

SSP  
A47

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ**  
**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ**  
**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**



**ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ**  
**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΙΣΧΥΟΣ 200 KW**  
**ΜΕ ΧΡΗΣΗ MICRO-INVERTER**

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ  
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ**

**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΙΣΧΥΟΣ 200 KW**

**ΜΕ ΧΡΗΣΗ MICRO-INVERTER**

**Επιβλέποντες : Κ. Αλαφοδήμος**

**Π. Κοφινάς**

**Π. Φετφατζής**

**Σπουδαστής**

**Παναγιώτης Μ. Αγγελόπουλος (ΑΜ : 23735 )**

**Ιούνιος 2012**





Μετά από χρόνια δεκαετία  
Πτύχιο σχεδόν στα τριανταεπτά  
Πολλοί με αυτό θα απορούν  
Και άλλοι θα χειροκροτούν  
Κάποιοι με αγάπη θα χαμογελάσουν  
Και άλλοι κρητικά ίσως γελάσουν  
Καθόλου όμως δε μ' ενδιαφέρει  
Αφού η μέχρι τώρα ζωή μου έχει φέρει  
Αλήθεια, φέμα, γνώση, δύναμη μεγάλη  
Ανθρώπους επικοινωνία αγάπη όσο ποτέ άλλη  
Ισιδώρο, Γιάννη, Ελπίδα και την Ευτυχία  
Παναγιώτη, Μιχάλη, Ασημίνα και Αρμονία  
Πιάνο, μουσική, παιχνίδια χαμόγελα πλατιά  
Νίκο Ειρήνη Αλέξανδρο μα και της Έμης τα φίλιά  
Μπαμπά Μαμά που αγαπώ τόσο πολύ  
Συγνώμη που τόσο καιρό δεν σας το έχω πει  
Φίλους εχθρούς που έχω αντιμετωπίσει  
Άλλες φορές έχασα και άλλες έχω κερδίσει  
Καθηγητές δασκάλους και θρανία  
Ένα σορό ντουζίνες με βιβλία  
Θλίψη κλάμα αγωνία πόνο  
Συναίσθημα χαράς σκέψεις και όχι μόνο  
Κι εγώ μπροστά σας στέκομαι ορθός  
Με το κεφάλι μου ψηλά περίφρανα γυμνός  
Από προκαταληψεις, ταμπού και κρητική  
Έκφραση προσώπου και λόγου κυνική  
Πιστεύω στην ισότητα της διαφορετικότητας  
Σεβασμό ήθος αξίες ανθρώπινης ακεραιότητας  
Τούτο μονάχα θέλω να σας πω  
Γιατί μετά μάλλον δε θα σας ξαναδώ  
Όπως κι εγώ κι εσύ μπορείς  
Τον εαυτό σου αν θες να βρεις  
Και μέρα με τη μέρα να τον δεις  
Προς το καλύτερο ν' αλλάζει  
Και δύσκολα αν έρθουν μη σε νοιάζει  
Με πάθος και πυγμή να τα παλέψεις  
Εμπόδια αν εμφανιστούν μπορείς να τ' αντέξεις  
Άσε τι δεν μπορούν οι γύρω σου να κάνουν  
Κοίτα μονάχα οι δικές σου οι δυνάμεις μέχρι που φτάνουν  
Και τελικά κυρίες και κύριοι τι σημασία έχει  
Πτύχιο ή όχι αν κάποιος στο χέρι του κατέχει (?)  
Αν δεν μπορεί την καθημερινότητα να ζήσει (?)  
Και στην ζωή του τελικά να εντυχίσει (?)



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κύριο Κ. Αλαφοδήμο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς την συγκεκριμένη εργασία όπως επίσης και τους κυρίους Π. Κοφινά και Π. Φετφατζή για την εποπτεία, συμβουλές και κατευθύνσεις καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας.





## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι να γίνει μια τεχνο-οικονομική μελέτη εγκατάστασης φωτοβολταϊκού πάρκου ισχύος 200 KW με χρήση μικρο-μετατροπών (micro-inverter) εξετάζοντας παράλληλα τρία διαφορετικά σενάρια :

1. Σταθερής Εγκατάστασης
2. Ηλιακός Ιχνηλάτης (Tracking) μονού κάθετου άξονα
3. Ηλιακός Ιχνηλάτης (Tracking) διπλού κάθετου άξονα

Αρχικά γίνεται αναφορά σε βασικές έννοιες που έχουν να κάνουν με την ενέργεια όπως μονάδες και τύπους για διαφορετικές μορφές ενέργειας. Στην συνέχεια μελετάμε τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σε ποιές μορφές συναντώνται, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών. Ακολουθεί ειδικότερη ανάλυση της Ηλιακής Ενέργειας και συστημάτων τα οποία οφείλονται σε αυτήν, όπως το φωτοβολταϊκό, στο οποίο θα σταθούμε για περαιτέρω ανάλυση αφού υπάρχει άμεση σύνδεση με την τεχνολογία που διέπει το Φ/Β στοιχείο – ημιαγωγό, Φ/Β πάνελ. Θα αναφέρουμε στοιχεία που έχουν να κάνουν με την ιστορία και εξέλιξη του Φ/Β φαινομένου αλλά και την παρούσα κατάσταση στην Ελλάδα για την ανάπτυξη αυτού. Θα γίνει εισαγωγή, σχεδιασμός και εξομοίωση μικρο-μετατροπέα (micro-inverter) τον οποίο θα χρησιμοποιήσουμε για την κατασκευή του φωτοβολταϊκού μας πάρκου. Θα εξετάσουμε ακόμα συστήματα ιχνηλάτησης – παρακολούθησης (tracking) σύμφωνα με τα οποία έχουν γίνει και οι τρεις διαφορετικές μελέτες τα αποτελέσματα των οποίων στο τέλος αυτής της πτυχιακής θα συγκρίνουμε.



## Περιεχόμενα

### **Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή στην Ενέργεια**

1.1 Ενέργεια.....	8
1.1.1 Κινητική.....	8
1.1.2 Δυναμική.....	8
1.1.3 Πυρηνική.....	9
1.1.4 Χημική.....	9
1.1.5 Θερμική.....	9
1.1.6 Ηλιακή.....	9

### **Κεφάλαιο 2 : Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας**

2.1 Εισαγωγή.....	10
2.1.1 Αιολική.....	10
2.1.2 Ηλιακή.....	10
2.1.3 Υδροηλεκτρική.....	10
2.1.4 Βιομάζα.....	10
2.1.5 Γεωθερμική.....	11
2.1.6 Ενέργεια από τη Θάλασσα.....	11
2.1.7 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα.....	11

### **Κεφάλαιο 3 : Ηλιακή Ενέργεια**

3.1 Εισαγωγή.....	12
3.2 Χαρακτηριστικά Ηλιακής Ακτινοβολίας.....	13
3.3 Συλλογή Μέγιστης Ακτινοβολίας.....	15
3.4 Θερμικά Συστήματα.....	17
3.5 Φωτοβολταϊκά Συστήματα.....	18

### **Κεφάλαιο 4 : Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο**

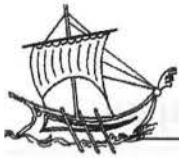
4.1 Εισαγωγή.....	18
4.2 Ιστορία και εξέλιξη.....	18
4.3 Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία (Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα).....	20
4.4 Φωτοβολταϊκό στοιχείο – Ημιαγωγοί.....	23



4.5 Υλικά και τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων / κυψελών (PV Cells) .	27
4.5.1 Το Πυρίτιο .....	27
4.5.2 Μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο .....	27
4.5.3 Παραγωγική Διαδικασία.....	29
4.5.4 Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο.....	30
4.5.5 Παραγωγική Διαδικασία.....	30
4.5.6 Πυρίτιο Ταινίας (Ribbon).....	31
4.5.7 Κρυσταλλικό Πυρίτιο Λεπτού Φίλμ .....	33
4.5.8 Άμορφο Πυρίτιο.....	34
4.5.9 Υβριδικά.....	35
4.5.10 Δισεληνιούχος Ινδιούχος Χαλκός (CuInSe <sub>2</sub> ή CIS) .....	35
4.5.11 Τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe) .....	36
4.6 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά Φ/Β στοιχείων .....	38
4.7 Ανίχνευση Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPPT).....	41
4.8 Φωτοβολταϊκά Πλαίσια.....	43
4.9 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των Φ/Β στοιχείων .....	45
4.9.1 Η επίδραση της σκίασης.....	48
4.9.2 Πρακτικοί κανόνες χωροθέτησης πάνελ στον Ελλαδικό χώρο .....	52
4.10 Παρούσα Κατάσταση και ανάπτυξη των Φ/Β στην Ελλάδα .....	53

## Κεφάλαιο 5 : Μετατροπέας – Αντιστροφέας (Inverter)

5.1 Μετατροπέας - Αντιστροφέας ( Inverter ).....	55
5.2 Φωτοβολταϊκός Μετατροπέας .....	56
5.2.1 Κεντρικός Μετατροπέας .....	57
5.2.2 Μετατροπείς Κλάδων ή Στοιχειοσειρών (String Inverters).....	58
5.2.3 Μετατροπείς Πολλαπλών Κλάδων ή Στοιχειοσειρών (MultiStings Inverters) .....	58
5.2.4 Μετατροπείς με Ενσωμάτωση σε Φ/Β πάνελ (Module IntegratedInverters) .....	59
5.2.5 Η χρήση Μετασχηματιστή στους Μετατροπείς.....	59
5.3 Μετατροπέας τύπου micro-inverter (Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα) .	61
5.4 Σχεδιασμός Φ/Β μετατροπέα τύπου micro-inverter.....	64
5.5 Εξομοίωση Φ/Β μετατροπέα τύπου micro-inverter .....	65



## Κεφάλαιο 6 : Σύστημα Στήριξης Φ/Β Πάνελ

6.1 Εισαγωγή.....	66
6.2 Σταθερές βάσεις.....	67
6.3 Σύστημα Ηλιακού Ιχνηλάτη (tracker). ....	69
6.4 Ανάλυση Συστημάτων Ιχνηλάτησης – Παρακολούθησης.....	72

## Κεφάλαιο 7 : Τεχνο-οικονομική ανάλυση εγκατάστασης φωτοβολταϊκού πάρκου ισχύος 200 KW με χρήση micro-inverter

7.1 Εισαγωγή.....	74
7.2 Χωρίς Σύστημα Παρακολούθησης (Tracking).....	75
7.3 Μονού κάθετου άξονα.....	84
7.4 Διπλού κάθετου άξονα.....	91
7.5 Συμπεράσματα.....	98

## Βιβλιογραφία - Αναφορές..... 101



## 1.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Κάθε φυσικό σύστημα περιέχει (ή εναλλακτικά αποθηκεύει) μία ποσότητα που ονομάζεται ενέργεια. Ενέργεια, συνεπώς, είναι η ικανότητα ενός σώματος ή συστήματος να παράγει έργο. Οποιαδήποτε μορφή δράσης από τα παιδικά παιχνίδια μέχρι τη λειτουργία των μηχανών και από το μαγείρεμα τροφών μέχρι τη γραμμή παραγωγής στο εργοστάσιο προϋποθέτει κατανάλωση ενέργειας. Οι πράγματι πολυποίκιλες μορφές ενέργειας βρίσκονται πίσω από την ασύλληπτη ποικιλία των φυσικών φαινομένων. Η ενέργεια με την οποία τροφοδοτείται ο πλανήτης μας προέρχεται σχεδόν εξ ολοκλήρου από τον Ήλιο. Ανάλογα με τον τρόπο που έχει αποκτηθεί, ανταλλαχθεί ή αποθηκευτεί, μπορούμε να μιλήσουμε για πολλές μορφές ενέργειας.

### 1.1.1 Κινητική

Κινητική ενέργεια, είναι η ενέργεια που έχει ένα σώμα όταν κινείται και αναφέρεται στην ικανότητά του να παράγει έργο. Ως κινητική ενέργεια ενός σώματος ορίζεται η συνολική ενέργεια που χρειάζεται να απορροφήσει ένα σώμα προκειμένου να αποκτήσει ορισμένη μεταφορική ταχύτητα ή/και γωνιακή ταχύτητα ξεκινώντας από την ακινησία. Υπάρχουν δύο ανεξάρτητα είδη κινήσεων για ένα μηχανικό σώμα, η μεταφορική κίνηση και η περιστροφή, οι οποίες χαρακτηρίζονται από την ταχύτητα και τη γωνιακή ταχύτητα αντίστοιχα. και εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες: τη μάζα και την ταχύτητα ενός κινούμενου σώματος.

### 1.1.2 Δυναμική

Ως δυναμική ενέργεια ορίζεται η ενέργεια που κατέχει ένα σώμα λόγω της θέσεως ή της κατάστασής του, είναι δηλαδή η δυνατότητα του σώματος να παράγει έργο επειδή βρίσκεται μέσα σε κάποιο πεδίο δυνάμεων. Συγκεκριμένα, η δυναμική ενέργεια διακρίνεται σε ενέργεια θέσεως (π.χ. ένα σώμα σε πεδίο βαρύτητας που έχει τη δυνατότητα να κινηθεί σε χαμηλότερη θέση παράγοντας έργο) και ενέργεια μορφής ή αλλιώς παραμόρφωσης, που εμφανίζεται όταν συστρέφουμε, συμπιέζουμε, τεντώνουμε ή λυγίζουμε ένα υλικό αλλάζοντας τη φυσική του μορφή (π.χ. το παραμορφωμένο ελατήριο ή λάστιχο). Στην περίπτωση αυτή, το σώμα μπορεί να παράγει έργο επανερχόμενο στη "φυσική" του μορφή..





## 1.1.3 Πυρηνική ή Ατομική

Πυρηνική ενέργεια ή ατομική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που απελευθερώνεται όταν μετασχηματίζονται ατομικοί πυρήνες. Είναι δηλαδή η δυναμική ενέργεια που είναι εγκλεισμένη στους πυρήνες των ατόμων λόγω της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων που τα συνιστούν. Η πυρηνική ενέργεια απελευθερώνεται κατά τη σχάση ή σύντηξη των πυρήνων και εφόσον οι πυρηνικές αντιδράσεις είναι ελεγχόμενες (όπως συμβαίνει στην καρδιά ενός πυρηνικού αντιδραστήρα) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει ενεργειακές ανάγκες.

## 1.1.4 Χημική

Η χημική ενέργεια, το σύνολο της δυναμικής ενέργειας που απαιτήθηκε για τη συγκρότηση μορίων χημικών ουσιών από διάφορα άτομα, κάτω από την αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων. Η χημική ενέργεια αποδίδεται συνήθως ως θερμική ή ηλεκτρική, όταν τα μόρια διασπώνται και πάλι σε άτομα ή μετασχηματίζεται στους οργανισμούς σε θερμική και κινητική, με βιολογικούς μηχανισμούς, και ονομάζεται ζωική ενέργεια.

## 1.1.5 Θερμική

Η θερμική ενέργεια χαρακτηρίζει το σύνολο της κινητικής ενέργειας των σωματιδίων που συγκροτούν τα υλικά σώματα, καθώς αυτά κινούνται στο εσωτερικό τους με συνέπεια να αναπτύσσουν θερμοκρασία. Πρόκειται για εσωτερική ενέργεια ενός συστήματος που βρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Η θερμική ενέργεια είναι η μορφή ενέργειας που παράγεται από την τυχαία κίνηση των ατόμων και μορίων των ουσιών. Όσο πιο έντονη είναι η κίνηση αυτών, τόσο πιο θερμό γίνεται το σώμα. Η κίνηση αυτή για να μεταβληθεί απαιτεί την είσοδο εξωτερικής ενέργειας, η οποία μπορεί να έχει διάφορες μορφές, όπως μεγάλου μήκους κύματος ηλιακή ενέργεια. Εν προκειμένω με τον όρο θερμότητα εννοούμε ειδικά την ενέργεια που μεταφέρεται από ένα σώμα υψηλής θερμοκρασίας σε άλλο με χαμηλότερη θερμοκρασία, και ποτέ αντίστροφα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η κινητική ενέργεια των σωματιδίων του δεύτερου. Συνεπώς θερμική ενέργεια διαθέτουν όλα τα σώματα είτε αυτά είναι ζεστά είτε είναι κρύα. Απλά το θερμό σώμα έχει περισσότερη θερμική ενέργεια η οποία και διαδίδεται με διάφορους τρόπους όπως είναι η θερμική ακτινοβολία.

## 1.1.6 Ηλιακή

Ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο την οποία θα εξετάσουμε αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 3.1. [1][2]



## 2.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας (ΑΠΕ) ή ήπιες μορφές ενέργειας, είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού κτλ. Ο όρος «ήπιες» αναφέρεται σε δυο βασικά χαρακτηριστικά τους. Καταρχάς, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Δεύτερον, πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, πολύ «φιλικές» στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Έτσι οι ΑΠΕ θεωρούνται από πολλούς μία αφετηρία για την επίλυση των οικολογικών προβλημάτων που αντιμετωπίζει η Γη.

### 2.1.1 Αιολική ενέργεια.

Χρησιμοποιήθηκε παλιότερα για την άντληση νερού από πηγάδια καθώς και για μηχανικές εφαρμογές (π.χ. την άλεση στους ανεμόμυλους). Έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται ευρέως για ηλεκτροπαραγωγή.

### 2.1.2 Ηλιακή ενέργεια.

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για: την άμεση παραγωγή θερμότητας, με ενεργητικά και παθητικά ηλιακά συστήματα. Αν η παραγόμενη θερμότητα είναι υψηλής θερμοκρασίας, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ατμού και στη συνέχεια μηχανικής ενέργειας (με ατμοστρόβιλους). Η μηχανική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε αυτή τη περίπτωση αναφερόμαστε σε θεριακή παραγωγή ηλεκτρισμού από την ηλιακή ενέργεια.☐

### 2.1.3 Υδροηλεκτρική ενέργεια.

Είναι τα γνωστά υδροηλεκτρικά έργα, που στο πεδίο των ήπιων μορφών ενέργειας εξειδικεύονται περισσότερο στα μικρά υδροηλεκτρικά. Είναι η πιο διαδεδομένη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας.

### 2.1.4 Βιομάζα.

Χρησιμοποιεί τους υδατάνθρακες των φυτών (κυρίως αποβλήτων της βιομηχανίας ξύλου, τροφίμων και ζωοτροφών και της βιομηχανίας ζάχαρης) με σκοπό την αποδέσμευση της ενέργειας που δεσμεύτηκε απ' το φυτό με τη φωτοσύνθεση. Ακόμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αστικά απόβλητα και απορρίμματα. Μπορεί να δώσει βιοαιθανόλη και βιοαέριο, που είναι καύσιμα πιο φιλικά προς το περιβάλλον από τα παραδοσιακά. Είναι μια πηγή ενέργειας με πολλές δυνατότητες και εφαρμογές που θα χρησιμοποιηθεί πλατιά στο μέλλον.



## 2.1.5 Γεωθερμική ενέργεια.

Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται απ' τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια, π.χ. στους θερμοπίδακες ή στις πηγές ζεστού νερού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας για θερμικές εφαρμογές είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η Ισλανδία καλύπτει το 80-90% των ενεργειακών της αναγκών, όσον αφορά τη θέρμανση, και το 20%, όσον αφορά τον ηλεκτρισμό, με γεωθερμική ενέργεια.

## 2.1.6 Ενέργεια από τη θάλασσα

- **Ενέργεια από παλίρροιες.** Εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα του Ήλιου και της Σελήνης, που προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού. Το νερό αποθηκεύεται καθώς ανεβαίνει και για να ξανακατέβει αναγκάζεται να περάσει μέσα από μια τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρισμό. Έχει εφαρμοστεί στην Αγγλία, τη Γαλλία και τη Ρωσία.
- **Ενέργεια από κύματα.** Εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας.
- **Ενέργεια από τους ωκεανούς.** Εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων. Βρίσκεται στο στάδιο της έρευνας.

## 2.1.7 Πλεονεκτήματα ΑΠΕ

- Είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον, έχοντας ουσιαστικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα.
- Δεν πρόκειται να εξαντληθούν ποτέ, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα.
- Μπορούν να βοηθήσουν την ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών, καθώς και να αποτελέσουν την εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου.
- Είναι ευέλικτες εφαρμογές που μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επί τόπου πληθυσμού, καταργώντας την ανάγκη για τεράστιες μονάδες παραγωγής ενέργειας (καταρχήν για την ύπαιθρο) αλλά και για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.
- Ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση και έχει μεγάλο χρόνο ζωής.
- Επιδοτούνται από τις περισσότερες κυβερνήσεις.

## Μειονεκτήματα ΑΠΕ

- Έχουν αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Συνεπώς απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια γης. Γι' αυτό το λόγο μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται σαν συμπληρωματικές πηγές ενέργειας.
- Για τον παραπάνω λόγο προς το παρόν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων.
- Η παροχή και απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται.
- Για τις αιολικές μηχανές υπάρχει η άποψη ότι δεν είναι κομψές από αισθητική άποψη κι ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πουλιών. Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας τους και την προσεκτικότερη επιλογή χώρων εγκατάστασης (π.χ. σε πλατφόρμες στην ανοιχτή θάλασσα) αυτά τα προβλήματα έχουν σχεδόν λυθεί.
- Για τα υδροηλεκτρικά έργα λέγεται ότι προκαλούν έκλυση μεθανίου από την αποσύνθεση των φυτών που βρίσκονται κάτω απ' το νερό κι έτσι συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. [3]

### 3.1 Ηλιακή Ακτινοβολία

Η ύπαρξη ζωής στη γη οφείλεται στον ήλιο. Τα φυτά, για τη φωτοσύνθεση, χρειάζονται ηλιακό φως. Τα φυτοφάγα ζώα τρέφονται με φυτά, τα σαρκοφάγα με φυτοφάγα, άρα όλα εξαρτώνται από τον ήλιο. Ο άνθρωπος εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιώντας ηλιακά ηλεκτρικά στοιχεία, πλαίσια ηλιακών κυψελίδων και γιγάντια κάτοπτρα. Έτσι θερμαίνεται νερό και παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας έχει πάρα πολλά θετικά στοιχεία, γιατί θα υπάρχει για πάντα και δεν μολύνει καθόλου την ατμόσφαιρα της γης. Οι ηλιακές συσκευές όμως κοστίζουν πολύ ακριβά.

Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που παράγεται στον ήλιο. Φτάνει σχεδόν αμετάβλητη στο ανώτατο στρώμα της ατμόσφαιρας του πλανήτη μας, διαμέσου του διαστήματος, και στη συνέχεια κατά τη διέλευσή της από την ατμόσφαιρα υπόκειται σε σημαντικές αλλαγές, που οφείλονται στην σύσταση της ατμόσφαιρας. Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα σημείο στην επιφάνεια της γης μια δεδομένη χρονική στιγμή χαρακτηρίζεται από την ένταση και την διεύθυνση πρόσπτωσης. Στην επιφάνεια της γης φτάνει μόνο ένα μέρος της ακτινοβολίας που προέρχεται άμεσα από τον ήλιο (άμεση ηλιακή ακτινοβολία), ενώ το υπόλοιπο είτε απορροφάται από τα

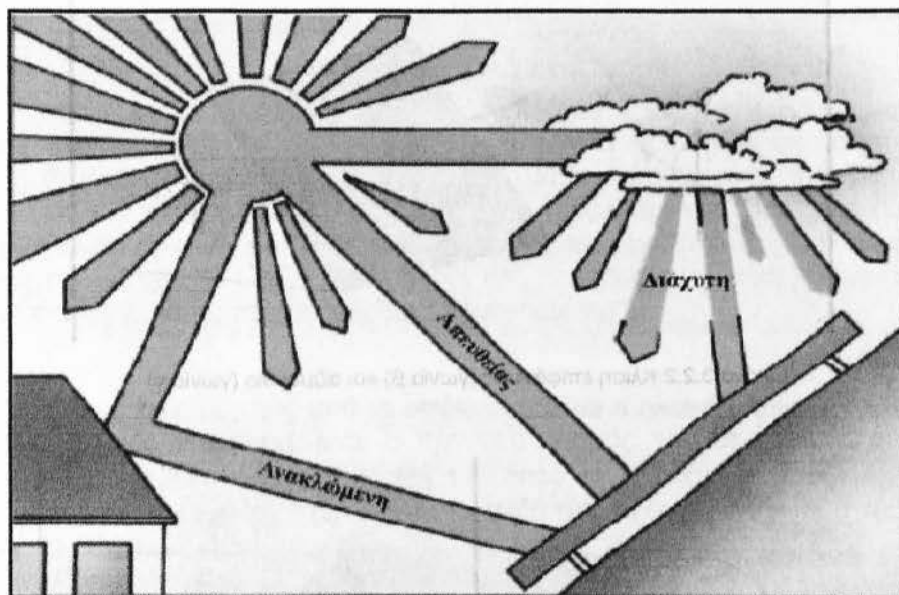


συστατικά της ατμόσφαιρας είτε ανακλάται πάλι προς το διάστημα ή προς την επιφάνεια της γης. Η ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης μετά από διαδοχικές ανακλάσεις δεν έχει συγκεκριμένη διεύθυνση και καλείται διάχυτη ακτινοβολία. Η ηλιακή ενέργεια είναι πρωτογενής, ήπια και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας η οποία έμμεσα δίνει γένεση σε άλλες τρεις ήπιες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, την υδραυλική, την αιολική και την ενέργεια της βιομάζας.

## 3.2 Χαρακτηριστικά Ηλιακής Ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ένα κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια του εδάφους αποτελείται από τρεις συνιστώσες όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.1 :

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



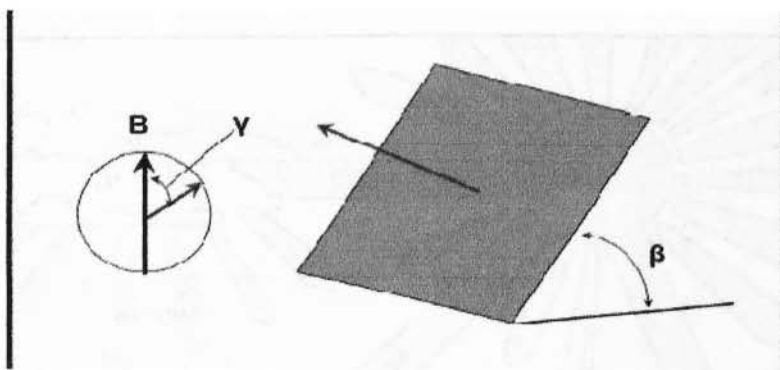
Εικόνα 3.2.1 Η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ένα κεκλιμένο επίπεδο



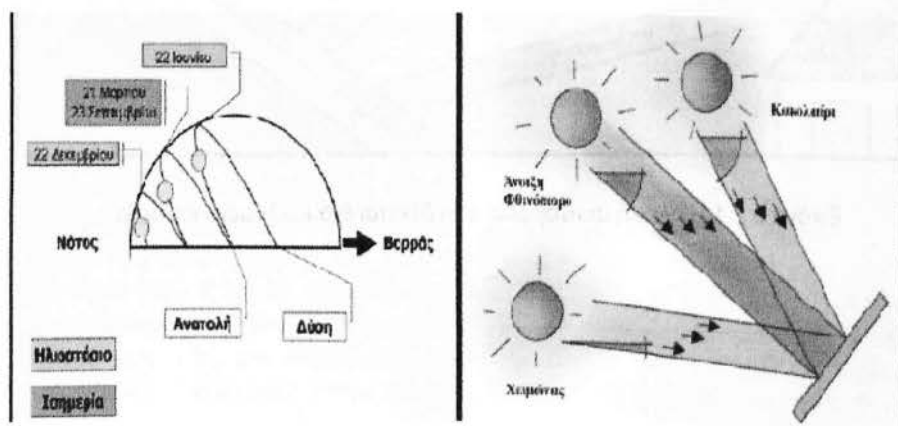


Σε ότι αφορά στην θέση μίας επιφάνειας μελέτης όπως φαίνεται στο σχήμα 3 και 4 ορίζουμε:

- Κλίση  $\beta$ : την κλίση της επιφάνειας ως προς το οριζόντιο επίπεδο.
- Αζιμούθιο  $\gamma$ : η γωνία που σχηματίζει η προβολή του κάθετου διανύσματος της επιφάνειας στο οριζόντιο επίπεδο με τον άξονα Βορράς-Νότος.
- Για νότιο προσανατολισμό  $\gamma=0$
- Για γωνίες δυτικά  $\gamma \rightarrow (+)$
- Για γωνίες ανατολικά  $\gamma \rightarrow (-)$
- Απόκλιση  $\delta$  του ήλιου: η γωνία ανάμεσα στην ευθεία ήλιου-γης και την προβολή της στο επίπεδο του ισημερινού
- Η μέγιστη τιμή της, κατά το θερινό ηλιοστάσιο, είναι:  $23.45^\circ$ .
- Η ελάχιστη τιμή της, κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο, είναι:  $-23.45^\circ$ . [4]



Εικόνα 3.2.2 Κλίση επιφάνειας (γωνία  $\beta$ ) και αζιμούθιο (γωνία  $\gamma$ )



Εικόνα 3.2.3 Κίνηση και απόκλιση του ήλιου (γωνία  $\delta$ ) κατά την διάρκεια του έτους.

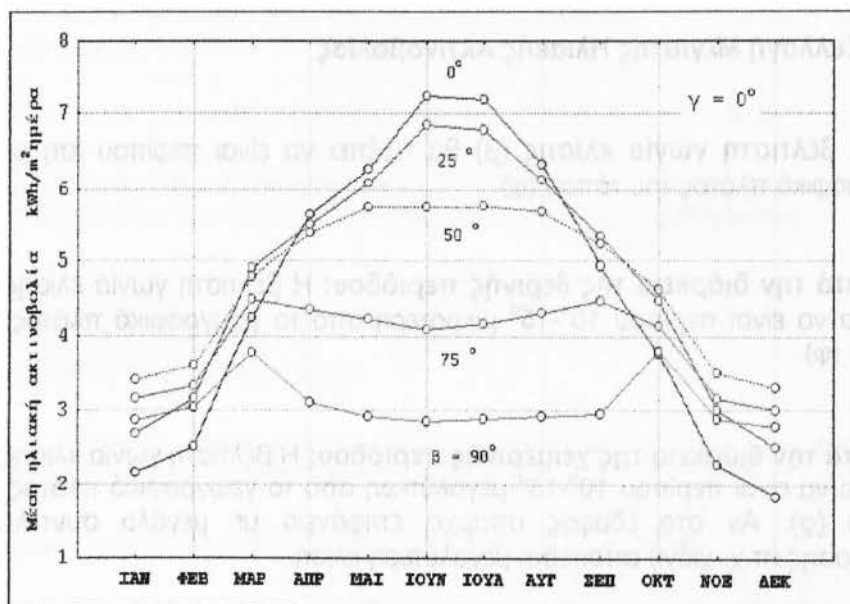


### 3.3 Συλλογή Μέγιστης Ηλιακής Ακτινοβολίας

- Η **βέλτιστη γωνία κλίσης** ( $\beta$ ) θα πρέπει να είναι περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου ( $\varphi$ ).
- **Κατά την διάρκεια της θερινής περιόδου:** Η βέλτιστη γωνία κλίσης ( $\beta$ ) πρέπει να είναι περίπου  $10^{\circ}$ - $15^{\circ}$  μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου ( $\varphi$ ).
- **Κατά την διάρκεια της χειμερινής περιόδου:** Η βέλτιστη γωνία κλίσης ( $\beta$ ) πρέπει να είναι περίπου  $10^{\circ}$ - $15^{\circ}$  μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου ( $\varphi$ ). Αν στο έδαφος υπάρχει επιφάνεια με μεγάλο συντελεστή ανάκλασης (π.χ. χιόνι) απαιτείται μεγαλύτερη κλίση.
- Ο **βέλτιστος προσανατολισμός** (αζιμούθιο  $\gamma$ ) είναι νότιος ( $\gamma=0^{\circ}$ ), ενώ απόκλιση κατά  $20^{\circ}$ - $30^{\circ}$  από νότο έχει μικρή επίδραση στην ετήσια συλλεγόμενη ενέργεια.

Στο πιο κάτω σχήμα 3.3.1 παρουσιάζεται η μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα, που θα δεχθεί μία επιφάνεια νότιου προσανατολισμού για διάφορες γωνίες κλίσεις. Οι τιμές αυτές αναφέρονται για βόρειο γεωγραφικό πλάτος  $38^{\circ}$ ,  $\rho = 0.2$  και είναι προσεγγιστικές. Παρ' όλα αυτά όμως δίνουν μία πλήρη εικόνα της επίδρασης που έχει η κλίση στην ηλιακή ακτινοβολία που θα δεχθεί η επιφάνεια. Απ' το σχήμα αυτό επιβεβαιώνεται ο εμπειρικός κανόνας που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Ένα άλλο μέγεθος από το οποίο εξαρτάται η ηλιακή ακτινοβολία που θα δεχθεί μία επιφάνεια, είναι ο προσανατολισμός της. Θεωρώντας ότι η ηλιακή ακτινοβολία είναι συμμετρική ως προς το ηλιακό μεσημέρι, τότε ο καλύτερος προσανατολισμός για ένα επίπεδο ηλιακό συλλέκτη είναι ο νότιος για το βόρειο ημισφαίριο, και ο βόρειος για το νότιο ημισφαίριο ( $\gamma = 0^{\circ}$ ). Αποκλίσεις κατά  $10^{\circ}$  μέχρι  $20^{\circ}$  ανατολικά ή δυτικά του νότου έχουν μικρή επίδραση στην ετήσια συλλεγόμενη ηλιακή ενέργεια. Ο προσανατολισμός σ' ένα επίπεδο ηλιακό συλλέκτη θα έχει επίδραση και στο χρόνο που θα δεχθεί την ηλιακή ακτινοβολία. Έτσι ένας συλλέκτης τοποθετημένος νοτιοανατολικά, θα δεχθεί το μεγαλύτερο ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας τις πρωινές ώρες.

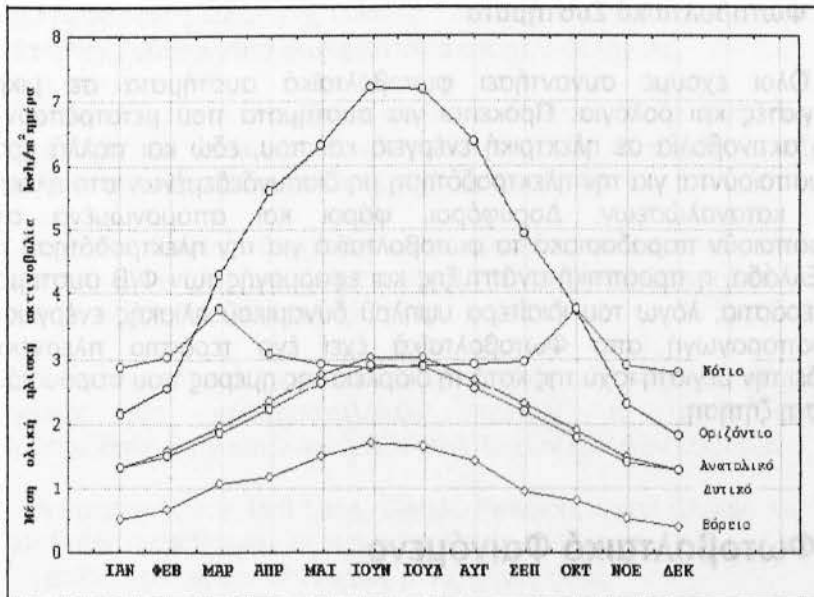
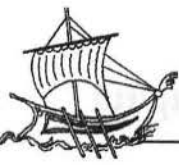


Γράφημα 3.3.1 Επίδραση της κλίσης στη μέση ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα, που δέχεται επιφάνεια νότιου προσανατολισμού ( $\gamma=0^\circ$ ) για βόρειο γεωγραφικό πλάτος του τόπου  $\varphi=38^\circ$  και συντελεστή ανάκλασης  $\rho=0.2$

Στο σχήμα 3.3.2 παρουσιάζεται η μέση ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα, που δέχεται οριζόντια επιφάνεια και τέσσερις κάθετες επιφάνειες, με προσανατολισμό νότιο, ανατολικό, βόρειο και δυτικό. Ένα χαρακτηριστικό που παρουσιάζει το σχήμα αυτό είναι ότι όλες οι καμπύλες εκτός εκείνης της νότιας επιφάνειας έχουν ένα μέγιστο που αντιστοιχεί στο θερινό ηλιοστάσιο, ενώ της νότιας έχει δυο μέγιστα που αντιστοιχούν στην εαρινή και την φθινοπωρινή ισημερία. Επίσης από το διάγραμμα παρατηρείται ότι τους χειμερινούς μήνες η νότια επιφάνεια θα δεχθεί τα μεγαλύτερα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες η οριζόντια επιφάνεια υπερτερεί όλων.

