

ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη και Εγκατάσταση Φ/Β πάρκου»

“Design and Installation of P/V park”



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΑΛΑΤΕΣΤΑΣ ΠΑΝΤΕΛΗΣ

ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΔΑΜΙΓΟΣ ΣΤΕΛΙΟΣ

ΑΙΓΑΛΕΩ 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ.Μαλατέστα Παντελή για την πολύτιμη συμβολή και καθοδήγηση του στη διενέργεια της ακόλουθης πτυχιακής εργασίας και τον ΑΔΜΗΕ για την παροχή στοιχείων απαραίτητων για τη συγγραφή της ακόλουθης εργασίας, καθώς και τους φίλους μου Γιάννη και Γρηγόρη για την πολύτιμη βοήθεια τους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

- 1.1. Το Ενεργειακό πρόβλημα
- 1.2. Κύριες Πηγές Ενέργειας σήμερα
- 1.3. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας
- 1.4. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από ΑΠΕ
- 1.5. Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου
- 1.6. Το Πρωτόκολλο του Κιότο
- 1.7. Το θεσμικό πλαίσιο της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ε.Ε.
- 1.8. Η ανάπτυξη των ΑΠΕ στην Ελλάδα
- 1.9. Η Ελληνική πραγματικότητα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

- 2.1. Το Φ/Β στοιχείο
- 2.2. Ημιαγωγοί
- 2.3. Φ/Β Φαινόμενο
- 2.4. Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των Φ/Β στοιχείων
 - 2.4.1 ΠΡΩΤΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ (Ιδανικό ηλιακό κύτταρο). Σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος (MPP)
 - 2.4.2 ΔΕΥΤΕΡΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ (Πραγματικό ηλιακό κύτταρο)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

- 3.1. Ηλιακή Ακτινοβολία
 - 3.1.1. Μέτρηση και Υπολογισμός της Ακτινοβολίας
 - 3.1.2. Υπολογισμός της Ηλιακής Ενέργειας που δέχεται η Γη

- 3.2. Ζενίθια γωνία του Ήλιου θ
- 3.2.1. Γωνία απόκλισης του Ήλιου δ
- 3.3. Γεωγραφικές Συντεταγμένες
- 3.4. Ηλιακή ακτινοβολία μέσα στην ατμόσφαιρα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

- 4.1. Αρχή Λειτουργίας και δομή συσσωρευτών
- 4.1.1. Σχεδιαστική Δομή και Αρχή Λειτουργίας των συσσωρευτών
- 4.1.2. Προσαρμογή της λειτουργίας του συσσωρευτή σε Φ/Β σύστημα
- 4.2. Αναγκαιότητα αποθηκευτικής διάταξης σε συστήματα με ανανεώσιμες πηγές

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

- 5.1. Κατηγορίες Φ/Β συστημάτων
- 5.2. Αυτόνομο Φ/Β σύστημα
- 5.2.1. Διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα
- 5.3. Μετατροπέας Συνεχούς Τάσης
- 5.4. Ανιχνευτές σημείου μέγιστης ισχύος (MAXIMUM POWER POINT TRACKERS, MPPT)
- 5.5. Αντιστροφέας (DC/AC INVERTER)
- 5.6. Σύνδεση με το δίκτυο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

- 6.1. Κριτήρια επιλογής της ισχύος
- 6.2. Κλίση συλλεκτών – Ηλιακό Δυναμικό στην Ελλάδα
- 6.3. Επιλογή Φ/Β πλαισίων
- 6.4 Επιλογή Αντιστροφέα
- 6.5 Συνδυασμός Πλαισίου – Αντιστροφέα
- 6.6 Κυκλωματική σύνδεση – Διαστασιολόγηση συστοιχίας

6.6.1 Ανάστροφο ρεύμα

6.7 Τοπογραφική διάταξη του ΦΒ πάρκου

6.7.1 Κατασκευές υποδομής – Βάσεις στήριξης

6.8 Γείωση Φ/Β πάρκου

6.9 Αντικεραυνική Προστασία

6.10 Αντιστροφείς

6.10.1 Καλώδια

6.10.2 Κιβώτια πινάκων

6.10.3 Σύστημα διαχείρισης και ελέγχου

Βιβλιογραφία

Εισαγωγή

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ή «ήπιες μορφές ενέργειας» είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχεται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η ενέργεια νερού, η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η βιομάζα και μπορούν να προσφέρουν εναλλακτικούς τρόπους παραγωγής ενέργειας.

Είναι η πρώτη μορφή ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος πριν στραφεί έντονα στη χρήση των ορυκτών καυσίμων. Ως Α.Π.Ε. θεωρούνται γενικά οι εναλλακτικές των παραδοσιακών πηγών ενέργειας (π.χ. του πετρελαίου ή του άνθρακα).

Οι ΑΠΕ πρακτικά είναι ανεξάντλητες, η χρήση τους δεν ρυπαίνει το περιβάλλον ενώ η αξιοποίησή τους περιορίζεται μόνον από την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδεκτών τεχνολογιών που θα έχουν σαν σκοπό την δέσμευση του δυναμικού τους. Το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών εμφανίσθηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1974 και παγιώθηκε μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων την τελευταία δεκαετία. Για πολλές χώρες, οι ΑΠΕ αποτελούν μια εγχώρια πηγή ενέργειας με ευνοϊκές προοπτικές συνεισφοράς στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Κάθε μορφή έχει τις δικές της ιδιομορφίες και μπορούν να εφαρμοστούν είτε σε μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας είτε σε μικρότερες μονάδες όπως στα κτίρια.

Οι νέες τεχνολογίες που εξετάζονται σήμερα, κυμαίνονται με βάση την παραγωγή ποσών ενέργειας με παρονομαστή το κόστος, δηλαδή να είναι οικονομικά αποδεκτές και ταυτόχρονα να καλύπτουν υψηλά ποσά ενέργειας.

Τελευταία από την Ευρωπαϊκή Ένωση αλλά και πολλά κράτη υιοθετούνται νέες πολιτικές για τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που προάγουν τέτοιες εσωτερικές πολιτικές και για τα κράτη μέλη.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρεται στα γενικά στα Φωτοβολταϊκά συστήματα που μέχρι τώρα γνωρίζουμε και έχουν αναπτυχθεί από τη βιομηχανία.

Κεφάλαιο 1^ο

1.1. Το Ενεργειακό Πρόβλημα

Από τις αρχές του προηγούμενου αιώνα, όταν άρχισαν οι εφαρμογές του ηλεκτρισμού, μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του '70, παρατηρείται διεθνώς μία συνεχής συγκέντρωση της παραγωγής σε συνεχώς μεγαλύτερους «Σταθμούς Παραγωγής» και παράλληλα ανάπτυξη των δικτύων Μεταφοράς και Διανομής με συνεχώς μεγαλύτερες τάσεις, λόγω της ραγδαίας αύξησης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συνέβη και στην χώρα μας με την ανάπτυξη του Εθνικού Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ), η οποία περίπου κατά την περίοδο 1956-63 εξαγόρασε τις 300 περίπου ηλεκτρικές εταιρείες που προμήθευαν τότε την ηλεκτρική ενέργεια με μικρά τοπικά δίκτυα. Όμως, με αφορμή τις «πετρελαϊκές κρίσεις» της δεκαετίας του '70, άρχισε να γίνεται διεθνώς συνείδηση η ανάγκη καλύτερης αξιοποίησης της ενέργειας, αφενός μεν για να αξιοποιούνται καλύτερα οι διατιθέμενοι ενεργειακοί πόροι, αφετέρου δε για να περιορίζεται η ρύπανση του περιβάλλοντος. Άρχισε τότε σε διεθνές επίπεδο η αναζήτηση Εναλλακτικών Πηγών Ενέργειας, σε αντιστάθμισμα των Συμβατικών Πηγών, όπως είναι το κάρβουνο και το πετρέλαιο, καθώς και της πυρηνικής ενέργειας, η οποία βεβαίως παρουσιάζει τα γνωστά προβλήματα. Παράλληλα άρχισε μία προσπάθεια για την εξοικονόμηση και γενικότερα την καλύτερη και αποδοτικότερη χρήση της ενέργειας. Το σύνολο των πηγών ενέργειας, που ο άνθρωπος έχει στη διάθεσή του διακρίνεται σε δύο κύριες κατηγορίες:

Στις πηγές εκείνες που βασίζονται σε υπάρχοντα αποθέματα μέσα στο στερεό φλοιό της Γης, με συγκεκριμένη διάρκεια ζωής και σ' αυτές που καθημερινά και αέναα μας παρέχονται σε βαθμό ήπιας εκμετάλλευσης. Στις πρώτες ανήκουν τα ορυκτά καύσιμα, και η χαρακτηριστικά μη ήπια μορφή ενέργειας, η πυρηνική ενέργεια. Οι δεύτερες, έχουν βασική τους προέλευση τον Ήλιο. Η ακτινοβολούμενη απ' τον Ήλιο ενέργεια, που φτάνει στη Γη, εκτός από τη γενικότερη συμβολή της στη δημιουργία, ανάπτυξη και διατήρηση της ζωής στον πλανήτη μας, δίδει ακατάπαυστα ενέργεια, με διάφορες μορφές αξιοποίησης. Άμεσα θερμαίνει, εξατμίζει μεγάλες ποσότητες θαλασσινού νερού και συντηρεί τον γνωστό φυσικό κύκλο, δημιουργώντας τις λίμνες και τα ποτάμια, που αποτελούν πρόσθετη πηγή ενέργειας (υδατοπτώσεις). Θέτει σε κίνηση τις αέριες μάζες της ατμόσφαιρας (Αιολική ενέργεια), δημιουργεί τα κύματα (Ενέργεια κυμάτων) και συμβάλλει στη δημιουργία των θαλασσιών ρευμάτων. Αναρροφούμενο από συνδυασμένα υλικά παράγει ηλεκτρισμό (Φωτοβολταϊκό φαινόμενο). Συμβάλλει στην ανάπτυξη της χλωρίδας, η καύση δε των φυτικών προϊόντων παράγει ενέργεια (βιομάζα).

1.2.Κύριες Πηγές Ενέργειας σήμερα

Το κάρβουνο

Για πολλά χρόνια μέχρι σήμερα αποτελεί την κύρια καύσιμη ύλη. Σ' αυτό βασίστηκε κατά κύριο λόγο, η βιομηχανική επανάσταση. Μεγάλο μέρος της σημερινής παγκόσμιας βιομηχανικής παραγωγής βασίζεται στην ενέργεια από την καύση του ορυκτού άνθρακα.

Το πετρέλαιο

Η παγκόσμια παραγωγή του εντατικοποιήθηκε από τα μέσα του 19ου αιώνα, ενώ από τα μέσα του 20ου αιώνα, οι ρυθμοί εκμετάλλευσης πήραν εκρηκτικές διαστάσεις. Σήμερα, μετά από δύο πετρελαϊκές κρίσεις (1973 και 1979) και τη διαπίστωση ορατών πλέον επιπτώσεων στο περιβάλλον μας, συνειδητοποιούμε την ανάγκη αλλαγής του τρόπου ζωής μας και αναζήτησης λύσεων από το χώρο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα συμβατικά καύσιμα καλύπτουν το 85% της καταναλισκόμενης ενέργειας στις αναπτυγμένες χώρες και το 55%, στις υπό ανάπτυξη. Στις τελευταίες, το ποσοστό χρήσης πετρελαίου, ως ενεργειακής πηγής, συνεχίζει να αυξάνει, ενώ στις αναπτυγμένες χώρες παρατηρείται τάση μείωσής του, με σταδιακή διεύδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η καύση του άνθρακα, του πετρελαίου και των παραγώγων του δίδει, ως άμεσα προϊόντα, το CO₂, τα οξείδια του αζώτου και του θείου. Οι αυξημένες ποσότητες των αερίων αυτών, που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα, αποτελούν μια μόνιμη απειλή για το μέλλον μας, προκαλώντας ισχυρές κλιματικές αλλαγές και επιβαρυντική απόκλιση από τις κανονικές συνθήκες ισορροπίας του φαινομένου του θερμοκηπίου. Εκτιμάται ότι τα υπάρχοντα αποθέματά των πηγών αυτών θα επαρκέσουν ακόμα για περίπου 200 χρόνια για το κάρβουνο και 50 χρόνια για το πετρέλαιο.

Η πυρηνική ενέργεια

Από το 1945 και μετά, προστέθηκε στις μεγάλης ισχύος πηγές ενέργειας, η πυρηνική, στην οποία αρχικά βασίστηκαν πολλές ελπίδες. Σήμερα αντιλαμβανόμαστε με απόγνωση, την αδυναμία μας να λύσουμε το πρόβλημα της ανεξέλεγκτης διασποράς των πυρηνικών όπλων ή της διασφαλισμένης αποθήκευσης των πυρηνικών αποβλήτων και αισθανόμαστε τρόμο για τα ολοένα και πιο πιθανά πυρηνικά ατυχήματα. Από τα πιο σημαντικά, εκείνο στον πυρηνικό σταθμό του Three Mile Island της Πενσυλβάνιας (ΗΠΑ), τον Απρίλιο του 1979 και εκείνο στο Τσέρνομπιλ της Ρωσίας, τον Απρίλιο του 1986, τρομοκράτησαν όλο τον κόσμο.

Η πυρηνική ενέργεια προορίζεται, στο βαθμό που έχει αναπτυχθεί σήμερα, κυρίως για παραγωγή ηλεκτρισμού βάσης, δηλαδή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σταθερής ισχύος χωρίς δυνατότητα κάλυψης των διακυμάνσεων ζήτησης. Καλύπτει το 6,5% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης και το 17% της παγκοσμίως παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η παραγόμενη παγκοσμίως ηλεκτρική ισχύς σε πυρηνικά εργοστάσια ανέρχεται σε 370 GW. Στην Ευρώπη ξεπερνά τα 158,4

1.3. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας διακρίνεται από την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κυριότερες πηγές από τις οποίες τροφοδοτούνται οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι:

- Άνθρακας
- Πετρέλαιο
- Φυσικό αέριο
- Βιομάζα
- Απορρίμματα
- Πυρηνική ενέργεια
- Υδροηλεκτρική ενέργεια
- Γεωθερμική ενέργεια
- Ηλιακή ενέργεια - Φωτοβολταϊκά
- Ηλιακή Θερμική ενέργεια
- Άλλες πηγές

Τις πηγές αυτές μπορούμε να τις κατηγοριοποιήσουμε με κριτήριο το κατά πόσο μπορούν να αναπληρώνονται αυτόματα μετά από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Έτσι λοιπόν έχουμε τις πηγές που δεν μπορούν να ανανεωθούν σε χρόνο μικρότερο της τάξης των εκατομμυρίων ετών, όπως ο άνθρακας, η πυρηνική ενέργεια, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και τις πηγές που μπορούν να ανανεώνονται επαναλαμβανόμενα από τη φύση ή τη συνεισφορά του ανθρώπου, όπως η υδροηλεκτρική ενέργεια, η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, η βιομάζα (ξύλο, φυτά).

Σημειώνουμε ότι ο άνθρακας, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και τα πυρηνικά υλικά αποτελούν σήμερα τις κυριότερες πηγές ενέργειας σε παγκόσμιο, ευρωπαϊκό και ελληνικό επίπεδο (με εξαίρεση την πυρηνική ενέργεια).

Παρακάτω παρατίθεται ένας αντιπροσωπευτικός πίνακας (ΠΙΝΑΚΑΣ 1.3.1), ο οποίος παρουσιάζει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Παγκόσμια, Ευρώπη 25, Ελλάδα) καθώς και τις πηγές από τις οποίες αυτή προέρχεται, για το έτος 2005.

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΠΟ	ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ		ΕΥΡΩΠΗ 25		ΕΛΛΑΔΑ	
	GWh	%	GWh	%	GWh	%
Άνθρακα	6.944.328	39,61%	974.578	30,55%	35.380	59,62%
Πετρέλαιο	1.170.152	6,67%	130.956	4,11%	8.385	14,13%
Αέριο	3.418.676	19,50%	604.578	18,95%	8.991	15,15%
Βιομάζα	149.811	0,85%	50.370	1,58%	122	0,21%
Απορρίματα	77.471	0,44%	39.223	1,23%	139	0,23%
Πυρηνικά	2.738.012	15,62%	986.074	30,91%	0	0,00%
Υδροηλεκτρική	2.889.094	16,48%	336.677	10,55%	5.205	8,77%
Γεωθερμία	55.896	0,32%	5.523	0,17%	0	0,00%
Φωτοβολταϊκά	840	0,005%	716	0,02%	1	0,00%
Ηλιακή θερμότητα	1.608	0,01%	510	0,02%	0	0,00%
Άλλες πηγές	85.102	0,49%	60.950	1,91%	1.121	1,89%
ΣΥΝΟΛΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	17.530.990	100,00%	3.190.155	100,00%	59.344	100,00%

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1.3: Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας (στοιχεία 2005) Πηγή ΙΕΑ
(International Energy Agency) Energy Statistics

Από τα παραπάνω στοιχεία, παρατηρούμε πως πάνω από το 66% της παγκόσμιας παραγωγής στηρίζεται σε μη ανανεώσιμους γαιάνθρακες και υδρογονάνθρακες, οι οποίοι με την καύση τους παράγουν θερμότητα που με τη σειρά της μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η χρήση αυτών των υλών έχει δύο πολύ σοβαρά μειονεκτήματα:

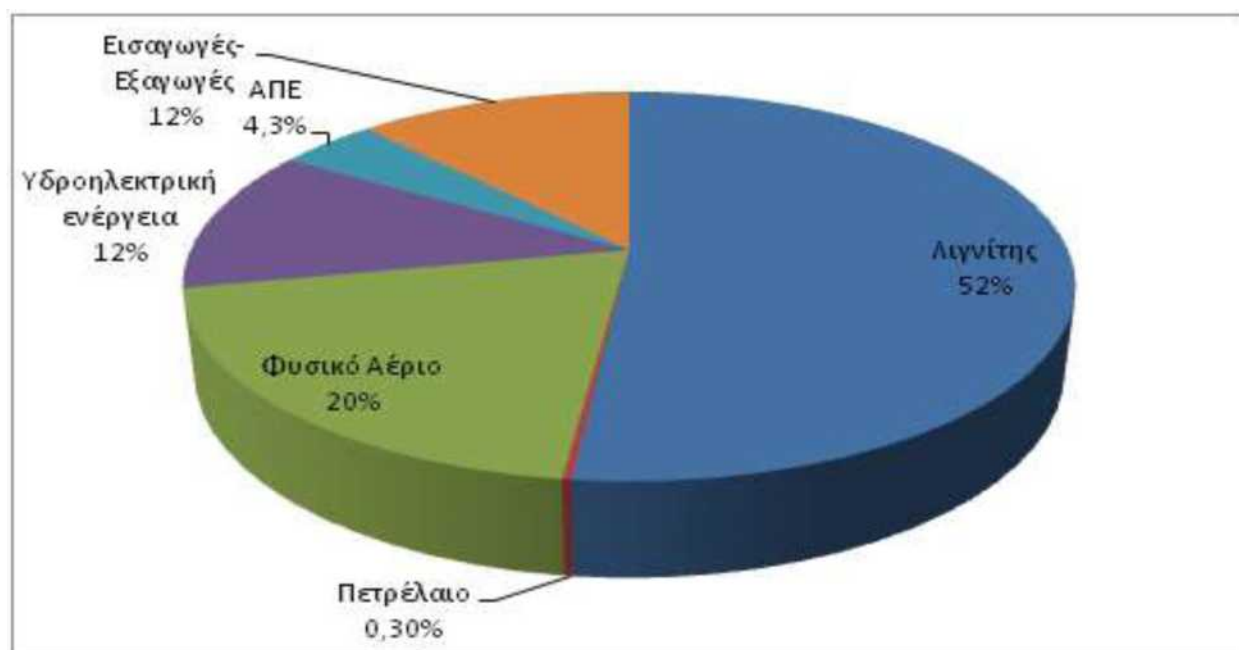
- Τα αποθέματα των γαιανθράκων και υδρογονανθράκων δεν είναι ανεξάντλητα.
- Εκπέμπουν ρύπους κατά την καύση τους και μολύνουν σημαντικά το περιβάλλον. Ο κυριότερος ρύπος είναι το διοξείδιο του άνθρακα, που αποτελεί την κυριότερη αιτία της δημιουργίας του φαινομένου του θερμοκηπίου και της υπερθέρμανσης του πλανήτη.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση στηρίζεται κατά 54% σε γαιάνθρακες και υδρογονάνθρακες, κατά 31% σε πυρηνική ενέργεια και μόλις κατά 15% σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η υψηλή χρήση της πυρηνικής ενέργειας αντιμετωπίζεται με σκεπτικισμό, λόγω των ιδιαίτερα αρνητικών επιπτώσεων σε περίπτωση ατυχήματος (όπως στο Chernobyl), αλλά και λόγω της υψηλής τοξικότητας των πυρηνικών αποβλήτων. Επιπλέον πρόβλημα είναι ότι τα πυρηνικά καύσιμα, όπως και οι υδρογονάνθρακες, είναι στο μεγαλύτερο μέρος τους εισαγόμενα από τρίτες χώρες υλικά. Τέλος, η πιθανή χρήση των πυρηνικών υλικών για πολεμικούς σκοπούς δημιουργεί ένα κλίμα αποστροφής και τρόμου απέναντι στην ευρεία χρήση τους.

Στην Ελλάδα, το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής (59,6%) στηρίζεται στην καύση γαιανθράκων χαμηλής ποιότητας, με χαμηλή απόδοση και υψηλή ποσότητα ρύπων ανά παραγόμενη MWh. Η κατάσταση αυτή κάνει πολύ δύσκολη την επίτευξη των στόχων της

Ελλάδας για μείωση των ρύπων. Αυτό εντείνεται από το γεγονός πως η χρήση των ΑΠΕ (Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας) είναι ιδιαίτερα μικρή, καθώς οι υδρογονάνθρακες συμμετέχουν κατά ένα 30% στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ανεβάζοντας τη χρήση ρυπογόνων γαιανθράκων και υδρογονανθράκων στο υψηλότερο 89% σε σχέση με το μέσο παγκόσμιο ποσοστό το οποίο είναι 66%.

Για το έτος 2010, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο διασυνδεδεμένο σύστημα της χώρας μας παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί (ΣΧΗΜΑ 1.3.1). Σε αυτό, παρατηρούμε μία σημαντική μείωση στο ποσοστό της παραγωγής που στηρίζεται στο λιγνίτη και το πετρέλαιο, αν και παραμένει ακόμη σε αρκετά υψηλά επίπεδα.



ΣΧΗΜΑ 1.3.1: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο διασυνδεδεμένο σύστημα της Ελλάδας (στοιχεία 2010)
Πηγή Invest In Greece Agency

Καθώς η ηλεκτρική ενέργεια είναι ένα απαραίτητο και ουσιώδες αγαθό, η κατανάλωση αυτής αυξάνεται όσο αναπτύσσεται η παγκόσμια οικονομία. Η σημαντική παγκόσμια οικονομική ανάπτυξη της τελευταίας εικοσαετίας έχει οδηγήσει σε διπλασιασμό της ζήτησης. Οι προβλέψεις για αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας οδηγούν στην άμεση ανάγκη εξεύρεσης λύσεων που θα μειώνουν την εξάρτηση από τα πεπερασμένα αλλά και ρυπογόνα καύσιμα. Οι λύσεις αναζητούνται στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ).

1.4. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από ΑΠΕ

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), όπως είναι ο ήλιος, ο άνεμος, τα ποτάμια, οι οργανικές ύλες, το ξύλο και τα απορρίμματα οικιακής και βιομηχανικής προέλευσης, ανανεώνονται μέσω του κύκλου της φύσης και θεωρούνται πρακτικά ανεξάντλητες. Υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον και είναι οι πρώτες μορφές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος μέχρι τις αρχές του 20ου αιώνα, οπότε και στράφηκε στην εντατική χρήση του άνθρακα και των υδρογονανθράκων.

Η πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1970 δημιούργησε διάφορους προβληματισμούς και ερωτήματα, όπως για παράδειγμα για πόσο ακόμη θα υπάρχουν οι μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τι θα γίνει εάν εξαντληθούν, ή για πόσο θα συνεχιστεί να αυξάνεται με τόσο γρήγορους ρυθμούς η ζήτηση ενέργειας. Επίσης, κατέστησε φανερό ότι η διακοπή του εφοδιασμού συμβατικών καυσίμων (π.χ. πετρέλαιο) εξαιτίας όχι μόνο της εξάντλησης των αποθεμάτων αλλά και για πολιτικούς λόγους, είναι μία κατάσταση πολύ πιθανή να συμβεί μέσα στις επόμενες δεκαετίες. Δόθηκε έτσι λοιπόν το έναυσμα για να δημιουργηθεί το ενδιαφέρον για την ευρύτερη αξιοποίηση των ΑΠΕ καθώς και για την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών έτσι ώστε ο άνθρωπος να πάψει να εξαρτάται από τον άνθρακα και τους υδρογονάνθρακες για να ικανοποιεί τις ενεργειακές του ανάγκες.

Επίσης, οι κυβερνήσεις πολλών χωρών συνειδητοποίησαν ότι οι ΑΠΕ μπορούν να αποτελέσουν μία σημαντική εγχώρια πηγή ενέργειας, με μεγάλες δυνατότητες ανάπτυξης σε τοπικό και εθνικό επίπεδο και αύξησαν έτσι τις επενδύσεις τους σε αυτές.

Τα βασικά πλεονεκτήματα χρήσης ΑΠΕ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι:

- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον
- Είναι διαθέσιμες σε κάθε χώρα και μειώνουν την ενεργειακή εξάρτηση από εισαγόμενους υδρογονάνθρακες
- Είναι διάσπαρτες γεωγραφικά και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, δίνοντας τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας έτσι τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες από τη μεταφορά ενέργειας
- Έχουν χαμηλό λειτουργικό κόστος, το οποίο δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων, δημιουργώντας αριθμό νέων θέσεων εργασίας, ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο.

Ως αποτέλεσμα, σήμερα, σε πολλές χώρες του πλανήτη, οι ΑΠΕ αξιοποιούνται αποτελεσματικά συνεισφέροντας σημαντικά στο ενεργειακό ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό και εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού.

Οι κυριότερες πηγές ΑΠΕ είναι:

- Αστικά και βιομηχανικά απορρίμματα
- Βιομάζα (στερεά, υγρή και αέρια)
- Γεωθερμία
- Ηλιακή ενέργεια (φωτοβολταϊκά και θερμική)
- Υδροηλεκτρική ενέργεια
- Αιολική ενέργεια

Η κατανομή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ (αντιπροσωπευτικά στοιχεία για το έτος 2005) παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα (ΠΙΝΑΚΑΣ 1.4.1).

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΠΟ	ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ		ΕΥΡΩΠΗ 25		ΕΛΛΑΔΑ	
	GWh	%	GWh	%	GWh	%
Αστικά απορρίμματα	47.628	1,46%	19.690	4,00%	0	0,00%
Βιομηχανικά απορρίμματα	29.843	0,92%	19.533	3,97%	139	2,11%
Στερεά βιομάζα	128.557	3,95%	37.896	7,70%	0	0,00%
Βιοαέριο	20.698	0,64%	12.362	2,51%	122	1,85%
Υγρά βιοκαύσιμα	556	0,02%	112	0,02%	0	0,00%
Γεωθερμία	55.896	1,72%	5.523	1,12%	0	0,00%
Ηλιακή θερμική ενέργεια	1.608	0,05%	510	0,10%	0	0,00%
Υδροηλεκτρική ενέργεια	2.889.094	88,69%	336.677	68,38%	5.205	79,01%
Ηλιακή ενέργεια - Φωτοβολταϊκά	840	0,03%	716	0,15%	1	0,02%
Κύματα, Ωκεανός	551	0,02%	518	0,11%	0	0,00%
Αιολική ενέργεια	82.259	2,53%	58.804	11,94%	1.121	17,02%
ΣΥΝΟΛΟ	3.257.530	100,00%	492.341	100,00%	6.588	100,00%

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.4.1: Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας με χρήση ΑΠΕ (στοιχεία 2005) Πηγή IEA (International Energy Agency) Energy Statistics

Η υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελεί την κυριότερη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Σε παγκόσμιο επίπεδο καλύπτει το 89% της ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και το 16,5% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα έργα που απαιτούνται για τη δημιουργία ενός υδροηλεκτρικού σταθμού παραγωγής έχουν πολλαπλά οφέλη,

καθώς με τα φράγματα αξιοποιείται ένα από τα πολυτιμότερα αγαθά, το νερό. Η βιομάζα αποτελούσε από την αρχή της ιστορίας του ανθρώπου τη βασική πηγή ενέργειας, και σήμερα αποτελεί το 4% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρισμού από ΑΠΕ.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, μετά την υδροηλεκτρική ενέργεια με 68,4%, σημαντικό ποσοστό αποτελεί η αιολική ενέργεια με 12%, καθώς πρόκειται για μία οικονομική λύση με ραγδαία αναπτυσσόμενη τεχνολογία.

Στην Ελλάδα, κυριότερη πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ είναι επίσης η υδροηλεκτρική ενέργεια με 79% και ακολουθεί η αιολική με 17%.

Η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε κάθε χώρα είναι συνάρτηση της διαθεσιμότητας της πρώτης ύλης αλλά και του κόστους της τεχνολογίας. Για αυτόν το λόγο, τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν χαμηλή διείσδυση όπως παρατηρούμε στον παραπάνω πίνακα, λόγω κυρίως της ακριβής τεχνολογίας τους ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια όμως, το κόστος της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών έχει σχετικά μειωθεί και σε συνδυασμό με την αύξηση της παραγωγής τους, η διείσδυσή τους συνεχώς αυξάνεται όπως θα δούμε και στη συνέχεια. Παρόλα αυτά, είναι άστοχο να πιστευτεί ότι στην φωτοβολταϊκή τεχνολογία το μόνο που υπάρχει είναι ένας αγώνας δρόμου όσον αφορά την τιμή (ή το κόστος), ο οποίος πρέπει να κερδηθεί. Αντιθέτως, μία πιο κοντινή ματιά σε όλες τις παραμέτρους που παρεμβαίνουν στο πρόβλημα της παροχής ενέργειας δείχνει ότι το “άμεσο κόστος” μιας ενεργειακής προοπτικής σπάνια είναι ο μοναδικός αποφασιστικός παράγοντας για την μαζική παραγωγή της.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα ασχοληθούμε με μία από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και συγκεκριμένα την ηλιακή ενέργεια. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να μετατραπεί άμεσα είτε σε ηλεκτρική, με τη χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων με τα οποία και θα ασχοληθούμε εκτενέστερα, είτε σε θερμική με τη χρήση ηλιακών θερμικών συλλεκτών. Τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται και συστήματα που χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για το δροσισμό κτιρίων.

Ο ηλιακός κλιματισμός -ως η διαδικασία παραγωγής ψύξης με πρωτογενή πηγή ενέργειας τη θερμότητα από την ηλιακή ακτινοβολία-, είναι ένας τομέας που αναμένεται να έχει σημαντική άνθιση τα επόμενα χρόνια.

Ο πλανήτης μας λαμβάνει κάθε ώρα από τον ήλιο ενέργεια της τάξης των 150 με 200 δισεκατομμύρια MWh, από την οποία όμως μόνο ένα μικρό ποσοστό φτάνει στην επιφάνεια της γης αφού το υπόλοιπο ανακλάται από την ατμόσφαιρα, τα σύννεφα, το έδαφος, τους ωκεανούς ή και απορροφάται θερμαίνοντας έτσι την επιφάνεια της γης. Η τροποποίηση της ακτινοβολίας που φτάνει από τον ήλιο, γίνεται από την ατμόσφαιρα με τους εξής μηχανισμούς: -απορρόφηση του φωτός από διάφορα αέρια, -διάχυση από μόρια αερίων, -απορρόφηση και περίθλαση από τη σκόνη και τα αέρια. Αξίζει να σημειώσουμε ότι η ακτινοβολούμενη ενέργεια από τον ήλιο είναι 600 φορές μεγαλύτερη από τις παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες του 2050. Παρόλο λοιπόν που δεν φτάνει όλη αυτή η ενέργεια στην επιφάνεια της γης, έστω και το 1/5 αυτής να φτάνει αρκεί και με το παραπάνω για να καλύψει πλήρως τις ανάγκες της ανθρωπότητας σε ενέργεια. Παρόλα αυτά, ο άνθρωπος είναι αδύνατο να εκμεταλλευτεί σε τέτοιο βαθμό την ηλιακή ενέργεια ώστε να εξαρτάται

αποκλειστικά από αυτή, καθώς κάτι τέτοιο θα απαιτούσε την κάλυψη τεράστιων εκτάσεων γης με ηλιακούς συλλέκτες.

Η ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.) και κυρίως της αιολικής και της φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας προωθείται και ενισχύεται σε όλο τον κόσμο με ισχυρά κίνητρα και πολύ υψηλούς ρυθμούς. Η αιολική ενέργεια εμφανίζεται για το παρόν πιο οικονομική και άρα περισσότερο προσιτή σε σχέση με την ηλιακή (φωτοβολταϊκή), κυρίως με τη μορφή αιολικών πάρκων συνδεδεμένων στο δίκτυο της ΔΕΗ. Μάλιστα, η κατασκευή αιολικών πάρκων έχει γνωρίσει σημαντική άνθιση τα τελευταία χρόνια στη χώρα μας και η συνολική εγκατεστημένη ισχύς έχει φτάσει τα 1300 MW, αν και υστερεί πολύ σε σχέση με άλλες ευρωπαϊκές χώρες. Το μειονέκτημα των φωτοβολταϊκών στοιχείων, παρά τα τόσα και σημαντικά πλεονεκτήματά τους, είναι ότι όπως είπαμε και παραπάνω παρουσιάζουν ακόμα υψηλό κατασκευαστικό κόστος. Πρέπει να σημειώσουμε όμως ότι η διαφορά κόστους παραγωγής της ηλεκτρικής KWh από πετρέλαιο και από ανανεώσιμες πηγές μειώνεται σταδιακά και προβλέπεται ότι μέσα στην επόμενη δεκαετία θα μπορεί να υπάρξει μία απευθείας σύγκριση κόστους ενέργειας. Επιπλέον, ένα σημείο που πρέπει να τονιστεί είναι ότι η μεγάλη διαφορά των ΑΠΕ σε σχέση με τις συμβατικές είναι ότι το *marginal cost* (το κόστος παραγωγής πλέον της απόσβεσης της επένδυσης - το κόστος καυσίμου στις συμβατικές πηγές) είναι ουσιαστικά μηδέν. Εφόσον ο ήλιος είναι διαθέσιμος, δεν κοστίζει περισσότερο η επιπλέον παραγωγή από φωτοβολταϊκά (και αντιστοίχως από αιολικά) εάν η εγκατάσταση υπάρχει ήδη. Αντιθέτως, το κόστος επιπλέον παραγωγής σε συμβατικούς σταθμούς είναι αρκετά υψηλό και μπορεί να φτάσει τα 3 λεπτά/KWh στους σταθμούς φυσικού αερίου (λαμβάνοντας υπόψη κόστος καυσίμου και δικαιωμάτων ρύπων).

Τέλος, αναφορικά με το πλαίσιο ενίσχυσης του ρυθμού διεύθυνσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων στο ενεργειακό ισοζύγιο και τη γενικότερη ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Α.Π.Ε.), η Ευρωπαϊκή Ένωση προωθεί σχετικά προγράμματα με ισχυρά οικονομικά κίνητρα. Προς την κατεύθυνση αυτή έχει συμβάλλει και η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε πολλά κράτη (Ευρωπαϊκή Οδηγία για την Ενέργεια, 19 Φεβρουαρίου 1997). Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να υπάρχουν κάθετα οργανωμένες ηλεκτρικές εταιρείες, δηλαδή εταιρείες που να καλύπτουν και τους τρεις τομείς της παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Μάλιστα έχουν τη δυνατότητα να ανεξαρτητοποιήσουν αυτούς τους τομείς και οποιοσδήποτε ιδιώτης έχει πρόσβαση στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, να παράγει με δικό του τρόπο κάποιο ποσό ενέργειας και είτε να το καταναλώνει ο ίδιος, είτε να το πουλάει στον τοπικό οργανισμό παροχής ενέργειας (όπως η Δ.Ε.Η. στην Ελλάδα), με την προϋπόθεση φυσικά ότι η ισχύς που παράγει πληροί ορισμένες προδιαγραφές. Ειδικά για το κλίμα και τις συνθήκες που επικρατούν στη χώρα μας, η ηλιακή και η αιολική ενέργεια κρίνονται ιδανικές για ιδιοπαραγωγή.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι σε παγκόσμια κλίμακα υπάρχει μία αυξημένη δραστηριοποίηση στον ευρύτερο χώρο των Α.Π.Ε. και προοιωνίζεται μία αλματώδης ανάπτυξη και πλήρης ενσωμάτωσή τους στην ενεργειακή παραγωγή.

Αξίζει να σημειώσουμε πάντως σε αυτό το σημείο ότι η ευρύτερη αξιοποίηση των ΑΠΕ επιβάλλεται σε παγκόσμιο επίπεδο και από το πρωτόκολλο του Κιότο, στο οποίο

αναφερόμαστε παρακάτω. Τέλος, το θεσμικό πλαίσιο της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση συμβάλλει και αυτό με τη σειρά του προς αυτή την κατεύθυνση.

1.5. Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου πρόκειται για ένα φυσικό φαινόμενο. Αυτό που αποτελεί απειλή για το πλανήτη μας είναι η υπερβολική εμφάνιση του φαινομένου, η οποία οφείλεται στις ανθρωπογενείς εκπομπές ρύπων. Έχει εξακριβωθεί ότι ορισμένα αέρια της ατμόσφαιρας (γνωστά και ως αέρια θερμοκηπίου), επιτρέπουν την διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας προς τη Γη, ενώ αντίθετα απορροφούν και επανεκπέμπουν προς το έδαφος ένα μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την επιφάνεια της. Αυτή η παγίδευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας από τα συγκεκριμένα αέρια ονομάζεται «φαινόμενο του θερμοκηπίου».

Πρόκειται για ένα γεωφυσικό φαινόμενο ουσιώδες και απαραίτητο για την ύπαρξη, τη διατήρηση και της εξέλιξη της ζωής στον πλανήτη. Χωρίς αυτόν τον μηχανισμό η μέση θερμοκρασία της Γης θα ήταν περίπου κατά 35°C χαμηλότερη, δηλαδή περίπου -20°C αντί για +15°C που είναι σήμερα, και η ζωή θα ήταν αδύνατη, στη μορφή που τη γνωρίζουμε.

Το εν λόγω φαινόμενο, στις φυσικές του διαστάσεις, δεν είναι επιβλαβές, αντίθετα έχει ζωτική σημασία για τη διατήρηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη στους 15°C περίπου. Το ανησυχητικό είναι η ενίσχυση του ως αποτέλεσμα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Οι ανθρωπογενείς εκπομπές θερμοκηπικών αερίων αυξάνουν τη δυνατότητα της ατμόσφαιρας να παγιδεύσει την υπέρυθρη ακτινοβολία της Γης.

Η αύξηση αυτή οδηγεί στην ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου και συνεπώς στην άνοδο της θερμοκρασίας του πλανήτη. Τα αέρια εκείνα των οποίων οι συγκεντρώσεις στην ατμόσφαιρα αυξάνονται σημαντικά λόγω της ανθρώπινης παρέμβασης. Εμάς μας ενδιαφέρουν οι εκπομπές ρύπων που προκαλούνται από τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τη χρήση της, άμεσα ή έμμεσα, δηλαδή από τον ενεργειακό τομέα.

1.6. Το Πρωτόκολλο του Κιότο

Το πρωτόκολλο του Κιότο, το οποίο θεσπίστηκε στις 11 Δεκεμβρίου 1997 στο Κιότο της Ιαπωνίας, διαδέχτηκε τη σύμβαση-πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για τις κλιματικές μεταβολές, είναι μία από τις σημαντικότερες διεθνείς νομοθετικές πράξεις καταπολέμησης των κλιματικών μεταβολών. Περιλαμβάνει τις δεσμεύσεις που έχουν αναλάβει οι εκβιομηχανισμένες χώρες για τον περιορισμό των οικείων εκπομπών των 6 αερίων (με κυριότερο το CO₂) που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, το οποίο ευθύνεται για την υπερθέρμανση του πλανήτη. Συγκεκριμένα, οι συνολικές εκπομπές των ανεπτυγμένων χωρών πρέπει να μειωθούν τουλάχιστον κατά 5% την περίοδο 2008-2012 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση στο σύνολό της υποχρεώνεται από το Πρωτόκολλο του Κιότο να μειώσει τις εκπομπές κατά 8% συνολικά. Στα πλαίσια του πρωτοκόλλου και με βάση τις εσωτερικές συμφωνίες σε επίπεδο Ε.Ε, η Ελλάδα έχει δεσμευθεί σε επίπεδο εσωτερικής συμφωνίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ότι οι συγκεκριμένες εκπομπές που ευθύνονται για τις κλιματικές αλλαγές, εντός της ελληνικής επικράτειας, δεν θα αυξηθούν περισσότερο από 25% ως το 2010, σε σχέση με τις εκπομπές του έτους βάσης που είναι το 1990.

