεια υπολογισμού της τελικά προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια και σε κάποιο γεωγραφικό σημείο, είναι η γωνία ζενίθ. Αυτή η γωνία είναι μηδενική όταν ο ήλιος είναι κάθετος στην επιφάνεια και όταν είναι σε οριζόντιο επίπεδο. Θεωρώντας

πως μια οριζόντια επιφάνεια έχει μηδενική κλίση, μπορούμε να βρούμε μια εξίσωση για την γωνία ζενίθ αν στην τελευταία σχέση θέσουμε . Κάτι τέτοιο μας δίνει:

Όπου η γωνία ζενίθ



Ορισμός των γωνιών του ήλιου  $\alpha$ , αζιμούθιας  $\psi$  και ζενιθιακής



Το σύστημα συντεταγμένων για τον προσδιορισμό της ημερήσιας κίνησης του ήλιου

Για να υπολογίσουμε το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει σε μια επιφάνεια σε συγκεκριμένο γεωγραφικό σημείο, θεωρούμε πως η εκπεμπόμενη ακτινοβολία από τον ήλιο είναι σταθερό μέγεθος. Το ποσοστό όμως που φτάνει στην επιφάνεια μεταβάλλεται ανάλογα με την ημερομηνία καθώς εξ αιτίας της κίνησης της γης η απόσταση από τον ήλιο αλλάζει. Για να υπολογίσουμε την κανονικοποιημένη ακτινοβολία που καταφτάνει από τον ήλιο, χρησιμοποιούμε την πιο κάτω εξίσωση:

\_\_\_\_\_

Όπου,

: κανονικοποιημένη ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια ενδιαφέροντος

: ηλιακή σταθερά (1.367kW/m<sup>2</sup>)

n: μέρα του χρόνου (αριθμός από 1 έως 356)

Για να υπολογίσουμε την τελικά προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια, εάν παραλείψουμε την επίδραση της ατμόσφαιρας, έχουμε:

Όπου,

: έξω-ατμοσφαιρική οριζόντια ακτινοβολία (kW/m<sup>2</sup>)

: γωνία ζενίθ

Θέλοντας να υπολογίσουμε την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ωριαία κλίμακα χρησιμοποιούμε τη φόρμουλα:

—

Όπου,

: έξω-ατμοσφαιρική οριζόντια ακτινοβολία (kW/m<sup>2</sup>)

, : ωριαία γωνία στην έναρξη και λήξη του χρονικού βήματος αντίστοιχα

Η πιο πάνω εξίσωση μας δίνει την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια, σε οποιοδήποτε χρονικό βήμα έξω από την ατμόσφαιρα. Ο λόγος των τιμών ηλιακής ακτινοβολίας που διαθέτουμε από μετεωρολογικά δεδομένα προς τις τιμές που υπολογίσαμε μας δίνει έναν παράγοντα καθαρότητας. Αυτός ο παράγοντας υπολογίζεται από τη σχέση:

—

Η ακτινοβολία που φτάνει σε μια επιφάνεια στη γή έχει δύο συνιστώσες. Πρόκειται για την άμεση ακτινοβολία, που προέρχεται απ'ευθείας από τις δέσμες ακτινοβολίας του ήλιου, και για την διάχυτη ακτινοβολία. Η διάχυτη ακτινοβολία προέρχεται από τη διάθλαση του φωτός στην ατμόσφαιρα και σε αντίθεση με την άμεση ακτινοβολία δεν εμποδίζεται από σύννεφα που αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα της προσπέλασης της ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα. Έτσι η συνολική ακτινοβολία δίνεται από τη σχέση:

Όπου,

: άμεση ακτινοβολία

: διάχυτη ακτινοβολία

Ο διαχωρισμός των δύο περιπτώσεων ακτινοβολίας είναι σημαντικός μιας και η άμεση ακτινοβολία που προέρχεται από ένα σημείο του ορίζοντα προσφέρει επίδραση απ'ότι η διάχυτη που έρχεται από όλα τα σημεία του ορίζοντα.

Η διάχυτη ακτινοβολία εμπεριέχει τρεις συνιστώσες. Αυτές είναι η ιστροπική συνιστώσα που έρχεται με τον ίδιο τρόπο από κάθε σημείο του ορίζοντα, μια περιβάλλουσα του ηλίου που είναι αυξημένη στην περιοχή του ορίζοντα που περιβάλλει τη στιγμιαία θέση του ήλιου και την ακτινοβολία του ορίζοντα. Με αυτό το σκεπτικό ορίζουμε τρεις επιπλέον παράγοντες.

---

Η μέτρηση της διαπερατότητας της ατμόσφαιρας σχετικά με την ηλιακή ακτινοβολία δίνεται από τον παράγοντα ανιστροπίας .

---

Ο τελευταίος παράγοντας που χρειάζεται προσδιορισμό είναι αυτός που σχετίζεται με την ακτινοβολία του ορίζοντα. Αυτός ο όρος σχετίζεται με το

πόσο συννεφιασμένος κατά μέσον όρο είναι ο ορίζοντας. Δίνεται από την σχέση:

$$\frac{\quad}{\quad}$$

Τελικά μπορούμε με καλή προσέγγιση να υπολογίσουμε την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε επιφάνεια δοσμένου γεωγραφικού σημείου, κλίσης και εντός ατμόσφαιρας με τον πιο κάτω τύπο:

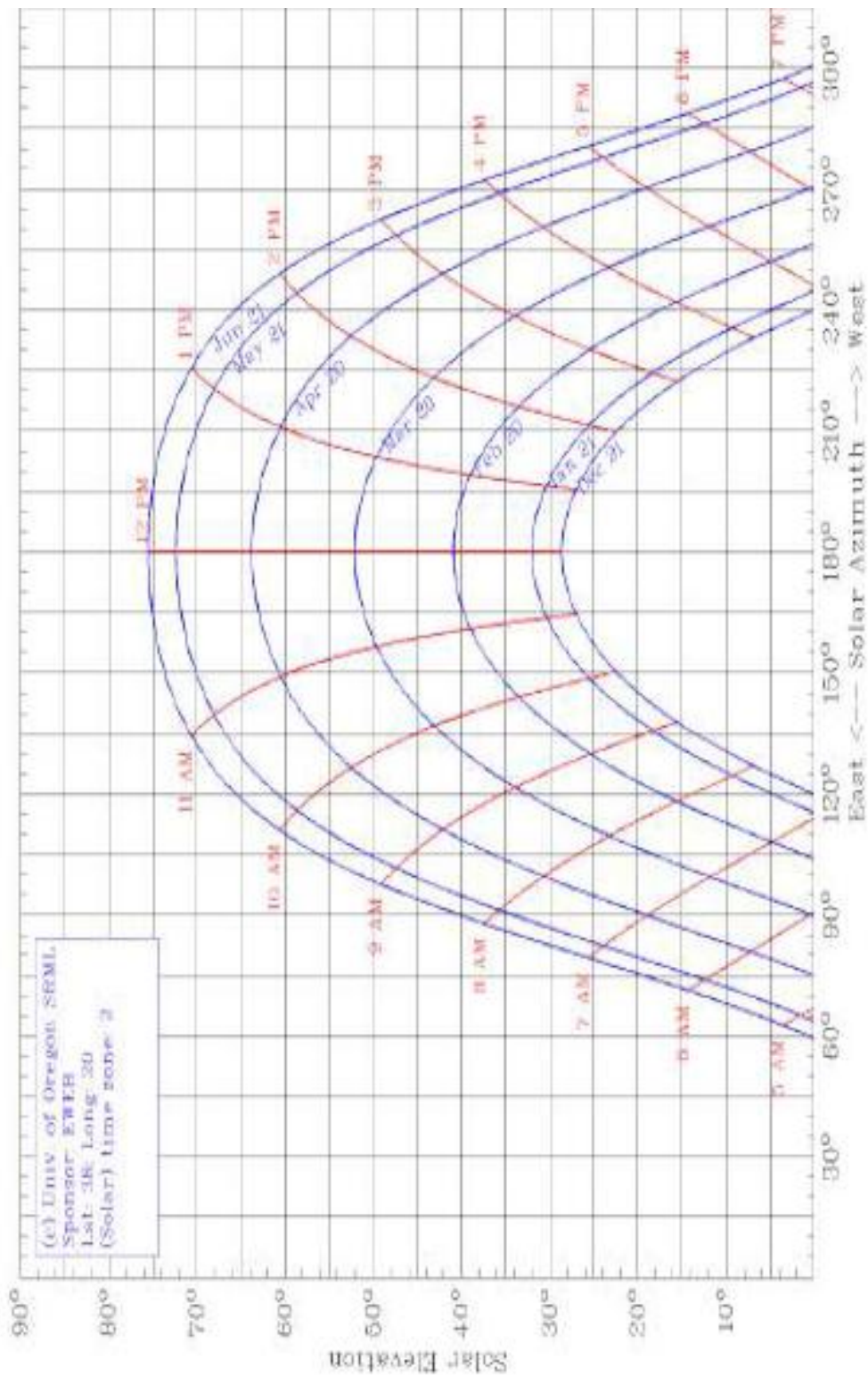
$$+ \frac{\quad}{\quad} - \frac{\quad}{\quad}$$

Όπου,

$\beta$ : κλίση επιφάνειας

$\rho_g$ : αντανάκλαση του εδάφους το οποίο λέγεται και albedo [%]

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι ωριαίες αποτυπώσεις για κάθε μήνα της θέσης του ήλιου για το μέσο γεωγραφικό πλάτος της Ελλάδας των 38 μοιρών.



Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε μία επιφάνεια, όπως αυτή του φωτοβολταϊκού στοιχείου, μπορεί να αυξηθεί και να βελτιωθεί αν αξιοποιηθεί πλήρως από μία κινητή, περιστρεφόμενη μονάδα σύμφωνα με την πορεία του ήλιου. Μία τέτοια διάταξη ονομάζεται φωτοβολταϊκός ιχνηλάτης (solar tracker).

Η χρήση ηλιακών ιχνηλατών επιτυγχάνει αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος καθώς εξασφαλίζεται κάθετη πρόσπτωση της ακτινοβολίας στην φωτοβολταϊκή μονάδα. Ωστόσο η ισχύς που καταναλώνεται για την κίνηση του ιχνηλάτη, το κόστος του καθώς και το κόστος συντήρησής του πρέπει να λαμβάνονται και αυτά υπόψη προκειμένου το συνολικό φωτοβολταϊκό σύστημα να έχει γρήγορη και συμφέρουσα απόσβεση.

### **1.5. Από τι αποτελείται ένα φωτοβολταϊκό σύστημα**

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να αποτελείται από τα παρακάτω υποσυστήματα:

- Φωτοβολταϊκή γεννήτρια μαζί με την μηχανική της υποστήριξη.

Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια είναι το τμήμα μιας εγκατάστασης που περιέχει Φ/Β στοιχεία, δηλαδή ηλεκτρονικές διατάξεις που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια όταν δέχονται ακτινοβολία.

- Φωτοβολταϊκά πάνελ, που είναι υπεύθυνα για την σωστή απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Το φωτοβολταϊκό πάνελ αποτελείται από ένα ή περισσότερα Φ/Β πλαίσια, δηλαδή φωτοβολταϊκά στοιχεία που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια όταν δέχονται ακτινοβολία τα οποία είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα. Στα μεγάλα έργα χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκές συστοιχίες (strings), δηλαδή πολλά Φ/Β πάνελ με ηλεκτρική αλληλοσύνδεση, τοποθετημένα μεταξύ τους πάνω σε μία μεταλλική κατασκευή στήριξης.

- Μπαταρίες-συσσωρευτές, που χρησιμοποιούνται σαν υποσύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε περιπτώσεις που η ηλιακή ακτινοβολία δεν επαρκεί για να φορτίσει το φωτοβολταϊκό σύστημα.

Κατά τη διάρκεια της ημέρας τα Φ/Β στοιχεία συλλέγουν και μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρικό ρεύμα αποθηκεύοντάς το σε μπαταρίες. Η αποθήκευση της ενέργειας είναι απαραίτητη καθώς η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει σημαντική διακύμανση κατά τη διάρκεια μιας ημέρας αλλά και κατά τη διάρκεια του χρόνου. Οι μπαταρίες μπορούν να μας προμηθεύσουν

με ρεύμα όταν αυτό ζητηθεί. Συσσωρευτές συναντάμε μόνο σε αυτόνομα Φ/Β συστήματα.

➤ Εξοπλισμός ελέγχου, καθορισμού της ισχύος καθώς και συστήματα για μετρήσεις. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

◦ Δίοδο φραγής η οποία τοποθετείται ανάμεσα στο Φ/Β στοιχείο και στον συσσωρευτή προκειμένου να αποτρέπει την αποφόρτιση της μπαταρίας.

◦ Ρυμιστή Φόρτισης, μία απαραίτητη συσκευή για τη σωστή λειτουργία των μπαταριών η οποία είναι υπεύθυνη για την ορθή φόρτισή τους και την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής τους. Φροντίζει να προστατεύει τις μπαταρίες από πιθανή υπερφόρτωση ή από ολική αποφόρτιση. Υπάρχουν ρυθμιστές φόρτισης MPPT και οι συμβατικοί ρυθμιστές φόρτισης PWM.

Οι ρυθμιστές φόρτισης MPPT που εγκαθίστανται στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα και καθορίζουν τα κατάλληλα επίπεδα φόρτισης των μπαταριών δημιουργούν προϋποθέσεις λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων παρέχοντας περιορισμένες έως ελάχιστες απώλειες στις πραγματικές τους αποδόσεις.

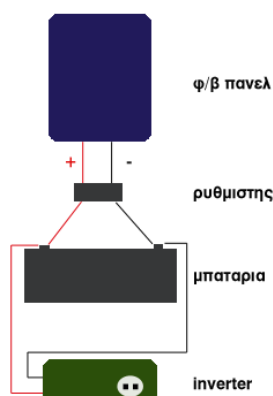
Ένας συμβατικός ρυθμιστής φόρτισης τύπου PWM διανέμει την παραγόμενη ενέργεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου προς τις μπαταρίες περίπου κατά το 80% ενώ η υπολειπόμενη ενέργεια της τάξεως του 20% περίπου χάνεται επειδή οι απλοί ρυθμιστές φόρτισης PWM δεν κάνουν ανίχνευση του μέγιστου σημείου ισχύος του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

◦ Μετατροπέα τάσης ρεύματος / αντιστροφείας (Inverter) για μετατροπή συνεχούς ρεύματος 12V σε εναλλασόμενο 230V. Πρόκειται για μία συσκευή η οποία μετατρέπει το συνεχές (DC) ρεύμα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος σε εναλλασόμενο (AC) προκειμένου να είναι εφικτή η τροφοδοσία οικιακών συσκευών από την μπαταρία του Φ/Β συστήματος.