Οι μεγάλες τιμές του ύψους του ήλιου κατά την θερινή περίοδο δικαιολογούν τη μορφή της καμπύλης που αναφέρεται στην οριζόντια επιφάνεια ενώ ο συνδυασμός του μικρού ύψους του ήλιου με την μεγάλη διάρκεια του ημερήσιου τόξου του, δίνουν τα δύο μέγιστα στις ισημερίες. Επίσης το πολύ μικρό ύψος του ήλιου σε συνδυασμό με το μικρό ημερήσιο τόξο του, έχουν σαν αποτέλεσμα η νότια επιφάνεια να υπερτερεί έναντι όλων των άλλων κατά την χειμερινή περίοδο.

Ο εμπειρικός κανόνας που αναφέρθηκε παραπάνω για την κλίση των ηλιακών συλλεκτών, δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα όταν εφαρμοσθεί σε μικρές ηλιακές εγκαταστάσεις. Επίσης στα φωτοβολταϊκά συστήματα που το κόστος των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι υψηλό, θα πρέπει να μελετηθεί η βέλτιστη κλίση τους για την συγκεκριμένη εφαρμογή.



Γράφημα 3.3.1 Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα, που δέχεται οριζόντια επιφάνεια και τέσσερις άλλες κάθετες επιφάνειες διαφορετικού προσανατολισμού για βόρειο γεωγραφικό πλάτος του τόπου  $\varphi=38^\circ$  και συντελεστή ανάκλασης  $\rho=0.2$

Όσον αφορά την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, θα μπορούσαμε να πούμε ότι χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών: τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα, και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα παθητικά και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. [5]

### 3.4 Θερμικά Ηλιακά Συστήματα

Η πιο απλή και διαδεδομένη μορφή των θερμικών ηλιακών συστημάτων είναι οι γνωστοί σε όλους μας ηλιακοί θερμοσίφωνες, οι οποίοι απορροφούν την ηλιακή ενέργεια και στη συνέχεια, τη μεταφέρουν με τη μορφή θερμότητας σε κάποιο ρευστό, όπως το νερό για παράδειγμα. Η απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας γίνεται μέσω ηλιακών συλλεκτών, σκουρόχρωμων δηλαδή επιφανειών καλά προσανατολισμένων στον ήλιο, οι οποίες βρίσκονται σε επαφή με νερό και του μεταδίδουν μέρος της θερμότητας που παρέλαβαν. Το παραγόμενο ζεστό νερό χρησιμοποιείται για απλή οικιακή ή πιο σύνθετη βιομηχανική χρήση, τελευταία δε ακόμη και για τη θέρμανση και ψύξη χώρων μέσω κατάλληλων διατάξεων.



## 3.5 Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Όλοι έχουμε συναντήσει φωτοβολταϊκά συστήματα σε μικρούς υπολογιστές και ρολόγια. Πρόκειται για συστήματα που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια και που, εδώ και πολλά χρόνια, χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροδότηση μη διασυνδεδεμένων στο ηλεκτρικό δίκτυο καταναλώσεων. Δορυφόροι, φάροι και απομονωμένα σπίτια χρησιμοποιούν παραδοσιακά τα φωτοβολταϊκά για την ηλεκτροδότησή τους. Στην Ελλάδα, η προοπτική ανάπτυξης και εφαρμογής των Φ/Β συστημάτων είναι τεράστια, λόγω του ιδιαίτερα υψηλού δυναμικού ηλιακής ενέργειας. Η ηλεκτροπαραγωγή από Φωτοβολταϊκά έχει ένα τεράστιο πλεονέκτημα αποδίδει την μέγιστη ισχύ της κατά τη διάρκεια της ημέρας που παρουσιάζεται η μέγιστη ζήτηση.

## 4.1 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Το ηλιακό φως είναι ουσιαστικά μικρά πακέτα ενέργειας που λέγονται φωτόνια. Τα φωτόνια περιέχουν διαφορετικά ποσά ενέργειας, ανάλογα με το μήκος κύματος του ηλιακού φάσματος. Το γαλάζιο χρώμα ή το υπεριώδες π.χ. έχουν περισσότερη ενέργεια από το κόκκινο ή το υπέρυθρο. Όταν λοιπόν τα φωτόνια προσκρούσουν σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο (που είναι ουσιαστικά ένας “ημιαγωγός”), άλλα ανακλώνται, άλλα το διαπερνούν και άλλα απορροφώνται από το φωτοβολταϊκό. Αυτά τα τελευταία φωτόνια είναι που παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Τα φωτόνια αυτά αναγκάζουν τα ηλεκτρόνια του φωτοβολταϊκού να μετακινηθούν σε άλλη θέση και ως γνωστόν ο ηλεκτρισμός δεν είναι τίποτε άλλο παρά διατεταγμένη κίνηση ηλεκτρονίων. Σ’ αυτή την απλή αρχή της φυσικής λοιπόν βασίζεται μια από τις πιο εξελιγμένες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού στις μέρες μας. [6]

## 4.2 Ιστορία και Εξέλιξη των Φωτοβολταϊκών

Ο Ήλιος αποτελεί μία τεράστια και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας που η εκμετάλλευση μόνο του 0,05% αυτής θα ήταν αρκετή να καλύψει κάθε ενεργειακή ανάγκη της ανθρωπότητας. Η εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας και η μετατροπή του σε ηλεκτρικό ρεύμα είναι σήμερα δυνατή μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Η ιστορία του συνοψίζεται στα ακόλουθα κύρια σημεία:

**1839:** Ο δεκαεννιάχρονος τότε Γάλλος φυσικός Alexandre-Edmond Becquerel, ανακάλυψε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο καθώς πειραματιζόταν με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης.

**1873:** Ανακαλύφθηκε η φωτοαγωγιμότητα του σεληνίου από τον Willoughby Smith.

**1876:** Ο William Grylls Adams με τον μαθητή του Richard Evans Day, ανακάλυψαν ότι το σελήνιο παράγει ηλεκτρισμό όταν εκτίθεται στο φως.





**1883:** Ο Αμερικάνος ερευνητής Charles Fritts, περιέγραψε την πρώτη κυψέλη η οποία αποτελούνταν από φωτοβολταϊκό στοιχείο σεληνίου.

**1887:** Ο Heinrich Hertz ανακάλυψε ότι διευκολύνεται η δημιουργία βολταϊκού τόξου μεταξύ δύο πολωμένων ηλεκτροδίων, όταν ο χώρος μεταξύ των ηλεκτροδίων ακτινοβολείται από υπεριώδη ακτινοβολία.

**1904:** Ο Albert Einstein δημοσίευσε την εργασία με την οποία έδωσε την εξήγηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Γι' αυτήν του την προσπάθεια, τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ το 1921.

**1918:** Ο πολωνός επιστήμονας Jan Czochralski ανέπτυξε μια νέα μέθοδο παραγωγής του μονοκρυσταλλικού πυριτίου, το οποίο αργότερα χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή των αντίστοιχων ηλιακών κυψελών.

**1954:** Οι ερευνητές του Bell Labs, Gerald Pearson, Daryl Chapin και Calvin Souther Fuller ανακάλυψαν τις πρώτες ηλιακές κυψέλες πυριτίου με απόδοση 4,5%, η οποία έφτασε στο 6% λίγους μόλις μήνες μετά.

**1958:** Η Hoffman Electronics πετυχαίνει να αυξήσει τον βαθμό απόδοσης κυψέλης στο 9%, ενώ στις 17 Μαρτίου εκτοξεύεται ο Vanguard I, ο πρώτος δορυφόρος του οποίου η ισχύς προέρχεται από ηλιακές κυψέλες.

**Σήμερα:** Η έρευνα πάνω στην βελτίωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών είναι συνεχής και εντεινόμενη. Οι εμπορικά διαθέσιμες εφαρμογές αποτελούνται πλέον από κυψέλες, των οποίων ο βαθμός απόδοσης μπορεί να ξεπερνάει ακόμη και το 20%, με κόστος σημαντικό μικρότερο από ότι στο παρελθόν.

Οι πρώτες συμβατικές φωτοβολταϊκές κυψέλες κατασκευάστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 50 και μέσα στην επόμενη δεκαετία χρησιμοποιήθηκαν στους δορυφόρους τροχιάς. Στη δεκαετία του 70, βελτιώσεις στην κατασκευή, απόδοση και ποιότητα των φωτοβολταϊκών βοήθησαν να μειωθούν τα κόστη και άνοιξαν το δρόμο για τη χρήση τους σε επίγειες εφαρμογές όπως η φόρτιση μπαταριών συστημάτων πλοήγησης, τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού και άλλων συστημάτων με χαμηλές ανάγκες σε ενέργεια.

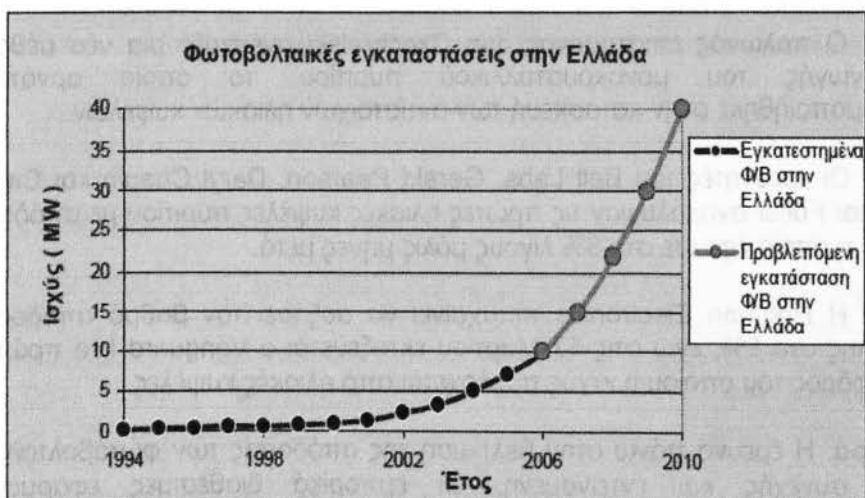
Στη δεκαετία του 80, τα φωτοβολταϊκά έγιναν μια δημοφιλής ενεργειακή πηγή για ηλεκτρονικές συσκευές του εμπορίου όπως οι υπολογιστές τσέπης, τα ρολόγια, τα ραδιόφωνα και άλλες μικροσυσκευές. Μετά την ενεργειακή κρίση του 70, αυξήθηκαν διεθνώς οι εφαρμογές των φωτοβολταϊκών για την ηλεκτροδότηση επαρχιακών κλινικών, ψυγείων, αντλιών νερού, τηλεπικοινωνιών και κατοικιών εκτός δικτύου ηλεκτροδότησης. Αυτές οι εφαρμογές παραμένουν ένα μεγάλο κομμάτι της σημερινής αγοράς φωτοβολταϊκών. Σήμερα η βιομηχανία φωτοβολταϊκών αυξάνεται κατά 25% το χρόνο και υιοθετείται με γρήγορους ρυθμούς η υλοποίηση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτίρια. Κάθε κιλοβάτ κοστίζει 2500 έως 3500 € και η ζωή ενός συστήματος φωτοβολταϊκών είναι γύρω στα 25 χρόνια.



Κατά την Οδηγία 2001/77 της ΕΕ, η Ελλάδα μέχρι το 2010 πρέπει να παράγει:

- 20.1% της ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ.
- 14% της ηλεκτρικής ενέργειας από τεχνολογίες ΑΠΕ πλην των μεγάλων Υ/Η.

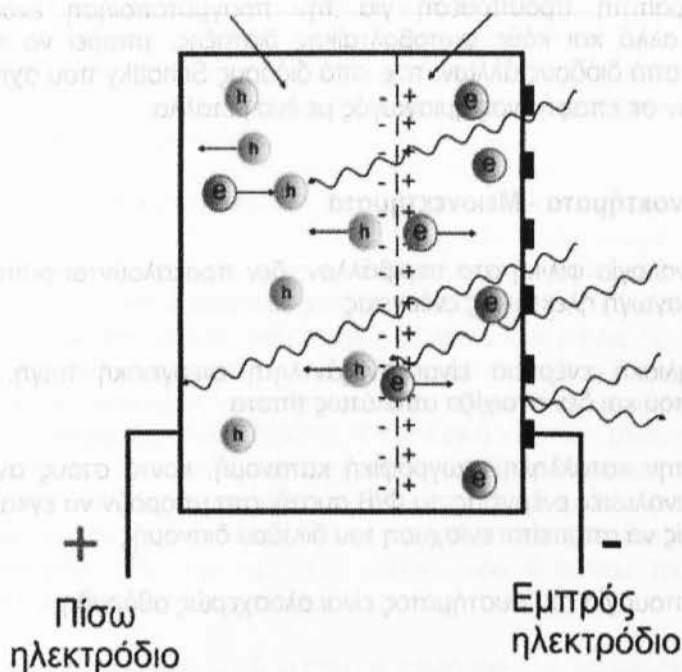
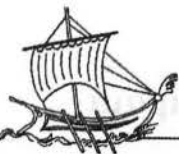
Αυτό σημαίνει 3,000 MW ΑΠΕ μέχρι το 2010.[7]



Γράφημα 4.2.1 Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις στην Ελλάδα

### 4.3 Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία

Είναι γνωστό ότι τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με τη μορφή ενός δίσκου, (δηλαδή η ένωση p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου), που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μία περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές), πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντιθέτου πρόσημου), μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου (Σχήμα 4.3.1).



Σχήμα 4.3.1: Το φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Ο μηχανισμός της εκδήλωσης του Φ/Β φαινομένου σε ένα ηλιακό στοιχείο. Τα φωτόνια της ακτινοβολίας, που δέχεται το στοιχείο στην εμπρός του όψη, τύπου  $n$  στο παράδειγμα του σχήματος, παράγουν ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές). Ένα μέρος από τους φορείς αυτούς διαχωρίζεται με την επίδραση του ενσωματωμένου πεδίου της διόδου και εκτρέπεται προς τα εμπρός (τα ελεύθερα ηλεκτρόνια,  $e^-$ ) ή προς τα πίσω (οι οπές,  $h^+$ ), δημιουργώντας μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου. Οι υπόλοιποι φορείς επανασυνδέονται και εξαφανίζονται. Επίσης ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται στην επιφάνεια του στοιχείου, ενώ ένα άλλος μέρος της διέρχεται από το στοιχείο χωρίς να απορροφηθεί, μέχρι να συναντήσει το πίσω ηλεκτρόδιο.

Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου  $n$  και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου  $p$ , με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου. Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η αποδοτική λειτουργία των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του παραπάνω φαινομένου. Εκτός από τις προσμίξεις των τμημάτων  $p$  και  $n$  μιας ομοένωσης, δηλαδή υλικού από τον ίδιο βασικά ημιαγωγό, το ενσωματωμένο ηλεκτροστατικό πεδίο, που



είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματοποίηση ενός ηλιακού στοιχείου, αλλά και κάθε φωτοβολταϊκής διάταξης, μπορεί να προέρχεται επίσης και από διόδους άλλων. π.χ. από διόδους Schottky που σχηματίζονται όταν έρθουν σε επαφή ένας ημιαγωγός με ένα μέταλλο.

### Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

- Τεχνολογία φιλική στο περιβάλλον: δεν προκαλούνται ρύποι από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Η ηλιακή ενέργεια είναι ανεξάντλητη ενεργειακή πηγή, διατίθεται παντού και δεν στοιχίζει απολύτως τίποτα
- Με την κατάλληλη γεωγραφική κατανομή, κοντά στους αντίστοιχους καταναλωτές ενέργειας, τα Φ/Β συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν χωρίς να απαιτείται ενίσχυση του δικτύου διανομής
- Η λειτουργία του συστήματος είναι ολοσχερώς αθόρυβη
- Έχουν σχεδόν μηδενικές απαιτήσεις συντήρησης
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής: οι κατασκευαστές εγγυώνται τα «κρύσταλλα» για 20-30 χρόνια λειτουργίας
- Υπάρχει πάντα η δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης, ώστε να ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών
- Μπορούν να εγκατασταθούν πάνω σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές, όπως είναι π.χ. η στέγη ενός σπιτιού ή η πρόσοψη ενός κτιρίου.
- Διαθέτουν ευελιξία στις εφαρμογές: τα Φ/Β συστήματα λειτουργούν άριστα τόσο ως αυτόνομα συστήματα, όσο και ως αυτόνομα υβριδικά συστήματα όταν συνδυάζονται με άλλες πηγές ενέργειας (συμβατικές ή ανανεώσιμες) και συσσωρευτές για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας. Επιπλέον, ένα μεγάλο πλεονέκτημα του Φ/Β συστήματος είναι ότι μπορεί να διασυνδεθεί με το δίκτυο ηλεκτροδότησης (διασυνδεδεμένο σύστημα), καταργώντας με τον τρόπο αυτό την ανάγκη για εφεδρεία και δίνοντας επιπλέον τη δυνατότητα στον χρήστη να πωλήσει τυχόν πλεονάζουσα ενέργεια στον διαχειριστή του ηλεκτρικού δικτύου, όπως ήδη γίνεται στο Φράιμπουργκ της Γερμανίας.

Ως **μειονέκτημα** θα μπορούσε να καταλογίσει κανείς στα φωτοβολταϊκά συστήματα το κόστος τους, το οποίο, παρά τις τεχνολογικές εξελίξεις παραμένει ακόμη αρκετά υψηλό. Μια γενική ενδεικτική τιμή είναι 2500 έως 3500€ ανά εγκατεστημένο κιλοβάτ (kW) ηλεκτρικής ισχύος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι μια τυπική οικιακή κατανάλωση απαιτεί από 3 έως 7 κιλοβάτ, το κόστος της εγκατάστασης δεν είναι αμελητέο. Το ποσό αυτό, ωστόσο, μπορεί να αποσβεστεί σε περίπου 5-6 χρόνια και το Φ/Β σύστημα θα



συνεχίσει να παράγει δωρεάν ενέργεια για τουλάχιστον άλλα 25χρόνια. Ωστόσο, τα πλεονεκτήματα είναι πολλά, και το ευρύ κοινό έχει αρχίσει να στρέφεται όλο και πιο πολύ στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στα φωτοβολταϊκά ειδικότερα, για την κάλυψη ή την συμπλήρωση των ενεργειακών του αναγκών. [8]

## 4.4 Φωτοβολταϊκό στοιχείο

Τα κύρια συστατικά των φωτοβολταϊκών γεννητριών είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ή φωτοστοιχεία ή ηλιακά κύτταρα. Αυτά είναι δίοδοι ημιαγωγών σε μορφή δίσκου, που καθώς δέχονται στην επιφάνεια τους την ηλιακή ακτινοβολία, αναπτύσσεται μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και στην πίσω όψη τους. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους και την ένταση ακτινοβολίας που δέχονται, ένα ηλιακό κύτταρο μπορεί να δώσει τάση μέχρι 0.5- 1.0 Volt και πυκνότητα ρεύματος μέχρι 20-40mA ανά  $cm^2$  της επιφάνειάς του. Το είδος του ημιαγωγού που επιλέγεται ως υλικό κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων, καθορίζεται με κυριότερο κριτήριο όπως θα δούμε και στη συνέχεια, από την τιμή του ενεργειακού διακένου του η οποία καθορίζει και την απόδοση του στοιχείου.

Το πυρίτιο αποτελεί το βασικότερο υλικό για την κατασκευή ηλιακών κυττάρων μιας και αποτελεί το κυρίαρχο υλικό στην κατασκευή ημιαγωγών. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία από πυρίτιο κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας είτε μονοκρυσταλλικά πολυκρυσταλλικά wafer, είτε λεπτά films πυριτίου (άμορφο).

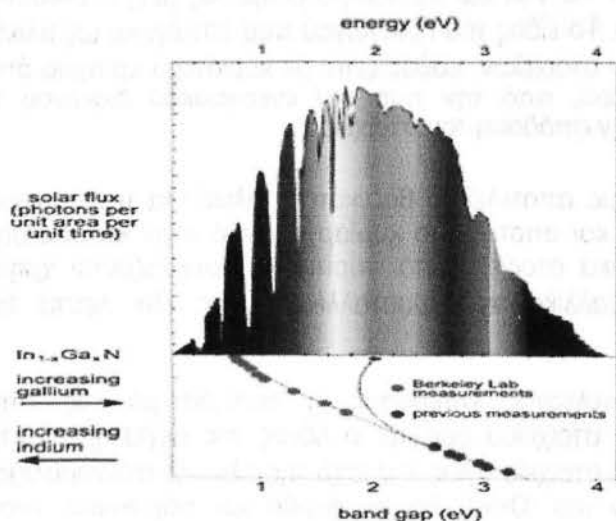
Ως συντελεστής απόδοσης ή απλούστερα ως απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το στοιχείο προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του. Όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, ένας ημιαγωγός μπορεί να απορροφήσει μόνο τα φωτόνια που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό του διάκενο. Και μάλιστα, από τα φωτόνια αυτά αξιοποιείται φωτοβολταϊκά το μέρος μόνο της ενέργειας τους που ισούται με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, ενώ η υπόλοιπη ενέργεια μετατρέπεται σε συνήθως ανεπιθύμητη θερμότητα. Επομένως, η τιμή του ενεργειακού διακένου των ημιαγωγών είναι ένα από τα κυριότερα κριτήρια που καθορίζουν την απόδοσή τους. Έτσι λοιπόν, οι μεγαλύτερες θεωρητικές αποδόσεις μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας μπορούν να πραγματοποιηθούν σε φωτοβολταϊκά στοιχεία από ημιαγωγούς με ενεργειακό διάκενο περίπου 1,5eV και δεν ξεπερνούν το 29%.

Καθημερινά όμως οι ερευνητικές προσπάθειες πανεπιστημιακών εργαστηρίων οδηγούν στην αύξηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Συγκεκριμένα στο Πανεπιστήμιο New South Wales' ARC Photovoltaic Centre of Excellence της Αυστραλίας επιτεύχθηκε ένα νέο παγκόσμιο ρεκόρ με φωτοβολταϊκά στοιχεία που αγγίζουν το θεωρητικό 29%. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι αναφερόμαστε σε στοιχεία πυριτίου πρώτης γενιάς.





Αυτή η διάκριση γίνεται γιατί έρευνες στην Αριζόνα των ΗΠΑ απέδειξαν ότι αν κατασκευαστεί Φ/Β στοιχείο από στρώσεις διάφορων ημιαγωγικών υλικών (και όχι αποκλειστικά από ένα υλικό) τότε μπορεί να απορροφηθεί σχεδόν όλο το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, οδηγώντας σε πολύ μεγάλες θεωρητικές αποδόσεις. Το 2002 ερευνητές στο Materials Sciences Division (MSD) of Lawrence Berkeley National Laboratory, σε συνεργασία με το Cornell University και το Japan's Ritsumeikan University, ανακάλυψαν ότι το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού indium nitride δεν είναι 2 eV όπως είχε καταγραφεί, αλλά 0.7 eV. Το γεγονός αυτό δίνει τη δυνατότητα για μετατροπή όλου του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας, από το υπέρυθρο μέχρι και το υπεριώδες. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 4.4.1 Τα παραπάνω ισχυρίζονται ότι η θεωρητική απόδοση αυτών των στοιχείων μπορεί να ξεπεράσει το 48%, ανοίγοντας νέους δρόμους για την δεύτερη γενιά φωτοβολταϊκών στοιχείων.

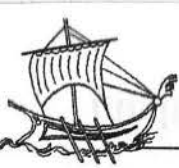


Εικόνα 4.4.1 Με την κατασκευή φ/β στοιχείων από στρώσεις υλικών μπορεί να αξιοποιηθεί πολύ μεγαλύτερο εύρος του ηλιακού φάσματος

Γίνεται λοιπόν φανερό ότι βρισκόμαστε ακόμα σε μια εποχή που η πρόοδος και εξέλιξη είναι καθημερινή, κάτι που θα οδηγήσει μέσα στα επόμενα 20 χρόνια σε νέες τεχνολογίες με δραματική μείωση του κόστους παραγωγής και ταυτοχρόνως με μεγαλύτερες αποδόσεις.

## Ημιαγωγοί

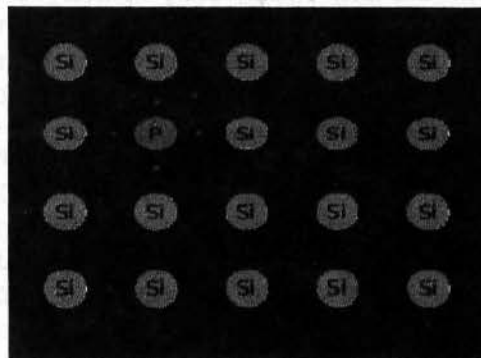
Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία όπως αναφέρθηκε προηγουμένως κατασκευάζονται κυρίως από ημιαγωγούς που είναι στοιχεία τετρασθενή με τετραδίκια κρυσταλλική δομή όπως το πυρίτιο (Si). Κάνοντας μια πιο αναλυτική προσέγγιση, στα στοιχεία αυτά δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς ηλεκτρικού ρεύματος και δε διαθέτουν ηλεκτρική αγωγιμότητα στην υποθετική περίπτωση που ο ημιαγωγός βρίσκεται στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή είναι εντελώς υποβαθμισμένος ενεργειακά. Όταν όμως απορροφήσουν κάποια αξιόλογη ενέργεια, π.χ. με τη μορφή θερμότητας ή ακτινοβολίας, πραγματοποιείται μια ριζική μεταβολή. Η ενέργεια που



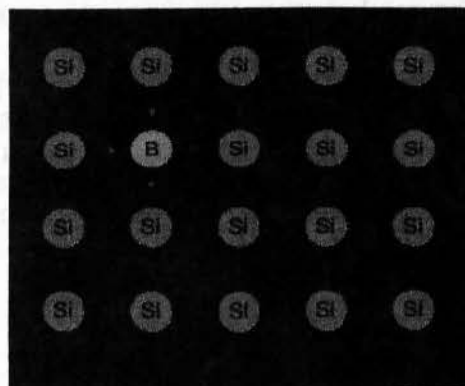
παρέχεται, κατανέμεται στα άτομα του ημιαγωγού και προκαλεί την απελευθέρωση πολλών ηλεκτρονίων από τους δεσμούς. Τα ηλεκτρόνια σθένους απομακρύνονται από την περιοχή του δεσμού τους στο κρυσταλλικό πλέγμα, χάρη στην κινητική ενέργεια που απόκτησαν και γίνονται ευκίνητοι φορείς του ηλεκτρισμού, δίνοντας στον ημιαγωγό μια αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Το ενεργειακό διάκενο ανάμεσα στη ζώνη σθένους και στη ζώνη αγωγιμότητας εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους, ώστε να μετατραπεί σε ελεύθερο ηλεκτρόνιο, με ταυτόχρονη δημιουργία μιας οπής.

Αν στα ηλεκτρόνια των δεσμών του κρυστάλλου προσφερθεί μια ποσότητα ενέργειας π.χ. αν δεχθούν μια δέσμη ακτινοβολίας που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια  $h\nu$  μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο ( $E_g < h\nu$ ), δε μπορούν να την απορροφήσουν και μένουν στη ζώνη σθένους. Αν όμως τα ενεργειακά κβάντα που προσφέρονται είναι ίσα ή μεγαλύτερα από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού ( $E_g \geq h\nu$ ), τότε κάθε κβάντο μπορεί να απορροφηθεί από ένα ηλεκτρόνιο σθένους και να το διεγείρει προς τη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας στη ζώνη σθένους μία οπή.

Αν τώρα ο τετρασθενής ημιαγωγός Si, νοθευτεί με κάποιο πεντασθενές στοιχείο (φώσφορος, P) ή με κάποιο τρισθενές στοιχείο (βόριο, B), τότε έχουμε ημιαγωγό προσμίξεως τύπου-n και τύπου-p αντίστοιχα.



Εικόνα 4.4.2 Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με άτομα νόθευσης τύπου-n [1]



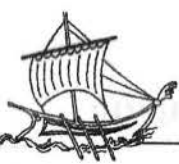
Εικόνα 4.4.3 Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με άτομα νόθευσης τύπου-p [1]

BIBΛΙΟΘΗΚΗ  
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ



Τέσσερα από τα πέντε ηλεκτρόνια σθένους κάθε ατόμου P, θα ενωθούν με ηλεκτρόνια σθένους των γειτονικών ατόμων Si και θα σχηματίσουν ομοιοπολικούς δεσμούς (Σχήμα 4.4.2). Το πέμπτο ηλεκτρόνιο (φορέας πλειονότητας) θα συγκρατείται πολύ χαλαρά από το θετικό πυρηνικό φορτίο του P και με λίγη ενέργεια μπορεί να αποσπασθεί και να κινείται σαν ελεύθερο ηλεκτρόνιο, αφήνοντας ένα ανιόν ( $P^+$ ) που μένει ακίνητο στο πλέγμα. Δηλαδή το πεντασθενές άτομο συμπεριφέρεται στο πλέγμα σαν δότης ηλεκτρονίων (τύπου-n ημιαγωγός). Αντίστοιχα, με την πρόσμιξη τρισθενών ατόμων B σε πλεγματικές θέσεις του Si, δημιουργούνται κενές θέσεις ηλεκτρονίων στους δεσμούς (σχήμα 4.4.3). Με την απορρόφηση λίγης ενέργειας, ένα ηλεκτρόνιο από ένα γειτονικό πλήρη δεσμό μπορεί να καλύψει την κενή θέση, αφήνοντας παράλληλα στην προηγούμενη θέση του μια οπή και μετατρέποντας το άτομο B σε κατιόν ( $B^-$ ). Δηλαδή το τρισθενές άτομο συμπεριφέρεται σαν αποδέκτης ηλεκτρονίων (φορέας μειονότητας) ή δότης οπών (τύπου-p ημιαγωγός).

Όταν σε μια περιοχή του ημιαγωγού υπάρχει δημιουργία ή έκχυση φορέων σε περίσσεια, αυτοί διαχέονται προς τις άλλες περιοχές του ημιαγωγού όπου η συγκέντρωση των αντίστοιχων φορέων είναι μικρότερη. Επίσης όταν έλθουν σε στενή επαφή ένας ημιαγωγός τύπου p με έναν ημιαγωγό τύπου n, δηλαδή σχηματιστεί μια ένωση p-n (διάταξη διόδου ημιαγωγού), τότε ένα μέρος από τις οπές του τεμαχίου τύπου p διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου n όπου οι οπές είναι λιγότερες και συγχρόνως ένα μέρος από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του τεμαχίου τύπου n διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου p όπου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι πολύ λιγότερα. Η ανάμιξη αυτή των φορέων και η αύξηση της συγκέντρωσης των φορέων μειονότητας στις περιοχές κοντά στη διαχωριστική επιφάνεια (περιοχή αραίωσης) των τεμαχίων τύπου p και n, ανατρέπουν την ισορροπία που υπήρχε πριν. Η αποκατάσταση των συνθηκών ισορροπίας γίνεται με επανασυνδέσεις των φορέων, μέχρι οι συγκεντρώσεις τους να πάρουν τιμές που να ικανοποιούν τον νόμο δράσης των μαζών. Η συγκέντρωση των κατιόντων στα οποία μετατράπηκαν οι αποδέκτες στο τμήμα τύπου p και n, παραμένουν αμετάβλητες αφού τα ιόντα, όπως συνήθως όλα τα άτομα στα στερεά, μένουν ακίνητα στο σώμα. Έτσι το υλικό χάνει τοπικά την ηλεκτρική ουδετερότητα και οι δύο πλευρές της ένωσης p-n φορτίζονται με αντίθετα ηλεκτρικά φορτία. Δημιουργείται λοιπόν μια διαφορά δυναμικού, που η τιμή της είναι σχετικά μικρή, αλλά το ενσωματωμένο αυτό ηλεκτροστατικό πεδίο εμποδίζει την παραπέρα διάχυση των φορέων πλειονότητας προς το απέναντι τμήμα της ένωσης. Το αποτέλεσμα είναι ότι η δίοδος που περιέχει την ένωση p-n, παρουσιάζει εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, ανάλογα με την φορά του. [9]



## 4.5 Υλικά και τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων / κυψελών (PV Cells)

Οι κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή φ/β στοιχείων είναι:

- Τεχνολογία παραγωγής ημιαγωγικών υλικών με κρυσταλλική δομή, την πλειοψηφία των οποίων αποτελεί το πυρίτιο.
- Τεχνολογία λεπτών υμενίων (thin film), η οποία ονομάζεται έτσι επειδή το πάχος των στοιχείων είναι πολύ μικρό (μερικά μόνο μm).
- Άλλες τεχνολογίες που σκοπό έχουν να γίνει λιγότερο ενεργοβόρα η παραγωγή του καθαρού πυριτίου, περιορίζοντας τις απώλειες σε ακριβό καθαρό πυρίτιο (π.χ. μέθοδος EFG, edge defined film fed growth και μέθοδος String Process).

Οι κρύσταλλοι και η μορφή λεπτού φιλμ διαφέρουν μεταξύ τους όσον αφορά την απόδοση απορρόφησης του φωτός, την απόδοση μετατροπής της μια μορφής ενέργειας στην άλλη, την τεχνολογία κατασκευής και το κόστος κατασκευής.

### 4.5.1 Το Πυρίτιο (Si)

Το πυρίτιο είναι ένας ημιαγωγός με έμμεσο ενεργειακό διάκενο 1,1eV. Αν και οι δύο αυτές ιδιότητές του, δηλαδή έμμεσο και σχετικά μικρή τιμή ενεργειακού διακένου δεν είναι ιδεώδεις για την φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, το πυρίτιο είναι ο ημιαγωγός που κυριάρχησε από την αρχή αλλά μέχρι και σήμερα, σαν υλικό κατασκευής φ/β στοιχείων. Οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό έχουν να κάνουν με το γεγονός ότι το πυρίτιο είναι το κύριο υλικό των διατάξεων ηλεκτρονικής για πολλές δεκαετίες. Επομένως οι ιδιότητες του είναι καλά μελετημένες και το υλικό κυκλοφορεί στη αγορά σε αρκετά μεγάλες ποσότητες, με ικανοποιητική χημική καθαρότητα και τελειότητα κρυσταλλικής δομής, με την χρησιμοποίηση τεχνολογικών μεθόδων δοκιμασμένων με επιτυχία. Επιπλέον τα φ/β στοιχεία πυριτίου έχουν λειτουργήσει με απόλυτα ικανοποιητική αξιοπιστία σε ακραίες καιρικές συνθήκες, τόσο σε διαστημικές όσο και σε επίγειες εφαρμογές. Εκτός του οξυγόνου, το πυρίτιο είναι το πιο άφθονο στοιχείο στην επιφάνεια του εδάφους. Σχεδόν πάντα, όμως απαντάται με τη μορφή οξειδίου στο περιβάλλον, συγκεκριμένα ως διοξείδιο του πυριτίου (SiO<sub>2</sub>). Για την αξιοποίησή του, επομένως, απαιτείται επεξεργασία έτσι ώστε να αποκτήσει υψηλή καθαρότητα.

### 4.5.2 Μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο.

Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο έχει μια ομοιόμορφη μοριακή δομή. Συγκρινόμενο με υλικά που δεν είναι σε μορφή κρυστάλλου, η υψηλή του ομοιομορφία έχει ως αποτέλεσμα τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης (δηλαδή την αναλογία της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται από το ηλιακό στοιχείο

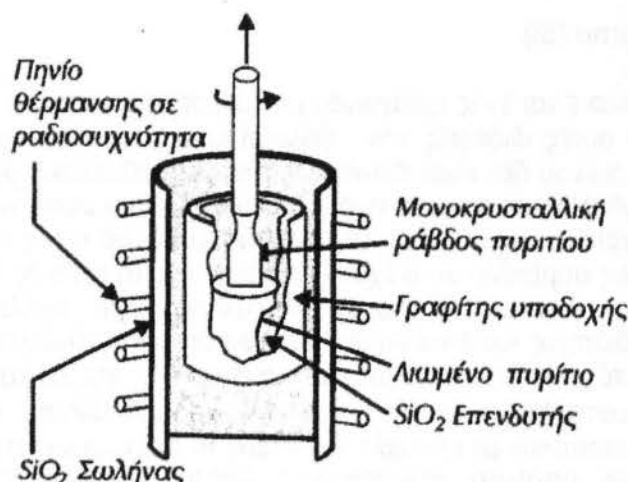




προς την διαθέσιμη από την ηλιακή ακτινοβολία ισχύ). Η απόδοση των μονοκρυσταλλικών στοιχείων του εμπόριου κυμαίνεται από 14-18%.

## 4.5.3 Παραγωγική Διαδικασία.

Το διοξείδιο του πυριτίου κατά την διαδικασία εξευμενισμού του (αφαίρεση των προσμίξεων) θερμαίνεται στους 1800°C παρουσία άνθρακα. Το μεταλλουργικό πυρίτιο που προκύπτει από αυτή την διαδικασία έχει μια καθαρότητα της τάξης του 98% και μπορεί μεν να χρησιμοποιηθεί στην μεταλλουργική βιομηχανία, είναι δε τελείως ακατάλληλο ως ημιαγωγός. Απαιτείται επομένως περαιτέρω επεξεργασία. Σε πρώτη φάση γίνεται ανάτηξη και στη συνέχεια αντίδραση με υδροχλώριο(HCl), μετατρέποντας το μεταλλουργικό πυρίτιο σε τριχλωροσιλάνιο ( $\text{SiHCl}_3$ ) που είναι ένα πτητικό υγρό. Εν συνεχεία αποχωρίζεται από διάφορες προσμίξεις μέσω κλασματικής απόσταξης (μέθοδος Siemens). Τέλος ανάγεται με υδρογόνο και συμπυκνώνεται. Πρέπει να τονιστεί ότι οι παραπάνω διαδικασίες είναι εξαιρετικά ενεργοβόρες και συντελούν στο υψηλό κόστος κατασκευής των φ/β στοιχείων. Το τελικό προϊόν είναι ένα υψηλής καθαρότητας πυρίτιο (με συγκέντρωση προσμίξεων μικρότερη από 1 άτομο ανά  $10^{12}$  άτομα Si), που δεν έχει όμως την επιθυμητή δομή.