Για την επίτευξη των εν λόγω στόχων, το Πρωτόκολλο προτείνει μια σειρά μέσων:

- ενίσχυση ή θέσπιση εθνικών πολιτικών μείωσης των εκπομπών (αύξηση της ενεργειακής αποτελεσματικότητας, ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κ.ά.)
- συνεργασία με τα άλλα συμβαλλόμενα μέρη (ανταλλαγή πείρας ή πληροφοριών, συντονισμός των εθνικών πολιτικών, μέσω αδειών εκπομπής, από κοινού εφαρμογής, και κατάλληλου μηχανισμού ανάπτυξης).

Ιδιαίτερη αναφορά αξίζει να γίνει σχετικά με το δεύτερο από τα δύο προαναφερθέντα και συγκεκριμένα στο σύστημα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου. Το σύστημα αυτό αποτελεί έναν μηχανισμό που έχει προβλεφθεί στο πρωτόκολλο για τη διευκόλυνση της επίτευξης των στόχων του με το μικρότερο δυνατό κόστος για την οικονομία. Στόχος του συστήματος αυτού είναι να δώσει κίνητρα στις εγκαταστάσεις να μειώσουν την εκπομπή αερίων ρύπων περισσότερο από ό,τι απαιτείται με βάση τη διεθνή συμφωνία και να δημιουργούν έτσι πρόσθετα έσοδα πωλώντας το υπόλοιπο του μεριδίου τους. Ταυτόχρονα, εγκαταστάσεις που αντιμετωπίζουν πρόβλημα στη συγκράτηση των εκπομπών τους εντός των ορίων που τους έχουν διατεθεί, θα μπορέσουν να αγοράσουν επιπλέον δικαιώματα ρύπανσης από άλλους που έχουν πλεόνασμα. Τέλος, εγκαταστάσεις που ακόμα και έτσι υπερβαίνουν τα όρια θα καταβάλλουν πρόστιμο για κάθε επιπλέον τόνο αερίου που παράγουν.

1.7. Το Θεσμικό Πλαίσιο της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση

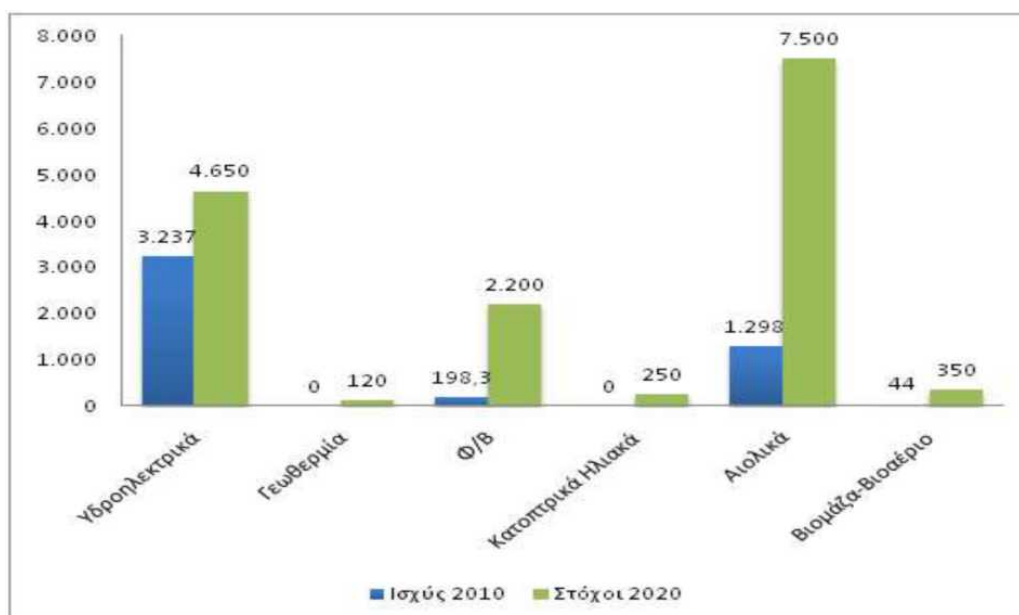
Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, στην παρουσίαση των στρατηγικών στόχων, χαρακτηρίζει την ενέργεια ως καθοριστικό παράγοντα ανταγωνιστικότητας και οικονομικής ανάπτυξης για την Ευρώπη.

Σύμφωνα με την Πράσινη Βίβλο του Νοεμβρίου του 2000, βασικός στόχος της ενεργειακής πολιτικής της Ευρωπαϊκής Κοινότητας είναι ο ασφαλής ενεργειακός εφοδιασμός όλων των καταναλωτών με προσιτό κόστος και με παράλληλη προστασία του περιβάλλοντος και προαγωγή υγιούς ανταγωνισμού στην ευρωπαϊκή αγορά ενέργειας.

Στο Ευρωπαϊκό Συμβούλιο της Λισσαβόνας το 2000, επισημάνθηκε η ανάγκη για επιτάχυνση του ανοίγματος των αγορών ενέργειας και τον Μάρτιο του 2001 η Επιτροπή ενέκρινε μία δέσμη μέτρων με σκοπό το πλήρες άνοιγμα των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου από τον Ιούλιο του 2007.

Η ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές διαδραματίζει πρωτεύοντα ρόλο στη διαφοροποίηση και την αειφορία των πηγών ενέργειας και στον αγώνα κατά της αλλαγής του κλίματος. Το πρόγραμμα altener (1999-2002), που θεσπίστηκε το 1993 και ανανεώθηκε το 1998, αποτέλεσε μία ουσιαστική προσπάθεια για την προώθηση των ΑΠΕ στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Με τη Λευκή Βίβλο του 1997, διαμορφώθηκαν κοινοτική στρατηγική και σχέδιο δράσης για τις ΑΠΕ. Ο κύριος στόχος που έθεσε η Λευκή Βίβλος ήταν να διπλασιαστεί το μερίδιο των ΑΠΕ στην ακαθάριστη εσωτερική κατανάλωση ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ώστε από 6% το 1997 να φτάσει το 12% το 2010 και τον Σεπτέμβριο του 2001 εκδόθηκε οδηγία του Συμβουλίου και του Κοινοβουλίου για την προαγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές. Ενδεικτικά, ένας από τους στόχους που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση είναι το 20% της παραγόμενης ενέργειας το 2020 να προέρχεται από ΑΠΕ, καλύπτοντας έτσι περίπου το 34% της συνολικής ζήτησης για ηλεκτρισμό στην ΕΕ. Σχετικά με την Ελλάδα, στο παρακάτω σχήμα (ΣΧΗΜΑ 1.7.1) φαίνεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ το έτος 2010 και οι στόχοι που έχουν τεθεί για το 2020.



ΣΧΗΜΑ 1.7.1: Εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ στην Ελλάδα το 2010 και στόχος για το έτος 2020 Πηγή Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής

1.8.Η Ανάπτυξη των ΑΠΕ στην Ελλάδα

Στη χώρα μας, τα προγράμματα ανάπτυξης των ΑΠΕ υποστηρίζονται και προωθούνται από πλευράς επίσημης πολιτείας, από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), που είναι ερευνητικός φορέας εποπτευόμενος από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) του Υπουργείου Ανάπτυξης, τα Περιφερειακά Ενεργειακά Γραφεία, τη ΔΕΗ, τα Ιδρύματα Τεχνολογίας και Έρευνας, τα Πανεπιστήμια, τα Τεχνολογικά Εκπαιδευτικά Ιδρύματα (ΤΕΙ), την Τοπική Αυτοδιοίκηση κ.α.

Εκτός αυτών, έντονη είναι ήδη η δραστηριότητα του ιδιωτικού τομέα, σ' όλο το φάσμα των εφαρμογών των ΑΠΕ. Η ανάπτυξη τους ενισχύεται από σχετικά προγράμματα της ΕΕ, η οποία επιχορηγεί όχι μόνο την έρευνα αλλά στηρίζει, ιδιαίτερα το τελευταίο διάστημα, εφαρμογές μεγάλης ισχύος, σε βιομηχανικές μονάδες, ξενοδοχεία κ.α.

Σημαντικό βήμα προώθησης των ΑΠΕ στη χώρα μας, μέσα στην τελευταία δεκαετία, απετέλεσε η χάραξη πιο συγκεκριμένης ενεργειακής πολιτικής και η θεσμοθέτηση νομοθετικού πλαισίου εγκατάστασης και αξιοποίησής τους. Η ανάπτυξη των ΑΠΕ και κυρίως της αιολικής και της ΦΒ ηλεκτρικής ενέργειας, προωθείται και ενισχύεται, με ισχυρά κίνητρα και υψηλούς ρυθμούς, σ' όλο τον αναπτυσσόμενο κόσμο.

Αιτία: τα συσσωρευμένα οικολογικά προβλήματα που δημιούργησε η αλόγιστη χρήση, αφενός των συμβατικών καυσίμων (Ρύπανση περιβάλλοντος), αφετέρου της πυρηνικής ενέργειας (πυρηνικά ατυχήματα). Η κύρια δυσκολία που αντιμετωπίζουν σήμερα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, προκειμένου να ενσωματωθούν στην καθημερινή ζωή, είναι το σχετικά υψηλό κόστος της παραγόμενης kWh τους, σε σχέση με το κόστος της kWh πετρελαίου. Μεταξύ των δύο κύριων τρόπων παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας, αιολικής και φωτοβολταϊκής, η αιολική εμφανίζεται σήμερα οικονομικότερη και άρα περισσότερο προσιτή, κυρίως με τη μορφή αιολικών πάρκων, συνδεδεμένων στο δίκτυο της ΔΕΗ.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά τους, όπως το ότι δεν έχουν κινούμενα μέρη, είναι αθόρυβα και μπορούν να εγκατασταθούν παντού όπου δε σκιάζει, παρουσιάζουν ακόμα υψηλό κατασκευαστικό κόστος. Η διαφορά κόστους παραγωγής της ηλεκτρικής κιλοβατώρας από ΑΠΕ και από πετρέλαιο μειώνεται σταδιακά, ώστε σύντομα, μέσα στην επόμενη δεκαετία, να μπορεί να προβλεφθεί μια απ' ευθείας σύγκριση κόστους ενέργειας. Ήδη το κόστος εγκατάστασής τους εμφανίζεται ανταγωνιστικό απέναντι στη συμβατική παραγωγή ενέργειας, σε περιπτώσεις μη συνδεδεμένων με το δίκτυο περιοχών (Απομονωμένοι οικισμοί, νησιά κ.α.). Τον Ιούνιο του 2006 ψηφίστηκε ο νέος νόμος για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ν. 3468/06), με ιδιαίτερως ευνοϊκά κίνητρα σε ιδιώτες, αλλά κυρίως σε επιχειρήσεις που σκοπεύουν να επενδύσουν στην παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας. Τα βασικά σημεία - κίνητρα του νέου νόμου είναι:

- Επιδoteίται η αρχική εγκατάσταση σε ποσοστό από 30% έως 55% της αξίας του συστήματος, ενώ επιδοτούμενο είναι και το επιτόκιο σε περίπτωση δανεισμού (Αναπτυξιακός νόμος 3299/04).
- η τιμή πώλησης της ηλιακής κιλοβατώρας είναι 0,40-0,50 ευρώ ανάλογα με την ισχύ του φωτοβολταϊκού συστήματος και τον τόπο εγκατάστασης. Η τιμή είναι μεγαλύτερη στα νησιά και μικρότερη στην ηπειρωτική χώρα.
- Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων θα μπορεί να πωλείται στη ΔΕΗ εγγυημένα για μία 20ετία, σε τιμή η οποία θα αναπροσαρμόζεται με βάση τον πληθωρισμό ή τις αυξήσεις των τιμολογίων της ΔΕΗ. Η σύμβαση πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στη ΔΕΗ ισχύει για 10 έτη και μπορεί να παρατείνεται για επιπλέον 10, μονομερώς, με έγγραφη δήλωση του παραγωγού.

Τον Ιανουάριο του 2009 ψηφίστηκε νέος νόμος για τα φωτοβολταϊκά (ν.3734/2009), όπου κυρίως τροποποιούνται άρθρα του προηγούμενου νόμου. Ρυθμίζονται θέματα αδειοδότησης και τιμολόγησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκούς σταθμούς. Η σύμβαση εγγυημένης πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας συνάπτεται για είκοσι (20) έτη, με τιμή αναφοράς από σχετικό πίνακα σταδιακά αποκλιμακούμενης τιμής της κιλοβατώρας μέχρι και το επόμενο έτος (2014), που αντιστοιχεί στο μήνα και το έτος υπογραφής της σύμβασης. Δίδεται, επίσης, η δυνατότητα, μετά από κοινή υπουργική απόφαση, εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σε κτίρια, με συμψηφισμό της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς το δίκτυο και της καταναλισκόμενης απ' αυτό. Οι προτάσεις για αδειοδότηση υποβάλλονται στη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), η οποία είναι ανεξάρτητη διοικητική αρχή και έχει κυρίως γνωμοδοτικές και εισηγητικές αρμοδιότητες στον τομέα της ενέργειας. Παρατηρείται, σήμερα, σε παγκόσμια κλίμακα, μια αυξημένη δραστηριότητα στον ευρύτερο τομέα των ΑΠΕ, που προοιωνίζει την αλματώδη ανάπτυξη και ενσωμάτωσή τους στην ενεργειακή παραγωγή, μέσα στην πρώτη εικοσαετία του νέου αιώνα.

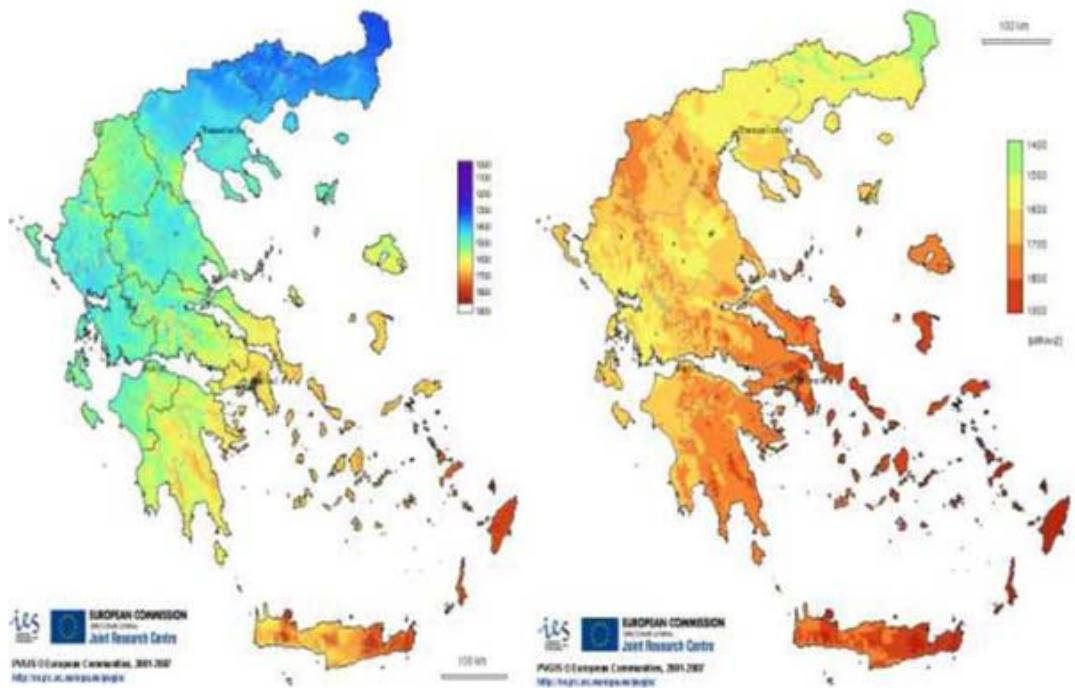
Η αύξηση της ποσοστιαίας συμμετοχής των ΑΠΕ στην παγκόσμια ενεργειακή παραγωγή, θα επιφέρει δραστικό περιορισμό στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου, που θα εκλύονταν από την καύση ενεργειακά ισοδύναμης ποσότητας συμβατικών καυσίμων. Κατά συνέπεια, η αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό δυναμικό παγκοσμίως, σε συνέργεια με άλλα παράλληλα διορθωτικά μέτρα που έχουν ληφθεί και ήδη εφαρμόζονται, αναμένεται να συμβάλλουν καταλυτικά στην αποκατάσταση της διαταραγμένης θερμοκρασιακής ισορροπίας του πλανήτη μας, στα φυσιολογικά επίπεδα.

1.9.Η Ελληνική Πραγματικότητα

Η χώρα μας συγκαταλέγεται μεταξύ των χωρών υψηλής ακτινοβολίας. Αυτό αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα στην εφαρμογή των φωτοβολταϊκών συστημάτων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Μάλιστα το πόσο πλούσια είναι η χώρα μας σε ηλιοφάνεια φαίνεται και σε μελέτες που έχουν γίνει από το Κέντρο Ερευνών της Ευρωπαϊκής Ένωσης και απεικονίζονται στα ΣΧΗΜΑΤΑ 1.3 και 1.4.

Οι χάρτες αυτοί αντιπροσωπεύουν την ετήσια ποσότητα ενέργειας (kWh/m²) που προέρχεται από την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο (ΣΧΗΜΑ 1.3) καθώς και σε επίπεδο με τη βέλτιστη γωνία κλίσης (ΣΧΗΜΑ 1.4) και αφορούν διάστημα 10 ετών και συγκεκριμένα την περίοδο 1981-1990.



ΣΧΗΜΑ 1.3: Ετήσια ποσότητα ενέργειας (kWh/m^2) που προέρχεται από την πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο

Πηγή European Research Centre

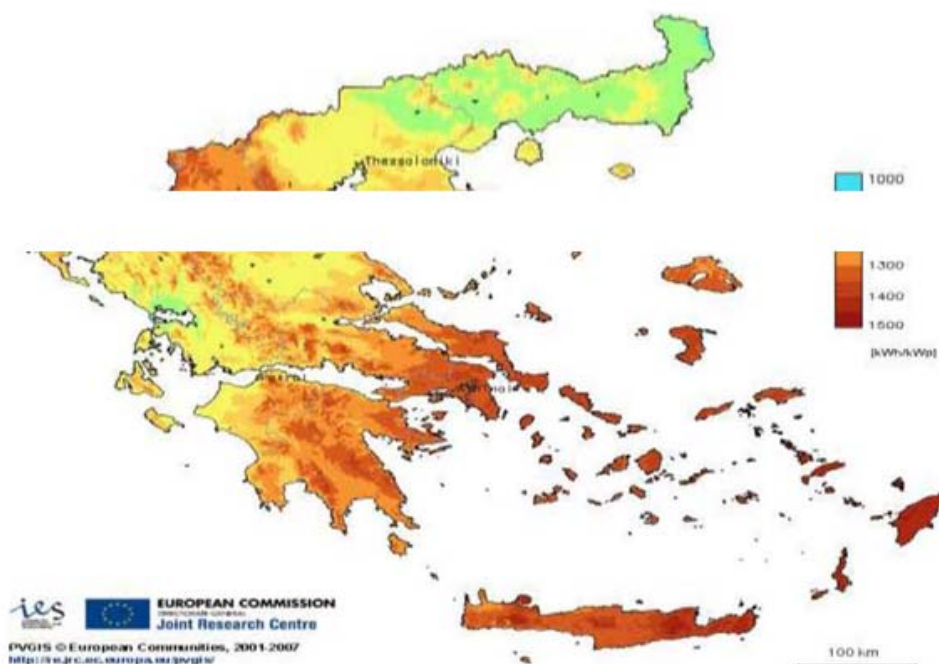
ΣΧΗΜΑ 1.4: Ετήσια ποσότητα ενέργειας (kWh/m^2) που προέρχεται από την πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας σε επίπεδο με τη βέλτιστη γωνία κλίσης

Πηγή European Research Centre

Εύκολα λοιπόν μπορούμε να διακρίνουμε ότι ακόμη και στην περίπτωση που δεν έχουμε τη βέλτιστη γωνία κλίσης αλλά οριζόντιο επίπεδο, καμία περιοχή της Ελλάδας δεν υπολείπεται των 1250 kWh/m^2 , ενώ το μεγαλύτερο μέρος της χώρας διαθέτει από 1400 έως 1800 kWh/m^2 .

Σε γενικές γραμμές, ένα φωτοβολταϊκό σύστημα στην Ελλάδα παράγει κατά μέσο όρο ετησίως περί τις $1.150\text{-}1.400$ κιλοβατώρες ανά εγκατεστημένο κιλοβάτ ($\text{kWh}/\text{έτος}/\text{KW}$). Όπως είναι προφανές, στις νότιες και πιο ηλιόλουστες περιοχές της χώρας ένα φωτοβολταϊκό παράγει περισσότερο ηλιακό ηλεκτρισμό απ' ότι στις βόρειες.

Ενδεικτικά, στον χάρτη που ακολουθεί (ΣΧΗΜΑ 1.5) παρουσιάζεται η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια εκφρασμένη σε kWh , από φωτοβολταϊκό σύστημα με συλλέκτες κρυσταλλικού Πυριτίου, ισχύος 1 kWp και υπό βέλτιστη κλίση.



ΣΧΗΜΑ 1.5: Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh) από φωτοβολταϊκό σύστημα με συλλέκτες κρυσταλλικού Πυριτίου, ισχύος 1 kWp και υπό βέλτιστη κλίση Πηγή European Research Centre

(Σημειώνεται ότι στις τιμές αυτές δεν περιλαμβάνονται απώλειες λόγω υψηλών θερμοκρασιών, αντανάκλασης καθώς και εκείνων που οφείλονται σε καλωδιώσεις και μετατροπείς)

Όλα τα πλεονεκτήματα όμως που προσφέρουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα δεν στάθηκαν ικανά μέχρι σήμερα να απογειώσουν την αγορά των φωτοβολταϊκών στη χώρα μας, αν και τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία σημαντική πρόοδος. Είναι χαρακτηριστικό ότι εντός του 2010 τα φωτοβολταϊκά σχεδόν τετραπλασίασαν τη διείσδυσή τους στο ενεργειακό μας σύστημα, ξεκινώντας από 53 MW στο τέλος του 2009 και καταλήγοντας στα 198 MW στο τέλος του 2010. Σε αυτή την πρόοδο έχουν συμβάλει και σημαντικά προγράμματα ενίσχυσης των Φ/Β, τα οποία έχει θεσπίσει το Ελληνικό κράτος, και περιλαμβάνουν γενναίες επιδοτήσεις τόσο της αγοράς και εγκατάστασης Φ/Β, όσο και της παραγόμενης ηλιακής κιλοβατώρας.

Παρόλα αυτά, με τον νόμο για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Ν. 3851/2010) δεν υπάρχουν πια επιδοτήσεις για τα φωτοβολταϊκά, όπως ίσχυε με τον παλαιότερο νόμο. Δεδομένης όμως της διαχρονικής πτώσης των τιμών που αναμένεται να συνεχιστεί μακροχρόνια, οι επενδύσεις είναι βιώσιμες και κερδοφόρες και μόνο με την ταρίφα που παρέχεται από το νόμο στην τιμή πώλησης της παραγόμενης ηλιακής κιλοβατώρας.

Κεφάλαιο 2°

2.1. Το Φ/Β στοιχείο

Η απ' ευθείας μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των φωτοβολταϊκών στοιχείων, που αλλιώς ονομάζονται και φωτοστοιχεία ή ηλιακά κύτταρα ή κυψελίδες. Αυτά ουσιαστικά αποτελούν την καρδιά κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος, τα κύρια συστατικά των φωτοβολταϊκών γεννητριών. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι ουσιαστικά δίοδοι ημιαγωγών σε μορφή δίσκου, που καθώς δέχονται στην επιφάνειά τους την ηλιακή ακτινοβολία, παρουσιάζεται μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και στην πίσω όψη τους. Ο μηχανισμός δημιουργίας αυτής της δίοδου ημιαγωγών και η εμφάνιση της διαφοράς δυναμικού περιγράφονται παρακάτω στο κεφάλαιο 2. Το υλικό που χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία των φωτοβολταϊκών κυψελίδων, είναι το Πυρίτιο (Si). Το πυρίτιο είναι ένα από τα πλέον διαδεδομένα στοιχεία στη φύση (αποτελεί περίπου το 28% του στερεού φλοιού της γης) με τη μορφή διαφόρων ενώσεων του. Το οξείδιο του πυριτίου (SiO₂), αποτελεί το κύριο συστατικό της άμμου. Με διαδοχικές εργασίες λοιπόν καθαρισμού της πρώτης ύλης (άμμος) παίρνουμε το τελικό προϊόν, δηλαδή το πυρίτιο, το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλή έως και πολύ υψηλή καθαρότητα (99,999999%). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία Πυριτίου διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με τη δομή του βασικού υλικού ή τον ιδιαίτερο τρόπο παρασκευής.

Οι διαφορετικοί τύποι είναι οι εξής:

- ΦΒ στοιχεία μονοκρυσταλλικού Πυριτίου (Single-crystal Silicon): Το βασικό υλικό είναι μονοκρυσταλλικό. Το πάχος του υλικού είναι σχετικά μεγάλο (Wafer ~ 300μm). Χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέσης απόδοσης/επιφάνειας ή «ενεργειακής πυκνότητας». Η απόδοσή τους στη βιομηχανία κυμαίνεται μεταξύ 15% έως 18% για το πλαίσιο. Χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος κατασκευής. Χρώμα: Σκούρο μπλε.
- ΦΒ στοιχεία πολυκρυσταλλικού Πυριτίου (Multicrystalline Silicon mc-Si): Δυνατότητα κατασκευής μεγάλων επιφανειών. Συνήθως κόβονται σε τετραγωνικής μορφής στοιχεία. Το πάχος τους είναι επίσης περίπου 0,3 χιλιοστά. Στην επιφάνεια της κυψελίδας διακρίνονται οι διαφορετικές μονοκρυσταλλικές περιοχές. Μάλιστα, όσο μεγαλύτερες είναι οι διαστάσεις των μονοκρυσταλλικών περιοχών, τόσο υψηλότερη η απόδοση του πολυκρυσταλλικού ΦΒ στοιχείου. Η απόδοση κυμαίνεται από 13% έως και 15% σε βιομηχανική μορφή ΦΒ πλαισίου. Το κόστος παρασκευής τους είναι μικρότερο σε σχέση με το αντίστοιχο του μονοκρυσταλλικού πυριτίου, γι' αυτό και έχουν λίγο χαμηλότερη τιμή. Χρώμα: Γαλάζιο
- ΦΒ στοιχεία ταινίας Πυριτίου (Ribbon Silicon): Δημιουργία λεπτής ταινίας από τηγμένο υλικό. Πρόκειται για μια σχετικά νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Προσφέρει έως και 50% μείωση στην χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις «παραδοσιακές τεχνικές» κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών κυψελών πυριτίου. Η απόδοση κυμαίνεται περί το 13%.
- ΦΒ στοιχεία άμορφου Πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon): Τεχνολογία λεπτών επιστρώσεων ή υμενίων (films), θεωρητικά πολύ χαμηλού κόστους παραγωγής, εξαιτίας της μικρής χρησιμοποιούμενης μάζας υλικού. Ο χαρακτηρισμός «άμορφο»,

προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου. Το λεπτό επίστρωμα σχηματίζεται επάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης χαμηλού κόστους. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αυτά, έχουν αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις προηγούμενες κατηγορίες. Συγκεκριμένα, η απόδοση αυτών των ΦΒ στοιχείων κυμαίνεται από 6% έως 8%. Με την τεχνολογία αυτή, παρασκευάζονται ΦΒ στοιχεία με διαδοχικές ενώσεις δύο ή τριών στρωμάτων με διαφορετικό ενεργειακό χάσμα, με σκοπό την αύξηση του αξιοποιήσιμου τμήματος του ηλιακού φάσματος (π.χ. ΦΒ στοιχεία από κράμα Πυριτίου με Άνθρακα και Γερμάνιο, τριών επαφών, με απόδοση ~13%).

Σημειώνεται σε αυτό το σημείο ότι με τον όρο απόδοση (ή συντελεστής απόδοσης) ενός ΦΒ στοιχείου ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το στοιχείο προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνειά του.

Ακολουθούν χαρακτηριστικές εικόνες των τεσσάρων κατηγοριών φωτοβολταϊκών στοιχείων Πυριτίου:



EIKONA 2.1: Φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού Πυριτίου



EIKONA 2.2: Φωτοβολταϊκό στοιχείο πολυκρυσταλλικού Πυριτίου



EIKONA 2.3: Φωτοβολταϊκό στοιχείο ταινίας Πυριτίου

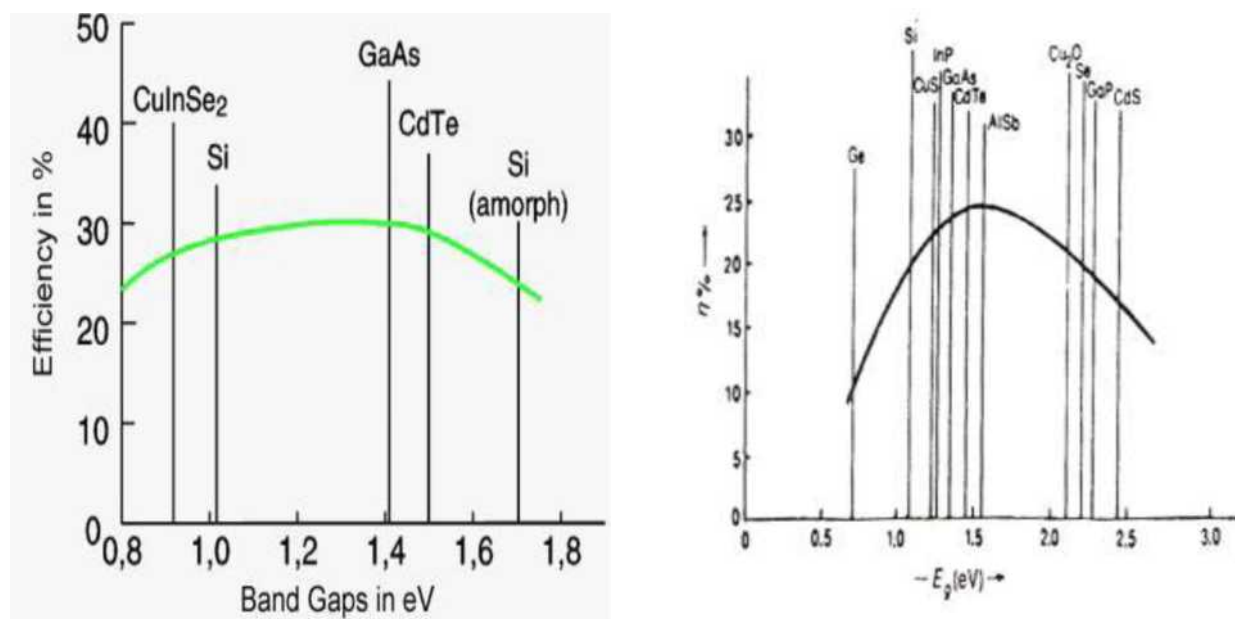


EIKONA 2.4: Φωτοβολταϊκό στοιχείο άμορφου Πυριτίου

Εκτός από το Πυρίτιο, σαν πρωταρχικό υλικό για την κατασκευή ηλιακών κυττάρων, η έρευνα έχει στραφεί και σε άλλα υλικά με ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Ένα από αυτά είναι το Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs). Είναι ένας σύνθετος ημιαγωγός με σχεδόν ιδανικό ενεργειακό χάσμα για θεωρητικά μέγιστο βαθμό απόδοσης. Ο μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης που έχει επιτευχθεί για επίγεια ακτινοβολία προέκυψε από κύτταρα με GaAs και ήταν 22%, σε σχέση με το 18% που έχει επιτευχθεί για το Πυρίτιο. Παρόλα αυτά, η τοξικότητα του GaAs και η έλλειψη επαρκών ποσοτήτων Ga (άρα αυξημένο κόστος) συνιστούν σημαντικά μειονεκτήματα.

Το κυριότερο κριτήριο για τον καθορισμό του είδους του ημιαγωγού που επιλέγεται ως υλικό για την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων, είναι η τιμή του ενεργειακού διακένου (ενεργειακό χάσμα, περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο), η οποία καθορίζει και την απόδοση του στοιχείου. Στο σχήμα που ακολουθεί (ΣΧΗΜΑ 2.1.1) παρουσιάζονται οι θεωρητικά μέγιστες αποδόσεις των πιο σημαντικών ΦΒ στοιχείων, ως συνάρτηση του ενεργειακού χάσματος του αντίστοιχου ημιαγωγού από τον οποίο είναι κατασκευασμένα.



ΣΧΗΜΑ 2.1.1: Απεικόνιση των ιδανικών αποδόσεων των πιο σημαντικών ΦΒ στοιχείων, ως συνάρτηση του ενεργειακού χάσματος των αντίστοιχων ημιαγωγών, στους 300°

Παρατηρούμε ότι ο μέγιστος βαθμός απόδοσης συμβαίνει για ενεργειακό χάσμα στην περιοχή 1.4-1.6 eV. Συγκεκριμένα, καταδεικνύεται ότι οι μεγαλύτερες θεωρητικές αποδόσεις μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας είναι περίπου 25% και μπορούν να πραγματοποιηθούν με ΦΒ στοιχεία από ημιαγωγούς με ενεργειακό χάσμα περίπου 1.5 eV.

Το ενεργειακό χάσμα του Πυριτίου είναι μικρότερο από το βέλτιστο αλλά η θεωρητικά μέγιστη απόδοση είναι ακόμη πολύ υψηλή.

Σχετικά με την τάση και το ρεύμα που μπορεί να δώσει ένα ηλιακό κύτταρο, ανάλογα με το υλικό της κατασκευής του και την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται, ένα ηλιακό κύτταρο μπορεί να δώσει μέχρι 0.5-1.0 Volt και πυκνότητα ρεύματος μέχρι 20-40 mA ανά cm της επιφάνειάς του.

Τέλος, όσον αφορά το κόστος των φωτοβολταϊκών στοιχείων, αυτό παρουσιάζει μία ραγδαία μείωση που οφείλεται στη συνεχή αύξηση της παραγωγής ημιαγωγικών υλικών και τη βελτίωση της τεχνολογίας Πυριτίου, ενώ ταυτόχρονα η απόδοση των ΦΒ στοιχείων συνεχώς αυξάνεται πλησιάζοντας τη μέγιστη θεωρητική τιμή τους. Για την εκτίμηση του κόστους των ΦΒ στοιχείων χρησιμοποιείται συνήθως το κόστος ανά watt αιχμής (W_p , peak watt) που είναι το κόστος που αντιστοιχεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος 1W όταν δέχεται ηλιακή ακτινοβολία με ένταση 1KW/m². Για παράδειγμα, το κόστος ηλιακού στοιχείου 10€/W_p σημαίνει πως το κόστος ενός ή περισσοτέρων φωτοβολταϊκών στοιχείων που παράγουν ηλεκτρική ισχύ 1 W, όταν εκτεθούν σε ηλιακή ακτινοβολία έντασης 1KW/m², είναι 10€. Από μία σύντομη έρευνα αγοράς, προκύπτει ότι στις μέρες μας το κόστος των ΦΒ του εμπορίου είναι περίπου 1,35€/W + ΦΠΑ.

2.2. Ημιαγωγοί

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, κατασκευάζονται κυρίως από ημιαγωγούς. Οι ημιαγωγοί είναι στοιχεία τετρασθενή με τετραεδρική κρυσταλλική δομή, όπως το πυρίτιο (Si). Ένας ημιαγωγός διακρίνεται από τα μέταλλα και τους μονωτές με βασικό κριτήριο την τυπική ηλεκτρική του συμπεριφορά. Σε κανονικές συνθήκες λοιπόν ισχύουν τα εξής:

- οι μονωτές, πρακτικά, δεν άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα, χαρακτηριζόμενοι από τεράστια ειδική αντίσταση
- τα μέταλλα αντιθέτως, ως καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού
- οι ημιαγωγοί αποτελούν μία ενδιάμεση κατηγορία αγωγών με ειδική αντίσταση ανάλογη της χημικής τους σύνθεσης

Οι ημιαγωγοί διακρίνονται σε ενδογενείς, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από την ίδια στοιχειακή σύνθεση σε όλη την έκτασή τους, και σε ημιαγωγούς προσμίξεων, που δημιουργούνται αν ένας ενδογενής ημιαγωγός εμπλουτιστεί με κατάλληλο τρόπο με άτομα άλλου στοιχείου.

Στους ημιαγωγούς λοιπόν, 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 μία μεταβολή.

Η ενέργεια που παρέχεται στο σώμα και κατανέμεται στα άτομά του, προκαλεί την ελευθέρωση πολλών ηλεκτρονίων από τους δεσμούς. Τα ηλεκτρόνια αυτά λοιπόν,

απομακρύνονται από την περιοχή του δεσμού τους στο κρυσταλλικό πλέγμα, χάρη στην κινητική ενέργεια που απέκτησαν και γίνονται ευκίνητοι φορείς του ηλεκτρισμού, δίνοντας στον ημιαγωγό μία αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Έχουμε λοιπόν μία μετάβαση ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους (VALENCE BAND) στη ζώνη αγωγιμότητας (CONDUCTION BAND). Παράλληλα όμως, αφήνουν πίσω τους στη ζώνη σθένους ένα δεσμό από τον οποίο λείπει ένα ηλεκτρόνιο, που καλείται οπή. Είναι φανερό ότι το ενεργειακό διάκενο (ή ενεργειακό χάσμα) 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 μίας οπής. (Πιο συγκεκριμένα, ενεργειακό χάσμα είναι η διαφορά ενέργειας μεταξύ του πάνω μέρους της ζώνης σθένους και του κάτω μέρους της ζώνης αγωγιμότητας, είναι δε η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για να ελευθερωθεί ένα ηλεκτρόνιο, σταθερή για κάθε υλικό, μετράται σε μονάδες eV και στην περίπτωση του πυριτίου είναι 1.1 eV).

Αν λοιπόν στα ηλεκτρόνια των δεσμών του κρυστάλλου προσφερθεί μια ποσότητα ενέργειας π.χ. αν δεχθούν μία δέσμη ακτινοβολίας που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια hf μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού ($E_g < hf$), τότε συμβαίνει το φαινόμενο που περιγράφηκε παραπάνω και έχουμε την εμφάνιση ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών. Αντιθέτως, αν η δέσμη ακτινοβολίας αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια hf μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού ($E_g > hf$), τότε τα ηλεκτρόνια των δεσμών του κρυστάλλου δεν μπορούν να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας και παραμένουν στη ζώνη σθένους.

Θα περιγράψουμε τώρα τη διαδικασία δημιουργίας ημιαγωγών προσμίξεων,

μελετώντας για αυτόν το λόγο τον κυριότερο εκπρόσωπο των ημιαγωγών, το πυρίτιο. Το άτομο του πυριτίου έχει 4 ηλεκτρόνια σθένους (δηλαδή 4 ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα), καθένα από τα οποία ανήκει σε ένα δεσμό με ένα άλλο άτομο πυριτίου.

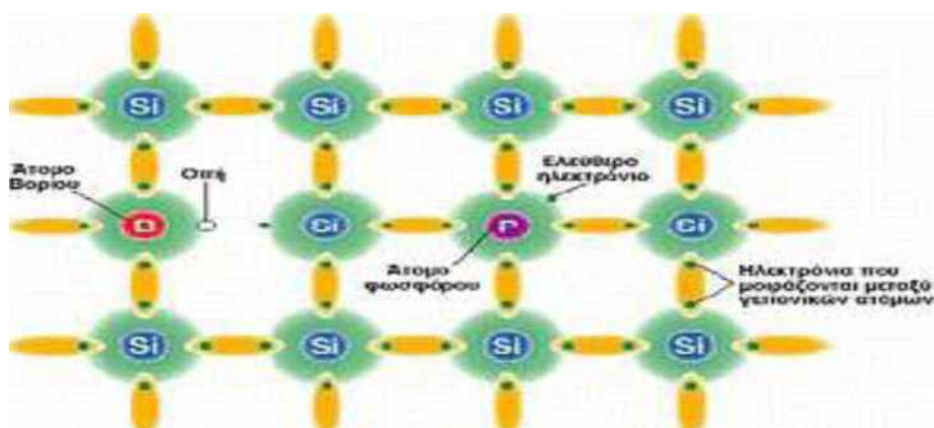
Αν εισάγουμε σε έναν καθαρό κρύσταλλο πυριτίου μία πρόσμιξη, αντικαθιστώντας ένα άτομο πυριτίου με ένα άτομο από κάποιο πεντασθενές στοιχείο (π.χ. φώσφορος, P), τότε το άτομο-πρόσμιξη θα αντικαταστήσει ένα άτομο πυριτίου προσφέροντας 4 ηλεκτρόνια σθένους για δημιουργία ομοιοπολικών δεσμών με ηλεκτρόνια σθένους γειτονικών ατόμων πυριτίου, ενώ θα υπάρχει περίσσεια ενός ηλεκτρονίου που δεν θα ανήκει σε δεσμό. Το επί πλέον ηλεκτρόνιο (φορέας πλειονότητας) δεν βρίσκεται ούτε στη ζώνη σθένους ούτε στη ζώνη αγωγιμότητας, αλλά σε μία ενδιάμεση στάθμη πολύ κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας. Με λίγη ενέργεια λοιπόν μπορεί να μεταβεί στη ζώνη αγωγιμότητας και να κινηθεί σαν ελεύθερο ηλεκτρόνιο, χωρίς το φόβο να επανασυνδεθεί με κάποια οπή αφού δεν έχει δημιουργήσει πίσω του κάποια οπή αλλά ένα θετικό ιόν φωσφόρου (κατιόν, P⁺). Έτσι ένας κρύσταλλος πυριτίου, όπου ένας μεγάλος αριθμός ατόμων του έχουν αντικατασταθεί με άτομα φωσφόρου θα έχει πολλά ελεύθερα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας και έναν αντίστοιχο αριθμό θετικών ιόντων στην κρυσταλλική του δομή. Άρα, το πεντασθενές άτομο συμπεριφέρεται στο πλέγμα σαν δότης (DONOR) ηλεκτρονίων και ο αντίστοιχος κρύσταλλος που δημιουργείται καλείται τύπου -n (n-TYPE)

Αντίστοιχα με τα παραπάνω, αν σε έναν καθαρό κρύσταλλο πυριτίου αντικαταστήσουμε ένα άτομο πυριτίου με ένα άτομο από κάποιο τρισθενές στοιχείο (π.χ. βόριο, B), τότε το

άτομο-πρόσμιξη θα προσφέρει τα 3 ηλεκτρόνια σθένους του για τη δημιουργία ομοιοπολικών δεσμών με ηλεκτρόνια σθένους τριών γειτονικών ατόμων πυριτίου, αλλά από τον τέταρτο δεσμό του αντικαθιστούμενο ατόμου πυριτίου θα λείπει ένα ηλεκτρόνιο, δηλαδή θα υπάρχει μία οπή. Με την απορρόφηση ενός μικρού ποσού ενέργειας, ένα ηλεκτρόνιο από ένα γειτονικό πλήρη δεσμό μπορεί να καλύψει την κενή θέση, αφήνοντας παράλληλα στην προηγούμενη θέση του μία οπή και μετατρέποντας το άτομο B σε ανιόν (B⁻). Έτσι, ένας κρύσταλλος πυριτίου «ντοπαρισμένος» με πολλά άτομα βορίου διαθέτει ένα μεγάλο αριθμό οπών που είναι δυνατόν να θεωρηθούν σαν ελεύθερα θετικά φορτία και να μετακινηθούν μέσω του κρυσταλλικού πλέγματος. Προσμίξεις αυτού του τύπου καλούνται δέκτες (ACCEPTORS), διότι οι οπές τους δέχονται ηλεκτρόνια, και ο αντίστοιχος κρύσταλλος που δημιουργείται καλείται τύπου-p (p-TYPE).