Οι αντιστροφείς διακρίνονται ως προς τη χρήση τους σε αντιστροφείς διασυνδεδεμένων συστημάτων και σε αυτούς των αυτόνομων συστημάτων, δηλαδή των συστημάτων που είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο της ΔΕΗ. Ως προς την τεχνολογία τους χωρίζονται σε αντιστροφείς καθαρού ημιτόνου ημίτονου (pure / true sine-wave) και τροποποιημένου ημιτόνου (modified sine-wave). Οι πρώτοι μπορεί να έχουν μεγαλύτερο κόστος (3-4 φορές ακριβότεροι



από τους αντιστροφείς τροποποιημένου ημιτόνου) αλλά είναι συμβατοί με όλες τις συσκευές, έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και πετυχαίνουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης.



Τοπολογία αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος

- Τα συστήματα στήριξης των Φ/Β πάνελ

## 1.6. Τεχνολογίες Αντιστροφών

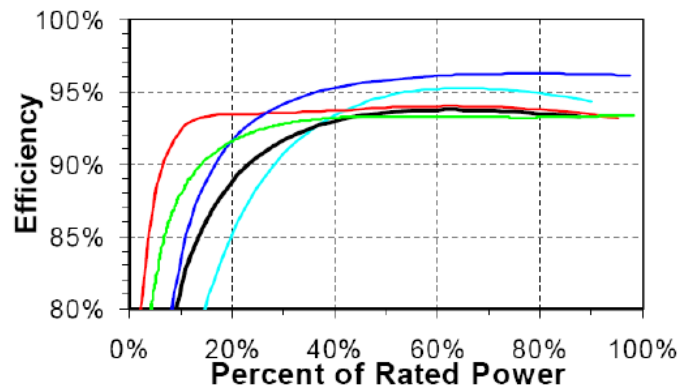
### 1.6.1. Τεχνικά χαρακτηριστικά Αντιστροφών

Ο αντιστροφέας είναι σίγουρα η καρδιά μιας εγκατάστασης. Η επιλογή του σε ένα Φ/Β σύστημα είναι πολύ σημαντικό θέμα. Ο αναστροφέας είναι αυτός που λαμβάνει την DC ισχύ από τη Φ/Β γεννήτρια την μετατρέπει σε AC και την μεταδίδει στο φορτίο ή το δίκτυο, ανάλογα με το αν λειτουργεί απομονωμένα ή όχι.

Το βασικότερο είναι η εκμετάλλευση όλης της ισχύς της Φ/Β πηγής, που σημαίνει ότι αυτό που παράγεται δίνεται στο δίκτυο σε κάθε χρονική στιγμή χωρίς μεγάλες απώλειες. Για το λόγο αυτό θα πρέπει ο αντιστροφέας να έχει διαστασιολογηθεί σωστά, δηλαδή τα ηλεκτρικά του χαρακτηριστικά να είναι συμβατά με αυτά της πηγής που εξυπηρετεί. Επίσης θα πρέπει να τοποθετείται σε χώρο που αερίζεται καλά.

### 1.6.2. Ισχύς αντιστροφέα

Η μέγιστη ισχύς εισόδου του αντιστροφέα είναι η επιτρεπόμενη ονομαστική συνολική ισχύς της Φ/Β πηγής. Ο λόγος της ισχύος αυτής προς την συνολική της πηγής ονομάζεται λόγος ονομαστικής ισχύος και συνήθως λαμβάνει τιμές μεταξύ 95% και 115%. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν περιθώρια υπερ- και υποδιαστασιολόγησης του αντιστροφέα. Στην πράξη συνήθως ο αντιστροφέας υποδιαστασιολογείται, δηλαδή η ονομαστική ισχύς του επιλέγεται λίγο μικρότερη από αυτή της Φ/Β γεννήτριας ώστε να βελτιώνεται η απόδοση σε χαμηλή ισχύ. Το ακόλουθο διάγραμμα δείχνει τη μεταβολή της απόδοσης των αντιστροφέων σε σχέση με την ισχύ που μεταφέρουν.



Μεταβολή της απόδοσης αντιστροφέων σε σχέση με την ισχύ που μεταφέρουν

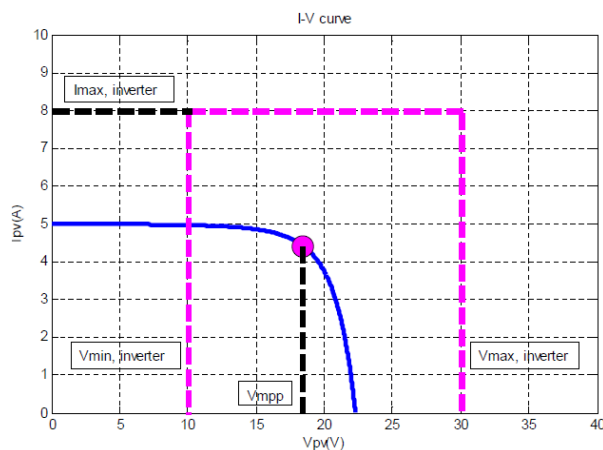
Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι η απόδοση του αντιστροφέα δεν διατηρείται σταθερή σε όλα τα επίπεδα ισχύος. Προκειμένου να έχουμε υψηλές αποδόσεις ο αντιστροφέας πρέπει να είναι κοντά στο πλήρες φορτίο. Όμως αυτό δεν είναι πάντα δυνατό. Μερικά συστήματα δεν φτάνουν ποτέ την ονομαστική τους ισχύ λόγω της ανεπαρκούς κλίσης, του προσανατολισμού ή της ακτινοβολίας στην περιοχή. Οι μέσες ετήσιες αποδόσεις των αντιστροφέων είναι συνήθως 6-8% χαμηλότερες από τις ονομαστικές. Η υποδιαστασιολόγηση μεταθέτει την μέγιστη απόδοση σε πιο χαμηλά επίπεδα ισχύος, στα οποία λειτουργεί ο αντιστροφέας τις περισσότερες ώρες του έτους.

### 1.6.3. Όρια τάσης, παράθυρο MPPT και μέγιστο ρεύμα

Η μέγιστη DC τάση εισόδου του αντιστροφέα θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την συνολική τάση ανοικτού κυκλώματος της Φ/Β πηγής ανηγμένη στην χαμηλότερη αναμενόμενη θερμοκρασία. Η θερμοκρασία αυτή είναι συνήθως οι  $-10^{\circ}\text{C}$ . Για τον υπολογισμό χρειάζεται να είναι γνωστά η τάση ανοικτού κυκλώματος του κάθε πλαισίου καθώς και ο θερμοκρασιακός συντελεστής για την τάση αυτή.

Το εύρος των τάσεων όπου εκτελείται το MPPT δίνεται ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί η συμβατότητα με την τάση MPPT της Φ/Β γεννήτριας. Για την μέγιστη και την ελάχιστη θερμοκρασία θα πρέπει να υπολογιστούν οι αντίστοιχες τιμές τάσης MPPT και να ελεγχθεί ότι βρίσκονται μέσα στο εύρος τάσεων του αντιστροφέα. Ως μέγιστη θερμοκρασία λαμβάνονται συνήθως οι  $70^{\circ}\text{C}$  ή  $75^{\circ}\text{C}$ . Πρέπει να είναι γνωστά η τάση MPPT του κάθε πλαισίου και ο αντίστοιχος θερμοκρασιακός συντελεστής. Θα πρέπει επίσης να ελεγχθεί ότι το ρεύμα της πηγής δεν ξεπερνά το μέγιστο ρεύμα εισόδου του αντιστροφέα.

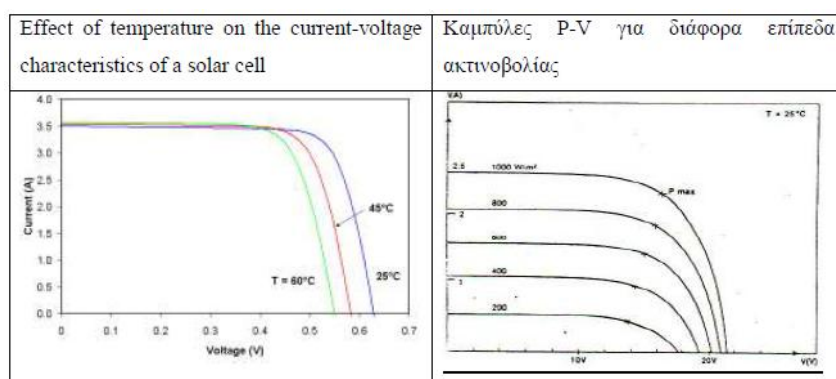
Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η καμπύλη I-V μιας Φ/Β πηγής και τα όρια τάσεως και ρεύματος του αντιστροφέα. Θα πρέπει η I-V στις κανονικές συνθήκες να παρουσιάζει το σημείο MPP κάπου στα μέσα του παραθύρου τάσης του αντιστροφέα, ώστε να υπάρχουν περιθώρια για τις μεταβολές της τάσης της πηγής λόγω θερμοκρασίας.



Καμπύλη I-V Φ/Β πηγής και όρια τάσης και ρεύματος αντιστροφέα

Τα Φ/Β πλαίσια ανάλογα με το είδος και τα στοιχεία που έχουν σε σειρά, παρουσιάζουν σχετικά κοντινές τιμές τάσεως ανοικτού κυκλώματος και MPP.

Σύμφωνα με αυτές τις τιμές, ο κατασκευαστής μπορεί να προτείνει την βέλτιστη διαμόρφωση της Φ/Β πηγής που θα συνδεθεί στον αντιστροφέα. Τέτοιες πληροφορίες βρίσκονται συνήθως στα εγχειρίδια λειτουργίας και εγκατάστασης των αντιστροφέων.



Από τις παραπάνω καμπύλες φαίνεται η σημαντική επίδραση της θερμοκρασίας στην τάση εξόδου των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Για αυτό το λόγο η διαστασιολόγηση του αντιστροφέα γίνεται σε ακραία όρια θερμοκρασίας (-10°C, +70°C) ώστε πάντα ο αντιστροφέας να λειτουργεί εντός ορίων MPP. Επιπλέον φαίνεται και μία μικρή μείωση της τάσης με μείωση της ηλιοφάνειας. Για αυτό το σκοπό πρέπει να διαστασιολογούμε την συστοιχία κοντά στο πάνω όριο του παραθύρου MPP του αντιστροφέα.

#### 1.6.4. ACC έξοδος του αντιστροφέα

Όσον αφορά την έξοδο του αντιστροφέα, αυτό που θα πρέπει να ελεγχθεί είναι η συμβατότητα με το δίκτυο που θα συνδεθεί το σύστημα ως προς την τάση και την συχνότητα. Για το ελληνικό δίκτυο οι κατάλληλες τιμές είναι 230V και 50Hz αντίστοιχα (μονοφασικοί αντιστροφεείς). Πληροφορίες συνήθως δίνονται και για την ποιότητα της ισχύος εξόδου, όπως η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος εξόδου. Μία άλλη πληροφορία είναι ο συντελεστής ισχύος της εξόδου του αντιστροφέα. Η τιμή που επιδιώκεται είναι η μονάδα (μοναδιαίος συντελεστής ισχύος), που σημαίνει ότι ο αντιστροφέας δεν παράγει ούτε καταναλώνει άεργο ισχύ.

### **1.6.5. Αποδόσεις**

Πολύ σημαντικός συντελεστής είναι η μέγιστη απόδοση του αντιστροφέα, η οποία όπως εξηγήθηκε παραπάνω επιτυγχάνεται μόνο σε συγκεκριμένα επίπεδα ισχύος εξόδου. Η μεταβολή της απόδοσης ανάλογα με την ισχύ δίνεται από την καμπύλη απόδοσης η οποία συνήθως περιλαμβάνεται στην τεχνική περιγραφή του αντιστροφέα. Επίσης στα διάφορα εγχειρίδια μπορεί να υπάρχει πρόταση του κατασκευαστή για το βαθμό υποδιαστασιολόγησης του αντιστροφέα.

Η ευρωπαϊκή απόδοση (euro-eta) είναι ένας τρόπος εκτίμησης της απόδοσης των αντιστροφέν σε τυπικές συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας στην Ευρώπη. Ορίζεται ως εξής:

Ο δείκτης των αποδόσεων που συμμετέχουν στον προσδιορισμό του αναφέρεται στο ποσοστό επί της ονομαστικής ισχύος. Η ευρωπαϊκή απόδοση είναι πιο κοντά στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας της Φ/Β πηγής.

### **1.6.6. Διαστασιολόγηση Μετατροπέων**

Όταν πρόκειται να διαστασιολογήσουμε έναν μετατροπέα, ελέγχουμε το παράθυρο  $m_{pp}$  για τις ακραίες θερμοκρασίες ( $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $+70^{\circ}\text{C}$ ) και βλέπουμε αν η τάση είναι εντός του παραθύρου. Συνήθως επιλέγουμε την τάση στου  $-10^{\circ}\text{C}$  να είναι ελάχιστα πιο χαμηλή από το άνω όριο τάσης του  $m_{pp}$  παραθύρου. Όσο αφορά στην DC ισχύ εισόδου του μετατροπέα, καλό είναι να μην υπερδιαστασιολογείται ο μετατροπέας. Στον Ελληνικό χώρο παρατηρούμε ηλιοφάνεια κοντά και πάνω από τα  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , καθώς και η ετήσια παραγωγή είναι μεγαλύτερη από  $1000\text{KWh}/\text{kWp}$ -έτος. Κατά συνέπεια καλό είναι να μην ξεπερνιέται η ενδεδειγμένη DC ισχύς εισόδου του μετατροπέα.

### **1.6.7. Επιλογή αντιστροφέν**

Μια πολύ σημαντική παράμετρος στο σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού πάρκου είναι η επιλογή των αντιστροφέν. Ο προβληματισμός είναι

- String inverter - Central Inverter
- Μονοφασικός ή τριφασικός
- Με μετασχηματιστή ή χωρίς (TL)

Δεν υπάρχει σαφές κριτήριο

#### **1.6.8. Μονοφασικός ή τριφασικός**

Η επιλογή αυτή είναι σχεδόν ανεξάρτητη με το μέγεθος του αντιστροφέα. Για εγκαταστάσεις πάνω από 5KW η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού επιβάλλει τριφασική σύνδεση. Άρα μία εγκατάσταση για παράδειγμα 10KW θα μπορούσε να γίνει με χρήση είτε ενός τριφασικού αντιστροφέα είτε τριών μονοφασικών αντιστροφέων.