Σχήμα 4.5.3.1 Μέθοδος Czochralski

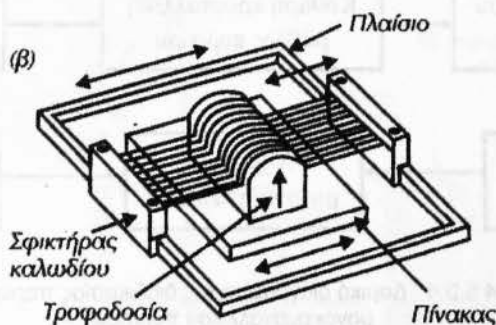
Ακολουθεί η κρυσταλλική ανάπτυξη του πυριτίου συνήθως με την μέθοδο Czochralski (Σχήμα 3.2), κατά την οποία αρχικά τήκεται αυτό μέσα σε ένα κυλινδρικό δοχείο και σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 1400° C. Έπειτα ένα πολύ μικρό κομμάτι κρυσταλλικού πυριτίου τοποθετείται σε επαφή με την επιφάνεια του λιωμένου πυριτίου, ενώ το κυλινδρικό δοχείο βρίσκεται σε περιστροφική κίνηση. Το κομμάτι πυριτίου δρα σαν πυρήνας κρυστάλλωσης και έτσι το πυρίτιο επικάθεται σε αυτό με αποτέλεσμα να μεγαλώσει και να σχηματισθεί σταδιακά ένας νέος μεγάλος κρύσταλλος πυριτίου με την συνεχή ανύψωση από το λιωμένο πυρίτιο. Αποτέλεσμα της μεθόδου είναι το πυρίτιο να αποκτήσει μια κυλινδρική μορφή με διάμετρο περίπου 10cm και μήκους 1m.



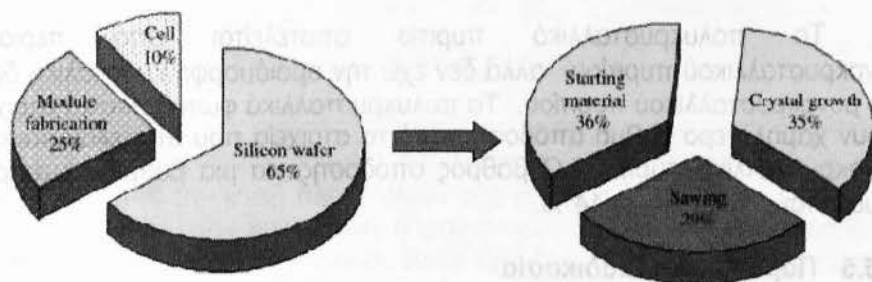


Εν συνεχεία ο κύλινδρος αυτός πρέπει να κοπεί σε πολύ λεπτούς δίσκους (κυλινδρικές πλάκες), πάχους που κυμαίνεται από 150 $\mu\text{m}$  μέχρι 500 $\mu\text{m}$  για τις ηλιακές εφαρμογές. Η διαδικασία είναι εξαιρετικά δαπανηρή, καθώς το πυρίτιο είναι πολύ σκληρό υλικό και επιπλέον ένα ποσοστό χάνεται κατά την κοπή, που φτάνει μέχρι και το 50%. Μια μέθοδος κοπής που περιορίζει κάπως τις παραπάνω απώλειες φαίνεται στο Σχήμα 3.3 και στηρίζεται στη κοπή με πολύ λεπτή διαμαντένια ίνα. Οι δίσκοι έπειτα λειαίνονται για την απομάκρυνση των ελαττωμάτων της κοπής και διαμορφώνονται σε διόδους τύπου-p ή τύπου-n με επίταξη, διάχυση ή εμφύτευση προσμίξεων.

Το τελικό στάδιο είναι η συγκόλληση των ηλεκτροδίων στην εμπρός και πίσω όψη του δίσκου, η αλληλοσύνδεση των έτοιμων πια στοιχείων, η κάλυψη της εμπρός επιφάνειάς τους με ένα αντιανακλαστικό επίστρωμα για την μείωση της ανάκλασης του φωτός και η στεγανή συσκευασία σε πλαίσια.



Σχήμα 4.5.3.2 Κοπή με την μέθοδο των πολλαπλών συρμάτων

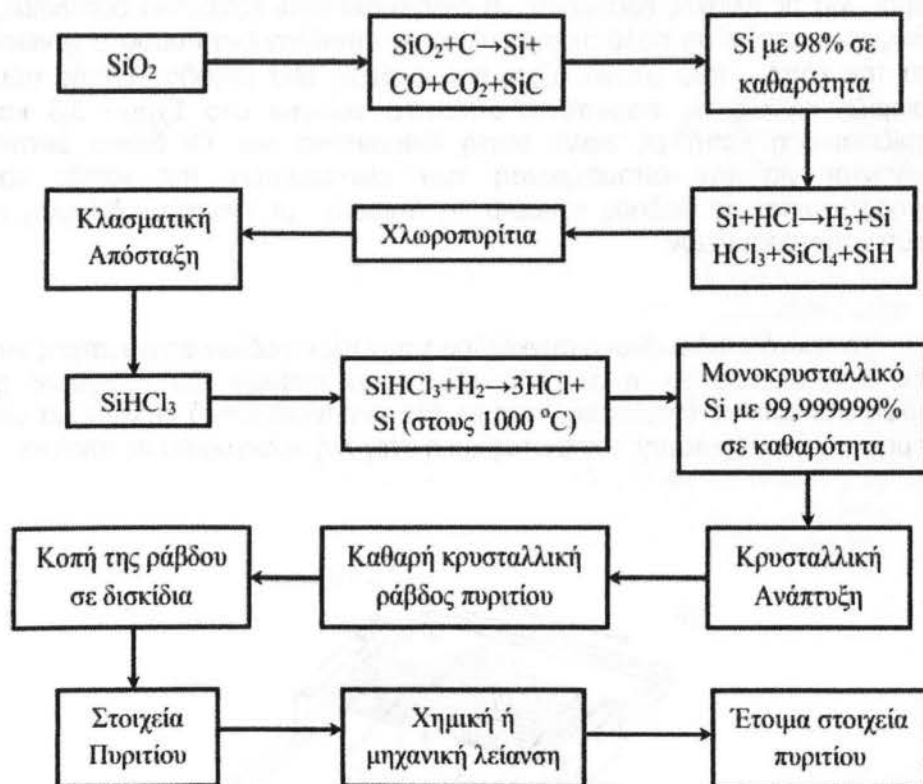


Γράφημα 4.5.3.3 Καταμερισμός του κόστους παραγωγής ενός Φ/Β στοιχείου ανά διαδικασία. Δεξιά αναλύεται το κόστος δημιουργίας δισκιδίων πυριτίου

Το κόστος ανά παραγωγική διαδικασία παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4, όπου φαίνεται ότι μεγάλο μέρος αποτελεί η παραγωγή καθαρού πυριτίου σε κρυσταλλική δομή (μέθοδος Czochranski) και η κοπή του σε λεπτά δισκίδια (πλάκες).



Συγκεντρωτικά η διαδικασία παραγωγής μονοκρυσταλλικού πυριτίου φαίνεται στο δομικό διάγραμμα στο σχήματος 3.5.



Μπλόκ-Διάγραμμα 4.5.3.4 Δομικό διάγραμμα της διαδικασίας παρασκευής ενός στοιχείου μονοκρυσταλλικού πυριτίου

## 4.5.4 Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο

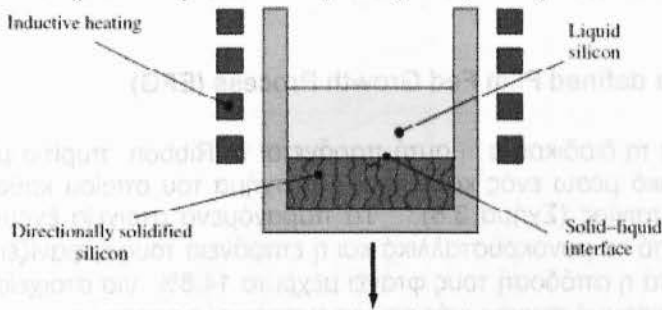
Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο αποτελείται από περιοχές μονοκρυσταλλικού πυριτίου, αλλά δεν έχει την ομοιόμορφη κρυσταλλική δομή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν χαμηλότερο βαθμό απόδοσης από τα στοιχεία που αποτελούνται από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Ο βαθμός απόδοσης για μια βαθμίδα εμπορίου κυμαίνεται μεταξύ 10 και 14 %.

## 4.5.5 Παραγωγική Διαδικασία

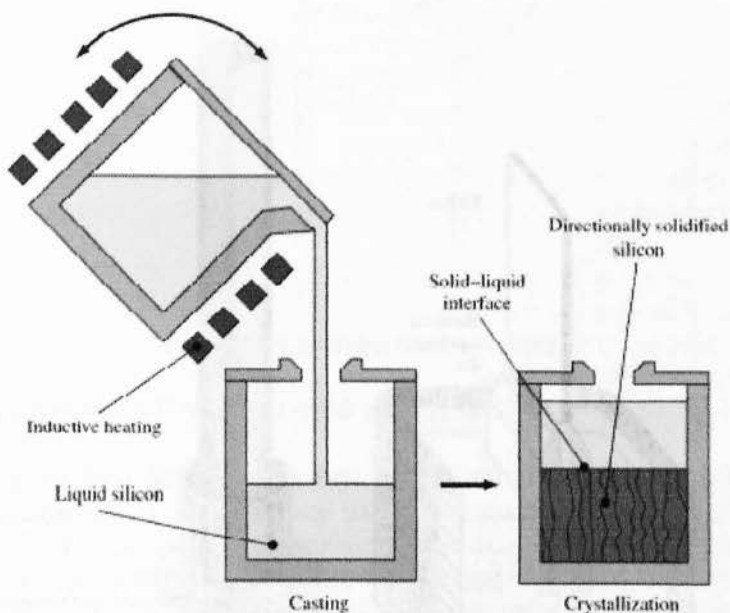
Η παραγωγή του πολυκρυσταλλικού πυριτίου διαφοροποιείται από την παραπάνω διαδικασία στο γεγονός ότι αντί της μεθόδου Czochranski για την επίτευξη «τέλειας» κρυσταλλικής δομής, το υψηλής καθαρότητας πυρίτιο, απλά τήκεται και τοποθετείται σε ένα δοχείο με τετραγωνική βάση, όπου και αφήνεται να στερεοποιηθεί (μέθοδος Bridgman) (Σχήμα 3.6). Εναλλακτικά χρησιμοποιείται η μέθοδος block casting, όπου το πυρίτιο τήκεται σε ένα δοχείο και έπειτα μεταφέρεται σε ένα δεύτερο όπου και στερεοποιείται (Σχήμα 3.7). Το στερεό πυρίτιο που δημιουργείται έχει πολυκρυσταλλική δομή.



Ακολουθεί η κοπή με τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω και η διαδικασία ολοκληρώνεται με τον ίδιο τρόπο με το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο.



Εικόνα 4.5.5.1 Μέθοδος Bridgman για την παραγωγή πολυκρυσταλλικού πυριτίου



Εικόνα 4.5.5.1 Μέθοδος Block Casting

Η διαδικασία παραγωγής πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι φθηνότερη από αυτή του μονοκρυσταλλικού. Επιπλέον οι τετραγωνικές πλάκες που προκύπτουν από την κοπή πλεονεκτούν στο γεγονός ότι μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή τετραγωνικών φ/β στοιχείων σε αντίθεση με τους δίσκους που είναι κυκλικοί. Αυτό έχει σαν συνέπεια τον μεγαλύτερο δείκτη κάλυψης του φ/β πλαισίου. Από τη άλλη εμφανίζουν μικρότερη απόδοση, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω.

#### 4.5.6 Πυρίτιο Ταινίας (Ribbon)

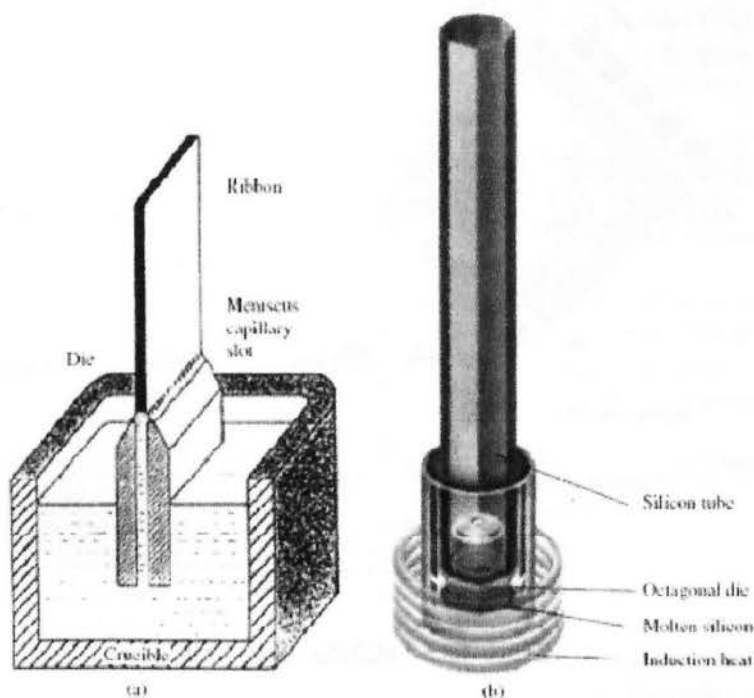
Το πυρίτιο σε μορφή ταινίας μπορεί να παραχθεί με πολλές τεχνικές. Στόχος είναι η αποφυγή του κόστους που συνεπάγεται η διαδικασία κοπής, όπως περιγράφηκε παραπάνω, καθώς και η μείωση των απωλειών σε



καθαρό πυρίτιο που συνεπάγεται. Από τις πολυάριθμες τεχνικές ουσιαστικά μόνο δύο κατέληξαν σε εμπορική χρησιμοποίηση.

## Edge defined Film Fed Growth Process (EFG)

Κατά τη διαδικασία αυτή παράγεται το Ribbon πυρίτιο μέσα από το λιωμένο υλικό μέσω ενός καλουπιού, το σχήμα του οποίου καθορίζει και τη μορφή της ταινίας (Σχήμα 3.8). Τα παραγόμενα στοιχεία έχουν μικρότερη ποιότητα από τα μονοκρυσταλλικά και η επιφάνειά τους εμφανίζει ανωμαλίες. Παρόλα αυτά η απόδοσή τους φτάνει μέχρι το 14,8% για στοιχεία που έχουν φτιαχτεί σε γραμμή παραγωγής και για εμπορικούς σκοπούς.

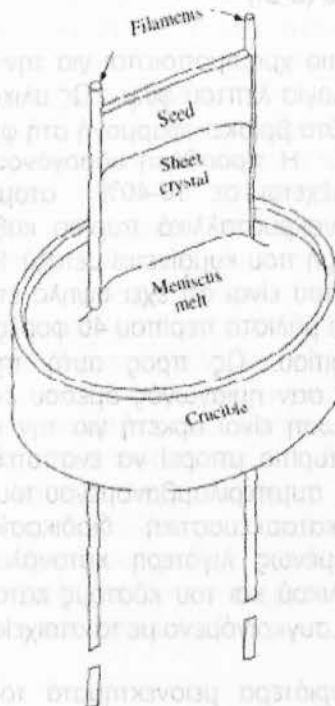
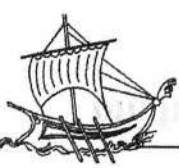


Εικόνα 4.5.6.1 Edge defined FilmFedGrowth(EFG)

α) Απλή διαμόρφωση σε δοχείο β) Οκταγωνική Διαμόρφωση

## String Ribbon Process (STR)

Σε αυτή την τεχνική το πυρίτιο εξάγεται κατευθείαν από το δοχείο με το λιωμένο πυρίτιο χωρίς καλούπι. Η διαδικασία είναι σχετικά απλή, καθώς χρησιμοποιούνται δύο λωρίδες που διαπερνούν το δοχείο στη βάση του και κινούνται με σταθερή ταχύτητα ανοδικά (Σχήμα 3.9). Στην αρχή της διαδικασίας χρειάζεται ένας "πυρήνας", έτσι ώστε να γίνει η αρχή της ταινίας πυρίτιου. Το πάχος της ταινίας εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα με την οποία κινούνται οι δύο λωρίδες. Η απόδοσή τους μπορεί να φτάσει μέχρι και το 14-15%.



Εικόνα 4.5.6.2 String Ribbon Process

## 4.5.7 Κρυσταλλικό Πυρίτιο λεπτού φιλμ (c-SiTFC)

Η τεχνολογία λεπτού φιλμ έχει ως σκοπό την μείωση του κόστους, μέσω της μείωσης του απαιτούμενου υλικού για την παραγωγή των στοιχείων. Η εναπόθεση μπορεί να γίνει κατευθείαν σε γυαλί, κεραμικό ή οποιοδήποτε άλλο κατάλληλο υπόστρωμα. Εκτός από το μειωμένο κόστος πλεονεκτούν και στην ευκολία με την οποία μπορεί να γίνει σύνδεσή τους σε σειρά, φτιάχνοντας έτσι ολόκληρα πλαίσια κατά τη διαδικασία εναπόθεσης. Από την άλλη όμως η διαδικασία αυτή είναι απαιτητική καθώς μεγάλες περιοχές πρέπει να παραχθούν χωρίς ελαττώματα.

Παρόλο που το c-SiTFC έχει πάχος μερικών μόνο μm (5 μέχρι 50μm), έχει αποδειχθεί θεωρητικά, αλλά και στην πράξη ότι εμφανίζει αξιόλογη απόδοση. Το κλειδί στην τεχνολογία είναι ο έξυπνος οπτικός σχεδιασμός, με αποτέλεσμα το φως μέσω ανακλάσεων να διαγράφει τελικά διαδρομή 30 φορές ή και περισσότερο, μεγαλύτερη από το πάχος του φιλμ. Εκτός από το πλεονέκτημα της μειωμένης απαίτησης σε πυρίτιο, το c-SiTFC δεν έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις στο υλικό του υποστρώματος, το οποίο μπορεί να είναι χαμηλής ποιότητας πυρίτιο, γυαλί, κεραμικά ή γραφίτης. Υπάρχει εκτεταμένη έρευνα όσον αφορά το c-SiTFC που έχει αναδείξει την υψηλή απόδοση που μπορεί να πετύχει (μέχρι 21% κάτω από ιδανικές συνθήκες). Παρόλο που έχει εμφανίσει σημαντική ανάπτυξη την τελευταία δεκαετία λίγες εταιρίες το έχουν περάσει στη γραμμή παραγωγής ως εμπορικό προϊόν.





## 4.5.8 Άμορφο πυρίτιο (a-Si)

Το άμορφο πυρίτιο χρησιμοποιείται για την παραγωγή φ/β στοιχείων σύμφωνα με την τεχνολογία λεπτού φιλμ. Ως υλικό εμφανίζει μεγάλη αταξία στη δομή του, παρά ταύτα βρίσκει εφαρμογή στη φ/β τεχνολογία με τη μορφή κράματος με υδρογόνο. Η προσθήκη υδρογόνου βελτιώνει τις ηλεκτρικές ιδιότητές του και περιέχεται σε 10-40% ατομική αναλογία. Διαφέρει ουσιαστικά από το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο καθώς εμφανίζει ενεργειακό διάκενο με μεταβλητή τιμή που κυμαίνεται μεταξύ 1,12eV και 1,7eV περίπου. Το κύριο πλεονέκτημα του είναι ότι έχει υψηλό επίπεδο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και μάλιστα περίπου 40 φορές υψηλότερη από αυτή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Ως προς αυτή την ιδιότητά του το a-Si συμπεριφέρεται σχεδόν σαν ημιαγωγός άμεσου ενεργειακού διακένου, για αυτό μια λεπτή επίστρωση είναι αρκετή για την κατασκευή φ/β στοιχείων. Επιπλέον το άμορφο πυρίτιο μπορεί να εναποτεθεί σε ποικίλα, χαμηλού κόστους υποστρώματα, συμπεριλαμβανομένου του χάλυβα, του γυαλιού και του πλαστικού. Η κατασκευαστική διαδικασία απαιτεί χαμηλότερες θερμοκρασίες και επομένως λιγότερη κατανάλωση ενέργειας. Έτσι το συνολικό κόστος του υλικού και του κόστους κατασκευής είναι χαμηλότερο ανά μονάδα επιφάνειας, συγκρινόμενο με τα στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου.

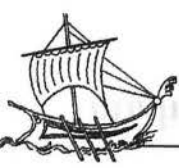
Δυο είναι τα κυριότερα μειονεκτήματά του. Ο χαμηλός βαθμός απόδοσης που κυμαίνεται μεταξύ 6 – 9 % για στοιχεία του εμπορίου και φτάνει το 13% για στοιχεία που έχουν φτιαχτεί στο εργαστήριο και η βαθμιαία μείωση του βαθμού απόδοσης. Μέσα σε μερικούς μήνες μπορεί η απόδοση να μειωθεί από 10% έως και 15 %.

## 4.5.9 Υβριδικά

Για να επιτευχθεί ουσιώδης βελτίωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών κυψελών έπρεπε να γίνει κάποια σημαντική αλλαγή. Σε μια προσπάθεια να γίνει αυτό έγινε μελέτη στη χρήση υβριδικών δομών, στις οποίες κυψέλες με διαφορετικά χαρακτηριστικά απορρόφησης φωτός συνδέονται μαζί. Αυτό επιτρέπει να πετύχουμε καλύτερα χαρακτηριστικά χρησιμοποιώντας τα ήδη υπάρχοντα υλικά και διαδικασίες.

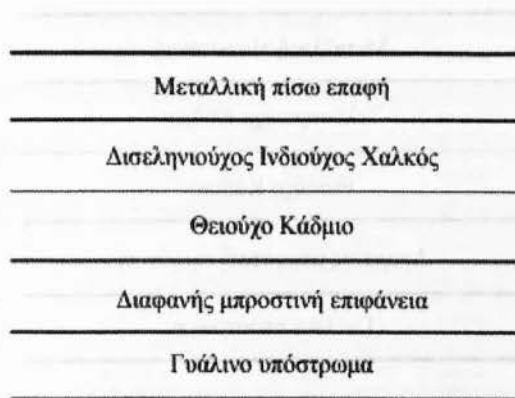
Τα **πλεονεκτήματα** της χρήσης μιας δομής με πολλά στρώματα είναι τα εξής

- Είναι δυνατόν να απορροφηθεί το φως σε μια πιο πλατιά φασματική περιοχή, δηλαδή αποτελεσματικότερα.
- Είναι δυνατόν να επιτευχθούν υψηλότερες τάσεις ανοιχτού κυκλώματος.
- Είναι δυνατόν να πέσει σε κάποιο βαθμό ο ρυθμός μείωσης της απόδοσης των κυψελών, ο οποίος οφείλεται σε φαινόμενα οπτικής υποβάθμισης που παρατηρούνται όταν χρησιμοποιούνται υλικά άμορφου πυριτίου.



## 4.5.10 Δισεληνιούχος Ινδιούχος Χαλκός (CuInSe<sub>2</sub> ή CIS)

Το ημιαγώγιμο υλικό του δισεληνιούχου ινδιούχου χαλκού είναι ένα ημιαγώγιμο υλικό, το οποίο μπορεί να είναι τύπου-n ή τύπου-p και έχει μια άμεση οπτική απορρόφηση με τον υψηλότερο συντελεστή απορρόφησης που έχει μετρηθεί μέχρι σήμερα. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του CIS εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον λόγο χαλκού/ινδίου, ενώ ο καλός έλεγχος της στοιχειομετρίας του θεωρείται ουσιώδης για αποδοτικές διατάξεις. Είναι δυνατόν να κατασκευασθούν ομοεπαφές τύπου p-n των CIS αλλά αυτές δεν θα είναι ούτε σταθερές ούτε αποδοτικές και οι καλύτερες διατάξεις μέχρι σήμερα είναι ετεροενώσεις με θειούχο κadmio (CdS). Το CdS μπορεί να αναπτυχθεί μόνο ως υλικό τύπου-n για αυτό και το CIS πρέπει να είναι τύπου-p. Το CIS έχει ενεργειακό διάκενο 1eV και παράγεται ως κιονοειδής πολυκρυσταλλική μεμβράνη, ενώ το CdS έχει ενεργειακό διάκενο 2,4eV και έτσι αυτό θα απορροφά έντονα όλη την προσπίπτουσα ακτινοβολία από το πράσινο μέχρι το μπλε άκρο φάσματος. Οι βέλτιστες διατάξεις χρησιμοποιούν ένα πολύ λεπτό στρώμα (0,03μm) του CdS με στρώμα παραθύρου ενός υλικού με μεγάλο ενεργειακό διάκενο και υψηλή αγωγιμότητα. Το οξειδίο του ψευδαργύρου έχει βρεθεί ότι είναι ένα κατάλληλο υλικό για το στρώμα του παραθύρου. Έτσι η δομή του ηλιακού στοιχείου CIS είναι αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.10.



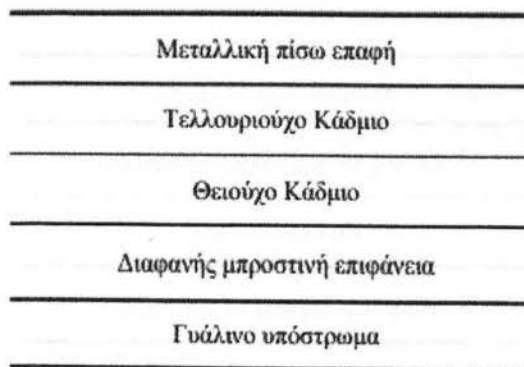
Διάγραμμα 4.5.10.1 Δομή του ηλιακού στοιχείου CIS

Μια σημαντική προσπάθεια έχει αφιερωθεί στην άνοδο της τεχνολογίας CIS κυρίως από τη SIEMENS. Έχουν φτιαχτεί στοιχεία CIS του εμπορίου, η απόδοση των οποίων πλησιάζει το 10%. Πλεονεκτούν σε σχέση με τα στοιχεία άμορφου πυριτίου, καθώς δεν εμφανίζουν βαθμιαία πτώση της απόδοσης για μια περίοδο μερικών ετών. Επίσης όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω προσφέρουν μεγάλη οικονομία σε ημιαγώγιμα υλικά. Από την άλλη όμως το CIS είναι ένα πολύπλοκο υλικό που δυσκολεύει την κατασκευή του. Τέλος πολύ σημαντική είναι η ασφάλεια του προσωπικού κατά τη διάρκεια της κατασκευής του, αφού η παραγωγή του περιλαμβάνει το σεληνιούχο υδρογόνο, ένα εξαιρετικά τοξικό αέριο.



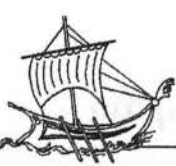
## 4.5.11 Τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe)

Το τελλουριούχο κάδμιο είναι ένα ημιαγώγιμο υλικό που αποτελείται από κάδμιο και τελλούριο, το οποίο έχει υψηλό επίπεδο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και το ενεργειακό του διάκενο είναι πολύ κοντά στο ιδανικό. Αρκεί ένα όγκος πάχους ενός μικρόμετρου για να απορροφηθεί το 90 % του ηλιακού φάσματος. Η δομή του ηλιακού στοιχείου είναι αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.11. Υπάρχουν μερικές χαμηλού κόστους τεχνικές, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απόθεση του CdTe και όλες αυτές, μπορούν, αφού υποστούν μια επεξεργασία μετά την απόθεση, να παράγουν υλικό υψηλής ποιότητας και αποδοτικά ηλιακά στοιχεία. Η διαδικασία πλεγματικής εκτύπωσης των στοιχείων CdTe προσφέρει μια τεχνολογία με χαμηλό κόστος παραγωγής, αλλά από την άλλη και μια εντελώς χαμηλού ρυθμού παραγωγή. Το βήμα που περιορίζει το ρυθμό παραγωγής είναι η θερμοκρασιακή επεξεργασία της μελάνης εκτύπωσης μετά την απόθεση, η οποία απαιτεί σχετικά υψηλές θερμοκρασίες (γύρω στους 500° C) για περιόδους μιας ώρας ή και περισσότερο. Με αυτή την τεχνολογία έχουν παραχθεί βασικές μονάδες με απόδοση 6% και έχουν ελεγχθεί σε εξωτερικές συνθήκες. Η εμπορική τους όμως διαθεσιμότητα είναι περιορισμένη.



Σχήμα 4.5.11.1 Δομή του ηλιακού στοιχείου CdTe

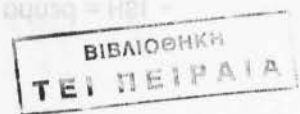
Μια ακόμα τεχνολογία είναι αυτή της ηλεκτροτυπίας. Η τεχνολογία αυτή είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή για τα στοιχεία CdTe, λόγω της πολύ μικρής χρήσης του υλικού και του χαμηλού κόστους. Η BP Solar έχει παράγει βασικές μονάδες με αποδόσεις πάνω από 10% και στοιχεία με αποδόσεις γύρω στο 13%. Οι έλεγχοι σταθερότητας σε εξωτερικές συνθήκες έχουν επιτευχθεί με ικανοποιητική επιτυχία. Από την άλλη όμως όπως και στο CIS, το κάδμιο είναι ένα τοξικό υλικό και θα πρέπει να λαμβάνονται αυξημένα μέτρα προστασίας κατά την παραγωγή του. Το μερίδιο αγοράς όλων των παραπάνω υλικών κατασκευής φ/β στοιχείων για το έτος 2002 φαίνεται στο Σχήμα 3.12. Είναι ξεκάθαρο ότι το πυρίτιο ως ημιαγώγιμο υλικό κατέχει την συντριπτική πλειοψηφία της αγοράς φ/β στοιχείων και συγκεκριμένα την πρωτιά κατέχει το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο που αποτελεί το 54% αυτής. [10]



Α/Α	Εταιρεία	Τύπος πάνελ	Ημερομηνία παραγωγής	Έτος Τεστ	Απόδοση*	Απόδοση (kWh/kw)	Αποφορά από το πρώτο
1	REC ASA	REC230AE1	2007 μέχρι 12/2010	2010	90,8%	1.150,4	-
2	Siliken SL	SLK50P5L 230Wp	2009	2009	89,6%	1.135,6	1,30%
3	Nex-power Technology Corp.	NT-125AX	2009 μέχρι 03/2010	2010	89,6%	1.135,4	1,30%
4	CH Solar GmbH & Co. KG	CH Solar 180 mono	Μέχρι 2010	2010	89,1%	1.129,2	1,80%
5	CSG PV Tech Co. Ltd.	CSG180S1-35/365	6/2008	2010	89,0%	1.127,7	2,00%
6	CNPV Solar Power SA	CNPV-185M	2006	2010	88,8%	1.126,0	2,10%
7	Win Win Precision Technology Co. Ltd.	Winaico WSP-235P6	2010	2010	88,6%	1.125,2	2,20%
8	Solarworld AG	Sunmodule Plus SW 225 mono	2009	2010	88,7%	1.124,4	2,30%
9	Bisol d.o.o.	BMU-215-2/221	2007	2010	88,2%	1.119,0	2,70%
10	CSG PV Tech Co. Ltd.	CSG230M2-306	06/2008	2010	88,2%	1.118,0	2,80%
11	Upsolar (Shanghai) Co. Ltd.	UP-M180M	2010 μέχρι 06/2011	2010	88,1%	1.116,4	3,00%
12	Trina Solar Energy Co Ltd.	TSM-225PC05	2010	2010	87,8%	1.112,6	3,30%
13	Conergy AG	Conergy PowerPlus 220P	2009	2010	87,7%	1.111,7	3,40%
14	Trina Solar Energy Co. Ltd.	TSM-180DC01	2007	2009	87,6%	1.110,6	3,50%
15	Aleo Solar AG	aleo S_18 225	2005	2010	87,6%	1.110,4	3,50%
16	Kioto Photovoltaics GmbH	KPV 210 PE	Μέχρι 2009	2009	87,4%	1.109,3	3,90%
17	Sunpeak / Apexolar	ALP235W1	2009 μέχρι 2010	2010	87,4%	1.106,8	3,80%
18	PV Power Technologies Pvt. Ltd.	PVG3 220	2008	2009	87,3%	1.106,0	3,90%
19	Hanwha Solar One Co. Ltd.	SF160-24-1M175	2010	2010	87,2%	1.105,3	3,90%
20	S-Energy Co. Ltd.	SM-220PA8	2009	2009	87,1%	1.104,0	4,00%
21	Win Win Precision Technology Co. Ltd.	Winaico WSP-230P6	2009	2009	87,0%	1.103,2	4,10%
22	Mage Solar AG	Mage Powertec Plus 235P5FJ	Μέχρι 03/2011	2009	86,9%	1.101,4	4,30%
23	Sonolis GmbH	SL-180CE-36M	2010	2010	86,8%	1.099,6	4,40%
24	Frankfurt Solar GmbH	FS215W-POLY	2009	2009	86,4%	1.095,2	4,80%
25	Perfectenergy (Shanghai) Co. Ltd.	PEM-180/185-72M-SCC	07/2008	2010	86,1%	1.091,7	5,10%
26	Shell Solar GmbH (Tüpsa Solarworld)	Shell SQ 150-C	Μέχρι 2005	2006	86,1%	1.091,0	5,20%
27	Emmvee Photovoltaics GmbH	ES-230P508	2006 μέχρι 12/2011	2010	86,1%	1.090,8	5,20%
28	Solarworld AG	Sunmodule Plus SW 210 Poly	2004	2006	85,8%	1.087,6	6,00%
29	Sunnise Solartech Co. Ltd.	SFM 180D72-GE	2009	2009	85,6%	1.085,3	5,70%
30	First Solar Inc.	FS-265	2006 μέχρι 2011	2007	85,5%	1.083,3	5,80%
31	Evergreen Solar Inc.	EC-120	2004 μέχρι 2006	2006	85,1%	1.079,1	6,20%
32	Sovello AG	Pure Power SV-X-200	2009 μέχρι 12/2011	2011	85,1%	1.079,0	6,20%
33	Shell Solar GmbH	Shell PowerMax Eclipse 80-C	2005 μέχρι 2006	2007	84,9%	1.076,2	6,50%
34	Photowatt International SAS	Pw 1650-175W	2005	2006	84,7%	1.073,7	6,70%
35	Solar-Fabrik AG	SF 130/4-130	2006 μέχρι 2010	2010	83,0%	1.051,9	9,60%
36	Canadian Solar Inc.	CS6A-170P	06/2007	2007	82,6%	1.047,4	9,00%
37	Isototon SA	I-110/241	Μέχρι 2005	2006	82,1%	1.041,0	9,50%
38	Hanwha Solar One Co. Ltd.	SF160 M5-24 (175 W)	2007	2007	81,8%	1.036,4	9,90%
39	Kyocera Corp.	KC170GT-2	Μέχρι 2006	2006	81,7%	1.034,8	10,00%
40	Isototon SA	IS-170/24	2007	2009	81,0%	1.027,2	10,70%
41	Solar-Fabrik AG	SF 145A	2003 μέχρι 2004	2005	80,3%	1.017,3	11,60%
42	Schott Solar AG	ASE-300-DC-FT (300 W)	1997 μέχρι 2006	2007	80,3%	1.017,1	11,60%
43	Sunways AG	MH plus 190 (190 Wp)	2003 μέχρι 2005	2005	80,1%	1.015,5	11,70%
44	Evergreen Solar Inc.	ES-180-RL	2006 μέχρι 2006	2007	79,8%	1.011,9	12,00%
45	BP Solar International Inc.	BP 7185 S	2005	2005	79,7%	1.003,9	12,70%
46	Sharp Corp.	NT-R5E3E	2003	2005	78,2%	990,9	13,90%

Πίνακας 4.5.11.3 Συγκρητικό Τεστ 44 Φ/Β Πάνελ

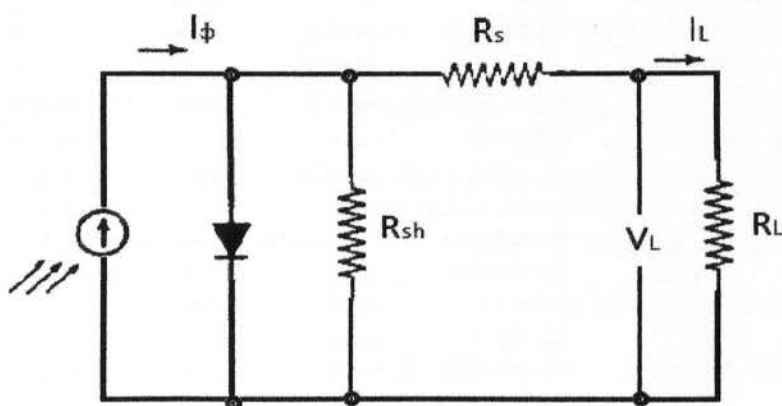
(Πηγή : Sunb.gr)





#### 4.6 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Για να κατανοηθεί η ηλεκτρική συμπεριφορά ενός ηλιακού κυττάρου, είναι χρήσιμο να δημιουργήσουμε ένα ηλεκτρικό ισοδύναμο το οποίο βασίζεται σε ηλεκτρικά στοιχεία των οποίων η συμπεριφορά είναι γνωστή. Ένα ιδανικό ηλιακό κύτταρο μπορεί να μοντελοποιηθεί από μία πηγή ρεύματος παράλληλα συνδεδεμένη με μία διόδο. Στην πράξη όμως δεν υπάρχει ιδανικό ηλιακό κύτταρο, έτσι προστίθενται στο μοντέλο μία σε σειρά αντίσταση  $R_S$  και μία παράλληλα συνδεδεμένη αντίσταση  $R_{SH}$ . Το ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στο Σχ. 4.5.3 :



Σχ.4.6.1 Ηλεκτρικό Ισοδύναμο ηλιακού κυττάρου

Από το ισοδύναμο κύκλωμα διαπιστώνουμε ότι το ρεύμα που παράγεται από το ηλιακό κύτταρο ισούται με αυτό που παράγεται από την πηγή ρεύματος μείον το ρεύμα της διόδου και μείον το ρεύμα που περνά από την αντίσταση  $R_{SH}$ :

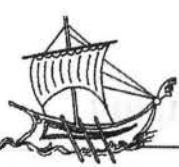
$$I_L = I_\phi - I_D - I_{SH}$$

( 4.6.1)

όπου

- $I_L$  = ρεύμα στην έξοδο του κυττάρου
- $I_\phi$  = φωτόρεύμα
- $I_D$  = ρεύμα διόδου
- $I_{SH}$  = ρεύμα που διέρχεται από την παράλληλη αντίσταση





Ισχύει επίσης:

$$V_J = V + I * R_S$$

(4.6.2)

όπου

- $V_J$  = τάση κατά μήκος της διόδου και της παράλληλης αντίστασης
- $V$  = τάση στην έξοδο του κυττάρου
- $I$  = ρεύμα στην έξοδο του κυττάρου
- $R_S$  = σε σειρά αντίσταση του κυττάρου ( $\Omega$ ) (παριστάνει την αντίσταση που συναντά το ηλεκτρόνιο από τη στιγμή που θα παραχθεί μέχρι «να βγει» στο εξωτερικό κύκλωμα)

Το ρεύμα που διέρχεται μέσα από τη δίοδο δίνεται από την εξίσωση:

$$I_D = I_0 * \left[ e^{\frac{q \cdot V_J}{n \cdot K \cdot T}} - 1 \right]$$

(4.6.3)

όπου

- $I_0$  = ρεύμα κόρου της διόδου
- $n$  = σταθερά με τιμές μεταξύ 1 και 2. Οφείλεται σε φαινόμενα επανασύνδεσης που συμβαίνουν στην περιοχή της επαφής.
- $q$  = φορτίο ηλεκτρονίου
- $k$  = σταθερά του Boltzman ( =  $1,380658 * 10^{-23} \text{ J} * \text{K}^{-1}$  )
- $T$  = απόλυτη θερμοκρασία
- Για το πυρίτιο στους  $25^\circ\text{C}$ ,  $kT / q = 0.0259 \text{ volts}$ .



