

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

Χαρακτηρισμός Φ/Β και η επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην απόδοσή τους

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ:
ΚΑΤΣΙΡΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ:
ΣΤΑΘΑΤΟΣ ΗΛΙΑΣ

ΠΑΤΡΑ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2014

Πρόλογος

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας αποτελεί η παρουσίαση και μερικώς η ανάλυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων και κυρίως η επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην απόδοσή τους.

Summary

At the present time the main source of energy is oil and its derivatives. However, the systematic use of oil has led mankind to the energy crisis. On the one hand, global economies have as a priority to ensure their energy needs with any costs and on the other hand, there is the ecological destruction of the products of combustion of oil, such as the greenhouse effect.

PV is a clean energy with many advantages. Illustration is an unlimited natural resource, has a long life and satisfactory performance. One way of improving the efficiency of production of photovoltaic energy is the construction of a prototype system for tracking the sun.

The subject of this thesis is the presentation and analysis of partially photovoltaic systems and especially the effect of air pollution on their performance.

Before doing the above analysis, in the first chapter are a reference to renewable energy and particularly the presence and development of photovoltaic systems in the Greek and international market. Then, in the second chapter presents the basic principles of solar energy on the sun and solar geometry. The third chapter has made an analysis of the photovoltaic effect and attempt a description of the most important materials and manufacturing technologies of photovoltaic modules. Even analyzing the electrical characteristics of the photovoltaic modules and the most important factors that influence it. Finally, the fourth chapter deals with reducing agents that contribute to reducing the efficiency of photovoltaic systems.

Περίληψη

Την σημερινή εποχή η κύρια μορφή ενέργειας είναι το πετρέλαιο και τα παράγωγα του. Όμως η συστηματική χρήση του πετρελαίου έχει οδηγήσει την ανθρωπότητα σε ενεργειακή κρίση. Από την μία πλευρά οι παγκόσμιες οικονομίες έχουν σαν προτεραιότητα την εξασφάλιση των ενεργειακών αναγκών τους με οποιασδήποτε κόστος και από την άλλη μεριά, υπάρχει η οικολογική καταστροφή από τα προϊόντα της καύσης του πετρελαίου, όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Η φωτοβολταϊκή ενέργεια είναι μια καθαρή ενέργεια με πολλά πλεονεκτήματα. Ενδεικτικά, αποτελεί έναν απεριόριστο φυσικό πόρο, έχει μεγάλη διάρκεια ζωής και ικανοποιητική απόδοση. Ένας τρόπος βελτίωση της απόδοσης της παραγωγής της φωτοβολταϊκής ενέργειας είναι η κατασκευή ενός πρωτότυπου συστήματος παρακολούθησης της πορείας του ήλιου.

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας αποτελεί η παρουσίαση και μερικώς η ανάλυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων και κυρίως η επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην απόδοσή τους.

Πριν γίνει η παραπάνω ανάλυση, στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια αναφορά στις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας και κυρίως στην παρουσία και την εξέλιξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην ελληνική και διεθνή αγορά. Στη συνέχεια, στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της ηλιακής ενέργειας που αφορούν την ηλιακή ακτινοβολία και την ηλιακή γεωμετρία. Στο τρίτο κεφάλαιο Πραγματοποιείται μια ανάλυση του φωτοβολταϊκού φαινομένου και επιχειρείται μια περιγραφή των σπουδαιότερων υλικών και τεχνολογιών κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων. Ακόμα αναλύονται τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φ/β στοιχείων και οι σημαντικότεροι παράγοντες που τα επηρεάζουν. Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο αναφερόμαστε στους παράγοντες μείωσης που συμβάλουν στην μείωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Λέξεις – Κλειδιά: Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Φωτοβολταϊκά πλαίσια, Απόδοση, Ρύπανση, Παράγοντες επίδρασης

Περιεχόμενα

<u>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</u>	4
<u>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</u>	5
<u>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</u>	7
<u>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u>	9
<u>1.1 Συμβατικές και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας</u>	9
<u>1.2 Φωτοβολταϊκά Συστήματα στην Ελληνική και Διεθνή Αγορά</u>	12
<u>2. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ</u>	16
<u>2.1 Ηλιακή Ακτινοβολία</u>	17
<u>2.2 Ηλιακή Γεωμετρία</u>	20
<u>3. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ</u>	22
<u>3.1 Ιστορική Αναδρομή</u>	23
<u>3.2 Αρχή λειτουργίας Φ/Β Συστημάτων – Θεωρία ημιαγωγών</u>	24
<u>3.2.1 Δομή των ημιαγωγών</u>	25
<u>3.2.2 Επαφή PN</u>	26
<u>3.2.3 Ρεύμα διάχυσης και ανάστροφο ρεύμα</u>	27
<u>3.2.4 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο</u>	29
<u>3.3 Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκού Στοιχείου</u>	30
<u>3.3.1 Μοντέλο Φωτοβολταϊκού Στοιχείου</u>	30
<u>3.3.2 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V</u>	31
<u>3.3.3 Συντελεστής Απόδοσης</u>	33
<u>3.3.4 Φωτοβολταϊκή γεννήτρια</u>	35
<u>3.4 Υλικά και Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών Στοιχείων</u>	37
<u>3.4.1 Το Πυρίτιο (Si)</u>	37
<u>3.4.1.1 Μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο</u>	38
<u>3.4.1.2 Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο</u>	39
<u>3.4.1.3 Ribbon Πυρίτιο</u>	39
<u>3.4.1.4 Κρυσταλλικό Πυρίτιο λεπτού φιλμ (c-SiTFE)</u>	40
<u>3.4.1.5 Άμορφο πυρίτιο (a-Si)</u>	40
<u>3.4.2 Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)</u>	41
<u>3.4.3 Δισεληνιούχος Ινδιούχος Χαλκός (CuInSe₂ ή CIS)</u>	42
<u>3.4.4 Τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe)</u>	42
<u>3.4.5 Άλλοι τύποι κυψελών</u>	43

<u>4. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΒ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ</u>	45
<u>4.1 Παράγοντες επίδρασης ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκών στοιχείων</u> ...	46
<u>4.1.1 Επίδραση της θερμοκρασίας</u>	47
<u>4.1.2 Επίδραση Γωνίας Πρόσπτωσης Ηλιακής Ακτινοβολίας</u>	47
<u>4.1.3 Επίδραση Ηλιακής Ακτινοβολίας</u>	48
<u>4.1.4 Εξάρτηση τάσης μέγιστης ισχύος (V_{mp}) από το επίπεδο ακτινοβολίας</u>	49
<u>4.1.5 Μεταβολές Ηλιακού Φάσματος</u>	49
<u>4.1.6 Σκίαση</u>	50
<u>4.1.7 Ρύπανση</u>	52
<u>4.2 Παράγοντες επίδρασης επιπέδου Φ/Β συστήματος</u>	53
<u>5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΡΥΠΑΝΣΗΣ</u>	56
<u>5.1 Μέσες ετήσιες απώλειες λόγω ρύπανσης</u>	59
<u>5.2 Οικονομική Ανάλυση</u>	60
<u>6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</u>	62
<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	63

Ευρετήριο Σχημάτων

<u>ΣΧΗΜΑ 1.1: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΜΕΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ & ΧΑΡΤΗΣ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΠΛΑΝΗΤΗ</u>	11
<u>ΣΧΗΜΑ 1.2: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΕΤΟΥΣ 2013</u>	13
<u>ΣΧΗΜΑ 1.3: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΕΤΟΥΣ 2013 ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΧΩΡΕΣ</u>	14
<u>ΣΧΗΜΑ 1.4: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΕΘΝΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΕΤΟΥΣ 2013</u>	15
<u>ΣΧΗΜΑ 2.1: ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΉΛΙΟΥ</u>	16
<u>ΣΧΗΜΑ 2.2 : ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ</u>	18
<u>ΣΧΗΜΑ 2.3 : ΧΑΡΤΗΣ ΕΤΗΣΙΑΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ</u>	18
<u>ΣΧΗΜΑ 2.4 : ΕΤΗΣΙΑ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (ΚWh/M²) ΠΟΥ ΠΡΟΣΠΙΠΤΕΙ ΣΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥΣ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΘΕΣΗ ΚΑΙ ΣΕ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΥΠΟ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΓΩΝΙΑ ΚΛΙΣΗΣ</u>	19
<u>ΣΧΗΜΑ 2.5: Η ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΚΛΙΣΗ ΕΝΟΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΣΤΙΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΡΕΣ ΤΟΥ ΕΤΟΥΣ, ΣΕ ΜΙΑ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΜΕ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ ΠΛΑΤΟΣ 38^ο. ΤΑ ΥΨΗ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΑ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ ΗΛΙΑΚΑ ΜΕΣΗΜΕΡΙΑ</u>	21
<u>ΣΧΗΜΑ 3.1: ΠΡΟΣΩΠΙΚΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ</u>	24
<u>ΣΧΗΜΑ 3.2: ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΜΗ ΣΤΟ ΗΜΙΑΓΩΓΟ ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΤΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΟΜΟΙΟΠΟΛΙΚΩΝ ΔΕΣΜΩΝ</u>	25
<u>ΣΧΗΜΑ 3.3.1: Η ΕΠΑΦΗ PN</u>	27
<u>ΣΧΗΜΑ 3.3.2: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ I-V. ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΜΙΑ ΕΠΑΦΗ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΤΑΣΗ ΠΟΛΩΣΗΣ</u>	28
<u>ΣΧΗΜΑ 3.4: ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ</u>	29
<u>ΣΧΗΜΑ 3.5: ΠΛΗΡΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΕΝΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ</u>	30
<u>ΣΧΗΜΑ 3.6: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ I-V ΕΝΟΣ ΙΔΑΝΙΚΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ</u>	32
<u>ΣΧΗΜΑ 3.7: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ Α) ΕΝ ΣΕΙΡΑ ΚΑΙ Β) ΤΗΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ I-V</u>	32
<u>ΣΧΗΜΑ 3.8: ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ</u>	33
<u>ΣΧΗΜΑ 3.9: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ FF</u>	34
<u>ΣΧΗΜΑ 3.10: ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΟ, ΠΛΑΙΣΙΟ, ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ</u>	35
<u>ΣΧΗΜΑ 3.11: ΦΒ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΚΛΙΣΗ</u>	36
<u>ΣΧΗΜΑ 3.12: Α) ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΗΛΙΟΥ ΕΝΟΣ ΑΞΟΝΑ, Β) ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΗΛΙΟΥ ΔΥΟ ΑΞΟΝΩΝ</u>	36
<u>ΣΧΗΜΑ 3.13: ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΟΣ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ</u>	38
<u>ΣΧΗΜΑ 3.14: Α) ΚΥΨΕΛΗ ΜΟΝΟΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ, Β) ΚΥΨΕΛΗ ΠΟΛΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ, Γ) ΚΥΨΕΛΗ ΑΜΟΡΦΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ</u>	41
<u>ΣΧΗΜΑ 3.15: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΥΡΙΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ</u>	43

<u>ΣΧΗΜΑ 3.16: ΑΠΟΔΟΣΕΙΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΕΛΙΩΝ</u>	44
<u>ΣΧΗΜΑ 4.0: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ, ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ ΣΤΗΝ ΕΤΗΣΙΑ DC-ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΑΠΟ ΕΝΑ MC-SI ΠΛΑΙΣΙΟ, ΩΣ ΠΡΟΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΚΛΙΣΗΣ ΙΣΗ ΜΕ ΤΟ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ ΠΛΑΤΟΣ</u>	48
<u>ΣΧΗΜΑ 4.1: ΜΕΤΑΒΟΛΗ VMP ΚΑΙ PMP ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΟΠΩΣ ΜΕΤΡΑΤΑΙ ΓΙΑ ΔΥΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ, A-SI ΚΑΙ MC-SI</u>	49
<u>ΣΧΗΜΑ 4.2: ΕΠΟΧΙΑΚΗ (ΜΗΝΙΑΙΑ) ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΟΥ ΔΙΑΤΙΘΕΤΑΙ ΑΠΟ ΕΝΑ MC-SI ΚΑΙ ΕΝΑ A-SI ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΟ</u>	50
<u>ΣΧΗΜΑ 4.3: ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΘΕΡΜΗΣ ΚΗΛΙΔΑΣ</u>	51
<u>ΣΧΗΜΑ 4.4: ΜΕΡΙΚΗ ΚΑΛΥΨΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΑΠΟ ΧΙΟΝΙ</u>	52
<u>ΣΧΗΜΑ 4.5: ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ AC ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΦΒ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ</u>	54
<u>ΣΧΗΜΑ 5.1: ΑΠΟΔΟΣΗ ΦΒ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ ΤΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ</u>	57
<u>ΣΧΗΜΑ 5.2: ΜΕΣΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΤΙΜΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΟΠΟΘΕΣΙΕΣ ΚΑΙ ΤΥΠΟΥΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ</u>	58
<u>ΣΧΗΜΑ 5.3: ΑΠΟΔΟΣΗ ΦΒ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ ΤΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ</u>	59
<u>ΣΧΗΜΑ 5.4: ΜΕΣΕΣ ΕΤΗΣΙΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΛΟΓΩ ΡΥΠΑΝΣΗΣ</u>	59
<u>ΣΧΗΜΑ 5.5: ΜΗΝΙΑΙΑ ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΗ ΑΠΟ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΠΟΔΟΣΗ</u>	60

1. Εισαγωγή

Στις μέρες μας, η αλόγιστη χρήση των συμβατικών πηγών ενέργειας για την κάλυψη των σύγχρονων αναγκών έχει προκαλέσει δυσμενείς επιπτώσεις στο φυσικό μας περιβάλλον. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την ολοένα αυξανόμενη ενεργειακή κρίση που συντελείται παγκοσμίως αλλά και με τις δυνατότητες που παρέχονται με την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστά αναγκαία την περαιτέρω ανάπτυξη και εξέλιξη του κλάδου των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια, λοιπόν τα Αιολικά και τα Φωτοβολταϊκά Συστήματα μπαίνουν όλο και περισσότερο στη ζωή μας.

Στο κλάδο των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, εντάσσεται και η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων με σημαντικές προοπτικές ανάπτυξης στον ελληνικό χώρο. Τα τελευταία χρόνια, η ταχύτατη ανάπτυξη της βιομηχανίας έχει επεκτείνει το ενδιαφέρον και την ανάγκη για έρευνα στον τομέα της φωτοβολταϊκής επιστήμης. Η συγκεκριμένη επιστήμη έχει τις βάσεις της στην τεχνολογία των ημιαγωγών, στην οποία υπάγονται τα ηλιακά στοιχεία, η ηλεκτρονική και η θεωρία των ηλεκτρικών κυκλωμάτων τα οποία χρησιμοποιούνται για την σχεδίαση και ανάλυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Οι περισσότερες τεχνολογικές εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων απαιτούν τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή για την πραγματοποίηση γρήγορων και ακριβών υπολογισμών ή προσομοιώσεων.

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών άρχισε να αναπτύσσεται περίπου το 1950, κυρίως για χρήση τους σε διαστημικές εφαρμογές, και από τότε εξελίσσεται συνεχώς. Σήμερα, δίνεται μεγάλη σημασία στην κατασκευή φωτοβολταϊκών πλαισίων που θα έχουν μεγαλύτερες αποδόσεις και κατά συνέπεια θα αξιοποιούν καλύτερα την διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια.

Στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας επιχειρείται μια ανάλυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, επικεντρωμένη στην κατανόηση των επιδράσεων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

1.1 Συμβατικές και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Η ενέργεια ως μια θεμελιώδης ανάγκη για την ανάπτυξη κάθε κοινωνίας αποτέλεσε και αποτελεί τον κινητήριο μοχλό κάθε ανθρώπινης δραστηριότητας. Οι περισσότερες χώρες του κόσμου βασίζονται σε δικά τους ή εισαγόμενα καύσιμα για να ικανοποιήσουν ένα μεγάλο ποσοστό των ενεργειακών τους αναγκών. Όσον αφορά όμως τα αποθέματα ενέργειας (ενεργειακό δυναμικό), οι πηγές ενέργειας διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Τις Συμβατικές ή Μη Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ή Ήπιες Μορφές Ενέργειας ή αλλιώς και Πράσινη Ενέργεια.

Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χαρακτηρίζονται οι πηγές οι οποίες δεν αναπληρώνονται ή αναπληρώνονται εξαιρετικά αργά για τα ανθρώπινα μέτρα από φυσικές διαδικασίες, και περιλαμβάνονται κυρίως από τα εξής:

- Τα στερεά καύσιμα των γαιανθράκων, όπως λιγνίτη, ανθρακίτη, τύρφη
- Τα υγρά καύσιμα που παίρνουμε με κατεργασία όπως μαζούτ, πετρέλαιο, βενζίνη, κηροζίνη κλπ,
- Τα αέρια καύσιμα όπως το φυσικό αέριο, υγραέριο κλπ,
- Την πυρηνική ενέργεια που παίρνουμε από τη σχάση ραδιενεργών υλικών.

Βέβαια, η φύση δεν σταματά να δημιουργεί ούτε άνθρακα ούτε πετρέλαιο. Οι μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι αυτές που χρησιμοποιούνται κυρίως τα τελευταία χρόνια και έχουν βοηθήσει πολύ στην ανάπτυξη της σύγχρονης κοινωνίας. Ωστόσο αυτές οι ενεργειακές πηγές έχουν περιορισμένες προοπτικές, αφού τα συμβατικά και πυρηνικά καύσιμα εξαντλούνται βαθμιαία, γεγονός που επιβαρύνθηκε τους τελευταίους δύο αιώνες με την εκρηκτική αύξηση του πληθυσμού και κατά συνέπεια την κατακόρυφη αύξηση της ενεργειακής ζήτησης. Εκτιμάται ότι τα υπάρχοντα αποθέματα των πηγών αυτών θα επαρκέσουν ακόμα για περίπου 200 χρόνια για το κάρβουνο, 60 χρόνια για το φυσικό αέριο και 50 χρόνια για το πετρέλαιο.