Άρα για οποιαδήποτε ισχύ  $> 5KW$  χρησιμοποιούμε είτε τριφασικούς αντιστροφείς είτε μονοφασικούς αντιστροφείς σε πολλαπλάσιο του 3 ώστε να υπάρχει συμμετρία φάσεων.

Επίσης σε περίπτωση χρήσης μονοφασικών αντιστροφέων σε πιθανή αποσύνδεση ενός μονοφασικού αντιστροφέα θα πρέπει να αποσυνδέονται και άλλοι 2 αντιστροφείς ώστε να τηρείται η συμμετρία φάσεων. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση ενός power balancer.

Επίσης σε μία μεγάλη εγκατάσταση η οποία υλοποιείται με string inverter σε περίπτωση χρήσης 9 μονοφασικών inverter για παράδειγμα θα χρησιμοποιήσουμε 9x3 καλώδια AC ενώ αν για την ίδια ισχύ χρησιμοποιηθεί 1 τριφασικός αντιστροφέας για την ίδια ισχύ τότε τα καλώδια θα είναι 3, μεγαλύτερης βέβαια διατομής (χρησιμοποιούνται επίσης και περισσότερα καλώδια DC λόγω της μεγαλύτερης απόστασης καθώς ο αντιστροφέας καλύπτει μεγαλύτερη περιοχή ενδιαφέροντος).

#### **1.6.9. String Inverter - Central Inverter**

Με τους string inverter επιτυγχάνουμε καλύτερο έλεγχο mppt, καθώς αυτός γίνεται τοπικά σε κάθε string ή σε ομάδες των 2-3 strings (ανάλογα με την

καλωδίωση και την χρήση ή υποπίνακα DC πριν τον κάθε αντιστροφέα). Με αυτό τον τρόπο πιθανότατα βελτιώνεται ο βαθμός απόδοσης στο θέμα mppt.

Ένα άλλο πλεονέκτημα της χρήσης πολλών string inverter είναι το γεγονός ότι σε περίπτωση βλάβης θα βγει εκτός παραγωγής μόνο ένα μικρό ποσοστό της ισχύος, άρα θα χαθεί μικρό ποσοστό παραγωγής ενέργειας, ενώ σε περίπτωση χρήσης κεντρικών αντιστροφέων σε ενδεχόμενη βλάβη θα χαθεί μεγάλο ποσοστό της ενεργειακής παραγωγής.

Όμως με τη χρήση πολλών string inverter αυξάνεται η πολυπλοκότητα της εγκατάστασης. Η χρήση των καλωδίων είναι σχετική ανάλογα με την ηλεκτρολογική μελέτη και τεchnοοικονομικά κριτήρια.

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα των central inverters είναι ότι η κατασκευή τους είναι πιο στιβαρή και ότι τοποθετούνται εντός αυτοφερόμενου οικίσκου, άρα είναι πιο εύκολη η εγκατάστασή τους σε εξωτερικό χώρο.

#### **1.6.10. Με Μετασχηματιστή ή Χωρίς (TL)**

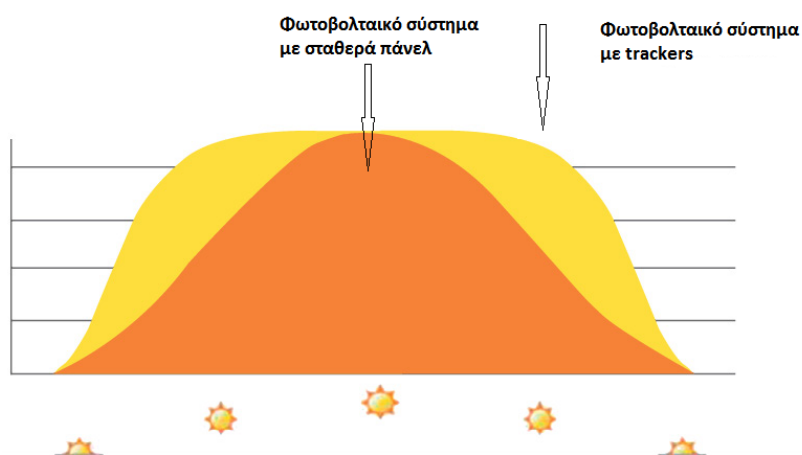
Ένας τυπικός αντιστροφέας παράγει μία AC τάση κάποιων Volt. Για να προσαρμοστεί η τάση αυτή στην τάση του δικτύου 230/400V χρησιμοποιείται μετασχηματιστής χαμηλής τάσης. Η ύπαρξη αυτού του Μετασχηματιστή αυξάνει τις απώλειες και κατά συνέπεια τον συντελεστή απόδοσης του αντιστροφέα, διαχωρίζει όμως τον αντιστροφέα από το Ηλεκτρικό Δίκτυο προσφέροντας περαιτέρω προστασία στα ηλεκτρονικά του κυκλώματα και απόσβεση των αρμονικών που παράγουν τα ηλεκτρονικά ισχύος ώστε να μην διοχετεύονται στο Δίκτυο.

Τα τελευταία χρόνια υπάρχουν στην αγορά αντιστροφείς χωρίς χρήση μετασχηματιστή απομόνωσης. Οι αντιστροφείς αυτοί χρησιμοποιούν γέφυρα απομόνωσης και έχουν μεγαλύτερη απόδοση από τους αντιστροφείς με μετασχηματιστή με απόδοση μεγαλύτερη από 97%.

## Κεφάλαιο 2

### 2.1. Ηλιακοί Ιχνηλάτες

Εκτός από τα συστήματα στα οποία τα φωτοβολταϊκά πάνελ έχουν συγκεκριμένη θέση και κλίση πάνω σε σταθερές βάσεις, υπάρχουν και αυτά στα οποία μπορούν να τοποθετηθούν πάνελ που συνεχώς προσανατολίζονται προς την κατεύθυνση του ήλιου. Τα συστήματα ηλιακής παρακολούθησης λέγονται ηλιακοί ιχνηλάτες (solar trackers). Το αποτέλεσμα από την χρήση τέτοιων συστημάτων είναι η μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας της Φ/Β εγκατάστασης καθώς αυξάνεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μιας και η επιφάνεια των πάνελ βρίσκεται συνεχώς κάθετα ως προς τις ηλιακές ακτίνες. Θεωρητικά ένας ηλιακός ιχνηλάτης μπορεί να αυξήσει την παραγωγή του Φ/Β συστήματος κατά +30% το καλοκαίρι και +15% το χειμώνα.



Απόδοση σταθερού Φ/Β συστήματος και Φ/Β συστήματος με trackers

### 2.2. Ταξινόμηση Ηλιακών Ιχνηλατών

Οι ηλιακοί ιχνηλάτες μπορούν να ταξινομηθούν ως ενεργητικοί και παθητικοί. Στην περίπτωση παθητικού συστήματος, ο ιχνηλάτης παρακολουθεί την πορεία του ήλιου από την ανατολή στη δύση χωρίς τη χρήση οποιουδήποτε τύπου ηλεκτρικής μηχανής που θα μπορούσε να τροφοδοτεί την κίνηση. Αυτά τα συστήματα είναι ιδανικά σε εγκαταστάσεις αυτόνομων συστημάτων.



Ωστόσο οι παθητικοί ηλιακοί ιχνηλάτες παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία όπως σε περιπτώσεις αυξημένου ανέμου ή χαμηλών θερμοκρασιών.

Υπάρχουν 3 βασικά είδη παθητικών ηλιακών ιχνηλατών ανάλογα με τον άξονα στον οποίο γίνεται η κίνησή τους:

1. Παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου στον κάθετο άξονα (vertical axis tracker). Επιτυγχάνεται μικρή αύξηση της απόδοσης του συστήματος.
2. Παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου στον οριζόντιο άξονα (horizontal axis tracker). Επιτυγχάνεται μεσαία αύξηση της απόδοσης του συστήματος.

Οι ηλιοστάτες ενός άξονα παρακολουθούν την ημερήσια (αζιμουθιακή) κίνηση του ήλιου, έχοντας σταθερή κλίση ως προς το εποχικό ύψος του ήλιου. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται αισθητά η απόδοση σε σχέση με τα συστήματα σταθερής τοποθέτηση φωτοβολταϊκών στοιχείων.

3. Παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου τόσο στον κάθετο όσο και στον οριζόντιο άξονα (dual axis tracker). Επιτυγχάνεται μέγιστη αύξηση της απόδοσης του συστήματος.

Στην περίπτωση ενεργειακού συστήματος ηλιακών ιχνηλατών, η παρακολούθηση της πορείας του ήλιου γίνεται με τροφοδότηση του συστήματος από μικρές ηλεκτρικές μηχανές που χρειάζονται κάποιον έλεγχο προκειμένου να μπορέσουν να κατευθύνουν τα πάνελ.

Επίσης οι ηλιακοί ιχνηλάτες διακρίνονται ανάλογα και με τη μέθοδο που δίνει κίνηση στους άξονες του συστήματος:

1. Ηλιοστάτες με υδραυλικά συστήματα κίνησης
2. Ηλιοστάτες με ηλεκτρικά συστήματα κίνησης

### **2.3. Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα Ηλιακών Ιχνηλατών**

Μπορεί η χρήση ηλιακών ιχνηλατών να επιτυγχάνει μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά θα πρέπει κάθε φορά να ζυγίζονται τόσο τα πλεονεκτήματα όσο και τα μειονεκτήματα μιας τέτοιας εγκατάστασης.

Επιτυγχάνουμε λοιπόν μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και την γρηγορότερη απόσβεση του κόστους της επένδυσης για την δημιουργία της εγκατάστασης.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα από τη χρήση ηλιακού ιχνηλάτη είναι:

- Αύξηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- Αύξηση απόδοσης φωτοβολταϊκών μονάδων από 10% έως και 30%
- Γρήγορη απόσβεση κόστους της επένδυσης που απαιτείται για την εγκατάσταση
- Ανθεκτικότητα κατασκευής
- Εύκολη διαδικασία εγκατάστασης
- Κατασκευή συστημάτων σε διάφορα μεγέθη

Μερικά από τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι ηλιακοί ιχνηλάτες είναι:

- Εφαρμογή μόνο σε περιοχές με υψηλό ποσοστό άμεσης ακτινοβολίας
- Αυξημένο κόστος επένδυσης
- Πολυπλοκότητα του συστήματος καθώς περιέχει κινητά μέρη-αύξηση πιθανότητας βλαβών
- Αυξημένο κόστος συντήρησης
- Αυξημένος κίνδυνος βλάβης-καταστροφής σε περίπτωση ακραίων καιρικών συνθηκών (π.χ. ανεμοπιέσεις)
- Κατανάλωση ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας για την περιστροφική κίνηση του συστήματος
- Δραματική αύξηση του απαιτούμενου χώρου εγκατάστασης για την ίδια ισχύ

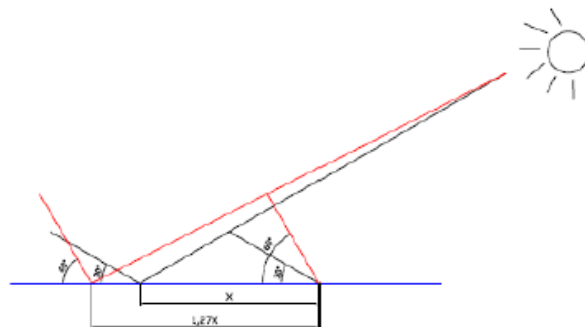
Από την παραπάνω απαρίθμηση καθίσταται σαφές ότι η ύπαρξη κινούμενου μηχανισμού προκαλεί προβλήματα στην κατασκευή. Επιπλέον οι εγκαταστάσεις τέτοιων συστημάτων παρουσιάζονται ογκώδεις και απαιτούν αρκετές φορές εξειδικευμένες κατασκευές. Επίσης, οι περισσότεροι trackers, σε περίπτωση ανεμοπίεσης, με ταχύτητα μεγαλύτερη από 80-100Km/h, οριζοντιώνονται για τον περιορισμό της και κατά συνέπεια χάνουν παραγωγή.

Όμως με το να οριζοντιώνονται οι trackers οδηγεί σε ένα πλεονέκτημα. Ο ήλιος περνά πίσω από τον άξονα Ανατολής-Δύσης με αποτέλεσμα να υπάρχει ακόμα ενεργειακή απολαβή από άμεση προσπίπτουσα ακτινοβολία η οποία δεν υπάρχει σε άλλη περίπτωση.

## 2.4. Χωροθέτηση Ηλιακών Ιχνηλατών

### Περίπτωση απλού άξονα

Τα συστήματα trackers ακολουθούν τον ήλιο. Ας πάρουμε για παράδειγμα την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου με τον ήλιο να βρίσκεται ενδεικτικά σε ύψος 30 μοίρες. Κατά συνέπεια ο tracker βρίσκεται σε θέση 60 μοίρες για την μεγιστοποίηση της ενεργειακής απολαβής. Τότε για να υπάρχει άμεση πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας στην πίσω σειρά με πάνελ, η πίσω σειρά πρέπει να απέχει περισσότερο. Ενδεικτικά, η πίσω σειρά στην περίπτωση που ο tracker βρίσκεται σε κλίση 60 μοίρες πρέπει να βρίσκεται σε διπλάσια απόσταση από ότι θα βρισκόταν χωρίς χρήση tracker. Κατά συνέπεια η συνολικά απαιτούμενη έκταση είναι 30% μεγαλύτερη.



### Περίπτωση διπλού άξονα

Η μεγαλύτερη αύξηση του χώρου εγκατάστασης έρχεται από την περίπτωση χρήσης tracker διπλού άξονα, τον άξονα Ανατολής-Δύσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε συστήματα σταθερά ή απλού άξονα (Βορρά-Νότου) δεν

απαιτείται η ύπαρξη κενών, ενώ αυτό είναι απαραίτητο στην περίπτωση tracker.



## 2.5. Τεχνολογίες Ηλιακών Ιχνηλατών

### Απλού άξονα

Η τεχνολογία απλού άξονα συνίσταται στην παρακολούθηση του ύψους του ήλιου ή στην παρακολούθηση του ήλιου σε Ανατολή και Δύση.

Στην περίπτωση παρακολούθησης του ύψους του ήλιου, ο μηχανισμός κίνησης είναι πολύ απλός. Η κίνηση βασίζεται στην ύπαρξη ενός βραχίονα ο οποίος κινείται εμπρός-πίσω και με την κίνησή του ωθεί τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες να περιστρέφονται γύρω από τον άξονά τους. Έτσι ένας μηχανισμός μπορεί να ελέγχει αρκετές σειρές φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Προϋπόθεση βέβαια είναι οι συστοιχίες να έχουν το πολύ 2 πάνελ. Η κατασκευή εδράζεται σε βάθρα ή σε πασσάλους και στα πάνελ δίνεται η δυνατότητα περιστροφικής κίνησης. Με αυτό τον απλό μηχανισμό έχουν λίγους μηχανισμούς κίνησης και η απαιτούμενη έκταση είναι ελάχιστα μεγαλύτερη. Η παραγωγή μπορεί να είναι έως και 15% μεγαλύτερη.