Σύμφωνα με τον νόμο του Ohm, το ρεύμα που διαρρέει την  $R_{SH}$  είναι:

$$I_{SH} = \frac{V_J}{R_{SH}} \quad (4.6.4)$$

όπου

-  $R_{SH}$  = παράλληλη αντίσταση ( $\Omega$ ) (παριστάνει την επανασύνδεση των ηλεκτρονίων και τις διαρροές των ηλεκτρονίων από τις παράπλευρες επιφάνειες)

Αντικαθιστώντας τις (4.6.2), (4.6.3), (4.6.4) στην (4.6.1) προκύπτει η εξής εξίσωση η οποία αποτελεί την χαρακτηριστική εξίσωση του ηλιακού κυττάρου:

$$I_L = I_\varphi - I_0 * \left[ e^{\frac{q \cdot V_J}{n \cdot K \cdot T}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_S}{R_{SH}}$$

(4.6.5)

Η χαρακτηριστική εξίσωση απλοποιείται σημαντικά εάν θεωρήσουμε την παράλληλη αντίσταση  $R_{SH}$  άπειρη, οπότε προκύπτει:

$$I_L = I_\varphi - I_0 * \left[ e^{\frac{q(V + I \cdot R_S)}{n \cdot K \cdot T}} - 1 \right]$$

(4.6.6)

Μία διαφορετική εκδοχή της χαρακτηριστικής εξίσωσης προκύπτει αν μεταφέρουμε στο αριστερό μέλος την τάση εξόδου  $V$ . Οι δύο εξισώσεις είναι ισοδύναμες:

$$V = -I \cdot R_S + \frac{n \cdot K \cdot T}{q} \ln \left( \frac{I_\varphi - I_L}{I_0 + 1} \right)$$

(4.6.7)

Παρατηρούμε ότι οι παραπάνω εξισώσεις δεν επιδέχονται αναλυτική επίλυση καθώς στην εξίσωση (4.6.6) το ρεύμα εξόδου υπάρχει τόσο στο δεξί όσο και στο αριστερό μέλος και στην εξίσωση (4.6.7) η τάση εξόδου



εμφανίζεται και αυτή και στα δύο μέλη. Παρόλα αυτά είναι δυνατόν να λυθούν με αριθμητικές μεθόδους.

## 4.7 Ανίχνευση Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPPT)

Σε αντίθεση με άλλες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται πάντοτε από το φορτίο που τροφοδοτεί, δηλαδή την τιμή της αντίστασης που είναι συνδεδεμένη στα άκρα του. Όταν δεν υπάρχει καθόλου αντίσταση, συναντάται η μέγιστη τάση εξόδου, η τάση ανοιχτοκύκλωσης Voc. Αντίθετα όταν βραχυκυκλωθούν τα άκρα της γεννήτριας, η τάση μηδενίζεται αλλά έχουμε μέγιστη ροή ρεύματος, το ρεύμα βραχυκύκλωσης Isc. Ωστόσο, η ισχύς που παράγεται για κάθε ζεύγος τιμών τάσης έντασης δεν είναι πάντα σταθερή αλλά μηδενίζεται όπως φαίνεται εύκολα στις ακραίες συνθήκες ανοιχτοκύκλωσης-βραχυκύκλωσης και παρουσιάζει ένα μέγιστο για συγκεκριμένη τιμή τάσης-έντασης. Επιθυμητό είναι λοιπόν σε κάθε εγκατάσταση φωτοβολταϊκών οι συστοιχίες να λειτουργούν παράγοντας τις τιμές αυτές τάσης-έντασης που δίνουν κάθε στιγμή τη μέγιστη ισχύ.

Όταν η φωτοβολταϊκή γεννήτρια τροφοδοτεί απευθείας ένα συγκεκριμένο φορτίο κάτι τέτοιο δεν είναι πραγματοποιήσιμο καθώς η τιμή του φορτίου έχει συγκεκριμένη αντίσταση. Όταν όμως μεταξύ γεννητριών και κατανάλωσης παρεμβάλλονται ηλεκτρονικά για τον έλεγχο της ισχύος, για την ρύθμιση φόρτισης συσσωρευτών, για την ανύψωση ή και την αλλαγή μορφής της παραγόμενης τάσης, τότε υπάρχει η δυνατότητα να λειτουργούν αυτές σε ένα μέγιστο σημείο. Αυτό το αναλαμβάνουν ειδικοί ανιχνευτές της μέγιστης ισχύος, ή maximum power point trackers (MPPT).

Η τεχνολογία της ανίχνευσης της μέγιστης ισχύος, άρχισε να χρησιμοποιείται σχετικά πρόσφατα στις εφαρμογές των φωτοβολταϊκών και αποτελεί πλέον χαρακτηριστικό κάθε καλού αντιστροφέα για σύνδεση με το δίκτυο ή φορτιστή συσσωρευτών. Η λογική που συνήθως ακολουθείται για τον εντοπισμό του σημείου μέγιστης ισχύος είναι η εξής: Παρακολουθώντας συνεχώς τις τιμές τάσης και έντασης εξόδου των φωτοβολταϊκών γεννητριών, προκαλούν ανά τακτά χρονικά διαστήματα μια διαταραχή της τάσης εξόδου αυτής. Αν διαπιστωθεί ότι με την ανύψωση της τάσης, αυξάνεται η ισχύς που παρέχει η γεννήτρια τότε αυξάνουν την τάση προς τα πάνω ώσπου να έρθει μια ισορροπία. Αυτό είναι και το σημείο μέγιστης λειτουργίας.

Όπως προαναφέρθηκε στην εξέταση των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η ένταση που παράγεται από ένα Φ/Β στοιχείο, δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται αντίστροφα από την τάση. Για κάποιο συγκεκριμένο ζεύγος τάσης – έντασης, το στοιχείο δίνει τη μέγιστη ισχύ του. Ωστόσο επειδή κάθε στιγμή η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο στοιχείο δεν είναι σταθερή, ομοίως σταθερή δεν είναι και η τάση εξόδου του. Είναι λοιπόν επιθυμητό για κάθε στιγμή το Φ/Β στοιχείο να μην παράγει την τάση και την ένταση όπως αυτά καθορίζονται από την αντίσταση του κυκλώματος που υπάρχει στα άκρα του, αλλά να δίνει στην έξοδο αυτό το ζεύγος τάσης – έντασης που μεγιστοποιεί την ισχύ του.



Η παραγόμενη ισχύς από ένα Φ/Β στοιχείο είναι  $P=VI$ . Όταν η λειτουργία του στοιχείου μετατοπιστεί σε διαφορετικό σημείο της καμπύλης  $V-I$  λόγω μεταβολής στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ή μεταβολή του φορτίου, τότε η τάση μεταβάλλεται κατά  $dV$  και η ένταση κατά  $dI$ .

Τότε η ισχύς είναι:

$$P=VI=(V+dV)(I+dI) \quad [4.7.1]$$

Αγνοώντας τους όρους δεύτερης τάξης έχουμε:

$$dP=dVI+dIV \quad [4.7.2]$$

Όπως είναι φανερό από την καμπύλη ισχύος του φωτοβολταϊκού, ο όρος  $dP$  (η κλίση δηλαδή της καμπύλης ισχύος) είναι μηδέν στο σημείο μέγιστης ισχύος. Στο σημείο αυτό (MPP) λοιπόν η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$0=dVI+dIV \quad [4.7.3]$$

$$\frac{dV}{dI} = -\frac{V}{I} \quad [4.7.4]$$

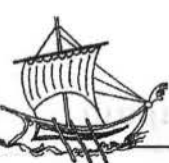
Στην εξίσωση αυτή, ο πρώτος όρος εκφράζει την δυναμική αντίσταση της πηγής  $Z_d$  ενώ ο δεύτερος την στατική αντίσταση  $Z_s$ . Με βάση αυτή την εξίσωση υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος:

1. Μία διαταραχή ρεύματος εισάγεται περιοδικά στην φωτοβολταϊκή πηγή ενώ μετρούνται δυναμική αντίσταση αυτής  $Z_d$  και η στατική αντίσταση  $Z_s$ . Η τάση λειτουργίας αυξάνεται ή μειώνεται μέχρι να ικανοποιηθεί η εξίσωση του σημείου μέγιστης ισχύος, δηλαδή  $Z_d = -Z_s$ .

2. Μια δεύτερη μέθοδος ελέγχου είναι να αυξάνεται η τάση όσο ισχύει η συνθήκη  $dP/dV > 0$  δηλαδή η ισχύς αυξάνεται με αύξηση της τάσης. Σε αντίθετη περίπτωση η τάση μειώνεται. Η τάση σταθεροποιείται όταν μηδενίζεται σχεδόν αυτός ο ρυθμός μεταβολής.

3. Μια τρίτη μέθοδος κάνει χρήση του γεγονότος ότι στα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία ο λόγος τάσης στη μέγιστη ισχύ προς τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι σταθερός, δηλαδή  $V_{mp}/V_{oc}=K$ , (περίπου 0,72 για τα στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου). Ένα Φ/Β στοιχείο το οποίο παραμένει ανοιχτοκυκλωμένο τοποθετείται δίπλα από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες για να μετράται συνεχώς η τάση ανοιχτοκύκλωσης αυτού. Η τάση τότε των παραγωγικών φωτοβολταϊκών στοιχείων ρυθμίζεται κάθε στιγμή στο σημείο  $KV_{oc}$ , που εξασφαλίζει τη μέγιστη ισχύ.

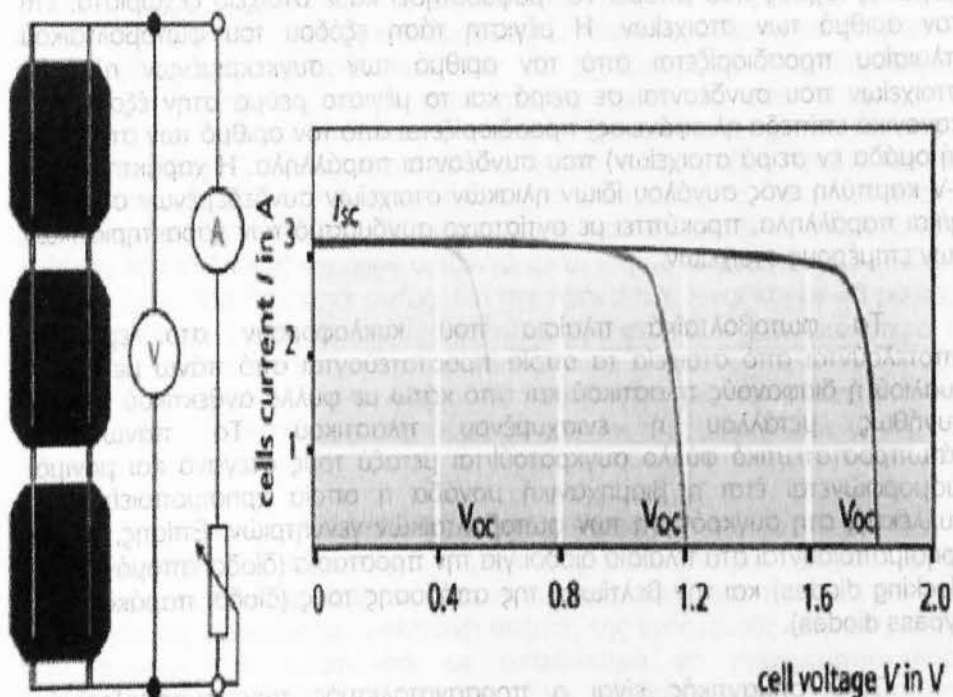
Το λογικό κύκλωμα ελέγχου μετρά την τάση και την ένταση εξόδου των φωτοβολταϊκών γεννητριών, η οποία βέβαια εξαρτάται κάθε στιγμή από την



ακτινοβολία που προσπίπτει, τη θερμοκρασία της γεννήτριας και φυσικά από την αντίσταση που συναντά η γεννήτρια στα άκρα της. Εφαρμόζοντας μία από τις παραπάνω μεθόδους, στέλνει σήμα στον DC/DC μετατροπέα να ανυψώσει ή να μειώσει την τάση μέχρι να εντοπιστεί το σημείο μέγιστης ισχύος. [11]

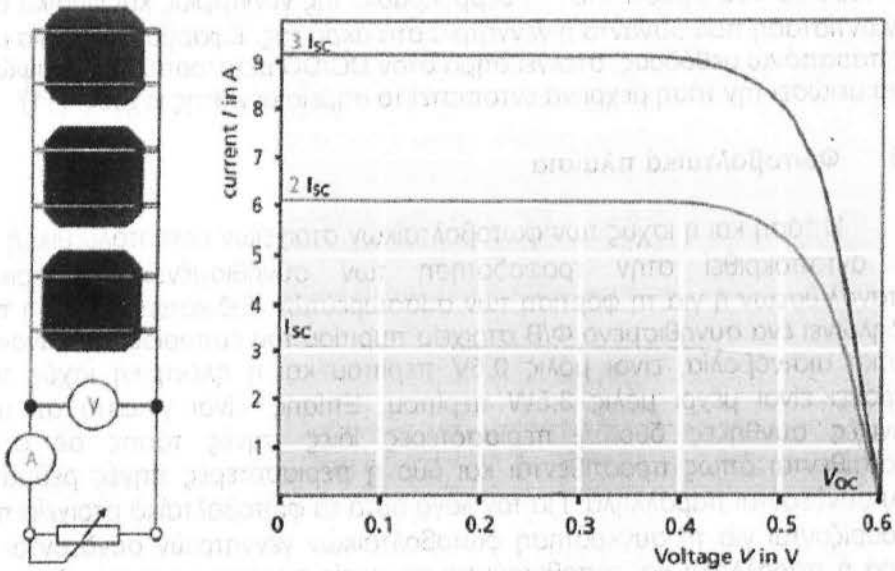
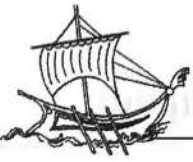
## 4.8 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Η τάση και η ισχύς των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι πολύ μικρή για να ανταποκριθεί στην τροφοδότηση των συνηθισμένων ηλεκτρικών καταναλώσεων ή για τη φόρτιση των συσσωρευτών. Ειδικότερα, η τάση που εκδηλώνει ένα συνηθισμένο Φ/Β στοιχείο πυριτίου του εμπορίου, σε κανονική ηλιακή ακτινοβολία, είναι μόλις 0.5V περίπου και η ηλεκτρική ισχύς που παράγει είναι μέχρι μόλις 3,5W περίπου. Επίσης, είναι γνωστό ότι υπό ιδανικές συνθήκες δύο ή περισσότερες ίδιες πηγές τάσης σε σειρά προστίθενται όπως προστίθενται και δύο ή περισσότερες πηγές ρεύματος που συνδέονται παράλληλα. Για τον λόγο αυτό τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που προορίζονται για τη συγκρότηση φωτοβολταϊκών γεννητριών συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα και τοποθετούνται σε ενιαίο πλαίσιο με κοινή ηλεκτρική έξοδο ώστε να τροφοδοτούν στην έξοδο τους με την επιθυμητή από τον κατασκευαστή τάση και ισχύ (σχήμα 4.8.1 – 4.8.2).



Γράφημα 4.8.1 IV Χαρακτηριστική τριών κυττάρων συνδεδεμένων σε σειρά





Γράφημα 4.8.2 IV Χαρακτηριστική τριών κυττάρων συνδεδεμένων παράλληλα

Όταν τα ηλιακά κύτταρα έχουν τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά, η μέγιστη ισχύς που παίρνουμε από ένα Φ/Β πλαίσιο ισούται με το γινόμενο της μέγιστης ισχύος που μπορεί να τροφοδοτήσει κάθε στοιχείο ξεχωριστά, επί τον αριθμό των στοιχείων. Η μέγιστη τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου προσδιορίζεται από τον αριθμό των συγκεκριμένων ηλιακών στοιχείων που συνδέονται σε σειρά και το μέγιστο ρεύμα στην έξοδο (για κανονικά επίπεδα ηλιοφάνειας) προσδιορίζεται από τον αριθμό των στοιχείων (ή ομάδα εν σειρά στοιχείων) που συνδέονται παράλληλα. Η χαρακτηριστική I-V καμπύλη ενός συνόλου ίδιων ηλιακών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά ή/και παράλληλα, προκύπτει με αντίστοιχο συνδυασμό των χαρακτηριστικών των επιμέρους στοιχείων .

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που κυκλοφορούν στο εμπόριο, αποτελούνται από στοιχεία τα οποία προστατεύονται από πάνω με φύλλο γυαλιού ή διαφανούς πλαστικού και από κάτω με φύλλο ανθεκτικού υλικού, συνήθως μετάλλου ή ενισχυμένου πλαστικού. Το πάνω και κάτωπροστατευτικό φύλλο συγκρατούνται μεταξύ τους στεγανά και μόνιμα. Διαμορφώνεται έτσι η βιομηχανική μονάδα η οποία χρησιμοποιείται ως συλλέκτης στη συγκρότηση των φωτοβολταϊκών γεννητριών. Επίσης, συχνά χρησιμοποιούνται στα πλαίσια δίοδοι για την προστασία (δίοδοι απομόνωσης, blocking diodes) και την βελτίωση της απόδοσης τους (δίοδοι παράκαμψης, bypass diodes).

Πολύ σημαντικός είναι ο προσανατολισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων της συστοιχίας σε σχέση με την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας και περιγράφεται με την κλίση και την αζιμούθια γωνία των πλαισίων. Προφανώς η πυκνότερη ισχύς μιας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε ένα συλλέκτη θα πραγματοποιείται όταν η επιφάνεια του είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της ακτινοβολίας. Στις συνηθισμένες περιπτώσεις τα



πλαίσια τοποθετούνται σε σταθερή κλίση και αζιμούθια γωνία, που επιλέγονται ώστε η γωνία πρόσπτωσης να είναι όσο το δυνατό μικρότερη κατά τη διάρκεια του έτους. Στο βόρειο ημισφαίριο η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου και η αζιμούθια γωνία είναι  $0^\circ$  (προς νότο). Βέβαια η βέλτιστη κλίση, λόγω της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου στη διάρκεια του έτους, είναι διαφορετική για κάθε εποχή οπότε και επιλέγεται ανάλογα την εφαρμογή κάποια διαφοροποίηση στην κλίση από την παράλληλο.

## 4.9 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των Φ/Β στοιχείων

Δεδομένης της μικρής απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου, έχει μεγάλη σημασία να γίνει πλήρης εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας στο μέρος που θα τοποθετηθεί. Γι' αυτόν τον σκοπό ακολουθούνται συγκεκριμένα βήματα τα οποία εξασφαλίζουν την όσο το δυνατόν καλύτερη εκμετάλλευση του ήλιου και την βέλτιστη λειτουργία του φωτοβολταϊκού.

- **Ηλιακή ακτινοβολία:** Ο ήλιος διαγράφει συγκεκριμένη τροχιά γύρω από τη γη, και ανάλογα με το που βρίσκεται το σημείο που θα τοποθετηθεί το Φ/Β πλαίσιο, προσδιορίζεται κατάλληλα ο προσανατολισμός του. Η αζιμούθια γωνία ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του ηλιακού συλλέκτη και στον 23 τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Για να έχουμε βέλτιστη απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας η γωνία πρόσπτωσης πρέπει να είναι κάθετη στο συλλέκτη οπότε και η αζιμούθια γωνία μηδέν. Για το βόρειο ημισφαίριο όπου και βρίσκεται η Ελλάδα, η αζιμούθια γωνία είναι μηδέν, οπότε και ο προσανατολισμός του συλλέκτη πρέπει να είναι προς το νότο. Επίσης η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη, δηλαδή η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και στον ορίζοντα, είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής που βρίσκεται αυτός. Για την Αθήνα π.χ. είναι ίση με 38 μοίρες. Για μεγαλύτερη απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι καλύτερο η κλίση των συλλεκτών να μην μένει σταθερή όλο το χρόνο, αλλά να αλλάζει δύο φορές το χρόνο. Για την Αθήνα για παράδειγμα, μια καλή λύση είναι να τοποθετούνται οι συλλέκτες υπό κλίση 60 μοιρών τους χειμερινούς μήνες και 30 μοιρών τους θερινούς.

- **Θερμοκρασία:** Ένας ακόμα παράγοντας που επιδρά αρνητικά στην απόδοση των φωτοβολταϊκών είναι η θερμοκρασία. Με την αύξηση της θερμοκρασίας προκαλείται αντίστοιχη αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωσης των φορέων του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται περισσότερες επανασυνδέσεις φορέων. Έτσι εκδηλώνεται ισχυρότερο ρεύμα διαρροής διαμέσου της διόδου, που συνεπάγεται μείωση της  $V_{oc}$  και του FF. (ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος  $P_m = I_m V_m$  προς το γινόμενο της βραχυκυκλωμένης έντασης και της ανοικτωκυκλωμένης τάσης  $I_{sc} V_{oc}$  ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης FF – fill factor).

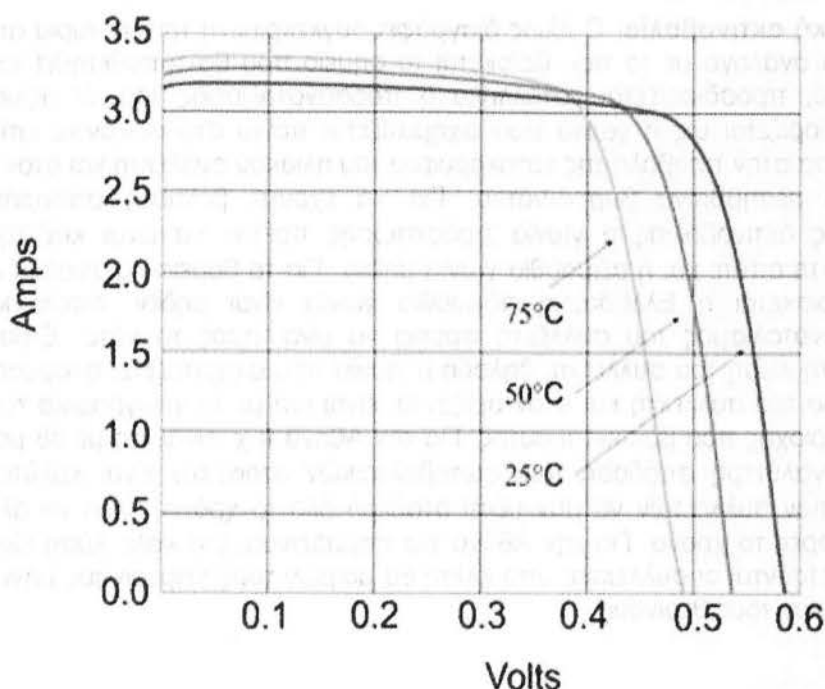


$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad [4.9.1]$$

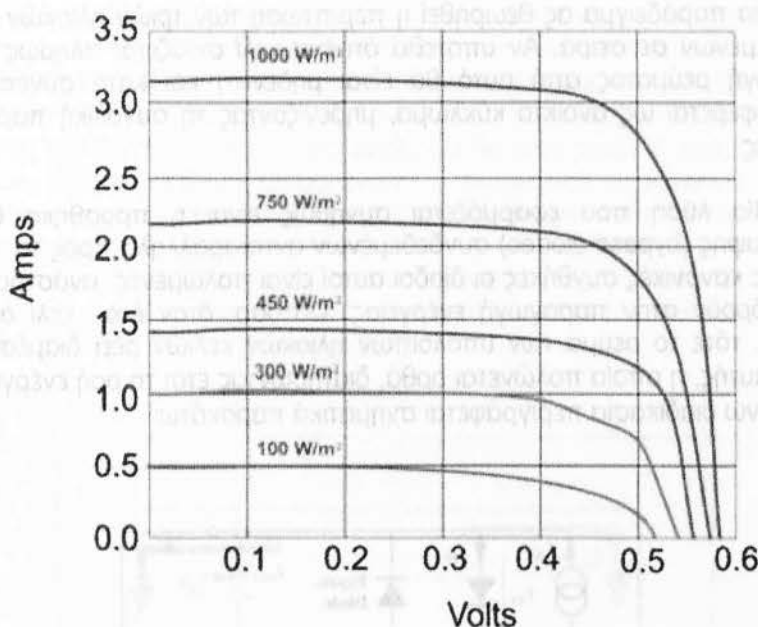
Αν ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου με μια συμβατική θερμοκρασία είναι  $n$ , η τιμή του σε διαφορετική θερμοκρασία  $\Theta$  θα είναι:

$$n_{\theta} = n\sigma_{\theta} \quad [4.9.2]$$

όπου  $\sigma_{\theta}$ , είναι ένας αδιάστατος συντελεστής της θερμοκρασιακής διόρθωσης της απόδοσης. Στη συμβατική θερμοκρασία, ο  $\sigma_{\theta}$  είναι ίσος με τη μονάδα, και μειώνεται κατά περίπου 0,005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας, για τα συνηθισμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου του εμπορίου.



Γράφημα 4.9.3 : Επίδραση της θερμοκρασίας στις καμπύλες I-V μιας τυπικής κυψέλης κρυσταλλικού πυριτίου



Γράφημα 4.9.4 : Παραγωγή ρεύματος και τάσης μιας ηλιακής κυψέλης υπο διαφορετικές εντάσεις φωτός.

Οι Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμής (Standard Test Conditions-STC) ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου επιτυγχάνονται σε θερμοκρασία 25°C, ακτινοβολούμενο ηλιακό επίπεδο 1000 W/m<sup>2</sup> και μάζα αέρα AM 1,5 φασματικής διανομής. Δεδομένου ότι αυτές οι συνθήκες είναι όχι πάντα χαρακτηριστικές για το πώς τα πλαίσια λειτουργούν στο πεδίο εγκατάστασης, η πραγματική απόδοση εκτιμάται ότι είναι συνήθως 85 έως 90 τοις εκατό της πρότυπης δοκιμαστικής κατάστασης (STC).

Οι Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμής (STC) συνδυάζουν την ακτινοβολία μιας θερινής ημέρας, την θερμοκρασία στοιχείου μιας χειμερινής ημέρας και το ηλιακό ηλεκτρομαγνητικό φάσμα μιας ανοιξιάτικης μέρας. Αυτές οι καταστάσεις μέτρησης προφανώς δεν αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές καταστάσεις λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων στην περιοχή της εγκατάστασης.

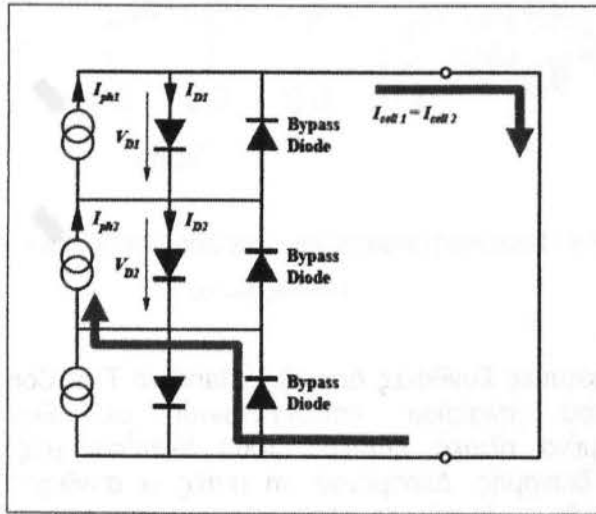
## 4.9.1 Η επίδραση της σκίασης

Η επίδραση της σκίασης, της έλλειψης δηλαδή ηλιακού φωτός, ανάγεται στην μερική ή ολική απώλεια δημιουργίας φωτορεύματος. Η σκίαση δημιουργείται συνήθως από την παρουσία φυσικών εμποδίων (π.χ. δένδρα, κτίρια, στύλοι κτλ) ή από παροδικά (και μάλλον στοχαστικού χαρακτήρα) φαινόμενα (π.χ. σύννεφα).



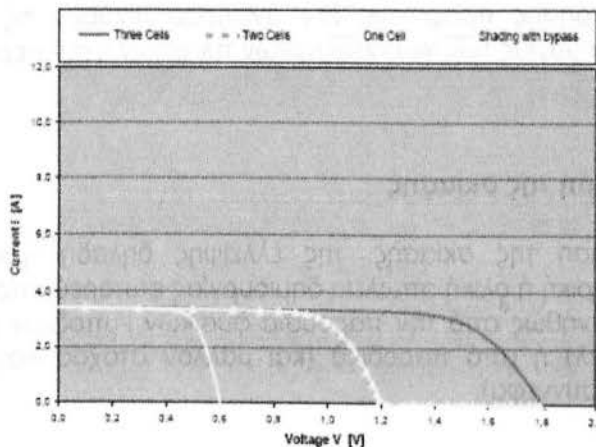
Για παράδειγμα ας θεωρηθεί η περίπτωση των τριών ηλιακών κελιών συνδεδεμένων σε σειρά. Αν υποθεθεί ότι ένα κελί σκιάζεται πλήρως τότε η παραγωγή ρεύματος από αυτό θα είναι μηδενική και κατά συνέπεια θα συμπεριφέρεται ως ανοικτό κύκλωμα, μηδενίζοντας τη συνολική παραγωγή ενέργειας.

Μία λύση που εφαρμόζεται συνήθως είναι η προσθήκη διόδων παράκαμψης (bypass diodes) συνδεδεμένων αντιπαράλληλα προς τα ηλιακά κελιά. Σε κανονικές συνθήκες οι διόδοι αυτοί είναι πολωμένες ανάστροφα και δεν επιδρούν στην παραγωγή ενέργειας. Ωστόσο, όταν ένα κελί σκιαστεί πλήρως, τότε το ρεύμα των υπόλοιπων ηλιακών κελιών ρέει διαμέσου της διόδου αυτής, η οποία πολώνεται ορθά, διατηρώντας έτσι τη ροή ενέργειας. Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται σχηματικά παρακάτω:



Σχήμα 4.9.1.1 Δίοδος ρεύματος διαμέσου της διόδου παράκαμψης σε περίπτωση πλήρους σκίασης

Η I-V χαρακτηριστική του συνδυασμού των κελιών μεταβάλλεται όπως στο παρακάτω Σχήμα:

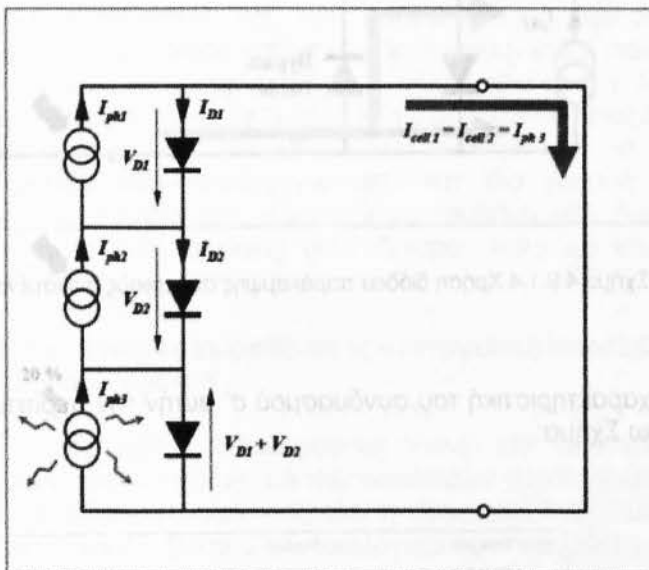


Γράφημα 4.9.1.2 I-V χαρακτηριστική κελιών με ένα κελί πλήρως σκιασμένο





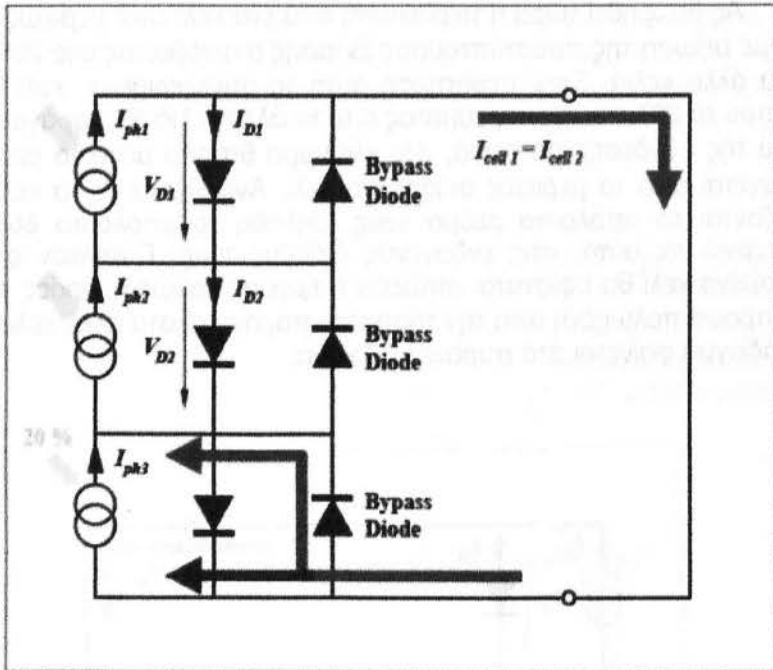
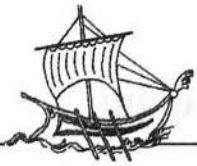
Ας θεωρηθεί τώρα η περίπτωση που ένα κελί είναι μερικώς σκιασμένο, π.χ. με μείωση της προσπίπτουσας έντασης ακτινοβολίας στο 20% σε σχέση με τα άλλα κελιά. Στην περίπτωση αυτή το συγκεκριμένο κελί θα παράγει περίπου το 20% του φωτορεύματος ενώ τα άλλα κελιά θα παράγουν το 100%. Λόγω της σύνδεσης σε σειρά, στο κύκλωμα θα ρέει μόνο το ρεύμα που θα παράγεται από το μερικώς σκιασμένο κελί. Αναφορικά με τα κελιά που δεν σκιάζονται το υπόλοιπο ρεύμα τους (δηλαδή το υπόλοιπο 80%) θα ρέει εσωτερικά σε αυτά, στις ενδογενείς διόδους τους. Επιπλέον στο μερικώς σκιασμένο κελί θα υφίσταται απώλεια ενέργειας καθώς η διόδος του θα είναι ανάστροφα πολωμένη από την τάση που παράγεται στα άλλα κελιά, όπως για παράδειγμα φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα:



Σχήμα 4.9.1.3 Η περίπτωση μερικώς σκιασμένου κελιού

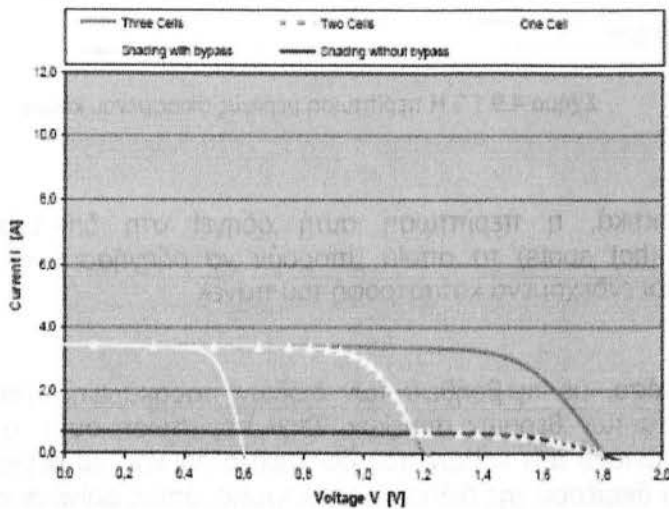
Πρακτικά, η περίπτωση αυτή οδηγεί στη δημιουργία «θερμών σημείων» (hot spots) τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε γρηγορότερη γήρανση και ενδεχόμενα καταστροφή του πάνελ.