Σε ένα υλικό τύπου-n, τα ηλεκτρόνια (αρνητικά φορτία) αποτελούν τους φορείς πλειονότητας (MAJORITY CARRIERS) ενώ οι οπές τους φορείς μειονότητας (MINORITY CARRIERS). Αντίστροφα, σε ένα υλικό τύπου-p, τους φορείς πλειονότητας αποτελούν οι οπές (θετικά φορτία), ενώ τους φορείς μειονότητας τα ηλεκτρόνια.

Στο παρακάτω σχήμα (ΣΧΗΜΑ 2.2.1) παριστάνεται ένα κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με άτομα πρόσμιξης:



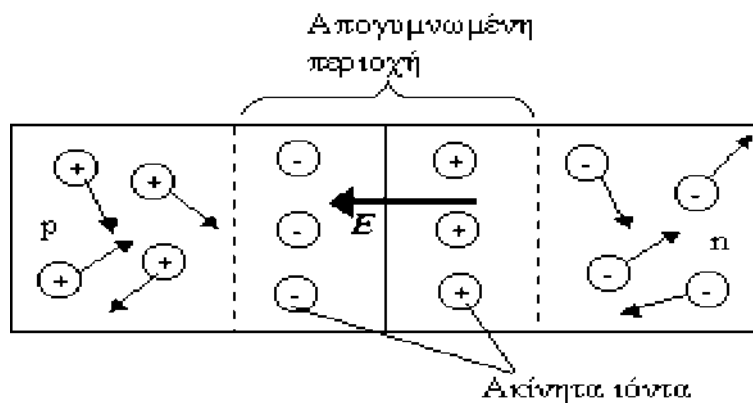
Σχήμα 2.2.1 : Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με άτομα πρόσμιξης

Όταν σε μία 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, αν φέρουμε σε επαφή ένα υλικό τύπου-n και ένα υλικό τύπου-p, δηλαδή σχηματιστεί μία ένωση p-n (διάταξη διόδου ημιαγωγού), τότε ένα μέρος από τις οπές του υλικού τύπου-p διαχέεται προς το υλικό τύπου-n όπου οι οπές είναι λιγότερες και ταυτόχρονα ένα μέρος από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του υλικού τύπου - n διαχέεται προς το υλικό τύπου-p όπου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι πολύ λιγότερα. Το παραπάνω φαινόμενο συνίσταται σε ένα ρεύμα διάχυσης (I_δ). Σημειώνουμε ότι η διαχωριστική γραμμή που δημιουργείται μεταξύ των δύο υλικών καλείται επαφή (JUNCTION) και αποτελεί την εστία δημιουργίας του φράγματος δυναμικού, το οποίο

αποτελεί ουσιαστική προϋπόθεση για τη λειτουργία του ηλιακού κυττάρου όπως θα δούμε και παρακάτω. Αυτή η διαδικασία μεταφοράς των φορτίων και η αύξηση της συγκέντρωσης των φορέων μειονότητας στις περιοχές κοντά στη διαχωριστική επιφάνεια (περιοχή αραίωσης) των υλικών τύπου p και n, ανατρέπουν την ισορροπία που υπήρχε πριν και δημιουργούν μία ανισορροπία φορτίων στις δύο πλευρές της επαφής: αρνητικά φορτία (επιπλέον ηλεκτρόνια) στην πλευρά τύπου-p της επαφής και θετικά φορτία στην πλευρά τύπου-n της επαφής. Έτσι λοιπόν οι δύο πλευρές της ένωσης p-n φορτίζονται με αντίθετα ηλεκτρικά φορτία. Η διαδικασία αυτή βέβαια δεν συνεχίζεται απεριόριστα. Οι φορτισμένοι φορείς που μεταφέρθηκαν στις δύο πλευρές της επαφής δημιουργούν ένα ηλεκτρικό πεδίο που ενεργεί σαν φράγμα και αντιτίθεται στην παραπέρα ροή των φορέων. Έχουμε λοιπόν τη δημιουργία μιας διαφοράς 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. Ωστόσο, οι φορείς μειονότητας δεν εμποδίζονται από το φράγμα δυναμικού. Αντίθετα μάλιστα, (χωρίς φωτισμό στη περίπτωση που μελετάμε ηλιακό κύτταρο) υπάρχει μικρός αριθμός φορέων μειονότητας, δηλαδή ελεύθερα ηλεκτρόνια στο υλικό τύπου-p και οπές στο υλικό τύπου-n, τα οποία οδηγούνται από το ηλεκτρικό πεδίο της επαφής στην αντίθετη πλευρά, δηλαδή στο υλικό τύπου-n και στο υλικό τύπου-p αντίστοιχα. Το φαινόμενο αυτό συνίσταται σε ένα ρεύμα ολισθήσεως.

Στη μόνιμη κατάσταση, μέσα στη διάταξη κυκλοφορούν δύο ρεύματα, το ρεύμα διάχυσης και το ρεύμα ολίσθησης. Μάλιστα, σε συνθήκες ισορροπίας (στην περίπτωση που αναφερόμαστε σε ένα ηλιακό κύτταρο, εννοούμε ότι αυτό δεν φωτίζεται), λίγοι φορείς πλειονότητας που αποκτούν τυχαία αρκετή ενέργεια ώστε να διασχίσουν το φράγμα συνιστούν ένα ρεύμα διάχυσης που αντισταθμίζεται από ίσο και αντίθετο ρεύμα ολίσθησης που οφείλεται σε φορείς μειονότητας, οπότε τελικά δεν υπάρχει ρεύμα στον κρύσταλλο.

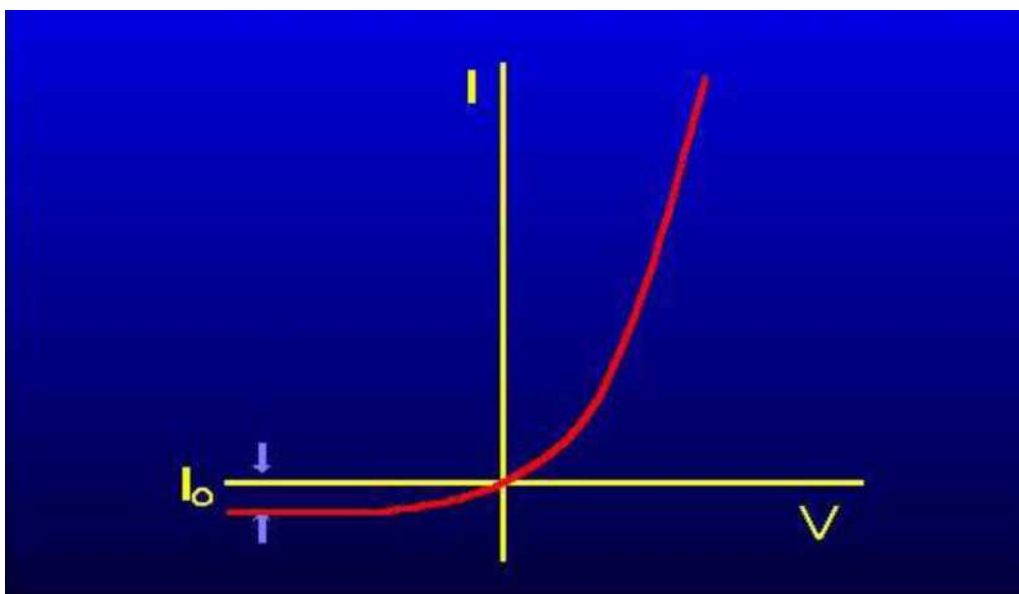
Στο σχήμα που ακολουθεί (ΣΧΗΜΑ 2.2.2) παρουσιάζεται η κατάσταση που περιγράψαμε παραπάνω, όταν φέρουμε σε επαφή έναν ημιαγωγό τύπου -p με έναν ημιαγωγό τύπου-n.



ΣΧΗΜΑ 2.2.2: Ημιαγωγική επαφή p-n (ή κρυσταλλοδίοδος)

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, ολόκληρη η επαφή αποτελείται από τρεις ξεχωριστές περιοχές. Την περιοχή τύπου-p, την περιοχή απογυμνώσεως ή ζώνη φραγμού και την περιοχή τύπου-n. Η περιοχή απογυμνώσεως δημιουργείται όταν, σύμφωνα και με αυτά που αναφέραμε παραπάνω, κινούμενα ηλεκτρόνια του δότη διαχέονται προς το τύπου-p μέρος της επαφής, αφήνοντας πίσω τους ακίνητα θετικά ιόντα. Αντιστρόφως, οπές διαχέονται προς το τύπου-n μέρος και αφήνουν πίσω τους μια περιοχή από ακίνητα αρνητικά ιόντα. Η περιοχή αυτή λοιπόν που επεκτείνεται μερικά μικρόμετρα πέρα από την επαφή ονομάζεται απογυμνωμένη διότι έχει αποψιλωθεί από κινητούς φορείς φορτίου. Το ηλεκτρικό πεδίο που υπάρχει σε αυτή και το φράγμα δυναμικού που δημιουργείται εμποδίζει όπως αναφέραμε και παραπάνω την περαιτέρω διάχυση οπών και ηλεκτρονίων κατά μήκος της επαφής όταν δεν εφαρμόζεται εξωτερική τάση.

Τέλος, το βασικό ηλεκτρικό χαρακτηριστικό μίας ημιαγωγικής επαφής p-n είναι ότι, όταν εφαρμόζεται στα άκρα της ηλεκτρική τάση, κατά τη μία ή την άλλη φορά, άγει ηλεκτρικό ρεύμα με χαρακτηριστικά διαφορετική ένταση σε κάθε περίπτωση. Ουσιαστικά μπορούμε να πούμε ότι επιτρέπει να περάσει το ρεύμα προς μία μόνο κατεύθυνση. Συγκεκριμένα, όταν πολώνεται κατά την ορθή φορά (Forward bias), δηλαδή ο θετικός πόλος της πηγής συνεχούς τάσεως συνδέεται με τη μεριά του ημιαγωγού p και ο αρνητικός με τη μεριά του ημιαγωγού n, τότε αυξανόμενης της εφαρμοζόμενης τάσης, το φράγμα δυναμικού μειώνεται και το ρεύμα παίρνει δυσανάλογα μεγάλες τιμές (αυξάνεται εκθετικά). Αντιθέτως, όταν πολώνεται κατά την ανάστροφη φορά (Reverse bias), τότε το φράγμα δυναμικού αυξάνεται και το ρεύμα παίρνει πολύ μικρότερες τιμές και έχει αντίστροφη φορά, συγκριτικά με την προηγούμενη κατάσταση, παρουσιάζοντας μία σχεδόν σταθερή τιμή, δηλαδή σχεδόν ανεξάρτητη της ανάστροφης ηλεκτρικής τάσης. Στο (ΣΧΗΜΑ 2.2.3) παριστάνεται η χαρακτηριστική καμπύλη I-V σε ορθή και ανάστροφη πόλωση (ιδανική χαρακτηριστική).

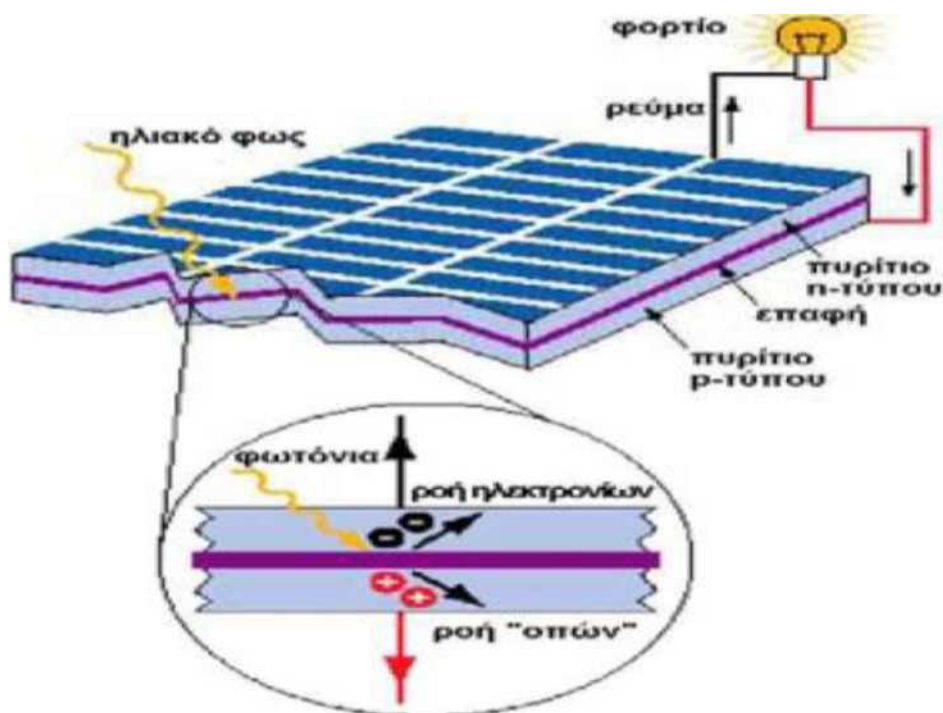


ΣΧΗΜΑ 2.2.3: Ιδανική χαρακτηριστική I-V, επαφής p-n

2.3. Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με τη μορφή ενός δίσκου που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Η ένωση p-n δηλαδή εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου. Όταν το ηλιακό κύτταρο (ηλιακό στοιχείο) φωτίζεται, κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Παράλληλα όμως εμφανίζεται και μία σπή, λαμβάνοντας υπόψη τα όσα αναφέραμε και στην προηγούμενη παράγραφο. Δημιουργείται έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μία περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και σπές), πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου πρόσημου), μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου.

Έστω λοιπόν ότι έχουμε το παρακάτω ηλιακό κύτταρο (ΣΧΗΜΑ 2.3.1), όπου η εμπρός του όψη, δηλαδή αυτή που φωτίζεται, είναι τύπου -n. Άρα, αυτό το κύτταρο χαρακτηρίζεται ως n-p ή n/p. Το υλικό τύπου-n αποτελεί τον αρνητικό και το υλικό τύπου-p τον θετικό πόλο του κυττάρου.



Τα φωτόνια της ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο στην εμπρός του όψη παράγουν ζεύγη ηλεκτρονίων-σπών. Έστω ότι ένα τέτοιο ζεύγος λοιπόν δημιουργείται στο υλικό τύπου-n. Η σπή του ζεύγους έχει ένα σχετικά μικρό χρονικό διάστημα που μπορεί να είναι ελεύθερη, διότι είναι πολύ πιθανό να επανασυνδεθεί (με διάφορους μηχανισμούς) με ένα από τα πολυπληθή ηλεκτρόνια που υπάρχουν στο υλικό τύπου-n. Τα ηλιακά κύτταρα, εν

τούτοις, σχεδιάζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο αντίστοιχος φορέας (οπή στη συγκεκριμένη περίπτωση) να φθάσει στην περιοχή της επαφής πριν του δοθεί η ευκαιρία επανασύνδεσης με κάποιον φορέα αντίθετου πρόσημου (ηλεκτρόνιο στη συγκεκριμένη περίπτωση), οπότε θα αποδώσει την ενέργειά του υπό μορφή θερμότητας χωρίς να συμβάλλει στο φωτόρρευμα που μας ενδιαφέρει. Από τη στιγμή που η οπή θα βρεθεί στο πεδίο της επαφής, επιταχύνεται από το φράγμα δυναμικού προς το υλικό τύπου-p, όπου υπάρχουν ελάχιστα ηλεκτρόνια και δεν υπάρχει μεγάλος κίνδυνος επανασύνδεσης. Επί πλέον υπάρχει μικρή πιθανότητα επιστροφής στο υλικό τύπου -n διότι πρέπει να υπερνικήσει το φράγμα δυναμικού. Από την άλλη μεριά, το ηλεκτρόνιο του ζεύγους παραμένει στο υλικό τύπου-n, διότι απωθείται από το φράγμα δυναμικού που υπάρχει στην επαφή. Ανάλογα φαινόμενα συμβαίνουν όταν το φως παράγει ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών σε υλικό τύπου-p.

Η διαδικασία αυτή διαχωρισμού των φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές) που παράγονται σε ένα φωτιζόμενο ηλιακό κύτταρο, δημιουργεί πλεόνασμα αρνητικών φορτίων στο υλικό τύπου-n και θετικών φορτίων στο υλικό τύπου-p. Εμφανίζεται λοιπόν μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, δηλαδή ουσιαστικά 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 επάνω στην επιφάνεια του στοιχείου. Έτσι, αν συνδέσουμε την πλευρά τύπου-n με την πλευρά τύπου-p του κυττάρου μέσω ενός εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος, θα έχουμε ροή ρεύματος μέσω του κυκλώματος. Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Τέλος, σημειώνουμε ότι υπάρχει και ένας αριθμός φορέων που αφού δημιουργηθούν στο φωτιζόμενο κύτταρο, επανασυνδέονται και εξαφανίζονται. Επίσης, ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται στην επιφάνεια του στοιχείου, ενώ ένα άλλο μέρος της διαπερνά το στοιχείο χωρίς να απορροφηθεί.

Όταν λοιπόν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται κατάλληλη ακτινοβολία, διεγείρεται παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, το φωτόρρευμα I_L , που η τιμή του είναι ανάλογη προς τα φωτόνια που απορροφά το στοιχείο. Η φορά του φωτορεύματος είναι αυτή του ενδογενούς πεδίου, δηλαδή από τον ημιαγωγό τύπου-n στον ημιαγωγό τύπου-p. Το φωτόρρευμα λοιπόν είναι ρεύμα ολίσθησης και έχει φορά αντίθετη του συμβατικού ρεύματος.

Η τιμή του φωτορεύματος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτάται από πολλούς κατασκευαστικούς παράγοντες, όπως ο συντελεστής ανάκλασης στην επιφάνεια του στοιχείου, ο συντελεστής απορρόφησης και το πάχος του ημιαγωγού, το πλήθος των επανασυνδέσεων των φορέων κλπ.

Συνοψίζοντας λοιπόν, το ΦΒ φαινόμενο είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού δύο διαφορετικών εσωτερικών φαινομένων:

- Της φωτοδημιουργίας «ελεύθερων» ηλεκτρικών φορέων (οπές και ηλεκτρόνια) στο εσωτερικό των ημιαγωγών
- Της δημιουργίας εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή της επαφής δύο ημιαγωγών. Αυτό προκαλεί τη δημιουργία του φράγματος δυναμικού, το οποίο οδηγεί στο

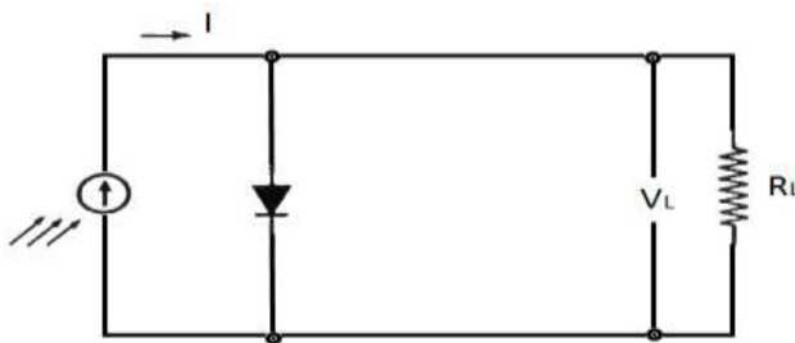
διαχωρισμό των παραγόμενων ζευγών ηλεκτρονίων-οπών και τη δημιουργία μιας διαφοράς δυναμικού.

Σχετικά με τη δημιουργία του ηλεκτροστατικού πεδίου, το οποίο συνεπάγεται και την εμφάνιση του φράγματος δυναμικού, εκτός από τον τρόπο που αναφέραμε παραπάνω, με τις προσμίξεις δηλαδή των τμημάτων p και n μίας ομοένωσης, δηλαδή υλικού από τον ίδιο βασικά ημιαγωγό (π.χ. πυρίτιο), αυτό μπορεί να προέρχεται επίσης και από διόδους διαφορετικών υλικών. Για παράδειγμα αναφέρουμε τις διόδους Schottky, που σχηματίζονται όταν έρθουν σε επαφή ένας ημιαγωγός με ένα μέταλλο.

2.4. Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των Φ/Β στοιχείων

2.4.1 ΠΡΩΤΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ (Ιδανικό ηλιακό κύτταρο). Σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος (MPP)

Για να προχωρήσουμε σε μία πρώτη εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, μπορούμε να το αναπαραστήσουμε με το πολύ απλοποιημένο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του παρακάτω σχήματος (ΣΧΗΜΑ 2.8):



ΣΧΗΜΑ 2.8: Απλό ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ΦΒ στοιχείου

Μπορούμε λοιπόν να θεωρήσουμε ότι το φωτοβολταϊκό στοιχείο (ιδανικό) αποτελεί μία πηγή σταθερού ρεύματος που ελέγχεται από μία δίοδο.

Θα μελετήσουμε τώρα τι συμβαίνει όταν το ηλιακό κύτταρο είναι υπό το σκότος και υπό ηλιακή ακτινοβολία.

- Το ηλιακό κύτταρο υπό σκότος

Το ηλιακό κύτταρο υπό σκότος δεν είναι ενεργή συνιστώσα. Λειτουργεί σαν p-n επαφή, δηλαδή σαν δίοδος. Εξωτερικά φαίνεται σαν δέκτης ενέργειας καθ' όσον δεν παράγει ούτε τάση ούτε ρεύμα. Εάν συνδεόταν με εξωτερική παροχή, η θεωρία δείχνει ότι V και I συνδέονται με την εξίσωση της διόδου (ΣΧΕΣΗ 2.2):

$$I_D = I_0(e^{qV/kT} - 1) \quad (2.2)$$

όπου I_D το ρεύμα του κυττάρου-διόδου (ρεύμα σκότους),

V η τάση του κυττάρου,

I_0 το ρεύμα κόρου της διόδου,

γ σταθερά ιδανικότητας της διόδου, με τιμές μεταξύ 1 και 2. Οφείλεται σε φαινόμενα επανασύνδεσης που συμβαίνουν στην περιοχή της επαφής,

T η απόλυτη θερμοκρασία,

k σταθερά Boltzmann, $q = 1.6 \times 10^{-19}$ (electronic charge)

- Φωτιζόμενο ηλιακό κύτταρο

Το ηλιακό κύτταρο υπό φωτισμό δίδει ένα φωτόρευμα I_L όπως αναφέραμε και παραπάνω. Το ρεύμα λοιπόν που γεννάται από το ηλιακό κύτταρο και είναι διαθέσιμο στα άκρα του είναι ίσο με:

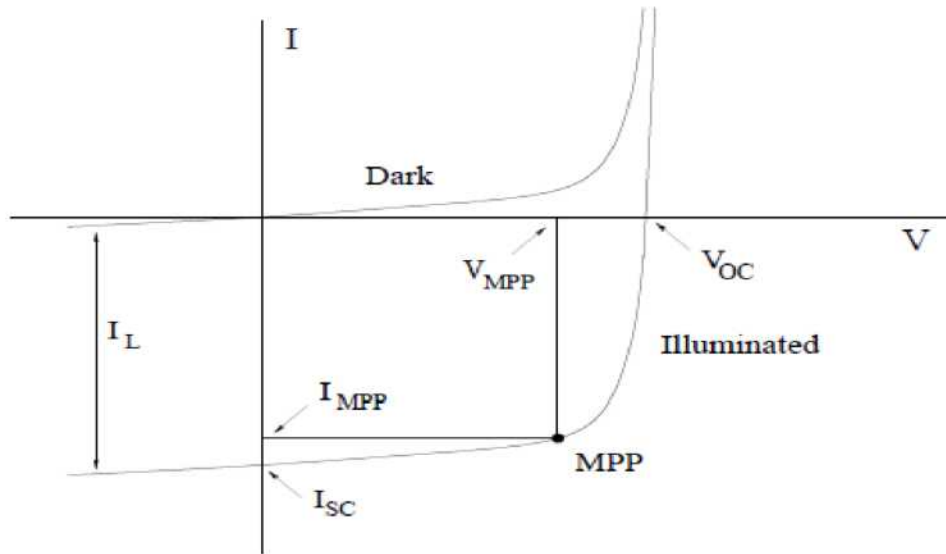
$$I = I_D - I_L = I_0(e^{qV/kT} - 1) - I_L \quad (2.3)$$

Παρατηρούμε λοιπόν, όπως άλλωστε έχουμε αναφέρει και προηγουμένως, ότι το συνολικό ρεύμα στο ηλιακό κύτταρο είναι το άθροισμα δύο συνιστωσών:

α) του ρεύματος διάχυσης, οι τιμές του οποίου ακολουθούν την καμπύλη $I-V$ της διόδου και

β) του ρεύματος ολίσθησης, το οποίο είναι το φωτόρευμα I_L .

Για να κατασκευάσουμε λοιπόν την χαρακτηριστική καμπύλη $I-V$ του φωτιζόμενου ηλιακού κυττάρου, προσθέτουμε δύο καμπύλες: την $I-V$ της μη φωτιζόμενης διόδου και την ευθεία $I = -I_L$ του φωτορεύματος, που αποτελεί την $I-V$ της πηγής σταθερού ρεύματος. Συνεπώς, σε κάθε τιμή του I_D προσθέτουμε το $-I_L$ και βρίσκουμε το ρεύμα του κυττάρου (I). Αυτό παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (ΣΧΗΜΑ 2.9), όπου απεικονίζονται η καμπύλη $I-V$ ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου στο σκοτάδι (Dark) και στο φως (Illuminated). Η σημαντική περιοχή βρίσκεται στο τέταρτο τεταρτημόριο. Εκεί το ΦΒ στοιχείο συμπεριφέρεται ως πηγή ενέργειας και άρα παρέχει ενέργεια σε έναν καταναλωτή ($P = VI < 0$).

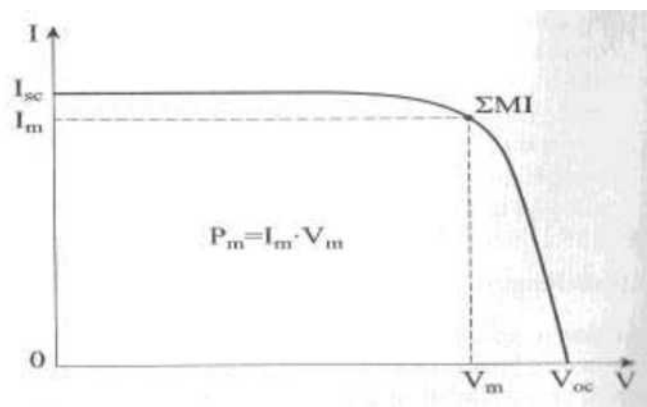


ΣΧΗΜΑ 2.9: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός ΦΒ στοιχείου, στο σκοτάδι (Dark) και στο φως (Illuminated)

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειώσουμε ότι για λόγους κυκλωματικής ανάλυσης, έχει επικρατήσει η αναπαράσταση της I-V χαρακτηριστικής του κυττάρου (ουσιαστικά αναφερόμαστε μόνο στο τμήμα του 4^{ου} τεταρτημορίου, αφού αυτό είναι το σημαντικότερο) να γίνεται στο 1^ο τεταρτημόριο, δηλαδή ανεστραμμένο ως προς τις τιμές του ρεύματος. Για το λόγο αυτό, αντί για τη σχέση (2.3), χρησιμοποιούμε την ακόλουθη σχέση (2.4) για να εκφράζουμε το ρεύμα του κυττάρου:

$$I = I_L - I_D = I_L - I_0(e^{qV/kT} - 1) \quad (2.4)$$

Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V που χρησιμοποιούμε λοιπόν, παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί (ΣΧΗΜΑ 2.10):



ΣΧΗΜΑ 2.10: Το βασικό τμήμα της καμπύλης, ανεστραμμένο στο 1^ο τεταρτημόριο

Στην περίπτωση αυτή και στην κατάσταση σταθερού φωτισμού, τα δύο ρεύματα που κυκλοφορούν μέσα στην επαφή, είναι αντιθέτου φοράς με απολύτως ίσες τιμές, $I_s = -I_c$ άρα το συνολικό ρεύμα του ΦΒ στοιχείου είναι $I = 0$.

Το φως δημιουργεί ζεύγη ελευθέρων φορέων, το ισχυρό ενδογενές πεδίο ωθεί τους αντιθέτου φορτίου φορείς στους χώρους που περιέχουν τους όμοιους τους ηλεκτρικούς φορείς. Η κίνησή τους προσδιορίζει το φωτόρευμα.

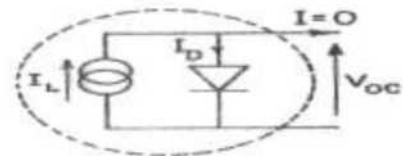
Αυξανόμενων των συγκεντρώσεων των ηλεκτρικών φορέων στους δύο χώρους, αυξάνεται η τάση να διαχυθούν προς τις αντίθετες περιοχές, διαπερνώντας τον εσωτερικό ηλεκτρικό φραγμό. Το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο στην επαφή ελαττώνεται εξαιτίας του αναπτυσσόμενου αντιθέτου ηλεκτρικού πεδίου των αυξημένων πλέον συγκεντρώσεων των φορέων πλειονότητας, έτσι ώστε οι φορείς πλειονότητας διαπερνούν ευκολότερα τον εσωτερικό φραγμό.

Στη μόνιμη κατάσταση το ρεύμα διάχυσης ισούται με το φωτόρευμα. Αυτή η ισότητα ρευμάτων, τα οποία επιβάλλονται αφενός από τη διάχυση, λόγω αύξησης των πυκνοτήτων των φορέων πλειονότητας, αφετέρου από την ηλεκτρική τάση του ενδογενούς ηλεκτρικού φραγμού, έχει ως αποτέλεσμα η ηλεκτρική τάση στα άκρα της επαφής p-n, να προσεγγίζει το ύψος V_{bi} του φραγμού της επαφής (στη πραγματικότητα δεν συμπίπτει λόγω επανασυνδέσεων ηλεκτρικών φορέων). Η φορά της είναι αντίθετη της V_{bi} . Ονομάζεται ΤΑΣΗ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ, V_{oc} και με βάση την προηγούμενη αιτιολόγηση ισχύει: $V_{oc} < V_{bi}$ (το = αφορά στην ιδανική περίπτωση που δεν συμβαίνουν επανασυνδέσεις). Συνοψίζοντας λοιπόν, είναι:

$$I_c = I_0(e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (\text{ίσες απόλυτες τιμές}) \quad (2.5)$$

Άρα, λύνοντας ως προς V τη σχέση (2.5) βρίσκουμε ότι:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (2.6)$$



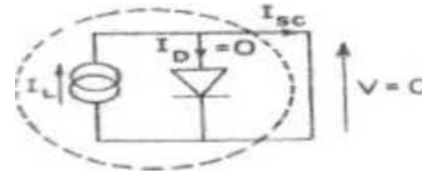
Η περίπτωση αυτή παρουσιάζεται στο διπλανό σχήμα (ΣΧΗΜΑ 2.11):

ΣΧΗΜΑ 2.11: Τάση ανοικτού κυκλώματος

- Βραχυκύκλωση των άκρων του ΦΒ στοιχείου

Αν τα άκρα της επαφής p-n, που φωτίζεται με σταθερή ροή ενέργειας, συνδεθούν μεταξύ τους με ένα χάλκινο σύρμα μεγάλης διατομής (βραχυκύκλωμα), θα περάσει μέσα απ' το σύρμα, που παρουσιάζει μηδενική πρακτικά αντίσταση, ρεύμα ίσο με το I_L . Αυτό δικαιολογείται εύκολα, αν αναλογιστούμε ότι το σύρμα δεν παρουσιάζει φραγμό ($\Delta v=0$) σε αντίθεση με την επαφή, η οποία παρουσιάζει φραγμό. Άρα κατά το βραχυκύκλωμα, $V=0$, $I_D=0$ και $I_{SC}=I_L$ (I_{SC} : ΡΕΥΜΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΗΣ). Συμπεραίνουμε επίσης ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι ευθέως ανάλογο της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η περίπτωση αυτή παρουσιάζεται στο διπλανό σχήμα (ΣΧΗΜΑ 2.12) :



- Σύνδεση αντίστασης R στα άκρα λειτουργίας μέγιστης ισχύος (MPP)

ΣΧΗΜΑ 2.12: Ρεύμα βραχυκυκλώσεως

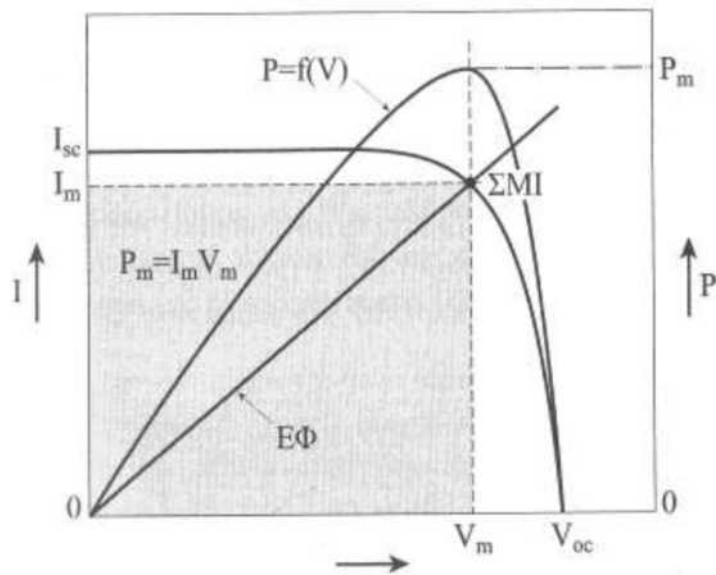
Όταν στα άκρα της φωτιζόμενης επαφής συνδέσουμε μία αντίσταση R, αυτή θα διαρρέεται από ρεύμα I_R το οποίο εξαρτάται από την τιμή αυτής της αντίστασης. Πιο συγκεκριμένα, το ρεύμα I_R θα πάρει μία τιμή που βρίσκεται με τη λύση της εξίσωσης:

$$I_R = I_L - I_0[\exp(qIRR^kT) - 1] \quad (2.7)$$

Προφανώς, υπάρχει κάποια τιμή της αντίστασης (δηλαδή του φορτίου του κυκλώματος) για την οποία η ισχύς που παράγει το ΦΒ στοιχείο θα γίνεται μέγιστη (P_m). Όπως παρατηρούμε και από τα σχήματα (2.9) και (2.10), στις ακραίες τιμές τάσης, 0 και V_{OC} , η παρεχόμενη ισχύς είναι μηδέν. Συνεπώς, είναι αναμενόμενο η καμπύλη $P=f(V)$ να εμφανίζει μέγιστο. Αυτό παρουσιάζεται κοντά στο σημείο όπου αρχίζει η έντονη πτώση του ρεύματος. Είναι προφανές ότι, για αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του ΦΒ στοιχείου, πρέπει να προσαρμόσουμε την αντίσταση του καταναλωτή που επιθυμούμε να συνδέσουμε στα άκρα του ΦΒ στοιχείου, ώστε η τάση και το ρεύμα σ' αυτόν να αντιστοιχούν στο Σημείο Μέγιστης Ισχύος, ΣΜΙ ή Maximum Power Point, MPP. Η τάση αυτή αναφέρεται ως V_m (ή V_{mpp}) και το ρεύμα ως I_m (ή I_{mpp}).

Υπολογίζοντας την ισχύ που παρέχει το ΦΒ στοιχείο, στην αντίσταση R σε συνάρτηση με την τάση στα άκρα του ΦΒ στοιχείου, κατασκευάζουμε το γράφημα της $P=f(V)$ που φαίνεται στο (ΣΧΗΜΑ 2.13). Σε αυτό φαίνεται και το ΣΜΙ, όπου το ΦΒ στοιχείο παράγει τη μέγιστη ισχύ $P_m=V_m I_m$. Μάλιστα το ΣΜΙ βρίσκεται στο σημείο από το οποίο μπορούμε να κατασκευάσουμε το ορθογώνιο με την μεγαλύτερη επιφάνεια μέσα στην I-V καμπύλη. Επίσης, στο σχήμα αυτό έχει σχεδιαστεί η ευθεία φόρτου ΕΦ, για έναν ωμικό καταναλωτή με αντίσταση R αντίστοιχη του ΣΜΙ ($R=R_{opt}=V_m/I_m$).

Η αντίσταση R_{opt} ονομάζεται βέλτιστη αντίσταση φορτίου και είναι συνάρτηση της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας των στοιχείων. Όταν λοιπόν ο καταναλωτής έχει αντίσταση ίση με R_{opt} τότε μεταφέρεται η μέγιστη ισχύς από την φωτοβολταϊκή γεννήτρια στον καταναλωτή.

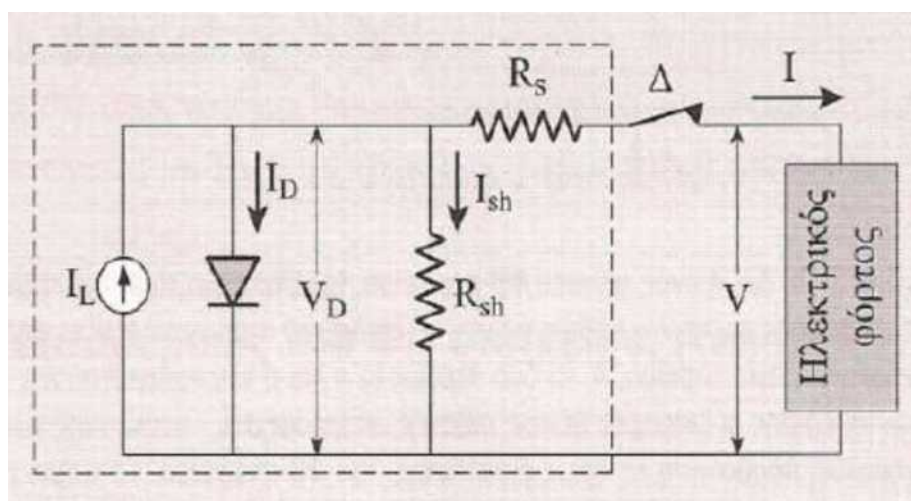


ΣΧΗΜΑ 2.13: Ανεστραμμένη I-V ΦΒ στοιχείου, καμπύλη $P=f(V)$ και ευθεία φόρτου ΕΦ ωμικού καταναλωτή με αντίσταση R αντίστοιχη του ΣΜΙ

Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας (και θερμοκρασίας) και για μεταβαλλόμενες τιμές στην αντίσταση του κυκλώματος που τροφοδοτεί το ηλιακό κύτταρο, η τάση και η ένταση του ρεύματος του κυττάρου παίρνουν ενδιάμεσες τιμές ανάμεσα στις ακραίες που αντιστοιχούν σε μηδενική αντίσταση (βραχυκυκλωμένη κατάσταση με μέγιστη τιμή ρεύματος, I_{sc} και μηδενική τάση) και άπειρη αντίσταση (ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση με μηδενική τιμή ρεύματος και μέγιστη τιμή τάσης, V_{oc}).

2.4.2 ΔΕΥΤΕΡΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ (Πραγματικό ηλιακό κύτταρο)

Το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2.8 είναι πολύ απλό και περιγράφει ιδανικές συνθήκες, που δεν υπάρχουν στα πραγματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Μία σωστότερη προσέγγιση αποτελεί το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2.14:



ΣΧΗΜΑ 2.14: Πλήρες ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ΦΒ στοιχείου

Το πλήρες ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ΦΒ στοιχείου δίδεται μέσα στο πλαίσιο διακεκομμένης γραμμής. Περιλαμβάνει μία πηγή σταθερού ρεύματος (I_L) σε συνδυασμό με μία ιδανική δίοδο. Στη συνέχεια τοποθετείται το μη ιδανικό τμήμα του ΦΒ στοιχείου, το οποίο περιλαμβάνει:

- Παράλληλη αντίσταση διαρροής, R_{sh} (Shunt resistance)

Η αντίσταση αυτή συνδέεται με τη διαρροή ρεύματος μεταξύ των άκρων της επαφής p-n. Πιο συγκεκριμένα, η αντίσταση διαμέσου της διόδου δεν έχει άπειρη τιμή, λόγω αναπόφευκτων κατασκευαστικών ελαττωμάτων και για αυτό το λόγο προκαλούνται διαρροές ρεύματος. Η τιμή της σε πολύ καλής απόδοσης ΦΒ στοιχεία είναι μεγαλύτερη των 10 Ω. Τιμές χαμηλότερες των 500Ω, προκαλούν έντονη ελάττωση του ρεύματος καθώς προχωρούμε προς την τάση ανοικτού κυκλώματος, V_{oc} . Μικρή R_{sh} χαρακτηρίζει καμπύλη I-V με αντίστοιχα μικρό παραλληλόγραμμο $I_m V_m$ δηλαδή αντίστοιχα μικρή μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ P_m .

Η αντίσταση αυτή περιλαμβάνει τις αναπόφευκτες αντιστάσεις που παρεμβάλλονται στην κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια. Αύξηση της R_s προκαλεί δραστική ελάττωση της αντίστοιχης μέγιστης ισχύος που αποδίδει το στοιχείο. Τυπικές τιμές της R_s για καλής ποιότητας ΦΒ στοιχεία: 0,1Ω έως 0,3Ω.

Οι δύο παραπάνω αντιστάσεις λοιπόν επηρεάζουν αισθητά την τιμή της τάσης V και του ρεύματος I που διαρρέει το φορτίο του κυκλώματος (ηλεκτρικός φόρτος).

Στην περίπτωση αυτή, για να εκφράσουμε το ρεύμα του κυττάρου χρησιμοποιούμε την εξής σχέση (ΣΧΕΣΗ 2.8):

$$I = I_L - I_0(\exp[q(V+IR_s)/\gamma kT]-1) - V/R_{sh} \quad (2.8)$$

όπου I το ρεύμα στην έξοδο του κυττάρου,

V η τάση στην έξοδο του κυττάρου,

I_0 το ρεύμα κόρου της διόδου,

I_L το φωτόρευμα,

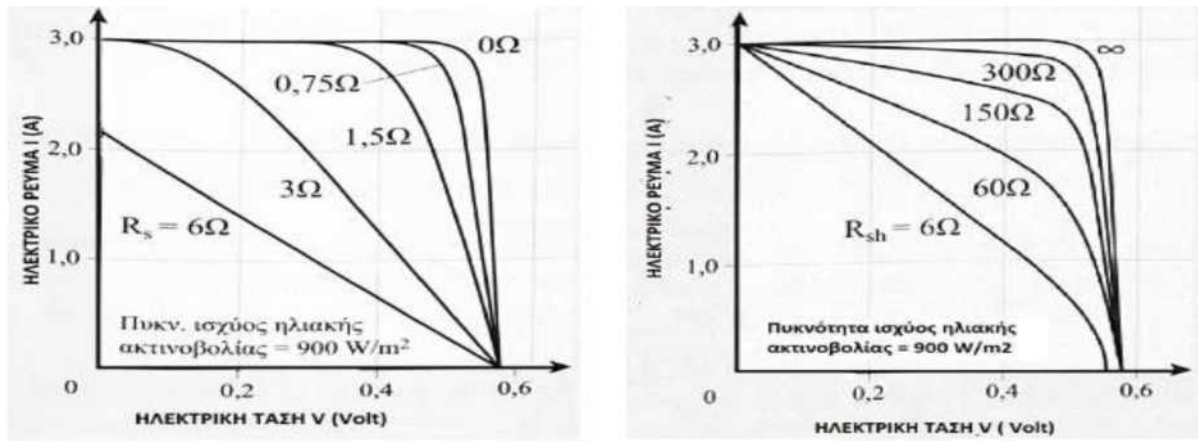
γ σταθερά ιδανικότητας της διόδου, με τιμές μεταξύ 1 και 2. Οφείλεται σε φαινόμενα επανασύνδεσης που συμβαίνουν στην περιοχή της επαφής,

T η απόλυτη θερμοκρασία,

K σταθερά Boltzmann,

$q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ (electronic charge) και R_s , R_{sh} έχουν περιγραφεί παραπάνω.

Τέλος, στο παρακάτω σχήμα (ΣΧΗΜΑ 2.15) παρουσιάζεται η επίδραση των R_s και R_{sh} στην καμπύλη I-V ενός ΦΒ στοιχείου:



Κεφάλαιο 3°

3.1. Ηλιακή Ακτινοβολία

Ο ήλιος είναι μια πύρινη σφαίρα με ακτίνα 700.000km. Από τον ήλιο ακτινοβολείται συνεχώς προς το διάστημα τεράστια ενέργεια, διαφόρων μηκών κύματος, αποτελούμενη από φως και θερμότητα. Η ισχύς της ενέργειας αυτής φθάνει σε τεράστια κλίμακα και η απορρόφηση δε γίνεται ομοιόμορφα, αλλά επιλεκτικά κατά ζώνες φάσματος.

Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας ισοδυναμεί με την εκπομπή μελανός σώματος 5762oK. Το φάσμα αυτό είναι συνεχές από 200 περίπου nm μέχρι 3000 nm με αιχμή γύρω στα 4800 nm. Η ατμόσφαιρα δεν μειώνει μόνο την ποσότητα, αλλά αλλάζει και τη φασματική σύνθεση της ακτινοβολίας.

Το μεσημέρι μιας τυπικής μέρας, όταν δηλαδή ο ήλιος είναι στο ζενίθ, η ένταση της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο είναι W/m^2 20% με 25% του οποίου οφείλονται στη διάχυτη. Η ένταση δεν είναι σταθερή, αλλά λόγω της περιστροφής της γης παρουσιάζει μεγάλη χρονική διακύμανση αφενός μεταξύ της μέγιστης τιμής την ημέρα και της μηδενικής τη νύχτα και αφετέρου διακύμανση ανάλογα με τη γεωγραφική θέση και την εποχή του έτους

3.1.1. Μέτρηση και Υπολογισμός της Ακτινοβολίας

Τα όργανα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι το πυρανόμετρο και το πυρηλιόμετρο. Το πυρανόμετρο (ακρίβεια: ~1%) μετρά την ακτινοβολία με θερμοηλεκτρική στήλη ή με φωτοβολταϊκό στοιχείο που σκεπάζεται από ημισφαίριο με γυάλινα τοιχώματα. Το πυρηλιόμετρο (ακρίβεια: από 0,2% έως 2%) μετρά την ακτινοβολία επίσης με θερμοηλεκτρική στήλη, που είναι τοποθετημένη στο κάτω μέρος ενός κυλίνδρου, του οποίου ο άξονας διατηρείται παράλληλος με τις ηλιακές ακτίνες με βοήθεια αστροστάτη.

Με το όργανο αυτό μπορεί να μετρηθεί και η φασματική κατανομή της ακτινοβολίας. Ωστόσο το πυρηλιόμετρο είναι σημαντικά ακριβότερο από το πυρανόμετρο. Εκτός από τα δύο αυτά όργανα χρήσιμες πληροφορίες παρέχουν οι ηλιογράφοι, που μετρούν τη διάρκεια της ηλιοφάνειας με ακρίβεια της τάξης των 10 λεπτών της ώρας.

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια επιφάνεια απαρτίζεται από τρεις συνιστώσες: την άμεση που έρχεται κατευθείαν από τον ήλιο, την διάχυτη που προέρχεται από τον θόλο της ατμόσφαιρας, εξαιτίας της σκέδασης της άμεσης από άτομα, μόρια και αιρούμενα σωματίδια και την ανακλώμενη, που προκαλείται από διάφορες κοντινές επιφάνειες, όταν η συλλεκτική επιφάνεια είναι κοντά σε κτίρια ή είναι κεκλιμένη, οπότε δέχεται ακτινοβολία από το έδαφος.

3.1.2. Υπολογισμός της Ηλιακής Ενέργειας που δέχεται η Γη

Η ενέργεια F_s , που εκπέμπεται από τον ήλιο ανά μονάδα επιφάνειας του και ανά μονάδα χρόνου (ροή ενέργειας) μπορεί να υπολογιστεί αν θεωρήσουμε ότι ο ήλιος θεκπέμπει, ακτινοβολία σαν ένα μέλαν σώμα θερμοκρασίας T_{eff} περίπου

Όπου σ είναι η σταθερά των Stefan - Boltzmann ($5.6697 \cdot 10^{-12} W cm^{-2} deg^{-4}$) R_s είναι η μέση ακτίνα του ηλίου (περίπου $696 \cdot 10^3 km$).

Η ενέργεια αυτή διαδίδεται σφαιρικά προς όλες τις διευθύνσεις, σχεδόν ισότροπα, και έτσι σε κάποια απόσταση από τον ήλιο κατανέμεται σε μία σφαιρική επιφάνεια, ακτίνας ίσης με την απόσταση αυτή, εφόσον βέβαια δεν συμβαίνει καμία απορρόφηση στο μεσοαστρικό διάστημα. Συνεπώς σε κάποια χρονική στιγμή που η γη βρίσκεται σε απόσταση a από τον ήλιο η ροή ενέργειας στη θέση αυτή θα είναι:

Η απόσταση όμως της γης από τον ήλιο δεν είναι σταθερή. Ας θεωρήσουμε ότι η μέση απόσταση ηλίου γης είναι $d_m = 1.496 \times 10^8 \text{ km}$.

Σ ονομάζεται ηλιακή σταθερά και η μέση τιμή της μέσα σε ένα χρόνο ισούται με περίπου 1367 W m^{-2} , όπως προέκυψε από πειραματικές μετρήσεις από το έδαφος και από δορυφόρους. Η διακύμανση της ηλιακής σταθεράς μέσα σε ένα έτος που οφείλεται στη διακύμανση της εκπεμπόμενης από τον Ήλιο ενέργειας είναι της τάξης του $\pm 1.5\%$, τελικά η μέση ολική ενέργεια ΕΓολ που δέχεται η Γη στη μονάδα του χρόνου είναι ανάλογη της επιφάνειας που προβάλλει η γη στη δέσμη των ηλιακών ακτινών, όπου $R_r = 6378 \text{ km}$, είναι η μέση ακτίνα της γης.

Είναι φανερό λοιπόν ότι η ενέργεια που δέχεται η Γη από τον ήλιο εξαρτάται από την θερμοκρασία του ήλιου, τις ακτίνες των δύο σωμάτων και από την απόσταση ηλίου - Γης.

Λόγω της ελλειπτικής τροχιάς της Γης, η απόσταση αυτή μεταβάλλεται μέσα σε ένα έτος και έχει σαν αποτέλεσμα την διακύμανση της ενέργειας που δέχεται η γη κατά περίπου $\pm 4\%$. Ο Ήλιος βρίσκεται στην πλησιέστερη θέση προς τη γη κοντά (4 Ιανουαρίου) στο χειμερινό ηλιοστάσιο (21 Δεκεμβρίου) και στην πλέον απομακρυσμένη κατά το θερινό ηλιοστάσιο (21 Ιουνίου). Συνεπώς κατά τον Δεκέμβριο η γη δέχεται περισσότερη ενέργεια από τον ήλιο από ότι τον Ιούνιο, αλλά για λόγους που θα δούμε στα επόμενα δεν γίνεται αυτή η διαφορά εύκολα αντιληπτή από τις ανθρώπινες αισθήσεις.

Η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάδοση της μέσα από την ατμόσφαιρα εξασθενίζει και τελικά η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας που φτάνει στο έδαφος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι της τάξης των 1000 W m^{-2} .

Φυσικά αυτή είναι η μέγιστη τιμή που μπορεί να συναντήσουμε, είναι δηλαδή η ενέργεια για κάθετη πρόσπτωση και κατά το θερινό ηλιοστάσιο. Στην πραγματικότητα η ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια του υπόλοιπου έτους είναι πολύ μικρότερη.

3.2. Ζενίθια γωνία του Ήλιου θ

Είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο, ότι η ροή της ενέργειας που δέχεται η Γη από τον Ήλιο, αντιπροσωπεύει και τη μέγιστη δυνατή ροή ενέργειας - κατά τη διεύθυνση διάδοσής της- που θα μπορούσαμε να συναντήσουμε της σε έναν τόπο πάνω στην επιφάνεια της Γης κατά τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Αυτό βέβαια θα συνέβαινε μόνον αν δεν υπήρχε καμία εξασθένιση της ακτινοβολίας όταν αυτή διέρχεται μέσα από την ατμόσφαιρα της γης. Ας θεωρήσουμε μία επιφάνεια τοποθετημένη οριζόντια σε έναν τόπο, και ότι η ατμόσφαιρα δεν αλληλεπιδρά με την ηλιακή ακτινοβολία. Γενικά οι ακτίνες του Ήλιου δεν προσπίπτουν στην επιφάνεια κάθετα, αλλά σχηματίζουν με την κατακόρυφο του τόπου (ζενίθ) μία γωνία θ , την οποία και ονομάζουμε ζενίθια γωνία .

Για να υπολογιστεί η ροή ενέργειας F που δέχεται ένας τόπος σε κάποια χρονική στιγμή, θα πρέπει να είναι γνωστή η ζενίθια γωνία θ του ήλιου στη χρονική αυτή στιγμή. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιούνται μέθοδοι της σφαιρικής αστρονομίας (σφαιρικό τρίγωνο) από τις οποίες προκύπτει ότι η ζενίθια γωνία.

Η ζενίθια γωνία θ είναι γενικά συνάρτηση τριών παραμέτρων, της απόκλισης δ , της ωριαίας γωνίας του Ήλιου H και του γεωγραφικού πλάτους το τόπου ϕ .

3.2.1. Γωνία απόκλισης του Ήλιου δ

Το επίπεδο της τροχιάς της Γης ονομάζεται επίπεδο της εκλειπτικής. Ο άξονας περιστροφής της Γης δεν είναι κάθετος προς την εκλειπτική, αλλά σχηματίζει γωνία που ονομάζεται λόξωση της εκλειπτικής. Εξαιτίας της λόξωσης της εκλειπτικής, κατά την ενός έτους η γωνία που σχηματίζει το επίπεδο του ισημερινού της Γης με τον άξονα που συνδέει τα κέντρα της Γης και του Ήλιου μεταβάλλεται, η γωνία αυτή ονομάζεται επίπεδο της εκλειπτικής.

Ο άξονας περιστροφής της Γης δεν είναι κάθετος προς την εκλειπτική, αλλά σχηματίζει γωνία που ονομάζεται λόξωση της εκλειπτικής. Εξαιτίας της λόξωσης της εκλειπτικής, κατά την διάρκεια ενός έτους η γωνία που σχηματίζει το επίπεδο του ισημερινού της Γης με τον άξονα που συνδέει τα κέντρα της Γης και του Ήλιου, η γωνία αυτή ονομάζεται απόκλιση και συμβολίζεται με δ .

Όταν η γωνία δ είναι θετική, τότε στο βόρειο ημισφαίριο της Γης έχουμε άνοιξη ή καλοκαίρι, ενώ όταν η γωνία δ είναι αρνητική τότε έχουμε φθινόπωρο ή χειμώνα.

3.3. Γεωγραφικές Συντεταγμένες

Γεωγραφικό μήκος ψ ενός τόπου, ονομάζεται η γωνία που σχηματίζεται από τον μεσημβρινό του τόπου και τον μεσημβρινό του Greenwich. Μετρείται πάνω στον ισημερινό και παίρνει τιμές από -180 δυτικά έως $+180$ ανατολικά του Greenwich.

Γεωγραφικό πλάτος ϕ ενός τόπου ονομάζεται η γωνία που σχηματίζεται από τη διεύθυνση της κατακόρυφου του τόπου και ονομάζεται η γωνία που σχηματίζεται από τη διεύθυνση της κατακόρυφου του τόπου και τον ισημερινό. Μετράται πάνω στον μεσημβρινό του τόπου και παίρνει τιμές από 90 βόρεια έως 90 νότια του ισημερινού.

Όταν το μεσημβρινό επίπεδο ενός τόπου περιέχει και τον Ήλιο, τότε στον τόπο αυτό έχουμε μεσημέρι (ο Ήλιος μεσουρανή).

Όταν το σημείο Σ κινηθεί προς τον Ισημερινό, η γωνία θ μικραίνει, με αποτέλεσμα να μεγαλώνει η ροή της ενέργειας που δέχεται ο τόπος. Επίσης παρατηρείται ότι όταν η απόκλιση δ γίνει αρνητική, τότε ο Ήλιος βρίσκεται κάτω από το επίπεδο του Ισημερινού (χειμερινή περίοδος), με αποτέλεσμα η γωνία θ για τον ίδιο τόπο Σ να γίνεται μεγαλύτερη, άρα και η ροή της ηλιακής ενέργειας μικρότερη. Τα αντίθετα φυσικά ισχύουν για έναν τόπο που βρίσκεται στο νότιο ημισφαίριο.

3.4 Ηλιακή Ακτινοβολία μέσα στην ατμόσφαιρα

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία διέρχεται μέσα από την ατμοσφαιρική μάζα, εξασθενίζει σαν αποτέλεσμα των μηχανισμών απορρόφησης και σκέδασης στα διάφορα συστατικά της ατμόσφαιρας. Το μέγεθος της απορρόφησης εξαρτάται από την φασματική περιοχή της ακτινοβολίας και από το μήκος της διαδρομής που αυτή διανύει. Είναι φυσικό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία με την οποία εισέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα (ζενίθια γωνία) τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η διαδρομή που θα διανύσει.

Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος (αφού διασχίσει την ατμόσφαιρα) γίνεται αισθητή με δύο μορφές: την άμεση και τη διάχυτη. Η πρώτη αναφέρεται στην ακτινοβολία η οποία φτάνει στο έδαφος απευθείας από τον Ήλιο, έχοντας χάσει ένα μέρος της αρχικής της έντασης κυρίως λόγω απορρόφησης και λιγότερο λόγω σκέδασης στα συστατικά της ατμόσφαιρας. Η διάχυτη συνιστώσα προέρχεται από πολλαπλή σκέδαση στα συστατικά της ατμόσφαιρας, και αντιπροσωπεύει στην ουσία ένα μέρος της ηλιακής ενέργειας που αποσύρθηκε από την άμεση. Η διάχυτη συνιστώσα φτάνει στην επιφάνεια της Γης από διάφορες διευθύνσεις χωρίς να είναι συνδεδεμένη με κάποια συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης.

Σε μία ανέφελη ημέρα, η άμεση συνιστώσα είναι αυτή που δημιουργεί σκιά, και για την ηλιακή ακτινοβολία αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο ποσοστό της ολικής, διαθέσιμης ενέργειας, κυρίως όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι μικρή (π.χ. <60). Όσο μεγαλώνει γωνία πρόσπτωσης, αρχίζει να ελαττώνεται το ποσοστό της άμεσης συνιστώσας υπέρ του ποσοστού της διάχυτης. Αντίθετα η διάχυτη δεν δημιουργεί σκιά και σε συνθήκες πλήρους νεφοκάλυψης αντιπροσωπεύει το 100% της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος.

Ο ρόλος των δύο αυτών συνιστωσών της ηλιακής ακτινοβολίας είναι πολύ σημαντικός για την συνολικά συλλεγόμενη ενέργεια και καθοριστικός για την επιλογή του τρόπου και των διατάξεων συλλογής που θα χρησιμοποιηθούν σε κάποια περιοχή.

Κεφάλαιο 4°

4.1. Αρχή Λειτουργίας και δομή συσσωρευτών

Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές είναι ουσιαστικά μετατροπείς χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική και έχουν τη δυνατότητα να εκτελούν αυτή τη μετατροπή και προς την αντίθετη κατεύθυνση παρέχοντας με άμεσο τρόπο τη δυνατότητα συσσώρευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

4.1.1. Σχεδιαστική δομή και Αρχή Λειτουργίας των συσσωρευτών

Κυψελίδα συσσωρευτή

Δομική μονάδα του συσσωρευτή είναι η κυψελίδα (cell), και μία εποπτική παρουσίαση της μονάδας αυτής δίνεται στο σχήμα. Η κυψελίδα είναι η βασική ηλεκτροχημική μονάδα της μπαταρίας, συνίσταται από μία θετική και μία αρνητική πλάκα που είναι βυθισμένες σε ένα διάλυμα ηλεκτρολύτη και περικλείονται σε ένα δοχείο. Με τη βοήθεια του παραπάνω σχήματος θα γίνει μία περιγραφή των συστατικών μερών της κυψελίδας ώστε να γίνεται στη συνέχεια, πιο εύκολα και κατανοητά η αναφορά σε σχετικά θέματα.

Ενεργό Υλικό (ActiveMaterial): Το ενεργό υλικό είναι ένας συνδυασμός υλικών τα οποία από τη θετική και την αρνητική πλάκα, είναι οι βασικοί συντελεστές της ηλεκτροχημικής αντίδρασης μέσα στην κυψελίδα. Η ποσότητα του ενεργού υλικού σε μία μπαταρία είναι ανάλογη της χωρητικότητας της. Σε μία τυπική μπαταρία μολύβδου, όπως είναι και η περίπτωση της μπαταρίας που χρησιμοποιούμε, το ενεργό υλικό είναι συνδυασμός διοξειδίου του μολύβδου (PbO_2) στη θετική πλάκα με μεταλλικό πορώδη μόλυβδο (Pb) στην αρνητική, που αντιδρούν σε διάλυμα θειικού οξέος (H_2SO_4) κατά τη λειτουργία της μπαταρίας.

Ηλεκτρολύτης: Ο ηλεκτρολύτης είναι το αγωγίμο μέσο που επιτρέπει τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της ιοντικής ανταλλαγής ή της ανταλλαγής ηλεκτρονίων, επάνω στις πλάκες της κυψελίδας. Στις μπαταρίες μολύβδου είναι διάλυμα θειικού οξέος (H_2SO_4) σε υγρή μορφή ή σε μορφή gel, ενώ στις μπαταρίες νικελίου (Ni) είναι διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH). Σε περιπτώσεις σαν τη δική μας, που ο ηλεκτρολύτης είναι υγρό διάλυμα, συχνά, απαιτείται η αναπλήρωση νερού λόγω του φαινομένου της εξαέρωσης.

Πλέγμα (Grid): Σε μία μπαταρία μολύβδου, το πλέγμα συνήθως είναι ένα πλαίσιο από κράμα μολύβδου το οποίο υποστηρίζει το ενεργό υλικό επάνω στις πλάκες και είναι αγωγός ηλεκτρικού ρεύματος. Υλικά κράματος όπως το αντιμόνιο (Sb) ή το ασβέστιο (Ca) συχνά χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν τη μηχανική αντοχή των πλακών και έχουν χαρακτηριστική επίδραση στις επιδόσεις της μπαταρίας. Οι συσσωρευτές του συστήματος έχουν μικρή πρόσμιξη αντιμονίου ($Sb < 3\%$) στα θετικά ηλεκτρόδια, με αποτέλεσμα να μπορούν να λειτουργούν διατηρούμενοι σε άριστη κατάσταση συνεχώς για 3 χρόνια σε παράλληλη, standby λειτουργία όταν τις διαπερνάει ρεύμα 2,23 V/cell και βρίσκονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Πλάκες (Plates): Οι πλάκες, που συνίστανται από το πλέγμα και από το ενεργό υλικό, είναι το βασικό στοιχείο της μπαταρίας και συνήθως αναφέρονται ως ηλεκτρόδια. Γενικά, υπάρχει ένα πλήθος αρνητικών και θετικών πλακών, συνδεδεμένων παράλληλα, μέσα σε μία κυψελίδα. Το πάχος τους και η σχέσεις των επιφανειών μεταξύ των αρνητικών και των θετικών πλακών, έχουν καθοριστική επίδραση στα χαρακτηριστικά της μπαταρίας.

Διαχωριστής (Separator): Ο διαχωριστής είναι ένα πορώδες απομονωτικό μέσο μεταξύ των πλακών της μπαταρίας που εμποδίζει την αγωγή επαφή μεταξύ θετικού και αρνητικού ηλεκτροδίου. Σε πολλές περιπτώσεις ο διαχωριστής εφαρμόζεται σαν φάκελος και περικλείει ολόκληρο το ηλεκτρόδιο, εμποδίζοντας τη δημιουργία βραχυκυκλώματος, λόγω των διαχεόμενων υλικών στο κάτω μέρος των πλακών.

Πόλοι ή Τερματικοί Πόλοι (Terminal Poles): Οι πόλοι είναι οι εξωτερικές θετικές ή αρνητικές, ηλεκτρικές συνδέσεις της μπαταρίας. Ένα φορτίο ή ένα φωτοβολταϊκό σύστημα συνδέεται με τη μπαταρία μέσω των πόλων.

Ο τύπος των δευτερευόντων συσσωρευτών μπορεί να αναφέρεται ως Μολύβδου-Οξειδίου (lead-acid ή απλά Pb), Νικελίου-Καδμίου (Ni-Cd), Αργύρου-Ψευδαργύρου κτλ, ανάλογα με το υλικό κατασκευής των ηλεκτροδίων τους. Ειδικότερα, όσο αφορά τους συσσωρευτές μολύβδου, το κράμα του πλέγματος των ηλεκτροδίων τους, τους κατατάσσει σε υποκατηγορίες (Μολύβδου- Ασβεστίου Pb-Ca, Μολύβδου-Αντιμονίου Pb-Sb) και το κράμα αυτό μαζί με τον τρόπο κατασκευής του συσσωρευτή, καθορίζει τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του και τις χρήσεις για τις οποίες αυτός προορίζεται. Σε όποιον τύπο και αν ανήκουν οι συσσωρευτές, ο μηχανισμός της λειτουργίας τους στηρίζεται σε μία αντιστρεπτή ηλεκτροχημική διαδικασία η οποία, για τους συσσωρευτές μολύβδου περιγράφεται από την αντίδραση:

Οι κυψελίδες των συσσωρευτών Pb αποτελούνται από ζεύγη μονωμένων πλακών βυθισμένων στο ίδιο διάλυμα θειικού οξέος (H_2SO_4). Οι πλάκες του αφόρτιστου συσσωρευτή καλύπτονται από θειικό μόλυβδο $PbSO_4$ (ή ακριβέστερα $Pb_2+SO_4^{2-}$). Κατά το στάδιο της φόρτισης, διασπάται ο θειικός μόλυβδος και σχηματίζεται οξείδιο του μολύβδου PbO_2 (ή ακριβέστερα $Pb_4+O_2^{2-}$) στις πλάκες των θετικών ηλεκτροδίων και μεταλλικός Pb στις πλάκες των αρνητικών. Αντίστροφα, κατά την εκφόρτιση του συσσωρευτή και κατά την τροφοδότηση των ηλεκτρικών καταναλώσεων, ο Pb οξειδώνεται στις πλάκες των αρνητικών ηλεκτροδίων προς ιόντα Pb^{2+} και δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα ενώ στις θετικές πλάκες ο ανάγεται προς, παίρνοντας ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα :

Τα προϊόντα των δύο αντιδράσεων, δηλαδή τα ιόντα ενώνονται με θειικά ιόντα (SO_4) από το διάλυμα και επανασχηματίζουν θειικό μόλυβδο πάνω στις πλάκες. Έτσι, καταναλώνεται θειικό οξύ και αραιώνεται το διάλυμα στις κυψελίδες. Με τη διαδικασία της φόρτισης, τα θειικά ιόντα επιστρέφουν στο διάλυμα και η περιεκτικότητά του αποκαθίσταται στην κανονική τιμή.

Ένας συσσωρευτής αποτελείται από μία συνάθροιση κυψελίδων και η ονομαστική του τάση είναι το άθροισμα των ονομαστικών τάσεων των κυψελίδων του. Έτσι, ο συσσωρευτής που χρησιμοποιούμε, με ονομαστική τιμή 60Volt αποτελείται από 30 κυψελίδες ονομαστικής τιμής 2Volt η καθεμία.

4.1.2. Προσαρμογή της λειτουργίας του συσσωρευτή σε Φ/Β σύστημα

Από όσα έχουν ήδη αναφερθεί και θα αναφερθούν παρακάτω, οι συσσωρευτές είναι αναπόσπαστο μέρος των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Για να βελτιστοποιηθεί η συνεργασία τους με τις φωτοβολταϊκές γεννήτριες και για να γίνει ο σχεδιασμός των συσκευών που θα επιληφθούν αυτής της συνεργασίας, όπως ο ρυθμιστής φόρτισης συσσωρευτών, υπάρχει η ανάγκη ανάπτυξης ενός ισοδύναμου ηλεκτρικού μοντέλου, που θα συμπεριληφθεί στο συνολικό μοντέλο του συστήματος. Το ισοδύναμο μοντέλο είναι μία βελτίωση του κοινώς χρησιμοποιούμενου ισοδύναμου μοντέλου Thevenin.

Η εσωτερική αντίσταση που παρουσιάζει ο συσσωρευτής, ως απαραίτητη απομονωτική βαθμίδα μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, είναι ένα κρίσιμο στοιχείο που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στη σχεδίαση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.

Σκοπός του σχεδιασμού είναι η μεγιστοποίηση της μεταφοράς ενέργειας από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια προς την κατανάλωση, αναλόγως της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας. Ειδικά στη δεύτερη περίπτωση, όταν το φορτίο είναι εξαιρετικά υψηλό (η αντίσταση που παρουσιάζει είναι μικρή σε σχέση με αυτή της μπαταρίας) απαιτείται ειδικός σχεδιασμός ώστε το σημείο ισορροπίας του συστήματος να βρίσκεται κοντά στα σημεία μέγιστης ισχύος (MPP) της I-V χαρακτηριστικής της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Στην πρώτη όμως περίπτωση, όπου η κατανάλωση λαμβάνει χώρα σε διαφορετικές χρονικές περιόδους από αυτές που λαμβάνει η παροχή ενέργειας από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια ή που η κατανάλωση είναι σχετικά μικρή, ο σχεδιασμός μπορεί να απλοποιηθεί σημαντικά και η μεταφορά ισχύος να είναι ικανοποιητική.

Ο σχεδιασμός των συστημάτων που επιλαμβάνονται την αναζήτηση του ακριβούς σημείου μέγιστης ισχύος ονομάζεται Maximum Power Point tracking (MPP tracking). Η λειτουργία του συστήματος σε σημεία κοντά σε σημεία μέγιστης ισχύος, επιτυγχάνεται επιβάλλοντας έναν κατάλληλο αλγόριθμο φόρτισης ο οποίος συντηρεί την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας. Όταν το φορτίο δεν υπάρχει ή είναι σχετικά μικρό σε σχέση με τη μπαταρία (και συνήθως αυτό ισχύει αφού υφίσταται περιορισμούς λόγω του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος εκφόρτισης του συσσωρευτή), ο σχεδιαστής μπορεί να προσαρμόσει τη συνολική κατανάλωση (μπαταρία ή/και φορτίο) με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ώστε να επιτύχει ικανοποιητικά επίπεδα μεταφοράς ισχύος.

4.2. Αναγκαιότητα αποθηκευτικής διάταξης σε συστήματα με ανανεώσιμες πηγές

Επειδή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από φυσικά φαινόμενα (π.χ. αιολική και ηλιακή ενέργεια) υπάρχει ενδεχόμενο, αρκετές φορές η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ να μη συμπίπτει χρονικά με τη ζήτηση από την πλευρά των καταναλωτών. Η αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας και η μετέπειτα χρήση της σε διαστήματα όπου θα υπάρχει ζήτηση, θα βοηθούσε ώστε να εκμεταλλευτούμε πλήρως τα πλεονεκτήματα που παρέχουν οι ανανεώσιμες πηγές. Επιπλέον σε αυτή την περίπτωση μπορεί να γίνει καλύτερη διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας αφού πλέον σχεδόν εκμηδενίζεται η πιθανότητα να μην υπάρχει ενέργεια τη στιγμή που θα ζητηθεί και έτσι επιτρέπεται η δημιουργία περισσότερο μακροπρόθεσμων σχεδίων διαχείρισης. Η ύπαρξη αποθηκευτικού μέσου λοιπόν δίνει στις ΑΠΕ την αξιοπιστία ενός συμβατικού συστήματος παραγωγής ενέργειας (π.χ. γεννήτριες ντίζελ) και ανοίγει το δρόμο για τη δημιουργία συστημάτων παραγωγής ενέργειας που βασίζονται αποκλειστικά και μόνο σε ανανεώσιμες πηγές.

Ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή για την οποία θα χρησιμοποιούνται οι ΑΠΕ χρειάζεται και μία αποθηκευτική διάταξη με κατάλληλες ιδιότητες. Προκειμένου να αποφασιστεί ποιο αποθηκευτικό μέσο είναι κατάλληλο για κάθε περίπτωση εφαρμογής χρειάζεται να εξεταστεί μια ευρεία γκάμα αποθηκευτικών διατάξεων.

Ιδιαίτερη είναι λοιπόν, η χρησιμότητα των ανανεώσιμων πηγών στα συστήματα τροφοδοσίας ενέργειας. Στα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποθηκευτικά μέσα βραχείας ή μακράς διάρκειας αποθήκευσης, ανάλογα με τη χρήση του συστήματος και τις ιδιότητες του αποθηκευτικού μέσου. Ανάλογα με το μέγεθος του αποθηκευτικού μέσου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διατάξεις για σχετικά μικρής διάρκειας αποθήκευση, π.χ. μία μέρα ή βδομάδα, ή για μεγάλης διάρκειας που είναι ικανές να

τροφοδοτήσουν με ενέργεια κατά τη διάρκεια σχεδόν όλου του χειμώνα, για παράδειγμα σε εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών, χωρίς να υπάρχει υποστήριξη συμβατικών γεννητριών. Σαν αποθηκευτικές διατάξεις βραχείας διάρκειας χρησιμοποιούνται κυρίως μπαταρίες μολύβδου λόγω του χαμηλού τους κόστους σε σχέση με τα άλλα μέσα, ενώ για μεγάλη διάρκεια ενδείκνυνται κυρίως αποθηκευτές υδρογόνου. Με τη βοήθεια του αποθηκευτικού μέσου λοιπόν, μπορούν να υπάρξουν εγκαταστάσεις αμιγώς ανανεώσιμων πηγών (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτρια) χωρίς την εφεδρεία συμβατικής γεννήτριας.

Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την επιλογή της αποθηκευτικής διάταξης είναι οι περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες πρόκειται να εκτεθεί η διάταξη. Έτσι ανάλογα με την περίπτωση και τις εγκαταστάσεις μπορεί να επιλεγεί διάταξη που μπορεί να εκτεθεί σε θερμοκρασίες από -10 ως 45°C, δηλαδή πρακτικά να τοποθετηθεί σε εξωτερικούς χώρους σχεδόν χωρίς καμία προστασία, διάταξη που πρέπει να τοποθετηθεί μέσα σε κτίριο (5 ως 20°C ή διάταξη που χρειάζεται να τοποθετηθεί σε μονωμένους χώρους ή χώρους με ενεργό έλεγχο θερμοκρασίας ώστε η θερμοκρασία να διατηρείται στους 15 ως 25°C).

Πρέπει να σημειωθεί ωστόσο ότι αν οι ανανεώσιμες πηγές καλύπτουν ένα μικρό μέρος από τη ζήτηση σε ενέργεια, η αποθήκευση ενέργειας μπορεί να μην είναι απαραίτητη καθώς η ζήτηση μπορεί να καλυφθεί από τα άλλα στοιχεία (π.χ. γεννήτριες ντίζελ). Ωστόσο όμως όσο αυξάνει η συμβολή των ανανεώσιμων πηγών στην εξυπηρέτηση του ζητούμενου φορτίου, γεγονός που είναι αναμενόμενο για τα επόμενα χρόνια, τόσο γίνεται απαραίτητη η διάταξη αποθήκευσης. Αυτό γίνεται εμφανές σε εγκαταστάσεις παροχής ενέργειας από φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επειδή τη νύχτα δεν υπάρχει ηλιοφάνεια είναι πιθανό η ζήτηση σε φορτίο να αυξηθεί νωρίς το απόγευμα, γιατί οι καταναλωτές θα προνοήσουν για τη νύχτα, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μία αιχμή στο φορτίο εκείνη την ώρα, η οποία θα πρέπει να καλυφθεί από συμβατικές πηγές. Η εγκατάσταση ενός αποθηκευτικού συστήματος θα βοηθούσε να εξομαλυνθούν αυτές οι κορυφές στη ζήτηση ενέργειας και να δημιουργηθεί στο βαθμό που είναι εφικτό ένα σταθερό φορτίο βάσης. Επίσης η αποθήκευση βοηθάει στο να εξισορροπηθεί η υψηλή παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά το καλοκαίρι με τη χαμηλή κατά τη διάρκεια του χειμώνα όπως προαναφέρθηκε.

Πολλά υποσχόμενη είναι επίσης η ύπαρξη αποθηκευτικού μέσου σε εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών για την τροφοδοσία απομακρυσμένων περιοχών. Το κόστος δημιουργίας μίας γραμμής μεταφοράς προκειμένου να μεταφερθεί ηλεκτρική ενέργεια από τον πλησιέστερο υποσταθμό και το κόστος παραγωγής αυτής της ενέργειας με συμβατικούς τρόπους (π.χ. το κόστος του καυσίμου της συμβατικής γεννήτριας) είναι ασύγκριτα μεγαλύτερο, από ότι η τροφοδοσία ενέργειας από ΑΠΕ με τη συνεισφορά κατάλληλης αποθηκευτικής διάταξης.

Τέλος οι αποθηκευτικές διατάξεις βοηθούν στο να ξεπεραστεί το γεγονός ότι η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ δεν μπορεί να είναι πλήρως προβλέψιμη. Έτσι είναι δυνατή η διαχείριση ενέργειας και ισχύος. Ένα μέρος από την παραγόμενη ενέργεια των ΑΠΕ καταναλώνεται αμέσως ώστε να αντικαταστήσει συμβατικές πηγές και το υπόλοιπο πρέπει να αποθηκεύεται για μετέπειτα χρήση.

Κεφάλαιο 5^ο

5.1. Κατηγορίες Φ/Β συστημάτων

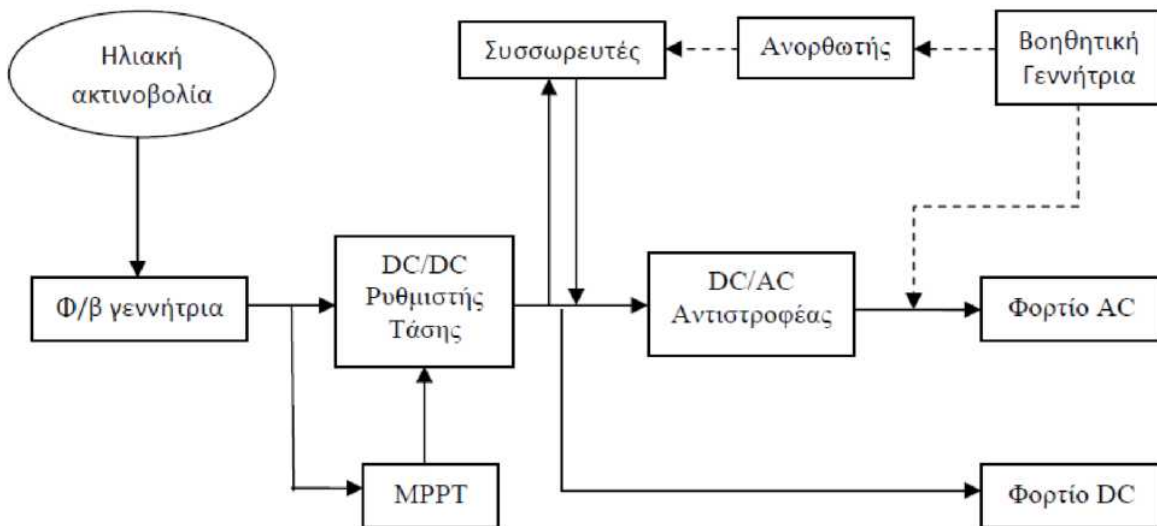
Ένα Φ/Β σύστημα, το οποίο παράγει ηλεκτρική ενέργεια για να εξυπηρετήσει τη ζήτηση κάποιων φορτίων, αποτελείται από πολλά επιμέρους συστατικά. Κύριο αντικείμενο του κεφαλαίου αυτού είναι μία επισκόπηση των συστατικών αυτών που συνθέτουν ένα πλήρες Φ/Β σύστημα.