Υπάρχουν και περιπτώσεις παρακολούθησης του ήλιου κατά την Ανατολή-Δύση. Μία περίπτωση είναι η χωροθέτηση των πάνελ σε κυκλική διάταξη και η δυνατότητα περιστροφής όλης της κατασκευής. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση σιδηροτροχιών επί σκυροδέματος ή επί μεταλλικής κατασκευής. Η δομική κατασκευή είναι αρκετά πολύπλοκη γεγονός που αυξάνει το κόστος. Όσον αφορά την απαιτούμενη έκταση, αυτή είναι κατά 50% μεγαλύτερη. Αυτό οφείλεται κυρίως στην απόσταση μεταξύ Ανατολής-Δύσης μεταξύ των όμορων κατασκευών.



Μία άλλη περίπτωση είναι η περιστροφή κατά άξονα, όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.

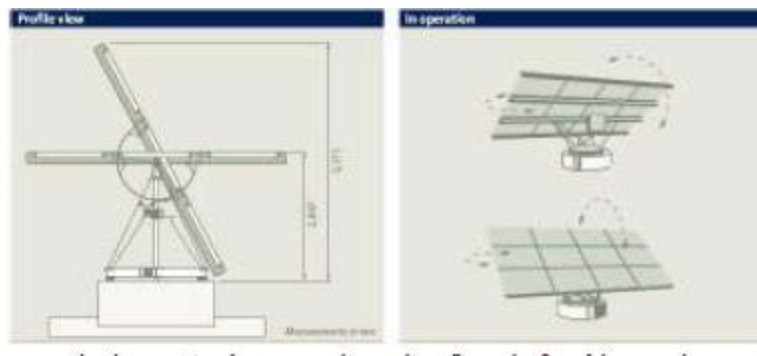


## 2.6. Τεχνικά Στοιχεία εγκαταστάσεων Ηλιακών Ιχνηλατών

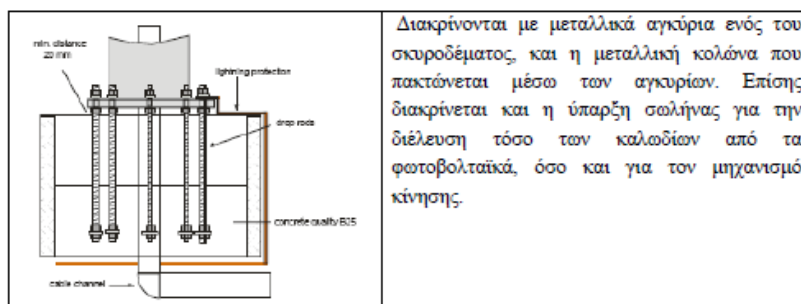
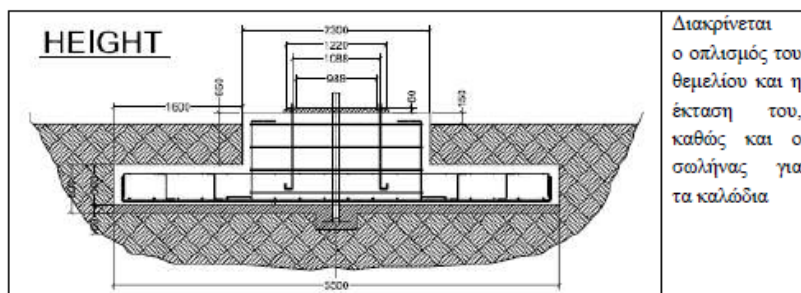
Τα συνηθισμένα tracker διπλού άξονα έχουν ένα κυκλικό θεμέλιο από σκυρόδεμα πάνω στο οποίο αγκυρώνεται μία μεταλλική κολώνα στην κορυφή της οποίας στηρίζεται η κατασκευή στήριξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων.



Εναλλακτικά η κατασκευή μπορεί να πακτώνεται απευθείας πάνω στο θεμέλιο.



Κατασκευαστικά τώρα ο tracker απαιτεί την ύπαρξη ενός θεμελίου κατά το πρότυπο των θεμελίων των Ανεμογεννητριών. Το θεμέλιο είναι κυκλικό και έχει μεγαλύτερη διάμετρο εντός του εδάφους. Εντός του θεμελίου τοποθετούνται τα αγκύρια σε προκαθορισμένη θέση έτσι ώστε να βιδωθεί σε αυτά η ανωδομή της κατασκευής.



Όπως προκύπτει η κατασκευή του θεμελίου δεν είναι απλή υπόθεση και είναι αρκετά πιο χρονοβόρα σε σύγκριση με την κατασκευή απλών πεδίων. Είναι αρκετά πιο πολύπλοκο δε, αν απαιτείται η κατασκευή σιδηροτροχιάς.

Δεδομένου ότι η χρήση tracker μονού άξονα αυξάνει την ενεργειακή απολαβή χωρίς ιδιαίτερη αύξηση της απαιτούμενης έκτασης, της πολυπλοκότητας της εγκατάστασης, του κόστους και χωρίς την ύπαρξη πολλών κινούμενων μερών και μηχανισμών κίνησης, δείχνει να είναι προτιμητέα σε σύγκριση με τους trackers διπλού άξονα.

## Κεφάλαιο 3

### 3.1. Κατασκευή Solar Tracker πάνω σε κινούμενο όχημα

Τα τελευταία χρόνια ολοένα και περισσότεροι ιδιοκτήτες οχημάτων όπως τροχόσπιτα, σκάφη αναψυχής ακόμα και διάφορα επαγγελματικά οχήματα καταφεύγουν στη λύση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος για τη συντήρηση των μπαταριών τους, η ακόμα και για μικρές καταναλώσεις. Τέτοιου είδους καταναλώσεις μπορεί να είναι ραντάρ, ψυγεία, ένα σύστημα ασφαλείας, φωτισμός ή ακόμα και μία μικρή τηλεόραση. Τα συστήματα όμως αυτά περιορίζονται τόσο από τις διαστάσεις τους όσο και από τη θέση στην οποία βρίσκονται γιατί δεν έχουν σταθερό προσανατολισμό καθώς το ύψος του ηλίου αλλάζει συνεχώς σε σχέση με τη θέση των οχημάτων.

Η ιδέα ενός ηλιακού ιχνηλάτη πάνω σε τέτοιου είδους οχήματα βασίστηκε στα δύο παραπάνω προβλήματα, τις διαστάσεις και τον λανθασμένο προσανατολισμό. Σε ότι αφορά τις διαστάσεις, μπορούμε να αυξήσουμε σημαντικά την απόδοση ενός συστήματος τοποθετώντας λιγότερα και μικρότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Ένα ακόμα μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της ιδέας είναι ότι μπορούμε να επιτύχουμε σωστό προσανατολισμό του φωτοβολταϊκού στοιχείου, κάτι που είναι εξαιρετικά δύσκολο με οποιαδήποτε σταθερή βάση, από τη στιγμή που τα οχήματα δεν διατηρούν σταθερή τη θέση τους.

Αρχικός μας στόχος ήταν να δημιουργήσουμε μία κατασκευή προσομοιώνοντας και τους δύο βαθμούς ελευθερίας που απαιτεί μία τέτοια λειτουργία, δηλαδή κίνηση τόσο στον οριζόντιο άξονα όσο και στον κατακόρυφο. Λόγω κατασκευαστικών προβλημάτων όμως, ασχοληθήκαμε με τον οριζόντιο προσανατολισμό (αζιμούθιο) και όχι με το ύψος του ηλίου.

### 3.2. Από τι αποτελείται

Για να μπορέσουμε να υλοποιήσουμε αυτή την ιδέα, έπρεπε πρώτα να τη σχεδιάσουμε έτσι ώστε να μπορέσουμε όσο το δυνατόν νωρίτερα να προβλέψουμε τις κατασκευαστικές δυσκολίες. Έτσι ξεκινήσαμε υλοποιώντας τον κορμό της κατασκευής από ξύλο. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήσαμε



κόντρα πλακέ πάχους 4mm καθώς και κάποιους δοκούς για να πετύχουμε την συναρμολόγηση του κόντρα πλακέ. Το κόντρα πλακέ μας έδωσε τις μηχανικές αντοχές οι οποίες ήταν απαραίτητες για να στηρίξουμε το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας αυτό το υλικό καταφέραμε να δώσουμε εύκολα το σχήμα που επιθυμούσαμε.

Η κίνηση του φωτοβολταϊκού γίνεται με έναν βηματικό κινητήρα ο οποίος στηρίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε με τη χρήση δύο πλαστικών γραναζιών να μπορούν αυτά να το περιστρέψουν. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, μέσω ενός ρυθμιστή φόρτισης τύπου PWM της εταιρείας Phocos, φορτίζει έναν συσσωρευτή μολύβδου 12V 2,3Ah. Τέλος, στο ηλεκτρονικό κύκλωμα συνδέονται και όλα τα αισθητήρια τα οποία δίνουν πληροφορίες για τη σχετική θέση του ηλίου ως προς το όχημα.

Στο ηλεκτρονικό κύκλωμα συνδέεται ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής ο οποίος χρησιμοποιεί τα δεδομένα των αισθητήρων και δίνει εντολή στον κινητήρα να κινείται όποτε αυτό χρειάζεται.

Πιο κάτω αναφέρονται αναλυτικά όλα τα επιμέρους στοιχεία, με την λειτουργία τους, από τα οποία αποτελείται η κατασκευή:

### 3.2.1. Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο μέγιστης Ισχύος 5Wp

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο το οποίο χρησιμοποιήσαμε είναι 5Wp με ανοχή +/- 3% της σειράς Solo Line 5 της εταιρείας LUXOR. Το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε στοιχειοσειρά (string) της οποίας η συνολική τάση δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 150V. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Φωτοβολταϊκού πλαισίου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Description	Solo Line 5
Pmpp	5Wp (+/- 3%)
Ump	17.39V
Impp	0.29A
Uoc	21.60V

Isc	0.32A
Max system voltage	150V DC

Αναλύοντας τα δεδομένα του πίνακα βλέπουμε ότι το πάνελ αυτό μπορεί να αποδώσει μέχρι 5W με ανοχή 3% που μπορεί να είναι είτε θετική είτε αρνητική. Η τάση  $V_{mp}$  είναι η μέγιστη τάση λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου, το ρεύμα  $I_{mp}$  είναι η μέγιστη τιμή της έντασης του ρεύματος που μπορεί να δώσει, το  $V_{oc}$  είναι η μέγιστη τάση που μπορούμε να μετρήσουμε όταν το πάνελ δεν έχει συνδεθεί σε κάποια στοιχειοσειρά και το ρεύμα  $I_{sc}$  είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης, όπως συνηθίζεται να λέγεται. Είναι το ρεύμα δηλαδή που θα μας δώσει το πλαίσιο αν ενώσουμε τους δύο του πόλους χωρίς στην πραγματικότητα να υπάρχει κανένα φορτίο.

Πρέπει επίσης να προσέξουμε πολύ τον παράγοντα της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πάνελ, η οποία είναι συνήθως κατά 25-30°C υψηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έτσι συνήθως οι κατασκευαστές παρέχουν τα δεδομένα της ισχύος, τάσης και ρεύματος στις λεγόμενες NOCT συνθήκες (Normal Operating Cell Temperature), οι οποίες αντιστοιχούν σε θερμοκρασία κελιού περί τους 45-48°C για θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C, ένταση ακτινοβολίας 800W/m<sup>2</sup>, φασματική κατανομή AM=1.5 και ταχύτητα ανέμου 1m/sec. Με αυτά τα δεδομένα είμαστε σε θέση να έχουμε μια περισσότερο ρεαλιστική εικόνα για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, αναφορικά με τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

### 3.2.2. Ρυθμιστής φόρτισης 4A

Ο ρυθμιστής φόρτισης που επιλέξαμε για την φόρτιση της μπαταρίας είναι ένας μικρός ρυθμιστής τεχνολογίας PWM. Είναι ένας ρυθμιστής που λειτουργεί στα 12V και αντέχει ρεύμα εισόδου μέχρι 4A. Δέχεται διατομή καλωδίου μέχρι 16 τετραγωνικά χιλιοστά ενώ η προστασία του από σκόνη και νερό είναι IP22. Το πρώτο από τα δύο ψηφία σημαίνει ότι σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα υπάρχει προστασία εισόδου στερεών αντικειμένων διαμέτρου άνω των 12mm ενώ το δεύτερο ψηφίο σημαίνει ότι η προστασία του από το νερό ισχύει σε περίπτωση που αυτό στάζει κατακόρυφα και η κλίση του

μηχανήματος δεν ξεπερνάει τις 15 μοίρες. Σε περιπτώσεις που δεν υπάρχουν αυτές οι συνθήκες τότε παύουν να ισχύουν οι προστασίες έναντι στα στερεά αντικείμενα και το νερό.

Το μεγάλο μειονέκτημα των ρυθμιστών φόρτισης PWM έναντι των MPPT είναι ότι εκτός από την απόδοσή τους που είναι αρκετά μικρότερη και αναφέρεται σε προηγούμενο κεφάλαιο, δεν έχει μεγάλο εύρος τάσης φωτοβολταϊκής πηγής με αποτέλεσμα να μην είναι επεκτάσιμοι. Εμείς επιλέξαμε τον συγκεκριμένο ρυθμιστή φόρτισης καθώς το ρεύμα φόρτισης και το ρεύμα της κατάλυσης, από το ηλεκτρονικό κύκλωμα και τον βηματικό κινητήρα, είναι λιγότερο από 1A οπότε και μας καλύπτει. Επίσης έχει αρκετά μικρό κόστος το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα να τον κάνει πιο προσιτό.

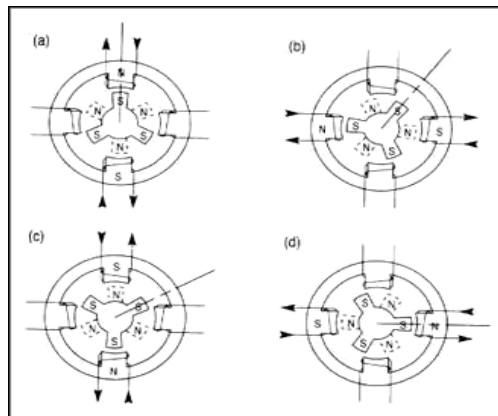
### **3.2.3. Βηματικός κινητήρας**

Για την κίνηση του ηλιακού ιχνηλάτη επιλέξαμε έναν βηματικού κινητήρα. Ο κυριότερος λόγος είναι ότι μπορούμε να κάνουμε κινήσεις ακριβείας με μεγαλύτερη ευκολία απ'ότι με έναν κινητήρα DC.