Ωστόσο, με τη βοήθεια των διόδων παράκαμψης αποφεύγονται τα προβλήματα των θερμών σημείων. Στην περίπτωση αυτή, η διαφορά των ρευμάτων μεταξύ των κελιών που δεν σκιάζονται και του μερικώς σκιασμένου κελιού ρέει διαμέσου της διόδου παράκαμψης, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα:



Σχήμα 4.9.1.4 Χρήση διόδου παράκαμψης σε μερικώς σκιασμένα κελιά

Η I-V χαρακτηριστική του συνδυασμού σ' αυτήν την περίπτωση δίνεται στο παρακάτω Σχήμα:



Γράφημα 4.9.1.5 Η I-V χαρακτηριστική συνδυασμού εν σειρά κελιών με ένα κελί μερικώς σκιασμένο



Ωστόσο, η χρήση μίας διόδου παράκαμψης ανά κελί είναι γενικά αρκετά δαπανηρή και στην πράξη, συνήθως χρησιμοποιείται μία διόδος ανά 10-1 κελιά. Για παράδειγμα για ένα πάνελ αποτελούμενο από 36 εν σειρά συνδεδεμένα κελιά, χρειάζονται 3 δίοδοι. Οι δίοδοι αυτοί περιλαμβάνονται συνήθως στο κιβώτιο σύνδεσης στο πίσω μέρος κάθε πάνελ.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι δίοδοι παράκαμψης δεν προκαλούν απώλειες σε κανονικές συνθήκες όταν δεν διαρρέονται από ρεύμα. Επιπρόσθετα της προστασίας ενός ή περισσοτέρων κελιών που σκιάζονται, οι δίοδοι παράκαμψης επιτρέπουν τη ροή ρεύματος από ένα φωτοβολταϊκό πάνελ σε μειωμένη βέβαια τάση και ισχύ.

Όπως έχει γίνει φανερό για την εν σειρά σύνδεση τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός πάνελ και, κατ' επέκταση μίας συστοιχίας πάνελ, καθορίζονται από το χειρότερο (από πλευράς σκίασης) κελί ή πάνελ. Για το λόγο αυτό, πάνελ με διαφορετικούς τύπους ηλιακών κελιών ή από διαφορετικούς κατασκευαστές δε θα πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους. Σε ακόμη μεγαλύτερα συστήματα ίσως είναι σκόπιμο ότι τα πάνελ που συνδέονται μεταξύ τους προέρχονται από την ίδια γραμμή παραγωγής. Επιπλέον, πρέπει ο σχεδιαστής μηχανικός να λαμβάνει κάθε δυνατή μέριμνα ώστε να αποφεύγονται σκιάσεις από δένδρα, καλώδια και στύλους ή περιβάλλοντα κτίρια.

## 4.9.2 Πρακτικοί κανόνες χωροθέτησης – ενεργειακή απολαβή πάνελ στον Ελλαδικό χώρο

Στις προηγούμενες παραγράφους έγινε μία ανασκόπηση της τεχνολογίας των ηλιακών κελιών και των κυριότερων χαρακτηριστικών τους. Αντικείμενο του εδαφίου αυτού αποτελεί η χρησιμοποίηση των παραπάνω γνώσεων για τους βασικούς υπολογισμούς χωροθέτησης ενός φωτοβολταϊκού σταθμού.

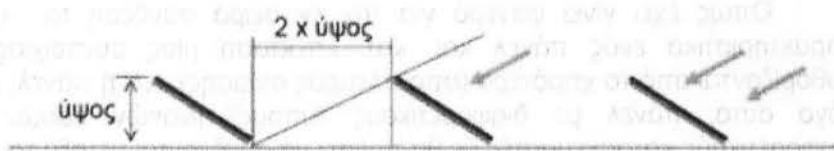
Όπως έγινε φανερό, το πρώτο ζητούμενο αποτελεί η επίτευξη της μέγιστης δυνατής έντασης ακτινοβολίας σε κάθε πάνελ κατά τη διάρκεια του χρόνου. Όπως θα περίμενε κανείς, η ένταση της ακτινοβολίας είναι αρκετά μεγαλύτερη το καλοκαίρι απ' ότι το χειμώνα. Ωστόσο, για τον υπολογισμό της ενεργειακής απολαβής θα πρέπει κανείς να λάβει υπόψη του και το γεγονός ότι οι υψηλές θερμοκρασίες του καλοκαιριού συντελούν αρνητικά στην παραγωγή ενέργειας.

Για την μέγιστη απολαβή ενέργειας, τα πάνελ είναι απαραίτητο να τοποθετούνται με νότιο προσανατολισμό με κλίση η οποία εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Για τα ελληνικά δεδομένα, μία τυπική μέση χαρακτηριστική κλίση είναι αυτή των 30 μοιρών. Ωστόσο όπως θα αναλυθεί περαιτέρω, είναι δυνατόν να αυξηθεί η ενεργειακή απολαβή αναγκάζοντας τα φωτοβολταϊκά πάνελ να ακολουθούν καθημερινώς την πορεία του ήλιου από ανατολή προς δύση με μεταβλητή κλίση, ώστε να λαμβάνεται υπόψη και η θέση του ήλιου στον ορίζοντα. Ωστόσο, τα προηγούμενα, δηλαδή η



τοποθέτηση των πάνελ σε νότιο προσανατολισμό με περίπου 30 μοίρες κλίση ως προς την οριζόντιο, δίνουν έναν πρακτικό κανόνα τοποθέτησης των πάνελ.

Αναφορικά με τη σκίαση, θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε η εγκατάσταση να βρίσκεται σε χώρο στον οποίο απουσιάζουν εμπόδια. Επιπλέον, για την αποφυγή σκιάσεων σειρών φωτοβολταϊκών πάνελ μεταξύ τους, ένας πρακτικός κανόνας τοποθέτησης είναι ότι η απόσταση μεταξύ διαδοχικών σειρών θα πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια του ύψους της εγκατάστασης, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα:



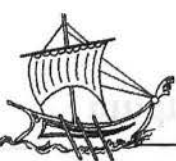
Σχήμα 4.9.2.1 Χωροθέτηση σειρών πάνελ

Η ενεργειακή απολαβή από τα φωτοβολταϊκά πάνελ εξαρτάται προφανώς και από τα κλιματολογικά δεδομένα του τόπου εγκατάστασης. Είναι προφανές ότι φωτοβολταϊκά πάνελ του ίδιου κατασκευαστή τοποθετημένα ακριβώς με τον ίδιο τρόπο θα δίνουν διαφορετική παραγωγή στη Βόρεια απ' ό,τι στη Νότια Ελλάδα, όπου επικρατούν διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Ο μελετητής μηχανικός θα πρέπει πάντα να έχει υπόψη του ότι η αναγραφόμενη ισχύ κάθε πάνελ (peak power,  $W_p$ ) αναφέρεται σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC) οι οποίες διαφέρουν σημαντικά από τις πραγματικά επικρατούσες συνθήκες. [15]

## 4.10 Παρούσα κατάσταση και ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα

Εξετάζοντας την Ελληνική αγορά και την ανάπτυξη των Φ/Β, μπορεί να διαπιστωθεί το καθεστώς που διέπει εν γένει τον κλάδο των ΑΠΕ στη χώρα μας. Επιγραμματικά, η ανάπτυξή τους υπήρξε μηδαμινή (2.2 MWp το 2003) τουλάχιστον μέχρι το 2006, όπου οι εγκαταστάσεις Φ/Β περιορίζονταν σε αυτές της ΔΕΗ σε νησιά (Κύθνος, Αντικύθηρα κλπ) και σε εγκαταστάσεις ιδιωτών σε απομακρυσμένες κατοικίες. Μια τέτοια ανάπτυξη ήταν σαφώς απογοητευτική, δεδομένου του εξαιρετικού ηλιακού δυναμικού της χώρας μας. Οι κύριοι λόγοι για την μικρή αυτή ανάπτυξη ήταν τα συνήθη γραφειοκρατικά προβλήματα, η ελλιπής ενημέρωση των μικροεπενδυτών, τα μηδαμινά κίνητρα τα οποία καθιστούσαν ασύμφορη μια επένδυση σε Φ/Β και ο μονοπωλιακός χαρακτήρας του ενεργειακού τομέα μέχρι το 2001.

Το 2006, με το νόμο 3468/2006, δημιουργήθηκε ένα σαφέστερο νομοθετικό πλαίσιο σε σχέση με τις ΑΠΕ και κατά συνέπεια και με τα Φ/Β. Ταυτόχρονα με τις ευνοϊκές τιμολογιακές ρυθμίσεις και επιχορηγήσεις για τους ενδιαφερόμενους επενδυτές σε μικρομεσαία κλίμακα, θεσμοθετήθηκε ένα

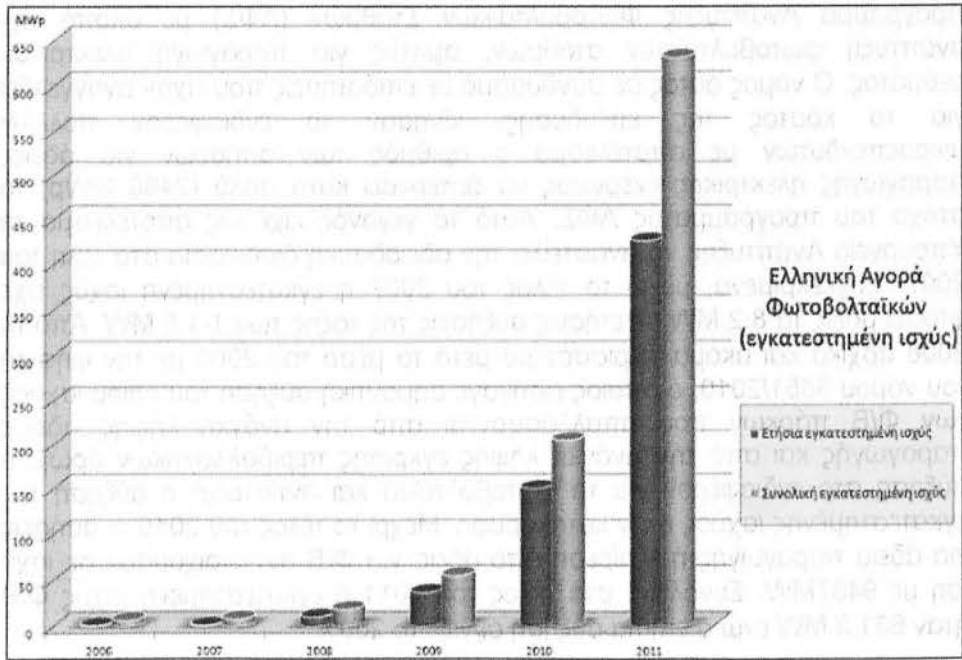


πρόγραμμα Ανάπτυξης Φωτοβολταϊκών Σταθμών (ΑΦΣ) με σκοπό την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών σταθμών, αμιγώς για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Ο νόμος αυτός σε συνδυασμό με επιδοτήσεις που είχαν αναγγελθεί για το κόστος της επένδυσης, κίνησαν το ενδιαφέρον πολλών μικροεπενδυτών με αποτέλεσμα ο αριθμός των αιτήσεων για άδειες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να ξεπερνάει κατά πολύ (2489 MWp) το στόχο του προγράμματος ΑΦΣ. Αυτό το γεγονός είχε ως αποτέλεσμα το Υπουργείο Ανάπτυξης να αναστείλει την αδειοδοτική διαδικασία στα τέλη του 2007. Συγκεκριμένα, μέχρι το τέλος του 2007 η εγκατεστημένη ισχύς είχε φτάσει μόλις τα 8.2 MW με ετήσιες αυξήσεις της τάξης των 1-1.5 MW. Από το 2008 αρχικά και ακόμα περισσότερο μετά τα μέσα του 2009 με την ψήφιση του νόμου 3851/2010, ο οποίος εισήγαγε σημαντική αύξηση του ορίου ισχύος των Φ/Β πάρκων που απαλλάσσονται από την ανάγκη λήψης άδειας παραγωγής και από την ανάγκη λήψης έγκρισης περιβαλλοντικών όρων, η αύξηση στο ενδιαφέρον για τα φωτοβολταϊκά και αντίστοιχα η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος ήταν κατακόρυφη. Μέχρι το τέλος του 2010 οι αιτήσεις για άδεια παραγωγής ή εξαίρεση από άδεια για Φ/Β αντιστοιχούσαν σε ισχύ ίση με 9437MW. Συνολικά, στο τέλος του 2011 η εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β ήταν 631,3 MW ενώ η ετήσια αύξηση άγγιξε το 200%.

Παρ' ότι η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος πρόκειται να συνεχιστεί με αντίστοιχους ρυθμούς τουλάχιστον μέχρι το 2015, πρέπει να τονιστεί ότι η, εθνικά ορισμένη, επιδιωκόμενη ισχύς από τα Φ/Β είναι ίση με 2200 MW μέχρι το 2020, οπότε γίνεται κατανοητό ότι ουσιαστικά, ένα μικρό ποσοστό των σημερινών ή και μελλοντικών αιτήσεων θα υλοποιηθεί. Είναι επομένως κατανοητό ότι απαιτείται επαρκής σχεδιασμός τόσο από την πλευρά της πολιτείας όσον αφορά την καθοδήγηση για νέες αιτήσεις και την κατανομή των αιτήσεων που θα υλοποιηθούν, όσο και από την πλευρά των επενδυτών για το αν ένα έργο μπορεί να είναι βιώσιμο μετά την υλοποίησή του.

Πράγματι λοιπόν, το πλαίσιο στήριξης των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα είναι ένας αξιόλογος παράγοντας προς μελέτη τον οποίο και θα εξετάσουμε αναλυτικότερα στην συνέχεια (αυτής της πτυχιακής εργασίας στο κεφάλαιο 7.1, 7.2 & 7.3). Βέβαια, οι τιμές για την προμήθεια και εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα κυμαίνονται σε υψηλότερα επίπεδα από τις ωριμότερες αγορές φωτοβολταϊκών στην Ευρώπη (Γερμανία, Ισπανία) αλλά αυτό είναι φυσικό καθώς με την ανάπτυξη της αγοράς οι όγκοι και η οργάνωση των δραστηριοτήτων των επιχειρήσεων και η εκπαίδευση του προσωπικού θα μειώσουν το αρχικά μεγαλύτερο κόστος σχεδίασης, προμήθειας, εγκατάστασης και συντήρησης. [12]





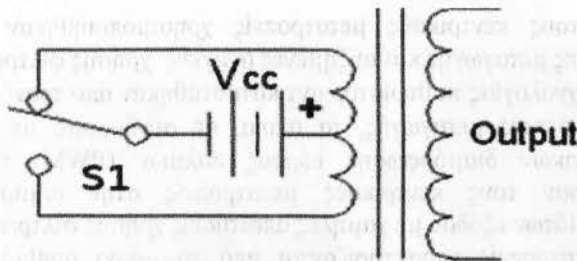
Γράφημα 4.10.1 Ελληνική Αγορά Εγκατεστημένων Φωτοβολταϊκών

## 5.1 Μετατροπέας - Αντιστροφέας ( Inverter )

Ο μετατροπέας - αντιστροφέας ( inverter ) είναι μια συσκευή που μετατρέπει το συνεχές (DC) ρεύμα του φωτοβολταϊκού συστήματος σε εναλλασσόμενο (AC) ρεύμα 230V. Έτσι μπορούμε να τροφοδοτήσουμε από τη μπαταρία του φωτοβολταϊκού συστήματος όλες τις οικιακές συσκευές που απαιτούν 230 Volt. Ο inverter ή μετατροπέας 230V συνδέεται με ένα διπλό καλώδιο (θετικό - αρνητικό) πάνω στους πόλους της μπαταρίας (όχι για διασυνδεδεμένα συστήματα). Έχει συνήθως μια ή δύο υποδοχές σαν τις πρίζες που έχουμε στους τοίχους του σπιτιού μας, πάνω στις οποίες συνδέουμε τις συσκευές που απαιτούν 230V, απ' ευθείας ή χρησιμοποιώντας πολύμπριζο ή και μπαλαντέζα. Δεν έχει σημασία πόσες συσκευές θα συνδέσουμε ταυτόχρονα, αρκεί η ισχύς όλων των συσκευών που λειτουργούν ταυτόχρονα να μην ξεπερνά την επιτρεπόμενη ισχύ του inverter - μετατροπέα τάσης. Έτσι, αν έχουμε έναν inverter 200W (200 Watt), μπορούμε να λειτουργήσουμε ταυτόχρονα μια τηλεόραση 60W, έναν ανεμιστήρα 40W, ένα φορητό υπολογιστή 60W και λαμπτήρες οικονομίας με 40W συνολικής ισχύος. Ένας μετατροπέας καλής ποιότητας θα κλείσει αν από λάθος συνδέσουμε μια συσκευή με παραπάνω Watt από αυτά που μπορεί να αντέξει, προστατεύοντας έτσι τις ηλεκτρικές συσκευές μας. Το ίδιο θα κάνει ένας inverter καλής ποιότητας αν διαπιστώσει ότι κοντεύει να αδειάσει η μπαταρία. Υπάρχουν inverter από 50W έως 15.000W. Συνήθως χρησιμοποιούμε inverter από 150W έως 1.200W ανάλογα βέβαια και με τις ανάγκες μας. Ένα μικρό φωτοβολταϊκό σύστημα back-up για τις περιπτώσεις διακοπής ρεύματος μπορεί να εξυπηρετείται από έναν inverter 300W, αλλά ένα μεγάλο φωτοβολταϊκό σύστημα που καλύπτει όλες τις καθημερινές ανάγκες για ένα ολόκληρο σπίτι θα θέλει inverter μέχρι και πάνω από 4.000W.



Στην εικόνα 5.1.1 φαίνεται το βασικό σχέδιο ενός μετατροπέα (inverter) χρησιμοποιώντας ένα μετασχηματιστή για να γίνει κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας του. Η είσοδος ελέγχεται μέσω ενός διακόπτη συνδεδεμένο σε μια DC πηγή η οποία με την σειρά της είναι συνδεδεμένη με ένα μετασχηματιστή. Ο διακόπτης  $S1$  χρησιμοποιείται για να ελέγξει την διαδρομή που το συνεχές ρεύμα θα ακολουθήσει. Αλλάζοντας τη διαδρομή έχουμε σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση εναλλασόμενου ηλεκτρικού ρεύματος στα άκρα του κυρίου πηνίου του μετασχηματιστή. Η συχνότητα, στην οποία αλλάζει κατάσταση-θέση ο διακόπτης, είναι ένας απλός για να μπορέσουμε να ελέγξουμε την συχνότητα του παραγόμενου εναλλασόμενου ηλεκτρικού ρεύματος. Σήμερα κυκλώματα Inverter χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό από διόδους (diodes), τρανζίστορ (transistor), πυκνωτές (capacitors) και αντιστάτες (resistor).



Σχ. 5.1.1 Μονοφασικός Αντιστροφέας-Μετατροπέας

## 5.2 Φωτοβολταϊκός Αντιστροφέας – Μετατροπέας

Ο φωτοβολταϊκός μετατροπέας – αντιστροφέας είναι ειδικού τύπου. Όπως μπορούμε να καταλάβουμε και από το όνομα του, είναι σχεδιασμένος για χρήση σε φωτοβολταϊκά συστήματα ο οποίος απαιτεί ένα αριθμό εξτρά λειτουργιών προκειμένου να μπορέσει να βελτιστοποιηθεί η διαδικασία. Η ύπαρξη τέτοιων λειτουργιών είναι η κύρια διαφορά από ένα απλό μετατροπέα και ένα Φ/Β μετατροπέα. Οι δύο κύριες λειτουργίες είναι η βέλτιστη μετατροπή ενέργειας (Maximum Power Point Tracking – MPPT) για το οποίο γίνεται αναφορά σε προηγούμενο κεφάλαιο, και η anti-islanding προστασία.

Το φαινόμενο islanding αφορά Φ/Β μετατροπείς συνδεδεμένους με το δίκτυο όπως επίσης και τοπικούς. Μια από τις χρήσεις τους είναι να παρέχουν ενέργεια από τα Φ/Β απευθείας στο δίκτυο σε περίπτωση περίσσειας ενέργειας. Είναι σχεδιασμένοι να κλείνουν αυτόματα σε περίπτωση που δεν αναγνωρίζουν σύνδεση με το δίκτυο και αυτό είναι ένα μέτρο πρόληψης για την αποφυγή υπερθέρμανσης και απώλειας ηλεκτρικής ενέργειας. Σε περίπτωση που υπάρχει φορτίο το οποίο λειτουργεί στην ίδια συχνότητα όπως και το δίκτυο τότε υπάρχει περίπτωση ο μετατροπέας να παραπλανηθεί



πιστεύοντας ότι είναι ακόμα συνδεδεμένος στο δίκτυο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *islanding*. [13]

## 5.2.1 Κεντρικός Μετατροπέας

Οι κεντρικοί αντιστροφέας αποτελούν το είδος των αντιστροφών που εμφανίζουν τα μεγαλύτερα επίπεδα ισχύος, της τάξης από 30-50kW έως και 1-2MW. Για το λόγο αυτό, η χρήση τους είναι περισσότερο διαδεδομένη σε σταθμούς μεγάλης ισχύος. Σε ορισμένες περιπτώσεις και σε επίπεδα ισχύος των εκατοντάδων kW οι αντιστροφέας αυτοί συνοδεύονται από μετασχηματιστή ανύψωσης 0,4/20kV, ώστε να επιτρέπουν την απευθείας σύνδεση τους στο δίκτυο ΜΤ της ΔΕΗ.

Αρχικά στους κεντρικούς μετατροπέες χρησιμοποιήθηκαν θυρίστορ με χαμηλές συχνότητες μεταγωγής και αυξημένες ανάγκες χρήσης φίλτρων. Ωστόσο με την εξέλιξη της τεχνολογίας τα θυρίστορ αντικαταστάθηκαν από τρανζίστορ IGBT με μεγαλύτερες συχνότητες μεταγωγής, τα οποία, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη εξελιγμένων τεχνικών διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) υλοποιούμενων ψηφιακά, οδήγησαν τους κεντρικούς μετατροπέες στην δημιουργία σχεδόν ημιτονοειδών ρευμάτων εξόδου με χαμηλές απαιτήσεις χρήσης φίλτρων.

Οι κεντρικοί μετατροπέες χαρακτηρίζονται από το μικρό αριθμό εισόδων DC (συνήθως 1-2 εισόδους). Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τον μεγάλο αριθμό πάνελ τα οποία πρέπει να συνδεθούν στην είσοδο τους, επιβάλλει την εκτεταμένη χρήση DC καλωδίων σε αντίθεση με τις άλλες ομάδες αντιστροφών όπου η καλωδίωση μπορεί να γίνει με AC.

Το παρακάτω Σχήμα παρουσιάζει έναν κεντρικό μετατροπέα στα με μέγιστη ισχύ εισόδου τα 1,4kWp.



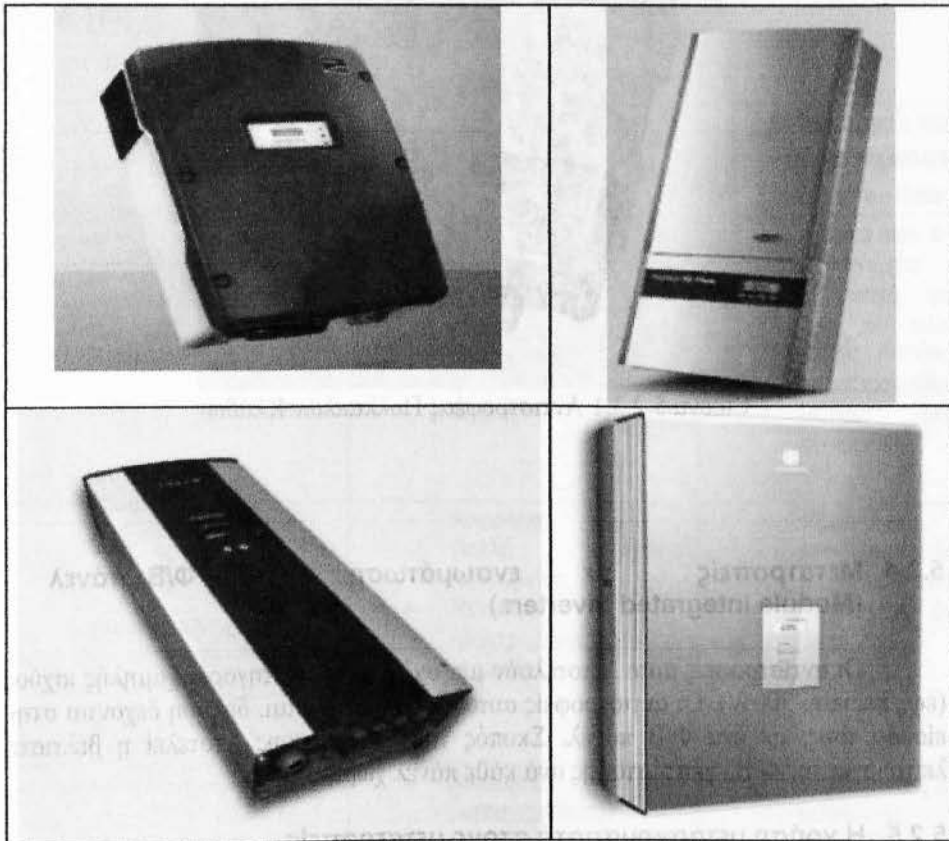
Εικόνα 5.2.1.1 Κεντρικός Μετατροπέας



## 5.2.2 Μετατροπείς κλάδων ή στοιχειοσειρών (string inverters)

Αποτελούν αδιαμφισβήτητη την περισσότερο διαδεδομένη κατηγορία αντιστροφέων σε σταθμούς μικρής έως και μέσης ισχύος. Η βασική αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην παράλληλη σύνδεση ενός αριθμού κλάδων (strings) σε αντίστοιχες εισόδους του αντιστροφέα (της τάξης των 2-8).

Οι αντιστροφείς αυτού του τύπου κυκλοφορούν στο εμπόριο με μετασηματιστή ή χωρίς μετασηματιστή καθώς επίσης και σε μονοφασική ή τριφασική σύνδεση (συνήθως πάνω από 10kW). Διαθέτουν αρκετή ευελιξία αναφορικά με τον αριθμό των πάνελ που μπορεί να συνδεθεί στις εισόδους τους, αρκεί φυσικά να μην παραβιάζονται οι μέγιστες ρυθμίσεις ασφαλείας τους. Επιπλέον είναι σκόπιμο να συνδέονται στις εισόδους τους με τον ίδιο τύπο και αριθμό πάνελ. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει ενδεικτικά ορισμένους αντιστροφείς αυτού του τύπου:



Εικόνα 5.2.2.1 Μετατροπείς Κλάδων

## 5.2.3 Μετατροπείς πολλαπλών κλάδων ή στοιχειοσειρών (multistring inverters)

Οι αντιστροφείς πολλαπλών κλάδων χρησιμοποιούνται όταν σε έναν αντιστροφέα είναι απαραίτητο να συνδεθούν διαφορετικά πάνελ, όσον αφορά την ονομαστική ισχύ τους, τον αριθμό των πάνελ που αποτελούν τον κλάδο, τον



κατασκευαστή κτλ. Στην περίπτωση αυτή στην ουσία κάθε είσοδος είναι ανεξάρτητη από τις άλλες και διαθέτει τους δικούς της ελεγκτές μέγιστης ισχύος και μετατροπείς.

Οι αντιστροφείς αυτοί χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου η διαθεσιμότητα πάνελ επιβάλλει τη σύνδεση διαφορετικών πάνελ ή σε περιπτώσεις όπου μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά εγκατάστασης που επηρεάζουν την παραγωγή ενέργειας, όπως είναι η κλίση των πάνελ ή η ύπαρξη προβλημάτων σκίασης.

Λόγω του ειδικού χαρακτήρα της χρήσης τους, η διαθεσιμότητα μοντέλων multi-string είναι σαφώς πιο περιορισμένη απ' ό τι σε συμβατικούς string inverters.



Εικόνα 5.2.3.1 Αντιστροφέας Πολλαπλών Κλάδων

## 5.2.4 Μετατροπείς με ενσωμάτωση σε Φ/Β πάνελ (Module integrated inverters)

Οι αντιστροφείς αυτοί αποτελούν μία σχετικά νέα κατηγορία χαμηλής ισχύος (έως περίπου 300W). Οι αντιστροφείς αυτοί ενσωματώνονται, δηλαδή δέχονται στην είσοδο τους, με ένα Φ/Β πάνελ. Σκοπός της χρήσης τους αποτελεί η βέλτιστη λειτουργία της Φ/Β εγκατάστασης ανά κάθε πάνελ χωριστά.

## 5.2.5 Η χρήση μετασχηματιστή στους μετατροπείς

Ο κυριότερος λόγος της χρήσης μετασχηματιστή σε έναν αντιστροφέα είναι αυτός της απομόνωσης της DC πλευράς η οποία συνδέεται με τα φωτοβολταϊκά πάνελ με την AC πλευρά που συνδέεται στο δίκτυο. Οι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι κατασκευασμένοι για συχνότητα 50Hz, ή για υψηλότερη συχνότητα (της τάξης των 10-15kHz) για μικρότερη ισχύ. Οι μετασχηματιστές χαμηλής συχνότητας εμφανίζουν μεγαλύτερες απώλειες, καταλαμβάνουν μεγαλύτερο όγκο και έχουν μεγαλύτερο βάρος. Αντιθέτως οι





μετασχηματιστές υψηλής συχνότητας χαρακτηρίζονται από πιο εξειδικευμένη κατασκευή.

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της χρήσης του μετασχηματιστή, πέραν του αυξημένου κόστους ανά μονάδα ισχύος, είναι αυτό της εισαγωγής επιπλέον απωλειών που κυμαίνονται μεταξύ 2-4%. Ωστόσο είναι πιθανόν και οι αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή να εμφανίζουν αυξημένες απώλειες αν χρησιμοποιούνται μετατροπείς ανύψωσης της DC τάσης των Φ/Β πάνελ (DC/DC μετατροπείς ανύψωσης). Επιπλέον, η έλλειψη γαλβανικής απομόνωσης στους αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή, δημιουργεί αυξημένες απαιτήσεις αναφορικά με την ασφάλεια και την εμφάνιση διαρροών και ασυμμετριών. Σε ορισμένες περιπτώσεις δε, επιβάλλεται η χρήση αντιστροφών με μετασχηματιστή. Μία τέτοια περίπτωση είναι αυτή των πάνελ άμορφου πυριτίου όπου υποχρεωτικά συνδέονται σε αντιστροφείς με μετασχηματιστή απομόνωσης.

Μία σύγκριση των δύο οικογενειών αντιστροφών παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα: [14]

	<b>Αντιστροφείς με μετασχηματιστή (with transformer)</b>	<b>Αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή (transformerless-TL)</b>
<b>Χαρακτηριστικά</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Οι τάσεις εισόδου και εξόδου είναι γαλβανικά απομονωμένες</li><li>- Ευρεία χρήση</li><li>- Κυρίως χρήση σε υψηλότερα επίπεδα ισχύος</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Η τάση των Φ/Β πάνελ πρέπει είτε να είναι σημαντικά υψηλότερη από το πλάτος της τάσης δικτύου, ή να χρησιμοποιηθούν DC/DC μετατροπείς ανύψωσης</li></ul>
<b>Πλεονεκτήματα</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Ασφάλεια</li><li>- Πολλά χρόνια λειτουργίας</li><li>- Μείωση ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Μεγαλύτερη απόδοση (σε συσκευές χωρίς DC/DC μετατροπείς</li><li>- Μικρότερος όγκος και βάρος</li></ul>
<b>Μειονεκτήματα</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Απώλειες μετασχηματιστή (μαγνητικές και ωμικές)</li><li>- Αυξημένος όγκος και βάρος</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Μεγαλύτερες απαιτήσεις ασφάλειας</li><li>- Μεγαλύτερη ευαισθησία σε ασυμμετρίες</li><li>- Μεταβολές του σημείου λειτουργίας</li></ul>

Πίνακας 5.2.5.1 Σύγκριση Αντιστροφών



## 5.3 Μετατροπέας τύπου micro-inverter.

Ο μετατροπέας τύπου micro-inverter προσφέρει ένα άλλο τρόπο σχεδιασμού Φ/Β συστημάτων. Στα συμβατικά συστήματα γίνεται χρήση Φ/Β διάταξης συνδεδεμένης σε ένα μετατροπέα (inverter) για να μπορέσει να μετασχηματιστεί η συνεχής τάση (DC) από την έξοδο της διάταξης σε εναλλασσόμενη (AC). Στην περίπτωση του μετατροπέα τύπου micro-inverter το κάθε Φ/Β συνδέεται με ένα μετατροπέα και στην συνέχεια γίνεται συνδιασμός όλων των εξόδων των μετατροπέων προκειμένου να έχουμε την συνολική επιθυμητή παραγωγή ενέργειας του συστήματός μας.

### Πλεονεκτήματα

- Το κάθε Φ/Β αποτελεί μια αυτόνομη μονάδα λειτουργίας ενώ στα συστήματα διάταξης – συστοιχίας των οποίων η κάθε μονάδα λειτουργίας αποτελείται από πλήθος Φ/Β πάνελ.
- Σε περίπτωση σκίασης ή δυσλειτουργίας του Φ/Β δεν επηρεάζεται η απόδοση του υπολοίπου συστήματός μας σε αντίθεση με την χρήση παραδοσιακού μετατροπέα (inverter) όπου τότε η απόδοση του συστήματος καθορίζεται από το χαμηλότερο σε απόδοση πάνελ.
- Μπορούμε να προσθέσουμε ή και να αφαιρέσουμε ένα πάνελ ακόμα και αν είναι άλλης μάρκας και ισχύος χωρίς να επηρεάζεται το υπόλοιπο σύστημα το οποίο δεν θα μπορούσε να γίνει σε μια συμβατική εγκατάσταση αφού θα έπρεπε το πάνελ να είναι ίδιας ισχύος και κατασκευαστή.
- Μπορούμε να παρακολουθούμε χωριστά την απόδοση του κάθε πάνελ.
- Δεν υπάρχουν απώλειες από τα DC καλώδια.
- Μπορούμε να τοποθετήσουμε το κάθε Φ/Β σε διαφορετική θέση-κλίση χωρίς αυτό να επηρεάζει το υπόλοιπο σύστημα και μπορούμε έτσι να επιτύχουμε μέγιστη απόδοση ισχύος.
- Σε περίπτωση δυσλειτουργίας ενός συμβατικού μετατροπέα (inverter) τότε ολόκληρη η διάταξη των Φ/Β πάνελ που θα ήταν συνδεδεμένη βγαίνει αυτόματα εκτός λειτουργίας πράγμα που δεν συμβαίνει με την χρήση μετατροπέα τύπου micro-inverter.

Το μοναδικό **Μειονέκτημα** των μετατροπέων τύπου micro-inverter είναι το κόστος αφού για κάθε Φ/Β πάνελ χρειαζόμαστε και ένα μετατροπέα.