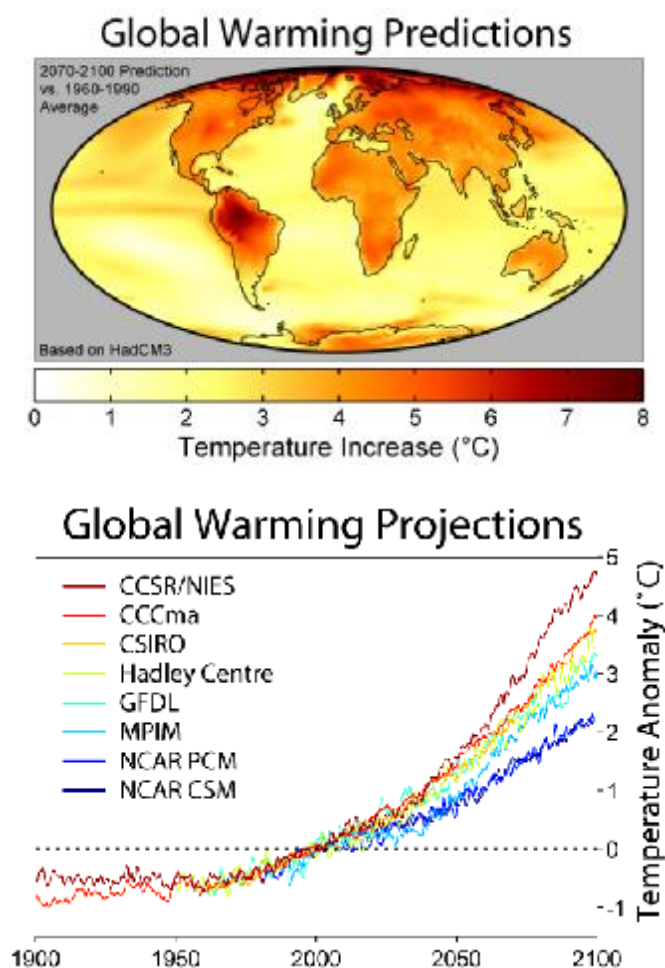
Το ενδιαφέρον για τις ήπιες μορφές ενέργειας ανακινήθηκε τη δεκαετία του 1970, ως αποτέλεσμα κυρίως της πετρελαϊκής κρίσης του 1973 και της συνεχόμενης αύξησης της τιμής του πετρελαίου τα επόμενα χρόνια, αλλά και της αλλοίωσης του περιβάλλοντος και της ποιότητας ζωής από την χρήση κλασικών πηγών ενέργειας. Συνεπώς, άρχισαν να επιβεβαιώνονται επιστημονικά οι επιβαρυντικές συνέπειες της αλόγιστης χρήσης αυτών των φαινομενικά “αθώων” καυσίμων στο οικοσύστημα και στην ανθρώπινη υγεία, όπως η όξινη βροχή, η μεγάλη απελευθέρωση CO₂ στην ατμόσφαιρα και η συνεχής αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη με δυσοίωνες προβλέψεις για το μέλλον. Δεν ήταν όμως μόνο αυτές οι συνέπειες. Δύο πολύ σοβαρά ατυχήματα που έγιναν στους πυρηνικούς σταθμούς του Three Mile Island της Πενσυλβάνια το 1979 και του Τσέρνομπιλ της Ουκρανίας το 1986, ήρθαν να προκαλέσουν έντονες αμφιβολίες στην κοινή γνώμη για την πυρηνική ενέργεια και τις καταστροφικές συνέπειες που έχει στο περιβάλλον και στον άνθρωπο μία πιθανή διαρροή. Έτσι η παγκόσμια κοινότητα άρχισε να στρέφεται προς τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας. Ο όρος «ήπιες» αναφέρεται σε δυο βασικά χαρακτηριστικά τους. Καταρχάς, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Δεύτερον, πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, πολύ «φιλικές» στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Ως ανανεώσιμες χαρακτηρίζονται οι πηγές που θα συνεχίζουν να μας παρέχουν ενέργεια σε βάθος χρόνου. Είναι οι πηγές ενέργειας που τροφοδοτούνται συνεχώς με ενέργεια από τον ήλιο, όπως:

- ο ίδιος ο ήλιος (ηλιακή ενέργεια),
- ο άνεμος (αιολική ενέργεια),
- οι υδατοπτώσεις (υδροηλεκτρική ενέργεια),
- η ενέργεια των κυμάτων, ρευμάτων, ωκεανών καθώς και
- η ενέργεια της βιομάζας

Στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ανήκει και η γεωθερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης και σχετίζεται με την ηφαιστειότητα και τις ειδικότερες γεωλογικές και γεωτεκτονικές συνθήκες κάποιων περιοχών.

Όπως ήδη αναφέραμε αυτές οι μορφές ενέργειας είναι φιλικές με το περιβάλλον και δεν πρόκειται να εξαντληθούν ποτέ, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα. Παρόλα αυτά όμως δεν αποτελούν παρά ένα μικρό ποσοστό της συνολικής παραγόμενης ενέργειας παγκοσμίως, που οφείλεται αφενός στο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που ήταν και συνεχίζει να είναι σχετικά υψηλό, αφετέρου στις πολιτικές και οικονομικές σκοπιμότητες που έχουν να κάνουν με τη διατήρηση της παρούσας κατάστασης στον ενεργειακό τομέα και εμπόδισαν την πλήρη εκμετάλλευση των ΑΠΕ.

Τα τελευταία χρόνια η Ευρωπαϊκή Ένωση, αλλά και από πολλά μεμονωμένα κράτη, υιοθετούνται νέες πολιτικές για τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που προάγουν τέτοιες εσωτερικές πολιτικές. Η ανάγκη για παγκόσμιο περιορισμό των αέριων ρύπων οδήγησε το καλοκαίρι του 1992 στην διάσκεψη στο Ρίο όπου οι επικεφαλής των βιομηχανικών χωρών δεσμεύτηκαν να μειώσουν μέχρι το 2000 τις εκπομπές αερίων που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου, δέσμευση που δεν εκπληρώθηκε από πολλές χώρες όπως π.χ. οι Η.Π.Α. Στην συνέχεια ήρθε η διάσκεψη στο Κιότο της Ιαπωνίας το Δεκέμβριο του 1997, όπου υπεγράφη η πρώτη συμφωνία σε παγκόσμιο επίπεδο (Πρωτόκολλο του Κιότο) η οποία τέθηκε σε ισχύ στις 16 Φεβρουαρίου 2005. Η αναγκαιότητα της μείωσης των παραγόμενων ρύπων από την μετατροπή συμβατικών καυσίμων σε ηλεκτρική ενέργεια και κατ'επέκταση της προώθησης των ΑΠΕ φαίνεται από τις εκτιμήσεις για την άνοδο της θερμοκρασίας του πλανήτη τα επόμενα χρόνια (σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1: Διάγραμμα εκτίμησης μέσης θερμοκρασιακής μεταβολής & Χάρτης πρόβλεψης αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη

(Πηγή:

http://www.globalwarmingart.com/wiki/Predictions_of_Future_Change_Gallery)

Παραπομπές: [1], [2]

1.2 Φωτοβολταϊκά Συστήματα στην Ελληνική και Διεθνή Αγορά

Το 2013, η ελληνική αγορά φωτοβολταϊκών ξεπέρασε τα 1.000 μεγαβάτ (MWp) νέων εγκαταστάσεων, καλύπτοντας τον ενδεικτικό εθνικό στόχο για το 2020 επτά χρόνια νωρίτερα! Αντί όμως να υπάρχει ένα κλίμα αισιοδοξίας γι' αυτή τη λαμπρή επίδοση, η αγορά βρίσκεται σε τέλμα λόγω των ελλειμμάτων του λειτουργού της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (ΛΑΓΗΕ) και μιας σειράς αρνητικών ρυθμίσεων που ελήφθησαν από τα μέσα του 2012 και μετά. Πέραν των σημαντικών μειώσεων στις εγγυημένες τιμές πώλησης της παραγόμενης ηλιακής ενέργειας (feed-in-tariffs, FiTs), η σημαντικότερη ρύθμιση που επηρεάζει τις μελλοντικές επενδύσεις είναι το πάγωμα της αδειοδοτικής διαδικασίας για νέα φωτοβολταϊκά που επιβλήθηκε τον Αύγουστο του 2012 δημιουργώντας προβλήματα συνέχειας στην αγορά.

Έτσι ουσιαστικά η αγορά καλείται να ξανάβρει εκ νέου το ρυθμό της, στη βάση πλέον νέων κανόνων που εν τω μεταξύ έχουν τεθεί. Οι νέοι αυτοί κανόνες προβλέπουν ιδιαίτερα χαμηλές τιμές πώλησης της παραγόμενης ενέργειας και ένα όριο (της τάξης των 250 MWp) στη νέα ετήσια ισχύ που μπορεί να εγκατασταθεί την περίοδο 2014-2020. Στόχος είναι το 2020 να είναι εγκατεστημένα περί τα 4.500 MWp φωτοβολταϊκών.

Με βάση το Ν.4254/2014, το επίπεδο συνολικής ισχύος φωτοβολταϊκών σταθμών που τίθενται σε δοκιμαστική λειτουργία ή ενεργοποιείται η σύνδεσή τους μετά την 1.1.2014 και η παραγόμενη ενέργεια των οποίων θα αποζημιώνεται με τις ισχύουσες κατά περίπτωση ταρίφες, ανέρχεται σε 200 MWp ανά έτος μέχρι και το έτος 2020. Εάν το σύνολο της ισχύος σταθμών που τίθενται σε δοκιμαστική λειτουργία ή ενεργοποιείται η σύνδεσή τους στο τέλος εκάστου έτους υπολείπεται των 200 MWp, η διαφορά προσαυξάνει το επίπεδο συνολικής ισχύος των 200 MWp του επόμενου έτους. Ειδικά το επίπεδο συνολικής ισχύος σταθμών που έχουν ενταχθεί στη διαδικασία αδειοδότησης fast track και η παραγόμενη ενέργεια των οποίων θα αποζημιώνεται με τις εκάστοτε ισχύουσες ταρίφες, ανέρχεται σε 300 MWp μέχρι και το έτος 2020.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία αγοράς φωτοβολταϊκών για το 2013 (σχήματα 1.2 και 1.3). Τα ποσοστά αυτά κατατάσσουν την Ελλάδα στην δεύτερη θέση διεθνώς σε ότι αφορά στη συμβολή των φωτοβολταϊκών στη συνολική κατανάλωση ενέργειας. Το 2013, η Ελλάδα βρέθηκε για τρίτη συνεχή χρονιά, στο top-10 της παγκόσμιας αγοράς σε ότι αφορά στη νέα ετήσια εγκατεστημένη ισχύ. Η επίδοση αυτή γίνεται ακόμη πιο εντυπωσιακή, όταν δει κανείς την κατά κεφαλή εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών, κατηγορία στην οποία η Ελλάδα καταλαμβάνει την 4η θέση διεθνώς. Η παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά το 2013 αποσόβησε την έκλυση περίπου 2,7 εκατ. τόνων διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα.

Σε ότι αφορά στη συνεισφορά των φωτοβολταϊκών στα δημόσια έσοδα, το 2013 στην Ελλάδα:

- Παρήχθη το 0,84% του ΑΕΠ (με το 40% να αφορά εγχώρια προστιθέμενη αξία)
- Εισπράχθηκε νέο ΦΠΑ τουλάχιστον 100 εκατ. € από νέες εγκαταστάσεις
- Δημιουργήθηκαν νέα φορολογικά έσοδα τουλάχιστον 100 εκατ. €

Την περίοδο 2008-2013, στην Ελλάδα επενδύθηκαν συνολικά περί τα 5 δις € στα φωτοβολταϊκά. Τέλος στα σχήμα 1.4 παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία των φωτοβολταϊκών στην διεθνή αγορά για το έτος 2013.

Στατιστικά στοιχεία αγοράς φωτοβολταϊκών για το 2013

Τελευταία ενημέρωση: 10-6-2014

A. Η ελληνική αγορά φωτοβολταϊκών

Διασυνδεδεμένα συστήματα	MWp
Νέα εγκατεστημένη ισχύς διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών το 2013	1.042,5
Συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών ως και το 2013	2.578,8

Διασυνδεδεμένα συστήματα ανά κατηγορία	Στέγες <10 kWp	<20 kWp	20-150 kWp	150 kWp-2 MWp	>2 MWp
Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (MWp)	372,7	65	917	843,2	380,9

Αριθμός φωτοβολταϊκών πάρκων	Αριθμός οικιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων	Συνολικός αριθμός φωτοβολταϊκών σταθμών
14.417	41.217	55.634

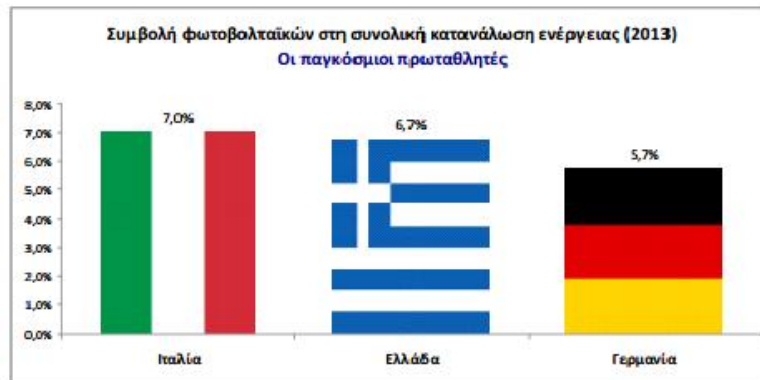
Συμβολή φωτοβολταϊκών στο ενεργειακό ισοζύγιο	
Ποσοστό επί της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το 2013	6,73%
Ποσοστό επί της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας το 2013	6,67%

Τα ποσοστά αυτά κατατάσσουν την Ελλάδα στη **δεύτερη θέση διεθνώς** σε ότι αφορά στη συμβολή των φωτοβολταϊκών στη συνολική κατανάλωση ενέργειας.

Το 2013, η Ελλάδα βρέθηκε για **τρίτη συνεχή χρονιά, στο top-10 της παγκόσμιας αγοράς** σε ότι αφορά στη νέα ετήσια εγκατεστημένη ισχύ.

Σχήμα 1.2: Στατιστικά στοιχεία ελληνικής αγοράς φωτοβολταϊκών έτους 2013

(Πηγή: http://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats_greece_2013_June14.pdf)

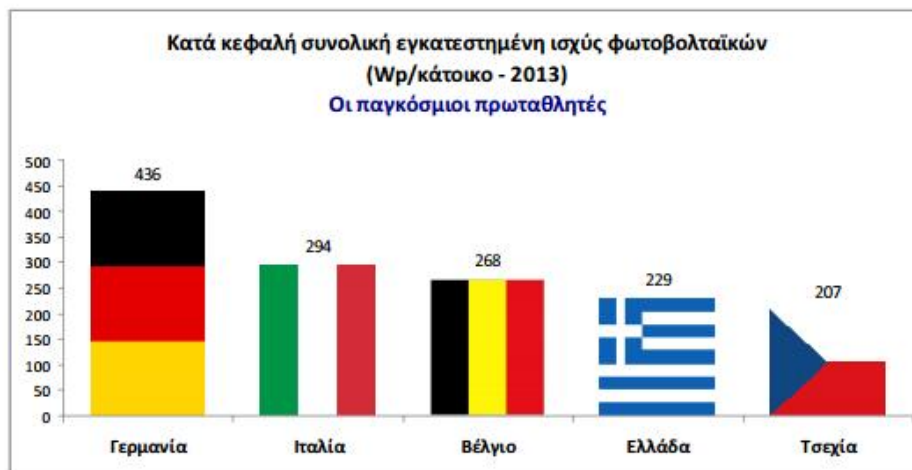


Πηγές: Fraunhofer ISE, ΣΕΦ, TERNA

Top-10	Χώρα	Νέα εγκατεστημένη ισχύς (GWp) το 2013
1	Κίνα	12,9
2	Ιαπωνία	6,9
3	ΗΠΑ	4,8
4	Γερμανία	3,3
5	Βρετανία	1,55
6	Ιταλία	1,45
7	Ινδία	1,1
8	Ρουμανία	1,1
9	Ελλάδα	1,04
10	Αυστραλία	0,8

Πηγές: EPIA, REN21

Κατά κεφαλή συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών
(Wp/κάτοικο - 2013)
Οι παγκόσμιοι πρωταθλητές



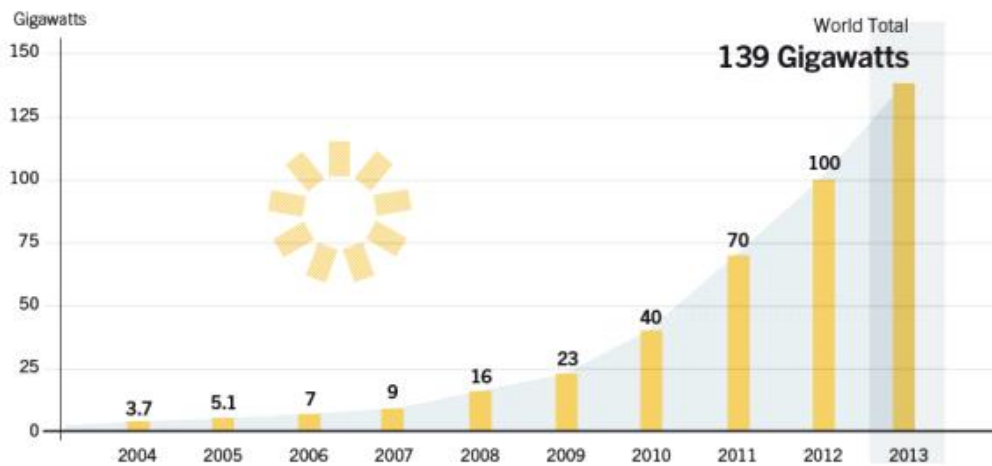
Πηγές: EPIA, REN21

Σχήμα 1.3: Στατιστικά στοιχεία ελληνικής αγοράς φωτοβολταϊκών έτους 2013 σε σύγκριση με άλλες χώρες

(Πηγή: http://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats_greece_2013_June14.pdf)