Με τη χρήση ενός κυκλώματος διπολικής οδήγησης βηματικού κινητήρα επιτυγχάνουμε την αριστερόστροφη ή τη δεξιόστροφη κίνηση αντίστοιχα. Το κεφάλαιο των βηματικών κινητήρων θα μπορούσε να αποτελέσει πολύ μεγάλο μέρος της εργασίας για να μπορέσουμε να το αναλύσουμε πλήρως. Για το λόγο αυτό θα δούμε τη γενική λειτουργία των βηματικών κινητήρων και στη συνέχεια τον τρόπο με τον οποίο ελέγχουμε τον δικό μας κινητήρα.

Όπως παρατηρούμε στο παρακάτω σχήμα ο βηματικός κινητήρας έχει πολλά κοινά σημεία με ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος (DC). Στην πραγματικότητα είναι DC κινητήρας με τη διαφορά ότι λειτουργεί με παλμούς συνεχούς τάσης και όχι με ένα μόνιμο σταθερό συνεχές ρεύμα. Η διαφορά αυτή είναι που του δίνει τα πλεονεκτήματα αλλά και τη διαφορετικότητα από τους DC κινητήρες. Αναλύοντας λοιπόν τον τρόπο λειτουργίας των βηματικών κινητήρων παρατηρούμε ότι μας επιτρέπουν να κάνουμε κινήσεις ακριβείας καθώς η μεγάλη ροπή που παρουσιάζουν, εκτός από τη μεγάλη εκκίνηση που προσφέρουν, δίνουν και άμεσο σταμάτημα. Με έναν απλό κινητήρα

συνεχούς ρεύματος είναι αδύνατο να πετύχουμε κάτι τέτοιο χωρίς την χρήση πρόσθετων κυκλωμάτων. Ένα άλλο πλεονέκτημα ενός βηματικό κινητήρα είναι ότι οι στροφές του κινητήρα είναι ανάλογες των παλμών που του στέλνουμε. Μπορούμε δηλαδή κάθε στιγμή να γνωρίζουμε τον ακριβή αριθμό των στροφών του κινητήρα στη μονάδα του χρόνου, χωρίς πρόσθετο κύκλωμα ανίχνευσης αυτών. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται σχηματικά η δομή των βηματικών κινητήρων.



Δομή βηματικών κινητήρων

Αν παρατηρήσουμε το σχήμα θα δούμε ότι όπως όλοι οι κινητήρες έτσι και οι βηματικοί αποτελούνται από το κινούμενο μέρος το οποίο ονομάζεται ρότορας και από το σταθερό μέρος το οποίο ονομάζεται στάτορας. Σε έναν βηματικό κινητήρα θα δούμε ότι σχεδόν πάντα αναφερόμαστε σε τέσσερις περιελίξεις όπως φαίνεται και στο σχήμα. Στην πραγματικότητα όμως οι περιελίξεις είναι πολλές περισσότερες συνδεδεμένες σε σειρά. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η περιστροφή λίγων μοιρών με κάθε παλμό.

Οι βηματικοί κινητήρες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες οι οποίες βασίζονται στην διάταξη των τυλιγμάτων στον στάτορα. Η πρώτη κατηγορία είναι οι βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, η δεύτερη κατηγορία είναι οι μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης και τέλος η τρίτη κατηγορία είναι οι υβριδικοί.

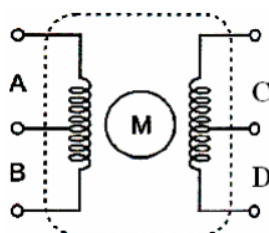
Οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη της πρώτης κατηγορίας, χαρακτηρίζονται από τον ρότορα ο οποίος είναι ένας μόνιμος μαγνήτης. Αλληλεπιδρώντας ο μόνιμος μαγνήτης με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργούν τα

τυλίγματα τα οποία βρίσκονται στον στάτορα, επιτυγχάνουν την κίνηση του κινητήρα. Στους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη ο στάτορας και ο ρότορας έχουν οδοντώσεις οι οποίες προσαρμόζονται αντίστοιχα σε κάθε παλμό και κατά συνέπεια κινείται ο άξονας του κινητήρα. Ο αριθμός των οδοντώσεων του στάτορα και του ρότορα είναι αυτός που καθορίζει και το βήμα του κινητήρα σε κάθε παλμό.

Στη δεύτερη κατηγορία έχουμε τους κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Οι κινητήρες αυτοί αποτελούνται από οδοντωτούς ρότορες μαλακού σιδήρου και έναν στάτορα. Το κύριο χαρακτηριστικό των κινητήρων μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης είναι ότι δεν παρουσιάζουν ελεύθερη ροπή. Ως ελεύθερη ροπή ορίζουμε τη ροπή που χρειάζεται ο άξονας του κινητήρα για να κινηθεί όταν δεν εφαρμόζεται τάση στα τυλίγματά του. Οι κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης έχουν από τρία ως πέντε τυλίγματα τα οποία συνδέονται σε έναν κοινό ακροδέκτη.

Τέλος στην τρίτη και τελευταία κατηγορία, αυτή των υβριδικών βηματικών κινητήρων, έχουμε τους κινητήρες που συνδυάζουν χαρακτηριστικά και των δύο κατηγοριών που αναλύσαμε ως τώρα. Είναι κινητήρες των οποίων ο ρότορας έχει πολλαπλές οδοντώσεις όπως είδαμε στους κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης με τη διαφορά ότι έχει έναν μαγνητισμένο άξονα. Αυτός ο άξονας ευθύνεται για την αυξημένη ροπή σε σχέση με τους κινητήρες των άλλων δύο κατηγοριών.

Αφού γνωρίσαμε τις κατηγορίες των βηματικών κινητήρων κατασκευαστικά, πρέπει να δούμε πως υλοποιείται η λειτουργία τους για να καταλάβουμε πρακτικά τον σχεδιασμό της κατασκευής του ηλιακού ιχνηλάτη που κατασκευάσαμε. Οι δύο τρόποι για να οδηγήσουμε έναν βηματικό κινητήρα είναι η μονοπολική και η διπολική οδήγηση. Οι μονοπολικοί βηματικοί κινητήρες αποτελούνται από δύο τυλίγματα με έναν ενδιάμεσο ακροδέκτη.



Ο ακροδέκτης αυτός συνδέεται με την τροφοδοσία και δημιουργεί δίπολο με το ένα από τα δύο άκρα του τυλίγματος κάθε φορά. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται αλλαγή της πολικότητας του ηλεκτρομαγνήτη χωρίς να αλλάζουμε την φορά του ρεύματος στο τύλιγμα. Το κύκλωμα το οποίο οδηγεί τον μονοπολικό βηματικό κινητήρα αναλαμβάνει να επιτρέψει και να διακόπτει διαδοχικά το ρεύμα από τα τυλίγματα με τέτοιο τρόπο ώστε να κινείται ο κινητήρας.

Οι μέθοδοι με τις οποίες επιτυγχάνεται αυτό είναι οι παρακάτω:

- Μονής φάσης (single-phase)

Στην μέθοδο μονής φάσης ενεργοποιούνται τα τυλίγματα το ένα μετά το άλλο διαδοχικά όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Τύλιγμα A	Τύλιγμα C	Τύλιγμα B	Τύλιγμα D
1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	1	0
0	0	0	1
1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	1	0
0	0	0	1
1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	1	0
0	0	0	1

- Διπλής φάσης (dual-phase)

Με τη μέθοδο αυτή, σε αντίθεση με την μέθοδο μονής φάσης, ενεργοποιούνται κάθε φορά δύο τυλίγματα. Εύκολα λοιπόν αντιλαμβανόμαστε ότι σε αυτήν την περίπτωση έχουμε μεγαλύτερη ροπή, αφού η ροπή δημιουργείται από δύο ίσες δυνάμεις κάθε φορά. Ο πίνακας ενεργοποίησης των τυλιγμάτων παίρνει την παρακάτω μορφή:

Τύλιγμα A	Τύλιγμα C	Τύλιγμα B	Τύλιγμα D
1	1	0	0
0	1	1	0
0	0	1	1
1	0	0	1
1	1	0	0
0	1	1	0
0	0	1	1
1	0	0	1
1	1	0	0
0	1	1	0
0	0	1	1
1	0	0	1

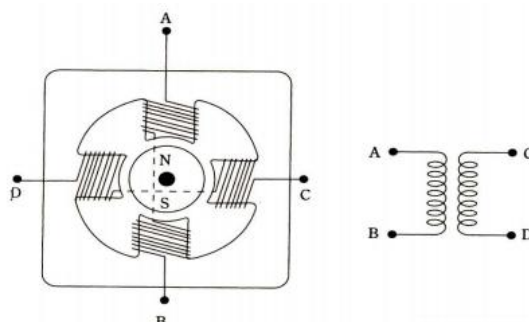
- Μισού βήματος (half step)

Τέλος έχουμε την μέθοδο του μισού βήματος. Η μέθοδος αυτή είναι η πολυπλοκότερη από τις τρεις μεθόδους. Κατά κάποιο τρόπο συνδυάζονται οι δύο πρώτες οι οποίες απευθύνονται σε ένα ολόκληρο βήμα κατά το πέρασμα των μεταβάσεων, ενώ αντίθετα τώρα παρεμβάλουμε ανάμεσα σε δυο καταστάσεις μονής φάσης μία κατάσταση διπλής. Για να το καταλάβουμε καλύτερα παρατηρούμε τον παρακάτω πίνακα:

Τύλιγμα A	Τύλιγμα C	Τύλιγμα B	Τύλιγμα D
1	0	0	0
1	1	0	0
0	1	0	0
0	1	1	0
0	0	1	0
0	0	1	1
0	0	0	1
1	0	0	1
1	0	0	0
1	1	0	0
0	1	0	0
0	1	1	0
0	0	1	0
0	0	1	1
0	0	0	1
1	0	0	1

Βλέπουμε λοιπόν ότι ενώ η πρώτη κατάσταση είναι της μονής φάσης, η αμέσως επόμενη είναι η πρώτη κατάσταση της διπλής φάσης. Στην περίπτωση αυτή λοιπόν ο κινητήρας κάνει τη διαδρομή του μισού βήματος και όχι ολόκληρου.

Τέλος, ολοκληρώνοντας το κεφάλαιο, θα αναφερθούμε στην διπολική λειτουργία των βηματικών κινητήρων. Για να κατανοήσουμε καλύτερα την λειτουργία αυτή παρατηρούμε το παρακάτω σχήμα:



Στο αριστερό σχήμα βλέπουμε και πάλι τα τέσσερα τλίγματα με τη διαφορά ότι στην ανάλυση που υπάρχει στο δεξί σχήμα δεν βλέπουμε τον μεσαίο ακροδέκτη. Έτσι για να επιτύχουμε την αναστροφή της μαγνητικής πολικότητας πρέπει υποχρεωτικά να εφαρμόσουμε αντίθετη τάση στα άκρα των τυλιγμάτων AB και CD. Η περιστροφή του κινητήρα επιτυγχάνεται με δύο τρόπους, όπως ακριβώς και στην μονοπολική λειτουργία. Ο πρώτος τρόπος είναι η περιστροφή να γίνεται σε ολόκληρο βήμα σε κάθε παλμό, ενώ η δεύτερη περίπτωση είναι η περιστροφή μισού βήματος.

Για να περιστρέψουμε τον κινητήρα με ολόκληρο βήμα σε κάθε παλμό έχουμε δύο περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση είναι να εφαρμόσουμε τάση μόνο στο ένα τύλιγμα. Με τον τρόπο αυτό κάνουμε εξοικονόμηση ενέργειας χάνοντας από την ροπή που έχει τη δυνατότητα να δώσει ο κινητήρας.

Τύλιγμα A	Τύλιγμα B	Τύλιγμα C	Τύλιγμα D
+	-	0	0
0	0	+	-
-	+	0	0
0	0	-	+
+	-	0	0
0	0	+	-
-	+	0	0
0	0	-	+



Με τα σύμβολα + και - φαίνεται η πολικότητα που δίνουμε κάθε φορά στα τυλίγματα και με το "0" φαίνεται ότι το τυλίγμα δεν έχει τάση στα άκρα του, άρα είναι ανενεργό στην κατάσταση αυτή.

Για να αυξήσουμε στο μέγιστο τη ροπή του κινητήρα, αλλά ταυτόχρονα να έχουμε και τη μέγιστη κατανάλωση σε ενέργεια, εφαρμόζουμε τάση και στα δύο τυλίγματα σε κάθε κατάσταση, τέτοια ώστε να περιστρέφεται ο κινητήρας. Έτσι προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

Τύλιγμα A	Τύλιγμα B	Τύλιγμα C	Τύλιγμα D
+	-	+	-
-	+	+	-
-	+	-	+
+	-	-	+
+	-	+	-
-	+	+	-
-	+	-	+
+	-	-	+

Ολοκληρώνοντας την διπολική λειτουργία των βηματικών κινητήρων, έχουμε τον συνδυασμό των δύο τρόπων λειτουργίας ολόκληρου βήματος ο οποίος μας δίνει τη διπολική λειτουργία μισού βήματος σε κάθε παλμό. Για να το καταλάβουμε καλύτερα αρκεί να παρατηρήσουμε την μετάβαση από κατάσταση σε επόμενη κατάσταση στον παρακάτω πίνακα:

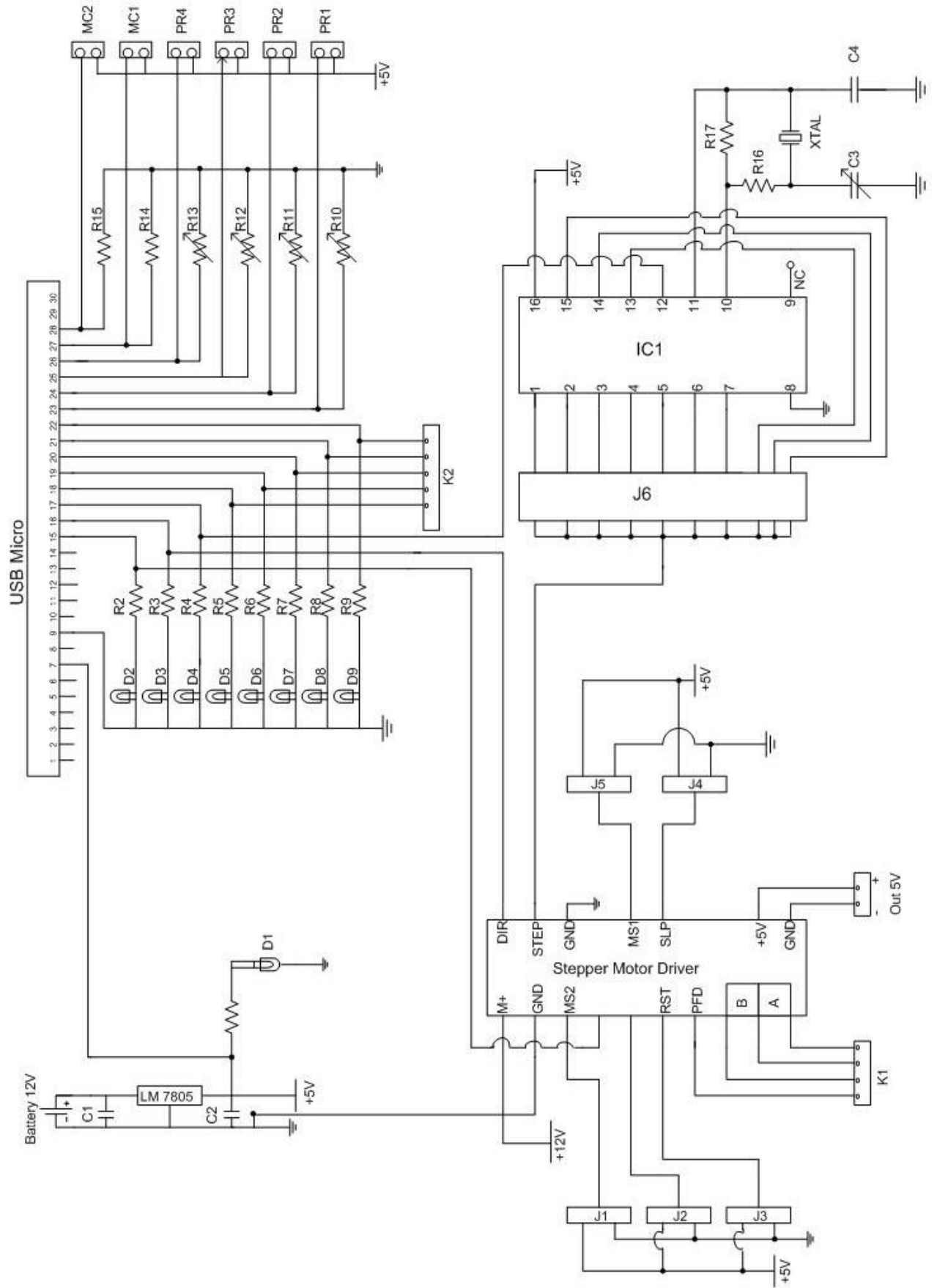
Τύλιγμα A	Τύλιγμα B	Τύλιγμα C	Τύλιγμα D
+	-	0	0
+	-	+	-
0	0	+	-
-	+	+	-
-	+	0	0
-	+	-	+
0	0	-	+
+	-	-	+
+	-	0	0
+	-	+	-
0	0	+	-
-	+	+	-
-	+	0	0
-	+	-	+
0	0	-	+
+	-	-	+
+	-	0	0

Ακριβώς όπως και στην μονοπολική λειτουργία, η περιστροφή μισού βήματος γίνεται με τον συνδυασμό των δύο πρώτων περιπτώσεων, καθώς αρχίζοντας να μελετάμε από την πρώτη κατάσταση βλέπουμε ενεργό το ένα τύλιγμα ενώ στη δεύτερη κατάσταση έχει ενεργοποιηθεί και το δεύτερο.

Από αυτά που είδαμε συνολικά για τους βηματικούς κινητήρες, θέλοντας να εκμεταλλευτούμε την μεγάλη ροπή που μπορούν να μας δώσουν οι διπολικοί κινητήρες, αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε έναν διπολικό κινητήρα με ολόκληρα βήματα σε κάθε παλμό, εκμεταλλευόμενοι και τα δύο του τυλίγματα. Αυτό το καταφέραμε χρησιμοποιώντας τον οδηγό EasyDriver V4.2. Για να μπορέσουμε να πετύχουμε την επιθυμητή ταχύτητα του κινητήρα, δημιουργήσαμε παλμούς κατασκευάζοντας ένα ρολόι παλμών με τη βοήθεια του ολοκληρωμένου CD4060. Το σχέδιο στο οποίο περιέχονται οι απαραίτητες πληροφορίες για την κατανόηση του ηλεκτρονικού κυκλώματος παρουσιάζεται σε επόμενο κεφάλαιο.

### **3.3. Ηλεκτρονικό Κύκλωμα βαθμίδες και σχέδιο**

Το Ηλεκτρονικό κύκλωμα σχεδιάστηκε έτσι ώστε να μπορεί ένας Ηλεκτρονικός Υπολογιστής να δέχεται πληροφορίες από τους αισθητήρες και αφού τις επεξεργαστεί να δίνει εντολή στον κινητήρα να κάνει τις απαραίτητες κινήσεις ώστε να υπάρχει πάντα επαφή με τον ήλιο. Παρακάτω φαίνεται το ηλεκτρονικό σχέδιο:



Πριν αναπτύξουμε τις ζωτικές βαθμίδες της κατασκευής, θα αναφερθούμε στις τάσεις που χρειαζόμαστε για να λειτουργήσει το ηλεκτρονικό κύκλωμα. Παρατηρώντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κάθε κυκλώματος χωριστά θα δούμε ότι όλα λειτουργούν με τάση 5V εκτός από την τροφοδοσία του οδηγού του βηματικού κινητήρα η οποία θα πρέπει να είναι μεταξύ 7-30 V συνεχούς τάσης (DC). Για να μπορέσουμε να υλοποιήσουμε αυτές τις ανάγκες, χρησιμοποιούμε τα 12V χωρίς σταθεροποίηση που μας δίνει ο συσσωρευτής. Όπως είπαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο συσσωρευτής ο οποίος χρησιμοποιούμε για τις ανάγκες της εργασίας είναι 12V 2,3Ah. Αναλύοντας τα χαρακτηριστικά του συσσωρευτή καταλαβαίνουμε ότι μπορεί να μας δίνει για μία ώρα συνεχές ρεύμα έντασης 2,3A ή για 2,3 ώρες ρεύμα έντασης 1A. Σε ότι αφορά την τάση των 5V χρησιμοποιούμε έναν σταθεροποιητή τάσης στα 5V LM7805. Ο σταθεροποιητής αυτός έχει τη δυνατότητα να δεχθεί διαφορά δυναμικού από 5V έως 18V.

Όπως βλέπουμε στο ηλεκτρονικό σχέδιο, υπάρχει ένα εξάρτημα το οποίο συνδέει τον ηλεκτρονικό υπολογιστή με την πλακέτα μέσω μιας ελεύθερης θύρας USB. Το εξάρτημα αυτό είναι το U401 της USBmicro.

Το U401 της USBmicro είναι ένα κύκλωμα το οποίο μας δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε σαν εισόδους ή εξόδους δύο πόρτες των 8 bit. Από τα 16 bit τα οποία είχαμε στη διάθεσή μας στην πραγματικότητα έχουμε χρησιμοποιήσει μόνο τα 8. Αφού πρώτα επιλέξαμε ποια πόρτα θα έχει τις εισόδους και ποια τις εξόδους, χρησιμοποιήσαμε 2 εξόδους και 6 εισόδους.

Η πρώτη έξοδος καθορίζει την διεύθυνση που κινείται ο κινητήρας ενώ η δεύτερη έξοδος δίνει εντολή στον οδηγό του κινητήρα να ξεκινήσει ή να σταματήσει αντίστοιχα. Οι υπόλοιπες έξοδοι οδηγούνται στην κλέμα K2 και είναι για μελλοντική χρήση. Στις εισόδους έχουμε τέσσερις φωτοαντιστάσεις σε μορφή διαιρέτη τάσης, σε συνδυασμό με μια μεταβλητή αντίσταση η κάθε μία και δύο μαγνητικές επαφές. Αναλυτικά η λειτουργία του κάθε αισθητήρα φαίνεται παρακάτω:

Είσοδος No23: Αντιστοιχεί στην κλέμα PR1. Η λειτουργία της είναι να ανιχνεύει την θέση του ηλίου

Είσοδος Νο24: Αντιστοιχεί στην κλέμα PR2. Η λειτουργία της είναι να ανιχνεύει την θέση του ηλιου

Είσοδος Νο25: Αντιστοιχεί στην κλέμα PR3. Η λειτουργία της είναι να πληροφορεί το σύστημα αν είναι μέρα ή νύχτα

Είσοδος Νο26: Αντιστοιχεί στην κλέμα PR4. Η λειτουργία της είναι να ελέγχει αν το όχημα κινείται με κατεύθυνση τον ήλιο

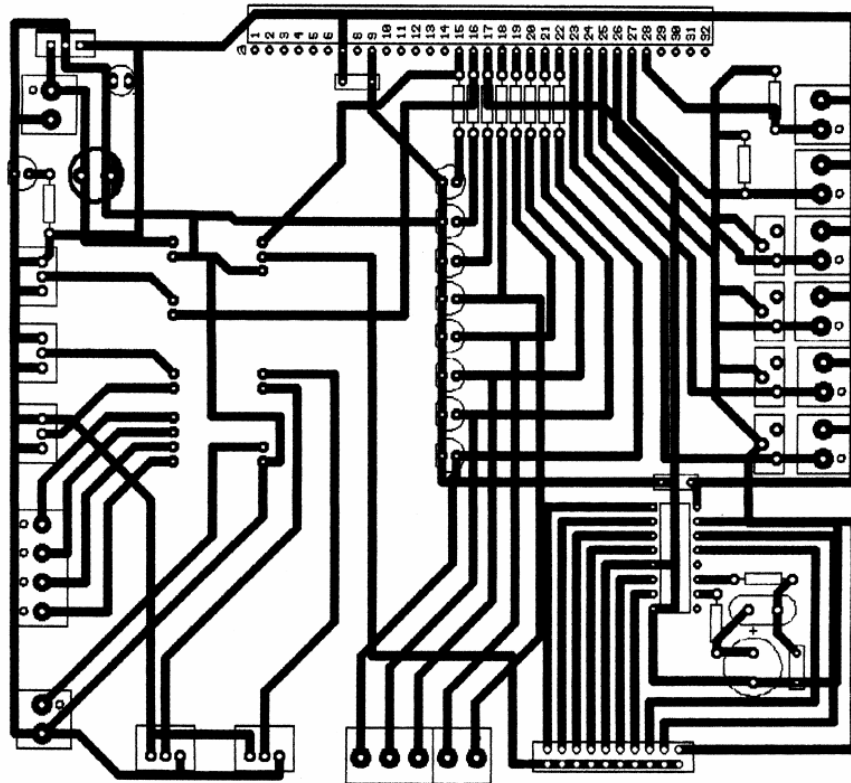
Είσοδος Νο27: Αντιστοιχεί στην κλέμα MC1. Ανιχνεύει αν ο ηλιακός ιχνηλάτης φτάσει στη θέση αρχής

Είσοδος Νο28: Αντιστοιχεί στην κλέμα MC2. Ανιχνεύει αν ο ηλιακός ιχνηλάτης φτάσει στη θέση τερματισμού

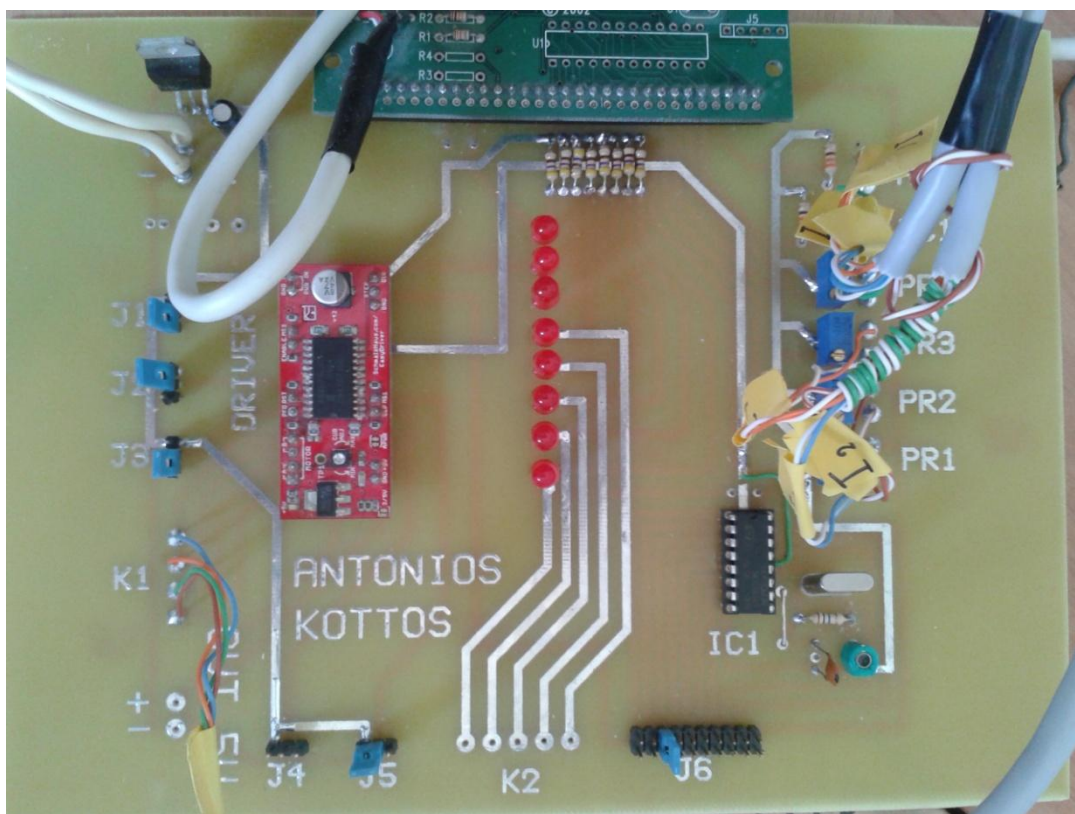
Στη συνέχεια διακρίνουμε ένα κύκλωμα το οποίο δημιουργεί παλμούς με τη βοήθεια ενός κρυστάλλου και ενός ολοκλήρωμένου CD4060BM. Τους παλμούς από την έξοδο του CD4060BM τους οδηγούμε στο κύκλωμα το οποίο οδηγεί τον βηματικό κινητήρα. Το κύκλωμα οδήγησης του βηματικού κινητήρα δέχεται εντολές μέσω των εξόδων του USBmicro Νο15 και Νο 16 σχετικά με το πότε πρέπει να χρησιμοποιεί τους παλμούς για να δίνει κίνηση αλλά και για το ποια θα είναι η κατεύθυνση που θα έχει ο κινητήρας κατά την κίνησή του.