Κατασκευαστής	Μοντέλο Μετατροπέα	Software	Απόδοση συνεχόμενου ρεύματος σε kW	Περιοχή Τάσης που έγιναν οι μετρήσεις (V)	Απόδοση (%)	Βαθμολογία	Θέση σχετική στη βαθμολογία
Anhui Ehe New Energy Tech. Co. Ltd.	EHE-N2K5	V 1.20.532 1D	2.7	200 - 400	87,4	Κακή	81
	EHE-N5K	2.0.532	5.4	300 - 650	80,3	Κακή	83
Aros Srl	Sino 4000 <sup>2)</sup>	k. A.	4.0	250 - 450	95,1	Καλή	32
Carlo Gavazzi Automation SpA	ISMG1500 E	k. A.	4.0	200 - 450	94,1	Ικανοποιητική	44
Conergy AG / Voltwerk Electronics GmbH	IPG 5 S	Version 2.1.0	5.0	275 - 750	95,0	Καλή	34
	IPG 5000 vision <sup>1)</sup>	k. A.	5.0	301 - 705	94,0	Ικανοποιητική	46
	IPG 15 T	k. A.	15,0	450 - 800	96,8	Πολύ καλή	19
Danfoss Solar Inverters AS	ULX 1600 HV IN	SW 1.05	1,8	260 - 500	89,2	Κακή	78
	TLX 10k	SW 1.06	10,3	430 - 800	96,5	Πολύ καλή	21
	TLX 15k	SW 1.06	15,5	430 - 800	96,7	Πολύ καλή	16
Dasstech Co. Ltd.	DSP-123K2	S.1	3.0	200 - 450	95,1	Καλή	32
	DSP-123KH	S.1	3.3	350 - 600	93,0	Επαρκή	62
Delta Energy Systems (Germany) GmbH	SI 3300 <sup>1)</sup>	0.03	3.6	150 - 435	93,9	Ικανοποιητική	50
Diehl AKO Stiftung & Co. KG	Platinum 2100 S	k. A.	1,9	206 - 360	92,8	Επαρκή	64
	Platinum 4800 S	k. A.	4,1	320 - 628	92,9	Επαρκή	63
	Platinum 6300 TL	k. A.	5,7	350 - 710	96,8	Πολύ καλή	14
Eaton Phoenixtec MMPL Co. Ltd.	PVG 2800	Überarbeitete Version, ab 5-2008 (3000 V.061)	2,9	250 - 450	94,4	Ικανοποιητική	39
	PVG 2800		2,9	255 - 435	78,4	Κακή	84
Eaton Phoenixtec MMPL Co. Ltd., Eitec Valere AS	PVG 10000	k. A.	10,4	320 - 720	91,8	Κακή	73
Fronius International GmbH	THEIA 4.4HE-1	V1.01	4,6	230 - 480	96,5	Πολύ καλή	21
	IG 30	IG Ctrl = 2.06.01.0, DC/DC- Platine = 2.02.04.0 IG Brain = 4.03.07, Display = 1.00.10.0, PINCI = 1.01.05.0 Carbo = 1.0.2.0, TL- 5kW = 1.0.2.0 Print SSP = 0.5.0.0 IG Brain = 4.28.20, Display = 1.1.0.5, PINCI = P500 = 1.4.35, PINCI P501 = 1.4.35	2,7	150 - 397	91,4	Κακή	75
	IG Plus 50		4,2	230 - 500	94,5	Ικανοποιητική	37
Fronius International GmbH	IG TL 5.0		4,7	350 - 700	95,9	Καλή	27
	IG Plus 100		8,4	230 - 500	94,8	Ικανοποιητική	35
Growatt New Energy Co. Ltd.	Growatt 5000TL <sup>1)</sup>	G.1.4	4,8	280 - 500	96,0	Καλή	26
Ingeteam Energy SA	Ingecon Sun Lite 3.3 TL	AAP1080 XX	3,5	150 - 414	93,4	Επαρκή	60
Jiangsu Eversolar New Energy Co. Ltd	Eversol-TL 4800	V1.00	4,1	290 - 500	96,7	Πολύ καλή	16
Kaco New Energy GmbH	Powador 2500ki DCS	k. A.	2,7	350 - 600	94,3	Ικανοποιητική	41
	Powador 2500ki <sup>1)</sup>	K214.32 DE Powador 2500ki KW43.05	2,7	350 - 597	92,5	Επαρκή	67
	Powador 3501ki <sup>1)</sup>	k. A.	3,5	125 - 391	92,6	Επαρκή	66
	Powador 4202	k. A.	3,7	200 - 510	94,0	Ικανοποιητική	46
	Powador 4000 supreme (18 kHz) <sup>1)</sup>	k. A.	4,6	350 - 510	95,7	Καλή	28
Kaco New Energy GmbH	Powador 4000 supreme (9 kHz) <sup>1)</sup>	k. A.	4,6	350 - 510	96,2	Καλή	25
	Powador 8000ki	Νέο Firmware από 2010 <sup>1)</sup>	8,3	350 - 600	94,4	Ικανοποιητική	39
	Powador 8000ki	Παλιό Firmware μέχρι 2010 <sup>1)</sup>	8,3	350 - 600	94,0	Ικανοποιητική	46
Kostal Industrie Elektrik GmbH	Piko 10.1	3.03	9,7	400 - 650	94,0	Ικανοποιητική	46



Κατασκευαστής	Μοντέλο Μετατροπέα	Software	Απόδοση συνεχόμενου ρευματος σε kW	Περιοχή Τάσης που έγιναν οι μετρήσεις (V)	Απόδοση (%)	Βαθμολογία	Θέση σχετική στη βαθμολογία
Mastervolt Solar BV	Sunmaster CS 2000 <sup>h</sup>	k.A.	5,8	212 - 386	92,3	Επαρκής	68
	Sunmaster XS 9500	k.A.	5,3	180 - 460	93,6	Ικανοποιητική	58
	Sunmaster CS20TL	k.A.	20,4	350 - 900	96,9	Πολύ καλή	10
Mitsubishi Electric Corporation	PV-F1300S4TL-0ER	CPU V13 11, DSP T13 14	4,8	200 - 650	93,9	Ικανοποιητική	50
Delmaier Technology GmbH	PAC 4	Version 3.8	4,3	330 - 600	93,6	Ικανοποιητική	58
Opti-Solar International	OT 4000	V2.07	4,2	250 - 400	92,1	Επαρκής	71
	OT 4000	V1.09	4,2	200 - 450	97,8	Κακή	89
Powercom Co. Ltd.	SLK-4000	k.A.	4,0	200 - 400	92,0	Επαρκής	72
	SLK-4000	V2.07	4,1	250 - 450	91,1	Κακή	76
Power-One SpA	Aurora FV1-2000-OUTD	DSP Inverter = E205	2,1	210 - 530	92,8	Επαρκής	64
	Aurora FV1-5000-OUTD-S	DSP Inverter = E01B	6,3	180 - 530	95,4	Καλή	31
	Aurora FV1-12-S-OUTD-FS	DSP Inverter = B052	13,0	360 - 750	95,4	Καλή	24
Refusol GmbH	Refusol 11K <sup>1</sup>	RFP, S02R011-22-14-S	11,0	380 - 900	96,9	Πολύ καλή	10
	Refusol 13K	RFP, S02R013-20-18-S	12,7	420 - 850	97,3	Πολύ καλή	4
	Refusol 17K	RFP, S02R017-20-18-S	16,8	480 - 950	97,4	Πολύ καλή	2
Riello UPS GmbH	HP 4005REL <sup>3</sup>	k.A.	4,0	255 - 435	91,7	Κακή	74
Samil Power Co. Ltd.	SolarRiver SR4K4TLA 1	1.00	4,2	200 - 500	96,6	Πολύ καλή	21
Shanghai Chint Power Systems Co., Ltd	CPG SC20KTL-O	9.0030.00 07.50	20,8	500 - 900	97,1	Πολύ καλή	7
Siemens AG	Sitop solar 1300 Master <sup>h</sup>	k.A.	1,1	200 - 553	90,2	Κακή	77
	Sinvert PVM20	28	19,6	480 - 850	97,5	Πολύ καλή	1
	Sinvert PVM10	26	10,2	390 - 350	97,0	Πολύ καλή	9
	Sinvert PVM13	26	12,6	420 - 850	97,3	Πολύ καλή	4
	Sinvert PVM17	26	16,8	480 - 950	97,4	Πολύ καλή	2
	Sunny Boy SB 1100	2.60	1,1	130 - 320	89,1	Κακή	79
Sunny Boy SB 2100TL	1.70/1.70	2,0	200 - 490	93,7	Ικανοποιητική	56	
Sunny Boy SB 3800	2.05/2.05	4,0	208 - 395	93,2	Επαρκής	61	
Sunny Boy SB 5000TL-25	1.60.00	4,8	175 - 440	95,7	Καλή	28	
SMA Solar Technology AG	Sunny Mini CentralGMC 7500TL	3.12/3.12	7,2	333 - 500	96,0	Πολύ καλή	19
	Sunny Mini Central GMC 7500HV	1.65/1.65	7,4	335 - 550	93,9	Ικανοποιητική	50
	Sunny Mini Central GMC 8000TL	2.87/2.87	8,3	335 - 487	96,9	Πολύ καλή	10
	Sunny Tripower STP 10000TL-10	EW 02.22.18R	10,2	320 - 800	97,1	Πολύ καλή	7
	Sunny Mini Central GMC 11000TL-10	1.12/1.12	11,4	333 - 500	96,9	Πολύ καλή	10
	Sunny Tripower STP 17000TL-10	02.06.00	17,4	400 - 800	97,3	Πολύ καλή	4
	Solarmax 2000C	12.4	2,0	195 - 515	93,8	Ικανοποιητική	53
	Solarmax 6000S	1.6.2255	4,8	220 - 550	94,3	Ικανοποιητική	41
	Solarmax 13KIT	1.0.7325	13,2	280 - 750	96,8	Πολύ καλή	14
	Solaxagrid 6000 3ph II	V3009_03_00	9,6	280 - 680	92,8	Ικανοποιητική	53
Sungrow Power Supply Co. Ltd.	S33KTL	DSP, S03KTL-V14, LCD, S03KTL-V15-B.M	3,0	180 - 420	94,6	Ικανοποιητική	37
	S33KTL	k.A.	3,0	180 - 420	93,7	Ικανοποιητική	59
	S34KTL	k.A.	4,0	210 - 420	95,0	Καλή	30
Sunny Swiss SA	SSP-9000	k.A.	9,2	250 - 490	96,8	Κακή	82
Sunways AG	NT 2000 (oberer V-Bereich) <sup>h</sup>	k.A.	2,6	475 - 749	92,3	Επαρκής	68
	NT 2500 (unterer V-Bereich) <sup>h</sup>	k.A.	2,6	350 - 623	93,8	Ικανοποιητική	53
	AT 2700	k.A.	2,8	181 - 600	94,3	Ικανοποιητική	41
Kantrex Technology SL (excl Schneider Electric Industries)	NT 4200	k.A.	4,4	340 - 750	96,7	Πολύ καλή	16
	AT 4500	k.A.	4,7	250 - 600	94,6	Ικανοποιητική	36
	Kantrex QT 5.0-3P	3.03	5,0	240 - 550	94,1	Ικανοποιητική	44

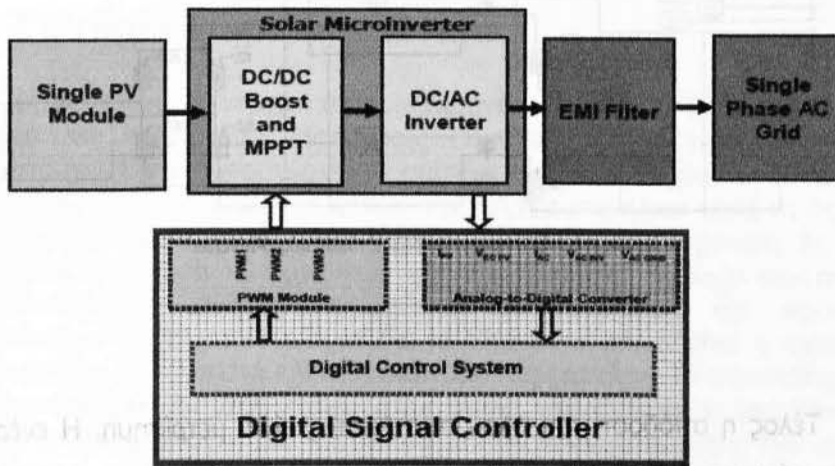
Πίνακας 5.3.1 Σύγκριση 84 Φ/Β Μετατροπέων (Inverter)

(Πηγή : Sunblog.gr)

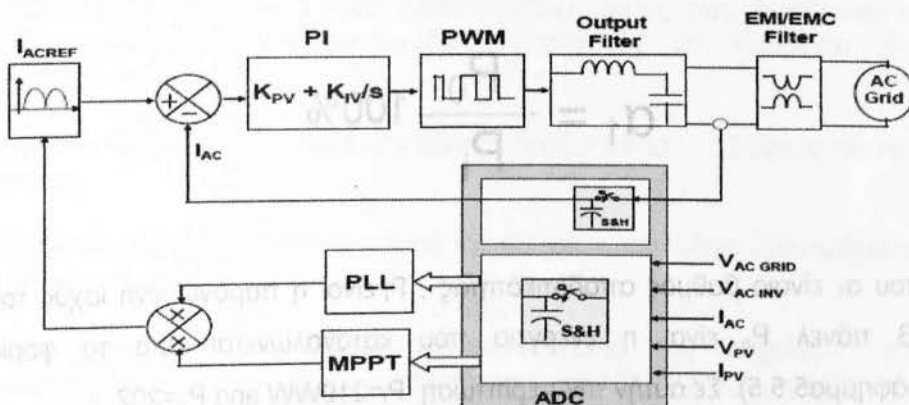


### 5.4 Σχέδιασμός Φ/Β μετατροπέα τύπου micro-inverter

Όταν γίνεται χρήση μετατροπέα τύπου micro-inverter τότε το κάθε Φ/Β πάνελ έχει τον δικό του. Μπορεί να υποστηρίξει Φ/Β πάνελ μέγιστης ισχύος 220 W με 36 Volt μέγιστη τάση και 10 A μέγιστο ρεύμα. Η τάση εξόδου του μετατροπέα κειμένεται απο 180 VAC μέχρι 264 VAC (RMS) και συχνότητα απο 45 Hz μέχρι 55 Hz. Συνδέεται με το δίκτυο και παρέχει ημιτοννοειδές ισχύστο δίκτυο. Το ρεύμα και η τάση εξόδου πρέπει να είναι αμιγός ημιτοννοειδές με χαμηλό συντελεστή παραμόρφωσης (TotalHarmonicDistortion – THD). Στην εικόνα 5.4.1φαινεται το μπλόκ διάγραμμα του μετατροπέα τύπου micro-inverterο οποίος ποτελείται από το Φ/Β πάνελ, τον μετατροπέα τύπου micro-inverter, φίλτρο ηλεκτομαγνητικής παρεμβολής (ElectromagneticInterference – EMI) και την μια φάση του δικτύου. Ο μετατροπέας έχει δύο υποσυστήματα τον DC/DC μετατροπέα για την ανίχνευση της μέγιστης ισχύος (MPPT) και DC/AC μετατροπέα ο οποίος πρέπει να είναι συγχρονισμένος με το ηλεκτρικό δίκτυο.



Μπλόκ-Διάγραμμα 5.4.1 Μπλόκ Διάγραμμα Μετατροπέα τύπου micro-inverter



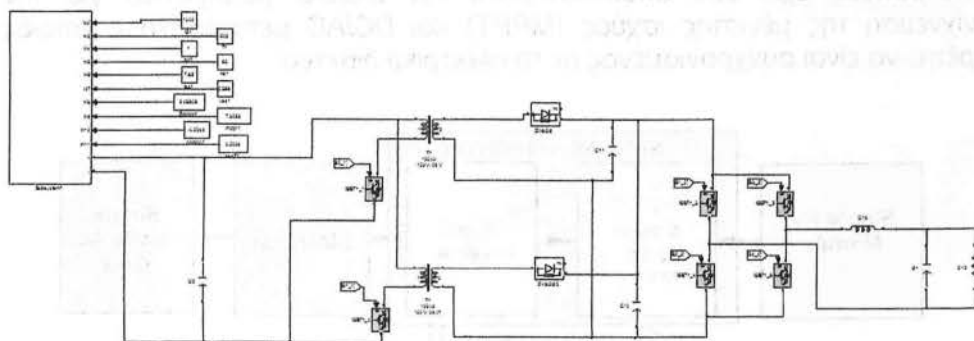
Σχέδιο 5.4.2 Μπλόκ Διάγραμμα Ελέγχου μικρο-μετατροπέα (micro-inverter) [14]





## 5.5 Εξομοίωση Φ/Β μετατροπέα τύπου micro-inverter

Το σύστημα του μετατροπέα τύπου micro-inverter αποτελείται από πηγή 60 Φ/Β κυττάρων συνδεδεμένα στην σειρά τα οποία αντιστοιχούν σε Φ/Β πάνελ ισχύος 220 W, ένα interleaved flyback converter για την ανύψωση της εναλλασσόμενης DC τάσης, ένας full bridge inverter για την μετατροπή της DC σε AC συνεχή τάση, και ένα φίλτρο για την βελτίωση της ενεργειακής ποιότητας (Σχέδιο 5.5.1). Ο έλεγχος του συστήματος πραγματοποιείται αλλάζοντας τον duty-cycle του Interleaved Flyback Converter και το συντελεστή διαμόρφωσης της γεννήτριας **PWM** η οποία παράγει τους παλμούς προκειμένου να οδηγήσει το IGBTs του full bridge inverter.

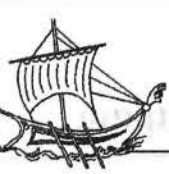


Σχέδιο 5.5.1 Σύστημα μετατροπέα τύπου micro-inverter

Τέλος η απόδοση του όλου συστήματος είναι μετρίσιμη. Η ενέργεια που παράγεται από το Φ/Β είναι υπολογίσιμη όπως επίσης και η ενέργεια που καταναλώνεται από την αντίσταση. Ο βαθμός αποδοτικότητας υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$\alpha_1 = \frac{P_o}{P_i} 100\%$$

Όπου  $\alpha_1$  είναι ο βαθμός αποδοτικότητας,  $P_i$  είναι η παραγόμενη ισχύς του Φ/Β πάνελ  $P_o$  είναι η ενέργεια που καταναλώνεται από το φορτίο (γράφημα 5.5.5). Σε αυτήν την περίπτωση  $P_i=219\text{W}$  and  $P_o=202$ .



$$\alpha_1 = \frac{202 \text{ W}}{219 \text{ W}} 100\% = 92,2 \%$$

Η αποτελεσματικότητα του συστήματος δεν είναι τόσο υψηλή. Οι απώλειες φτάνουν σε ποσοστό το 7,8 % και αυτό ωφείλεται στην χρήση δύο μετασχηματιστών στην εφαρμογή πράγμα που αυξάνει τις απώλειες του συστήματος λόγο θερμότητας στην καλωδίωση-περιελίξεις και στον πυρήνα. [15]

## 6.1 Σύστημα Στήριξης Φ/Β Πάνελ

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα είναι συνάρτηση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνειά του. Είναι προφανές ότι σε συστήματα που δεν έχουν τη δυνατότητα μετακίνησης ώστε να παρακολουθούν την πορεία του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας και του χρόνου, η απόδοση δεν είναι η βέλτιστη δυνατή. Σε τέτοια συστήματα, η αύξηση των αναγκών της εγκατάστασης σε ισχύ συνεπάγεται υποχρεωτικά την αύξηση της ωφέλιμης επιφάνειας με την προσθήκη περισσότερων πάνελ στο σύστημα. Για το λόγο αυτό, επινοήθηκε η τεχνολογία του ηλιοστάτη, ή εντοπιστή ηλιακής ακτινοβολίας (*tracker*). Ο ηλιοστάτης είναι μια μηχανολογική διάταξη, πάνω στην οποία τοποθετείται η φωτοβολταϊκή γεννήτρια, ώστε το σύστημα να μπορεί να περιστρέφεται μέσω των ειδικών εξαρτημάτων και του λογισμικού που διαθέτει. Με τον τρόπο αυτό γίνεται η καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, ενώ εξοικονομείται χρήμα: σε σχέση με την αγορά επιπλέον φωτοβολταϊκών πάνελ, η αγορά ενός ηλιοστάτη είναι στις περισσότερες περιπτώσεις η συμφέρουσα λύση. Ο ηλιοστάτης έχει σχεδιαστεί με τρόπο ώστε να αντέχει σε υψηλές ταχύτητες ανέμου. Τέλος, εκτός από τους ηλιοστάτες/εντοπιστές που διατίθενται στο εμπόριο, υπάρχουν και αυτοσχέδιες κατασκευές με παρόμοια αρχή λειτουργίας.

Τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) πάνελ συνήθως εδράζονται επί εδάφους με δύο τρόπους:

1. Σε βάσεις σταθερής κλίσης ως προς την οριζόντιο, συνήθως αναφερόμενες ως «σταθερές βάσεις»
2. Σε βάσεις επί διατάξεων παρακολούθησης της πορείας του ήλιου, αναφερόμενες συνήθως ως συστήματα ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου, ή ηλιοπαρακολουθητές ή τράκερς (*trackers*).



Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά

## 6.2 Σταθερές Βάσεις

Οι σταθερές βάσεις αποτελούν τον απλούστερο και οικονομικότερο τρόπο έδρασης Φ/Β πάνελ. Η αρχή σχεδιασμού τους είναι απλή: οι ακτίνες του ήλιου θα πρέπει να προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια των πάνελ κατά το μεσημέρι. Έτσι οι βάσεις κατασκευάζονται ώστε να επιτρέπουν την τοποθέτηση των πάνελ σε σταθερή κλίση, περί τις 30 μοίρες. Η κλίση αυτή θεωρείται ως μία 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.

Οι σταθερές βάσεις κατασκευάζονται συνήθως από αλουμίνιο ή ανοξείδωτο χάλυβα (χάλυβα γαλβανισμένο εν θερμώ). Συνήθως κατασκευάζονται μετά από τεχνική μελέτη ώστε να διαπιστωθεί η στατική τους επάρκεια και η αντοχή τους σε ανεμοπνέσεις ή φορτία χιονιού.

Οι βάσεις τοποθετούνται επί του εδάφους είτε με σκυροδέτηση είτε απευθείας με εδαφόμεληξη. Η σκυροδέτηση των βάσεων γίνεται συνήθως σε δοκάρι (δηλαδή σε όλη τη σειρά των βάσεων) από οπλισμένο σκυρόδεμα, είτε σε πέλαμα από σκυρόδεμα, τοποθετημένα κατάλληλα ώστε να επιτρέπουν το βίδωμα των υποδοχών των βάσεων. Η εδαφόμεληξη γίνεται συνήθως σε βάθη τυπικά του 0,5-1,5 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 εδαφόμεληξη. Ωστόσο, συστήνεται να διενεργείται αυτοψία και γεωτεχνική μελέτη για να διαπιστωθεί κατά πόσο ο τύπος του εδάφους επιτρέπει την εδαφόμεληξη χωρίς να δημιουργούνται θέματα στατικής επάρκειας των βάσεων.

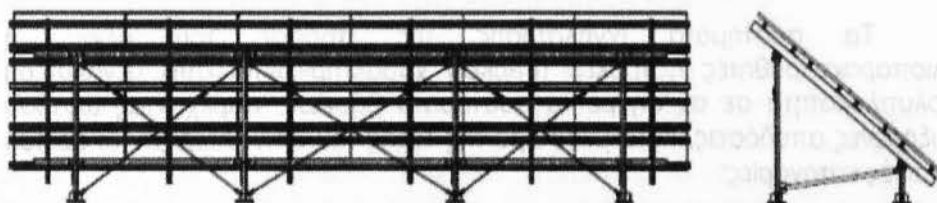
Επιπλέον, ο μελετητής μηχανικός θα πρέπει να είναι προσεκτικός στη χρήση παρελκόμενων υλικών όπως βίδες ή σύνδεσμοι Φ/Β πάνελ, καθώς θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την αποφυγή οξειδώσεων ή ηλεκτρόλυσης. Θα πρέπει επίσης να λαμβάνεται μέριμνα για τη δυνατότητα όδευσης καλωδίων καθώς και για τη στήριξη 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 x 1 μέτρο 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

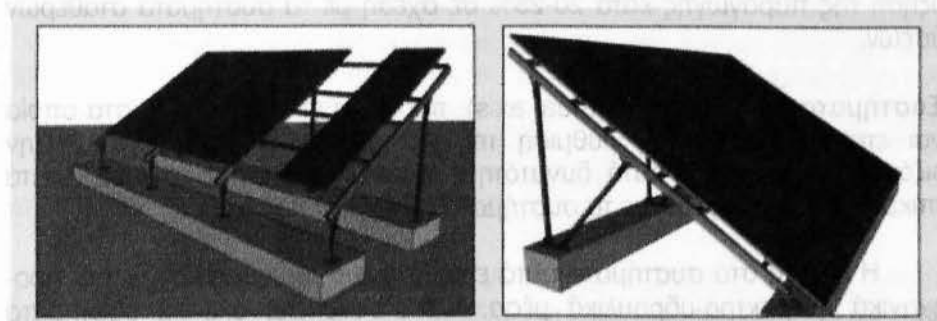


διάσταση (landscape). Η ακριβής χωροθέτηση εξαρτάται από τη μορφολογία του διαθέσιμου χώρου εγκατάστασης και τις διαστάσεις αυτού.

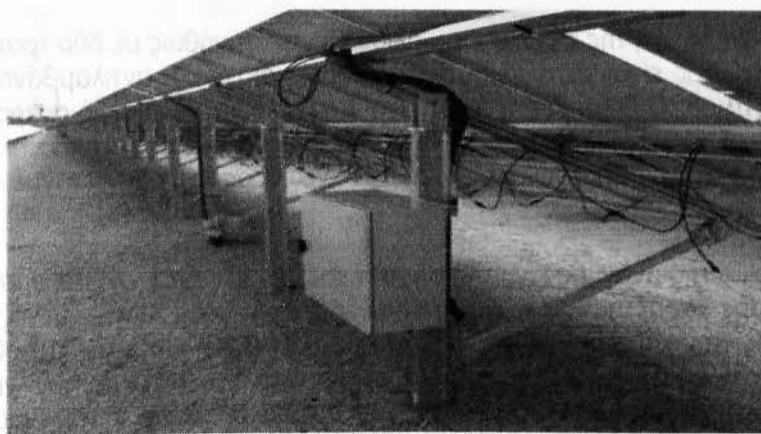
Οι επόμενες φωτογραφίες παρουσιάζουν ενδεικτικά κάποιες σταθερές



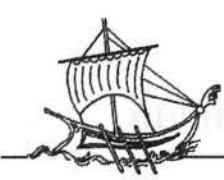
Εικόνα 6.2.1 Τυπική Σταθερή Βάση Στήριξης



Εικόνα 6.2.2 Σκυροδέτηση σταθερών Βάσεων



Εικόνα 6.2.3 Παράδειγμα Εδαφόμπτυξης βάση



## 6.3 Σύστημα Ηλιακού Ιχνηλάτη (tracker)

Η ιχνηλάτηση της πορείας του ήλιου αποτελεί μία τεχνική η οποία στοχεύει στην μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της προσπάθειας κίνησης των βάσεων των πάνελ κατά τη διάρκεια της ημέρας ώστε να επιτυγχάνεται συνεχώς η κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Τα συστήματα ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου, ή ηλιοπαρακολουθητές ή τράκερ (tracker) χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη πολυπλοκότητα σε σχέση με τα συστήματα βάσεων, παρέχοντας ωστόσο αυξημένες αποδόσεις, κατά μέσο όρο της τάξης του 30%. Χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- **Συστήματα μονού άξονα (single axis):** πρόκειται για συστήματα στα οποία λαμβάνει χώρα κίνηση των πάνελ σε έναν άξονα, αυτόν της Ανατολής-Δύσης κατά τη διάρκεια μίας μέρας. Τυπικά, τα συστήματα αυτά επιτυγχάνουν αύξηση της παραγωγής κατά 20-25% σε σχέση με τα συστήματα σταθερών βάσεων.

- **Συστήματα διπλού άξονα (dual axis):** πρόκειται για συστήματα στα οποία είναι επιπλέον δυνατή η ρύθμιση της κλίσης των πάνελ ως προς την οριζόντιο. Η επιπλέον αυτή δυνατότητα παρέχει αυξημένη απόδοση κατά τυπικά 25-40% σε σχέση με τα συστήματα σταθερών βάσεων.

Η κίνηση στα συστήματα αυτά επιτυγχάνεται με συνήθως με ηλεκτρομηχανικά ή ηλεκτρο-υδραυλικά μέσα. Κατά συνέπεια, όλα τα συστήματα ιχνηλάτησης χαρακτηρίζονται από ιδιοκαταναλώσεις, οι οποίες είναι μικρές καθώς η κίνηση δεν είναι συνεχής αλλά περιοδική, τυπικά μία κίνηση ανά 10 λεπτά. Ωστόσο, είναι σκόπιμο η ενέργεια αυτή να προέρχεται από το δίκτυο της ΔΕΗ και όχι από τα Φ/Β πάνελ λόγω της διαφοράς τιμής.

Η ανίχνευση της πορείας του ήλιου γίνεται συνήθως με δύο τρόπους: ο πρώτος τρόπος είναι με ηλιακούς αισθητήρες, οι οποίοι αντιλαμβάνονται τη θέση του ήλιου. Ο δεύτερος τρόπος είναι μέσω λογισμικού, από αστρονομικά δεδομένα, βάσει των οποίων υπολογίζεται η θέση και πορεία του ήλιου για κάθε μέρα του έτους, ανάλογα με τις γεωγραφικές συντεταγμένες της περιοχής.

Λόγω της ανάγκης κίνησης σημαντικού αριθμού πάνελ, τα συστήματα ιχνηλάτησης χαρακτηρίζονται από επίπεδες επιφάνειες τοποθετημένες σε μία κάθετη ως προς το έδαφος βάση στήριξης. Στη βάση στήριξης τοποθετείται συνήθως και ο αντιστροφέας (inverter) ή αν αυτό δεν είναι δυνατόν, γίνεται η αναχώρηση καλωδίων προς ένα κεντρικό σημείο συλλογής όπου βρίσκονται και οι αντιστροφεείς.

Το γεγονός αυτό οδηγεί σε κατασκευές σημαντικού ύψους το οποίο κυμαίνεται από 2,5 έως 10-12 μέτρα, αναλόγως της κατασκευής. Το ύψος της κατασκευής συνήθως αυξάνει με την αύξηση της επιφάνειας των πάνελ.





Σήμερα συστήματα ιχνηλάτησης κατασκευάζονται για να φέρουν ισχύ πάνελ που κυμαίνεται από 2-3kWp έως περίπου 33kWp.

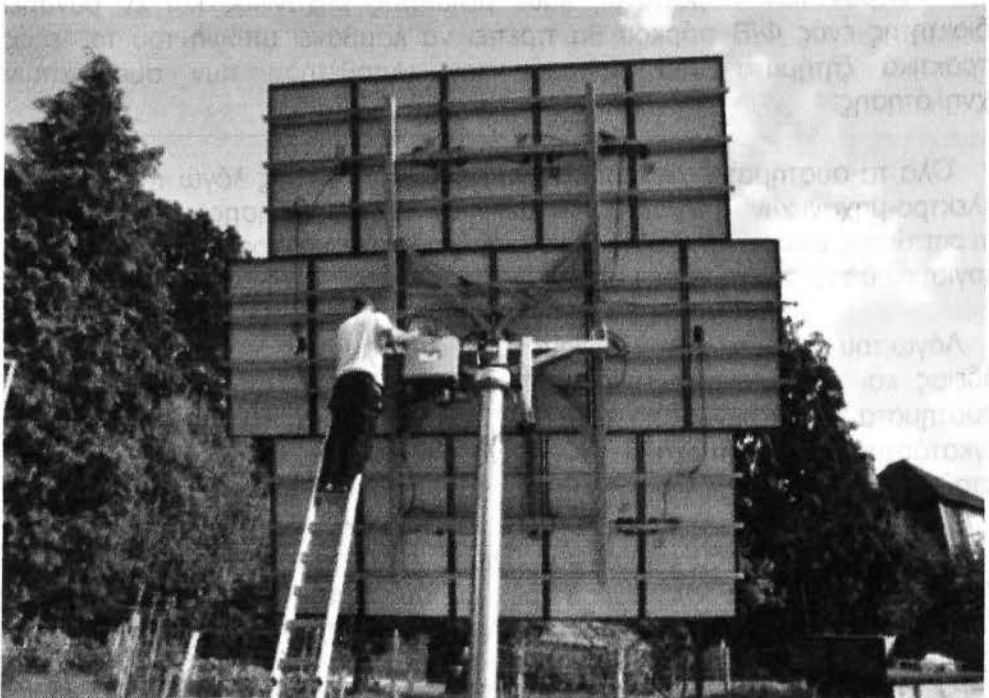
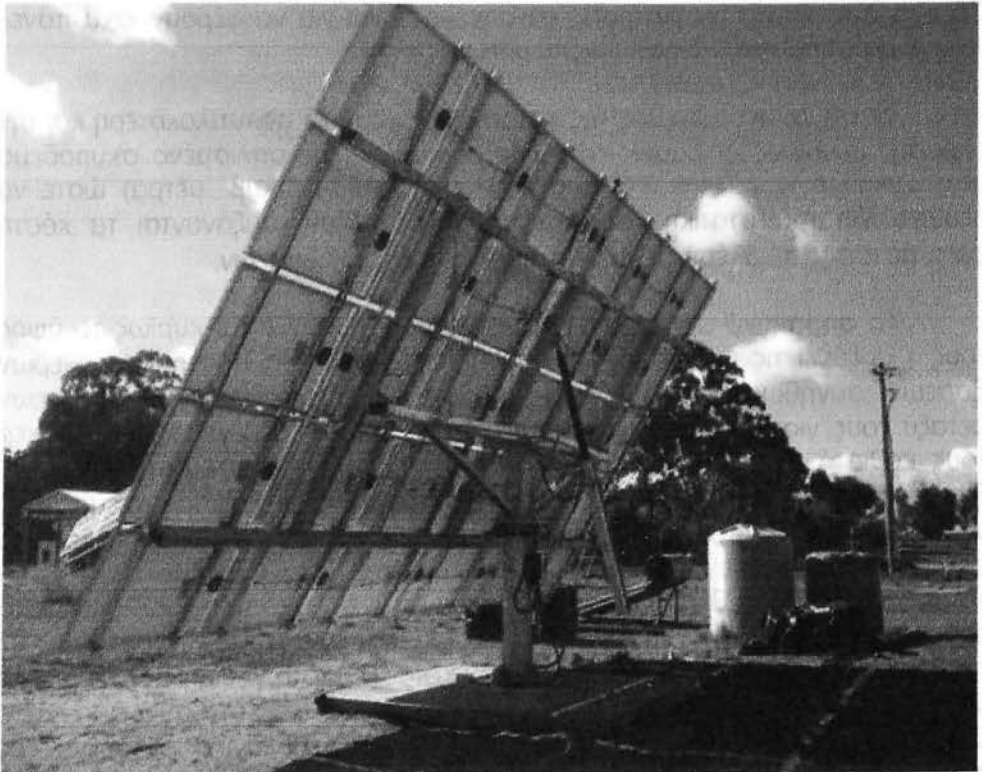
Το σημαντικό μέγεθος της κατασκευής καθιστά πολυπλοκότερη και την έδραση. Συνήθως οι βάσεις στήριξης εδράζονται σε οπλισμένο σκυρόδεμα σημαντικού όγκου (από 2-3 έως και περίπου 20-30 κυβ. μέτρα) ώστε να εξασφαλίζεται η στατική τους επάρκεια. Επιπλέον, αυξάνονται τα κόστη εγκατάστασης σε σχέση με τα συστήματα σταθερών βάσεων.

Το σημαντικό μέγεθος των συστημάτων αυτών ( και κυρίως το ύψος τους ) αυξάνει τις απαιτήσεις χώρου σε σχέση με ένα σύστημα σταθερών βάσεων, συνήθως κατά 1,5-2 φορές, λόγω των μεγαλύτερων αποστάσεων μεταξύ τους για την αποφυγή σκιάσεων. Επιπλέον, το μέγεθος των τράκερ τους καθιστά περισσότερο ευάλωτους (σε σχέση με συστήματα σταθερών βάσεων) σε ανεμοπιέσεις. Η συνηθέστερη τεχνική που χρησιμοποιείται είναι να χρησιμοποιείται ένα ανεμόμετρο και όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει ένα όριο για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, το σύστημα κίνησης να λαμβάνει εντολή να θέτει την επιφάνεια των πάνελ σχεδόν παράλληλα με το έδαφος, μία διαδικασία γνωστή ως «οριζόντιωση», για λόγους προστασίας. Η ταχύτητα αυτή κυμαίνεται ανάλογα με τον κατασκευαστή, αλλά μπορεί να είναι και χαμηλή και να αντιστοιχεί σε άνεμο έντασης 5-6 Bf. Κατά συνέπεια, κάθε μελετητής μηχανικός θα πρέπει να εκτιμά τα ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής εγκατάστασης προτού προχωρήσει στην επιλογή ενός συγκεκριμένου τύπου τέτοιου συστήματος.