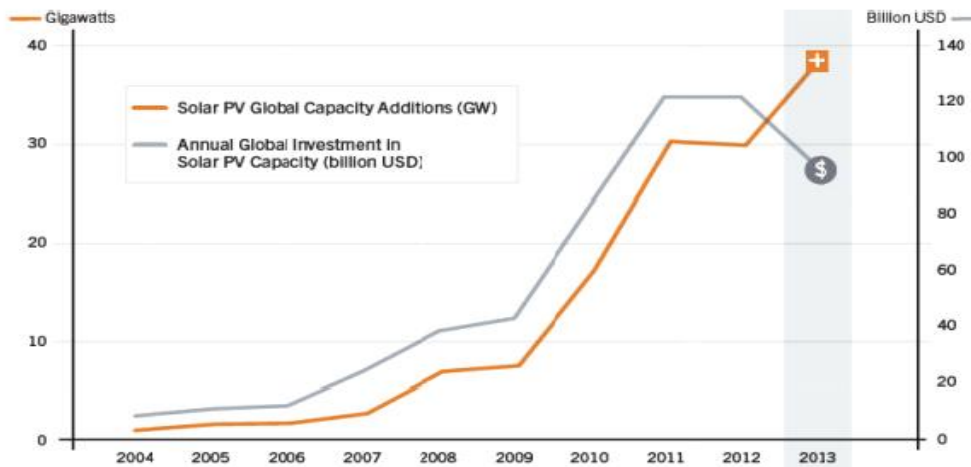
Β. Η διεθνής αγορά φωτοβολταϊκών το 2013

Συνολικά εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών παγκοσμίως



Πηγή: REN 21, Renewables 2014 Global Status Report

Παγκόσμια ετήσια εγκατεστημένη ισχύς και επενδύσεις σε φωτοβολταϊκά



Πηγή: REN 21, Renewables 2014 Global Status Report

32% αύξηση νέας εγκατεστημένης ισχύος το 2013 έναντι του 2012
22% μείωση επενδύσεων το 2013 έναντι του 2012 λόγω μείωσης κόστους φωτοβολταϊκού εξοπλισμού

Σε 2,27 εκατ. εργαζόμενους μεταφράζεται η άμεση και έμμεση απασχόληση που σχετίζεται με την αγορά φωτοβολταϊκών διεθνώς (35% του συνόλου των θέσεων εργασίας στις ΑΠΕ το 2013)

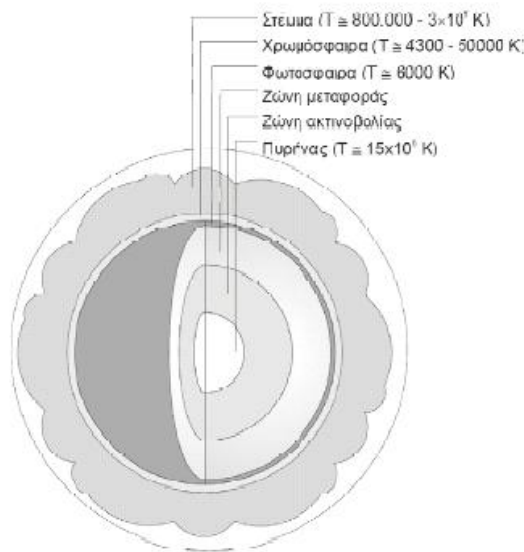
Σχήμα 1.4: Στατιστικά στοιχεία διεθνούς αγοράς φωτοβολταϊκών έτους 2013

(Πηγή: http://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats_greece_2013_June14.pdf)

Παραπομπές:[4]

2. Ηλιακή Ενέργεια

Ο Ήλιος είναι ένα τυπικό αστέρι, με μάζα 2×10^{30} kg, ακτίνα 700.000 km (109 φορές μεγαλύτερη της Γης), ηλικία 5×10^9 χρόνια και υπολογίζεται ότι έχει μπροστά του άλλα 5 περίπου δισεκατομμύρια χρόνια ζωής. Η επιφανειακή θερμοκρασία του είναι ~ 5.800 K, ενώ η εσωτερική περίπου $15.000.000$ K. Η υψηλή θερμοκρασία του ήλιου οφείλεται στις αυτοσυντηρούμενες πυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του, κατά τις οποίες το υδρογόνο μετατρέπεται σε ήλιο. Το έλλειμμα μάζας απ' αυτή τη διαδικασία μετατρέπεται σε ενέργεια, η οποία μεταφέρεται στην επιφάνειά του και στη συνέχεια διαχέεται στο διάστημα με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Εκτός από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ο ήλιος εκπέμπει και μια ασθενή σωματιδιακή ακτινοβολία που αποτελείται από φορτισμένα σωματίδια, κυρίως πρωτόνια και ηλεκτρόνια, και ονομάζεται ηλιακός άνεμος. Υπολογίζεται ότι για κάθε γραμμάριο υδρογόνου (H) που μετατρέπεται σε ήλιο (He) εκλύεται ενέργεια ίση με $U = 1,67 \times 10^5$ kWh. Η απόσταση γης-ήλιου μεταβάλλεται περιοδικά κατά τη διάρκεια του έτους, με μέση απόσταση $150.000.000$ km, την οποία για να διανύσει το φως με ταχύτητα ~ 300.000 km/s χρειάζεται 8,5 λεπτά.



Δεδομένης της διαμέτρου d και της φαινόμενης θερμοκρασίας του T , η ισχύς P που ακτινοβολείται από την επιφάνειά του μπορεί να εκτιμηθεί ότι είναι:

$$P = \pi d^2 \sigma T^4 = 3,8 \times 10^{23} \text{ kW}$$

Σχήμα 2.1: Σύσταση του Ήλιου

Παραπομπές:[8]

2.1 Ηλιακή Ακτινοβολία

Ο Ήλιος, αποτελεί μια αστείρευτη ενεργειακή πηγή του πλανήτη μας και παίζει καθοριστικό ρόλο για την ύπαρξη της ζωής στη Γη. Καθορίζει τη θερμοκρασία στην επιφάνειά της και παρέχει ουσιαστικά το σύνολο της ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία όλων των φυσικών συστημάτων. Με μία καλή προσέγγιση, ο ήλιος ενεργεί ως μία τέλεια πηγή ακτινοβολίας (μέλαν σώμα) σε μία θερμοκρασία επιφάνειας που έχει ήδη αναφερθεί. Η ροή ενέργειας που προσπίπτει κατά μέσο όρο πάνω σε μία μονάδα επιφάνειας κάθετη προς τη διεύθυνση της δέσμης έξω από την ατμόσφαιρα της Γης, είναι γνωστή ως ηλιακή σταθερά και ισούται με $S=1367 \text{ W/m}^2$. Γενικότερα, η ολική ισχύς από μία πηγή ακτινοβολίας που πέφτει πάνω στη μονάδα επιφάνειας, ονομάζεται ένταση ακτινοβολίας [1,4]. Αυτό το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας όμως δεν φτάνει ολόκληρο στο έδαφος. Κατά τη διέλευση των ηλιακών ακτίνων από την ατμόσφαιρα της Γης η ένταση τους ελαττώνεται, αφού τα φωτόνια σκεδάζονται στα μόρια της ατμόσφαιρας, στα πολύ μικρής διαμέτρου d σωματίδια και στα μεγαλύτερης διαμέτρου αιωρήματά της, όπως οι υδρατμοί, η σκόνη και ο καπνός. Ταυτόχρονα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από διάφορα συστατικά της ατμόσφαιρας. Για παράδειγμα, στην περιοχή της υπέρυθρης ακτινοβολία αυτή η απορρόφηση γίνεται από τους υδρατμούς και το διοξείδιο του άνθρακα, στο ορατό φάσμα από το οξυγόνο, ενώ η υπεριώδης ακτινοβολία απορροφάται από τα μόρια του όζοντος στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας.

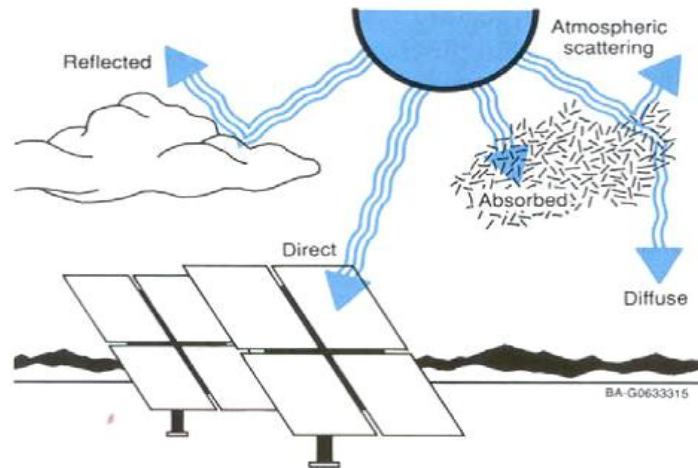
Έτσι, στην επιφάνεια της γης, φτάνουν δύο συνιστώσες του ηλιακού φωτός: α) η απευθείας ή άμεση B (Beam) και β) η σκεδαζόμενη στα μόρια του αέρα, η οποία ονομάζεται διάχυτη D (Diffuse). Η διάχυτη ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια, προέρχεται από όλο τον ουράνιο θόλο (πάνω από το φυσικό ορίζοντα). Παρόλα αυτά, η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ένα συλλέκτη περιλαμβάνει και μια τρίτη συνιστώσα. Αποτελείται λοιπόν από την i) απευθείας, ii) τη διάχυτη και iii) την ανακλώμενη (Albedo) από το έδαφος ακτινοβολία. Η συνολική αυτή ακτινοβολία περιγράφεται ως ολική ακτινοβολία και συμβολίζεται με το γράμμα G (Global Irradiation). Η ακτινοβολία λόγω ανάκλασης εξαρτάται όπως είναι φυσικό από τη μορφολογία, το χρώμα του εδάφους και την πυκνότητα των νεφών, ενώ η ολική (απευθείας και διάχυτη), εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τους επόμενους παράγοντες:

- τη σύσταση - κατάσταση της ατμόσφαιρας, τη δεδομένη χρονική στιγμή (π.χ. υγρασία ή ατμοσφαιρικά αιωρήματα)
- την ημέρα κατά τη διάρκεια του έτους
- τη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων στην επιφάνεια του συλλέκτη (ύψος του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας)

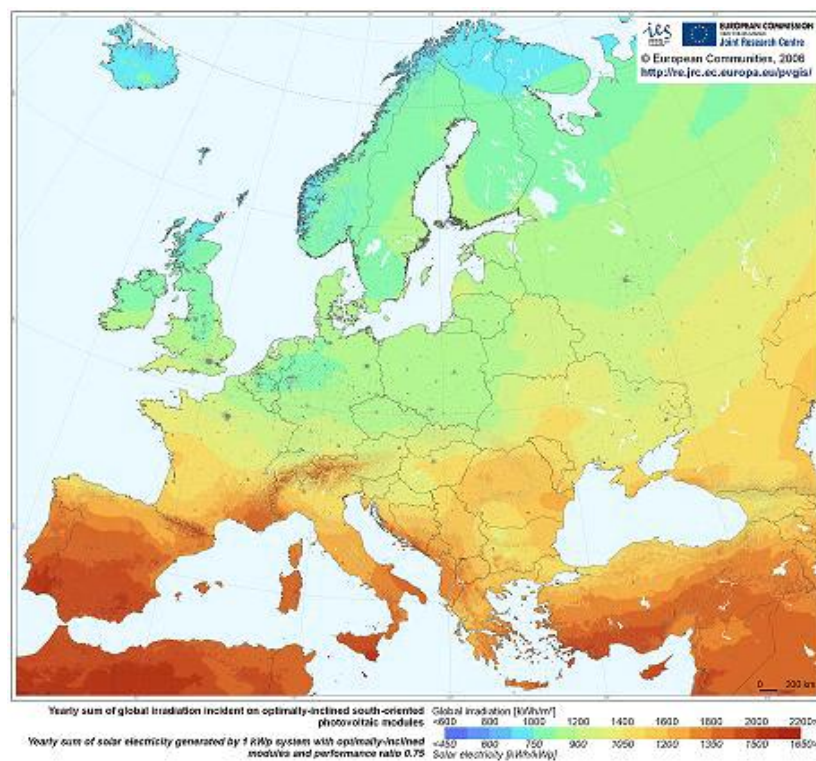
Κατά την ανατολή του ήλιου, η ζενίθια γωνία του (δηλαδή η γωνιακή απόκλιση του ήλιου από την κατακόρυφη του τόπου) είναι $\theta_z=90^\circ$ συνεπώς η ολική πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας G καθορίζεται κυρίως από τη διάχυτη συνιστώσα, D . Καθώς το ύψος του ήλιου αυξάνει η άμεση ακτινοβολία μεγαλώνει, μέσα σε μια αίθρια ημέρα, μέχρι το ηλιακό μεσημέρι μετά το οποίο ελαττώνεται περίπου κατά συμμετρικό τρόπο.

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στη Γη, κατανέμεται ανομοιόμορφα στις διάφορες περιοχές. Οι περιοχές κοντά στον Ισημερινό λαμβάνουν περισσότερη ακτινοβολία από τις υπόλοιπες. Η ηλιακή ακτινοβολία διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τις εποχές και εξαρτάται από την ώρα της ημέρας, το κλίμα (τα σύννεφα σκεδάζουν σε σημαντικό βαθμό τις ακτίνες του ήλιου) και την ατμοσφαιρική ρύπανση. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν αποφασιστικά το ποσό της

ηλιακής ενέργειας που διατίθεται και προσπίπτει στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία (kW/m^2) αθροίζεται στη διάρκεια ενός έτους, προκύπτει η ετήσια ηλιακή ενέργεια (συνήθως σε kWh/m^2). Η τιμή αυτή παρουσιάζει σημαντικές διαφορές ανάλογα με την τοποθεσία, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3 που ακολουθεί.



Σχήμα 2.2 : Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας

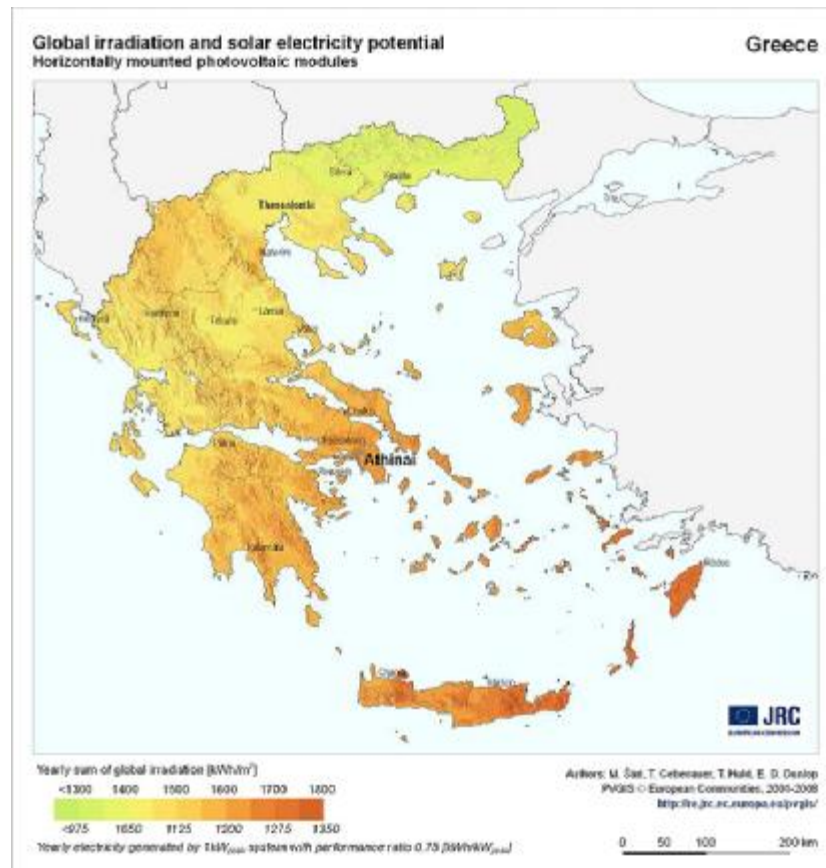


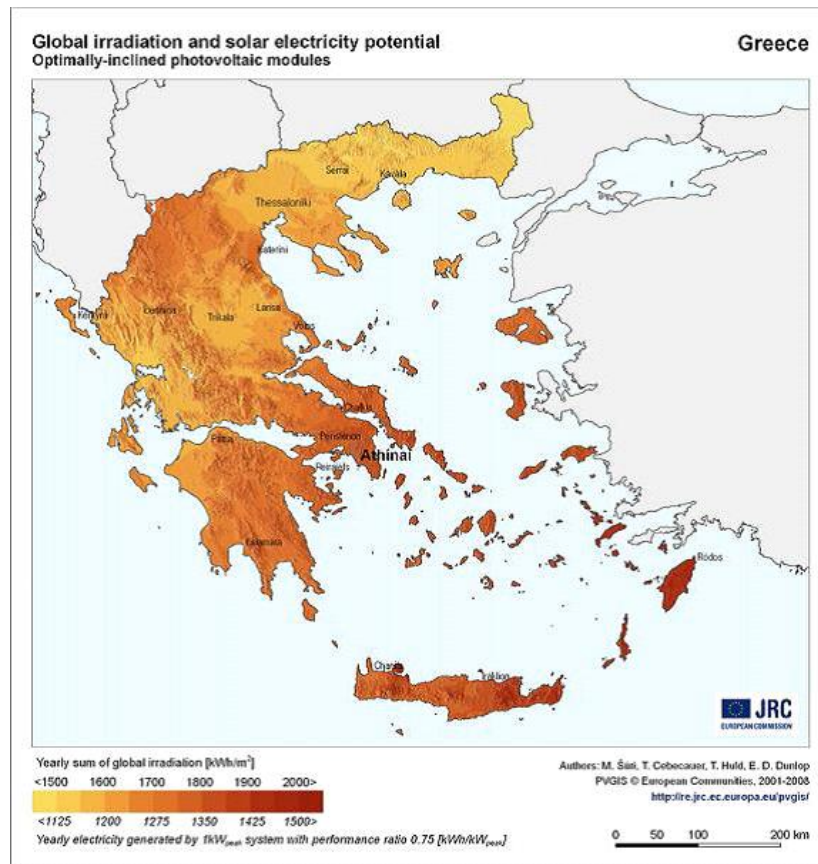
Σχήμα 2.3 : Χάρτης ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στην Ευρώπη

(Πηγή: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>)

Η Ελλάδα συγκαταλέγεται μεταξύ των χωρών υψηλής ακτινοβολίας. Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα στην εφαρμογή των φωτοβολταϊκών συστημάτων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Από το Κέντρο Ερευνών της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν γίνει μελέτες για τη χώρα μας, οι οποίες παρουσιάζονται στους χάρτες του σχήματος 2.3. Οι χάρτες αυτοί απεικονίζουν την ετήσια ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας (kWh/m^2) που προέρχεται από την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας, άμεσης και διάχυτης, σε συλλέκτες που βρίσκονται στην επιφάνεια της Γης σε οριζόντια θέση και υπό τη βέλτιστη γωνία κλίσης και αφορούν μετρήσεις που έγιναν την περίοδο 1981-1990. Όπως θα δούμε παρακάτω η ακτινοβολία στην περίπτωση της οριζόντιας κλίσης κυμαίνεται από $1300\text{-}1800 \text{ W}/\text{m}^2$ και από $1500\text{-}1950 \text{ W}/\text{m}^2$ για βέλτιστη κλίση αντίστοιχα, ποσότητες αρκετά μεγαλύτερες από πολλές Ευρωπαϊκές χώρες.