5.2. Αυτόνομο Φ/Β σύστημα (OFF-GRID ή STAND ALONE SYSTEM)

Χαρακτηρίζονται έτσι τα Φ/Β συστήματα τα οποία παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να είναι συνδεδεμένα στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο, από το οποίο θα μπορούσαν να αντλούν συμπληρωματική ενέργεια ή να στέλνουν την περίσσεια της παραγόμενης. Η απαιτούμενη από την εφαρμογή ηλεκτρική ενέργεια λοιπόν καλύπτεται εξ ολοκλήρου από τη Φ/Β συστοιχία (αν συμμετέχουν και άλλες πηγές ενέργειας, είτε ανανεώσιμες, όπως π.χ. αιολικές γεννήτριες, είτε συμβατικές, τότε κάνουμε λόγο για υβριδικό σύστημα). Αποτελούν την ιδανικότερη λύση για περιοχές που βρίσκονται μακριά από το κεντρικό δίκτυο και στις οποίες η διασύνδεσή τους με αυτό θα απαιτούσε τεράστια οικονομικά κεφάλαια. Ειδικότερα για τον ελλαδικό χώρο, ο οποίος έχει πολυάριθμα μικρά νησιά και μικρούς οικισμούς, τα αυτόνομα Φ/Β συστήματα έχουν βρει πολλές εφαρμογές, αν και υπάρχουν ακόμα πολλές δυνατότητες ανάπτυξης. Σε ένα αυτόνομο Φ/Β σύστημα μπορεί να περιλαμβάνονται ή όχι ηλεκτρικοί συσσωρευτές. Έτσι, διακρίνονται σε 2 κατηγορίες:

- Αυτόνομα Φ/Β συστήματα άμεσης τροφοδοσίας του φορτίου της εφαρμογής (Direct-coupled PV systems), στα οποία η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αποδίδεται απευθείας στην κατανάλωση, όσο φωτίζεται η Φ/Β συστοιχία, χωρίς αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές.
- Αυτόνομα Φ/Β συστήματα με αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Σχεδιάζονται με πρόβλεψη ορισμένων ημερών αυτονομίας του συστήματος, με βάση το κατάλληλο μέγεθος των συσσωρευτών. Σε αυτούς λοιπόν αποθηκεύεται ηλεκτρική ενέργεια προκειμένου να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της νύχτας ή των περιόδων συννεφιάς. Αυτά αποτελούν την πλειοψηφία των αυτόνομων Φ/Β συστημάτων και για αυτό θα αναφερθούμε εκτενέστερα στη συνέχεια.

Στο σχήμα που ακολουθεί (ΣΧΗΜΑ 5.2.1) παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα ενός τέτοιου συστήματος.



ΣΧΗΜΑ 5.2.1: Απλοποιημένο διάγραμμα αυτόνομου Φ/Β συστήματος. Εάν χρησιμοποιηθεί μία βοηθητική πηγή ενέργειας, όπως φαίνεται στο σχήμα με τη διακεκομμένη γραμμή, τότε το σύστημα καλείται υβριδικό Φ/Β σύστημα.

Αποτελείται καταρχήν από τη Φ/Β γεννήτρια, η οποία είναι και το βασικότερο συστατικό του συστήματος, αφού εκεί γίνεται η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Έπειτα περιλαμβάνει συσσωρευτές για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, σε περιόδους που η παραγόμενη ενέργεια εμφανίζει περίσσεια και για την χρησιμοποίησή της όταν η παραγωγή είναι ανεπαρκής. Ο δημοφιλέστερος ίσως τύπος ηλεκτρικού συσσωρευτή, είναι ο συσσωρευτής Μολύβδου - Θεικού οξέος (Pb/H₂SO₄). Όπως είναι κατανοητό, η χωρητικότητα των μπαταριών είναι δεδομένη και υπάρχει το ενδεχόμενο να μην καλύπτουν τις ανάγκες του φορτίου σε παρατεταμένες περιόδους συννεφιάς ή κάποιας βλάβης του συστήματος. Από την άλλη μεριά όμως, η επιλογή συσσωρευτών πολύ μεγάλης χωρητικότητας κρίνεται οικονομικά ασύμφορη. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, η ιδανικότερη λύση είναι μια βοηθητική γεννήτρια (συνήθως ντηζελογεννήτρια), η οποία τίθεται σε λειτουργία όταν είναι αναγκαίο. Ένα τέτοιο σύστημα, όπως αναφέραμε και παραπάνω, καλείται υβριδικό. Τα υβριδικά συστήματα μπορούν επίσης να αποτελέσουν μία λογική προσέγγιση σε καταστάσεις όπου οι περιστασιακές αιχμές ζήτησης είναι σημαντικά υψηλότερες από τη ζήτηση φορτίου βάσης. Τέλος, αναπόσπαστα συστατικά ενός αυτόνομου συστήματος είναι οι διατάξεις για την μετατροπή της παραγόμενης ενέργειας από τα Φ/Β στοιχεία σε μορφή κατάλληλη για την τροφοδότηση των φορτίων, οι οποίες περιέχουν έναν DC/DC μετατροπέα σε συνδυασμό με έναν ανιχνευτή μέγιστης ισχύος (MPPT) και έναν DC/AC αντιστροφέα.

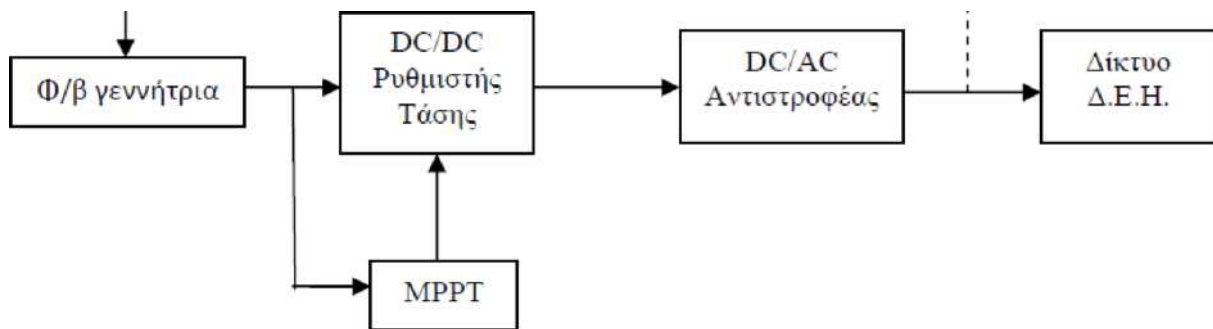
5.2.1. Διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα (GRID-CONNECTED SYSTEM)

Τα συστήματα αυτά συνδέονται απ' ευθείας στο εθνικό ή τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής παροχής (AC). Το δίκτυο αποτελεί για το Φ/Β σύστημα, μία τεράστια «δεξαμενή» ηλεκτρικής ενέργειας, σταθερής ηλεκτρικής τάσης. Συνεπώς, στα συστήματα αυτά δεν απαιτείται αποθήκευση της παραγόμενης Φ/Β ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, η συνολική αποδοτικότητα ενός διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος θα είναι καλύτερη από την αποδοτικότητα ενός αυτόνομου συστήματος, αφού το δίκτυο έχει πρακτικά απεριόριστη ικανότητα αποθήκευσης και επομένως η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί πάντοτε να αποθηκεύεται. Αντιθέτως, στις αυτόνομες εφαρμογές οι συσσωρευτές θα είναι ενίοτε πλήρως φορτισμένοι, οπότε η

παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια θα πρέπει με κάποιο τρόπο να αποβάλλεται. Τα διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα διακρίνονται σε αυτά που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο, ως κατακεντρωμένα συστήματα (Centralized systems), των οποίων η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται στο κεντρικό δίκτυο. Τα κατακεντρωμένα Φ/Β συστήματα, διακρίνονται σε αυτά που χρησιμοποιούν το δίκτυο ως βοηθητική πηγή ενέργειας (Grid back-up) και σε εκείνα που λειτουργούν σε συνεχή αλληλεπίδραση με το δίκτυο, διοχετεύοντας την επιπλέον παραγόμενη ενέργεια σ' αυτό (Grid interactive).

Τα συνδεδεμένα στο δίκτυο Φ/Β συστήματα αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό του συνόλου των εγκατεστημένων Φ/Β συστημάτων παγκοσμίως (IEA, Photovoltaic Barometer). Παρά τη θεαματική αύξηση των Φ/Β συστημάτων κεντρικού σταθμού, ιδίως μετά το 2002, τα κατακεντρωμένα Φ/Β συστήματα εξακολουθούν να αποτελούν την κύρια συνιστώσα των συνδεδεμένων στο δίκτυο Φ/Β συστημάτων, σε ποσοστό ~90%.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος.



ΣΧΗΜΑ 5.2.1.1: Απλοποιημένο διάγραμμα διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος

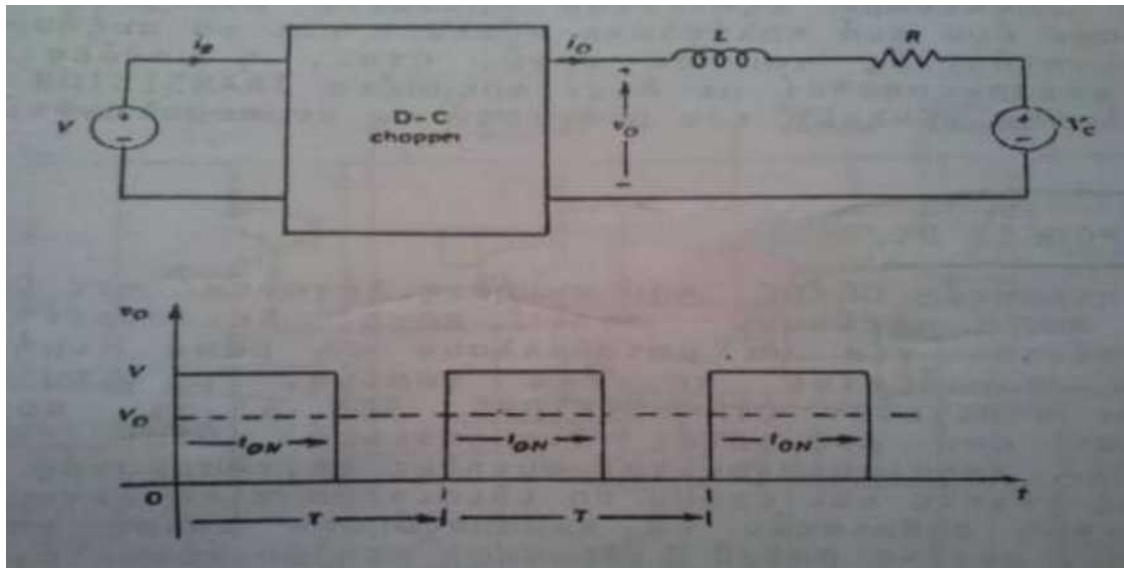
5.3. Μετατροπές Συνεχούς Τάσης

Σε ένα Φ/Β σύστημα, η παραγόμενη τάση από τα Φ/Β στοιχεία δεν έχει σταθερή τιμή, αλλά μεταβάλλεται γύρω από μία μέση τιμή. Για να σταθεροποιηθεί λοιπόν η τάση εξόδου της Φ/Β γεννήτριας και να καταστεί κατάλληλη για την είσοδό της στον αντιστροφέα στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται μετατροπές συνεχούς ρεύματος. Η μετατροπή μιας συνεχούς τάσεως V , σε συνεχή, (βασίζεται στη χρήση υψίσουχων διακοπτικών στοιχείων κυκλωμάτων (switchmode π.χ. transistors, thyristors), με τα οποία μπορούμε να διαχειριζόμαστε μεγάλη ισχύ, με ελάχιστες απώλειες.

Χωρίς να επεκταθούμε στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τη λειτουργία των δύο αυτών διακοπτικών στοιχείων, πρέπει να τονίσουμε δύο βασικές διαφορές τους κατά τη διακοπτική λειτουργία τους:

- Το Transistor για να αποτελεί κλειστό διακόπτη πρέπει να υπάρχει συνεχώς ρεύμα στη βάση του, μόλις όμως το ρεύμα στη βάση μηδενισθεί, σβήνει και το Transistor, σε αντιδιαστολή με το Thyristor που παραμένει κλειστός διακόπτης και μετά το μηδενισμό του παλμού εναύσεως.
- Για να σβήσουμε ένα Transistor πρέπει απλώς να μηδενίσουμε το ρεύμα στη βάση του, ενώ για να σβήσει ένα Thyristor ή για τη μεταγωγή (commutation) του ρεύματος σε άλλο Thyristor του κυκλώματος, πρέπει με κάποιο τρόπο να μηδενισθεί το ρεύμα μέσω αυτού (π.χ. με εξαναγκασμένη μεταγωγή με τη βοήθεια ενός πρόσθετου κυκλώματος που χρησιμοποιεί πυκνωτές κ.λ.π.).

Η αρχή λειτουργίας ενός μετατροπέα DC/DC φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί (ΣΧΗΜΑ 5.3.1):



ΣΧΗΜΑ 5.3.1: Αρχή λειτουργίας μετατροπέα DC/DC

Στο σχήμα αυτό, τα στοιχεία L , R , V_C αποτελούν το φορτίο, v_o και i_o είναι η τάση και το ρεύμα εξόδου και V_O είναι η μέση τιμή της τάσης εξόδου. Όπως φαίνεται λοιπόν, ο μετατροπέας DC/DC εφαρμόζει στο φορτίο μια σειρά παλμών τάσης της ίδιας πολικότητας. Η τιμή της τάσης V_O μπορεί να μεταβληθεί κατά τρεις διαφορετικούς τρόπους:

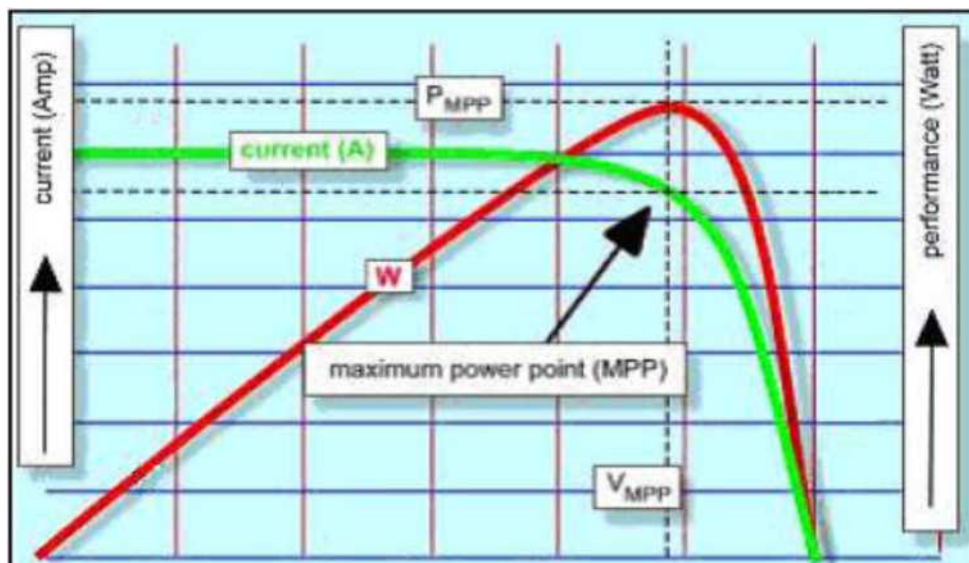
- Μεταβάλλοντας το χρόνο t_{ON} και διατηρώντας την περίοδο T σταθερή - διαμόρφωση εύρους παλμών (PULSE WIDTH MODULATION, PWM).
- Διατηρώντας το χρόνο t_{ON} σταθερό και μεταβάλλοντας την περίοδο T - διαμόρφωση συχνότητας (FREQUENCY MODULATION).
- Με συνδυασμό των δύο.

Η μονάδα DC/DC CONVERTER λοιπόν, μετατρέπει συνεχή τάση σε συνεχή, μεγαλύτερης ή μικρότερης τιμής (αναφερόμαστε σε μέση τιμή dc τάσης), ανάλογα με τις απαιτήσεις. Επίσης, οι μετατροπείς DC/DC διαφέρουν και στην περιοχή λειτουργίας τους. Θα αναφερθούμε εκτενέστερα στο σημείο αυτό σε δύο διαφορετικούς μετατροπείς: (η ανάλυση που ακολουθεί αφορά τη μόνιμη κατάσταση των μετατροπέων και τα στοιχεία θεωρούνται ιδανικά)

5.4. Ανιχνευτές σημείου μέγιστης ισχύος (MAXIMUM POWER POINT TRACKERS, MPPT)

Ο ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT), είναι μία συσκευή που επεξεργάζεται κατάλληλα το ρεύμα και την τάση εξόδου της Φ/Β συστοιχίας, ώστε σε κάθε χρονική στιγμή να απορροφάμε τη μέγιστη δυνατή ισχύ από τη συστοιχία. Τονίζουμε ότι δεν πρέπει να συγχέεται με τη συσκευή ανίχνευσης και παρακολούθησης (με μετακίνηση της συστοιχίας) της θέσεως του ηλίου. Η τεχνολογία της ανίχνευσης της μέγιστης ισχύος, άρχισε να χρησιμοποιείται σχετικά πρόσφατα στις εφαρμογές των Φ/Β και αποτελεί πλέον χαρακτηριστικό κάθε καλού αντιστροφέα για σύνδεση με το δίκτυο ή φορτιστή συσσωρευτών -για αυτόνομο Φ/Β σύστημα-. (σημειώνουμε ότι το MPPT είναι ένας μικροελεγκτής ενσωματωμένος σε DC/AC inverter ή DC/DC converter)

Στο ΣΧΗΜΑ 3.9 φαίνεται αφ' ενός μεν η I-V χαρακτηριστική, αφ' ετέρου δε η αντίστοιχη καμπύλη ισχύος συναρτήσει της τάσης ενός Φ/Β πλαισίου.



ΣΧΗΜΑ 3.9: I-V χαρακτηριστική και αντίστοιχη καμπύλη ισχύος συναρτήσει της τάσης ενός Φ/Β πλαισίου

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, έχουμε απορρόφηση μέγιστης ισχύος (MPP) αν το σημείο λειτουργίας (που εξαρτάται από το φορτίο) αντιστοιχεί σε τάση V_{MPP} και ρεύμα I_{MPP} . Ωστόσο, το σημείο μέγιστης ισχύος δεν είναι σταθερό αλλά εξαρτάται:

- Από την προσπίπτουσα ακτινοβολία, οπότε το I_{MPP} μεταβάλλεται σημαντικά ενώ η V_{MPP} ελάχιστα
- Από τη θερμοκρασία λειτουργίας του πλαισίου, οπότε η V_{MPP} μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας
- Από την καθαρότητα της γυάλινης επικάλυψης των πλαισίων, τις μεταβολές στα χαρακτηριστικά λειτουργίας λόγω γήρανσης, αστοχίες (βλάβες) των κυττάρων της συστοιχίας κ.α.

Από την άλλη μεριά, σε κάθε I-V χαρακτηριστική το σημείο λειτουργίας εξαρτάται από τη χαρακτηριστική του φορτίου. Οι πιθανοί τύποι φορτίων είναι: φορτία σταθερής αντίστασης, φορτία σταθερής τάσης (π.χ. συσσωρευτής, αν και η τάση του μεταβάλλεται σε κάποια όρια), φορτία σταθερής ισχύος ή τέλος φορτία που μεταβάλλονται με το χρόνο.

Επειδή το σημείο λειτουργίας του συστήματος καθορίζεται από την τομή της I-V χαρακτηριστικής της συστοιχίας με τη χαρακτηριστική του φορτίου, μεταβολή κάποιων (-ων) από τις παραμέτρους που επηρεάζουν είτε την I-V χαρακτηριστική και αναφέρθηκαν παραπάνω, είτε το φορτίο, ή τέλος συνδυασμός αυτών, θα έχει ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση του σημείου λειτουργίας από το σημείο μέγιστης ισχύος. Ένας MPPT είναι λοιπόν η μονάδα εκείνη που αναλαμβάνει να διατηρεί το σημείο λειτουργίας στο σημείο μέγιστης ισχύος, ανεξάρτητα από τις παραπάνω μεταβολές.

Για την ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος, χρησιμοποιούνται σήμερα πολυάριθμες τεχνικές και αλγόριθμοι. Όλες αυτές οι τεχνικές μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Έμμεσοι ανιχνευτές MPP

Αυτοί οι ανιχνευτές προσεγγίζουν το σημείο μέγιστης λειτουργίας με βάση απλές υποθέσεις και έμμεσες μετρήσεις. Για παράδειγμα, σύμφωνα με μία μέθοδο η τάση λειτουργίας ρυθμίζεται ανάλογα με την εποχή του χρόνου. Μεγαλύτερες τιμές τάσης στο σημείο μέγιστης λειτουργίας αναμένονται το χειμώνα, όπου οι θερμοκρασίες είναι χαμηλές, ενώ το καλοκαίρι οι τιμές τάσης είναι σαφώς μικρότερες. Μία άλλη μέθοδος ρυθμίζει την τάση ανάλογα με τη θερμοκρασία που αναπτύσσει το πλαίσιο. Τέλος, μία τρίτη μέθοδος κάνει χρήση του γεγονότος ότι στα περισσότερα Φ/Β στοιχεία ο λόγος τάσης στη μέγιστη ισχύ προς την τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι σταθερός.

Ένα Φ/Β στοιχείο το οποίο παραμένει ανοιχτοκυκλωμένο, τοποθετείται δίπλα από τις Φ/Β συστοιχίες για να μετράται συνεχώς η τάση ανοιχτοκύκλωσης αυτού. Η τάση τότε των παραγωγικών Φ/Β στοιχείων ρυθμίζεται κάθε στιγμή στο σημείο K-Voc, που εξασφαλίζει τη μέγιστη ισχύ.

- Άμεσοι ανιχνευτές MPP

Η λειτουργία τους βασίζεται στη συνεχή παρακολούθηση των τιμών της τάσης και έντασης εξόδου των Φ/Β γεννητριών, προκαλώντας ανά τακτά χρονικά διαστήματα μια διαταραχή της τάσης εξόδου αυτής. Όπως αναφέραμε και παραπάνω, για την ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι που δεν είναι δυνατόν να αναφερθούν εδώ. Οι περισσότεροι από αυτούς βασίζονται στη μέτρηση της ισχύος εξόδου της συστοιχίας, που με τη βοήθεια ανατροφοδότησης και ενός μετατροπέα επιτυγχάνουν μετατόπιση της τάσεως λειτουργίας ώστε να συμπέσει με την τάση που αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος. Πάντως, ανεξάρτητα από τον αλγόριθμο που θα επιλεγεί, η υλοποίησή του απαιτεί την κατασκευή μιας ηλεκτρονικής μονάδας που θα ελέγχει και θα μεταβάλλει το λόγο μετασχηματισμού τάσης εισόδου/εξόδου ενός μετατροπέα (DC/DC για αυτόνομα, DC/AC για διασυνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα) που θα λειτουργεί σαν μονάδα προσαρμογής αντιστάσεως για τη μετατόπιση του σημείου λειτουργίας.

Πράγματι, όπως φαίνεται και στο ΣΧΗΜΑ 3.9, η χαρακτηριστική ισχύος- τάσης της Φ/Β συστοιχίας, που αντιστοιχεί σε κάποια τιμή ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, γενικά παρουσιάζει ένα μόνο μέγιστο σημείο.

Επομένως κατά την ανίχνευσή του πρέπει:

- Να αυξάνουμε την V όταν $dP/dV > 0$

- Να μειώνουμε την V όταν $dP/dV < 0$

Επίσης, αν $V = \alpha \cdot V_{out}$, όπου $1/\alpha$ ο λόγος μετασχηματισμού μεταξύ τάσης εξόδου (V_{out}) και τάσης εισόδου (V) του μετατροπέα που χρησιμοποιεί ελεγχόμενο λόγο μετασχηματισμού, επειδή η τάση εξόδου (V_{out}) του μετατροπέα είναι σχεδόν σταθερή (είναι η τάση του συσσωρευτή στην περίπτωση αυτόνομου συστήματος ή η τάση του δικτύου σε περίπτωση συστήματος διασυνδεδεμένου στο δίκτυο), καθώς μεταβάλλεται το α , το dP/dV θα έχει το ίδιο πρόσημο με το $dP/d\alpha$ και $dV/d\alpha > 0$

Κατά την ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος πρέπει:

- Να αυξάνουμε το α όταν $dP/d\alpha > 0$
- Να μειώνουμε το α όταν $dP/d\alpha < 0$

Έτσι, έχοντας κατά νου ότι η κλίση της P - α χαρακτηριστικής (που είναι ισοδύναμη της P - V χαρακτηριστικής) δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα χωρίς να εισάγουμε μεταβολές στο σημείο λειτουργίας (διότι διαφορετικά θα είναι παράγωγος=0), το πρόβλημα της ανίχνευσης μεταφράζεται στον καθορισμό και την υλοποίηση κατάλληλου αλγορίθμου, που θα ελέγχει τον λόγο μετασχηματισμού του μετατροπέα, ο οποίος βασιζόμενος σε μικρές μεταβολές του σημείου λειτουργίας προσδιορίζει την τιμή ή το πρόσημο της κλίσης $dP/d\alpha$.

Μία απλοποιημένη χονδρική διάταξη MPPT παρουσιάζεται στο ΣΧΗΜΑ 3.10.



Στο σχήμα αυτό λοιπόν, παρατηρούμε ότι για να επιτευχθεί η λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα DC/DC converter, ανύψωσης-υποβιβασμού τάσης, στα άκρα της ηλεκτρονικής συσκευής στην οποία εισέρχεται η ισχύς του Φ/Β.

Ανά πάσα στιγμή η ισχύς που παράγεται από ένα Φ/Β στοιχείο είναι:

$$P = V \cdot I \quad (3.9)$$

Εάν λόγω μεταβολής π.χ. στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ή μεταβολή του φορτίου, αλλάξει η παραγόμενη ισχύς, μετατοπιστεί δηλαδή σε διαφορετικό σημείο λειτουργίας πάνω στην καμπύλη I - V , τότε θα υπάρξει μεταβολή της τάσης και μεταβολή της έντασης κατά dV και dI αντίστοιχα. Η ισχύς στο καινούριο σημείο λειτουργίας θα είναι τώρα:

$$P' = (V+dV) \cdot (I+dI) = V \cdot I + V \cdot dI + I \cdot dV \quad (3.10)$$

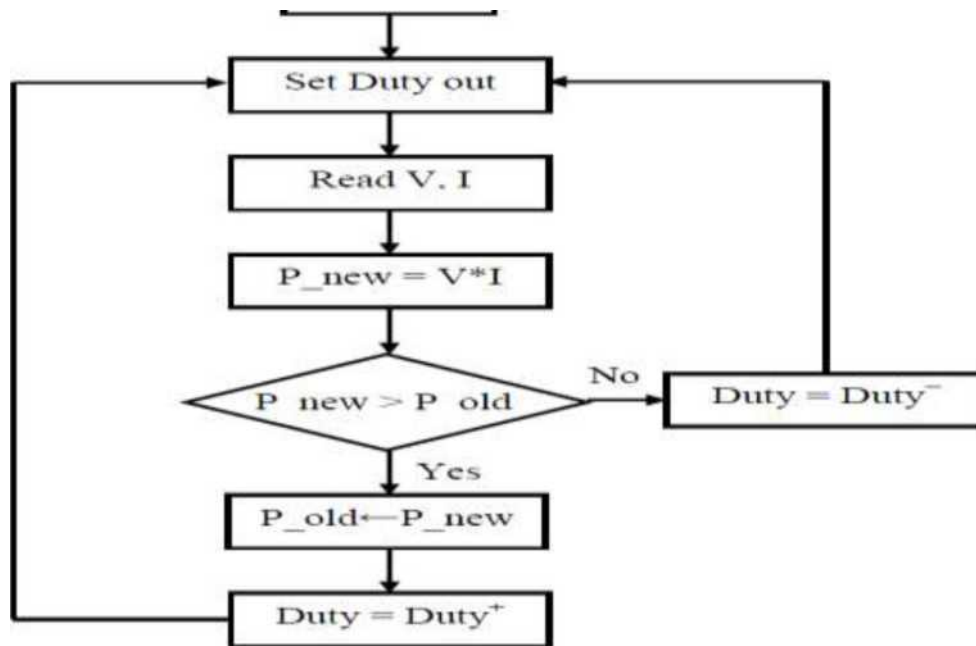
όπου αγνοήθηκαν οι όροι δεύτερης τάξης. Συνεπώς, προκύπτει μία μεταβολή στην ισχύ:

$$dP = P' - P = V \cdot dI + I \cdot dV \quad (3.11)$$

Στη συνέχεια, ρυθμίζεται κατάλληλα, σύμφωνα με όσα αναφέραμε παραπάνω, ο λόγος μετασχηματισμού του μετατροπέα ώστε να μετατοπιστεί το σημείο λειτουργίας και να ταυτιστεί εκ νέου με το σημείο μέγιστης ισχύος.

Σχετικά με το λογικό κύκλωμα ελέγχου MPPT που φαίνεται στο ΣΧΗΜΑ 3.10, αυτό μετρά την τάση και την ένταση εξόδου των Φ/Β γεννητριών. Οι τιμές αυτές βέβαια εξαρτώνται κάθε στιγμή από την ακτινοβολία που προσπίπτει, τη θερμοκρασία της γεννήτριας και φυσικά από την αντίσταση που συναντά η γεννήτρια στα άκρα της. Εφαρμόζοντας τη μέθοδο που έχει περιγραφεί παραπάνω, στέλνει σήμα στον DC/DC μετατροπέα να ανυψώσει ή να μειώσει την τάση μέχρι να εντοπιστεί το σημείο μέγιστης ισχύος. Ανάλογα με την περίπτωση λοιπόν, το συγκεκριμένο κύκλωμα λειτουργεί είτε ως μετατροπέας ανύψωσης είτε ως μετατροπέας υποβιβασμού τάσης.

Ακολουθεί ένα ενδεικτικό διάγραμμα ροής ενός απλού αλγορίθμου εύρεσης MPP:



ΣΧΗΜΑ 3.11: Διάγραμμα ροής ενός απλού αλγορίθμου εύρεσης MPP

Το συγκεκριμένο διάγραμμα ροής αντιστοιχεί σε έναν απλό αλγόριθμο που συγκρίνει δύο διαδοχικές μετρήσεις της ισχύος, οπότε το αντίστοιχο κύκλωμα υλοποίησης του αλγορίθμου απαιτείται να διαθέτει μνήμη, ώστε να συγκρίνει τις τρέχουσες μετρούμενες τιμές ισχύος, τάσης, έντασης με προηγούμενες οπότε να προσαρμόζει ανάλογα τη στάθμη της τάσης που θα απορροφήσει ο αντιστροφέας.

Σύμφωνα με το διάγραμμα ροής, εισάγεται μία περιοδική διαταραχή της τάσης και ελέγχεται αν αυτή προκαλεί αύξηση ή μείωση της παραγόμενης ισχύος.

- Αν το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της ισχύος, τότε εισάγεται εκ νέου η ίδια διαταραχή (αν εισήχθηκε αύξηση της τάσης τότε εισάγεται και πάλι αύξηση και το αντίστοιχο αν είχε εισαχθεί μείωση).
- Αν το αποτέλεσμα είναι η μείωση της ισχύος, τότε εισάγεται η αντίθετη διαταραχή (αν εισήχθηκε αύξηση της τάσης τότε εισάγεται μείωση και το αντίστοιχο αν είχε εισαχθεί μείωση της τάσης). Ο παραπάνω αλγόριθμος χρησιμοποιεί δύο σημεία της καμπύλης ισχύος και ταλαντεύεται γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος. Το κύριο μειονέκτημά του είναι ότι εμφανίζει απώλειες ισχύος ιδίως

στην περίπτωση που η ηλιακή ακτινοβολία αλλάζει απότομα. Μια καλύτερη υλοποίηση μπορεί να προσφέρει ένας αλγόριθμος που εκμεταλλεύεται τρία σημεία της καμπύλης ισχύος.

Συνοψίζοντας λοιπόν, με τη χρήση ενός MPPT πετυχαίνουμε να εκμεταλλευόμαστε τη μέγιστη δυνατή ισχύ που μπορεί να αποδώσει ένα Φ/Β σύστημα, που σημαίνει και αύξηση του βαθμού απόδοσης. Από την άλλη μεριά όμως, μία τέτοια μονάδα παρουσιάζει άλλου είδους προβλήματα, όπως το αυξημένο κόστος, την τιμή του βαθμού απόδοσης κατά τη μετατροπή και τέλος, σχετικά με την αξιοπιστία του συστήματος. Κατά συνέπεια, η απόφαση για τη χρησιμοποίηση ή μη ενός MPPT σε κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή, πρέπει να βασίζεται σε μία ανάλυση - με λεπτομερή εξομείωση της λειτουργίας του συστήματος ή με πειραματικές επιτόπιες μετρήσεις - που θα μελετά τόσο το ενεργειακό ισοζύγιο όσο και το κόστος (χωρίς ή με MPPT) ώστε να είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε εκ των προτέρων ποια λύση είναι πλεονεκτικότερη.

5.5. Αντιστροφέας (DC/AC INVERTER)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η τάση που παράγεται από τη ΦΒ γεννήτρια είναι ακατάλληλη για την άμεση σύνδεση του ΦΒ σταθμού στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ΦΒ στοιχεία παράγουν συνεχή τάση. Παρόλα αυτά, η χρησιμοποίηση εναλλασσομένου ρεύματος σε ΦΒ εφαρμογές επιβάλλεται, στις περισσότερες των περιπτώσεων, εξαιτίας της επικράτησής του, κατά γενικό τρόπο, σε κάθε είδους οικιακές χρήσεις και εφαρμογές καθώς και στη βιομηχανία.

Ο απλούστερος τρόπος μετατροπής DC ισχύος σε AC είναι η μηχανική σύνδεση ενός DC κινητήρα με AC γεννήτρια, που όμως παρουσιάζει μικρό βαθμό απόδοσης. Όμως, η καθιερωμένη πλέον μέθοδος για μία τέτοια μετατροπή βασίζεται στη χρήση ημιαγωγών στοιχείων (transistor, thyristor) και έτσι προκύπτει ο καθαρά ηλεκτρονικός αντιστροφέας DC/AC inverter.

Ο ρόλος λοιπόν του αντιστροφέα (DC/AC inverter) είναι η μετατροπή της συνεχούς τάσης που παράγεται από τα ΦΒ στοιχεία σε εναλλασσόμενη, κατάλληλης τιμής και συχνότητας για σύνδεση στο δίκτυο (ή σε εφαρμογές οικιακής χρήσεως).

Γενικά, ένας αντιστροφέας πρέπει να εκτελεί τρεις λειτουργίες, που είναι α) αντιστροφή, β) ρύθμιση της τάσης και γ) διαμόρφωση της κυματομορφής. Οι αντιστροφείς DC/AC μπορεί να είναι είτε μονοφασικοί είτε τριφασικοί.

Όταν η είσοδος είναι μία πηγή τάσης, αυτοί ονομάζονται αντιστροφείς πηγής τάσης (VSI) ενώ όταν ως είσοδος λαμβάνεται μια πηγή έντασης ονομάζονται αντιστροφείς πηγής έντασης (CSI). Ο χαρακτηρισμός του αντιστροφέα δεν έχει να κάνει απαραίτητα με την ενεργειακή πηγή του συστήματος, αλλά με την τοπολογία. Έτσι είναι δυνατόν να αλλάξει η μορφή της πηγής χρησιμοποιώντας παθητικά στοιχεία. Οι αντιστροφείς πηγής τάσης έχουν μία χωρητικότητα παράλληλα συνδεδεμένη με την πηγή, ενώ οι αντιστροφείς πηγής έντασης ένα πηνίο σε σειρά με την πηγή.

Τέλος, οι αντιστροφείς των οποίων τα διακοπτικά στοιχεία είναι θυρίστορ, μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής: Όταν η ενέργεια για το σβήσιμο των θυρίστορ παρέχεται από μία εξωτερική πηγή (δίκτυο), τότε ανήκουν στην κατηγορία των αντιστροφέων οδηγούμενων από το δίκτυο (φυσική μετάβαση). Όταν η ενέργεια αυτή προέρχεται από εσωτερικά κυκλώματα που περιέχουν στοιχεία όπως πυκνωτές, τότε ανήκουν στην κατηγορία των αυτοοδηγούμενων αντιστροφέων (εξαναγκασμένη μετάβαση).

5.6. Σύνδεση με το δίκτυο

Η λειτουργία ενός ηλεκτρικού δικτύου ελέγχεται από συσκευές προστασίας και ρύθμισης της τάσης, που έχουν σκοπό την παροχή προς τους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας αποδεκτής ποιότητας, ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των σφαλμάτων και προσφέροντας υψηλό επίπεδο ασφάλειας. Η σύνδεση μονάδων παραγωγής στο δίκτυο πρέπει να συμβαδίζει με αυτές τις γενικές αρχές, ώστε αφενός μεν να μην προκαλούνται ενοχλήσεις στους λοιπούς καταναλωτές και αφετέρου να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ του δικτύου διανομής και των εγκαταστάσεων των παραγωγών.

Ο τρόπος σύνδεσης μίας δεδομένης εγκατάστασης παραγωγής δεν προκύπτει μονοσήμαντα από την ονομαστική ισχύ της. Δηλαδή, σταθμοί παραγωγής ίδιας ισχύος μπορεί να συνδέονται στο δίκτυο κατά τελείως διαφορετικούς τρόπους, ανάλογα με τα ειδικά τεχνικά χαρακτηριστικά τους, την κατά περίπτωση υφιστάμενη κατάσταση δικτύων και την προβλεπόμενη ανάπτυξή τους. Γενικά, ο τρόπος διασύνδεσης αποτελεί αντικείμενο τεχνικοοικονομικής εξέτασης.

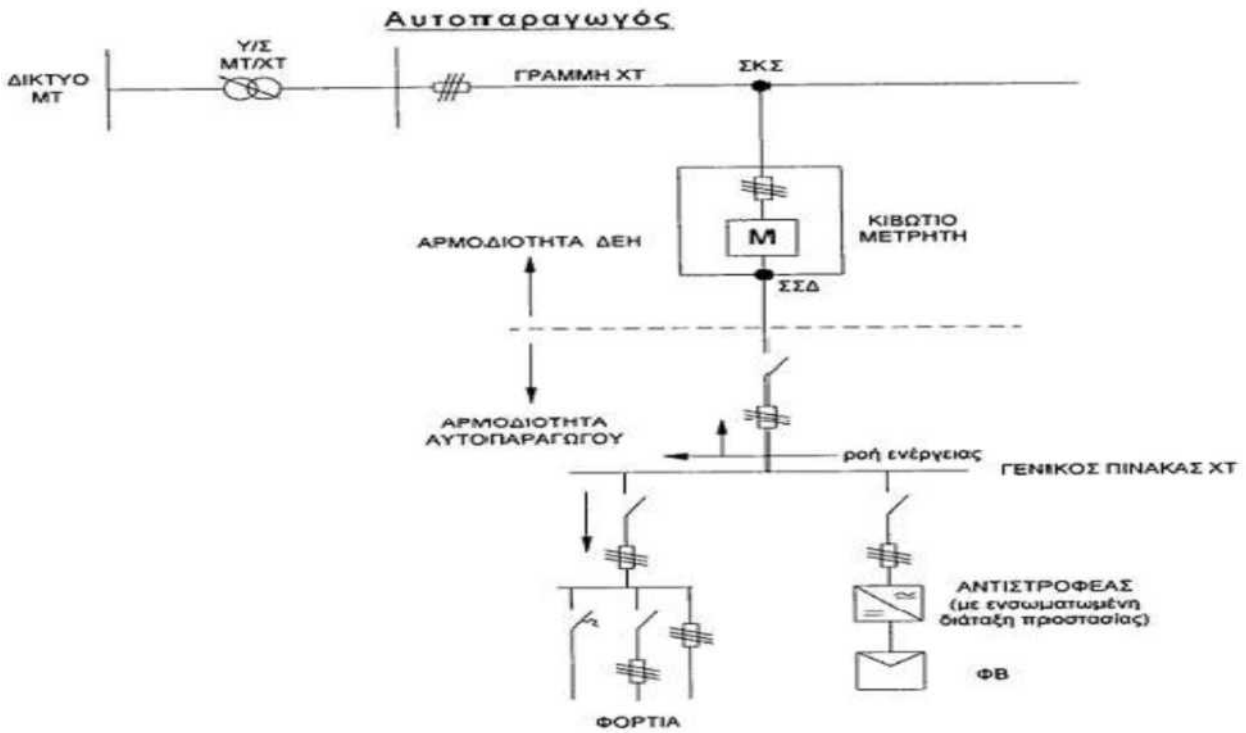
Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν οι ακόλουθοι δύο περιορισμοί ως προς το επίπεδο τάσης στο οποίο μπορεί να συνδεθεί μία εγκατάσταση παραγωγής, οι οποίοι εφαρμόζονται ασχέτως των λοιπών τεχνικών κριτηρίων:

- Εγκαταστάσεις ισχύος μεγαλύτερης των 100 KW δεν μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο χαμηλής τάσης (ΧΤ).
- Εγκαταστάσεις ισχύος μεγαλύτερης των 20 MW δεν μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο μέσης τάσης (ΜΤ).