Πέραν των παραπάνω, κάθε μελετητής μηχανικός και εν δυνάμει ιδιοκτήτης ενός Φ/Β πάρκου θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του τα εξής πρακτικά ζητήματα που αφορούν την τοποθέτηση των συστημάτων ιχνηλάτησης:

- Όλα τα συστήματα ιχνηλάτησης χρήζουν συντήρησης λόγω της ύπαρξης ηλεκτρο-μηχανικών ή ηλεκτρο-υδραυλικών μέσων κίνησης. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να καταστεί απαραίτητος ο επανα-προγραμματισμός του λογισμικού του συστήματος κίνησης, λόγω απώλειας δεδομένων.
- Λόγω του σημαντικού τους ύψους, είναι απαραίτητη η έκδοση οικοδομικής άδειας και όχι έγκρισης εργασιών μικρής κλίμακας, όπως ισχύει για τα συστήματα σταθερών βάσεων. Το γεγονός αυτό αυξάνει το κόστος εγκατάστασης και επηρεάζει τον χρόνο υλοποίησης της κατασκευής του σταθμού.
- Επιπλέον λόγω του σημαντικού ύψους, η εκτέλεση διάφορων εργασιών γίνεται δυσκολότερη σε σχέση με τα συστήματα σταθερών βάσεων. Παραδείγματα τέτοιων εργασιών αποτελούν η αντικατάσταση ενός πάνελ που έχει υποστεί φθορά ή ο καθαρισμός των πάνελ.

Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες διατάξεις ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου. [14]

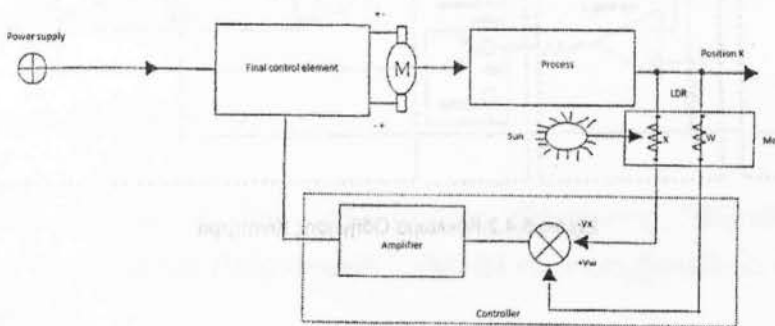


Εικόνα 6.3.1 Συστήματα Ιχνηλάτησης – Παρακολούθησης (Tracker)



## 6.4 Ανάλυση Συστήματος Ιχνηλάτησης – Παρακολούθησης (Tracker)

Ο προσανατολισμός του Φ/Β πάνελ ορίζεται απο την γωνιάς μεταξύ της επιφάνειας του Φ/Β πάνελ και της επιφάνειας της γης και την αζιμούθια γωνία η οποία σχηματίζεται μεταξύ της κάθετης προβολής του Φ/Β πάνελ και του τοπικού μεσημβρινού (Βορά Νότου) Η επιφάνεια των φωτοβολταϊκών μονάδων πρέπει να προσανατολίζονται προς τον ήλιο με τη βοήθεια ενός αυτοματοποιημένου συστήματος ελέγχου που διάγραμμα του απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα



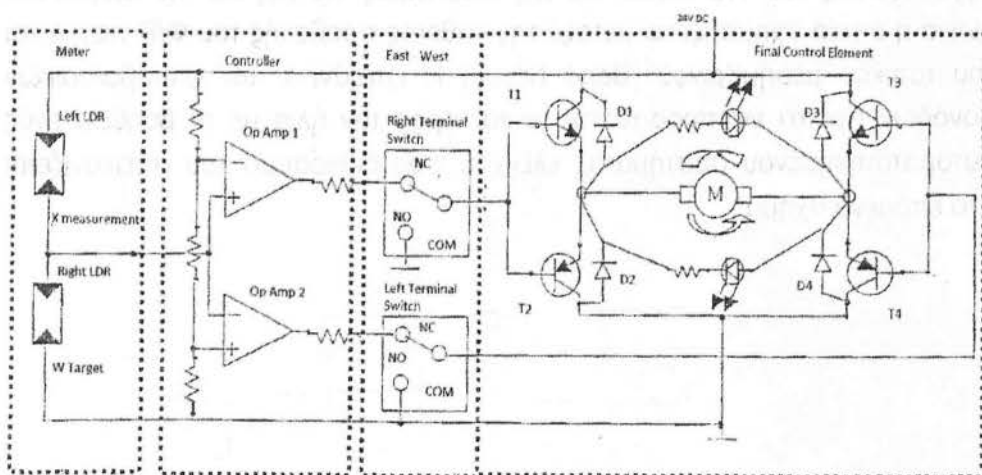
Σχέδιο 6.4.1 Μπλόκ Διάγραμμα Αυτόματου Συστήματος Ιχνηλάτησης – Παρακολούθησης

Αποτελείται από τέσσερα κύρια τμήματα που συνεργάζονται με έναν τρόπο που επιτρέπει στο μοντέλο να είναι ένα σύστημα κλειστού βρόχου με ανάδραση. Αυτά τα μέρη είναι, η διαδικασία, ο μετρητής, ο ελεγκτής και το τελικό στοιχείο ελέγχου. Η λειτουργία του συστήματος οδηγεί στον έλεγχο της γωνιάς του άξονα ο οποίος περιστρέφεται από την ανατολή στη δύση μέχρι το ηλιοβασίλεμα. Ένα ίδιο σύστημα χρησιμοποιείται για την αλλαγή της γωνιάς μεταξύ του Φ/Β πάνελ και την επιφάνεια της γης, έτσι ώστε η ομάδα να ακολουθήσει τον ήλιο καθ' ύψος. [17]

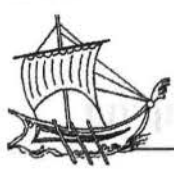
Το κύκλωμα οδήγησης του κινητήρα εμφανίζεται στο σχεδιάγραμμα που ακολουθεί. Είναι ένας DC κινητήρας με ονομαστική ισχύ 0,2 kW και ονομαστικής τάσης των 24V DC. Δύο αντιστάσεις (TwoLight Dependent Resistors LDRs) χρησιμοποιούνται. Κανονικά, η αντίσταση του LDR ένα είναι 1000 KΩ, αλλά όταν φωτίζεται με το φως πέφτει η αντίσταση στα 10Ω. Όταν οι δύο LDR λάβουν το ίδιο φωτισμό ο στόχος W και το X της μέτρησης είναι ίσες. Η διαφορά μεταξύ τους είναι μηδέν και οι δύο ενισχυτές (op-amps) του κυκλώματος έχουν μηδενική έξοδο. Αυτό ισούται με μηδέν τάση στον κινητήρα και το σύστημα είναι αδρανές. Όταν ο ήλιος αλλάζει θέση, τότε ο φωτισμός των αισθητήρων είναι διαφορετικός και λόγω αυτό η έξοδος



το ενός απο τους δυο ενισχυτές τείνει σε σημείο κερεσμού. Η γέφυρα θα παράγει την κατάλληλη πολικότητα της τάσης στον κινητήρα, έτσι ώστε ο κινητήρας να αλλάξετε τη θέση του πίνακα και το σύστημα να τεθεί σε κατάσταση αδράνειας.



Σχέδιο 6.4.2 Κύκλωμα Οδήγησης Κινητήρα



## 7.1 Τεχνο-οικονομική Ανάλυση Φωτοβολταϊκού Πάρκου 200 KW με χρήση micro-inverter.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει τεχνο-οικονομική ανάλυση φωτοβολταϊκού πάρκου ισχύος 200 KW με χρήση micro-inverter το οποίο βρήσκατε στο Νομό Αχαΐας. Θα εξεταστούν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις :

- Χωρίς Tracker
- Με μονού κάθετου άξονα
- Με διπλού κάθετου άξονα

Θα γίνει χρήση του προγράμματος εξομοίωσης “Φωτοβολταϊκό Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών” (PVGIS) το οποίο διατίθεται δωρεάν στο διαδίκτιο.

Το Φωτοβολταϊκό Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (PVGIS) του Ινστιτούτου Ενέργειας και Μεταφορών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής αποτελεί μια βάση δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας και άλλων κλιματικών δεδομένων για την Ευρώπη και την Αφρική. Με τη χρήση διαδραστικών χαρτών καταχωρώντας τις γεωγραφικές συντεταγμένες ενός φωτοβολταϊκού πάρκου είναι δυνατό να υπολογιστεί η απόδοσή του. Η ιστοσελίδα περιλαμβάνει ακόμα εικόνες κινούμενων γραφικών που απεικονίζουν διάφορα κλιματολογικά στοιχεία κατά τη διάρκεια του έτους. Το Φωτοβολταϊκό Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (PVGIS) αποτελεί μέρος του προγράμματος SOLAREC.[19]

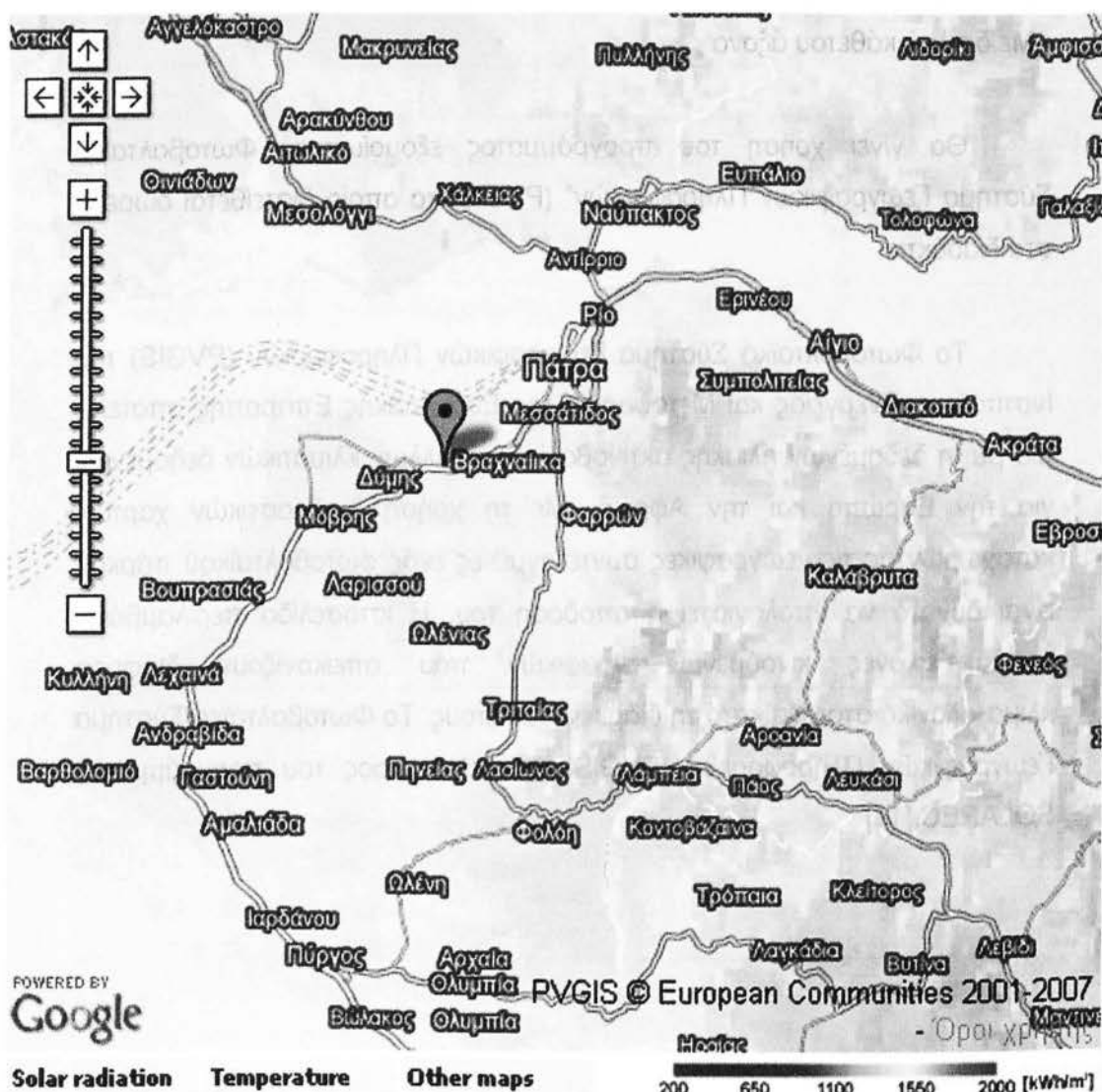




## 7.2 Χωρίς Tracker

Η θέση την οποία επιλέξαμε για να κάνουμε την εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού πάρκου βρήκεται στον Νομό Αχαΐας θεωρώντας ότι το οικόπεδο που θα γίνει η εγκατάσταση είναι πεδινό, σε απόσταση ασφαλείας απο την θάλασσα και αρκετά μεγάλο σε επιφάνεια, με συντεταγμένες (εικόνα 7.2.1) :

8 38° 8' 43" Βόρεια , 21° 35' 7" Ανατολικά



Εικόνα 7.2.1 PVGIS χάρτης ηλιακής ακτινοβολίας Ευρώπης



Ο τύπος ηλιακών panel που επιλέξαμε είναι μονοκρυσταλικά. Η μέγιστη ομοαστική ισχύς που θα μπορεί να αποδώσει το πάρκο είναι 200 KW. Οι πιθανές απώλειες από την καλωδίωση αλλά και τους inverter υπολογίζεται στο 20% της συνολικής ισχύος. Η βελτιστοποίηση της κλήσης και του αζιμούθιου των panel θα γίνει αυτόματα από το πρόγραμμα.

### Performance of Grid-connected PV

Radiation database:  
 [What is this?]

PV technology:

Installed peak PV power  kWp

Estimated system losses [0;100]  
 %

**Fixed mounting options:**

Mounting position:

Slope [0;90]  °  Optimize slope  
(Azimuth angle from -180 to 180. East=-90, South=0)

Azimuth  °  Also optimize azimuth

**Tracking options:**

Vertical axis Slope [0;90]  °  Optimize

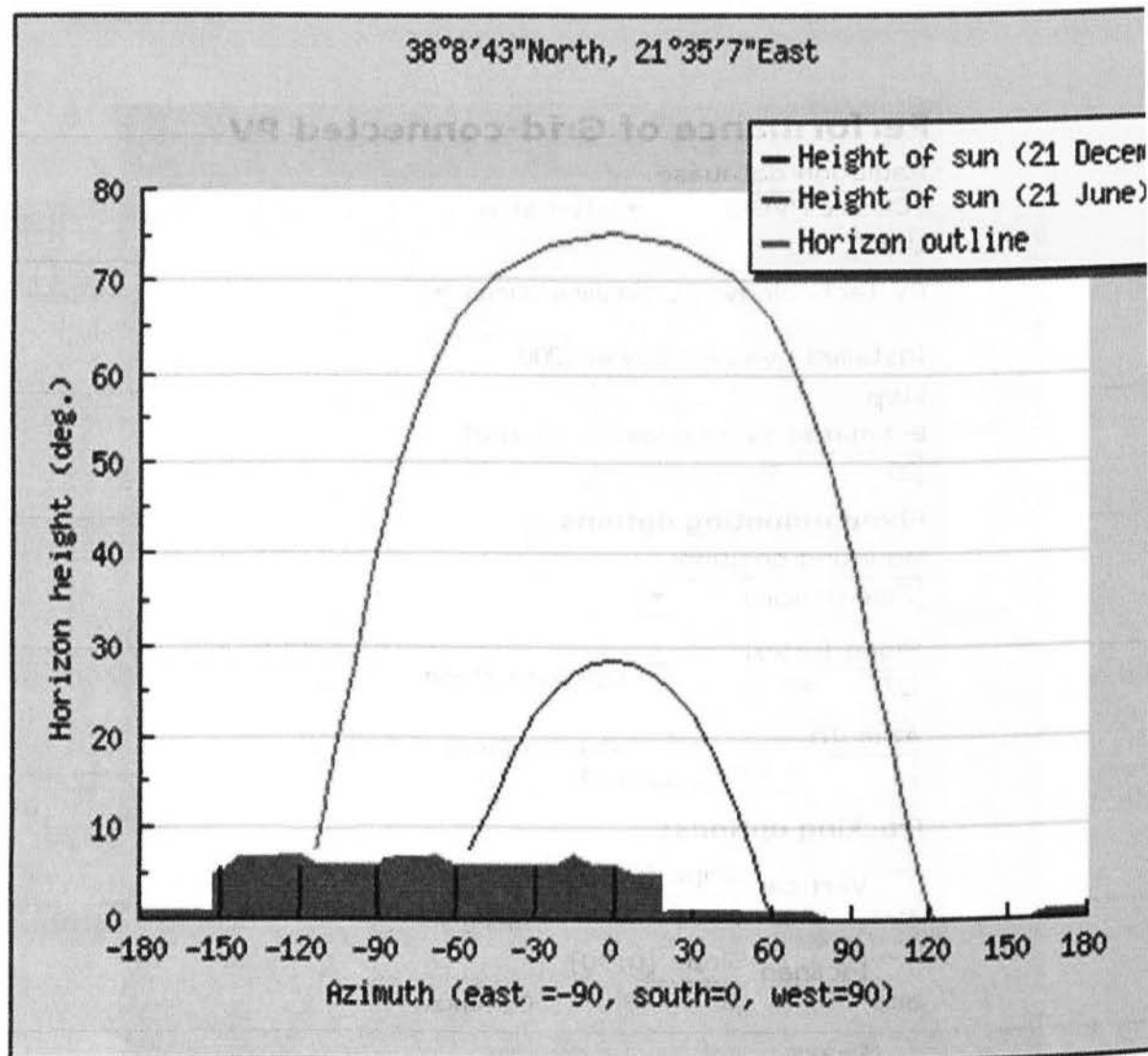
Inclined axis Slope [0;90]  °  Optimize

2-axis tracking

Εικόνα 7.2.1 PVGIS Παράθυρο Παραμέτρων



Η γραφική παράσταση για τον ορίζοντα φαίνεται στην εικόνα 7.3.1. Η κόκκινη γραμμή δείχνει την πορεία του ήλιου κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών όπως και την μέγιστη τιμή, και η μπλέ γραμμή μας δείχνει την πορεία κατά την διάρκεια των χειμερινών μηνών.



Εικόνα 7.2.1 Γραφική Παράσταση Ορίζοντα



Στον πίνακα 7.4.1 που ακολουθεί μπορούμε να δούμε :

$E_d$ : Μέσος όρος ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (kWh)

$E_m$ : Μέσος όρος μηνιαίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (kWh)

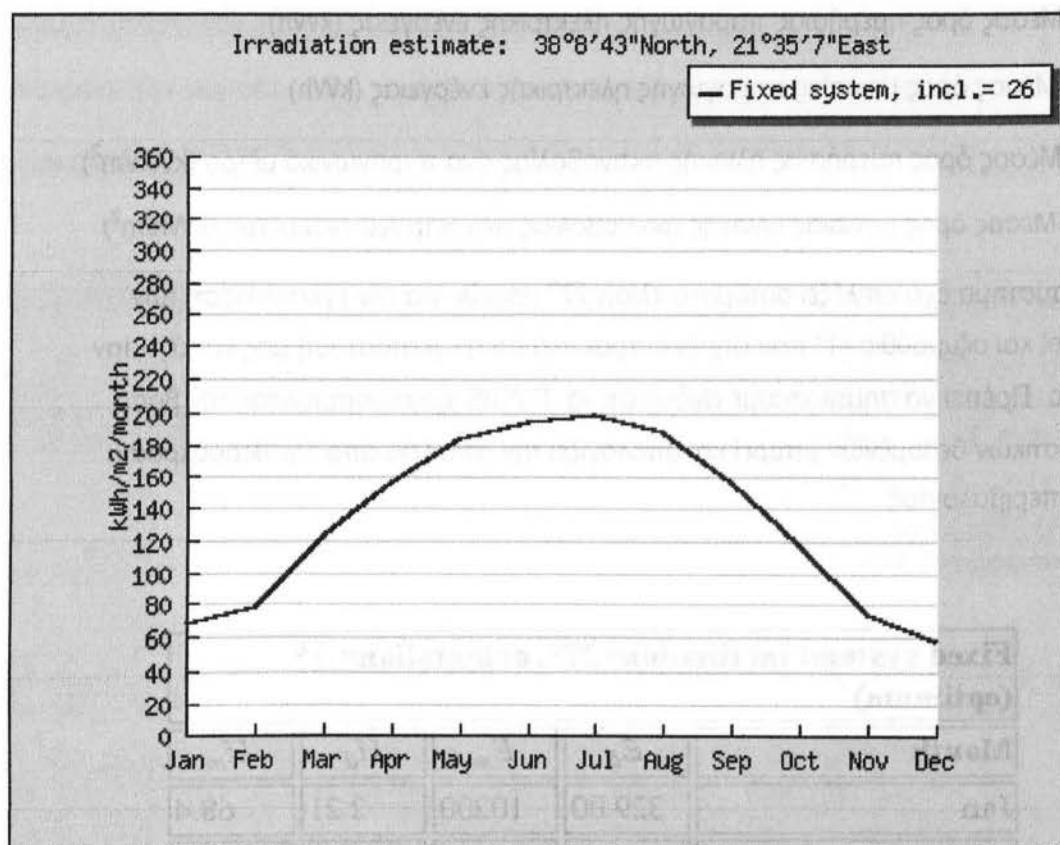
$H_d$ : Μέσος όρος ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας ανα τετραγωνικό μέτρο ( $kWh/m^2$ )

$H_m$ : Μέσος όρος μηνιαίας ηλιακής ακτινοβολίας ανα τετραγωνικό μέτρο ( $kWh/m^2$ )

Το σύστημα έχει επιλέξει αυτόματα κλίση  $27^\circ$  μοιρών για την εγκατάσταση των panel και αζιμούθιο  $-1^\circ$  που σημενεί πρακτικά ότι η εγκατάστασή μας κοιτάζει τον Νότο. Πρέπει να σημειώσουμε ακόμα ότι το PVGIS χρησιμοποιώντας την βάση κλιματικών δεδομένων μπορεί και υπολογίζει την απώλεια απο την θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

<b>Fixed system: inclination=<math>27^\circ</math>, orientation=<math>-1^\circ</math> (optimum)</b>				
<b>Month</b>	$E_d$	$E_m$	$H_d$	$H_m$
Jan	329.00	10200	2.21	68.4
Feb	410.00	11500	2.79	78.2
Mar	567.00	17600	3.94	122
Apr	732.00	21900	5.18	155
May	813.00	25200	5.92	184
Jun	876.00	26300	6.50	195
Jul	857.00	26600	6.41	199
Aug	813.00	25200	6.08	189
Sep	712.00	21400	5.20	156
Oct	528.00	16400	3.76	117
Nov	353.00	10600	2.44	73.2
Dec	277.00	8590	1.87	58.1
<b>Yearly average</b>	<b>606</b>	<b>18400</b>	<b>4.37</b>	<b>133</b>
<b>Total for year</b>		<b>221000</b>		<b>1590</b>

7.2.3 Πίνακας Μηνιαίας και Συνολικής Παραγωγής Ενέργειας



#### 7.2.4 Γραφική Παράσταση Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το φωτοβολταϊκό πάρκο θα έχει ονομαστική ισχύ 199 KW και αυτό ωφείλεται από την χαμηλή απόδοση των micro-inverters και θα αποτελείται από :

- 800 Φ/Β Πάνελ LG 250S1C 250 W,  $V_{oc}=37.1$  and  $I_{sc}=8.76$
- 800 Μικρο-Μετατροπείς (Micro-inverter) Enphase M215
- Σύστημα Τηλεμετρίας
- Σταθερές Βάσεις Αλουμινίου

Το κάθε Φ/Β πάνελ θα συνδεθεί με ένα μικρο-μετατροπέα και μέσω αυτού κατευθείαν στο ηλεκτρικό δίκτυο. Κάθε Φ/Β πάνελ έχει επιφάνεια 1.60 m<sup>2</sup>. Η συνολική επιφάνεια των Φ/Β που θα χρειαστούμε για το πάρκο είναι  $800 * 1.60 = 1.280 \text{ m}^2$ .





Πίνακας 7.2.5 Υλικών και Κόστους

Υλικά	Μονάδες	Τιμή / Τεμ. (€)	Σύνολο (€)
Φ/Β Πάνελ	800	307*	245.600
Μικρό-Μετατροπέας (micro-inverter)	800	150*	120.000
Σύστημα Τηλεμετρίας	1	600*	600
Βασεις Αλουμινίου	34	1176*	39984
<b>Συνολικό Κόστος</b>			<b>406184</b>

[\* Τιμές Καταλόγου]

Πρέπει ακόμα να υπολογίσουμε :

- Το κόστος για την μεταφορά των υλικών – **3.500€**,
- Κατασκευαστικό και Ηλεκτρολογικό κόστος – **25.000€**
- Τα τέλη σύνδεσης με το Ηλεκτρικό Δίκτυο – **17.000€**.
- Μετασηματιστή Χαμηλής – Μέσης Τάσης – **8.000 €**

Οπότε το τελικό κόστος ανέρχεται στα **459684€**.

Η παραγόμενη ισχύς και το κέρδος απο την προς πώληση ενέργεια για κάθε έτος και για διάρκεια 20 ετών φαίνονται στον πίνακα 7.2.6. Έχουμε υπολογίσει μείωση 0,9 % ανα έτος λόγο μείωσης της αποδοτικότητας των Φ/Β πάνελ.

Η τιμή πώλησης KWh είναι ορισμένη στα 0.271 €.



Πίνακας 7.2.6 Παραγώμενη Ισχύς και Κέρδος ανα έτος

Έτος	Παραγώμενη Ισχύς (MWh)	Κέρδος (€)
1	221.000,00	59.891,00 €
2	219.011,00	59.351,98 €
3	217.039,90	58.817,81 €
4	215.086,54	58.288,45 €
5	213.150,76	57.763,86 €
6	211.232,41	57.243,98 €
7	209.331,31	56.728,79 €
8	207.447,33	56.218,23 €
9	205.580,31	55.712,26 €
10	203.730,08	55.210,85 €
11	201.896,51	54.713,96 €
12	200.079,44	54.221,53 €
13	198.278,73	53.733,54 €
14	196.494,22	53.249,93 €
15	194.725,77	52.770,68 €
16	192.973,24	52.295,75 €
17	191.236,48	51.825,09 €
18	189.515,35	51.358,66 €
19	187.809,72	50.896,43 €
20	186.119,43	50.438,36 €
<b>Total</b>	<b>4.061.738,55</b>	<b>1.100.731,15 €</b>

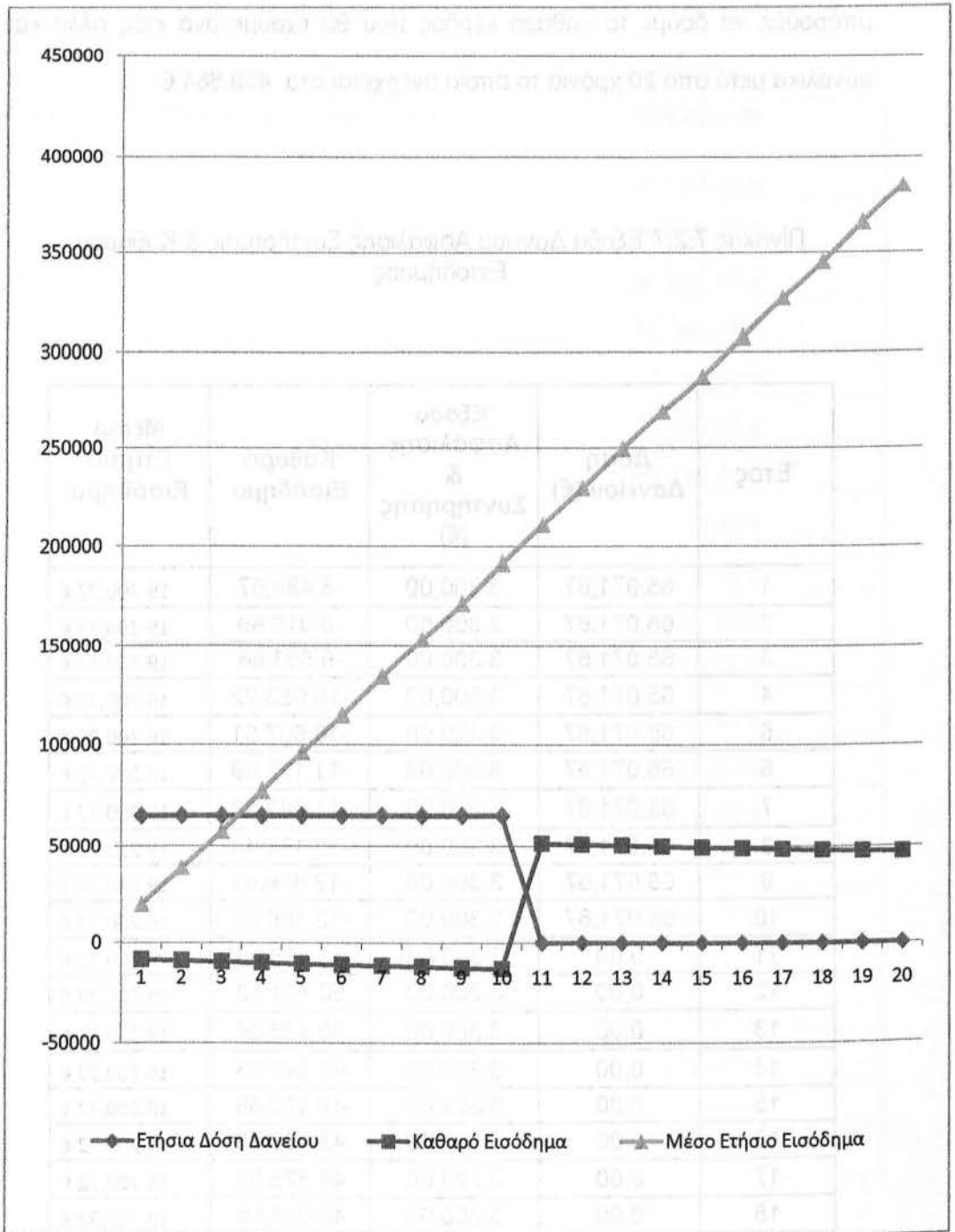
Η χρηματοδότηση για την κατασκευή του Φ/Β πάρκου θα γίνει μέσω τραπεζικού δανείου το και θα καλύψη το 100 % της αξίας αυτού με επιτόκιο 7,5% και περίοδο αποπληρωμής τα 10 χρόνια. Το κόστος ετήσιας αφάλισης και συντήρησης ανέρχεται στα **3.300 €**. Στον πίνακα 7.2.7 που ακολουθεί



μπορούμε να δούμε το καθαρό κέρδος που θα έχουμε ανα έτος αλλά και συνολικά μετά απο 20 χρόνια το οποίο ανέρχεται στα 459.684 €

Πίνακας 7.2.7 Έξοδα Δανείου Ασφάλισης Συντήρησης & Καθαρού Εισοδήματος

Έτος	Δόση Δανείου (€)	Έξοδα Ασφάλισης & Συντήρησης (€)	Καθαρό Εισόδημα	Μέσω Ετήσιο Εισόδημα
1	65.071,67	3.300,00	-8.480,67	19.200,72 €
2	65.071,67	3.300,00	-9.019,69	19.200,72 €
3	65.071,67	3.300,00	-9.553,86	19.200,72 €
4	65.071,67	3.300,00	-10.083,22	19.200,72 €
5	65.071,67	3.300,00	-10.607,81	19.200,72 €
6	65.071,67	3.300,00	-11.127,69	19.200,72 €
7	65.071,67	3.300,00	-11.642,88	19.200,72 €
8	65.071,67	3.300,00	-12.153,44	19.200,72 €
9	65.071,67	3.300,00	-12.659,41	19.200,72 €
10	65.071,67	3.300,00	-13.160,82	19.200,72 €
11	0,00	3.300,00	51.413,96	19.200,72 €
12	0,00	3.300,00	50.921,53	19.200,72 €
13	0,00	3.300,00	50.433,54	19.200,72 €
14	0,00	3.300,00	49.949,93	19.200,72 €
15	0,00	3.300,00	49.470,68	19.200,72 €
16	0,00	3.300,00	48.995,75	19.200,72 €
17	0,00	3.300,00	48.525,09	19.200,72 €
18	0,00	3.300,00	48.058,66	19.200,72 €
19	0,00	3.300,00	47.596,43	19.200,72 €
20	0,00	3.300,00	47.138,36	19.200,72 €
<b>Total</b>	<b>650.716,67</b>	<b>66.000,00</b>	<b>384.014,47</b>	<b>384.014,40 €</b>



Γράφημα 7.2.8 Δανείου & Καθαρού Εισοδήματος



## 7.3 Με μονού κάθετου άξονα

Η τομοθεσία του πάρκου μας παραμένει η ίδια με την προηγούμενη περίπτωση οπότε οι κλιματολογικές σ συνθήκες και ο ορίζοντας είναι οι ίδιοι. Η διαφορά είναι ότι σε αυτήν την μελέτη έχουμε εγκατάσταση με μονή κίνηση στον κάθετο άξονα.

**Performance of Grid-connected PV**

Radiation database:  
[Classic PVGIS] [What is this?]

PV technology: [Crystalline silicon]

Installed peak PV power [200] kWp

Estimated system losses [0; 100] [20] %

**Fixed mounting options:**

Mounting position: [Free-standing]

Slope [0; 90] [27] °  Optimize slope (Azimuth angle from -180 to 180. East=-90, South=0)

Azimuth [ -1 ] °  Also optimize azimuth

**Tracking options:**

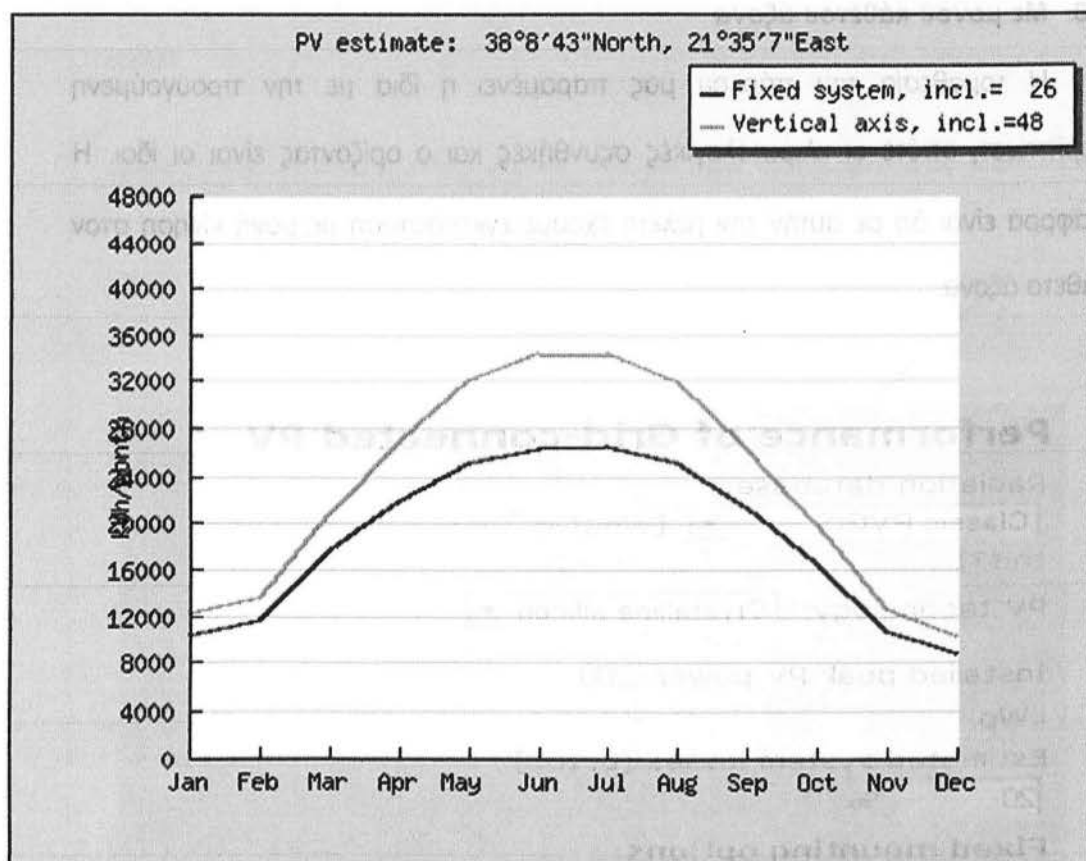
Vertical axis Slope [0; 90] [48] °  Optimize

Inclined axis Slope [0; 90] [0] °  Optimize

2-axis tracking

Εικόνα 7.3.1 PVGIS Παράθυρο Παραμέτρων





Εικόνα 7.3.2 Γραφική Παράσταση Απόδοσης Φωτοβολταϊκού

Παρατηρούμε ότι η συνολική ετήσια παραγόμενη ενέργεια απο το σύστημα ιχνηλάτησης (tracking) μονού κάθετου άξονα είναι αυξημένη στα 275 MWh ( Πίνακας 7.3.3 ) σε σύγκριση με το σύστημα σταθερής εγκατάστασης του οποίου η αιτήσια παραγόμενη ισχύς φτάνει τα 221 MWh , το οποίο αντιστοιχεί σε αύξηση της τάξης του 24,43 %.