Το ποσό της ενέργειας που παράγει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, δεν εξαρτάται μόνο από την διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, αλλά επηρεάζεται σημαντικά και από την ικανότητα των ηλιακών πλαισίων να την μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια. Για το λόγο αυτό, οι επιστήμονες εντείνουν συνεχώς τις προσπάθειές τους, ώστε να πετύχουν βελτίωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων και να γίνουν περισσότερο ανταγωνιστικά σε σχέση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας.





Σχήμα 2.4 : Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία (kWh/m²) που προσπίπτει σε φωτοβολταϊκούς συλλέκτες σε οριζόντια θέση και σε συλλέκτες υπό τη βέλτιστη γωνία κλίσης

(Πηγή: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>)

Παραπομπές: [1], [5], [6], [7]

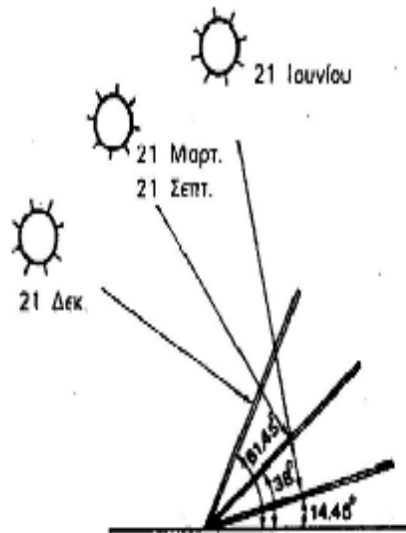
2.2 Ηλιακή Γεωμετρία

Η αιτία της ύπαρξης των εποχών του έτους είναι ότι ο άξονας περιστροφής της Γης γύρω από τον εαυτό της δεν είναι κάθετος στο επίπεδο περιφοράς της γύρω από τον Ήλιο, αλλά σχηματίζει μία γωνία περίπου 23,45ο ενώ ταυτόχρονα ο άξονας κρατά την ίδια διεύθυνση στον χώρο.

Αυτή λοιπόν η γωνία που σχηματίζει ο κύκλος της πορείας του ηλίου σε σχέση με εκείνο που εκτελεί κατά την ισημερία ονομάζεται απόκλιση του ήλιου δ και μεταβάλλεται από $-23,45^\circ$ (χειμερινό ηλιοστάσιο-μικρότερη μέρα) μέχρι $+23,45^\circ$ (θερινό ηλιοστάσιο-μεγαλύτερη μέρα). Η ηλιακή απόκλιση για μια μέρα D του έτους υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(\frac{D + 284}{365} \cdot 360\right)$$

Στις συνηθισμένες περιπτώσεις, οι συλλέκτες τοποθετούνται σε σταθερή κλίση και αζιμούθια γωνία, που επιλέγονται ώστε η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας να είναι όσο το δυνατόν κοντά στο 0 (κάθετη πρόσπτωση). Στο βόρειο ημισφαίριο, η βέλτιστη κλίση τοποθέτησης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους, είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου και η αζιμούθια γωνία είναι 0° ως προς το νότο. Λόγω όμως της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου στη διάρκεια του έτους η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη αλλάζει κάθε εποχή. Όταν το φωτοβολταϊκό σύστημα, επιδιώκεται να παράγει όσο το δυνατό περισσότερη ενέργεια στη διάρκεια του καλοκαιριού, η κλίση του συλλέκτη επιλέγεται περίπου 10°-15° μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, ενώ για το χειμώνα η κλίση επιλέγεται περίπου 10°-15° μεγαλύτερη. Σημειώνουμε ότι η βέλτιστη κλίση για την οποία επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση για ένα Φ/Β σύστημα είναι συγκεκριμένη κατά το χειμερινό και θερινό ηλιοστάσιο καθώς και στις ισημερίες.



Σχήμα 2.5: Η βέλτιστη κλίση ενός ηλιακού συλλέκτη στις χαρακτηριστικές μέρες του έτους, σε μια τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος 38°. Τα ύψη του ήλιου αφορούν τα αντίστοιχα ηλιακά μεσημέρια.

Παραπομπές: [5], [10]

3. Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την βοήθεια ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ειδικά των φωτοβολταϊκών συστημάτων αποκτά ολοένα και περισσότερους υποστηρικτές στην εποχή μας. Τα πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι πολλά, μερικά από τα οποία είναι τα εξής:

- Λειτουργούν αθόρυβα, καθαρά και χωρίς κατάλοιπα, αποφεύγοντας τη μόλυνση του περιβάλλοντος.
- Λειτουργούν χωρίς καύσιμα και δεν χρησιμοποιούν υγρά ή αέρια, όπως τα θερμικά συστήματα.
- Μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς κινητά μέρη, συνεπώς απαιτούν και ελάχιστη συντήρηση
- Έχουν μηδενικό κόστος λειτουργίας, αφού χρησιμοποιούν το φως του ήλιου για να παράγουν ηλεκτρισμό.
- Έχουν αρκετά μεγάλη διάρκεια ζωής (περίπου 25-30 χρόνια)
- Λειτουργούν και κάτω από συνθήκες συννεφιασμένης ατμόσφαιρας λόγω της διάχυτης ακτινοβολίας (ειδικά την χειμερινή περίοδο).
- Έχουν γρήγορη απόκριση σε ξαφνικές μεταβολές της ηλιοφάνειας.
- Λειτουργούν αποδοτικά και σε χαμηλές θερμοκρασίες (για την ακρίβεια πιο αποδοτικά απ' ό,τι σε υψηλές).
- Μπορούν να κατασκευαστούν από πυρίτιο, ένα από τα πιο άφθονα στοιχεία στην Γη.
- Είναι κατάλληλα για επιτόπιες εφαρμογές, όπου δεν υπάρχει ή δεν συμφέρει οικονομικά η επέκταση του ηλεκτρικού δικτύου.
- Έχουν σχετικά μεγάλο λόγο ισχύος/βάρους, άρα είναι κατάλληλα και για εγκατάσταση σε στέγες.
- Είναι ευέλικτες εφαρμογές που μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επί τόπου πληθυσμού, καταργώντας την ανάγκη για τεράστιες μονάδες παραγωγής ενέργειας, αφού έχουν μεγάλες δυνατότητες σε μια ευρεία περιοχή τιμών (mW – MW).
- Αν ένα κομμάτι του συστήματος υποστεί βλάβη, τότε το σύστημα συνεχίζει την λειτουργία του μέχρι την αντικατάσταση εκείνου του μέρους.
- Υπάρχει η δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης ανάλογα με τις ανάγκες μας, αλλά και συνδυασμός με άλλου είδους συστήματα Α.Π.Ε. όπως με αιολικά (υβριδικό σύστημα).
- Δυνατότητα μαζικής παραγωγής φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Απ' την άλλη μεριά όμως, όπως όλοι ξέρουμε τα φωτοβολταϊκά συστήματα ακόμα και στις μέρες μας δεν παίζουν τόσο καθοριστικό ρόλο στην συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει γιατί παρόλα τα πλεονεκτήματα που αναφέραμε παραπάνω τα φωτοβολταϊκά παρουσιάζουν και αρκετά μειονεκτήματα, μερικά από τα οποία είναι τα εξής:

- Υψηλό κόστος των φωτοβολταϊκών πλαισίων.
- Έχουν αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 20% ή και χαμηλότερο. Συνεπώς απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια γης. Γι' αυτό το λόγο μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται σαν συμπληρωματικές πηγές ενέργειας.

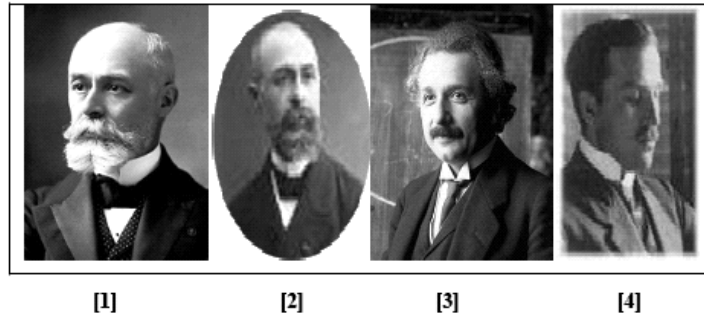
- Δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν (προς το παρόν) για την κάλυψη των αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων εξαιτίας του λόγου που αναφέραμε παραπάνω.
- Η παροχή και απόδοση της ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται.
- Η αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία απαιτείται για τις περισσότερες εφαρμογές λόγω της αστάθειας και της μεγάλης διακύμανσης της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, είναι δαπανηρή.

Παραπομπές:[11]

3.1 Ιστορική Αναδρομή

Η φωτοβολταϊκή επιστήμη πολλοί πιστεύουν ότι είναι ένα τεχνολογικό επίτευγμα των τελευταίων ετών. Η πραγματικότητα είναι ότι η επιστήμη αυτή, έχει γεννηθεί δεκαετίες πριν. Το πρώτο βήμα το έκανε ο 19χρονος Edmund Becquerel το 1839 όταν ανακαλύπτει αυτό που ονομάζουμε εμείς ‘φωτοβολταϊκό φαινόμενο’. Ο Becquerel [1] καθώς πειραματιζόταν με ένα ηλεκτρολυτικό στοιχείο το οποίο αποτελούταν από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια σε αγωγίμο υγρό, παρατήρησε ότι με την έκθεση της διάταξης αυτής στον ήλιο η ροή αυξανόταν. Έτσι λοιπόν το αναπτύχθηκε η πρώτη σκέψη γύρω από τη επιστήμη αυτή, χωρίς όμως να υπάρχει πρακτική εφαρμογή. Μερικά χρόνια αργότερα (1883) ο Charles Fritz [2] παράγει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο με απόδοση 1-2%. Το 1904 ο Albert Einstein [3] είναι ο πρώτος που γράφει την πλησιέστερη θεωρία γύρω από το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Για το επίτευγμα αυτό τιμήθηκε το 1921 με το βραβείο Nobel. Δεκατέσσερα χρόνια αργότερα ο Jan Czochralski κατασκευάζει το πρώτο στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Το 1931 πραγματοποιήθηκαν έρευνες πάνω στο κάδμιο σελήνιο στο οποίο παρατηρείται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Το CdS αποτελεί πολύ σημαντικό υλικό παραγωγής φωτοβολταϊκών panel. Στα επόμενα χρόνια (1954) ανακαλύπτεται ότι το πυρίτιο μαζί με συγκεκριμένα ρυπαρότητες είναι πολύ ευαίσθητο στο φως. Το αποτέλεσμα είναι τα πρώτα πρακτικά φωτοβολταϊκά στοιχεία με απόδοση 6%. Τέσσερα χρόνια αργότερα κατασκευάζεται φωτοβολταϊκό στοιχείο με απόδοση 9%. Στις 17 Μαρτίου του 1958 εκτοξεύεται το Vanguard I, ο πρώτος δορυφόρος τροφοδοτούμενος από φωτοβολταϊκά, ο οποίος θα δουλέψει για οκτώ συναπτά έτη. Εν συνεχεία έχουμε ακόμα τρεις δορυφόρους να εκτοξεύονται, με την ίδια τεχνολογία, τον Explorer III (Αμερική), τον Vanguard II (Αμερική) και τον Sputnik III (Ρωσία). Το ίδιο έτος κατασκευάζεται ο πρώτος τηλεφωνικός αναμεταδότης τροφοδοτούμενος από φωτοβολταϊκά στοιχεία. Μέσα στα επόμενα δύο χρόνια (1958-1960) η απόδοση των φωτοβολταϊκών φτάνει το 14%. Έτσι λοιπόν το 1960 η Ιαπωνική κυβέρνηση εγκαθιστά φωτοβολταϊκά σε φάρους η οποία ήταν και η μεγαλύτερη φωτοβολταϊκή διάταξη της εποχής. Μέσα στην επόμενη δεκαετία οι εφαρμογές φωτοβολταϊκών στοιχείων γίνονται όλο και πιο έντονες. Έτσι λοιπόν το 1972 οι Γάλλοι εγκαθιστούν φωτοβολταϊκά (CdS) σε σχολείο, το 1976 ξεκινούν οι πρώτες εφαρμογές φωτοβολταϊκών για τροφοδοσία ψυγείων, τηλεπικοινωνιακού και ιατρικού εξοπλισμού, άντλησης νερού και φωτισμού. Αποτέλεσμα αυτής της συνεχώς και αυξανόμενης χρήσης των φωτοβολταϊκών είναι η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών να ξεπεράσει έως το 1999 τα 1000MW κ τρία χρόνια αργότερα

διπλασιάζεται. Μια από τις πιο σημαντικές εφαρμογές φωτοβολταϊκών είναι η συμπληρωματική παραγωγή ενέργειας. Στην Βόρεια Αμερική πολλές εταιρείες παραγωγής ενέργειας (αντίστοιχες ΔΕΗ) υποστηρίζουν τα φορτία του κλιματισμού τους θερινούς μήνες με φωτοβολταϊκά συστήματα.



Σχήμα 3.1: Προσωπικότητες της φωτοβολταϊκής επιστήμης

Παραπομπές:[12]

3.2 Αρχή λειτουργίας Φ/Β Συστημάτων – Θεωρία ημιαγωγών

Όπως γνωρίζουμε η ύλη αποτελείται από πολύ μικρά σωματίδια τα οποία δε μπορούν να διαιρεθούν άλλο με χημικά μέσα (χημικές αντιδράσεις). Τα σωματίδια αυτά ονομάζονται άτομα. Η ύλη λοιπόν, αποτελείται από άτομα που διαφέρουν μεταξύ τους κατά σχήμα και κατά μέγεθος. Ο σχηματισμός των υλικών σωμάτων οφείλεται στις ενώσεις ατόμων με άλλα άτομα. Κάθε άτομο αποτελείται από μια περιοχή, που είναι στο κέντρο του, στην οποία, είναι συγκεντρωμένο όλο το θετικό φορτίο, καθώς και σχεδόν όλη η μάζα του ατόμου. Η περιοχή αυτή ονομάζεται πυρήνας. Ο πυρήνας περιέχει τα στοιχειώδη σωματίδια, πρωτόνιο και νετρόνιο. Το πρωτόνιο έχει θετικό φορτίο ενώ το νετρόνιο είναι ηλεκτρικά ουδέτερο. Γύρω από το πρωτόνιο υπάρχει μια άλλη περιοχή, ο σφαιρικός φλοιός, μέσα στον οποίο κινούνται τα ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια, σε αντίθεση με τα πρωτόνια, έχουν αρνητικό φορτίο. Στο σφαιρικό φλοιό τα ηλεκτρόνια περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα σε τροχιές που ονομάζονται στιβάδες, οι οποίες έχουν διαφορετική απόσταση από το πυρήνα. Η πιο απομακρυσμένη στιβάδα, από το πυρήνα, ονομάζεται εξωτερική στιβάδα ή στιβάδα σθένους. Η εξωτερική στιβάδα μπορεί να έχει μέχρι 8 ηλεκτρόνια και είναι χαρακτηριστική για τις ιδιότητες που εμφανίζει ένα άτομο. Για να έχει ένα άτομο, σταθερή δομή, θα πρέπει στην εξωτερική στιβάδα να έχει 2 ή 8 ηλεκτρόνια.

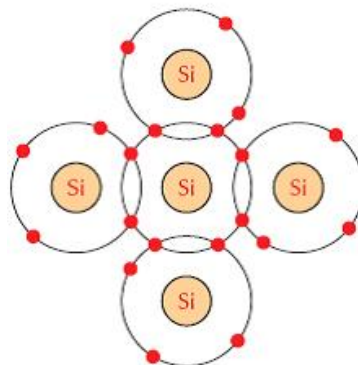
Από το νόμο του Coulomb γνωρίζουμε ότι τα ετερόνυμα φορτία έλκονται ενώ τα ομόνυμα απωθούνται. Επομένως ο θετικός πυρήνας ασκεί ελκτική δύναμη στα ηλεκτρόνια, του ηλεκτρονικού νέφους. Τα ηλεκτρόνια της στιβάδας που απέχουν περισσότερο από το πυρήνα δέχονται τις ασθενέστερες δυνάμεις και ονομάζονται εξωτερικά ηλεκτρόνια. Ανάλογα με το υλικό π.χ. στα μέταλλα είναι δυνατό σε γειτονικά άτομα ,ο θετικός πυρήνας, να πλησιάσει τόσο πολύ, ώστε στα εξωτερικά ηλεκτρόνια να ασκούνται ισχυρές δυνάμεις που τα αποσπών από τα άτομα τους και

μετατρέπονται σε πραγματικά ελεύθερα ηλεκτρόνια. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται τυχαία και ακανόνιστα προς όλες τις διευθύνσεις. Αν στα άκρα τους (μέταλλα) συνδέσουμε μια μπαταρία, τότε τα ηλεκτρόνια θα έλκονται από το θετικό πόλο και θα απωθούνται από το αρνητικό πόλο της. Αυτό έχει σαν συνέπεια τα ηλεκτρόνια να κινούνται προς μια κατεύθυνση. Αυτή η προσανατολισμένη κίνηση των φορτισμένων σωματιδίων (ηλεκτρόνια) ονομάζεται ηλεκτρικό ρεύμα.