#### **3.4. Σχεδίαση - Τύπωση Πλακέτας**

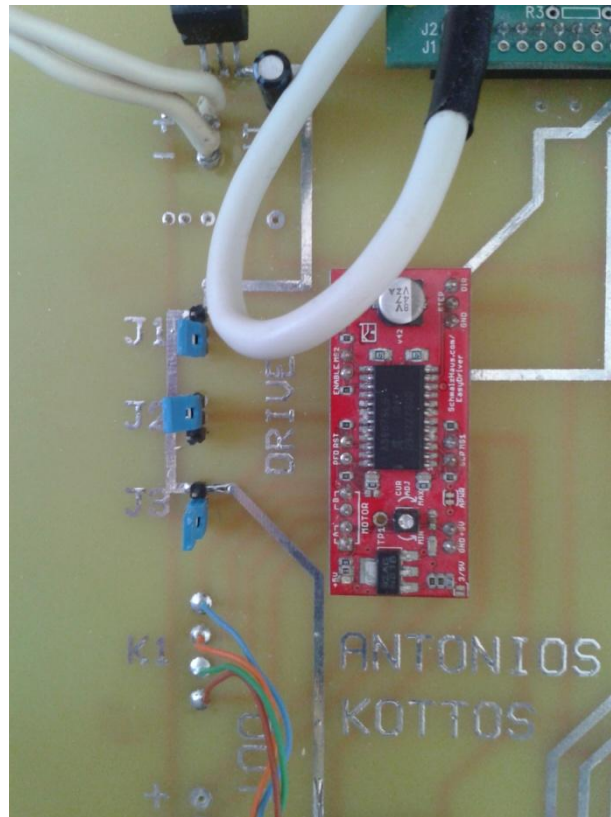
Για να μπορέσουμε να υλοποιήσουμε το ηλεκτρονικό κύκλωμα σχεδιάσαμε το PCB ώστε μετά την κατάλληλη επεξεργασία μιας διπλής όψης φωτοευαίσθητης πλακέτας να πάρουμε την τελική μορφή της.



Στη συνέχεια αφού επικασιτερώσαμε και κολλήσαμε τα εξαρτήματα πήραμε το τελικό αποτέλεσμα.



Η πλακέτα με το κόκκινο χρώμα είναι το κύκλωμα διπολικής οδήγησης του βηματικού κινητήρα.



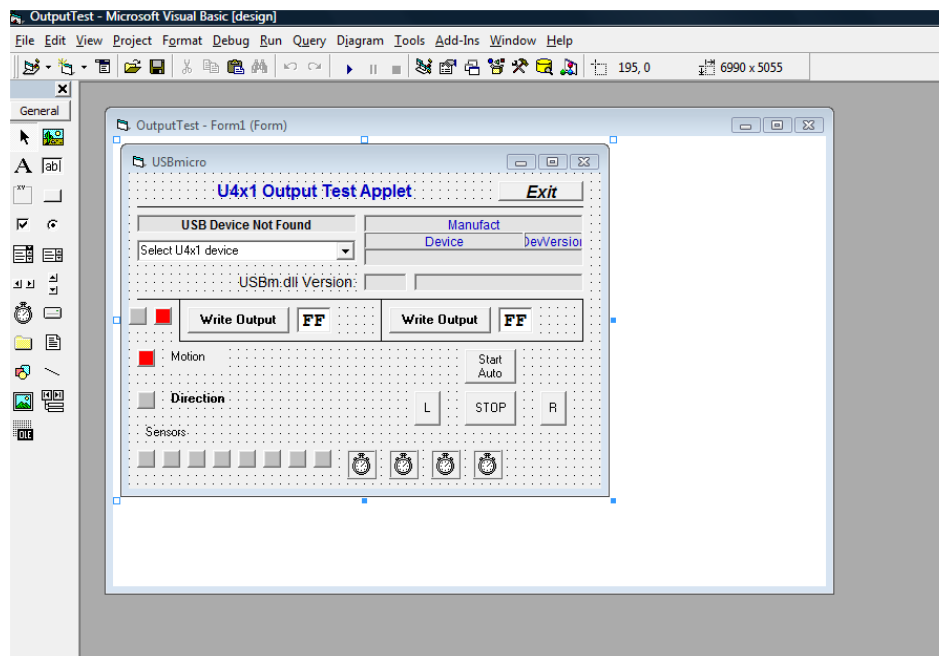
Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνεται συνολικά η κατασκευή αρχικά χωρίς το φωτοβολταϊκό πλαίσιο και στη συνέχεια με το πλαίσιο τοποθετημένο. Η κατασκευή αυτή προσομοιώνει ένα όχημα στην οροφή του οποίου έχουμε τοποθετήσει ένα φωτοβολταϊκό πάνελ.





### 3.5. Προγραμματισμός VB

Για να μπορέσει να λειτουργήσει η παραπάνω κατασκευή, όπως έχουμε προαναφέρει επιλέξαμε την χρήση ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή. Για να μπορέσουμε να προγραμματίσουμε τον υπολογιστή να δέχεται τις πληροφορίες και να ελέγχει τον βηματικό κινητήρα χρησιμοποιήσαμε τη γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic.



Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται η φόρμα που κατασκευάσαμε θέλοντας να την κάνουμε όσο γίνεται πιο εύχρηστη. Όπως βλέπουμε, υπάρχουν τέσσερα κουμπιά (Start Auto, Stop, L, R).



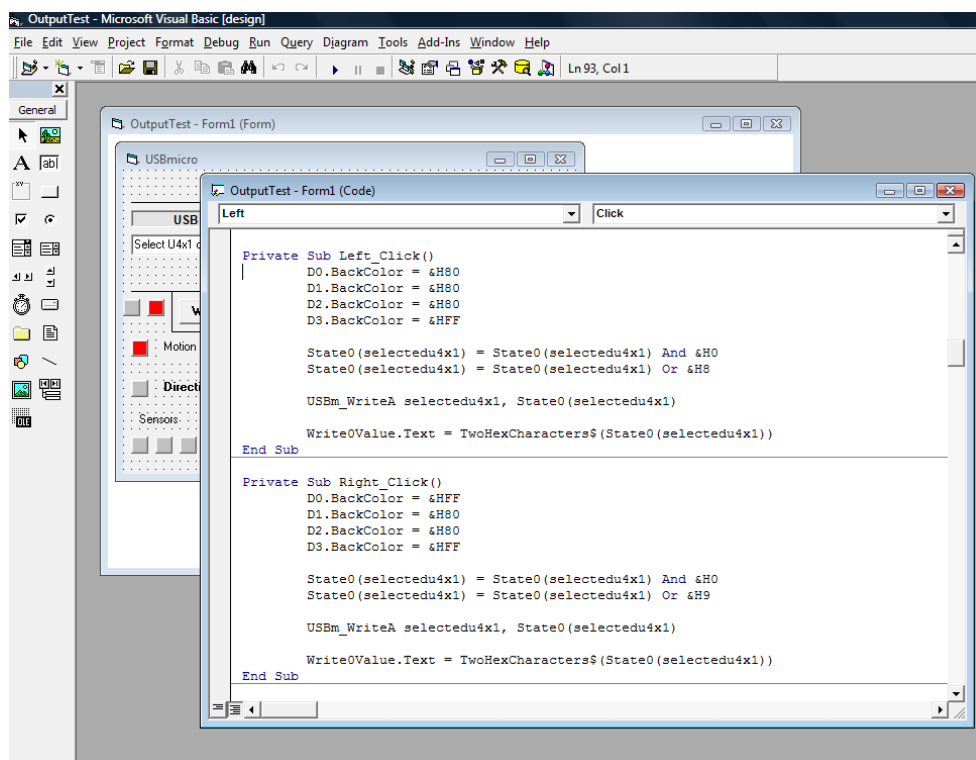
Πατώντας το κουμπί 'Start Auto' ξεκινάει η αυτόματη λειτουργία του προγράμματος στην οποία το φωτοβολταϊκό πάνελ περιστρέφεται μόνο του μέχρι να ευθυγραμμιστεί με τις ακτίνες του ήλιου.

Με το κουμπί 'Stop' σταματάει η αυτόματη λειτουργία καθώς και η όποια κίνηση κάνει ο tracker.

Τα δύο κουμπιά 'L' και 'R' λειτουργούν μόνο στην περίπτωση που έχουμε απενεργοποιήσει την αυτόματη λειτουργία μέσω του κουμπιού 'Stop' και μας δίνεται η δυνατότητα να περιστρέψουμε το πάνελ χειροκίνητα, είτε αριστερά είτε δεξιά.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι με τα κουμπιά 'L', 'R' μπορούμε να ξεπεράσουμε τα όρια περιστροφής του tracker κάτι που δεν μπορεί να συμβεί κατά την αυτόματη λειτουργία.

Ο κώδικας που γράψαμε στην VB φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία και κατόπιν στις σελίδες που ακολουθούν.



```
OutputTest - Microsoft Visual Basic [design]
File Edit View Project Format Debug Run Query Diagram Tools Add-Ins Window Help
Ln 93, Col 1

General
OutputTest - Form1 (Form)
USBmicro
USB
[Select U4x1
Motion
Direct
Sensors

Private Sub Left_Click()
    D0.BackColor = &H80
    D1.BackColor = &H80
    D2.BackColor = &H80
    D3.BackColor = &HFF

    State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) And &H0
    State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) Or &H8

    USBm_WriteA selectedu4x1, State0(selectedu4x1)

    Write0Value.Text = TwoHexCharacters$(State0(selectedu4x1))
End Sub

Private Sub Right_Click()
    D0.BackColor = &HFF
    D1.BackColor = &H80
    D2.BackColor = &H80
    D3.BackColor = &HFF

    State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) And &H0
    State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) Or &H9

    USBm_WriteA selectedu4x1, State0(selectedu4x1)

    Write0Value.Text = TwoHexCharacters$(State0(selectedu4x1))
End Sub
```

Option Explicit

```
Dim State0(20) As Byte
Dim State1(20) As Byte
Dim workstr As String * 255
Dim result As Integer
Dim clock As Integer
Dim selectedu4x1 As Byte
Dim itemcount As Byte
Dim Start As Integer
Dim k As Byte
```

Private Sub Combo1\_Click()

```
    selectedu4x1 = Combo1.ListIndex
```

```
    result = USBm_DeviceMfr(selectedu4x1, workstr)
    Manufact.Caption = "Made by: " & Hex$(USBm_DeviceVID(selectedu4x1))
& ": " & workstr
```

```
    result = USBm_DeviceProd(selectedu4x1, workstr)
    Device.Caption = Hex$(USBm_DevicePID(selectedu4x1)) + ": " + workstr
```

```
    DevVersion.Caption = Hex$(USBm_DeviceDID(selectedu4x1))
```

```
    result = USBm_DeviceSer(selectedu4x1, workstr)
    Serial.Caption = workstr
```

```
    USBm_WriteA selectedu4x1, State0(selectedu4x1)
    USBm_WriteB selectedu4x1, State1(selectedu4x1)
```

```
    If State0(selectedu4x1) And &H1 Then D0.BackColor = &HFF Else
D0.BackColor = &H80
    If State0(selectedu4x1) And &H2 Then D1.BackColor = &HFF Else
D1.BackColor = &H80
    If State0(selectedu4x1) And &H4 Then D2.BackColor = &HFF Else
D2.BackColor = &H80
    If State0(selectedu4x1) And &H8 Then D3.BackColor = &HFF Else
D3.BackColor = &H80
    'If State0(selectedu4x1) And &H10 Then D4.BackColor = &HFF Else
D4.BackColor = &H80
    'If State0(selectedu4x1) And &H20 Then D5.BackColor = &HFF Else
D5.BackColor = &H80
    'If State0(selectedu4x1) And &H40 Then D6.BackColor = &HFF Else
D6.BackColor = &H80
    'If State0(selectedu4x1) And &H80 Then D7.BackColor = &HFF Else
D7.BackColor = &H80
```

```
    Write0Value.Text = TwoHexCharacters$(State0(selectedu4x1))
```

End Sub

' Form load  
' When the form is loaded find the hardware.

Private Sub Form\_Load()

result = USBm\_Version(workstr)  
lblVer.Caption = workstr  
lblVerNum.Caption = result

selectedu4x1 = 0

If USBm\_FindDevices Then

itemcount = USBm\_NumberOfDevices

DeviceStatus.Caption = itemcount & " USB Devices Found"  
DeviceStatus.BackColor = &H1FF00

For k = 0 To itemcount - 1

result = USBm\_DeviceSer(k, workstr)  
Combo1.AddItem k + 1 & " -> " & workstr

State0(k) = &HA  
'State1(k) = &H0

USBm\_WriteA k, State0(k)  
'USBm\_WriteB k, State1(k)

USBm\_DirectionA k, &HFF, &HFF  
'USBm\_DirectionB k, &HFF, &HFF

Next k

State0(selectedu4x1) = &HA  
'State1(selectedu4x1) = &H0

Write0Value.Text = TwoHexCharacters\$(2)  
'Write1Value.Text = TwoHexCharacters\$(0)

End If

End Sub

Private Sub Left\_Click()

```

D0.BackColor = &H80
D1.BackColor = &H80
D2.BackColor = &H80
D3.BackColor = &HFF

State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) And &H0
State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) Or &H8

USBm_WriteA selectedu4x1, State0(selectedu4x1)

Write0Value.Text = TwoHexCharacters$(State0(selectedu4x1))
End Sub

Private Sub Right_Click()
    D0.BackColor = &HFF
    D1.BackColor = &H80
    D2.BackColor = &H80
    D3.BackColor = &HFF

    State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) And &H0
    State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) Or &H9

    USBm_WriteA selectedu4x1, State0(selectedu4x1)

    Write0Value.Text = TwoHexCharacters$(State0(selectedu4x1))
End Sub

Private Sub Start_Auto_Click()
    Timer2 = True

End Sub

Private Sub Stop_Auto_Click(index As Integer)

    D0.BackColor = &H80
    D1.BackColor = &HFF
    D2.BackColor = &H80
    D3.BackColor = &HFF

    State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) And &H0
    State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) Or &HA

    USBm_WriteA selectedu4x1, State0(selectedu4x1)

    Write0Value.Text = TwoHexCharacters$(State0(selectedu4x1))
    Timer1 = False
    Timer2 = False
    Timer3 = False
    Timer4 = False

```

End Sub

Private Sub Timer1\_Timer()

    'Read Inputs

    USBm\_ReadB selectedu4x1, State1(selectedu4x1)

    Write1Value.Text = TwoHexCharacters\$(State1(selectedu4x1))

    If State1(selectedu4x1) And &H1 Then D8.BackColor = &HFF Else  
    D8.BackColor = &H80