<b>Vertical axis tracking system optimal inclination=48°</b>				
<b>Month</b>	$E_d$	$E_m$	$H_d$	$H_m$
Jan	390.00	12100	2.62	81.2
Feb	480.00	13400	3.28	91.9
Mar	672.00	20800	4.66	144
Apr	898.00	26900	6.30	189
May	1030.00	32000	7.43	230
Jun	1150.00	34400	8.38	252
Jul	1110.00	34400	8.18	253
Aug	1030.00	31800	7.59	235
Sep	879.00	26400	6.38	191
Oct	638.00	19800	4.54	141
Nov	419.00	12600	2.90	87.0
Dec	326.00	10100	2.21	68.5
<b>Yearly average</b>	<b>753</b>	<b>22900</b>	<b>5.38</b>	<b>164</b>
<b>Total for year</b>		<b>275000</b>		<b>1960</b>

### 7.3.3 Πίνακας Μηνιαίας και Συνολικής Παραγωγής Ενέργειας

Το πάρκο θα έχει ονομαστική ισχύ 199 KW και θα αποτελείται από :

- 800 Φ/Β Πάνελ LG 250S1C 250 W,  $V_{oc}=37.1$  and  $I_{sc}=8.76$
- 800 Μικρο-Μετατροπείς (Micro-inverter) Enphase M215
- Σύστημα Τηλεμετρίας
- 34 Ιχνηλάτες μονού άξονα DEGERtraker 40NT (επιφάνειας 40 m<sup>2</sup>)

Η μέγιστη DC τάση που μπορεί ο μικρο-μετατροπέας να δεχτεί είναι 45 V και μέγιστο ισχύς 260 W. Το κάθε Φ/Β πάνελ θα συνδεθεί με ένα μικρο-μετατροπέα και μέσω αυτού κατευθείαν στο ηλεκτρικό δίκτυο. Κάθε Φ/Β πάνελ έχει επιφάνεια 1.60 m<sup>2</sup>. Η συνολική επιφάνεια των Φ/Β που θα



χρειαστούμε για το πάρκο είναι  $800 * 1.60 = 1.280 \text{ m}^2$ . Ο ιχνηλάτης ενός άξονα έχει επιφάνεια  $40 \text{ m}^2$  άρα θα χρειαστούμε  $1.280 / 40 = 32$  ιχνηλάτες.

Το συνολικό κόστος για την κατασκευή του πάρκου θα είναι :

Πίνακας 7.3.4 Υλικών και Κόστους

Υλικά	Μονάδες	Τιμή / Τεμ. (€)	Σύνολο (€)
Φ/Β Πάνελ	800	307*	245.600
Μικρό-Μετατροπέας (micro-inverter)	800	150*	120.000
Σύστημα Τηλεμετρίας	1	600*	600
Ηλιοστάτες Μονού Άξονα (1-axis Tracker)	34	4.305*	146.370
<b>Συνολικό Κόστος</b>			<b>512.570</b>

[\* Τιμές Καταλόγου]

Πρέπει ακόμα να υπολογίσουμε :

- Το κόστος για την μεταφορά των υλικών – **3.500€**,
- Κατασκευαστικό και Ηλεκτρολογικό κόστος –**25.000€**
- Τα τέλη σύνδεσης με το Ηλεκτρικό Δίκτυο –**17.000€**.
- Μετασχηματιστής Χαμηλής – Μέσης Τάσης – **8.000 €**

Οπότε το τελικό κόστος ανέρχεται στα **558.070€**.

Η παραγόμενη ισχύς και το κέρδος απο την προς πώληση ενέργεια για κάθε έτος και για διάρκεια 20 ετών φαίνονται στον πίνακα 7.3.6. Έχουμε υπολογίσει μείωση 0,9 % ανα έτος λόγω μείωσης της αποδοτικότητας των Φ/Β πάνελ.

Η τιμή πώλησης KWh είναι ορισμένη στα 0.271 €.



Πίνακας 7.3.5 Πραγώμενης Ισχύος και Κέρδους ανα έτος

Έτος	Παραγόμενη Ισχύς (MWh)	Κέρδος (€)
1	275.000,00	74.525,00 €
2	272.525,00	73.854,28 €
3	270.072,28	73.189,59 €
4	267.641,62	72.530,88 €
5	265.232,85	71.878,10 €
6	262.845,75	71.231,20 €
7	260.480,14	70.590,12 €
8	258.135,82	69.954,81 €
9	255.812,60	69.325,21 €
10	253.510,29	68.701,29 €
11	251.228,69	68.082,98 €
12	248.967,63	67.470,23 €
13	246.726,93	66.863,00 €
14	244.506,38	66.261,23 €
15	242.305,83	65.664,88 €
16	240.125,07	65.073,89 €
17	237.963,95	64.488,23 €
18	235.822,27	63.907,84 €
19	233.699,87	63.332,67 €
20	231.596,57	62.762,67 €
<b>Total</b>	<b>5.054.199,55</b>	<b>1.369.688,08 €</b>

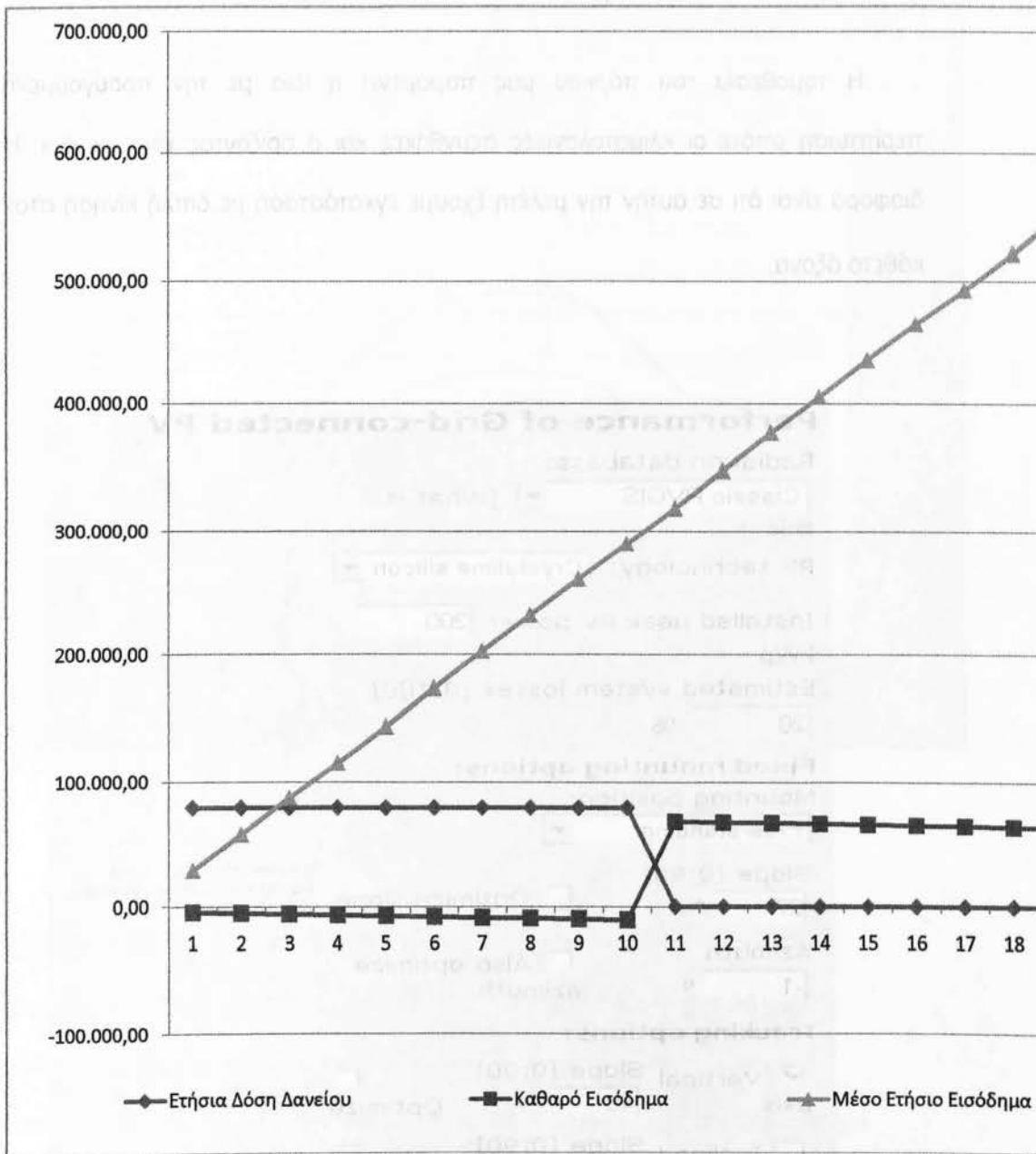
Η χρηματοδότηση για την κατασκευή του Φ/Β πάρκου θα γίνει μέσω τραπεζικού δανείου το και θα καλύψη το 100 % της αξίας αυτού με επιτόκιο 7,5% και περίοδο αποπληρωμής τα 10 χρόνια. Το κόστος ετήσιας αφάλισης και συντήρησης ανέρχεται στα **3.900 €**. Στον πίνακα 7.2.7 που ακολουθεί μπορούμε να δούμε το καθαρό κέρδος που θα έχουμε ανα έτος αλλά και συνολικά μετά απο 20 χρόνια το οποίο ανέρχεται στα 558.070 €



Πίνακας 7.3.6 Έξοδα Δανείου Ασφάλισης Συντήρησης & Καθαρού Εισοδήματος

Έτος	Δόση Δανείου (€)	Έξοδα Ασφάλισης & Συντήρησης (€)	Καθαρό Εισόδημα	Μέσω Ετήσιο Εισόδημα
1	78.998,93	3.900,00	-4.473,93	28.984,93
2	78.998,93	3.900,00	-5.144,65	28.984,93
3	78.998,93	3.900,00	-5.809,34	28.984,93
4	78.998,93	3.900,00	-6.468,05	28.984,93
5	78.998,93	3.900,00	-7.120,83	28.984,93
6	78.998,93	3.900,00	-7.767,73	28.984,93
7	78.998,93	3.900,00	-8.408,81	28.984,93
8	78.998,93	3.900,00	-9.044,12	28.984,93
9	78.998,93	3.900,00	-9.673,72	28.984,93
10	78.998,93	3.900,00	-10.297,64	28.984,93
11	0,00	3.900,00	68.082,98	28.984,93
12	0,00	3.900,00	67.470,23	28.984,93
13	0,00	3.900,00	66.863,00	28.984,93
14	0,00	3.900,00	66.261,23	28.984,93
15	0,00	3.900,00	65.664,88	28.984,93
16	0,00	3.900,00	65.073,89	28.984,93
17	0,00	3.900,00	64.488,23	28.984,93
18	0,00	3.900,00	63.907,84	28.984,93
19	0,00	3.900,00	63.332,67	28.984,93
20	0,00	3.900,00	62.762,67	28.984,93
<b>Total</b>	<b>789.989,32</b>	<b>78.000,00</b>	<b>579.698,78</b>	





Γράφημα 7.3.7 Δανείου & Καθαρού Εισοδήματος

#### 7.4 Μεδιπλού κάθετου άξονα



## 7.4 Μεδιπλού κάθετου άξονα

Η τομοθεσία του πάρκου μας παραμένει η ίδια με την προϋγούμενη περίπτωση οπότε οι κλιματολογικές σ συνθήκες και ο ορίζοντας είναι οι ίδιοι. Η διαφορά είναι ότι σε αυτήν την μελέτη έχουμε εγκατάσταση με διπλή κίνηση στον κάθετο άξονα.

**Performance of Grid-connected PV**

Radiation database:  [What is this?]

PV technology:

Installed peak PV power  kWp

Estimated system losses [0; 100]  %

**Fixed mounting options:**

Mounting position:

Slope [0; 90]  °  Optimize slope (Azimuth angle from -180 to 180, East=-90, South=0)

Azimuth  °  Also optimize azimuth

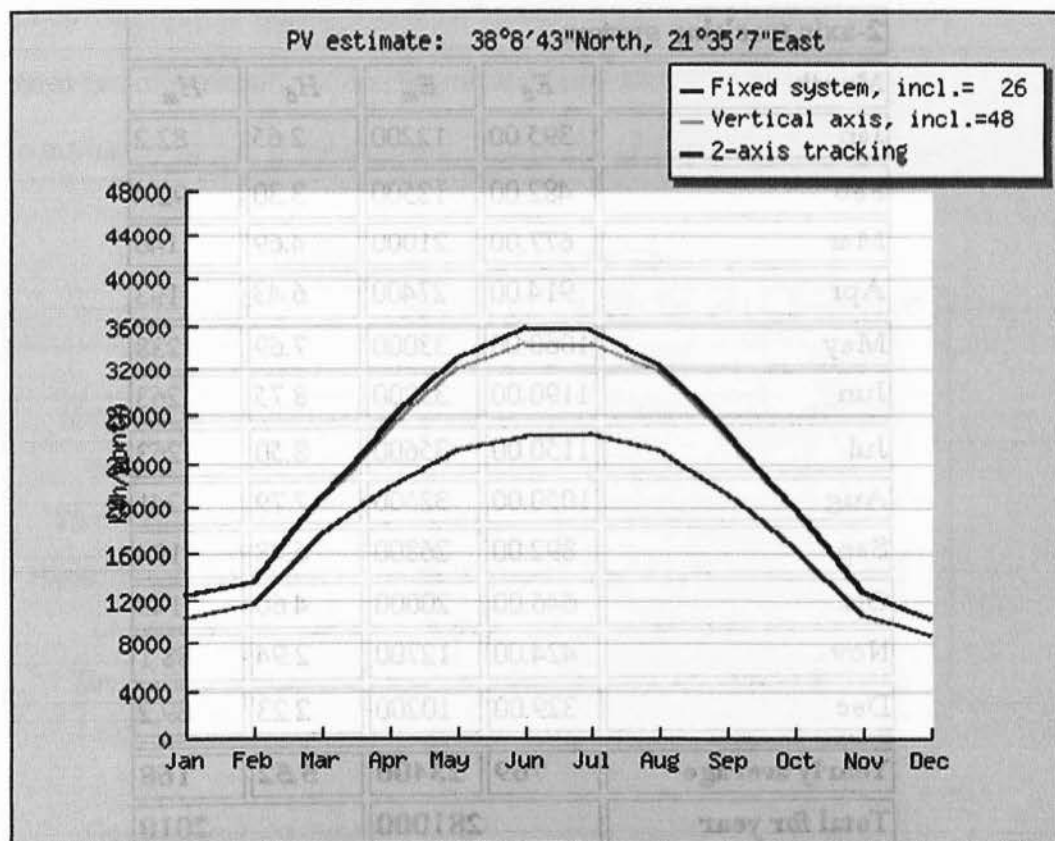
**Tracking options:**

Vertical axis Slope [0; 90]  °  Optimize

Inclined axis Slope [0; 90]  °  Optimize

2-axis tracking

Εικόνα 7.4.1 PVGIS Παράθυρο Παραμέτρων



Εικόνα 7.4.2 Γραφική Παράσταση Απόδοσης Φωτοβολταϊκού

Παρατηρούμε ότι η συνολική ετήσια παραγόμενη ενέργεια απο το σύστημα ιχνηλάτησης (tracking) διπλού κάθετου άξονα είναι αυξημένη στα 281 MWh ( Πίνακας 7.4.3 ) σε σύγκριση με το σύστημα μονού κάθετου άξονα του οποίου η αιτήσια παραγόμενη ισχύς φτάνει τα 275 MWh , το οποίο αντιστοιχεί σε αύξηση της τάξης του 2,18 % και σε σύγκριση με το σύστημα σταθερής εκατάστασης η αύξηση κειμένεται στο 27,14 %.



<b>2-axis tracking system</b>				
<b>Month</b>	$E_d$	$E_m$	$H_d$	$H_m$
Jan	395.00	12200	2.65	82.2
Feb	482.00	13500	3.30	92.4
Mar	677.00	21000	4.69	146
Apr	914.00	27400	6.43	193
May	1060.00	33000	7.69	238
Jun	1190.00	35800	8.75	263
Jul	1150.00	35600	8.50	263
Aug	1050.00	32500	7.79	241
Sep	892.00	26800	6.48	194
Oct	646.00	20000	4.60	143
Nov	424.00	12700	2.94	88.1
Dec	329.00	10200	2.23	69.2
<b>Yearly average</b>	<b>769</b>	<b>23400</b>	<b>5.52</b>	<b>168</b>
<b>Total for year</b>	<b>281000</b>		<b>2010</b>	

### 7.4.3 Πίνακας Μηνιαίας και Συνολικής Παραγωγής Ενέργειας

Το πάρκο θα έχει ονομαστική ισχύ 199 KW και θα αποτελείται από :

- 800 Φ/Β Πάνελ LG 250 S1C 250 W,  $V_{oc}=37.1$  and  $I_{sc}=8.76$
- 800 Μικρο-Μετατροπείς (Micro-inverter) Enphase M215
- Σύστημα Τηλεμετρίας

Η μέγιστη DC τάση που μπορεί ο μικρο-μετατροπέας να δεχτεί είναι 45 V και μέγιστο ισχύς 260 W. Το κάθε Φ/Β πάνελ θα συνδεθεί με ένα μικρο-μετατροπέα και μέσω αυτού κατευθείαν στο ηλεκτρικό δίκτυο. Κάθε Φ/Β πάνελ έχει επιφάνεια 1.60 m<sup>2</sup>. Η συνολική επιφάνεια των Φ/Β που θα



χρειαστούμε για το πάρκο είναι  $800 * 1.60 = 1.280 \text{ m}^2$ . Ο ιχνηλάτης ενός άξονα έχει απιφάνεια  $70 \text{ m}^2$  άρα θα χρειαστούμε  $1.280 / 70 = 19$  ιχνηλάτες.

Το συνολικό κόστος για την κατασκευή του πάρκου θα είναι :

Πίνακας 7.4.4 Υλικών και Κόστους

Υλικά	Μονάδες	Τιμή / Τεμ. (€)	Σύνολο (€)
Φ/Β Πάνελ	800	307*	245.600
Μικρό-Μετατροπέας (micro-inverter)	800	150*	120.000
Σύστημα Τηλεμετρίας	1	600*	600
Ηλιοστάτες Διπλού Άξονα (2-axis Tracker)	19	7.691*	146.129
<b>Συνολικό Κόστος</b>			<b>512.329</b>

[\* Τιμές Καταλόγου]

Πρέπει ακόμα να υπολογίσουμε :

- Το κόστος για την μεταφορά των υλικών – **3.500€**,
- Κατασκευαστικό και Ηλεκτρολογικό κόστος – **25.000€**
- Τα τέλη σύνδεσης με το Ηλεκτρικό Δίκτυο – **17.000€**.
- Μετασηματιστής Χαμηλής – Μέσης Τάσης **8.000 €**

Οπότε το τελικό κόστος ανέρχεται στα **557.829€**.

Η παραγόμενη ισχύς και το κέρδος απο την προς πώληση ενέργεια για κάθε έτος και για διάρκεια 20 ετών φαίνονται στον πίνακα 7.4.6. Έχουμε υπολογίσει μείωση 0,9 % ανα έτος λόγω μείωσης της αποδοτικότητας των Φ/Β πάνελ. Η τιμή πώλησης KWh είναι ορισμένη στα 0.271 €. Το ετήσιο κόστος ασφάλισης και συντήρησης ανέρχεται στα **4.500 €**.





Πίνακας 7.4.5 Παραγώμενης Ισχύος και Κέρδους ανα έτος

Έτος	Παραγώμενη Ισχύς (MWh)	Κέρδος (€)
1	281.000,00	76.151,00 €
2	278.471,00	75.465,64 €
3	275.964,76	74.786,45 €
4	273.481,08	74.113,37 €
5	271.019,75	73.446,35 €
6	268.580,57	72.785,33 €
7	266.163,35	72.130,27 €
8	263.767,88	71.481,09 €
9	261.393,96	70.837,76 €
10	259.041,42	70.200,22 €
11	256.710,05	69.568,42 €
12	254.399,66	68.942,31 €
13	252.110,06	68.321,83 €
14	249.841,07	67.706,93 €
15	247.592,50	67.097,57 €
16	245.364,17	66.493,69 €
17	243.155,89	65.895,25 €
18	240.967,49	65.302,19 €
19	238.798,78	64.714,47 €
20	236.649,59	64.132,04 €
<b>Total</b>	<b>5.164.473,00</b>	<b>1.399.572,18 €</b>

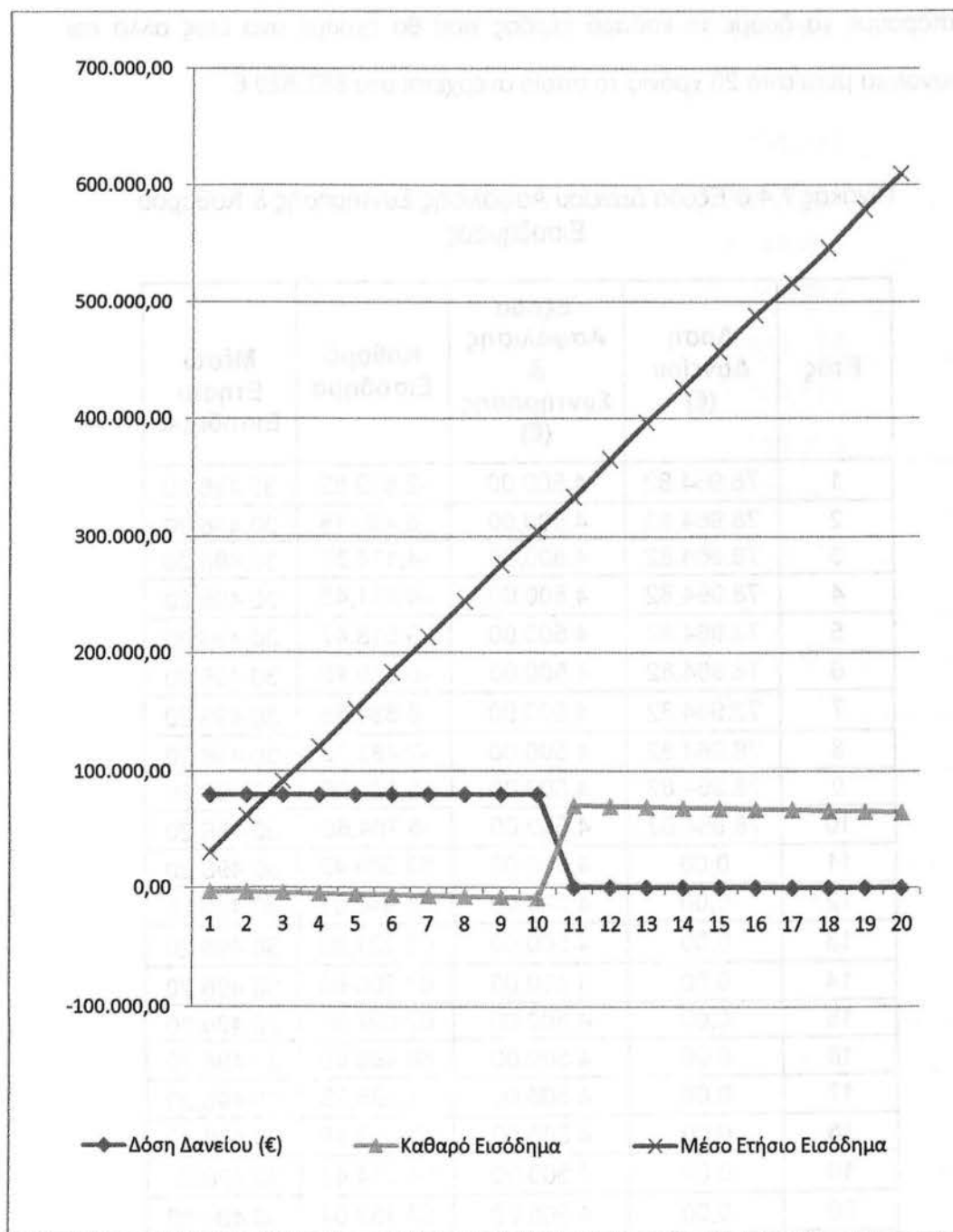
Η χρηματοδότηση για την κατασκευή του Φ/Β πάρκου θα γίνει μέσω τραπεζικού δανείου το και θα καλύψη το 100 % της αξίας αυτού με επιτόκιο 7,5% και περίοδο αποπληρωμής τα 10 χρόνια. Το κόστος ετήσιας αφάλισης και συντήρησης ανέρχεται στα 4.500 €. Στον πίνακα 7.2.7 που ακολουθεί



μπορούμε να δούμε το καθαρό κέρδος που θα έχουμε ανα έτος αλλά και συνολικά μετά απο 20 χρόνια το οποίο ανέρχεται στα 557.829 €

Πίνακας 7.4.6 Έξοδα Δανείου Ασφάλισης Συντήρησης & Καθαρού Εισοδήματος

Έτος	Δόση Δανείου (€)	Έξοδα Ασφάλισης & Συντήρησης (€)	Καθαρό Εισόδημα	Μέσω Ετήσιο Εισόδημα
1	78.964,82	4.500,00	-2.813,82	30.496,20
2	78.964,82	4.500,00	-3.499,18	30.496,20
3	78.964,82	4.500,00	-4.178,37	30.496,20
4	78.964,82	4.500,00	-4.851,45	30.496,20
5	78.964,82	4.500,00	-5.518,47	30.496,20
6	78.964,82	4.500,00	-6.179,49	30.496,20
7	78.964,82	4.500,00	-6.834,55	30.496,20
8	78.964,82	4.500,00	-7.483,73	30.496,20
9	78.964,82	4.500,00	-8.127,06	30.496,20
10	78.964,82	4.500,00	-8.764,60	30.496,20
11	0,00	4.500,00	69.568,42	30.496,20
12	0,00	4.500,00	68.942,31	30.496,20
13	0,00	4.500,00	68.321,83	30.496,20
14	0,00	4.500,00	67.706,93	30.496,20
15	0,00	4.500,00	67.097,57	30.496,20
16	0,00	4.500,00	66.493,69	30.496,20
17	0,00	4.500,00	65.895,25	30.496,20
18	0,00	4.500,00	65.302,19	30.496,20
19	0,00	4.500,00	64.714,47	30.496,20
20	0,00	4.500,00	64.132,04	30.496,20
<b>Total</b>	<b>789.648,17</b>	<b>90.000,00</b>	<b>609.924,01</b>	



Γράφημα 7.4.7 Δανείου & Καθαρού Εισοδήματος



## 7.5 Συμπεράσματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα κερδίζουν συνεχώς έδαφος στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής. Όντας ευέλικτα, αποκεντρωμένα, με δυνατότητες ενσωμάτωσης σε κτίρια και με την τεχνολογία να αναπτύσσεται με γρήγορους ρυθμούς, τα ΦΒ συστήματα φαίνεται ότι θα παίξουν πρωταγωνιστικό ρόλο τόσο σε εγχώριο όσο και σε διεθνές επίπεδο. Ήδη στην Ελλάδα το 2010 η νέα εγκατεστημένη ισχύς από φωτοβολταϊκά τριπλασιάστηκε καθότι με το νέο νομικό πλαίσιο ενισχύθηκε η τιμή πώλησης της κιλοβατώρας και απλοποιήθηκαν σε κάποιο βαθμό οι αδειοδοτικές και λοιπές διαδικασίες. Άλλωστε προβλέπεται ότι οι τιμές των φωτοβολταϊκών συστημάτων θα μειώνονται σταδιακά ενώ αντίθετα προσπάθειες καταβάλλονται συνεχώς για την βελτίωση του βαθμού απόδοσής τους.

Στην παρούσα πτυχιακή άσκηση έγινε τεχνο-οικονομική μελέτη εγκατάστασης φωτοβολταϊκού πάρκου ισχύος 200 KWμε χρήση μικρομετατροπέα (Micro-inverter) και μελετήθηκαν τρεις διαφορετικά σενάρια :

4. Σταθερής Εγκατάστασης
5. Ηλιακός Ιχνηλάτης (Tracking) μονού κάθετου άξονα
6. Ηλιακός Ιχνηλάτης (Tracking) διπλού κάθετου άξονα

Η χρήση μικρομετατροπέα (micro-inverter) δίνει την δυνατότητα σε κάθε Φ/Β πάνελ να αποτελεί μια αυτόνομη μονάδα λειτουργίας, ενώ στα συστήματα διάταξης – συστοιχίας η κάθε μονάδα λειτουργίας αποτελείται από πλήθος Φ/Β πάνελ. Σε περίπτωση σκίασης ή δυσλειτουργίας του Φ/Β, δεν επηρεάζεται η απόδοση του υπολοίπου συστήματός μας σε αντίθεση με την χρήση παραδοσιακού μετατροπέα (inverter) όπου τότε η απόδοση του συστήματος καθορίζεται από το χαμηλότερο σε απόδοση πάνελ. Μπορούμε να προσθέσουμε ή και να αφαιρέσουμε ένα πάνελ ακόμα και αν είναι άλλης μάρκας και ισχύος χωρίς να επηρεάζεται το υπόλοιπο σύστημα το οποίο δεν θα μπορούσε να γίνει σε μια συμβατική εγκατάσταση αφού θα έπρεπε το πάνελ να είναι ίδιας ισχύος και κατασκευαστή. Μπορούμε να παρακολουθούμε χωριστά την απόδοση του κάθε πάνελ. Δεν υπάρχουν



απώλειες απο τα καλώδια. Μπορούμε να τοποθετήσουμε το κάθε Φ/Β σε διαφορετική θέση-κλίση χωρίς αυτο να επηρεάζει το υπόλοιπο σύστημα και μπορούμε έτσι να επιτύχουμε μέγιστη απόδοση ισχύος. Σε περίπτωση δυσλειτουργίας ενός συμβατικού μετατροπέα (inverter) τότε ολόκληρη η διάταξη των Φ/Β πάνελ που θα ήταν συνδεδεμένη βγαίνει αυτόματα εκτός λειτουργίας πράγμα που δεν συμβαίνει με την χρήση μετατροπέα τύπου micro-inverter. Η διάρκεια του κύκλου ζωής του μπορεί να φτάσει και τα 25 χρόνια. Το μοναδικό **Μειωνέκτημα** είναι το κόστος αφού για κάθε Φ/Β πάνελ χρειαζόμαστε και ένα μικρομετατροπέα.

### Για την στήριξη των Φ/Β πάνελ έγινε χρήση :

1. Σταθερών βάσεων κατασκευασμένων από αλουμίνιο για τις οποίες έχει γίνει απαραίτητη τεχνική μελέτη για να διαπιστωθεί η στατική τους επάρκεια και η αντοχή τους σε ανεμοπιέσεις και φορτία χιονιού. Τοποθετούνται σε κλίση 30 μοιρών η οποία θεωρείται μια ικανοποιητική μέση τιμή για τα Ελληνικά δεδομένα. Αποτελούνται από τεμάχια τα οποία τοποθετούνται επι το έργων.

2. Σύστημα ιχνηλάτησης - παρακολούθησης (tracker) για την μεγιστοποίηση της παραγώμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη πολυπλοκότητα, σε σχέση με τις σταθερές βάσεις αλουμινίου, οι οποίες μάλιστα χρήζουν συντήρησης λόγω ύπαρξης ηλεκτρο-μηχανικών ή ηλεκτρο-υδραυλικών μέσων κίνησης. Το μεγάλο τους μέγεθος τα καθιστά ευάλωτα σε ανεμοπιέσεις γι' αυτό και γίνεται χρήση ανεμόμετρου έτσι ώστε μόλις ανιχνευθεί μεγάλη ταχύτητα αέρα δίνεται εντολή στο σύστημα κίνησης και θέτει την επιφάνεια των πάνελ σε οριζόντια θέση (ως προς το έδαφος).

Η εγκατάσταση πάρκου με σταθερές βάσης στήριξης των Φ/Β πάνελ αν και έχει το χαμηλότερο κόστος (459684 €), έχει επίσης και την χαμηλότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (4.061.738,55Mwh) στη διάρκεια 20 ετίας. Τοποθετώντας ηλιακούς ιχνηλάτες μονού κάθετου άξονα έχουμε αύξηση του κόστους εγκατάστασης κατά 21,4 % (558.070 €) και για ηλιακό ιχνηλάτη διπλού κάθετου άξονα 21,3 % (557.829 €), η αύξηση δε στην παραγώμενη ισχύ μας είναι 24,43 % (5.054.199,55Mwh), και 27,14 % (5.164.473,00Mwh)





αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπ' όψη μας τις παραπάνω πληροφορίες μπορούμε να πούμε ότι η επιλογή ιχνηλάτη μονού κάθετου άξονα είναι η αποδοτικότερη γιατί διατηρεί ένα σχετικά χαμηλό ετήσιο κόστος συντήρησης και ασφάλισης του πάρκου μας έχοντας παράλληλα μια αρκετά καλή αποδοτικότητα στο μέγεθος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και του κέρδους που θα έχουμε στη διάρκεια 20ετίας. Μπορούμε όμως να επιτύχουμε περαιτέρω αύξηση της παραγόμενης ισχύος αν σε τακτά χρονικά διαστήματα (2-3 μήνες) διορθώνουμε χειροκίνητα την γωνία κλίσης των Φ/Β πάνελ σε σχέση με την οριζόντιο επιτυγχάνοντας έτσι καλύτερη απόδοση αυτών.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] [www.wikipedia.gr](http://www.wikipedia.gr)
- [2] Α. Ζενάκος, Ν. Λεκάκης, Α. Σχοινάς, Βιβλίο Φυσικής Β & Γ Γυμνασίου.
- [3] Κωνσταντίνα Στυλιανοπούλου και Εμμανουέλα Χατζηρόδου ,  
“ Διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας Στο Ελληνικό Δίκτυο”  
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Μακεδονίας , Τμήμα Τεχνολόγων  
Αντιρρύπανσης 2009.
- [4] Ανδρέας Κ. Κοκκοφίτης, “Ανάλυση, σχεδίαση και έλεγχος των  
ηλεκτρονικών ισχύος μια αυτόνομης Φ/Β εγκατάστασης σε μέγιστη ισχύ  
εξόδου 2,5 KW ” Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα  
Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών 2006.
- [5] Δέδες Ι. Γεώργιος, “Μελέτη και κατασκευή συστήματος καταγραφής  
καμπυλών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών Φ/Β πλαισίου και  
προσομοίωση κυκλώματος οδήγησης αντιστροφή τριών επιπέδων”  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και  
Μηχανικών Υπολογιστών
- [6] ARC Μελετητική Σύμβουλοι Μηχανικοί“ Το φωτοβολταϊκό  
Φαινόμενο ”, ([www.arcmeletitiki.gr](http://www.arcmeletitiki.gr))
- [7] Όλγα Κυριτσάκη “ Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας Στην Ελλάδα “,  
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κοζάνης , Τμήμα Διοίκησης και  
Οικονομίας, 2010.
- [8] Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών , “ Φωτοβολταϊκά, Ένας  
Πρακτικός Τεχνικός Οδηγός “ , 2011
- [9] Παναγιώτα-Μαρία Παπασάββα , “ Σύγχρονες Ηλεκτρονικές Διατάξεις με  
Οργανικά Ημιαγωγά Υλικά” , Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης  
, Τμήμα Ηλεκτρολογίας , 2010.
- [10] Γιώργος Σ. Λέτζας , Θωμάς Κ. Μπουμπούλης , “ Ανάπτυξη Μοντέλου  
Ισοδύναμου Φωτοβολταϊκού Σταθμού. Υλοποίηση Ανιχνευτή Σημείου  
Μέγιστης Απόδοσης – MPPT Tracker “ , Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλονίκης , Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών  
Ηλεκτρονικών Υπολογιστών.



- [11] Στέφανος Ι. Φούσκας , "Έξυπνο Κτήριο και Φωτοβολταϊκά " , Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά, Τμήμα Αυτοματισμού , 2010
- [12] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας , " Εγκατάσταση Φ/Β Συστημάτων σε Κτηριακές Εγκαταστάσεις" , Τμήμα Φ/Β Συστημάτων και Διεσπαρμένης Παραγωγής , 2010
- [13] National Program on Technology Enhanced Learning, A joint Venture by Indian Institutes of Science 'Power Electronic Version 2 EE IIT, Kharagpur
- [14] Alexander Khaled Hayman "Development of a High-Efficiency Solar Micro-inverter" Submitted to the Department of Electrical Engineering and Computer Science in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering and Computer Science at the Massachusetts Institute of Technology, September 2009
- [15] Φώπιος Στεργίουπουλος, Μωυσής Δαμιανίδης, Μάνθος Τόλης και Γεώργιος Κατσαρος "Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων' Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας.
- [16] Chia-Yen Lee, Po-Cheng Chou, Che-Ming Chiang and Chiu-Feng Lin, "Sun Tracking Systems: A Review, Sensors" 2009
- [17] Mariusz Malinowski, Steffen Bernet, "Simple Control Scheme of Three-Level PWM Converter Connecting Wind Turbine with Grid"
- [18] C. Liu, B. Wu and R. Cheung, "Advanced algorithm for MPPT control of photovoltaic systems", Canadian Solar Buildings Conference
- [19] Παναγιώτης Ι. Κοφινάς , "Research study on micro-inverter using solar cell/panel modeling subsystems, solar inverter simulation, maximum power point programming and techno-economic study " , KingstonUniversity.