3.2.1 Δομή των ημιαγωγών

Υπάρχουν υλικά που τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι ελάχιστα όπως το πλαστικό ή το ξύλο. Αντίθετα τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι πάρα πολλά στα μέταλλα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, τα υλικά, να έχουν διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Τα υλικά με βάση τις ηλεκτρικές ιδιότητες που εμφανίζουν, χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: αγωγούς, μονωτές και ημιαγωγούς. Οι αγωγοί έχουν μικρή ειδική αντίσταση 10-8 Ωm και άρα επιτρέπουν τη διέλευση του ρεύματος. Οι μονωτές έχουν μεγάλη ειδική αντίσταση 10+11 Ωm και άρα εμποδίζουν τη διέλευση του ρεύματος. Οι ημιαγωγοί συμπεριφέρονται μερικές φορές σαν μονωτές και μερικές φορές σαν αγωγοί, ανάλογα με τις συνθήκες, π.χ. η θερμοκρασία.

Οι ημιαγωγοί όπως το γερμάνιο και το πυρίτιο έχουν τέσσερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική στιβάδα. Αυτό δίνει τη δυνατότητα σε κάθε ένα ηλεκτρόνιο της στιβάδας σθένους να σχηματίσει ομοιοπολικό δεσμό με ένα άλλο ηλεκτρόνιο σθένους ενός γειτονικού ατόμου, σχηματίζοντας τέσσερις ομοιοπολικούς δεσμούς. Με αυτό τον τρόπο η εξωτερική στιβάδα αποκτάει οκτώ ηλεκτρόνια και άρα το άτομο έχει σταθερή δομή. Εξαιτίας των σταθερών δεσμών σχηματίζονται κρύσταλλοι όπου όλα τα άτομα βρίσκονται σε συγκεκριμένες θέσεις. Στην παραπάνω περίπτωση, τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στιβάδας δεν μπορούν να απομακρυνθούν και άρα δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια μέσα στο υλικό. Έτσι δεν είναι δυνατή η διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος και επομένως το υλικό συμπεριφέρεται σαν μονωτής. Όμως η συμπεριφορά του πυριτίου εξαρτάται ισχυρά από τη θερμοκρασία. Στη θερμοκρασία δωματίου κάποια ηλεκτρόνια σθένους απελευθερώνονται και μπορούν να κινηθούν ελεύθερα μέχρι να συναντηθούν με κάποιο άτομο που τους λείπει ένα ηλεκτρόνιο. Η απελευθέρωση ενός ηλεκτρονίου σθένους από ένα άτομο ερμηνεύεται από τη θεωρία των ενεργειακών ζωνών.



Σχήμα 3.2: Σταθερή δομή στο ημιαγωγό πυρίτιο εξαιτίας των τεσσάρων ομοιοπολικών δεσμών

Μέχρι στιγμής έχουμε αναφερθεί στα ηλεκτρόνια σθένους, που βρίσκονται στην στιβάδα σθένους και σχηματίζουν τους δεσμούς αλλά και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια,

που μπορούν εύκολα να αποσπαστούν, όταν έχουν την κατάλληλη ενέργεια. Όμως υπάρχουν και τα ηλεκτρόνια που υπάρχουν στις εσωτερικές στιβάδες και ουσιαστικά είναι «ανεργά». Αν κάνουμε ένα διάγραμμα ενεργείας όλων των ηλεκτρονίων θα έχουμε τις παρακάτω ενεργειακές ζώνες:

- Τις εσωτερικές ενεργειακές ζώνες που αντιστοιχούν στην ενέργεια των ηλεκτρονίων στις εσωτερικές στιβάδες.
- Ζώνη σθένους που αντιστοιχεί στην ενέργεια των ηλεκτρονίων σθένους.
- Ζώνη αγωγιμότητας που αντιστοιχεί στην ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων.
- Απαγορευμένη ζώνη ή ενεργειακό χάσμα, που είναι η διαφορά ενέργειας μεταξύ της ζώνης αγωγιμότητας και της ζώνης σθένους.

Παρατηρούμε ότι στους μονωτές το απαγορευμένο χάσμα έχει μεγάλη ενέργεια με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια. Στους ημιαγωγούς η ενέργεια τους χάσματος του είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα να υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια υπό προϋποθέσεις, ενώ στους αγωγούς δεν υπάρχει ενεργειακό χάσμα και υπάρχει περίσσια από ελεύθερα ηλεκτρόνια. Ουσιαστικά το ενεργειακό χάσμα εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για την μετατροπή ενός ηλεκτρονίου σθένους σε ελεύθερο ηλεκτρόνιο. Όταν στα ηλεκτρόνια ενός ατόμου, προσφερθεί ενέργεια από μια ακτινοβολούμενη δέσμη (φωτόνια), η ενέργεια των φωτονίων θα είναι:

$$E=hn$$

Όπου n είναι η συχνότητα των φωτονίων και h η σταθερά του Planck.

Αν το ενεργειακό χάσμα E_g είναι μεγαλύτερο από την ενέργεια των φωτονίων ($E_g > hn$), τότε τα ηλεκτρόνια σθένους παραμένουν στα άτομα. Αν όμως, είναι μικρότερο ($E_g < hn$) τότε τα ηλεκτρόνια σθένους μετατρέπονται σε ελεύθερα ηλεκτρόνια. Η περίσσια ενέργειας μεταφέρεται στα ηλεκτρόνια ως κινητική ενέργεια E_k ,

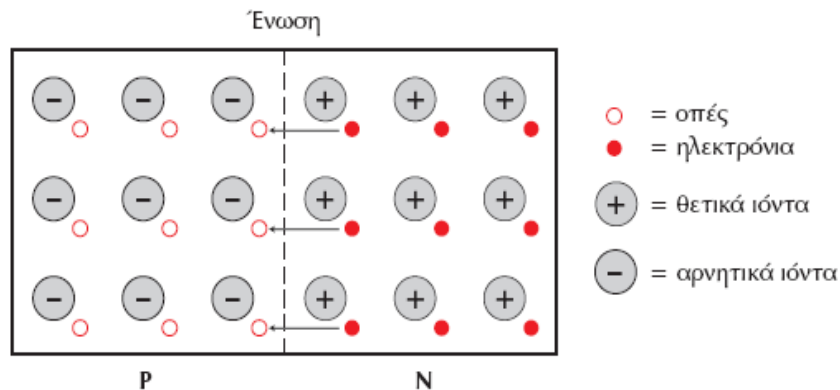
$$E_k = hn - E_g$$

3.2.2 Επαφή PN

Όταν ένα άτομο χάσει ένα ηλεκτρόνιο, με τον τρόπο που περιγράψαμε προηγουμένως, παύει να είναι ηλεκτρικά ουδέτερο και αποκτάει θετικό φορτίο. Όμως, υπάρχει η πιθανότητα, ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο από γειτονικό άτομο να καλύψει τη θέση του ηλεκτρονίου που έφυγε πριν. Έτσι το γειτονικό άτομο αποκτάει με τη σειρά του θετικό φορτίο. Με αυτό το τρόπο είναι σαν να μετακινείται το θετικό φορτίο, όπως τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Αυτό το ελεύθερο κινούμενο θετικό φορτίο, ονομάζεται οπή.

Στους ημιαγωγούς οι συγκεντρώσεις (αριθμός φορτίων ανά κυβικό εκατοστό) των ελεύθερων ηλεκτρονίων και των οπών είναι ίσες. Υπάρχει η δυνατότητα σε ένα ημιαγωγό να βάλουμε μια μικρή ποσότητα ενός στοιχείου που έχει τρία ή πέντε ηλεκτρόνια στην εξωτερική στιβάδα. Έτσι, ο ημιαγωγός έχει στο εσωτερικό του άτομα προσμίξεων. Στην περίπτωση που το άτομο της πρόσμιξης έχει τρία ηλεκτρόνια, τότε η συγκέντρωση των οπών είναι μεγαλύτερη από τη συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Σε αυτή τη περίπτωση, λέμε ότι έχουμε ημιαγωγό τύπου P. Για να σχηματιστούν ημιαγωγοί τύπου P οι προσμίξεις έχουν 3 ηλεκτρόνια στη

στιβάδα σθένους, όπως το βόριο, γάλλιο και ίνδιο. Αν το άτομο της πρόσμιξης έχει πέντε ηλεκτρόνια η συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι μεγαλύτερη από τη συγκέντρωση των οπών και λέμε ότι ο ημιαγωγός είναι τύπου N.



Σχήμα 3.3.1: Η επαφή PN

Η επαφή PN σχηματίζεται, όταν ένα μικρό κομματάκι ημιαγωγού τύπου N, έλθει σε επαφή με ένα κομμάτι τύπου P. Όπως έχουμε αναφέρει, στο τμήμα N του ημιαγωγού υπάρχουν περισσότερα ελεύθερα ηλεκτρόνια από τις οπές, ενώ στο τμήμα P του ημιαγωγού συμβαίνει το αντίθετο. Όταν γίνει η ένωση των δυο ημιαγωγών τα εξωτερικά ηλεκτρόνια που βρίσκονται κοντά στην ένωση θα ενωθούν με τις γειτονικές οπές με αποτέλεσμα η περιοχή κοντά να είναι απογυμνωμένη από ηλεκτρόνια και οπές. Στην περιοχή αυτή υπάρχουν μόνο αρνητικά και θετικά ιόντα. Τα θετικά ιόντα είναι στην περιοχή P ενώ τα αρνητικά ιόντα είναι στη περιοχή N. Η περιοχή αυτή του ημιαγωγού, η οποία δεν έχει καθόλου εξωτερικά ηλεκτρόνια ή οπές ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης. Τα θετικά και αρνητικά ιόντα που αποτελούν την περιοχή απογύμνωσης, δημιουργούν ένα δυναμικό φραγμού που εμποδίζει τα εξωτερικά ηλεκτρόνια και τις οπές να το υπερπηδήσουν, αν δεν έχουν τη κατάλληλη ενέργεια, μέσω κάποιας εξωτερικής τάσης.

Παραπομπές: [13], [14], [15], [16]

3.2.3 Ρεύμα διάχυσης και ανάστροφο ρεύμα

Όταν συμβαίνει η κίνηση των οπών προς την περιοχή N και η κίνηση των ηλεκτρονίων προς την περιοχή P λέμε ότι έχουμε ρεύμα διαχύσεως I_f . Βέβαια μέσα στην επαφή PN είναι δυνατό να αναπτυχθούν οπές και ηλεκτρόνια εξαιτίας της θερμικής διάσπασης των ατόμων. Οι φορείς αυτοί όταν βρίσκονται στην περιοχή απογύμνωσης κινούνται με την επίδραση του δυναμικού φραγμού, έτσι ώστε οι οπές να κινούνται προς την περιοχή P και τα ηλεκτρόνια προς την περιοχή N. Το ρεύμα έχει αντίθετη φορά από το ρεύμα διαχύσεως και ονομάζεται ανάστροφο ρεύμα I_o .

Στην περίπτωση που βάλουμε μια εξωτερική τάση, ώστε η επαφή P να είναι συνδεδεμένη με το θετικό πόλο της πηγής και η επαφή N με το αρνητικό πόλο της πηγής, λέμε ότι έχουμε πόλωση κατά την ορθή φορά. Οι οπές απωθούνται από το

θετικό πόλο της πηγής και τα ηλεκτρόνια από το αρνητικό πόλο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αυξάνουν οι οπές στην περιοχή και τα ηλεκτρόνια στην περιοχή N και να στενέψει η περιοχή απογύμνωσης. Το ρεύμα που κυκλοφορεί στον ημιαγωγό θα είναι:

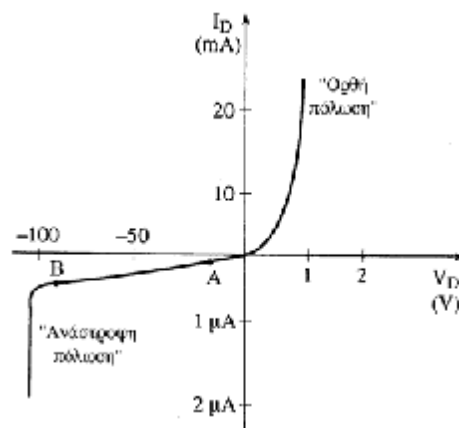
$$I_d = I_f - I_o$$

Στην περίπτωση που η επαφή P συνδέεται με τον αρνητικό πόλο της πηγής έχουμε αναστροφή πόλωση. Σε αυτή τη περίπτωση επειδή οι οπές έλκονται από τον αρνητικό πόλο και τα ηλεκτρόνια από το θετικό πόλο, η περιοχή απογύμνωσης διευρύνεται και το ρεύμα που διαρρέει τον ημιαγωγό ισούται σχεδόν με το ανάστροφο ρεύμα

$$I_d = -I_o$$

αφού, το ρεύμα διάχυσης I_I είναι σχεδόν μηδέν.

Η χαρακτηριστική καμπύλη ενός ημιαγωγού μας δείχνει, πως μεταβάλλεται το ρεύμα σε σχέση με τη τάση. Στο παρακάτω σχήμα, ορθή πόλωση έχουμε για θετική τάση και αναστροφή πόλωση για αρνητική τάση. Παρατηρούμε ότι στη ορθή πόλωση το ρεύμα αυξάνει εκθετικά με τη τάση.



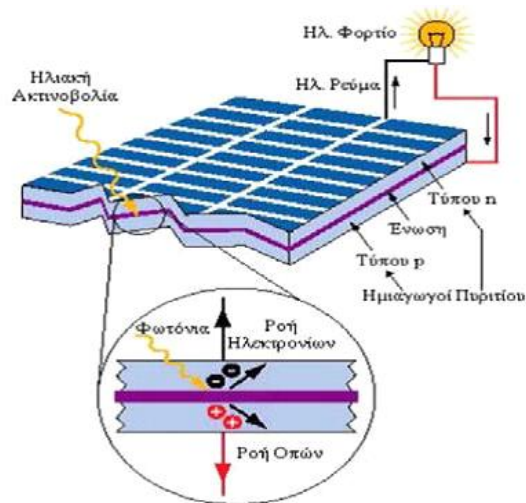
Σχήμα 3.3.2: Χαρακτηριστική I-V. Μεταβολή της ρεύματος σε μια επαφή σε σχέση με την τάση πόλωσης.

Παραπομπές: [17], [18]

3.2.4 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι το φαινόμενο, όπου η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική. Δηλαδή η ενέργεια των φωτονίων, όταν αυτά πέσουν σε μια κατάλληλη επαφή PN, μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Στις επαφές αυτές δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίων οπών. Τα ζεύγη ηλεκτρονίων οπών οφείλονται στη θερμική διάσπαση των ατόμων, που προκαλείται από το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Ο ρυθμός δημιουργίας των παραπάνω ζευγών αυξάνει, αν προσφέρουμε μια κατάλληλη ακτινοβολία, που το ελάχιστο μήκος κύματος καθορίζεται και εξαρτάται από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού (επαφή PN). Τα ζεύγη ηλεκτρονίων οπών που δημιουργούνται βρίσκονται μέσα στην περιοχή απογύμνωσης και κινούνται με την επίδραση του πεδίου που δημιουργείται από τα ιόντα της περιοχής απογύμνωσης. Οι μεν οπές έλκονται από το θετικό υπόστρωμα P ενώ τα ηλεκτρόνια από το υπόστρωμα N με αποτέλεσμα να αυξηθούν το ανάστροφο ρεύμα.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να εμφανίζεται μια τάση στους ακροδέκτες του ηλιακού στοιχείου. Η τάση αυτή, είναι ίση με την φωτοβολταϊκή τάση. Εάν κατασκευαστεί ένα κύκλωμα όπως αυτό της παραπάνω εικόνας, τότε θα παραχθεί ηλεκτρική ισχύς, αφού τα ηλεκτρόνια θα πρέπει να διέλθουν από το φορτίο για να συνδεθούν με τις οπές.



Σχήμα 3.4: Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Παραπομπές: [10], [19]

3.3 Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

Η ηλιακή κυψέλη είναι η συσκευή στην οποία συντελείται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, κατά το οποίο, το φως προσπίπτοντας σε μια επαφή PN, παράγει μια φωτοτάση ή μια διαφορά δυναμικού μεταξύ το δυο στρωμάτων της επαφής. Αυτή η τάση είναι ικανή να οδηγήσει ένα ρεύμα μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος, παράγοντας με αυτό το τρόπο ωφέλιμο έργο. Συνήθως οι κυψέλες ομαδοποιούνται σε πλαίσια και τα πλαίσια συναθροίζονται και διαμορφώνουν τη Φ/Β συστοιχία.

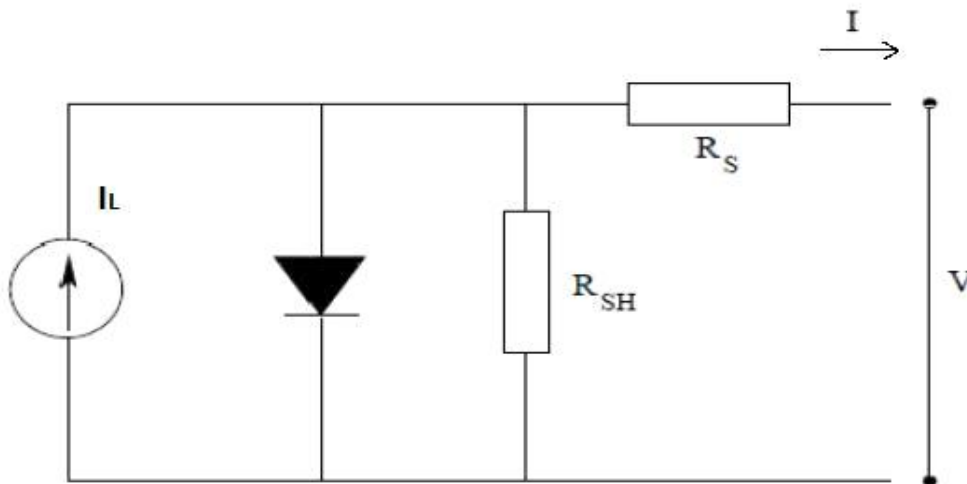
3.3.1 Μοντέλο Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

Στην πραγματικότητα ένα ηλιακό κύτταρο περιλαμβάνει μία παράλληλη και μία εν σειρά αντίσταση που οφείλονται στην τεχνολογία κατασκευής τους.