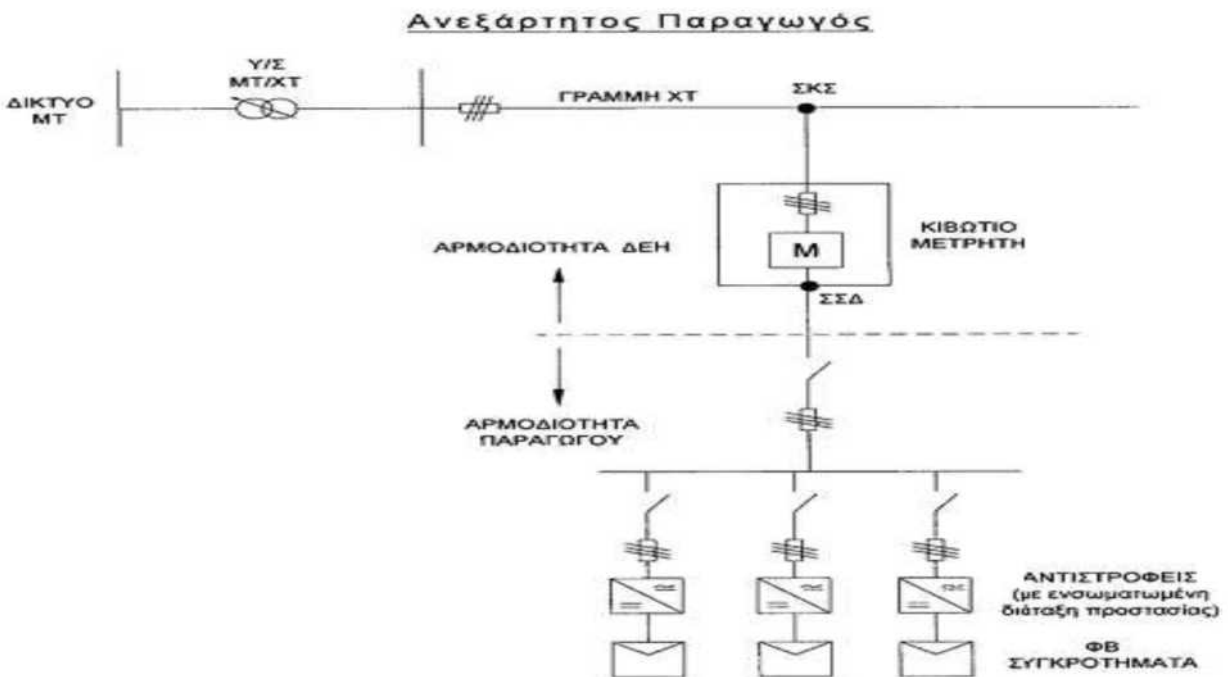
Ενημερωτικά αναφέρουμε ότι:

1. το δίκτυο ΧΤ της ΔΕΗ είναι στα 220/380V,
2. το δίκτυο ΜΤ της ΔΕΗ είναι στα 20KV,
3. το δίκτυο ΥΤ της ΔΕΗ είναι στα 150KV,
4. το δίκτυο ΥΥΤ της ΔΕΗ είναι στα 400KV-

Παρακάτω παρατίθενται τα δύο δυνατά, τυπικά σχήματα σύνδεσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος με το δίκτυο χαμηλής τάσης της ΔΕΗ:



ΣΧΗΜΑ 3.23: Τυπικό σχήμα σύνδεσης αυτοπαραγωγού με το δίκτυο ΧΤ της ΔΕΗ



ΣΧΗΜΑ 3.24: Τυπικό σχήμα σύνδεσης ανεξάρτητου παραγωγού με το δίκτυο ΧΤ της ΔΕΗ

ΣΚΣ (Σημείο Κοινής Σύνδεσης): είναι το πλησιέστερο στην εγκατάσταση παραγωγής σημείο του δικτύου όπου συνδέονται άλλοι πελάτες.

ΣΣΔ (Σημείο Σύνδεσης στο Δίκτυο): το άκρο της γραμμής προς την πλευρά της εγκατάστασης, δηλαδή το σημείο φυσικής σύνδεσης της εγκατάστασης.

Οι πιο σημαντικές τεχνικές διευκρινίσεις που απαιτούνται από τη ΔΕΗ είναι:

- Σταθμοί ισχύος μέχρι 100 kW συνδέονται στο δίκτυο χαμηλής τάσης, μέσω μονοφασικής παροχής προκειμένου για ισχύ μέχρι 5 kW και τριφασικής παροχής προκειμένου για ισχύ άνω των 5 kW και μέχρι τα 100 kW.
- Οι προεπιλεγμένες τιμές ρυθμίσεων των προστασιών ορίων τάσεως και συχνότητας θα πρέπει να είναι οι εξής:

Διασυνδεδεμένο Σύστημα: Τάση: -20% έως +15% της ονομαστικής

Συχνότητα: +/- 0,5 Hz Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά: Τάση: -20% έως +15% της ονομαστικής

Συχνότητα: από 51 Hz έως 47,5 Hz

- Η Ολική Αρμονική Παραμόρφωση (THD) του ρεύματος των αντιστροφών δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 5%.
- Εφόσον οι αντιστροφείς δεν διαθέτουν μετασχηματιστή απομόνωσης, η έγχυση συνεχούς ρεύματος θα πρέπει να περιορίζεται στο 0,5% του ονομαστικού.
- Η προστασία έναντι του φαινομένου της νησιδοποίησης είναι υποχρεωτική. (Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται σε διανεμημένα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο. Όταν το διανεμημένο σύστημα συνεχίζει να παρέχει ισχύ σε ένα τμήμα του δικτύου της ΔΕΗ ενώ το τμήμα αυτό έχει αποσυνδεθεί για κάποιο λόγο από το κεντρικό δίκτυο, π.χ. για εργασίες συντήρησης, τότε λέμε ότι εμφανίζεται το φαινόμενο της νησιδοποίησης)

Κεφάλαιο 6°

ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Ο σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η εγκατάσταση ενός ΦΒ σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον ελλαδικό χώρο, που θα έχει ισχύ περί τα 100kWp. Αρχικά θα εξετάσουμε το ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας και θα αναφερθούμε λεπτομερώς στην πόλη στην οποία και θα γίνει η εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού πάρκου. Η πόλη που επιλέγεται είναι η Κόρινθος.

Σχετικά με την κλίση των συστοιχιών, θεωρούμε μεταβολή της κλίσης δύο φορές το χρόνο με τη βοήθεια ενός απλού μηχανισμού. Δεν θα εξετάσουμε την περίπτωση συστήματος με κινούμενες συστοιχίες που θα ακολουθούν τις ακτίνες του ήλιου, για λόγους ταχύτητας διεκπεραίωσης του έργου, συντήρησης και για λόγους αυξημένης οικονομικής επιβάρυνσης.

Η ευρύτερη περιοχή έχει θαμνώδη βλάστηση, ενώ δεν υπάρχουν σε κοντινή απόσταση κτίρια ή κάποιο ψηλό βουνό ή κάποιο άλλο εμπόδιο που θα μπορούσε να δημιουργήσει προβλήματα σκίασης.

Στην περιοχή πνέουν αρκετά ισχυροί άνεμοι με μέσο όρο 3m/s.

Η έκταση γης στην οποία θα πραγματοποιηθεί η εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού πάρκου, βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από το δίκτυο ΧΤ, οπότε δεν δικαιολογούνται επιπλέον έξοδα υποδομών για διασύνδεση στο δίκτυο.

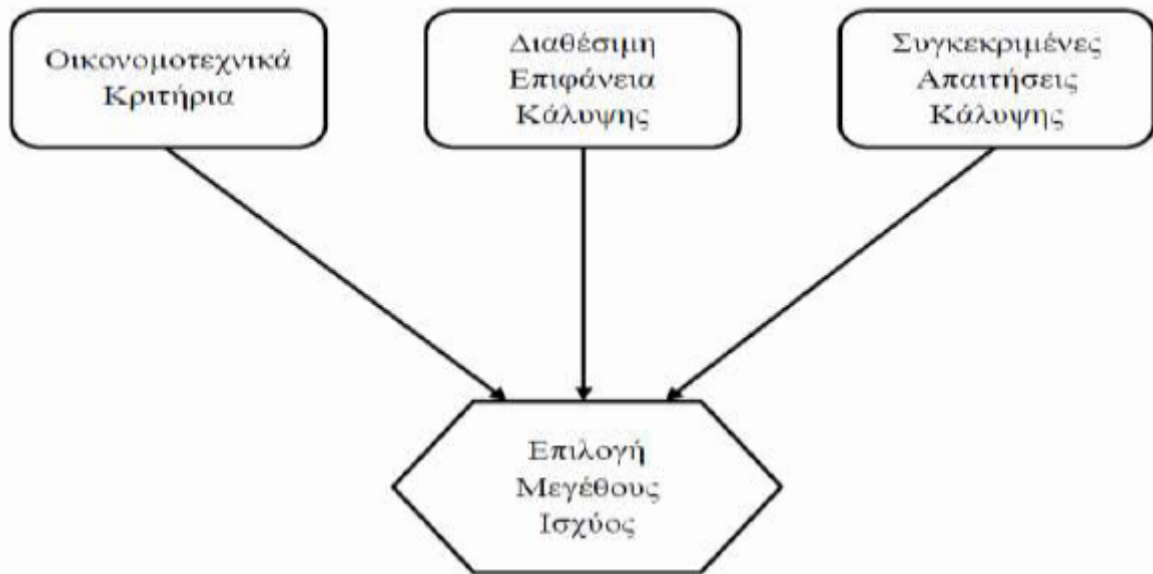
Επίσης, θα εξετάσουμε χωρίς όμως να επεκταθούμε πολύ (καθώς δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσης μελέτης), διάφορα μέτρα για την προστασία της εγκατάστασης, όπως γειώσεις και αντικεραυνική προστασία.

6.1 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Μέγεθος αφετηρία για τη σχεδίαση ενός ΦΒ πάρκου αποτελεί η ισχύς του, η οποία καθορίζεται κατά περίπτωση από τα παρακάτω κριτήρια (Σχήμα 6.1):

- Οικονομοτεχνικά κριτήρια (απαιτήσεις επενδυτή, μέγεθος επένδυσης). Στην περίπτωση αυτή, στην οποία απαιτείται οικονομοτεχνική μελέτη, εμπíπτουν κυρίως οι αυτοπαραγωγοί, με απευθείας διασυνδεδεμένα στο δίκτυο ΦΒ συστήματα.
- Κριτήρια με βάση την διαθέσιμη επιφάνεια κάλυψης. Στην περίπτωση αυτή, η ισχύς του πάρκου είναι ίση με την ισχύ που προκύπτει αν καλύψουμε πλήρως με συλλέκτες τη διαθέσιμη επιφάνεια (εννοείται ότι συνυπολογίζονται οι ζώνες σκίασης και επισκεψιμότητας). Το σύστημα μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα, με συσσωρευτές, ή με απευθείας διασύνδεση στο δίκτυο, χωρίς συσσωρευτές.
- Καθαρά τεχνικά κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά αφορούν τον καθορισμό συγκεκριμένου μεγέθους ισχύος που απορρέει από συγκεκριμένες απαιτήσεις κατανάλωσης (αυτόνομα συστήματα μη διασυνδεδεμένα, είτε αυτοπαραγωγοί όπως στο πρώτο κριτήριο). Το μειονέκτημα του αυτόνομου συστήματος είναι ότι δεν αξιοποιεί την ενέργεια όταν δεν υπάρχει κατανάλωση, πράγμα που δεν

ισχύει με το απευθείας διασυνδεδεμένο σύστημα.

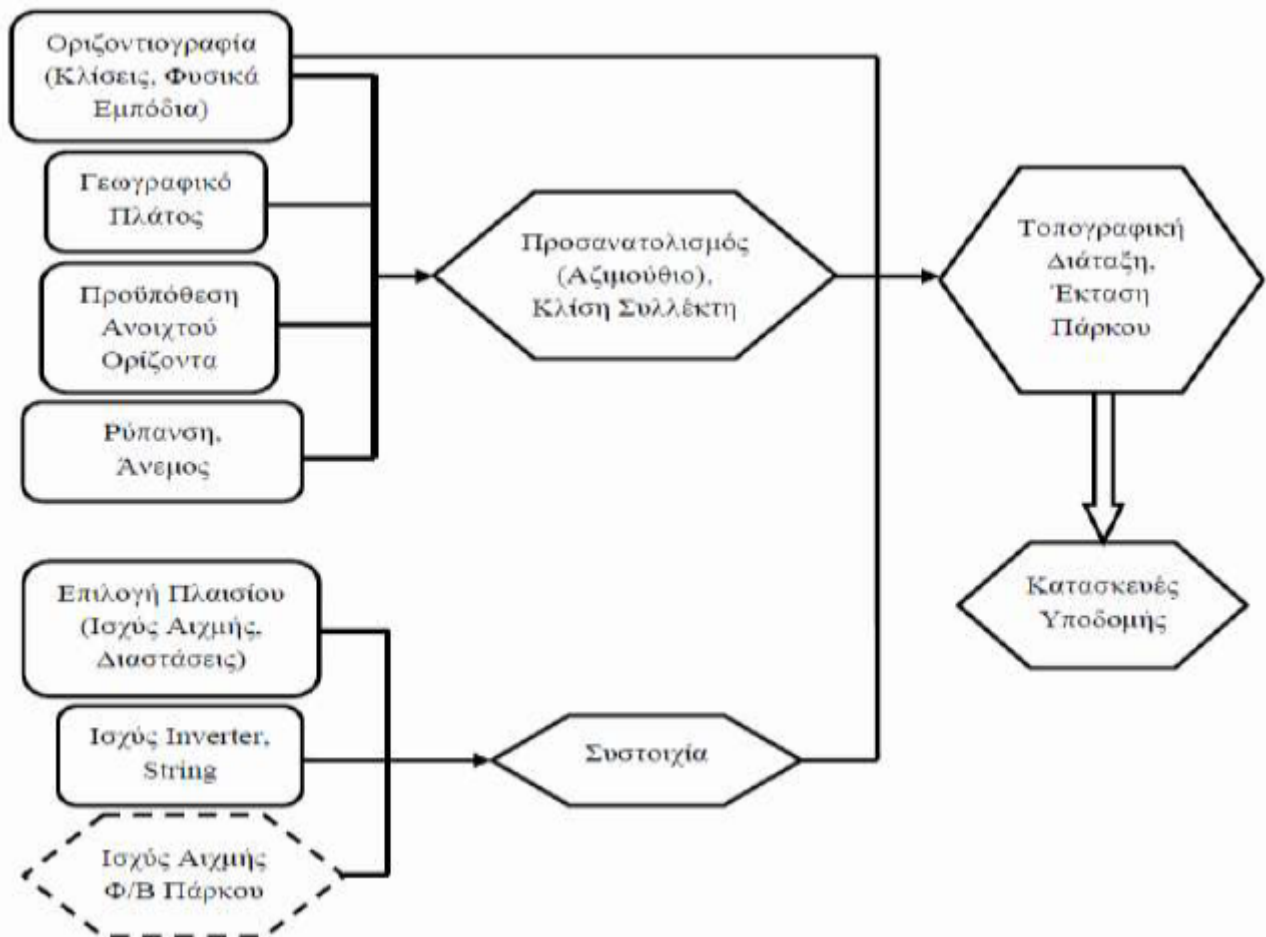


6.1 : Κριτήρια επιλογής της ισχύος

Στην περίπτωσή μας, το μοναδικό κριτήριο που θα καθορίσει το μέγεθος της ισχύος του ΦΒ πάρκου είναι το ποσό της επένδυσης που είναι διαθέσιμο. Εφόσον λοιπόν έχουμε στη διάθεσή μας την απαραίτητη έκταση και πρόθεσή μας είναι να υλοποιηθεί το έργο με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ισχύ, αλλά χωρίς να υπερβαίνει τα 100kWp (γεγονός που θα δημιουργούσε καθυστερήσεις λόγω γραφειοκρατίας και επιπλέον αδειών, βεβαιώσεων κλπ.), επιλέγεται αυτό το μέγεθος της ισχύος (100kWp).

Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια ΦΒ Πάρκου

Το ζητούμενο σε κάθε εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Για να γίνει αυτό, πρέπει να είναι κατανοητό από ποιούς παράγοντες εξαρτάται, με πρωταρχικό παράγοντα φυσικά το διαθέσιμο ηλιακό δυναμικό της περιοχής. Για το λόγο αυτό, παραθέτουμε το ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 6.2), όπου φαίνονται όλοι αυτοί οι παράγοντες:

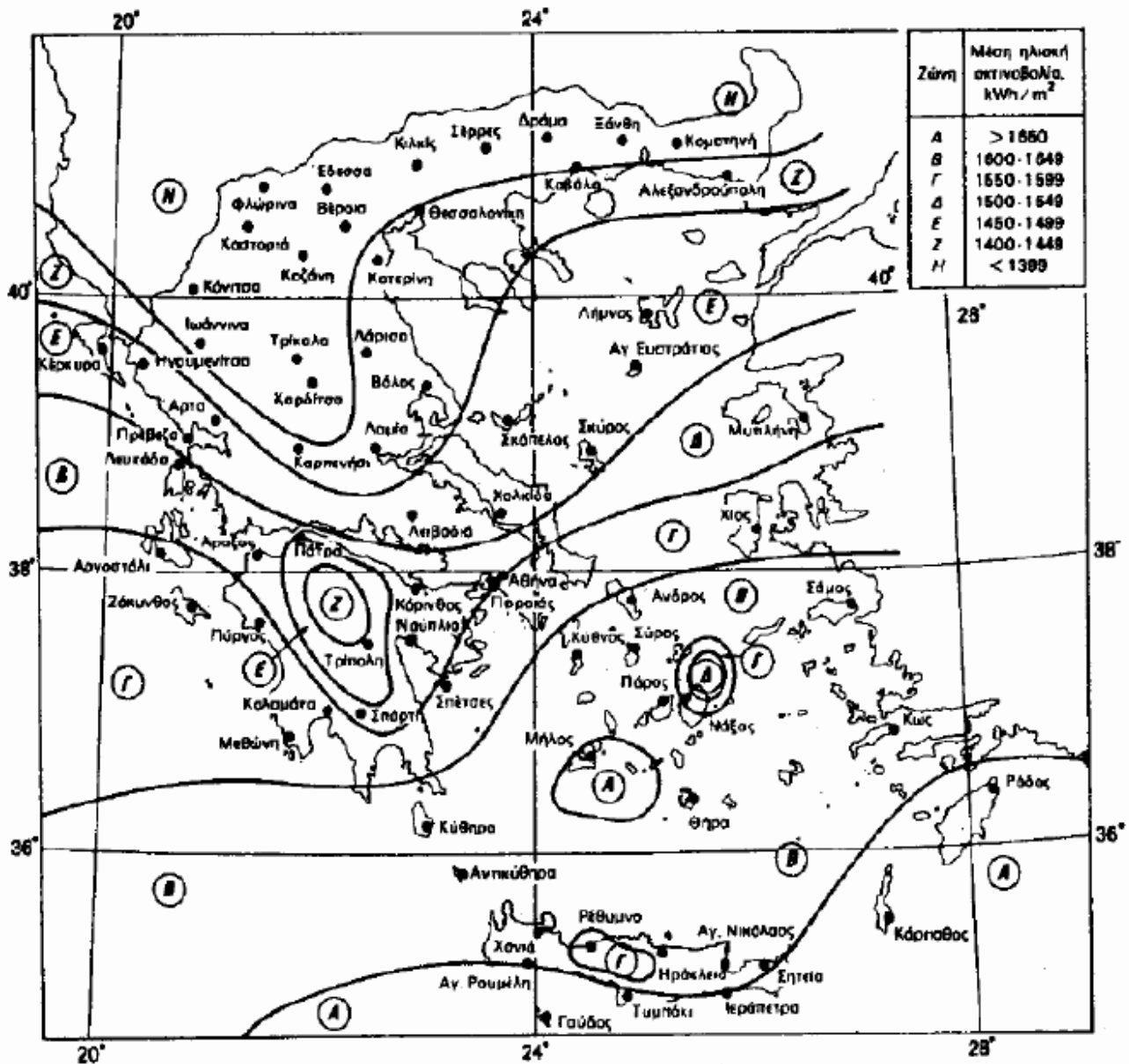


6.2 : Αλγόριθμος υπολογισμού παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ΦΒ πάρκου

6.2 ΚΛΙΣΗ ΤΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ - ΗΛΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Η τοποθεσία στην οποία βρίσκεται ένας ΦΒ σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζει την παραγόμενη ισχύ, λόγω των καιρικών φαινομένων της συγκεκριμένης περιοχής και της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται. Το ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας είναι από τα υψηλότερα της Ευρώπης, με σημαντικές διακυμάνσεις όμως από περιοχή σε περιοχή στο εσωτερικό της χώρας.

Ο Ελλαδικός χώρος μπορεί να χωριστεί σε 7 ζώνες ανάλογα με το ποσό της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται (Σχήμα 6.3):



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

Όπως βλέπουμε από τον παραπάνω χάρτη, οι υψηλότερες τιμές ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζονται στο νότιο και νοτιοανατολικό Αιγαίο και την Κρήτη. Μάλιστα, οι περιοχές της Ελλάδας με υψηλό δυναμικό έχουν ετήσια ηλιακή ακτινοβολία κατά 25% περίπου υψηλότερη από αυτές με χαμηλό δυναμικό.

- Σταθερή ετήσια κλίση

Καταρχήν, εφ' όσον βρισκόμαστε στο βόρειο ημισφαίριο, οι Φ/Β συστοιχίες θα κοιτούν προς το Νότο. Αφού λοιπόν επιλέγουμε απόλυτα νότιο προσανατολισμό, η τιμή της αζιμουθιας γωνίας γ επιλέγεται μηδενική. Ο στόχος μας τώρα είναι η εύρεση της βέλτιστης κλίσης των Φ/Β συστοιχιών ως προς το οριζόντιο επίπεδο σε ετήσια βάση, δηλαδή εκείνη η κλίση που θα εξασφαλίσει τη μέγιστη ετήσια ηλιακή ακτινοβολία.

Οι τιμές της μέσης μηνιαίας ηλιακής ακτινοβολίας στην Κόρινθο (kWh/m^2), σε οριζόντιο επίπεδο αλλά και για διάφορες κλίσεις, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

κλίση β ($^\circ$)	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ
0	55	72	124	147	200	215	218	197	153	107	66	53
7-14	66	82	134	151	200	212	216	201	163	121	79	66
23-33	83	96	145	150	189	195	201	196	172	140	100	86
42-52	91	100	145	141	170	173	180	181	168	146	109	96

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2 (Πηγή: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος)

- Εναλλαγή μεταξύ δύο κλίσεων στη διάρκεια ενός έτους

Ο λόγος που επιλέγουμε δύο κλίσεις στη διάρκεια ενός έτους είναι η βελτίωση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στα Φ/Β πλαίσια. Το καλοκαίρι ευνοούνται μικρές τιμές της κλίσης (10° - 25°) ενώ το χειμώνα ευνοούνται μεγαλύτερες τιμές (45° - 60°).

Επομένως η κλίση των συστοιχιών θα αλλάζει μεταξύ δύο θέσεων κάθε 6 μήνες. Σημειώνουμε ότι ως καλοκαιρινούς μήνες θεωρούμε τους 6 μήνες με τις μεγαλύτερες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας (Απρίλιος μέχρι Σεπτέμβριος) και ως χειμερινούς τους 6 με τις μικρότερες (Οκτώβριος μέχρι Μάρτιος).

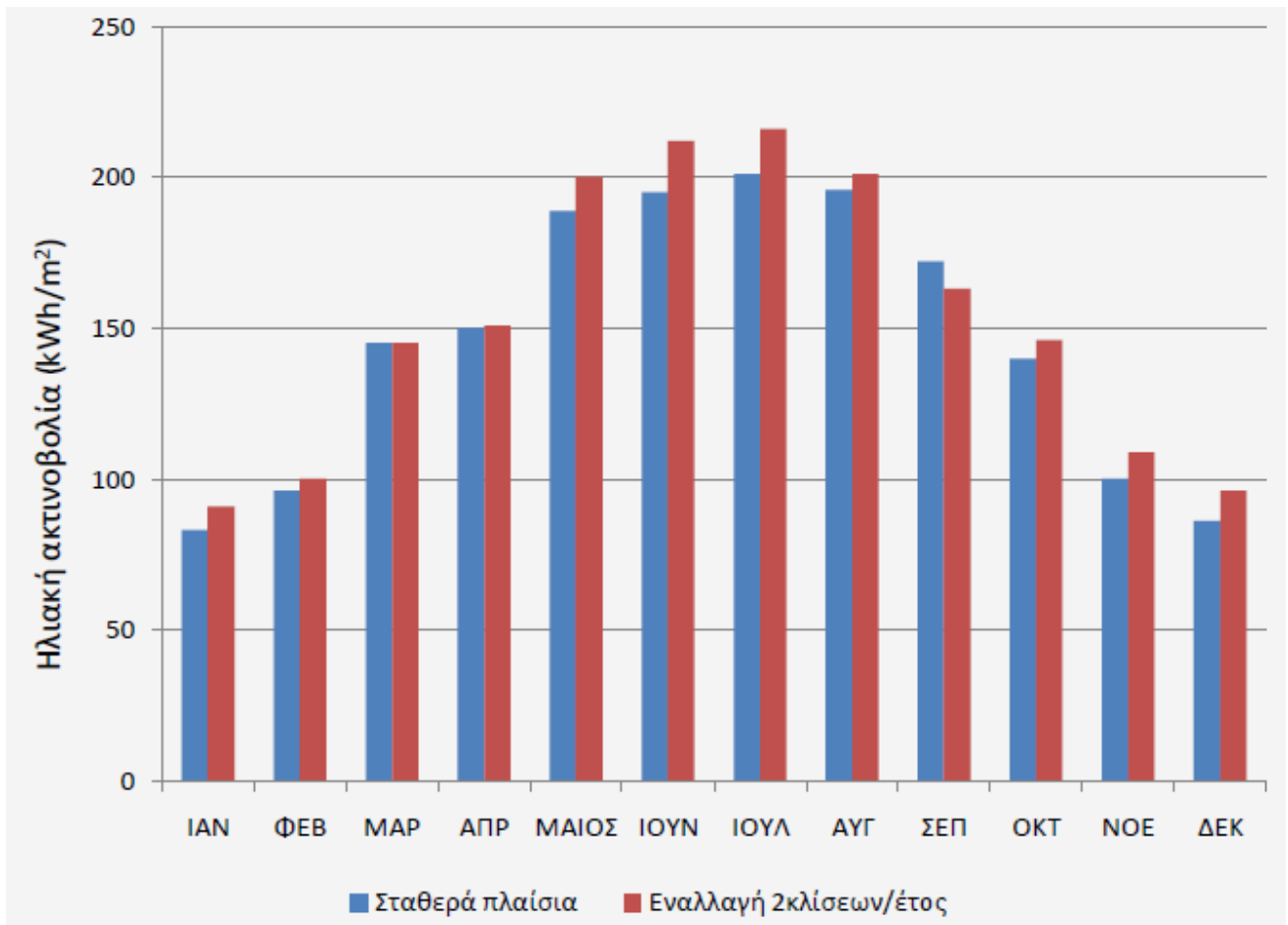
Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζεται η βέλτιστη κλίση σε ετήσια (Ε) βάση, χειμερινή (Χ) και θερινή (Θ) περίοδο, καθώς και η αντίστοιχη ηλιακή ενέργεια για αυτές τις κλίσεις, για την περιοχή της Κορίνθου:

κλίση (β°)	Ε	Χ	Θ
7-14	1692	578	1144
23-33	1753	660	1102
42-52	1699	682	1013

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3 (Πηγή: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος)

Παρατηρούμε λοιπόν ότι η βέλτιστη κλίση για τους καλοκαιρινούς μήνες είναι περίπου 10° και η ηλιακή ακτινοβολία που προκύπτει για αυτούς τους μήνες είναι 1144 kWh/m^2 , ενώ για τους χειμερινούς μήνες είναι περίπου 50° και η αντίστοιχη ακτινοβολία είναι 682 kWh/m^2 . Επομένως, η συνολική ετήσια ακτινοβολία που προκύπτει με την εναλλαγή μεταξύ των δύο παραπάνω κλίσεων είναι 1826 kWh/m^2 . Εάν είχαμε μία μόνο σταθερή ετήσια κλίση (30°), τότε η συνολική ετήσια ακτινοβολία που θα προέκυπτε θα ήταν 1753 kWh/m^2 . Επομένως, το κέρδος σε σχέση με τη σταθερή ετήσια κλίση είναι 73 kWh/m^2 ή περίπου 4,1%.

Τέλος, στο ΣΧΗΜΑ 6.4 φαίνονται οι μηνιαίες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας για σταθερή ετήσια κλίση και για εναλλαγή της κλίσης μεταξύ δύο θέσεων στη διάρκεια του έτους, όπως μελετήσαμε παραπάνω. Όπως βλέπουμε, παρόλο που τους περισσότερους μήνες η σταθερή ετήσια γωνία υστερεί, το μήνα Σεπτέμβριο συμβαίνει το αντίθετο.



ΣΧΗΜΑ 6.4: Μηνιαίες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας για σταθερή ετήσια κλίση και για εναλλαγή της κλίσης μεταξύ δύο θέσεων στη διάρκεια του έτους

Στην παρούσα μελέτη, όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω, θα δουλέψουμε με μεταβολή της κλίσης των συστοιχιών δύο φορές το χρόνο με τη βοήθεια ενός απλού μηχανισμού, παρόλο που στην συγκεκριμένη περιοχή εγκατάστασης του ΦΒ πάρκου βλέπουμε ότι το κέρδος που θα μας αποφέρει αυτή η επιλογή δεν είναι πολύ μεγάλο (~4,1%).

Τέλος σημειώνουμε ενημερωτικά ότι:

- η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε μία επιφάνεια με σταθερή βάση μπορεί να αυξηθεί 4-6% με τη μεταβολή της κλίσης ανά μήνα ή ανά εποχή.
- στην Ελλάδα, συστήματα περιστρεφόμενων βάσεων ενός άξονα αυξάνουν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία κατά 23~25% ενώ σε συστήματα δύο αξόνων η αύξηση ανέρχεται περίπου στο 28~30%.

6.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Η επιλογή των ΦΒ πλαισίων δεν είναι ένα εύκολο θέμα, λόγω της πληθώρας των κατασκευαστικών εταιριών και των τύπων πλαισίων. Οι κυριότερες παράμετροι σύμφωνα με τις οποίες θα επιλέξουμε τα πλαίσια που θα χρησιμοποιηθούν στο υπό μελέτη ΦΒ πάρκο, είναι η αξιοπιστία και η τεχνογνωσία της κατασκευάστριας εταιρίας, η απόδοσή τους, η μέγιστη ισχύς που παράγουν και φυσικά το κόστος.

Η πρώτη απόφαση που πρέπει να ληφθεί έχει να κάνει με το είδος του ΦΒ πλαισίου όσον αφορά την τεχνολογία κατασκευής του (βλ. ΠΙΝΑΚΑ 6.4). Οι κυρίαρχοι υποψήφιοι στην επιλογή μας ήταν τα πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου και πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

Υλικό φ/β στοιχείων	Απόδοση φ/β στοιχείων του εμπορίου	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο	14-19%	<ul style="list-style-type: none"> • Ομοιόμορφη μορφακή δομή • Μεγάλος βαθμός απόδοσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλό κόστος παραγωγής • Μεγάλες απώλειες κατά τη διαδικασία κοπής • Ενεργόβόρα διαδικασία παραγωγής
Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο	10-14%	<ul style="list-style-type: none"> • Οικονομικότερη παραγωγική διαδικασία από το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο • Τετραγωνικά δισκία επιτρέπουν μεγαλύτερο δεικτη κάλυψης 	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλότερη απόδοση συγκρινόμενη με το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο • Μεγάλες απώλειες κατά τη διαδικασία κοπής
Ribbon Πυρίτιο	Έως 15%	<ul style="list-style-type: none"> • Λιγότερες απώλειες πυριτίου στην παραγωγή 	<ul style="list-style-type: none"> • Χειρότερη ποιότητα πυριτίου από αυτή του μον'κού • Περιορισμένες εμπορική παραγωγή μέχρι σήμερα
Thin-film Πυρίτιο	Έως 17% (πραγσία εξελισσόμενη έρευνα)	<ul style="list-style-type: none"> • Λιγότερο χρησιμοποιούμενο υλικό • Όχι μεγάλες απαιτήσεις σε υλικό υποστρώματος • Πολλά υποσχόμενη τεχνολογία 	<ul style="list-style-type: none"> • Περιορισμένες εμπορική παραγωγή μέχρι σήμερα
Άμορφο Πυρίτιο	6-9%	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλό κόστος παραγωγής συγκρινόμενο με το κρυσταλλικό πυρίτιο • Υψηλό επίπεδο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας 	<ul style="list-style-type: none"> • Μικρός βαθμός απόδοσης • Βαθμιαία μείωση της απόδοσης με την πάροδο του χρόνου
Αρσενικούχο γάλλιο	25-30%	<ul style="list-style-type: none"> • Μεγάλος βαθμός απόδοσης • Υψηλή θερμική αδράνεια 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλό κόστος παραγωγής (5πλάσιο του κρυσταλλικού πυριτίου)
Δισεληνιούχος Ινδίουχος Χαλκός	Έως 10%	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλό επίπεδο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας • Δεν εμφανίζει βαθμιαία πτώση της απόδοσης όπως το άμορφο πυρίτιο 	<ul style="list-style-type: none"> • Πολύπλοκο υλικό • Αυξημένα μέτρα προστασίας κατά την παραγωγική διαδικασία • Περιορισμένες εμπορική παραγωγή μέχρι σήμερα
Τελουριούχο Κόσμιο	6-13%	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλό επίπεδο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας • Χαμηλό κόστος παραγωγής 	<ul style="list-style-type: none"> • Αυξημένα μέτρα προστασίας κατά την παραγωγική διαδικασία • Περιορισμένες εμπορική παραγωγή μέχρι σήμερα

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.4: Υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ΦΒ στοιχείων

Επειδή το κόστος των μονοκρυσταλλικών γεννητριών είναι αρκετά υψηλότερο από αυτό των πολυκρυσταλλικών (κατά 10-15%), αν και οι μονοκρυσταλλικές γεννήτριες έχουν καλύτερη απόδοση από τις πολυκρυσταλλικές (κατά 1,5-3%), εμείς αποφασίζουμε την επιλογή πολυκρυσταλλικού πλαισίου.

Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή της κατασκευάστριας εταιρίας. Λόγω του πολύ μεγάλου αριθμού εταιριών που δραστηριοποιούνται σε αυτόν το χώρο, δεν ήταν δυνατόν να εξεταστούν όλες, για αυτό και

επιλέχθηκαν 6 από τις μεγαλύτερες εταιρίες, των οποίων η τεχνογνωσία και αξιοπιστία είναι αναμφισβήτητες. Οι εταιρίες αυτές είναι η BP Solar, Sanγο, Kyocera, Siemens, Sharp, Silcio. Μετά από μία στοιχειώδη έρευνα αγοράς που πραγματοποιήσαμε στο διαδίκτυο, μελετώντας τα datasheet των παραπάνω εταιριών, αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε πλαίσια της εταιρίας Silcio.

Σχετικά με την ισχύ των πλαισίων που θα χρησιμοποιήσουμε, μας συμφέρει περισσότερο η επιλογή ενός ΦΒ πλαισίου με μεγάλη ισχύ αντί πολλών πλαισίων με μικρότερες ισχύς, ειδικά για μεγάλες ΦΒ εγκαταστάσεις που λειτουργούν ως σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο λόγος είναι ότι θα διευκολυνθούμε στην εγκατάστασή τους, θα χρειαστούν λιγότερες συνδέσεις, και το συνολικό κόστος εγκατάστασης είναι μικρότερο. Παρόλα αυτά, η επιλογή ενός πλαισίου με πολύ μεγάλη ισχύ μπορεί να έχει και αρνητικές επιπτώσεις, γιατί μία ενδεχόμενη σκίαση ενός μέρους του θα έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ότι σε ένα πλαίσιο μικρότερης ισχύος. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, αποφασίζεται η ισχύς του πλαισίου να είναι γύρω στα 200Wr. Στο σημείο αυτό παραθέτουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά 3 πλαισίων της εταιρίας Silcio (Πίνακας 6.5), τα οποία βρίσκονται κοντά στα 200Wr που έχουμε επιλέξει. Πρέπει να τονίσουμε ότι, όπως αναφέρουμε και παρακάτω, δεν μπορούμε να αποφασίσουμε κατευθείαν ποιο από αυτά τα πλαίσια θα επιλέξουμε, αφού πρέπει πρώτα να ελέγξουμε αν μπορούν να συνδυαστούν και με ποιόν τρόπο με τους αντιστροφείς της επόμενης παραγράφου.

SILCIO			
Ηλεκτρική απόδοση σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC*)			
Πλαίσιο	SE 215	SE 220	SE 225
Ονομαστική μέγιστη ισχύς Pmax	215W	220W	225W
Ονομαστική τάση φόρτισης Vmp	28,79V	29,12V	29,41V
Ονομαστικό ρεύμα φόρτισης Imp	7,47A	7,56A	7,65A
Τάση ανοικτού κυκλώματος Voc	36,81V	36,94V	37,07V
Ρεύμα βραχυκύκλωσης Isc	8,10A	8,12A	8,14A
Τάση μέγιστης ισχύος συστήματος	1000V	1000V	1000V
Πλήθος ΦΒ στοιχείων ανά πλαίσιο	60 Πολυκρυσταλλικά κύτταρα Si		
Διαστάσεις (μήκος*πλάτος*ύψος) mm	1654x993x40		
Βάρος	Περίπου 22kg		

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.5: Τεχνικά χαρακτηριστικά πλαισίων της εταιρίας Silcio (*STC: Ηλιακή ακτινοβολία 1000W/m², AM 1,5, θερμοκρασία πλαισίου 25°C)

Υπολογίζουμε την απόδοση των πλαισίων:

$$n = \frac{215}{1000 \cdot 1,6424} = 0,1309 = 13,10 \% \text{ για το πλαίσιο SE 215}$$

$$n = \frac{220}{1000 \cdot 1,6424} = 0,1339 = 13,40 \% \text{ για το πλαίσιο SE 220}$$

$$n = \frac{225}{1000 \cdot 1,6424} = 0,1369 = 13,70 \% \text{ για το πλαίσιο SE 225}$$

Πρέπει να τονίσουμε ότι η επιλογή του ΦΒ πλαισίου εξαρτάται άμεσα από την επιλογή του αντιστροφέα και των τεχνικών του χαρακτηριστικών. Επίσης, οι διαστάσεις του πλαισίου που θα χρησιμοποιήσουμε, θα καθορίσουν τις βάσεις στήριξης και γενικότερα τις κατασκευαστικές υποδομές του ΦΒ πάρκου.

Εκτός από τις διαστάσεις του πλαισίου και την ισχύ αιχμής του, σημαντικότερο ρόλο παίζουν τα μεγέθη της τάσης και έντασης στο σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος (MPP), καθώς και το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοιχτού κυκλώματος, που επηρεάζονται άμεσα από τα χαρακτηριστικά μεγέθη του αντιστροφέα. Τέλος, άμεσα συνυφασμένη με όλα τα παραπάνω είναι και η κυκλωματική διάταξη της συστοιχίας.

6.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ

Αυτό είναι ίσως το σημαντικότερο κομμάτι στη μελέτη μίας ΦΒ εγκατάστασης.

Από οικονομικής πλευράς, η πιο συμφέρουσα κίνηση είναι η επιλογή αντιστροφέων μεγάλης ισχύος, γιατί η διαφορά στην τιμή είναι αρκετά μεγάλη και η πολυπλοκότητα του ΦΒ συστήματος μικρή (ΣΧΗΜΑ 6.5).

Για παράδειγμα, θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι το ΦΒ πάρκο που μελετάμε, ισχύος 100kWp, καλύπτεται από ένα μοναδικό αντιστροφέα. Μία τέτοια επιλογή όμως είναι προφανώς λανθασμένη, καθώς περιέχει τον κίνδυνο να αποκοπεί ολόκληρο το σύστημα σε περίπτωση βλάβης αυτού του μοναδικού αντιστροφέα.

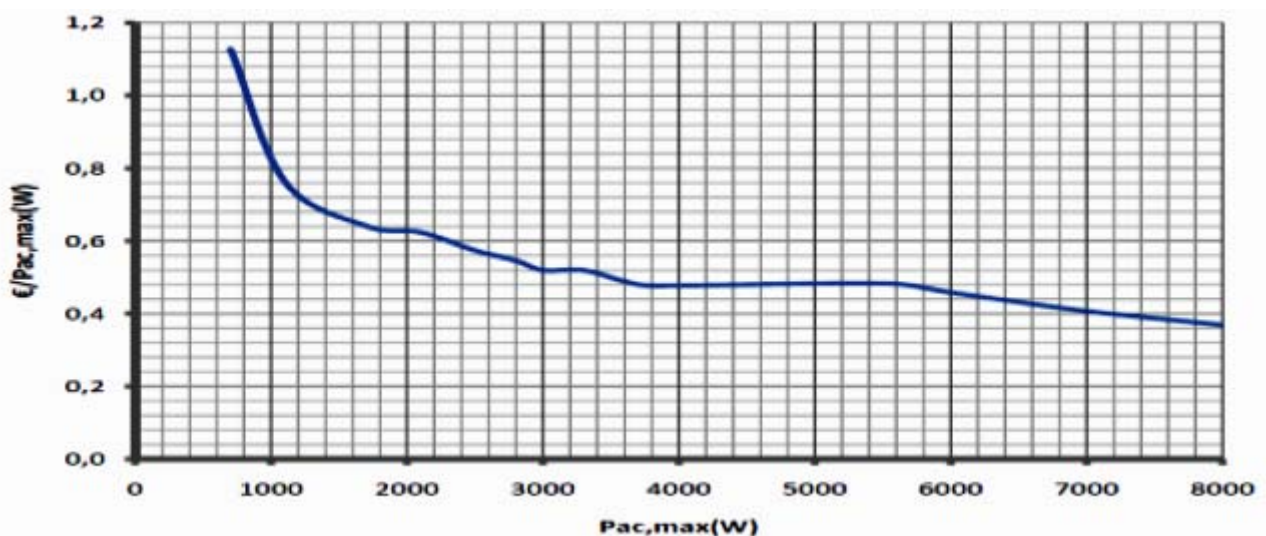
Ο τύπος των αντιστροφέων για απευθείας διασύνδεση στο δίκτυο είναι συγκεκριμένος και με ειδικές διατάξεις, όπως αυτές του σκανδαλισμού, της διάγνωσης και του εύρους λειτουργίας. Για τη λειτουργία τους προαπαιτείται η ύπαρξη τάσης στο δίκτυο (σκανδαλισμός).