    If State1(selectedu4x1) And &H2 Then D9.BackColor = &HFF Else  
    D9.BackColor = &H80

    If State1(selectedu4x1) And &H4 Then D10.BackColor = &HFF Else  
    D10.BackColor = &H80

    If State1(selectedu4x1) And &H8 Then D11.BackColor = &HFF Else  
    D11.BackColor = &H80

    If State1(selectedu4x1) And &H10 Then D12.BackColor = &HFF Else  
    D12.BackColor = &H80

    If State1(selectedu4x1) And &H20 Then D13.BackColor = &HFF Else  
    D13.BackColor = &H80

    If State1(selectedu4x1) And &H40 Then D14.BackColor = &HFF Else  
    D14.BackColor = &H80

    If State1(selectedu4x1) And &H80 Then D15.BackColor = &HFF Else  
    D15.BackColor = &H80

    'Solar Tracking

        If D8.BackColor = &HFF And D10.BackColor = &HFF Then

            D0.BackColor = &H80

            D1.BackColor = &HFF

            D2.BackColor = &H80

            D3.BackColor = &H80

        State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) And &H0

        State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) Or &H2

        USBm\_WriteA selectedu4x1, State0(selectedu4x1)

        Write0Value.Text = TwoHexCharacters\$(State0(selectedu4x1))

    Elseif D8.BackColor = &H80 And D10.BackColor = &HFF Then

        D0.BackColor = &HFF

        D1.BackColor = &H80

        D2.BackColor = &H80

        D3.BackColor = &H80

        State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) And &H0

        State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) Or &H1

        USBm\_WriteA selectedu4x1, State0(selectedu4x1)

        Write0Value.Text = TwoHexCharacters\$(State0(selectedu4x1))

```

Elseif D8.BackColor = &HFF And D10.BackColor = &H80 Then
    D0.BackColor = &H80
    D1.BackColor = &H80
    D2.BackColor = &H80
    D3.BackColor = &H80

    State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) And &H0
    State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) Or &H0

    USBm_WriteA selectedu4x1, State0(selectedu4x1)
    Write0Value.Text = TwoHexCharacters$(State0(selectedu4x1))

Else
    D0.BackColor = &H80
    D1.BackColor = &HFF
    D2.BackColor = &H80
    D3.BackColor = &H80

    State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) And &H0
    State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) Or &H1

    USBm_WriteA selectedu4x1, State0(selectedu4x1)

    Write0Value.Text = TwoHexCharacters$(State0(selectedu4x1))

End If

```

End Sub

Private Sub Timer2\_Timer()

'Read Inputs

```
USBm_ReadB selectedu4x1, State1(selectedu4x1)
```

```
Write1Value.Text = TwoHexCharacters$(State1(selectedu4x1))
```

```
If State1(selectedu4x1) And &H1 Then D8.BackColor = &HFF Else
D8.BackColor = &H80
```

```
If State1(selectedu4x1) And &H2 Then D9.BackColor = &HFF Else
D9.BackColor = &H80
```

```
If State1(selectedu4x1) And &H4 Then D10.BackColor = &HFF Else
D10.BackColor = &H80
```

```
If State1(selectedu4x1) And &H8 Then D11.BackColor = &HFF Else
D11.BackColor = &H80
```

```
If State1(selectedu4x1) And &H10 Then D12.BackColor = &HFF Else
D12.BackColor = &H80
```

```

    If State1(selectedu4x1) And &H20 Then D13.BackColor = &HFF Else
D13.BackColor = &H80
    If State1(selectedu4x1) And &H40 Then D14.BackColor = &HFF Else
D14.BackColor = &H80
    If State1(selectedu4x1) And &H80 Then D15.BackColor = &HFF Else
D15.BackColor = &H80

    'Go to Start Point
'If start <> 1 Then

    'Check Conditions

    If D9.BackColor = &HFF And D11.BackColor = &H80 And D13.BackColor =
&H80 Then
        Timer1 = True
        Timer3 = False
        Timer4 = False
    ElseIf D9.BackColor = &H80 And D12.BackColor = &H80 Then
        Timer1 = False
        Timer3 = True
        Timer4 = False
    ElseIf D13.BackColor = &HFF Then
        Timer1 = False
        Timer3 = True
        Timer4 = False
        Timer2 = False
    ElseIf D11.BackColor = &HFF Then
        Timer1 = False
        Timer3 = False
        Timer4 = True
        clock = 0
        Timer2 = False
    End If
'End If

End Sub

Private Sub Timer3_Timer()

USBm_ReadB selectedu4x1, State1(selectedu4x1)

    Write1Value.Text = TwoHexCharacters$(State1(selectedu4x1))

    If State1(selectedu4x1) And &H1 Then D8.BackColor = &HFF Else
D8.BackColor = &H80
    If State1(selectedu4x1) And &H2 Then D9.BackColor = &HFF Else
D9.BackColor = &H80

```

```

    If State1(selectedu4x1) And &H4 Then D10.BackColor = &HFF Else
D10.BackColor = &H80
    If State1(selectedu4x1) And &H8 Then D11.BackColor = &HFF Else
D11.BackColor = &H80
    If State1(selectedu4x1) And &H10 Then D12.BackColor = &HFF Else
D12.BackColor = &H80
    If State1(selectedu4x1) And &H20 Then D13.BackColor = &HFF Else
D13.BackColor = &H80
    If State1(selectedu4x1) And &H40 Then D14.BackColor = &HFF Else
D14.BackColor = &H80
    If State1(selectedu4x1) And &H80 Then D15.BackColor = &HFF Else
D15.BackColor = &H80

```

```

Timer2 = False

```

```

    If D8.BackColor = &HFF And D10.BackColor = &HFF Then
        Timer1 = True
        Timer2 = True
        Timer3 = False

```

```

    ElseIf D12.BackColor = &HFF Then

```

```

        D0.BackColor = &H80
        D1.BackColor = &HFF
        D2.BackColor = &H80
        D3.BackColor = &H80

```

```

        State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) And &H0
        State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) Or &H2

```

```

        USBm_WriteA selectedu4x1, State0(selectedu4x1)

```

```

        Write0Value.Text = TwoHexCharacters$(State0(selectedu4x1))
        Timer1 = False
        Timer2 = True
        Timer3 = False

```

```

    Else

```

```

        D0.BackColor = &H80
        D1.BackColor = &H80
        D2.BackColor = &H80
        D3.BackColor = &H80

```

```

        State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) And &H0
        State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) Or &H0

```

```

        USBm_WriteA selectedu4x1, State0(selectedu4x1)

```

```

        Write0Value.Text = TwoHexCharacters$(State0(selectedu4x1))
    End If

```

```

End Sub

```



```

Private Sub Timer4_Timer()

USBm_ReadB selectedu4x1, State1(selectedu4x1)

    Write1Value.Text = TwoHexCharacters$(State1(selectedu4x1))

    If State1(selectedu4x1) And &H1 Then D8.BackColor = &HFF Else
D8.BackColor = &H80
    If State1(selectedu4x1) And &H2 Then D9.BackColor = &HFF Else
D9.BackColor = &H80
    If State1(selectedu4x1) And &H4 Then D10.BackColor = &HFF Else
D10.BackColor = &H80
    If State1(selectedu4x1) And &H8 Then D11.BackColor = &HFF Else
D11.BackColor = &H80
    If State1(selectedu4x1) And &H10 Then D12.BackColor = &HFF Else
D12.BackColor = &H80
    If State1(selectedu4x1) And &H20 Then D13.BackColor = &HFF Else
D13.BackColor = &H80
    If State1(selectedu4x1) And &H40 Then D14.BackColor = &HFF Else
D14.BackColor = &H80
    If State1(selectedu4x1) And &H80 Then D15.BackColor = &HFF Else
D15.BackColor = &H80

    'Stop motor
D0.BackColor = &H80
    D1.BackColor = &HFF
    D2.BackColor = &H80
    D3.BackColor = &H80

    State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) And &H0
    State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) Or &H2

    USBm_WriteA selectedu4x1, State0(selectedu4x1)

    Write0Value.Text = TwoHexCharacters$(State0(selectedu4x1))

    'Check Position
    If D11.BackColor = &HFF Then clock = 0
    If clock < 30 Then
        clock = clock + 1
    Else
        Timer2 = True
    End If

End Sub

Private Sub Write0_Click()

    USBm_WriteA selectedu4x1, ReturnHexByte(Write0Value.Text)

```

```

State0(selectedu4x1) = ReturnHexByte(Write0Value.Text)

If State0(selectedu4x1) And &H1 Then D0.BackColor = &HFF Else
D0.BackColor = &H80
If State0(selectedu4x1) And &H2 Then D1.BackColor = &HFF Else
D1.BackColor = &H80
If State0(selectedu4x1) And &H4 Then D2.BackColor = &HFF Else
D2.BackColor = &H80
If State0(selectedu4x1) And &H8 Then D3.BackColor = &HFF Else
D3.BackColor = &H80
'If State0(selectedu4x1) And &H10 Then D4.BackColor = &HFF Else
D4.BackColor = &H80
'If State0(selectedu4x1) And &H20 Then D5.BackColor = &HFF Else
D5.BackColor = &H80
'If State0(selectedu4x1) And &H40 Then D6.BackColor = &HFF Else
D6.BackColor = &H80
'If State0(selectedu4x1) And &H80 Then D7.BackColor = &HFF Else
D7.BackColor = &H80

```

End Sub

' D0

Private Sub D0\_Click()

```

If D0.BackColor = &HFF Then
D0.BackColor = &H80
State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) And &HFE
Else
D0.BackColor = &HFF
State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) Or &H1
End If

```

USBm\_WriteA selectedu4x1, State0(selectedu4x1)

Write0Value.Text = TwoHexCharacters\$(State0(selectedu4x1))

End Sub

' D1

Private Sub D1\_Click()

```

If D1.BackColor = &HFF Then
D1.BackColor = &H80
State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) And &HFD
Else
D1.BackColor = &HFF
State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) Or &H2
End If

```

```

    USBm_WriteA selectedu4x1, State0(selectedu4x1)

    Write0Value.Text = TwoHexCharacters$(State0(selectedu4x1))

End Sub

' D2

Private Sub D2_Click()

    If D2.BackColor = &HFF Then
        D2.BackColor = &H80
        State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) And &HFB
    Else
        D2.BackColor = &HFF
        State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) Or &H4
    End If

    USBm_WriteA selectedu4x1, State0(selectedu4x1)

    Write0Value.Text = TwoHexCharacters$(State0(selectedu4x1))

End Sub

' D3

Private Sub D3_Click()

    If D3.BackColor = &HFF Then
        D3.BackColor = &H80
        State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) And &HF7
    Else
        D3.BackColor = &HFF
        State0(selectedu4x1) = State0(selectedu4x1) Or &H8
    End If

    USBm_WriteA selectedu4x1, State0(selectedu4x1)

    Write0Value.Text = TwoHexCharacters$(State0(selectedu4x1))

End Sub

' Exit the program

Private Sub ExitButton_Click()

    End

```

End Sub

## Κεφάλαιο 4

### 4.1. Βελτιώσεις συστήματος

Το παραπάνω σύστημα που περιγράψαμε και κατασκευάσαμε μπορεί με κάποιες τροποποιήσεις να μας δώσει καλύτερα αποτελέσματα.

Για παράδειγμα θα μπορούσαμε αντί να έχουμε ένα βαθμό ελευθερίας στο σύστημα να έχουμε δύο, δηλαδή το σύστημά μας να παρακολουθεί τον ήλιο τόσο στην οριζόντια κίνησή του όσο και στην κάθετη. Σε αυτήν την περίπτωση θα μπορούσαμε να πετύχουμε αύξηση της απόδοσης του συστήματος κατά 7%-10%.

Μία άλλη αλλαγή η οποία θα μπορούσε να επιφέρει βελτίωση στο σύστημά μας είναι η αντικατάσταση των φωτοαντιστάσεων με φωτοδιόδους. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούσαμε με έναν αναλογικό αισθητήρα (φωτοδίοδος) να βρίσκουμε την βέλτιστη θέση του tracker ως προς τον ήλιο. Στην περίπτωση όμως αυτή δεν θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε το USB micro το οποίο έχει μόνο ψηφιακές εισόδους χωρίς τη βοήθεια ενός A to D converter (analog to digital converter). Η χρήση φωτοδιόδου βοηθά επίσης στο να έχει το σύστημα μεγαλύτερη ακρίβεια στη λειτουργία του από ότι με τις φωτοαντιστάσεις.

Τέλος, αντί για χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε έναν μικροεπεξεργαστή για τον έλεγχο των πληροφοριών από τους αισθητήρες και την κίνηση του βηματικού κινητήρα.

Όμως επειδή σκοπός της εργασίας μας είναι να δείξουμε τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού tracker αρκεστήκαμε στην πιο απλή μορφή ενός τέτοιου συστήματος.

## Βιβλιογραφία

- [1] Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία, Κ. Καγκαράκη
- [2] Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές. Μ.Π. Παπαδόπουλος, Εκδόσεις ΕΜΠ, 1997
- [3] Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, «Φωτοβολταϊκά Συστήματα» 3η Έκδοση 2009, εκδόσεις ΖΗΤΗ Θεσσαλονίκη
- [4] Ψηφιακή Σχεδίαση, Μ. Morris Mano, Εκδόσεις Παπασωτηρίου
- [5] Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications, Tom Markvart/Luis Castaner
- [6] Σημειώσεις Ηλιακής Ενέργειας Καθηγητή Μ. Παπαδόπουλου
- [7] Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα, Sendra/Smith, Πρώτη Έκδοση
- [8] Visual Basic 6, Morris Stephen, Εκδόσεις 2001, Εκδόσεις Δίαυλος
- [9] Δημοσίευση σε Τεχνικό Περιοδικό, Ε. Παρασκευαδάκη
- [10] Τεχνικά Φυλλάδια Εταιρείας SMA
- [11] Τεχνικά Φυλλάδια Εταιρείας FRONIUS
- [12] Τεχνικά Φυλλάδια Συστημάτων Tracker εταιρείας Solon
- [13] Τεχνικά Φυλλάδια Συστημάτων Tracker εταιρείας Solar Track
- [14] Τεχνικά Φυλλάδια Συστημάτων Tracker εταιρείας SunPower
- [15] ΔΕΗ Ανανεώσιμες, διαθέσιμο: <http://www.ppcr.gr/Home.aspx?C=2>
- [16] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας, διαθέσιμο: <http://www.cres.gr>
- [17] SMA Solar Technology: [www.sma-hellas.com](http://www.sma-hellas.com)
- [18] Φωτοβολταϊκό φαινόμενο: [el.wikipedia.org/wiki/Φωτοβολταϊκό\\_φαινόμενο](http://el.wikipedia.org/wiki/Φωτοβολταϊκό_φαινόμενο)