Η παράλληλη R_{sh} (shunt/παράλληλη) οφείλεται σε διαρροές των φορέων που συμβαίνουν είτε στην επαφή p-n (επανασυνδέσεις), είτε στην εξωτερική παράπλευρη επιφάνεια του κυττάρου (επιφανειακή διαρροή), είτε σε άλλες ανωμαλίες του κυττάρου.

Η εν σειρά αντίσταση R_s (series/σε σειρά) παριστάνει όλα τα καταναμημένα στοιχεία αντίστασης κατά την ροή των φορέων στον κυρίως ημιαγωγό, την επιφανειακή ροή στον ημιαγωγό που βρίσκεται στην πλευρά που προσπίπτει το φως (συνήθως n-τύπου), την επιφάνεια μεταξύ ημιαγωγού και ωμικής επαφής.

Έτσι προκύπτει το πλήρες μοντέλο του φωτοβολταϊκού στοιχείου όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5 που ακολουθεί.



Σχήμα 3.5: Πλήρες μοντέλο αναπαράστασης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

Με τη βοήθεια του παραπάνω ισοδύναμου κυκλώματος μπορούμε να υπολογίσουμε το ολικό ρεύμα που υπάρχει στην έξοδο του Φ/Β στοιχείου προσεγγίζοντας περισσότερο ένα πραγματικό κύτταρο. Έτσι, έχουμε την πλήρη εξίσωση ρεύματος – τάσης η οποία είναι η εξής:

$$I = I_L - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q(V+R_s \cdot I)}{AK_s T}} - 1 \right) - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}}$$

Όπου:

- I και V το ρεύμα και η τάση που δημιουργούνται λόγω του φορτίου που συνδέουμε στο φωτοβολταϊκό.
- I_0 το ρεύμα κορεσμού της διόδου (αντιπροσωπεύει το ρεύμα των φορέων μειονότητας που δημιουργούνται από θερμική διέγερση και επιταχύνονται μέσα στο πεδίο της επαφής p-n),
- A σταθερά ιδανικότητας της διόδου η οποία παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 2 (1 για ιδανική δίοδο επανασυνδέσεις στην ζώνη εξάντλησης δεν λαμβάνονται υπόψη γιατί το εύρος της περιοχής θεωρείται αμελητέο, αλλού συμβολίζεται με n),
- T απόλυτη θερμοκρασία της επαφής.

Συνήθως, στα φωτοβολταϊκά στοιχεία του εμπορίου, η αντίσταση R_s είναι μικρότερη των 5 Ω και η αντίσταση R_{sh} είναι μεγαλύτερη από 500 Ω . Σε καλής ποιότητας Φ/Β στοιχεία οι R_s και R_{sh} κυμαίνονται σε τιμές $\sim 0,1 \Omega$ και 1 k Ω αντίστοιχα. Για δική μας ευκολία στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούμε το ιδανικό μοντέλο κυττάρου θεωρώντας $R_s=0$ και $R_{sh}=\infty$.

Παραπομπές:[1], [10]

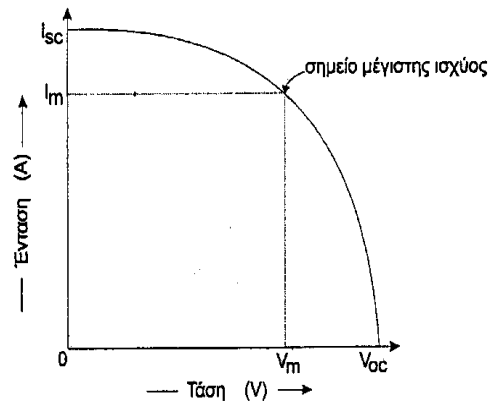
3.3.2 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V

Στο σχήμα 3.6 απεικονίζεται γραφικά η χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου.

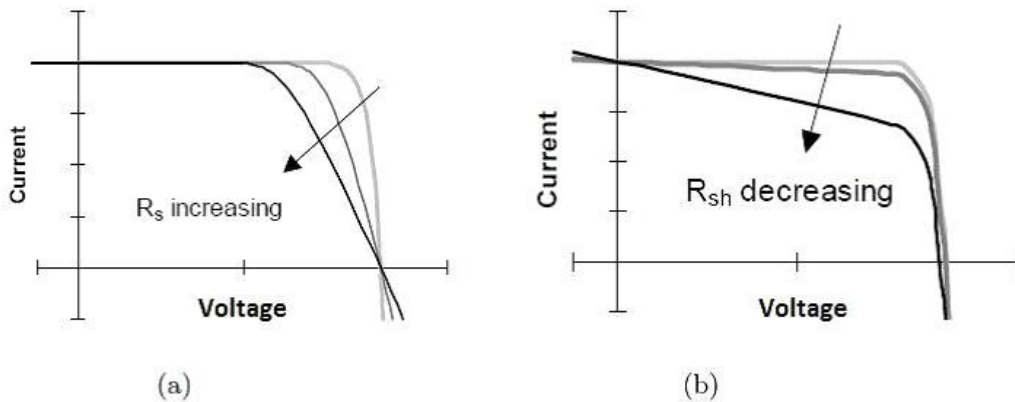
Στη γραφική αυτή διακρίνονται όλα τα χαρακτηριστικά της σημεία όπως η τάση ανοιχτοκύκλωσης και το ρεύμα βραχυκύκλωσης αλλά και η μέγιστη ισχύς P_{max} που αποδίδει το φωτοβολταϊκό, όπως και η τάση και το ρεύμα που αντιστοιχούν σε αυτή την ισχύ [V_{mpp} (V_m): Voltage at max power point, I_{mpp} (I_m): Current at max power point].

Προφανώς, υπάρχει μία τιμή της αντίστασης φορτίου R_m , η οποία μεγιστοποιεί την παραγόμενη ισχύ του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Το σημείο αυτό αντιστοιχεί στο «γόνατο» της I-V χαρακτηριστικής καμπύλης, MPP (Maximum Power Point).

Οι αντιστάσεις R_s και R_{sh} του πλήρους μοντέλου, που αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο, διαφοροποιούν στην πραγματικότητα λίγο την μορφή της παραπάνω χαρακτηριστικής καμπύλης. Αύξηση της R_s περιορίζει την περιοχή τάσεων στην οποία αντιστοιχεί σταθερό ρεύμα βραχυκύκλωσης (ελάττωση της μέγιστης ισχύος) και μείωση της R_{sh} κάτω από 500 Ω προκαλεί έντονη κλίση του οριζώντιου τμήματος της καμπύλης, δηλαδή ελάττωση του ρεύματος καθώς πηγαίνουμε προς την V_{oc} (χαμηλότερη τιμή του συντελεστή πλήρωσης).



Σχήμα 3.6: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου



Σχήμα 3.7: Επίδραση της α) εν σειρά και β) της παράλληλης αντίστασης στην καμπύλη I-V

Συνθήκες αναφοράς (Standard Test Conditions STC)

Για λόγους σύγκρισης των χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν τα φβ στοιχεία ή πλαίσια, έχουν καθοριστεί κάποιες συνθήκες αναφοράς κάτω από τις οποίες δίνονται οι χαρακτηριστικές I-V καμπύλες. Αυτές είναι οι εξής:

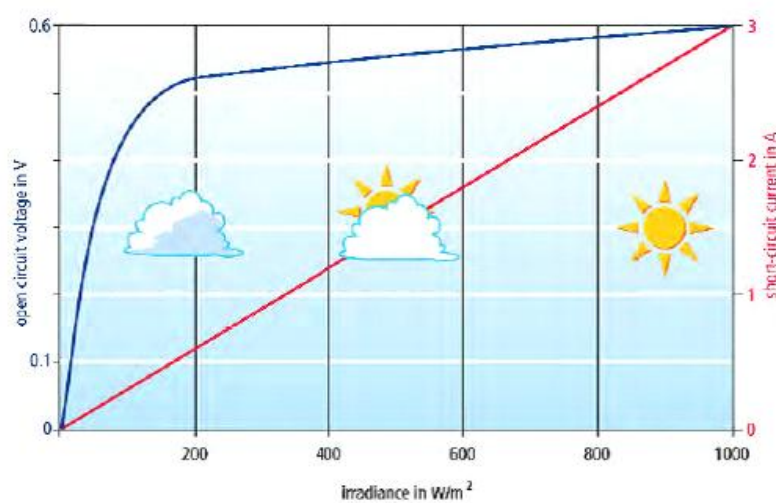
- ακτινοβολία ίση με $E = 1000\text{W/m}^2$
- θερμοκρασία στοιχείων ίση με $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$
- καθορισμένο ηλιακό φάσμα που χαρακτηρίζεται από $AM = 1.5$

Τα τρία βασικά σημεία μιας I-V χαρακτηριστικής είναι:

- Το σημείο μέγιστης ισχύος (maximum power point, MPP) στο οποίο το Φβ στοιχείο λειτουργεί παράγοντας μέγιστη ισχύ. Στο σημείο αυτό η ισχύς συμβολίζεται με P_{mp} , το ρεύμα με I_{mp} και η τάση με V_{mp} .
- Το ρεύμα βραχυκύκλωσης, I_{sc} (το οποίο είναι 5% με 15% υψηλότερο από το ρεύμα μέγιστης ισχύος).
- Η τάση ανοικτοκύκλωσης, V_{oc} (η οποία κυμαίνεται γύρω στα 0.6V)

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης μεταβάλλεται γραμμικά με την ακτινοβολία, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί. Αντίθετα η τάση ανοικτοκύκλωσης μένει

πρακτικά σταθερή στις μεταβολές της ακτινοβολίας. Μαθηματικά, η εξάρτηση τάσης-ακτινοβολίας είναι λογαριθμική.



Σχήμα 3.8: Εξάρτηση ρεύματος και τάσης από την ακτινοβολία

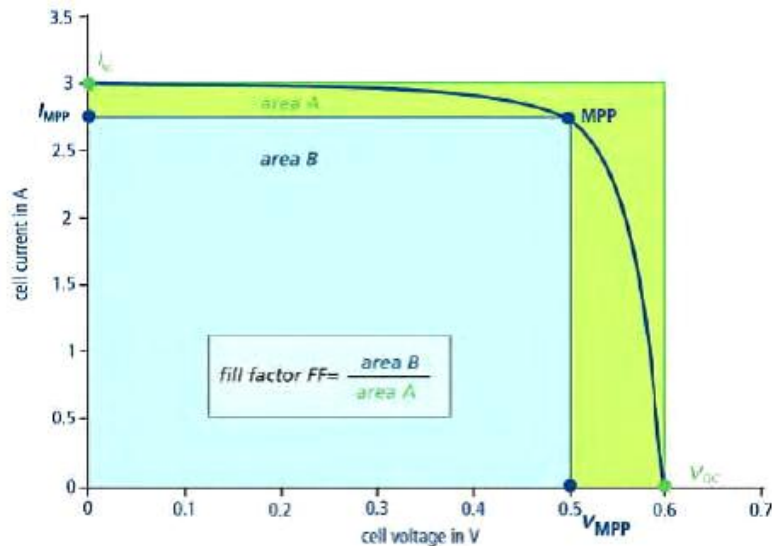
Παραπομπές: [1], [10]

3.3.3 Συντελεστής Απόδοσης

Ο συντελεστής πλήρωσης (fill factor, FF) περιγράφει την ποιότητα των φβ στοιχείων. Ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ισχύος MPP προς το γινόμενο της τάσης ανοικτοκύκλωσης, V_{oc} , με το ρεύμα βραχυκύκλωσης, I_{sc} .

$$FF = \frac{V_{MPP} \times I_{MPP}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{P_{MPP}}{V_{oc} \times I_{sc}}$$

Για στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου ο συντελεστής αυτός έχει τιμή 0.75 με 0.85, ενώ για στοιχεία άμορφου πυριτίου κυμαίνεται μεταξύ 0.5 και 0.7. Γραφικά ο συντελεστής αυτός μπορεί να προσδιοριστεί από το λόγο των εμβαδών B προς A όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9: Συντελεστής πλήρωσης FF

Ο συντελεστής απόδοσης του κυττάρου ορίζεται από το πηλίκο της μέγιστης ισχύος P_{max} που αποδίδει το Φ/Β στοιχείο κάτω από ορισμένες συνθήκες, προς την προσπίπτουσα ισχύ ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του στοιχείου, δηλαδή :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{G \cdot A} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{G \cdot A}$$

Όπου:

- G η προσπίπτουσα ανά τετραγωνικό μέτρο ισχύς ηλιακής ακτινοβολίας (ή αλλιώς πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας) σε W/m^2 και
- A το εμβαδό της επιφάνειας του συλλέκτη σε m^2

Αν αναφερόμαστε σε φωτοβολταϊκό πλαίσιο συνήθως σαν A χρησιμοποιούμε το ολικό εμβαδό του πλαισίου (μαζί με το μεταλλικό περίβλημα και τα κενά), που εκφράζει το σφαιρικό συντελεστή απόδοσης. Παρ' όλα αυτά μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την πραγματική/ενεργή επιφάνεια του συλλέκτη και να έχουμε τον πραγματικό συντελεστή απόδοσης. Εάν εφαρμόσουμε τον τύπο του συντελεστή πλήρωσης στην παραπάνω σχέση παίρνουμε μια άλλη έκφραση του συντελεστή απόδοσης, η οποία είναι η εξής:

$$\eta = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{G \cdot A}$$

Όπως είναι γνωστό η απόδοση ενός Φ/Β στοιχείου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως τον χρησιμοποιούμενο ημιαγωγό, την ακτινοβολία G και την θερμοκρασία.

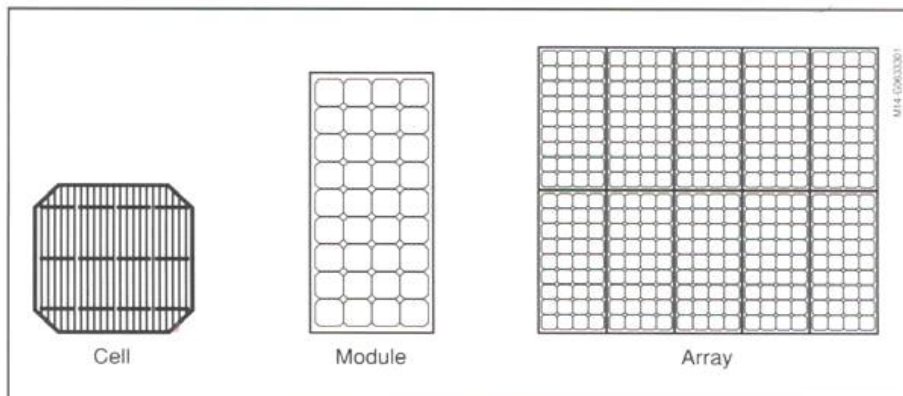
Παραπομπές:[1], [10]

3.3.4 Φωτοβολταϊκή γεννήτρια

Το βασικό χαρακτηριστικό συστατικό κάθε φ/β εγκατάστασης είναι η φ/β γεννήτρια, που αποτελείται από τους ηλιακούς συλλέκτες με τα φ/β ηλιακά στοιχεία. Θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μια «μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας» κατά αναλογία με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής από θερμοηλεκτρικά εργοστάσια. Μια φ/β γεννήτρια αποτελείται από φ/β πλαίσια που ενώνονται και συγκροτούν συστοιχίες.

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο (cell) αποτελεί τη βασική μονάδα και το θεμελιώδες συστατικό ενός φβ συστήματος. Ένα μεμονωμένο στοιχείο παράγει τυπικά 1 με 2 Watt, ισχύς ανεπαρκής για την πλειοψηφία των σημερινών εφαρμογών. Για την αύξηση της παραγόμενης ισχύος είναι δυνατή η σύνδεση των στοιχείων (σειρά και παράλληλα) προς σχηματισμό μεγαλύτερων μονάδων, των επονομαζόμενων πλαισίων (modules), τα οποία μπορούν να συνδυαστούν στη συνέχεια σε ακόμα μεγαλύτερες μονάδες, γνωστές ως συστοιχίες (arrays). Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να κλιμακωθεί ένα φωτοβολταϊκό σύστημα με τρόπο τέτοιο ώστε να καλύπτει σχεδόν οποιεσδήποτε απαιτήσεις μπορεί να εμφανιστούν, μικρές ή μεγάλες.

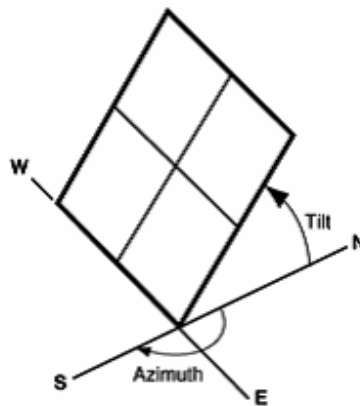
Τα μεμονωμένα πλαίσια ή ακόμη και οι συστοιχίες δεν αποτελούν από μόνα τους ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Για το σκοπό αυτό είναι απαραίτητες κάποιες κατασκευές στις οποίες μπορούν να τοποθετηθούν τα πλαίσια και να προσανατολιστούν προς τον ήλιο και κάποιες συσκευές οι οποίες δέχονται την dc-ενέργεια που παράγεται από τα πλαίσια (inverters) και τη μετατρέπουν σε κατάλληλη μορφή ενέργειας για την εκάστοτε εφαρμογή.