Επίσης, πρέπει να τονίσουμε ότι η ονομαστική ισχύς εξόδου του αντιστροφέα δεν πρέπει να ταυτίζεται σε καμία περίπτωση με την ισχύ αιχμής των ΦΒ πλαισίων στην είσοδό του, καθώς τα ΦΒ πλαίσια παράγουν την ονομαστική ισχύ αιχμής τους υπό ιδανικές συνθήκες, οι οποίες δεν συναντώνται στην πράξη αλλά

ακόμη και αν συμβεί αυτό, διαρκεί για ένα πολύ μικρό διάστημα. Επιπλέον και οι εταιρίες οι οποίες παράγουν αντιστροφείς προτείνουν η μέγιστη ονομαστική ισχύς της γεννήτριας να είναι αυξημένη κατά ένα ποσοστό (10-20%) σε σχέση με την ονομαστική ισχύ εισόδου του αντιστροφέα. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή αν επιλεγεί μικρότερη τιμή, αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα μη αποδοτική χρήση των αντιστροφέων και ακόμα μεγαλύτερο κόστος, καθώς θα απαιτούνται περισσότεροι αντιστροφείς για την υλοποίηση της ίδιας ΦΒ εγκατάστασης.

Καταρχήν πρέπει να επιλέξουμε την κατασκευάστρια εταιρία. Μετά από μία στοιχειώδη έρευνα αγοράς στο διαδίκτυο, αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε αντιστροφείς της εταιρίας SMA, που αποτελεί μία εκ των μεγαλύτερων εταιριών σε αυτόν το χώρο και τα προϊόντα της θεωρούνται κορυφαία όσον αφορά την αξιοπιστία και την απόδοση.

Στη συνέχεια πρέπει να επιλέξουμε την κατάλληλη ισχύ του αντιστροφέα (ή αντιστροφέων) που θα χρησιμοποιήσουμε. Η επιλογή αυτή πρέπει να συμβιβάζει τους παράγοντες του κόστους, της αξιοπιστίας και ευκολίας χειρισμού του συστήματος. Θεωρούμε ότι όλοι οι αντιστροφείς που θα χρησιμοποιηθούν είναι όμοιοι, γεγονός που εξασφαλίζει ότι και τα string των ΦΒ πλαισίων καθώς και οι συστοιχίες θα προκύψουν ίδιες. Το γεγονός αυτό απλοποιεί την τοπογραφική διάταξη της εγκατάστασης και διευκολύνει την κυκλωματική σύνδεση. Εφόσον η εγκατάσταση που μελετάμε έχει ισχύ 100kWp, η ισχύς των αντιστροφέων πρέπει να επιλεγεί αναλογικά με αυτή την τιμή. Θα εξετάσουμε λοιπόν τις διάφορες υλοποιήσεις που μπορούν να προκύψουν χρησιμοποιώντας τους αντιστροφείς της σειράς SUNNY MINI CENTRAL της εταιρίας SMA, οι οποίοι είναι κατάλληλοι για εγκαταστάσεις μέσης και μεγάλης ισχύος.



ΣΧΗΜΑ 6.5: Κόστος αντιστροφέων της εταιρίας SMA (σειρές Sunny Boy και Sunny Mini Central) σε σχέση με την μέγιστη ισχύ εξόδου. Το κόστος/Watt μειώνεται με την αύξηση της ισχύος του αντιστροφέα.

Στον παρακάτω πίνακα (ΠΙΝΑΚΑΣ 6.6), παραθέτουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά 3 μοντέλων της σειράς που επιλέξαμε.

SMA - SUNNY MINI CENTRAL			
	SMC 6000TL	SMC 7000TL	SMC 8000TL
ΤΙΜΕΣ ΕΙΣΟΔΟΥ			
Μέγιστη ισχύς DC	6200W	7200W	8250W
Εύρος τάσης DC	335V – 700V	335V – 700V	335V – 700V
Ονομαστική τάση DC	350V	350V	350V
Μέγιστη τάση DC	700V	700V	700V
Μέγιστο ρεύμα εισόδου	19A	22A	25A
Διακύμανση τάσης DC	<10%	<10%	<10%
Μέγιστος αριθμός παράλληλων string	4	4	4
ΤΙΜΕΣ ΕΞΟΔΟΥ			
Μέγιστη ισχύς AC	6000W στους 40 °C	7000W στους 40 °C	8000W στους 40 °C
Ονομαστική ισχύς AC	6000W	7000W	8000W
Μέγιστο ρεύμα εξόδου	27A	31A	35A
THD ρεύματος AC	<4%	<4%	<4%
Ονομαστική τάση AC	220V-240V	220V-240V	220V-240V
Ονομαστική συχνότητα AC	50Hz	50Hz	50Hz
ΑΠΟΔΟΣΗ			
Μέγιστη απόδοση	98%	98%	98%
Euro-Eta	97,7%	97,7%	97,7%
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ			
Βάρος	31kg	32kg	33kg
Ύψος/Μήκος/Πλάτος (mm)	613/468/242	613/468/242	613/468/242

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.6: Τεχνικά χαρακτηριστικά inverters της εταιρίας SMA

Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του πλήθους των αντιστροφέων σε κάθε περίπτωση. Η ΦΒ εγκατάσταση που μελετάμε, όπως γνωρίζουμε πρόκειται να συνδεθεί στο δίκτυο ΧΤ μέσω τριών αγωγών στις τρεις φάσεις του δικτύου (τριφασική σύνδεση). Εξετάζουμε λοιπόν το κατά πόσο είναι δυνατόν οι τρεις αυτοί αντιστροφέες να προσφέρουν μία υλοποίηση στην οποία θα υπάρχει συμμετρία ισχύος μεταξύ των τριών φάσεων. Εφόσον έχουμε καταλήξει στον τύπο του αντιστροφέα που θα χρησιμοποιήσουμε, αυτό συνεπάγεται ότι ο συνολικός αριθμός των αντιστροφέων πρέπει να είναι πολλαπλάσιος του 3, για να μπορούν να ομαδοποιηθούν συμμετρικά, όσον αφορά την ισχύ, οι έξοδοί τους. Αν μία τέτοια υλοποίηση δεν καταστεί δυνατή με κανέναν από τους αντιστροφέες που θα επιλεγούν, τότε θα εξεταστεί μία διαφορετική προσέγγιση.

(Σημαντική σημείωση: οι αντιστροφείς που μελετάμε παρέχουν μονοφασική έξοδο. Στην πραγματικότητα όμως, η συντριπτική πλειοψηφία των αντιστροφέων που χρησιμοποιούνται σε ΦΒ εγκαταστάσεις στις μέρες μας παρέχουν κατευθείαν τριφασική έξοδο. Παρόλα αυτά, θα προτιμήσουμε τους μονοφασικούς αντιστροφείς ώστε να εξοικειωθούμε και με τη δημιουργία τριφασικών συνδέσεων από μονοφασικές παροχές.)

- Θα εξετάσουμε αρχικά τον αντιστροφέα SMC 6000TL. Η ισχύς εισόδου του είναι 6kW. Λαμβάνοντας υπόψη τα όσα αναφέραμε παραπάνω για την ισχύ αιχμής των πλαισίων, συμπεραίνουμε ότι η ιδανική ισχύς στην είσοδό του είναι μεταξύ 6.000Wr και 7.200Wr (...20% αυξημένη). Οι τιμές αυτές μας οδηγούν στην επιλογή 15 τέτοιων αντιστροφέων (αριθμός πολλαπλάσιος του 3), που θα δέχονται στην είσοδό τους $100.000Wr/15 \sim 6.667Wr$.
- Δουλεύοντας με τον ίδιο τρόπο για τον αντιστροφέα SMC 7000TL, γνωρίζουμε ότι η ισχύς εισόδου του είναι 7kW. Άρα, η ιδανική ισχύς στην είσοδό του είναι μεταξύ 7.000Wr και 8400Wr (...20% αυξημένη). Οι τιμές αυτές μας οδηγούν στην επιλογή 12 τέτοιων αντιστροφέων (αριθμός πολλαπλάσιος του 3), που θα δέχονται στην είσοδό τους $100.000Wr/12 \sim 8.333Wr$.
- Αντίστοιχα, προκύπτουν 12 αντιστροφείς SMC 8000TL με ισχύ εισόδου επίσης 8.333Wr, καθώς αν επιλέγαμε 9 τότε η ισχύς στην είσοδο του καθενός θα ήταν πολύ μεγάλη (11.111 Wr).

Είναι προφανές ότι ανάμεσα στους παραπάνω 3 αντιστροφείς, μας συμφέρει να επιλέξουμε τον SMC 7000TL, καθώς χρειάζονται 12 τέτοιοι αντιστροφείς (σε αντίθεση με τον SMC 6000TL που χρειάζονται 15) και είναι φθηνότερος από τον SMC 8000TL.

Παρόλα αυτά, πρέπει πρώτα να ελέγξουμε κατά πόσο είναι δυνατόν να συνδυαστεί με τα επιλεγόμενα πλαίσια πριν προχωρήσουμε στην τελική μας απόφαση. Το γεγονός αυτό εξετάζεται στην επόμενη παράγραφο.

Τέλος, σημειώνουμε ότι οι παραπάνω τιμές ισχύος εισόδου των αντιστροφέων είναι ενδεικτικές, ενώ οι ακριβείς θα υπολογιστούν με βάση την ισχύ των ΦΒ πλαισίων.

6.5 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ - ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ

Μετά την επιλογή λοιπόν των αντιστροφέων και των πλαισίων, που πραγματοποιήσαμε παραπάνω, θα εξετάσουμε τώρα όλους τους δυνατούς συνδυασμούς για την υλοποίηση του ΦΒ πάρκου. Στη διαδικασία αυτή πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τα εξής:

- Τα πλαίσια που συνδέονται σε έναν αντιστροφέα πρέπει να έχουν τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά. Σε αντίθετη περίπτωση δεν επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση των δυνατοτήτων τους, όπως επίσης μπορεί να προκύψουν και τεχνικά προβλήματα (π.χ. ανάστροφο ρεύμα προς κάποιο παράλληλο string).
- Όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη παράγραφο, προτιμούμε οι αντιστροφείς που θα χρησιμοποιηθούν να είναι οι ίδιοι (κυρίως να έχουν την ίδια ισχύ) και ο συνολικός αριθμός τους να

είναι πολλαπλάσιο του 3.

- Όλα τα πλαίσια που θα χρησιμοποιηθούν στην εγκατάσταση θα είναι τα ίδια.

Θα εξετάσουμε αρχικά την περίπτωση που επιλέγονται 15 αντιστροφείς SMC 6000TL. Καθένας από αυτούς θα δέχεται στην είσοδό του 6667Wr. Εξετάζοντας τα πλαίσια που έχουμε στη διάθεσή μας, συμπεραίνουμε ότι το πιο ιδανικό πλαίσιο για να συνδυαστεί με αυτόν τον αντιστροφέα (σκοπός πάντα είναι η εγκατεστημένη ισχύς να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στα 100kWp χωρίς όμως να τα ξεπερνάει) είναι το SE 220.

Πρέπει να υπολογίσουμε τον κατάλληλο αριθμό των πλαισίων και την κυκλωματική τους σύνδεση. Σε κάθε αντιστροφέα θα συνδέσουμε 30 πλαίσια των 220Wr διότι: $220Wr \times 30 = 6600Wr$. Τα πλαίσια αυτά οργανώνονται σε 2 παράλληλα string των 15 πλαισίων το καθένα, γεγονός που σημαίνει ότι η είσοδος του αντιστροφέα δέχεται: 15 πλαίσια εν σειρά $\times 29,12 V = 436,8V$ από ένα string (επί συνόλου 2 string ανά αντιστροφέα), που είναι η απαραίτητη τάση εισόδου προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ισχύς εξόδου.

Επίσης, κάθε αντιστροφέας δέχεται στην είσοδό του: 2 παράλληλα string $\times 7,56A = 15,12A$ που παρατηρούμε ότι βρίσκεται μέσα στα όρια του αντιστροφέα. Ο συνολικός αριθμός ΦΒ πλαισίων της εγκατάστασης προκύπτει: 30 πλαίσια/αντιστροφέα $\times 15$ αντιστροφείς = 450 ΦΒ πλαίσια και η συνολική ισχύς της εγκατάστασης είναι: $6600Wr/αντιστροφέα \times 15$ αντιστροφείς = 99.000Wr που είναι πολύ κοντά στο επιθυμητό.

Σημειώνουμε στο σημείο αυτό ότι ο λόγος που επιλέξαμε το συγκεκριμένο συνδυασμό πλαισίου - αντιστροφέα είναι ότι μετά από υπολογισμούς που κάναμε, ο συνδυασμός του SMC 6000TL με τα άλλα 2 πλαίσια έδινε ισχύ εγκατάστασης είτε μεγαλύτερη από το επιθυμητό είτε αρκετά μικρότερη.

Θα εξετάσουμε τώρα την περίπτωση που επιλέγονται 12 αντιστροφείς SMC 7000TL. Καθένας από αυτούς θα δέχεται στην είσοδό του 8333Wr όπως είδαμε παραπάνω, ώστε να φτάσουμε τα 100kWp που είναι η επιθυμητή τιμή της εγκατάστασης. Χρησιμοποιώντας τα πλαίσια SE 225 προκύπτουν τα εξής:

Σε κάθε αντιστροφέα θα συνδέσουμε 36 πλαίσια των 225Wr διότι: $225Wr \times 36 = 8100Wr$. Οργανώνοντας αυτά τα πλαίσια σε 2 παράλληλα string των 18 πλαισίων το καθένα, η είσοδος του αντιστροφέα δέχεται: 18 πλαίσια σε σειρά $\times 29,41V = 529,38V$.

Όμως, σύμφωνα με το datasheet του αντιστροφέα, αυτή η τάση εισόδου είναι εκτός των ορίων MPP του αντιστροφέα (333V - 500V). Εάν αντί για 2 θεωρήσουμε 3 παράλληλα string ώστε να αντιμετωπίσουμε το παραπάνω πρόβλημα, τότε το ρεύμα εισόδου θα είναι 3 παράλληλα string $\times 7,65A = 22,95A$, που βρίσκεται εκτός ορίων MPP του αντιστροφέα.

Τα πλαίσια αυτά λοιπόν δεν συνδυάζονται με τον συγκεκριμένο αντιστροφέα. Για να μπορέσουμε να τα συνδυάσουμε, πρέπει να κάνουμε τις εξής επιλογές: Σε κάθε αντιστροφέα θα συνδέσουμε μόνο 32 πλαίσια των 225Wr, οπότε $225Wr \times 32 = 7200Wr$. Οργάνωση σε 2 παράλληλα string των 16 πλαισίων το καθένα, οπότε η είσοδος του αντιστροφέα δέχεται: 16 πλαίσια εν σειρά $\times 29,41V = 470,56V$ (εντός ορίων). Κάθε

αντιστροφέας δέχεται στην είσοδό του: 2 παράλληλα string x 7,65A = 15,3A (εντός ορίων). Συνολικός αριθμός πλαισίων ΦΒ εγκατάστασης: 32 πλαίσια/αντιστροφέα x 12 αντιστροφέες = 384 ΦΒ πλαίσια και η συνολική ισχύς της εγκατάστασης είναι: 7200Wp/αντιστροφέα x 12 αντιστροφέες = 86.400Wp που απέχει πολύ από το επιθυμητό.

Αντίστοιχα προβλήματα προκύπτουν και για τα 2 άλλα πλαίσια που έχουμε επιλέξει, καθώς κανένα από αυτά δεν συνδυάζεται με τον αντιστροφέα SMC 7000TL. Μάλιστα, όπως συμπεράναμε μετά από υπολογισμούς, τα προβλήματα θα ήταν ακόμη πιο μεγάλα, με την ισχύ της εγκατάστασης να απέχει κατά πολύ από το επιθυμητό.

Τέλος, θα εξετάσουμε την περίπτωση που επιλέγονται 12 αντιστροφέες SMC 8000TL. Καθένας από αυτούς θα δέχεται στην είσοδό του 8333Wp, όπως είδαμε παραπάνω. Χρησιμοποιώντας πλαίσια SE 225 προκύπτουν τα εξής:

Σε κάθε αντιστροφέα θα συνδέσουμε 36 πλαίσια των 225Wp διότι: $225Wp * 36 = 8100Wp$. Οργανώνοντας αυτά τα πλαίσια σε 2 παράλληλα string των 18 πλαισίων το καθένα, η είσοδος του αντιστροφέα δέχεται: 18 πλαίσια σε σειρά x 29,41V = 529,38V.

Όμως, σύμφωνα με το datasheet του αντιστροφέα, αυτή η τάση εισόδου είναι εκτός των ορίων MPP του αντιστροφέα (333V - 500V). Προκύπτει λοιπόν ίδιο πρόβλημα κε πριν. Όμως τώρα μπορούμε να το αντιμετωπίσουμε θεωρώντας ότι 2 αλλά 3 παράλληλα string, αφού ο αντιστροφέας SMC 8000TL μπορεί να δεχτεί ρεύμα έως 25A.

Κάνουμε λοιπόν τις εξής επιλογές: Σε κάθε αντιστροφέα θα συνδέσουμε 36 πλαίσια των 225Wp, οπότε $225Wp * 36 = 8100Wp$. Οργάνωση σε 3 παράλληλα string των 12 πλαισίων το καθένα, οπότε η είσοδος του αντιστροφέα δέχεται: 12 πλαίσια εν σειρά x 29,41V = 352,92V (εντός ορίων).

Κάθε αντιστροφέας δέχεται στην είσοδό του: 3 παράλληλα string x 7,65A = 22,95A (εντός ορίων). Συνολικός αριθμός πλαισίων ΦΒ εγκατάστασης: 36 πλαίσια/αντιστροφέα * 12 αντιστροφέες = 432 ΦΒ πλαίσια και η συνολική ισχύς της εγκατάστασης είναι: $8100Wp/αντιστροφέα * 12 αντιστροφέες = 97.200Wp$.

Εάν χρησιμοποιούσαμε κάποιο από τα 2 άλλα πλαίσια που έχουμε επιλέξει, τότε η συνολική ισχύς της εγκατάστασης θα ήταν μικρότερη από 97.200Wp, οπότε θα απέχει ακόμη περισσότερο από τον στόχο των 100kWp.

Όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν παραπάνω, παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα:

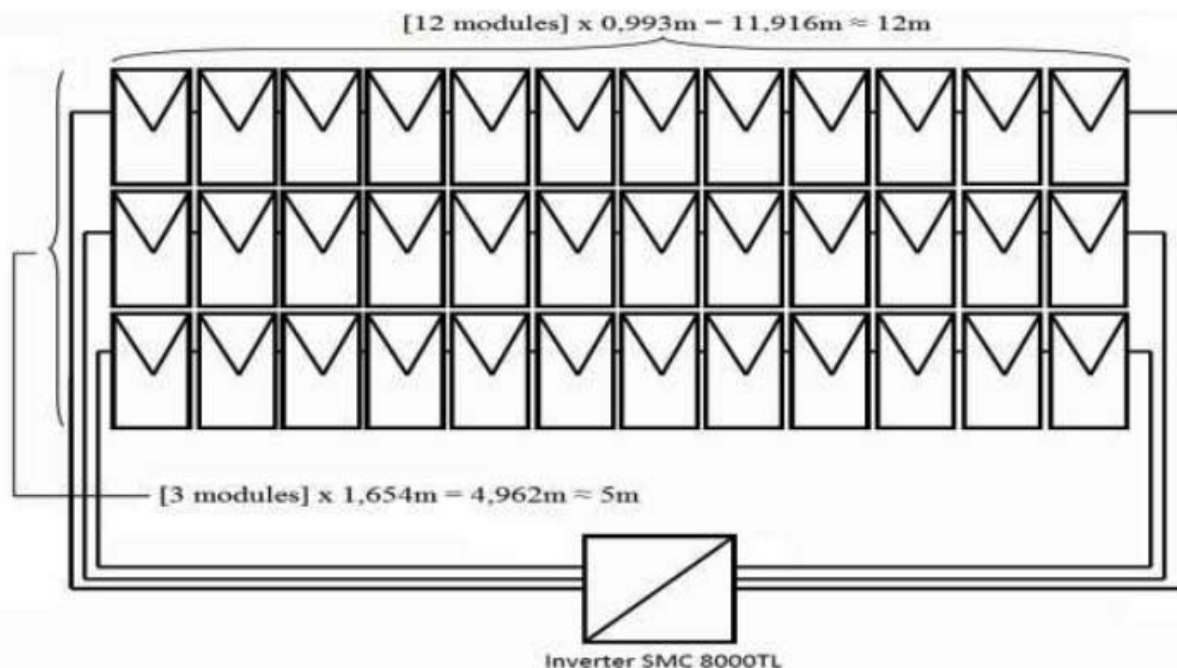
	1 ^η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ	2 ^η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ	3 ^η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ
Αντιστροφέας (INV)	SMC 6000TL	SMC 7000TL	SMC 8000TL
Πλαίσιο	SE 220	SE 225	SE 225
Πλήθος αντιστροφέων	15	12	12
Πλαίσια/Αντιστροφέα	30	32	36
Ισχύς PV στην είσοδο αντιστροφέα, $P_{in,dc}$	6600Wp	7200Wp	8100Wp
Παράλληλα String/Αντιστροφέα	2	2	3
Πλαίσια εν σειρά/Αντιστροφέα	15	16	12
Τάση στην είσοδο αντιστροφέα $V_{in,dc}$	436,8V	470,56V	352,92V
Ένταση ρεύματος στην είσοδο αντιστροφέα $I_{in,dc}$	15,12A	15,3A	22,95A
Συνολικός αριθμός πλαισίων	450	384	432
Συνολική ισχύς εγκατάστασης	99.000Wp	86.400Wp	97.200Wp
Κόστος αντιστροφέων	15×2.650€=39.750€	12×2.750€=33.000€	12×2.850€=34.200€

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.7: Πιθανοί συνδυασμοί πλαισίων – αντιστροφέων

Όπως μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε, αποκλείεται η 2^η περίπτωση, καθώς απέχει πολύ από τον στόχο των 100kWp. Ανάμεσα στις άλλες δύο περιπτώσεις, προτιμάται η περίπτωση 3 καθώς το κόστος των αντιστροφέων σε αυτήν τη περίπτωση προκύπτει αρκετά μικρότερο.

6.6 ΚΥΚΛΩΜΑΤΙΚΗ ΣΥΝΔΕΣΗ - ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ

Παίρνοντας την απόφαση να εφαρμόσουμε την 3^η περίπτωση υλοποίησης από τον παραπάνω πίνακα (ΠΙΝΑΚΑΣ 6.7), το πιο βολικό επόμενο βήμα θα ήταν να επιλεγούν οι συστοιχίες του ΦΒ πάρκου να αποτελούνται από 36 ΦΒ πλαίσια, με την κυκλωματική υλοποίηση που έχουμε περιγράψει (ΣΧΗΜΑ 6.6):



ΣΧΗΜΑ 6.6: Κυκλωματική διάταξη συστοιχίας

Η παραπάνω υλοποίηση συνεπάγεται ότι θα υπάρχει ένας αντιστροφέας ανά συστοιχία. Αυτή η υλοποίηση δεν είναι μοναδική, αλλά προφανώς υπάρχουν και άλλες εναλλακτικές.

Για παράδειγμα θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι κάθε string με 12 πλαίσια σε σειρά αποτελεί και μία συστοιχία και σε κάθε αντιστροφέα να καταλήγουν 3 συστοιχίες παράλληλα. Ο συνολικός αριθμός των πλαισίων/αντιστροφέα παραμένει σταθερός και ίσος με 36.

Η διαφορά είναι ότι σε αυτή την περίπτωση υλοποίησης, οι συστοιχίες είναι μικρότερες (άρα μικρότερου μεγέθους απαιτήσεις στην υποδομή στήριξης) αλλά απαιτείται μεγαλύτερο μήκος καλωδίων από την προηγούμενη περίπτωση. Τονίζουμε όμως ότι σχετικά με την απαιτούμενη έκταση του ΦΒ πάρκου, δεν προκύπτει καμία διαφορά ανάμεσα στις δύο παραπάνω εναλλακτικές λύσεις.

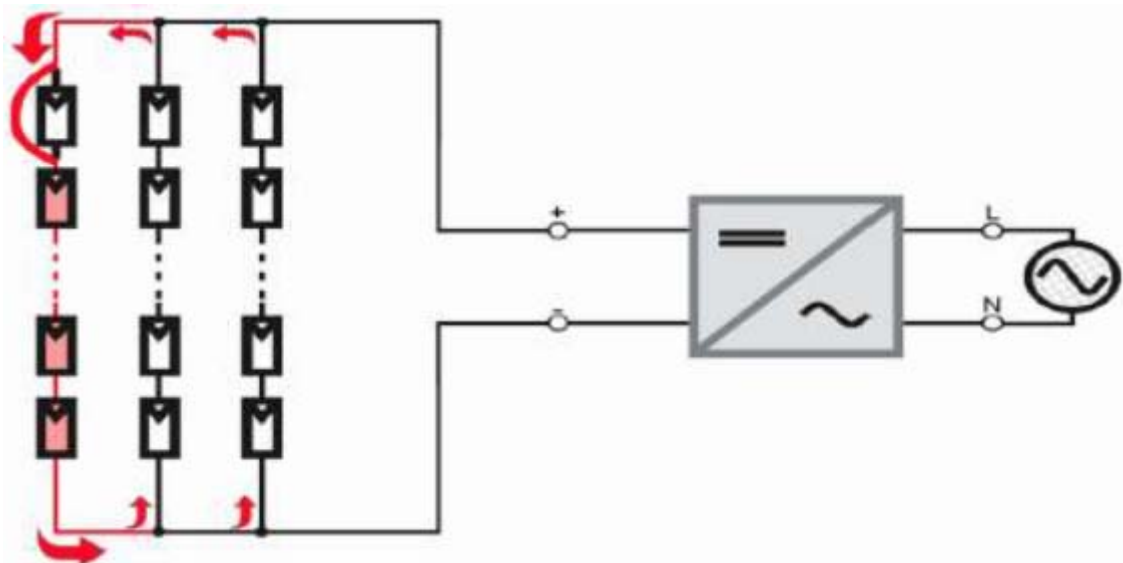
Τέλος, δεν είναι δεσμευτικό ότι η σε σειρά σύνδεση των ΦΒ πλαισίων ενός string πρέπει να αποτελεί και το μήκος μιας συστοιχίας. Ως μήκος της συστοιχίας θα μπορούσε να επιλεγεί οποιοσδήποτε αριθμός ΦΒ πλαισίων, απλά η σύνδεσή τους θα γινόταν πιο πολύπλοκη.

6.6.1 Ανάστροφο ρεύμα

Το φαινόμενο της αντίστροφης ροής του ρεύματος προς τα πλαίσια σε μία ΦΒ συστοιχία που συνδέεται σε έναν αντιστροφέα, είναι ένα ανεπιθύμητο φαινόμενο γενικά. Η περίπτωση στην οποία μπορεί να εμφανιστεί είναι όταν υπάρχουν ΦΒ πλαίσια συνδεδεμένα παράλληλα και η τάση ανοιχτού κυκλώματος στα άκρα των παράλληλων strings είναι διαφορετική. Σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας λοιπόν, το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποφευχθεί εάν επιλεγούν παράλληλα strings ίδιου μήκους και ισχύος. Επιπλέον, το φαινόμενο της σκίασης δεν συνεπάγεται εμφάνιση ανάστροφου ρεύματος σημαντικής τιμής καθώς η επίδρασή του στην τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι ασήμαντη.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι σε μία σωστά διαστασιολογημένη ΦΒ γεννήτρια, η εμφάνιση ανάστροφου ρεύματος είναι τελείως ανεπαίσθητη. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να εμφανιστεί μόνο σε περιπτώσεις

σφαλμάτων της ΦΒ γεννήτριας (π.χ. βραχυκύκλωμα σε ένα ή περισσότερα πλαίσια), τα οποία μπορούν να μειώσουν σημαντικά την τάση ανοιχτού κυκλώματος ενός string σε σχέση με τα άλλα παράλληλα string. Τότε, η δίοδος παράκαμψης (bypass diode), που έχουν όλα τα ΦΒ πλαίσια, αναγκάζει το ανάστροφο ρεύμα να περάσει μέσα από το string που εμφάνισε το σφάλμα και ανάλογα με την τιμή αυτού του ρεύματος μπορεί να οδηγήσει σε υπερθέρμανση και πιθανώς σε καταστροφή όλων των πλαισίων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά σε αυτό το string.



Σχήμα 6.7: Φαινόμενο της αντίστροφης ροής του ρεύματος

Όπως παρατηρούμε και στο παραπάνω σχήμα (ΣΧΗΜΑ 6.7), η τιμή του ανάστροφου ρεύματος ισούται με το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης των υπολοίπων strings. Στην περίπτωση της συστοιχίας που έχουμε επιλέξει για την εγκατάσταση του ΦΒ πάρκου που μελετάμε, η τιμή αυτή είναι:

$$\text{ΑΝΑΣΤΡΟΦΟ ΡΕΥΜΑ} = (3 \text{ παράλληλα strings} - 1) \times 8,14\text{A} = 16,28\text{A}$$

Παρόλο που τέτοια φαινόμενα σφαλμάτων συμβαίνουν πολύ σπάνια στην πράξη, πρέπει να λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα αντιμετώπισής τους. Τρόποι αντιμετώπισης του φαινομένου της αντίστροφης ροής ρεύματος σε μία συστοιχία, είναι οι εξής:

- Διαστασιολόγηση των strings
 - Δίοδοι Φραγής (String Diodes)
 - Ασφάλειες τήξης (String Fuses)

Γενικός κανόνας: για τιμές του ανάστροφου ρεύματος μεγαλύτερες από το διπλάσιο του ρεύματος βραχυκύκλωσης των πλαισίων, πρέπει να λαμβάνονται μέτρα προστασίας.

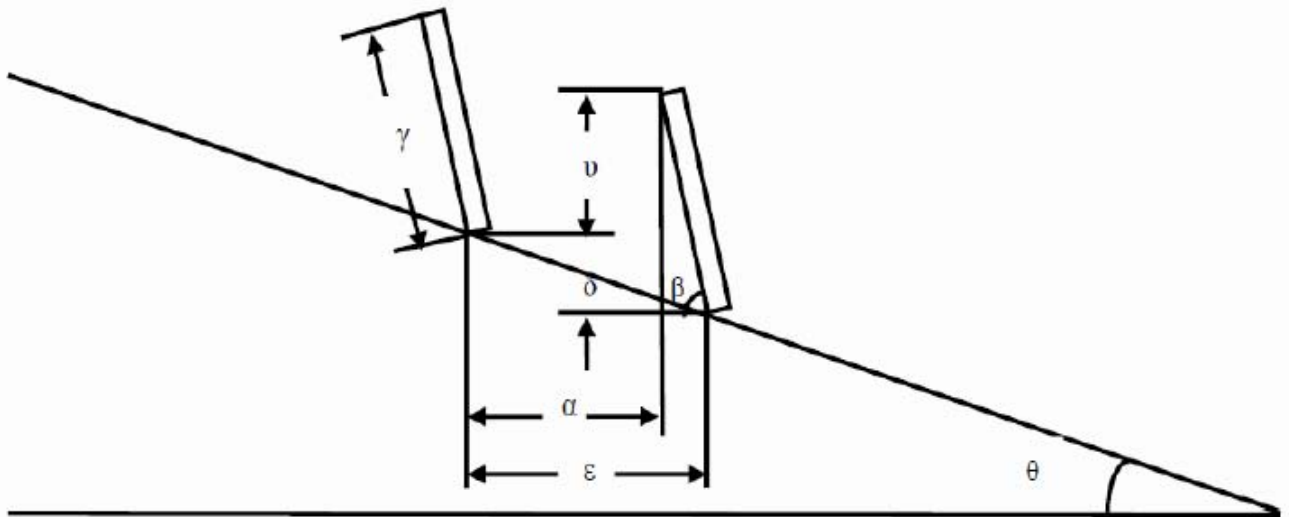
Στην ΦΒ εγκατάσταση που μελετάμε, θα χρησιμοποιήσουμε ασφάλειες τήξης.

6.7 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΦΒ ΠΑΡΚΟΥ

Η τοπογραφική διάταξη του πάρκου πρέπει να είναι η καλύτερη δυνατή, γεγονός που εξασφαλίζεται αν έχει επιτευχθεί:

- Η βέλτιστη κλίση των πλαισίων ως προς το οριζόντιο επίπεδο και ο προσανατολισμός τους προς το νότο, όπως έχει προκύψει και από τη μελέτη της παραγράφου 6.2.
- Η ελάχιστη δυνατή χρησιμοποίηση επιφανειών στις οποίες θα τοποθετηθούν τα πλαίσια, χωρίς σε καμία περίπτωση να επηρεάζεται η προσλαμβανόμενη ηλιακή ενέργεια (αποφυγή σκιάσεων μεταξύ γειτονικών συστοιχιών).
- Η ελάχιστη δυνατή χρησιμοποίηση καλωδίων για τις ενώσεις μεταξύ των πλαισίων, των συστοιχιών, των αντιστροφέων, κλπ.

Λαμβάνοντας υπόψη το ΣΧΗΜΑ 6.8, στο οποίο φαίνονται δύο συνεχόμενες συστοιχίες στην πλαγιά, θα υπολογίσουμε αρχικά την ελάχιστη απόσταση (ϵ) μεταξύ δύο συνεχόμενων συστοιχιών κατά μήκος του άξονα B-N, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι η μία συστοιχία δεν θα σκιάζει την επόμενη.



ΣΧΗΜΑ 6.8: Διάταξη ΦΒ συστοιχιών σε πλαγιά με κλίση $\kappa = \tan\theta$, με απόλυτα νότιο προσανατολισμό.

Εμείς γνωρίζουμε τα εξής:

- Το γεωγραφικό πλάτος της Κορίνθου είναι $38,25^\circ$. Συνεπώς, σύμφωνα με το διάγραμμα της εταιρίας Monegon (ΣΧΗΜΑ 6.9) προκύπτει ο λόγος της ελεύθερης απόστασης a προς το ύψος u : $a/u = 2,6$.
- Τα ΦΒ πλαίσια πρόκειται να τοποθετηθούν σε πλαγιά με κλίση 6% κατά τη διεύθυνση Β-Ν με υπερύψωση στον Βορρά. Άρα, $\kappa = \tan\theta = 0,06$.
- Η κλίση των πλαισίων, όπως έχουμε αποφασίσει θα είναι 10° τους καλοκαιρινούς μήνες και 50° τους χειμερινούς μήνες (2 εναλλαγές το χρόνο). Για τον υπολογισμό της ελάχιστης απόστασης μεταξύ δύο πλαισίων, θα δουλέψουμε για την περίπτωση με τη δυσμενέστερη κλίση (περισσότερο όρθια τοποθέτηση), οπότε $\beta = 50^\circ$.
- Το ύψος γ της συστοιχίας προέκυψε περίπου 5m όπως είδαμε και στην παράγραφο 5.6. Άρα, $\gamma = 5m$.

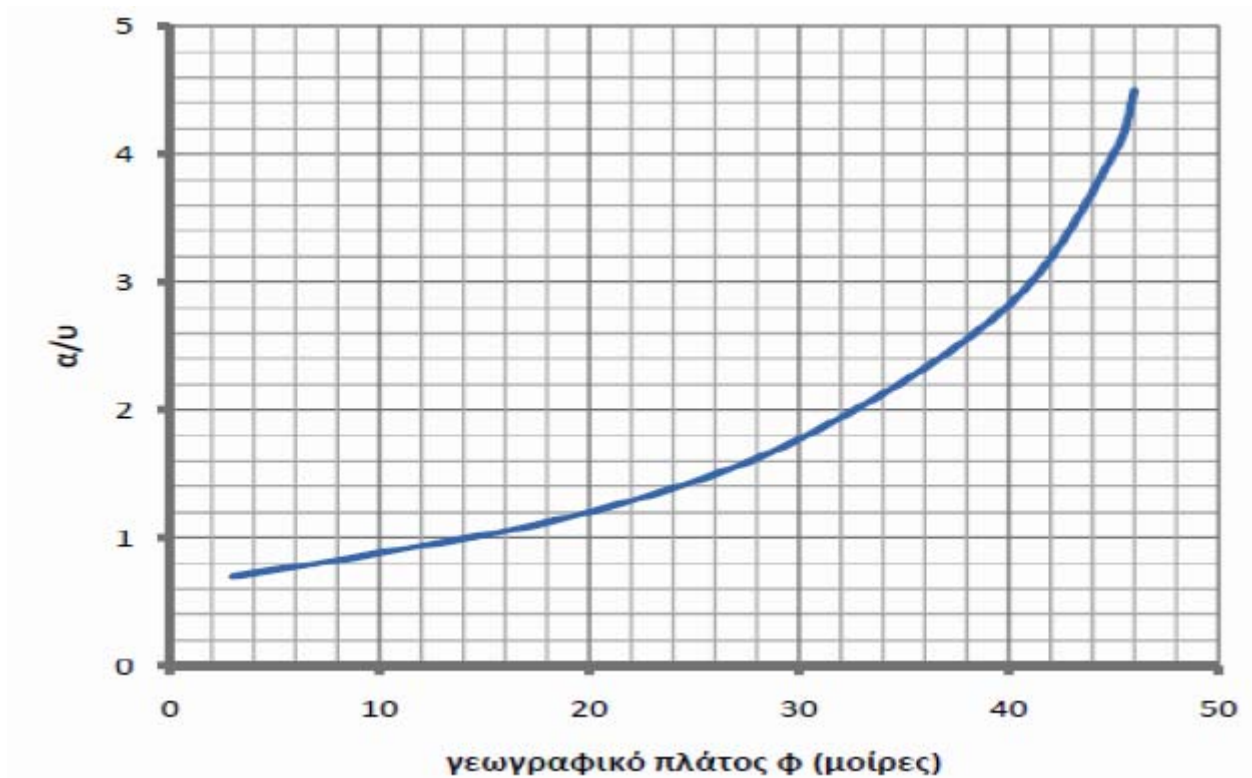
Η ζητούμενη ελάχιστη απόσταση (ϵ), προκύπτει από τον τύπο:

$$\epsilon = \gamma \cdot \frac{\frac{\alpha}{v} \cdot \sin\beta + \cos\beta}{1 + \frac{\alpha}{v} \cdot \kappa}$$

Έχουμε λοιπόν:

$$\epsilon = 5 \cdot \frac{2,6 \cdot \sin 50 + \cos 50}{1 + 2,6 \cdot 0,06} = 5 \cdot \frac{1,992 + 0,643}{1 + 0,156} = 11,39\text{m} \approx 12\text{m},$$

στρογγυλοποιήσαμε δηλαδή την τιμή στα 12m. **Οπότε**, $\epsilon=12\text{m}$.



ΣΧΗΜΑ 6.9: Καμπύλη του λόγου της ελεύθερης απόστασης α ανάμεσα στις γειτονικές συστοιχίες, προς την

επικάλυψη του ύψους u , σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος ϕ , ώστε να μην εμποδίζεται ουσιαστικά η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας. Εταιρία Monegon (1980)

Έχοντας υπολογίσει την απόσταση των συστοιχιών στη διεύθυνση B-N, αυτό που μας απομένει τώρα είναι η διερεύνηση όσον αφορά τη διεύθυνση A-Δ.

Παρατηρούμε ότι στη διεύθυνση αυτή το έδαφος παρουσιάζει μία μικρή κλίση ίση με 2%. Αυτό σημαίνει ότι η οριζοντίωση μίας συστοιχίας απαιτεί μία υπερύψωση του άκρου της συστοιχίας που βρίσκεται στην Ανατολή. Η διαφορά ύψους κατά μήκος της συστοιχίας είναι: $0,02 \times 12\text{m} = 0,24\text{m}$

Έχουμε τις εξής εναλλακτικές επιλογές για την τοποθέτηση των συστοιχιών:

- Τοποθέτηση των συστοιχιών ακολουθώντας την φυσική κλίση, χωρίς να γίνει οριζοντίωσή τους.
- Οριζοντίωση κάθε συστοιχίας κατά τον άξονα A-Δ, ακολουθώντας κλιμακωτά τη φυσική κλίση.
- Οριζοντίωση συνολικά, όλων των συστοιχιών που θα τοποθετηθούν στη διεύθυνση A-Δ.

Καταρχήν, απορρίπτουμε τον 3^ο τρόπο τοποθέτησης, αφού μπορεί να δημιουργήσει κατασκευαστικά προβλήματα, αλλά και συνεπάγεται ότι η ανατολικότερη συστοιχία θα απαιτούσε μία μεγάλη υπερύψωση, γεγονός τελείως μη πρακτικό, αντικοινωνικό και αντιαισθητικό.

Ο 2^{ος} τρόπος τοποθέτησης εξασφαλίζει ότι οι δυτικότερες συστοιχίες δεν θα σκιάζονται καθόλου, αλλά προκύπτουν προβλήματα σκίασης μεταξύ των άλλων συστοιχιών.

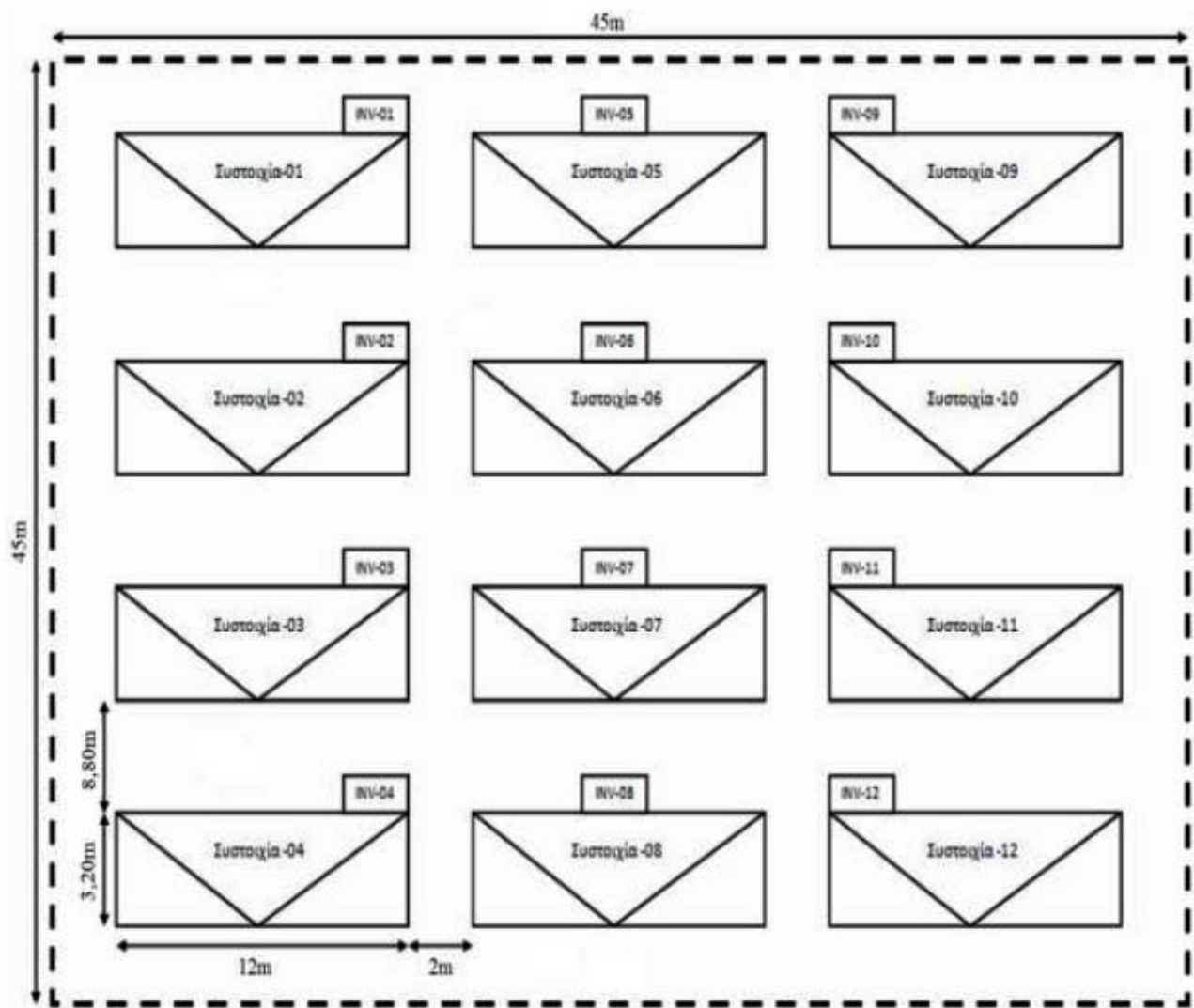
Ο 1^{ος} τρόπος τοποθέτησης, δηλαδή ακολουθώντας την κλίση του εδάφους, συνεπάγεται ότι όλες οι συστοιχίες θα σκιάζονται κατά τη δύση του ήλιου και για όσο χρονικό διάστημα το ύψος του γίνεται μικρότερο από τη γωνία κλίσης. Στην περίπτωση βέβαια που μελετάμε, η κλίση είναι πολύ μικρή και η επίδραση της σκίασης τελείως αμελητέα. Ο τρόπος αυτός βέβαια μπορεί να δημιουργήσει κατασκευαστικές δυσκολίες εάν η κλίση δεν είναι ομαλή κατά μήκος του άξονα A- Δ, όπως και δυσκολίες στην τοποθέτηση των πλαισίων στις βάσεις.

Στην παρούσα μελέτη θα επιλέξουμε τον 2^ο τρόπο τοποθέτησης, που εμφανίζει τις λιγότερες κατασκευαστικές απαιτήσεις, οι απώλειες λόγω σκίασης είναι πολύ μικρές και είναι ο πιο άρτιος αισθητικά. Μάλιστα, για να ελαχιστοποιηθούν τυχόν προβλήματα σκίασης, αλλά και για να υπάρχει εύκολη πρόσβαση στις συστοιχίες, επιλέγουμε ελεύθερη ζώνη (διάδρομο) μεταξύ δύο διαδοχικών συστοιχιών στον άξονα A-Δ ίση με 2m.

Επιλέγουμε ότι οι 12 συστοιχίες θα τοποθετηθούν σε τρεις σειρές των τεσσάρων συστοιχιών η κάθε μία, όπως φαίνεται και στο ΣΧΗΜΑ 5.10, που αποτελεί την κάτοψη του ΦΒ πάρκου. Επίσης, μπορούμε σε αυτό το σχήμα να διακρίνουμε και τα όρια της περιοχής που απαιτείται, καθώς και τη θέση των αντιστροφών.

Επίσης, με τη βοήθεια και του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 6.8, υπολογίζουμε:

$$\varepsilon - \alpha = 12 - 8,80 = 3,20\text{m}$$



ΣΧΗΜΑ 6.10: Τοπογραφική διάταξη του ΦΒ πάρκου (κάτοψη)

Σημειώνουμε ότι η παραπάνω μελέτη έγινε για κλίση των ΦΒ πλαισίων ίση με 50° , που είναι η δυσμενέστερη περίπτωση. Για το λόγο αυτό, τους καλοκαιρινούς μήνες που η κλίση θα αλλάζει και θα γίνεται 10° , δεν θα δημιουργείται απολύτως κανένα πρόβλημα σκίασης. Επίσης, αυτούς τους μήνες, ο διάδρομος των 8,80m που βλέπουμε παραπάνω θα στενεύει λόγω της ελάττωσης της κλίσης των πλαισίων και θα γίνεται πλέον:

$\alpha' = \varepsilon - \gamma \cdot \cos\beta' = 12 - 5\cos 10 = 12 - 4,92 = 7,08\text{m}$, που προσφέρει και πάλι μία άνετη πρόσβαση στις συστοιχίες.

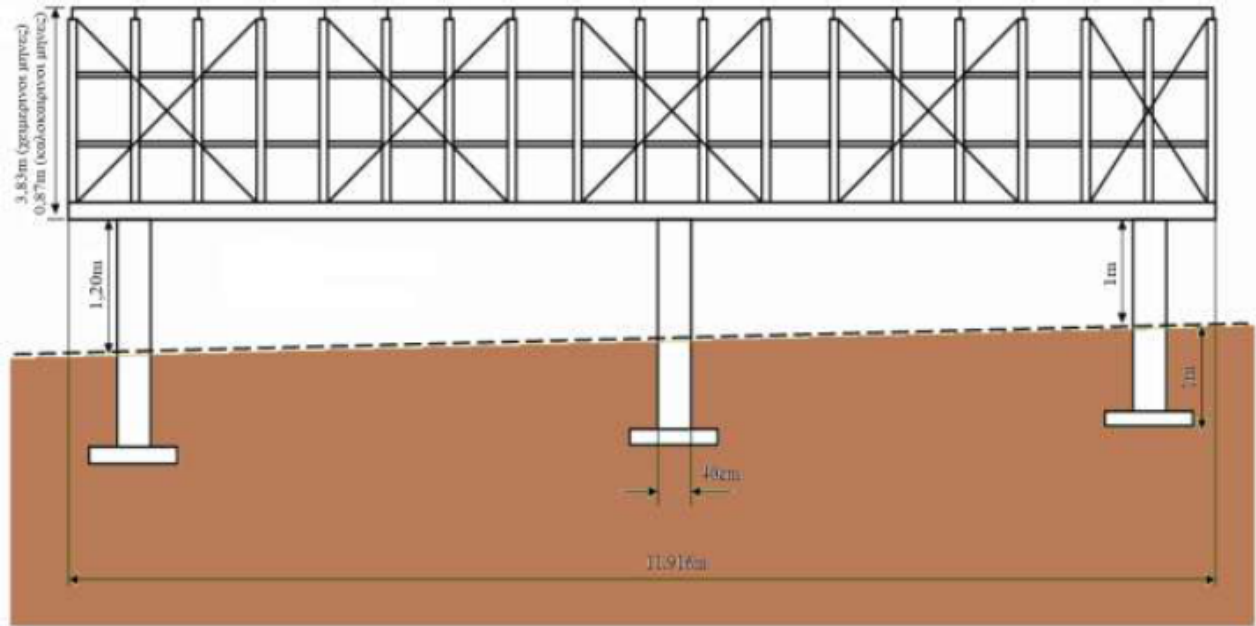
Τέλος, η περιοχή όπου πραγματοποιείται η ΦΒ εγκατάσταση οριοθετείται από μία περίφραξη με συρματοπλεγμα, που την προστατεύει από τυχόν κινδύνους (π.χ. από οικόσιτα και άγρια ζώα).

6.7.1 Κατασκευές υποδομής - Βάσεις στήριξης

Για την εγκατάσταση των συστοιχιών, επιλέχθηκε κάθε συστοιχία να τοποθετηθεί σε 6 στύλους από μπετόν (2 σειρές των 3 στύλων) $40 \times 20\text{cm}$, οι οποίοι θεμελιώνονται σε βάθος περίπου 1m και στηρίζονται σε μία πεδιλοδοκό $100 \times 100 \times 30\text{cm}$. Οι κεφαλές των 6 στύλων της κάθε συστοιχίας ορίζουν μία κοινή οριζόντια στάθμη, εφόσον όπως αναφέραμε και παραπάνω έχουμε επιλέξει να οριζοντιωθεί η κάθε συστοιχία.

Στη συνέχεια, πάνω σε αυτούς τους στύλους εδράζονται οι μεταλλικές βάσεις στήριξης της συστοιχίας. Πρέπει να τονίσουμε ότι επιλέγουμε μεταλλικές βάσεις που να έχουν τη δυνατότητα χειροκίνητης αλλαγής της γωνίας κλίσης, αφού έχουμε αποφασίσει να αλλάζουμε την κλίση 2 φορές το χρόνο. Οι μεταλλικές βάσεις στήριξης μπορούν να υλοποιηθούν από μία πληθώρα συνδυασμών μεταλλικών δοκών ή και να επιλεγούν έτοιμες βάσεις στήριξης του εμπορίου. Οι διάφοροι τύποι βάσεων του εμπορίου και το μέγεθός τους αποτελούν αντικείμενο της αντοχής υλικών και ξεφεύγουν από τα όρια αυτής της μελέτης. Γενικά πάντως αναφέρουμε ότι ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του βάρους χωρίς σε καμία περίπτωση να τίθεται σε κίνδυνο η ασφάλεια και η αντοχή της κατασκευής.

Στο ΣΧΗΜΑ 6.11 παρουσιάζεται μία ενδεικτική υλοποίηση, όπου μπορούμε να παρατηρήσουμε τη μεταλλική κατασκευή, τη θέση των στύλων και τα θεμέλιά τους.



ΣΧΗΜΑ 6.11: Ενδεικτική υλοποίηση συστοιχίας, βάσεων στήριξης και στύλων (πίσω όψη).

Σχετικά με το παραπάνω σχήμα:

- Το ύψος μεταξύ του επάνω και του κάτω άκρου της μεταλλικής βάσης είναι $5\text{m} \cdot \sin 10^\circ = 0,87\text{m}$ για τους καλοκαιρινούς μήνες και $5\text{m} \cdot \sin 50^\circ = 3,83\text{m}$ για τους χειμερινούς μήνες.
- Η ακριβής διαφορά ύψους μεταξύ των άκρων της συστοιχίας λόγω της κλίσης του εδάφους στον άξονα Α-Δ είναι $0,02 \cdot 11,916\text{m} = 0,238\text{m}$, όπως έχουμε υπολογίσει και παραπάνω.

Τέλος, σημειώνουμε ότι επάνω στους στύλους τοποθετείται και ο αντιστροφέας της κάθε συστοιχίας χωρίς να υπάρχει κανένα πρόβλημα, αφού είναι ενδεδειγμένη η εξωτερική χρήση τους (ΣΧΗΜΑ 6.12). Επίσης, στους στύλους τοποθετούνται και τα μέσα προστασίας και απόζευξης (διακόπτες, ασφάλειες, κλπ), καθώς και οι αναμονές των γειώσεων.

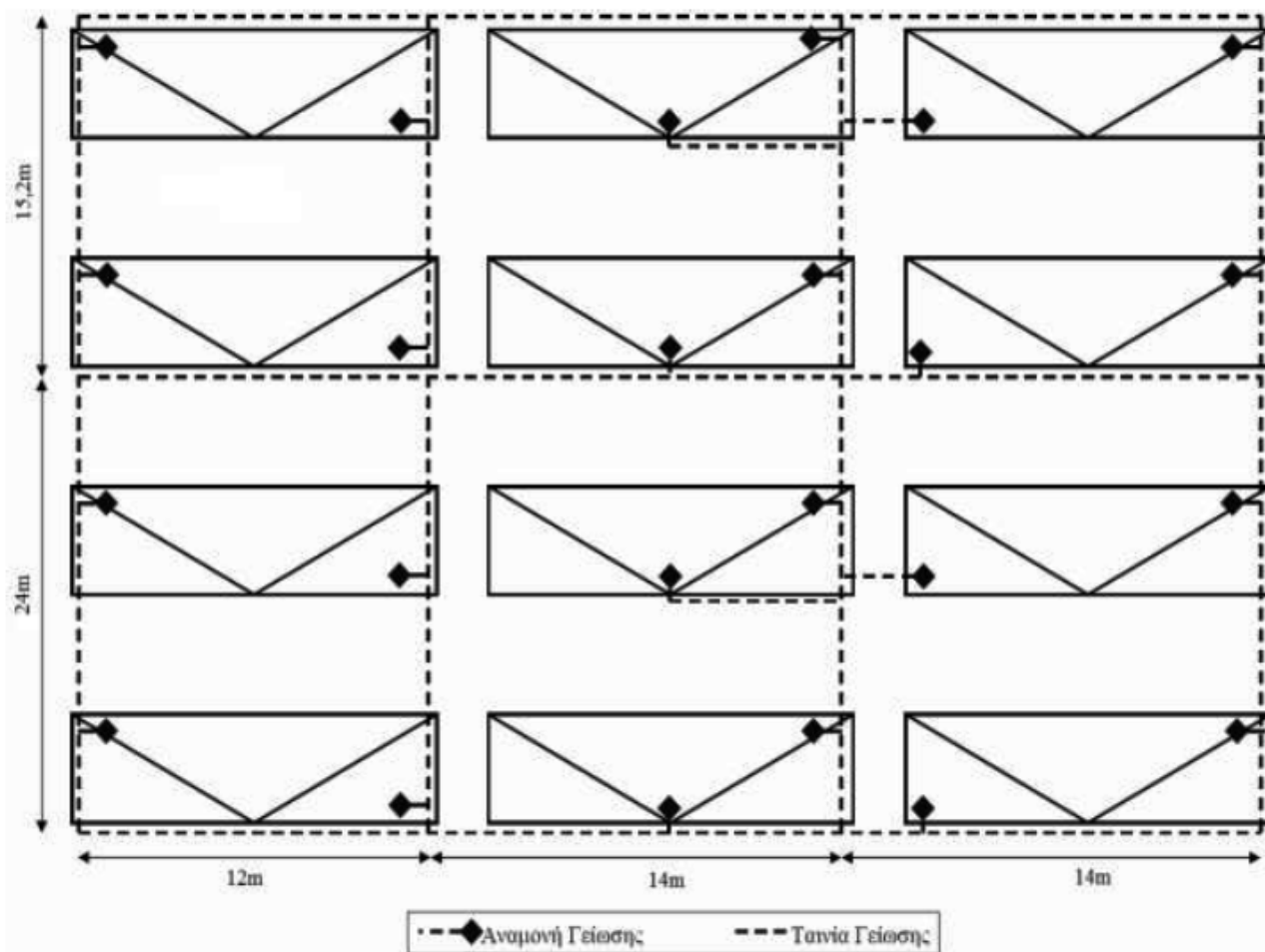


ΣΧΗΜΑ 6.12: Τοποθέτηση αντιστροφέα και διατάξεων προστασίας και απόζευξης σε στύλο που στηρίζει ΦΒ συστοιχία

6.8 ΓΕΙΩΣΗ ΦΒ ΠΑΡΚΟΥ

Στην εγκατάσταση που μελετάμε θα χρησιμοποιήσουμε άμεση θεμελιακή γείωση. Η θεμελιακή γείωση αποτελείται γενικά από ταινία ή κυλινδρικό αγωγό που τοποθετείται στο κάτω μέρος των θεμελίων των κτιρίων, μέσα στο σκυρόδεμα. Στο ΦΒ πάρκο που μελετάμε, η θεμελιακή γείωση θα συνδέεται με τα βάθρα των συστοιχιών, τα οποία είναι χυτά από οπλισμένο σκυρόδεμα και θεμελιωμένα σε βάθος περίπου 1m.

Σε εγκαταστάσεις μεγάλων διαστάσεων (με τη μία τουλάχιστον διάσταση >25 m), επιλέγεται η περικλειόμενη από τη θεμελιακή γείωση επιφάνεια να κατανέμεται σε μικρότερα τμήματα - βρόχους, μέγιστων διαστάσεων 20m*20m. Στο πάρκο που εξετάζουμε λοιπόν, λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω παρατήρηση, η θεμελιακή γείωση αποτελείται από 6 βρόχους (ΣΧΗΜΑ 6.13), αφού η περικλειόμενη επιφάνεια έχει μεγάλες διαστάσεις.



ΣΧΗΜΑ 6.13: Σύστημα θεμελιακής γείωσης με ταινία και αναμονές γείωσης (κάτοψη).

Ως ηλεκτρόδια θεμελιακής γείωσης θα χρησιμοποιηθούν χαλύβδινες ταινίες 30mm x3,5mm τουλάχιστον. Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε χαλύβδινους αγωγούς κυκλικής διατομής με ελάχιστη διάμετρο 10mm αντί για ταινία, όμως έτσι θα είχαμε υψηλότερη αντίσταση γείωσης. Η μεγαλύτερη διάσταση της διατομής της ταινίας πρέπει να τοποθετηθεί κατακόρυφα. Οι συνδέσεις των ταινιών μεταξύ τους θα υλοποιηθούν με συνδέσμους ταινίας-ταινίας και πρέπει να είναι κατασκευασμένες από θερμά γαλβανισμένο ή ανοξείδωτο χάλυβα ώστε να αντέχουν σε διάβρωση και να έχουν ικανότητα να άγουν το αναμενόμενο ρεύμα σφάλματος. Το ίδιο ισχύει και για τις συνδέσεις των ταινιών με το σιδηρό οπλισμό.

Για τη σύνδεση της ηλεκτρικής εγκατάστασης, των ισοδυναμικών συνδέσεων, κλπ με τη θεμελιακή γείωση κατασκευάζονται λήψεις όσο το δυνατόν πλησιέστερα στις θέσεις εγκατάστασης πινάκων διανομής που προβλέπεται η άμεση σύνδεσή τους στη γείωση, και δίπλα στους αντιστροφείς. Οι λήψεις θεμελιακής γείωσης, επειδή βρίσκονται εκτός του εδάφους, πρέπει να κατασκευάζονται από υλικό ανθεκτικό στη διάβρωση. Μπορεί να είναι σε μορφή ακροδέκτη γείωσης ή ζυγού γείωσης ή σε μορφή στρογγυλού αγωγού ή ταινίας και πρέπει να επισημαίνονται (π.χ. με χρωματισμό) και να προστατεύονται από φθορές. Τέλος, τα εξαρτήματα σύνδεσης της ηλεκτρικής εγκατάστασης και των ισοδυναμικών συνδέσεων με τις λήψεις της θεμελιακής γείωσης πρέπει να έχουν αντοχή σε διάβρωση στο περιβάλλον που εγκαθίστανται, καθώς και ικανότητα να άγουν το αναμενόμενο ηλεκτρικό ρεύμα.

Εάν η θεμελιακή γείωση χρησιμοποιείται και ως γείωση αντικεραυνικής προστασίας, όπως συμβαίνει και στην εγκατάσταση που μελετάται, θα πρέπει οι συνδετήρες-σφιγκτήρες να έχουν υποστεί τις προβλεπόμενες εργαστηριακές δοκιμές των προτύπων της σειράς ΕΛΟΤ EN 50164.

Τέλος, όπως θα δούμε παρακάτω, το σύστημα γείωσης του ΦΒ πάρκου συμπληρώνεται από ένα τρίγωνο γείωσης που τοποθετείται μεταξύ του κεντρικού πίνακα και της διάταξης της ΔΕΗ (μετρητής).

6.9 ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

Η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση που μελετάμε, όπως και οι περισσότερες αυτού του τύπου εγκαταστάσεις, βρίσκεται σε απομονωμένη περιοχή, καταλαμβάνει μεγάλη έκταση και οι ΦΒ συλλέκτες βρίσκονται εγκατεστημένοι στην ύπαιθρο. Κάτω από αυτές τις συνθήκες τα ΦΒ συστήματα είναι εκτεθειμένα σε άμεσα κεραυνικά πλήγματα και επιρρεπή σε κρουστικές υπερτάσεις που δημιουργούνται από τον κεραυνό ή από χειρισμούς του ηλεκτρικού δικτύου (ΔΕΗ). Ο κίνδυνος εστιάζεται στην ολική απώλεια του εξοπλισμού όταν δεχτεί άμεσο κεραυνικό πλήγμα είτε η εγκατάσταση είτε το ηλεκτρικό δίκτυο που τροφοδοτεί, καθώς και εκτεταμένες ζημιές των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται, όταν ο κεραυνός πλήξει θέσεις πλησίον της εγκατάστασης ή του δικτύου που τροφοδοτεί.

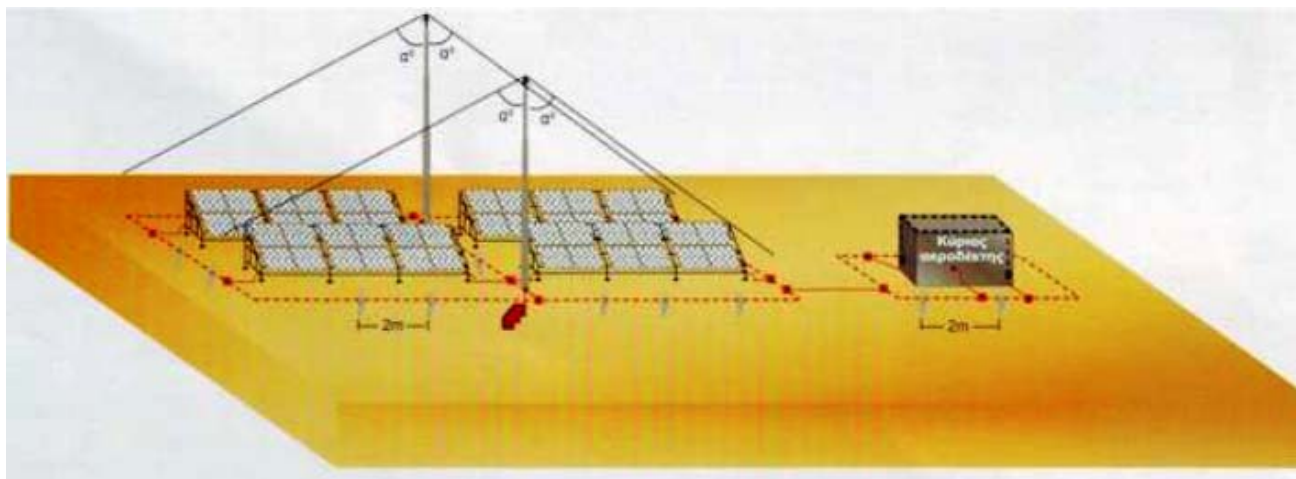
Σε όλες τις περιπτώσεις, αν και η πιθανότητα να χτυπήσει κεραυνός την εγκατάσταση δεν είναι και τόσο μεγάλη, εντούτοις οι οικονομικές απώλειες αντικατάστασης του εξοπλισμού και η απώλεια παραγωγής ενέργειας είναι τόσο σημαντικές και μεγάλες που το κόστος ενός Συστήματος Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ) να συμφέρει οικονομικά. Το ΣΑΠ αποτελείται τόσο από εξωτερικές όσο και από εσωτερικές εγκαταστάσεις αντικεραυνικής προστασίας.

Το εξωτερικό σύστημα του ΣΑΠ αποτελείται από:

- Το συλλεκτήριο σύστημα. Σκοπός του είναι να συλλέξει το κεραυνικό ρεύμα και να το διοχετεύσει μέσω των αγωγών καθόδου στο σύστημα γείωσης με ασφάλεια. Αποτελείται από ράβδους (ακίδες), τεταμένα σύρματα, πλέγμα αγωγών (βρόχοι), μεμονωμένα ή σε συνδυασμό.
- Τους αγωγούς καθόδου. Σκοπός τους είναι να οδηγήσουν το κεραυνικό ρεύμα από το συλλεκτήριο σύστημα στο σύστημα γείωσης με ασφάλεια. Αποτελείται από αγωγούς διατεταγμένους συνήθως περιμετρικά της κατασκευής, ορατούς ή μη.
- Το σύστημα γείωσης. Σκοπός του είναι να επιτευχθεί η διάχυση του κεραυνικού ρεύματος μέσα στη γη, με ασφάλεια χωρίς να δημιουργούνται επικίνδυνες υπερτάσεις. Αποτελείται από οριζόντια ή κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης, τοποθετημένα εντός του εδάφους ή εγκιβωτισμένα σε σκυρόδεμα (έχουμε αναφερθεί στο σύστημα γείωσης στην προηγούμενη παράγραφο).

Η εγκατάσταση του Εξωτερικού ΣΑΠ των ΦΒ συλλεκτών και του οικίσκου του πάρκου, σχεδιάζεται σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα ΕΛΟΤ EN 62305 -3 και την απαιτούμενη κλάση προστασίας, η οποία υπολογίζεται από το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 62305-2. Το εξωτερικό ΣΑΠ των συλλεκτών αποτελείται συνήθως από σύστημα ιστών βασιζόμενο στη μέθοδο της γωνίας προστασίας. Το εξωτερικό ΣΑΠ του οικίσκου πραγματοποιείται με συλλεκτήριους αγωγούς βασιζόμενο στη μέθοδο των βρόχων. Όλα τα εξαρτήματα

εγκατάστασης του εξωτερικού ΣΑΠ πρέπει να έχουν επιτυχώς δοκιμαστεί σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα σειράς ΕΛΟΤ EN 50164. Στο ΣΧΗΜΑ 6.14 παρουσιάζεται μία ενδεικτική μορφή εξωτερικού ΣΑΠ φωτοβολταϊκών:



ΣΧΗΜΑ 6.14: Ενδεικτική μορφή εξωτερικού ΣΑΠ φωτοβολταϊκών

6.10 Αντιστροφείς

Είναι απαραίτητο να τονίσουμε ότι οι αντιστροφείς που χρησιμοποιήθηκαν ικανοποιούν όλες τις απαιτήσεις ασφαλείας σύμφωνα με τον «οδηγό σύνδεσης φωτοβολταϊκών σταθμών στο δίκτυο χαμηλής τάσης» της ΔΕΗ. Τα σημαντικότερα σημεία του είναι τα εξής:

- Η εισαγωγή συνεχούς ρεύματος (χωρίς τη χρήση ΜΣ) είναι μικρότερη του 0,5% της ονομαστικής του τιμής.
- Η συνολική αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος (THDI) είναι μικρότερη από 4%.
- Η ενεργός προστασία έναντι της νησιδοποίησης.
- Η σύνδεση και η αποσύνδεση γίνεται μέσω ηλεκτρονόμων που ελέγχονται μέσω λογισμικού και περιλαμβάνει αυτόματη (επανα)σύνδεση εφόσον οι τιμές τάσης και συχνότητας εμπίπτουν στα όρια $0,8V_{nom} - 1,15V_{nom}$ και 49,5Hz - 50,5Hz και άμεση αποσύνδεση εάν δεν πληρούνται τα όρια αυτά.

6.10.1 Καλώδια

Σύνδεση μεταξύ ΦΒ πλαισίων (dc καλώδια): Τα ΦΒ πλαίσια συνδέονται μεταξύ τους με καλώδια ειδικού τύπου διατομής $4mm^2$, τα οποία μπορούμε να τα προμηθευτούμε μαζί με τις γεννήτριες. Η θέση του κιβωτίου σύνδεσης σε κάθε ΦΒ πλαίσιο, φαίνεται στο datasheet της εταιρίας Silcio. Γενικά, στο κιβώτιο

αυτό, ένας ακροδέκτης παρέχει δύο πολικότητες, επικοινωνώντας με το εξωτερικό μέσω 2 οπών με στυπιοθλίπτες καλωδίου. Πρέπει ωστόσο να τονίσουμε ότι τα πλαίσια που έχουμε επιλέξει, όπως και τα περισσότερα πλέον πλαίσια που κυκλοφορούν, είναι προκαλωδιωμένα και διαθέτουν στεγανούς συνδετήρες, επιτρέποντας έτσι τη γρήγορη σύνδεση χωρίς να είναι αναγκαίο το άνοιγμα κιβωτίων σύνδεσης. Η προκαλωδίωση αυτή περιλαμβάνει καλώδια με αρσενικό και θηλυκό βύσμα για τις δύο πολικότητες. Στο εσωτερικό του κιβωτίου σύνδεσης υπάρχουν και 3 ενσωματωμένες διόδους by-pass, όπως αναφέρεται και στο datasheet του πλαισίου, οι οποίες έχουν τοποθετηθεί από τον κατασκευαστή με σκοπό να περιορίζουν τις βλάβες από σκίαση.

Σύνδεση της συστοιχίας με τον αντιστροφέα (dc καλώδια): Ο υπολογισμός αυτών των καλωδίων γίνεται με βάση τις τιμές της τάσης και της έντασης στην είσοδο του αντιστροφέα, οι οποίες φαίνονται στον ΠΙΝΑΚΑ 6.7 (περίπτωση 3).

6.10.2 Κιβώτια πινάκων

Οι πίνακες που θα τοποθετηθούν εκτός του οικίσκου, στο ύπαιθρο, δηλαδή οι υποπίνακες της εγκατάστασης, θα είναι μεταλλικοί τύπου PILLAR (ΣΧΗΜΑ 6.10.2). Οι πίνακες εξωτερικού χώρου - Pillar είναι πίνακες διανομής, τροφοδότησης κινητήρων, φωτισμού για υπαίθρια εγκατάσταση, όπου λόγω αντίξοων περιβαλλοντικών συνθηκών απαιτείται μεγάλη στεγανότητα και εύκολη επεκτασιμότητα. Ο βαθμός προστασίας τους από την επίδραση του περιβάλλοντος (σκόνη, βροχή, κ.α.) κυμαίνεται από IP40 μέχρι IP66, ανάλογα με τις προδιαγραφές.

Ανάλογα με τις διαστάσεις και το ηλεκτρολογικό υλικό, χωρίζονται σε μονομερή, διμερή, τριμερή και τετραμερή αριθμό διαμερισμάτων, γεγονός που δίνει μεγάλη ευελιξία τοποθέτησης και αφαίρεσης υλικών, χωρίς να επηρεάζονται τα γειτονικά υλικά. Επίσης, το ηλεκτρολογικό υλικό κουμπώνεται σε ειδική γαλβανιζέ ράγα. Στην εγκατάσταση που μελετάμε θα χρησιμοποιήσουμε 4 μεταλλικούς IP55 πίνακες τύπου PILLAR.

Η θέση του κάθε πίνακα στην εγκατάσταση είναι πολύ σημαντική, καθώς από αυτή εξαρτάται άμεσα το μήκος των καλωδίων που απαιτούνται για τη σύνδεση των αντιστροφέων. Πράγματι, όπως είδαμε και παραπάνω, οι επιλογές καλωδίων που έχουμε κάνει προϋποθέτουν ότι το μήκος καλωδίου μεταξύ αντιστροφέα - αντίστοιχου υποπίνακα δεν υπερβαίνει τα 31 m. Η τοποθέτηση των υποπινάκων ικανοποιούν την προϋπόθεση αυτή, καθώς το μακρύτερο καλώδιο που προκύπτει είναι περίπου 10m. Επίσης, με την επιλογή αυτών των θέσεων πετυχαίνουμε και συνολικά το μικρότερο δυνατό μήκος χρησιμοποιούμενων καλωδίων.



ΣΧΗΜΑ 6.10.2: Πίνακας εξωτερικού χώρου - τύπου Pillar

[Πληροφορίες σχετικά με τον βαθμό προστασίας (IP κώδικας) μπορούμε να βρούμε στην ιστοσελίδα <http://www.geovsolutions.gr/ip.php>]

Οι πίνακες που θα τοποθετηθούν εντός του οικίσκου, θα είναι μεταλλικοί IP54 κατάλληλης διάστασης. Θα υπάρχει ο κεντρικός πίνακας που αναφέρθηκε προηγουμένως και ο πίνακας διαφόρων παροχών (φωτισμός, συναγερμός, κάμερες).

6.10.3 Σύστημα διαχείρισης και ελέγχου

Είναι πολύ σημαντικό να μπορεί να γίνεται η παρακολούθηση και καταγραφή της απόδοσης μιας ΦΒ εγκατάστασης, καθώς και η εύκολη επέμβαση στις παραμέτρους του συστήματος όταν είναι αυτό αναγκαίο. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο ένα σύστημα ελέγχου. Η εταιρία SMA, ταυτόχρονα με την παραγωγή των αντιστροφένων, προσφέρει και μία πληθώρα προϊόντων καταγραφής, αλλά και λογισμικού επεξεργασίας σε οποιοδήποτε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Για την εγκατάσταση που μελετάται, μία πολύ καλή λύση προσφέρει το σύστημα απομακρυσμένου ελέγχου και διαχείρισης Sunny WebBox του οίκου SMA, γερμανικής κατασκευής και προέλευσης, με ενσωματωμένο εσωτερικό modem για σύνδεση με γραμμή κινητής τηλεφωνίας.

Οι βασικές λειτουργίες του συστήματος ελέγχου και μετρήσεων θα είναι οι παρακάτω:

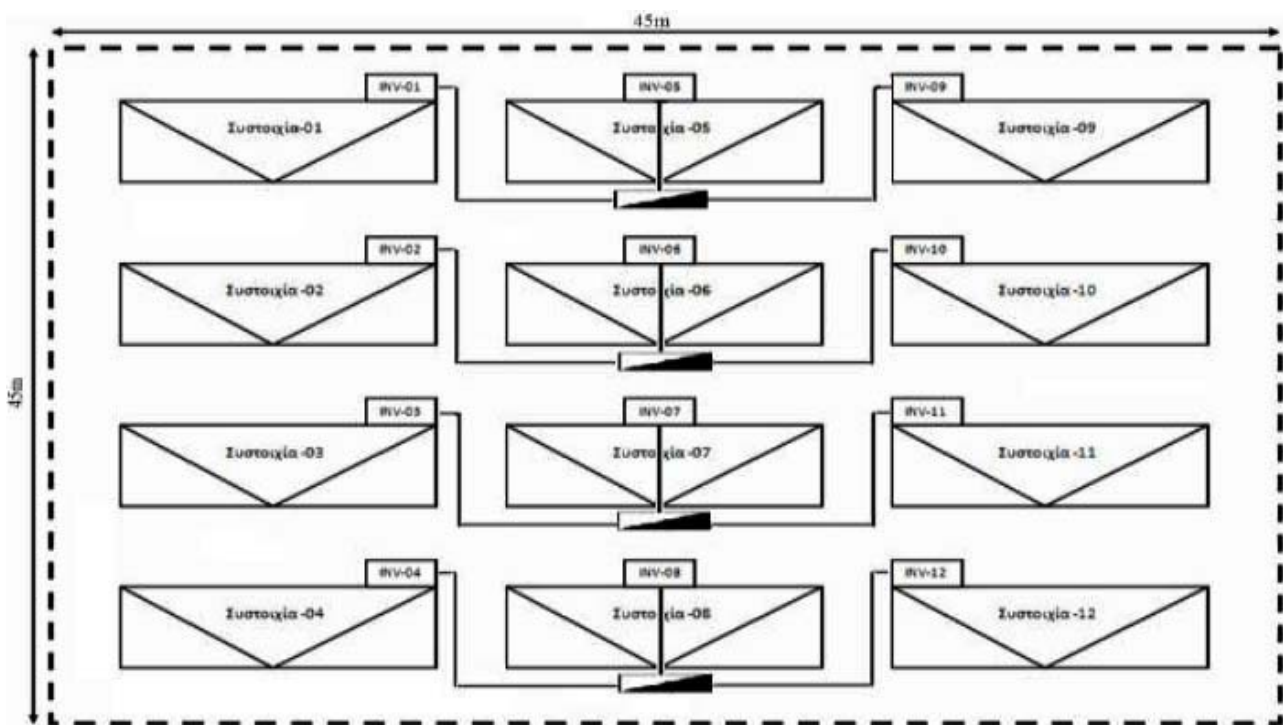
- Καταγραφή των λειτουργικών δεδομένων του ΦΒ σταθμού.

- Μετάδοση και απεικόνιση των λειτουργικών δεδομένων του ΦΒ σταθμού.
- Επεξεργασία λειτουργικών δεδομένων του ΦΒ σταθμού.
- Ενημέρωση όταν παρατηρηθεί απόκλιση από την προβλεπόμενη κατάσταση λειτουργίας.

Το σύστημα παρέχει τη δυνατότητα τοπικής παρακολούθησης μέσω υπολογιστή αλλά και απομακρυσμένης παρακολούθησης μέσω της ιστοσελίδας της SMA.

Επικοινωνία με τους αντιστροφείς: Γίνεται μέσω καλωδίωσης RS485 για εξωτερικό χώρο και εντός εδάφους. Με το Sunny WebBox είναι δυνατή η σύνδεση και επιτήρηση έως και 50 αντιστροφέων. Η μέγιστη εμβέλεια επικοινωνίας με καλώδια RS485 είναι 1000m, οπότε προφανώς δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα σύνδεσης των μετατροπέων με το Sunny WebBox, το οποίο θα τοποθετηθεί εντός του οικίσκου.

Πλήρεις οδηγίες για το Sunny WebBox υπάρχουν στο site της SMA: [http://files.sma.de/dl/2585/S_WebBox-BGR111033.p d f](http://files.sma.de/dl/2585/S_WebBox-BGR111033.pdf)



ΣΧΗΜΑ 6.10.3: Σύνδεση των αντιστροφέων στους υποπίνακες (Σημείωση 1: Αξίζει να αναφέρουμε ότι ως εναλλακτική υλοποίηση θα μπορούσαμε να έχουμε μόνο έναν υποπίνακα, στον οποίο θα ομαδοποιούσαμε όλα τα καλώδια σε 4 ομάδες των τριών. Σημείωση 2: Από καθέναν από τους παραπάνω υποπίνακες φεύγει ένα τριφασικό καλώδιο για τη σύνδεση με τον κεντρικό πίνακα που βρίσκεται εντός του οικίσκου)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ζαχαρίας Θ., ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ Ι, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2009
- [2] Ζαχαρίας Θ., ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΙΙ, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2009
- [3] Γιαννακόπουλος Β. Γαβριήλ, Βοβός Α. Νικόλαος, ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, Εκδόσεις Ζήτη, 2008
- [4] Γιαννακόπουλος Β. Γαβριήλ, Βοβός Α. Νικόλαος, ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, Εκδόσεις Ζήτη, 2008
- [5] Φραγκιαδάκης Ι., ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ, Εκδόσεις Ζήτη, 2009
- [6] Καγκαράκης Κ., ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ, Εκδόσεις Συμμετρία, 1992
- [7] Bogus Klaus, Castaner Luis, Cuevas Andres, ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ ΑΠΟ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ, Εκδόσεις Ίων, 2003
- [8] Περράκη Β., ΦΥΣΙΚΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2009
- [9] Περράκη Β., ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2010
- [10] Ned Mohan, Tore A. Undeland, William P. Robbins, ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ, Εκδόσεις Τζιόλα, 2010
- [11] Σαφάκας Ν. Αθανάσιος, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2007
- [12] Μήλιας-Αργεΐτης Ιωάννης, ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2008
- [13] Μάργαρης Ι. Νικόλαος, ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ, Εκδόσεις Τζιόλα, 2000
- [14] Σπύρου Ν., ΑΓΩΓΙΜΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ, Εκδόσεις Τζιόλα, 2009
- [15] MANITOBA RESEARCH CENTRE, PAPER OF OCTOBER 2008, ISSUE: SIMULATION OF GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

- [16] <http://www.ypeka.gr> (Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας & Κλιματικής Αλλαγής)
- [17] <http://www.investingreece.gov.gr>
- [18] <http://www.elemko.gr> (ΕΛΕΜΚΟ ΑΒΕΕ, Αντικεραυνική Προστασία)
- [19] <http://www.helapco.gr> (Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών)
- [20] <http://www.tee.gr> (Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος)
- [21] <http://www.pscad.com>
- [22] <http://www.econews.gr>