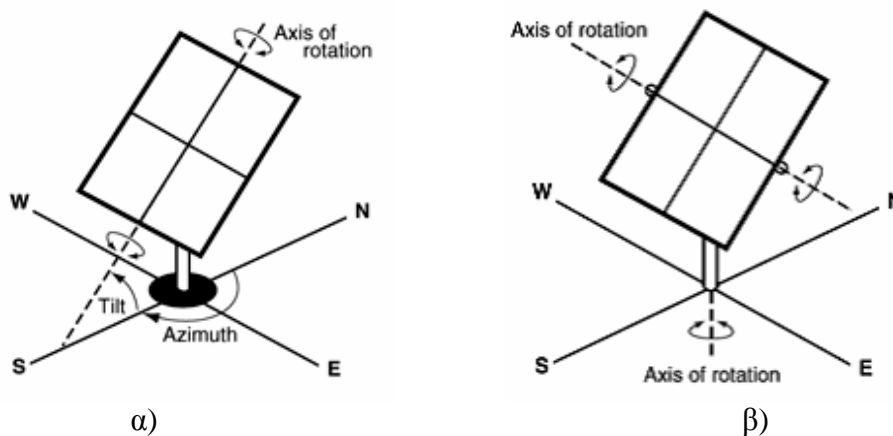
Σχήμα 3.10: Φβ στοιχείο, πλαίσιο, συστοιχία

Οι φβ συστοιχίες διακρίνονται σε τρεις διαφορετικούς τύπους με βάση τη διάταξη τοποθέτησής τους ως προς το έδαφος και τη σχετική τους θέση ως προς τον ήλιο. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να έχουν σταθερή κλίση – είναι σταθερά τοποθετημένοι ως προς το έδαφος (σχήμα 3.11) είτε να διαθέτουν σύστημα ανίχνευσης του ήλιου ενός άξονα ή δύο αξόνων (σχήμα 3.12). Ειδικότερα, στο πρώτο σχήμα φαίνεται μια φβ συστοιχία με σταθερή κλίση ως προς το έδαφος, προσανατολισμένη προς το νότο. Στο δεύτερο απεικονίζεται μια φβ συστοιχία με στροφόμενη βάση ανίχνευσης ηλίου ενός άξονα στραμμένου προς νότο. Η συστοιχία αυτή ιχνηλατεί τον ήλιο από ανατολή προς δύση πάνω στον άξονα περιστροφής της. Τέλος, το τρίτο σχήμα δείχνει μια φβ συστοιχία με σύστημα ανίχνευσης ηλίου δύο αξόνων. Η συστοιχία αυτή ιχνηλατεί τον ήλιο από ανατολές προς δυσμάς καθώς επίσης αλλάζει και τη γωνία

κλίσης της από το έδαφος κατά τη διάρκεια της ημέρας. Κάτι τέτοιο επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση της κίνησης του ήλιου επί αδιάλειπτης βάσης.



Σχήμα 3.11: ΦΒ συστοιχία με σταθερή κλίση



Σχήμα 3.12: α) Σύστημα ανίχνευσης ηλίου ενός άξονα, β) Σύστημα ανίχνευσης ηλίου δύο αξόνων

Στην περίπτωση σταθερά τοποθετημένης φβ συστοιχίας, η γωνία αζιμουθίου (ή αζιμούθια γωνία) είναι η γωνία προσανατολισμού της συστοιχίας ως προς το νότο. Για φβ συστοιχία με σύστημα ανίχνευσης ηλίου ενός άξονα περιστροφής, η αζιμούθια γωνία είναι η γωνία προσανατολισμού που σχηματίζει ο άξονας περιστροφής με το νότο. Η έννοια της αζιμούθιας γωνίας δεν έχει νόημα στην περίπτωση φβ συστοιχίας με στρεφόμενη βάση ανίχνευσης ηλίου δύο αξόνων.

Αποτελεί συνήθης πρακτική ο προσανατολισμός ως προς το νότο φβ συστοιχιών (σταθερά τοποθετημένων ως προς το έδαφος) με αζιμούθια γωνία ίση με 0° (δηλαδή προς νότο) για τοποθεσίες στο βόρειο ημισφαίριο και 180° (δηλαδή προς βορρά) για τοποθεσίες στο νότιο ημισφαίριο. Με την πρακτική αυτή επιτυγχάνεται κατά κανόνα μέγιστη ηλιακή απολαβή και ως εκ τούτου μέγιστη ενεργειακή παραγωγή. Για τοποθεσίες στο βόρειο ημισφαίριο, αύξηση της αζιμούθιας γωνίας ευνοεί την

ενεργειακή παραγωγή τις απογευματινές ώρες, και αντίστοιχα μείωση τις πρωινές ώρες. Το αντίστροφο ισχύει για τοποθεσίες στο νότιο ημισφαίριο. Αποτελεί συνήθως πρακτική η τοποθέτηση φβ συστοιχιών σταθερά τοποθετημένων ως προς το έδαφος με γωνία κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής που γίνεται η εγκατάσταση.

Παραπομπές:[1]

3.4 Υλικά και Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών Στοιχείων

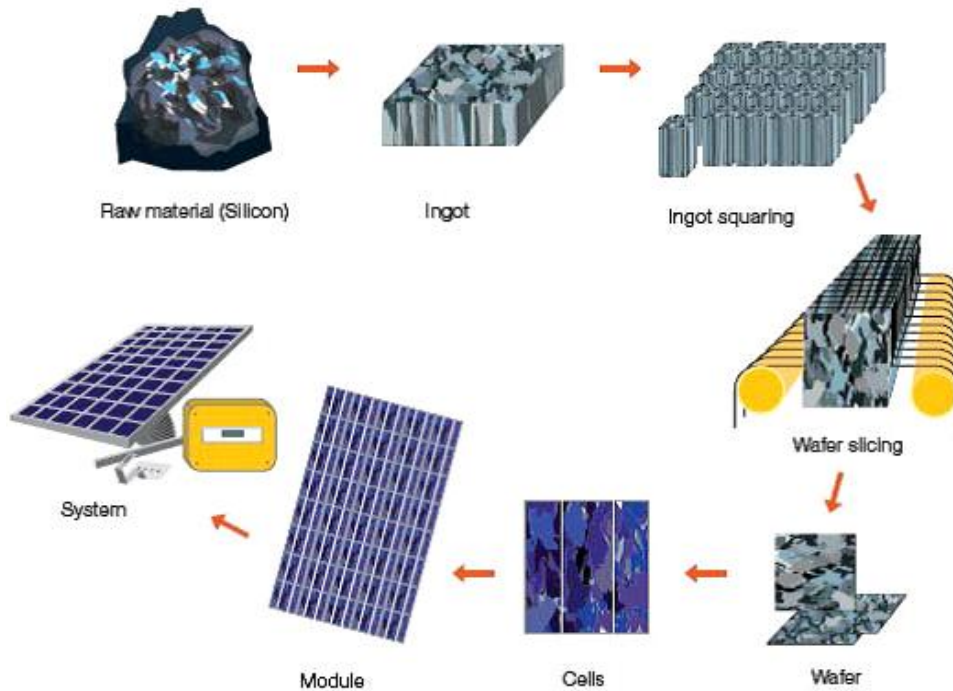
Οι κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή φ/β στοιχείων είναι οι εξής:

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

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

3.4.1 Το Πυρίτιο (Si)

Το πυρίτιο είναι ένας ημιαγωγός με έμμεσο ενεργειακό διάκενο 1,1eV. Αν και οι δύο αυτές ιδιότητές του, δηλαδή έμμεσο και σχετικά μικρή τιμή ενεργειακού διακένου δεν είναι ιδεώδεις για την φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, το πυρίτιο είναι ο ημιαγωγός που κυριάρχησε από την αρχή αλλά μέχρι και σήμερα, σαν υλικό κατασκευής φ/β στοιχείων. Οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό έχουν να κάνουν με το γεγονός ότι το πυρίτιο είναι το κύριο υλικό των διατάξεων ηλεκτρονικής για πολλές δεκαετίες. Επομένως οι ιδιότητες του είναι καλά μελετημένες και το υλικό κυκλοφορεί στη αγορά σε αρκετά μεγάλες ποσότητες, με ικανοποιητική χημική καθαρότητα και τελειότητα κρυσταλλικής δομής, με την χρησιμοποίηση τεχνολογικών μεθόδων δοκιμασμένων με επιτυχία. Επιπλέον τα φ/β στοιχεία πυριτίου έχουν λειτουργήσει με απόλυτα ικανοποιητική αξιοπιστία σε ακραίες καιρικές συνθήκες, τόσο σε διαστημικές όσο και σε επίγειες εφαρμογές. Εκτός του οξυγόνου, το πυρίτιο είναι το πιο άφθονο στοιχείο στην επιφάνεια του εδάφους. Σχεδόν πάντα, όμως απαντάται με τη μορφή οξειδίου στο περιβάλλον, συγκεκριμένα ως διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2). Για την αξιοποίησή του, επομένως, απαιτείται επεξεργασία έτσι ώστε να αποκτήσει υψηλή καθαρότητα.



Σχήμα 3.13: Συνοπτικά η διαδικασία παραγωγής ενός Φ/Β συστήματος

3.4.1.1 Μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο

Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο έχει μια ομοιόμορφη μοριακή δομή. Συγκρινόμενο με υλικά που δεν είναι σε μορφή κρυστάλλου, η υψηλή του ομοιομορφία έχει ως αποτέλεσμα τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης (δηλαδή την αναλογία της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται από το ηλιακό στοιχείο προς την διαθέσιμη από την ηλιακή ακτινοβολία ισχύ). Η απόδοση των μονοκρυσταλλικών στοιχείων του εμπορίου κυμαίνεται από 14-18%.

Όσο αφορά την παραγωγική διαδικασία του, το διοξείδιο του πυριτίου κατά την διαδικασία εξευμενισμού του (αφαίρεση των προσμίξεων) θερμαίνεται στους 1800 οC παρουσία άνθρακα. Το μεταλλουργικό πυρίτιο που προκύπτει από αυτή την διαδικασία έχει μια καθαρότητα της τάξης του 98% και μπορεί μεν να χρησιμοποιηθεί στην μεταλλουργική βιομηχανία, είναι δε τελείως ακατάλληλο ως ημιαγωγός. Απαιτείται επομένως περαιτέρω επεξεργασία. Σε πρώτη φάση γίνεται ανάτηξη και στη συνέχεια αντίδραση με υδροχλώριο (HCl), μετατρέποντας το μεταλλουργικό πυρίτιο σε τριχλωροσιλάνιο (SiHCl_3) που είναι ένα πτητικό υγρό. Εν συνεχεία αποχωρίζεται από διάφορες προσμίξεις μέσω κλασματικής απόσταξης (μέθοδος Siemens). Τέλος ανάγεται με υδρογόνο και συμπυκνώνεται. Πρέπει να τονιστεί ότι οι παραπάνω διαδικασίες είναι εξαιρετικά ενεργοβόρες και συντελούν στο υψηλό κόστος κατασκευής των φ/β στοιχείων. Το τελικό προϊόν είναι ένα υψηλής καθαρότητας πυρίτιο (με συγκέντρωση προσμίξεων μικρότερη από 1 άτομο ανά 1012 άτομα Si), που δεν έχει όμως την επιθυμητή δομή.

Ακολουθεί η κρυσταλλική ανάπτυξη του πυριτίου συνήθως με την μέθοδο Czochranski, κατά την οποία αρχικά τήκεται αυτό μέσα σε ένα κυλινδρικό δοχείο και σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 1400°C. Έπειτα ένα πολύ μικρό κομμάτι κρυσταλλικού πυριτίου τοποθετείται σε επαφή με την επιφάνεια του λιωμένου

πυριτίου, ενώ το κυλινδρικό δοχείο βρίσκεται σε περιστροφική κίνηση. Το κομμάτι πυριτίου δρα σαν πυρήνας κρυστάλλωσης και έτσι το πυρίτιο επικάθεται σε αυτό με αποτέλεσμα να μεγαλώσει και να σχηματισθεί σταδιακά ένας νέος μεγάλος κρύσταλλος πυριτίου με την συνεχή ανύψωση από το λιωμένο πυρίτιο. Αποτέλεσμα της μεθόδου είναι το πυρίτιο να αποκτήσει μια κυλινδρική μορφή με διάμετρο περίπου 10cm και μήκους 1m. Εν συνεχεία ο κύλινδρος αυτός πρέπει να κοπεί σε πολύ λεπτούς δίσκους (κυλινδρικές πλάκες), πάχους που κυμαίνεται από 150μm μέχρι 500μm για τις ηλιακές εφαρμογές. Η διαδικασία είναι εξαιρετικά δαπανηρή, καθώς το πυρίτιο είναι πολύ σκληρό υλικό και επιπλέον ένα ποσοστό χάνεται κατά την κοπή, που φτάνει μέχρι και το 50%. Μια μέθοδος κοπής που περιορίζει κάπως τις παραπάνω απώλειες στηρίζεται στη κοπή με πολύ λεπτή διαμαντένια ίνα. Οι δίσκοι έπειτα λειαίνονται για την απομάκρυνση των ελαττωμάτων της κοπής και διαμορφώνονται σε διόδους τύπου-p ή τύπου-n με επίταξη, διάχυση ή εμφύτευση προσμίξεων.

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

3.4.1.2 Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο

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

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

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

3.4.1.3 Ribbon Πυρίτιο

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

Από τις πολυάριθμες τεχνικές ουσιαστικά μόνο δύο κατέληξαν σε εμπορική χρησιμοποίηση, οι οποίες είναι οι εξής:

α. Edge defined Film Fed Growth Process (EFG)

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

β. String Ribbon Process (STR)

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

3.4.1.4 Κρυσταλλικό Πυρίτιο λεπτού φιλμ (c-SiTFC)

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

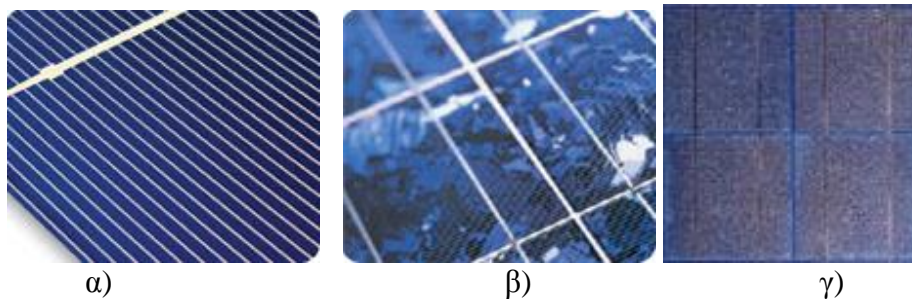
Παρόλο που το c-SiTFC έχει πάχος μερικών μόνο μm (5 μέχρι 50 μm), έχει αποδειχθεί θεωρητικά, αλλά και στην πράξη ότι εμφανίζει αξιόλογη απόδοση. Το κλειδί στην τεχνολογία είναι ο έξυπνος οπτικός σχεδιασμός, με αποτέλεσμα το φως μέσω ανακλάσεων να διαγράφει τελικά διαδρομή 30 φορές ή και περισσότερο,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

3.4.1.5 Άμορφο πυρίτιο (a-Si)

Το άμορφο πυρίτιο χρησιμοποιείται για την παραγωγή φ/β στοιχείων σύμφωνα με την τεχνολογία λεπτού φιλμ. Ως υλικό εμφανίζει μεγάλη αταξία στη δομή του, παρά ταύτα βρίσκει εφαρμογή στη φ/β τεχνολογία με τη μορφή κράματος με υδρογόνο. Η προσθήκη υδρογόνου βελτιώνει τις ηλεκτρικές ιδιότητές του και περιέχεται σε 10-40% ατομική αναλογία. Διαφέρει ουσιαστικά από το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο

καθώς εμφανίζει ενεργειακό διάκενο με μεταβλητή τιμή που κυμαίνεται μεταξύ 1,12eV και 1,7eV περίπου. Το κύριο πλεονέκτημα του είναι ότι έχει υψηλό επίπεδο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και μάλιστα περίπου 40 φορές υψηλότερη από αυτή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Ως προς αυτή την ιδιότητά του το a-Si συμπεριφέρεται σχεδόν σαν ημιαγωγός άμεσου ενεργειακού διακένου, για αυτό μια λεπτή επίστρωση είναι αρκετή για την κατασκευή φ/β στοιχείων. Επιπλέον το άμορφο πυρίτιο μπορεί να εναποτεθεί σε ποικίλα, χαμηλού κόστους υποστρώματα, συμπεριλαμβανομένου του χάλυβα, του γυαλιού και του πλαστικού. Η κατασκευαστική διαδικασία απαιτεί χαμηλότερες θερμοκρασίες και επομένως λιγότερη κατανάλωση ενέργειας. Έτσι το συνολικό κόστος του υλικού και του κόστους κατασκευής είναι χαμηλότερο ανά μονάδα επιφάνειας, συγκρινόμενο με τα στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου.

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



Σχήμα 3.14: α) κυψέλη μονοκρυσταλλικού πυριτίου, β) κυψέλη πολυκρυσταλλικού πυριτίου, γ) κυψέλη άμορφου πυριτίου

3.4.2 Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

Το αρσενικούχο γάλλιο είναι ένας ημιαγωγός με ενεργειακό διάκενο 1,43 eV, τιμή η οποία είναι στη βέλτιστη περιοχή για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας με θεωρητική απόδοση περίπου 25-30%. Ένα ακόμη πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι το ενεργειακό διάκενο είναι άμεσο. Επομένως το GaAs συνδυάζει καταρχήν ιδανικά τις προϋποθέσεις για να χρησιμοποιηθεί ως υλικό κατασκευής ηλιακών φ/β στοιχείων. Το μειονέκτημά του είναι το υψηλό κόστος παραγωγής, περίπου πενταπλάσιο από αυτό του κρυσταλλικού πυριτίου. Έχει εφαρμογή κυρίως σε ηλιακά στοιχεία συγκεντρωμένης ακτινοβολίας, όπου το υψηλό κόστος του αντισταθμίζεται από την υψηλή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας. Επίσης το GaAs συναντάται συχνά σε διαστημικές εφαρμογές λόγω της υψηλής θερμικής αδράνειάς του και του υψηλού βαθμού απόδοσης. Συγκεκριμένα η απόδοση των στοιχείων GaAs πέφτει στο μισό, σε σύγκριση με την απόδοσή τους σε συνηθισμένη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, όταν θερμανθούν στους 200°C. Η αντίστοιχη μείωση στα στοιχεία πυριτίου παρατηρείται ήδη στους 120°C.

3.4.3 Δισεληνιούχος Ινδιούχος Χαλκός (CuInSe₂ ή CIS)

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

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

3.4.4 Τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe)

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

Μια ακόμα τεχνολογία είναι αυτή της ηλεκτροτυπίας. Η τεχνολογία αυτή είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή για τα στοιχεία CdTe, λόγω της πολύ μικρής χρήσης του υλικού και του χαμηλού κόστους. Έχουν παραχθεί βασικές μονάδες με αποδόσεις πάνω από 10% και στοιχεία με αποδόσεις γύρω στο 13%. Οι έλεγχοι σταθερότητας σε εξωτερικές συνθήκες έχουν επιτευχθεί με ικανοποιητική επιτυχία. Από την άλλη όμως όπως και

στο CIS, το κάδμιο είναι ένα τοξικό υλικό και θα πρέπει να λαμβάνονται αυξημένα μέτρα προστασίας κατά την παραγωγή του.

Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών			
ΤΥΠΟΣ	'Λεπτού υμενίου' ή 'Thin Film'	Πολυκρυσταλλικά	Μονοκρυσταλλικά
Εμφάνιση			
Απόδοση ανά μονάδα επιφάνειας	α-Si: 4,5-6,5% μ-Si: 8-9% CIS-CIGS: 6-12% CdTe: 6-11%	11-16%	11-19%
Επιφάνεια ανά kWp	9-25 m ²	7-9 m ²	5,5-9 m ²

Σχήμα 3.15: Συγκριτικός πίνακας κύριων φωτοβολταϊκών τεχνολογιών

3.4.5 Άλλοι τύποι κυψελών

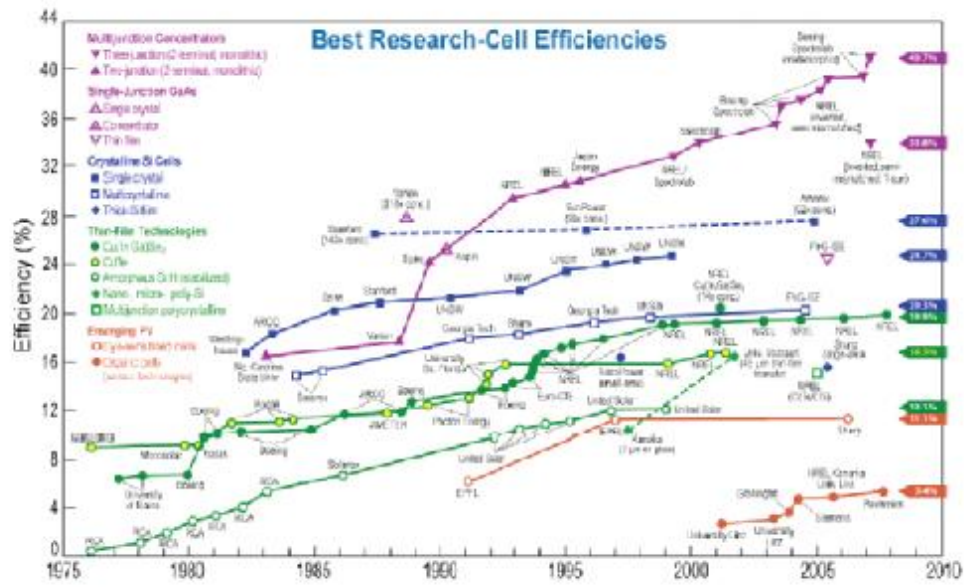
Υπάρχουν και άλλοι τύποι φωτοβολταϊκών τεχνολογιών που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα, όπως είναι τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά, τα φωτο-ηλεκτροχημικά ηλιακά στοιχεία και οι εύκαμπτες ηλιακές κυψέλες.

Το συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό αποτελείται από μερικές ηλιακές κυψέλες σχεδιάζονται για να λειτουργήσουν με μεγάλη ποσότητα ηλιακού φωτός. Αυτές οι κυψέλες συνεργάζονται με συλλέκτες, που χρησιμοποιούνται σαν φακοί για να στρέψουν το φως του ήλιου επάνω τους. Η κύρια ιδέα είναι να χρησιμοποιήσουν πολύ λίγο από το ακριβό ημιαγωγικό υλικό. Οι αποδόσεις είναι της τάξης 20 με 30%.

Οι εύκαμπτες ηλιακές κυψέλες κατασκευάζονται με βάση μια παρόμοια διαδικασία παραγωγής της κυψέλης από λεπτό υμένιο, όταν προστίθεται το ενεργό υλικό σε ένα λεπτό πλαστικό, η κυψέλη μπορεί να γίνει εύκαμπτη. Αυτό ανοίγει μια σειρά νέων εφαρμογών, όπως η τοποθέτηση τους στις οικοδομές στην στέγη, σαν κεραμίδια αλλά και διάφορες καταναλωτικές εφαρμογές.

Τα φωτο-ηλεκτροχημικά ηλιακά στοιχεία (dye doped Titania solar cell), αποτελούνται από μια υγρή χρωστική ουσία που απορροφά το φως και ένα νανοκρυσταλλικό υμένιο TiO₂ που μεταφέρει τα ηλεκτρικά φορτία στα ηλεκτρόδια.

Επίσης, σε ανάπτυξη βρίσκεται η διαδικασία εναπόθεσης λεπτών υμενίων, μικρο και πολυκρυσταλλικού πυριτίου σε κεραμικά υποστρώματα, σε μεταλλικό φύλλο, σε γυαλί, και σε γραφίτη, επιχειρώντας την εξεύρεση μιας μεταβατικής λύσης στο μεσοπρόθεσμο πρόβλημα επάρκειας πρώτης ύλης από την βιομηχανία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.



Σχήμα 3.16: Αποδόσεις τεχνολογιών ηλιακών κελιών

Παραπομπές: [20], [21], [22]

4. Παράγοντες μείωσης ενεργειακής απόδοσης ΦΒ συστημάτων

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια ποσοτικοποίησης της επίδρασης των κυριότερων παραγόντων (derating factors) που επηρεάζουν τη διαθέσιμη από τα φβ πλαίσια dc-ενέργεια. Οι εν λόγω παράγοντες συγκρίνονται με κάποιους άλλους επιπέδου συστήματος, οι οποίοι συχνά συντελούν σε σημαντική μείωση της AC - ενέργειας που αποδίδεται στο φορτίο σε σχέση με αυτή που δύναται να διαθέσει μια φβ συστοιχία.

Η θεωρητική εκτίμηση της αναμενόμενης ενεργειακής απόδοσης ενός φβ πλαισίου ή ενός φβ σταθμού δε λαμβάνει υπόψη μια σειρά από παράγοντες οι οποίοι συχνά συνεπάγονται το σημαντικό περιορισμό της. Ως γνωστόν, η ισχύς που παράγεται από ένα ΦΒ σύστημα εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων (derating factors), οι οποίοι θα πρέπει κατά κύριο λόγο να εξετάζονται κατά τη φάση σχεδιασμού του συστήματος. Η ανάλυση που επιχειρείται στο παρόν κεφάλαιο διευκολύνεται σημαντικά εξετάζοντας την ετήσια ενεργειακή απόδοση των φβ συστημάτων. Η ετήσια ενεργειακή απόδοση αποτελεί την πιο κατάλληλη παράμετρο στο σχεδιασμό ΦΒ συστημάτων καθώς επίσης και το καλύτερο μέτρο για την παρακολούθηση της μακροχρόνιας συμπεριφοράς τους.

Πέρα από τους παράγοντες που αναφέρονται, θα πρέπει επίσης να εκτιμάται η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με τη χρήση απλοποιημένων διαδικασιών στις οποίες δε λαμβάνονται υπόψη τέτοιοι παράγοντες με τόσο σημαντική επίπτωση (αν και όχι υποχρεωτικά προς την κατεύθυνση μείωσης της απόδοσης). Στη συνέχεια ακολουθεί μια σύντομη σύνοψη των κυριότερων από τους παράγοντες αυτούς.

Η μέγιστη θεωρητική απόδοση ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου δεν ξεπερνά το 30%, ενώ το υπόλοιπο 70% χάνεται. Οι βασικοί μηχανισμοί της απώλειας αυτού του ποσοστού της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει σε ένα Φ/Β συλλέκτη οφείλονται στους παράγοντες που αναφέρονται παρακάτω:

- **Σκίαση**
Η επίδραση της σκίασης στην ενεργειακή απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες μείωσης, ιδιαίτερα σε μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκών συστημάτων και σε άλλες περιπτώσεις με περιορισμένη έκταση εγκατάστασης.
- **Αθροιστική ηλιακή ακτινοβολία**
Χρονοσειρές ηλιακής ακτινοβολίας μακράς διάρκειας σχετίζονται άμεσα με τον προσανατολισμό της επιφάνειας των συλλεκτών και ενδεχομένως με τη διάταξη ανίχνευσης του ήλιου. Ο συγκεκριμένος παράγοντας εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση εγκατάστασης και κυμαίνεται ανάμεσα σε 25% μείωση περίπου για κάθετη επιφάνεια και πάνω από 30% αύξηση για σύστημα ανίχνευσης ήλιου δύο αξόνων, συγκριτικά με μια σταθερή τοποθέτηση συλλέκτη, κλίσης ίσης με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής.
- **Μεταβολές ηλιακού φάσματος**
Έχει βρεθεί ότι οι ωριαίες μεταβολές του ηλιακού φάσματος εξαλείφονται κατά μέσο όρο σε ετήσια βάση. Η τεχνολογία άμορφου πυριτίου έχει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στο συγκεκριμένο φαινόμενο, ωστόσο οι μετρηθείσες επιπτώσεις δεν ξεπερνούν συνήθως το ποσοστό των 3%.

- **Ισχύς πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες αναφοράς (Standard Test Conditions, STC)** Ανάλυση αρκετών φωτοβολταϊκών τεχνολογιών έχει αποδείξει ότι για την ίδια περίπου ονομαστική ισχύ, όλες οι τεχνολογίες είναι ισοδύναμες αναφορικά με την αναμενόμενη ετήσια ενεργειακή τους απόδοση, με σφάλμα υπολογισμού μέχρι και 5%.
- **Θερμοκρασία λειτουργίας**
Ανάλυση αρκετών φωτοβολταϊκών τεχνολογιών και γεωγραφικών θέσεων εγκατάστασης έχει αποδείξει ότι η ετήσια ενεργειακή απόδοση είναι δυνατόν να μειωθεί κατά έναν παράγοντα της τάξης του 2 με 5% εξαιτίας της πραγματικής θερμοκρασίας λειτουργίας. Ο παράγοντας αυτός εξαρτάται από το σχεδιασμό του πλαισίου, την ταχύτητα του ανέμου, την τεχνική τοποθέτηση και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- **Εξάρτηση τάσης μέγιστης ισχύος (V_{mp}) από το επίπεδο ακτινοβολίας**
Πλαίσια τύπου a-Si και CdTe τείνουν να έχουν για χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας τιμές τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος υψηλότερες από ότι στην πρότυπη ακτινοβολία ενός ήλιου (1 Sun). Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση μέχρι και 10% της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής.
- **Ρύπανση πλαισίων**
Ο παράγοντας της ρύπανσης, που εξετάζεται διεξοδικά σε επόμενο κεφάλαιο, μπορεί να προκαλέσει μείωση στην ετήσια ενεργειακή απόδοση σε ποσοστό μέχρι και 10% περίπου.
- **Παράγοντες επιπέδου συστήματος**
Περιλαμβάνουν μια πληθώρα παραγόντων που επιδρούν στη διαδικασία μετατροπής της παραγόμενης DC-ενέργειας σε AC. Διαφορετικοί παράγοντες συναντώνται σε διασυνδεδεμένα και σε αυτόνομα φβ συστήματα.
- **Οπτικές απώλειες σε υψηλές τιμές γωνίας πρόσπτωσης (AOI)**
Τέτοιες απώλειες οφείλονται στα αυξημένα επίπεδα ανάκλασης της γυάλινης επιφάνειας που καλύπτει το φβ πλαίσιο, για γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των 60°. Εντούτοις, η εν λόγω επίδραση είναι σχετικά μικρή σε μακροχρόνια βάση (τυπικά κάτω από 5%) παρόλο που μπορεί να έχει μεγαλύτερη επίδραση σε μηνιαία (εποχιακή) βάση (γύρω στα 10% για κάθετη τοποθέτηση).

4.1 Παράγοντες επίδρασης ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκών στοιχείων

Η ετήσια DC-ενέργεια που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο επηρεάζεται από έναν αριθμό αλληλεπιδρώντων παραγόντων, κάποιιοι από τους οποίους σχετίζονται με το ίδιο το πλαίσιο και άλλοι οι οποίοι εξαρτώνται από τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά της θέσης εγκατάστασης. Οι σημαντικότεροι από αυτούς δόθηκαν συνοπτικά στην αρχή του κεφαλαίου και αναλύονται εκτενέστερα ακολούθως.

4.1.1 Επίδραση της θερμοκρασίας

Ένας σημαντικός παράγοντας, ο οποίος μπορεί να μεταβάλλει αξιοσημείωτα την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι η θερμοκρασία των φ/β στοιχείων του. Έχει μετρηθεί ότι κυρίως λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται, αλλά και λόγω των ηλεκτρικών απωλειών που πραγματοποιούνται πάνω τους, στις αντιστάσεις σειράς, τα φ/β στοιχεία αποκτούν κατά την λειτουργία τους θερμοκρασία αρκετά μεγαλύτερη από αυτή του περιβάλλοντος. Αν T_c είναι η θερμοκρασία του στοιχείου μπορούμε να θεωρήσουμε ότι εξαρτάται αυτή γραμμικά από την θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a και την ηλιακή ακτινοβολία G , ως εξής:

$$T_c = T_a + h_w * G$$

Όπου:

- h_w είναι ένας χαρακτηριστικός συντελεστής των φ/β πλαισίων, με τιμή συνήθως $h_w = 0,03 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$

Αυτό συνεπάγεται ότι ένα φ/β πλαίσιο που δέχεται ηλιακή ακτινοβολία 1 kW/m^2 , θα έχει θερμοκρασία κατά 30°C μεγαλύτερη από αυτή του περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία ακόμα επηρεάζεται από την ταχύτητα του ανέμου και γίνεται καλύτερη απαγωγή θερμότητας όσο η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη. Ως γενικός κανόνας στους υπολογισμούς φ/β εγκαταστάσεων, που επαληθεύεται και από μετρήσεις σε πραγματικές εγκαταστάσεις, λαμβάνεται συνήθως αύξηση της θερμοκρασίας του φ/β πλαισίου κατά 30°C από αυτή του περιβάλλοντος.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός φ/β πλαισίου δίνονται συνήθως σε στάνταρ συνθήκες (STC : Standard Test Conditions, δηλαδή θερμοκρασία 25°C , $AM=1,5$ και ηλιακή ακτινοβολία 1 kW/m^2). Αν υποθέσουμε ότι $\eta_{m,STC}$ είναι η απόδοση του φ/β πλαισίου σε STC, τότε για να υπολογιστεί η απόδοση σε οποιαδήποτε άλλη θερμοκρασία χρειάζεται ένας διορθωτικός θερμοκρασιακός συντελεστής ($\sigma\theta$), ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma\theta = 1 - (T_c - 25) * 0,005$$

Η σχέση αυτή ισχύει για τα συμβατικά στοιχεία πυριτίου και υποδηλώνει μείωση της απόδοσης κατά $0,005$ ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας πάνω από τη θερμοκρασία των 25°C . Τελικά η απόδοση ενός φ/β πλαισίου σε οποιαδήποτε θερμοκρασία προκύπτει από την εξής σχέση:

$$\eta_m = \sigma\theta * \eta_{m,25^\circ\text{C}}$$

4.1.2 Επίδραση Γωνίας Πρόσπτωσης Ηλιακής Ακτινοβολίας

Ένας επιπλέον παράγοντας που επηρεάζει την παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια dc-ενέργεια είναι οι οπτικές απώλειες που μεταβάλλονται με την γωνία πρόσπτωσης (AOI), υπό την οποία οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν στο πλαίσιο. Η επίδραση των απωλειών αυτών σχετίζεται κυρίως με την ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς η απόκριση του πλαισίου στη διάχυτη ακτινοβολία είναι κατά κύριο λόγο ανεξάρτητη του προσανατολισμού του. Στην περίπτωση

επιπέδων πλαισίων, οι οπτικές απώλειες σχετίζονται με τις απώλειες ανάκλασης της εμπρόσθιας γυάλινης επιφάνειας. Η ανάκλαση της γυάλινης επιφάνειας αυξάνεται σημαντικά για γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των 60° περίπου. Αποτέλεσμα αυτού είναι μικρότερη ποσότητα ακτινοβολίας να φτάνει στα στοιχεία στο εσωτερικού του πλαισίου και ως εκ τούτου η παραγόμενη ενέργεια να μειώνεται σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης. Όπως και η επίδραση των μεταβολών του ηλιακού φάσματος, έτσι και η επίδραση από αυτή την οπτική απώλεια στην ετήσια ενεργειακή παραγωγή είναι σχετικά μικρή. Παρ' όλα αυτά μπορεί να έχει μια σημαντική εποχιακή διακύμανση, ανάλογα με τον προσανατολισμό του πλαισίου. Στην περίπτωση πλαισίου τοποθετημένου σε στρεφόμενη βάση ανίχνευσης δύο αξόνων ($AOI = 0^\circ$), η απώλεια στην ενέργεια εξαιτίας της γωνίας πρόσπτωσης είναι μηδενική. Η μέγιστη επίδραση στην ετήσια ενέργεια είναι περίπου 4%, για την περίπτωση κατακόρυφα τοποθετημένου πλαισίου, ενώ για την τυπική περίπτωση πλαισίου τοποθετημένου υπό κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος η ετήσια απώλεια είναι μόνο 1% περίπου.

4.1.3 Επίδραση Ηλιακής Ακτινοβολίας

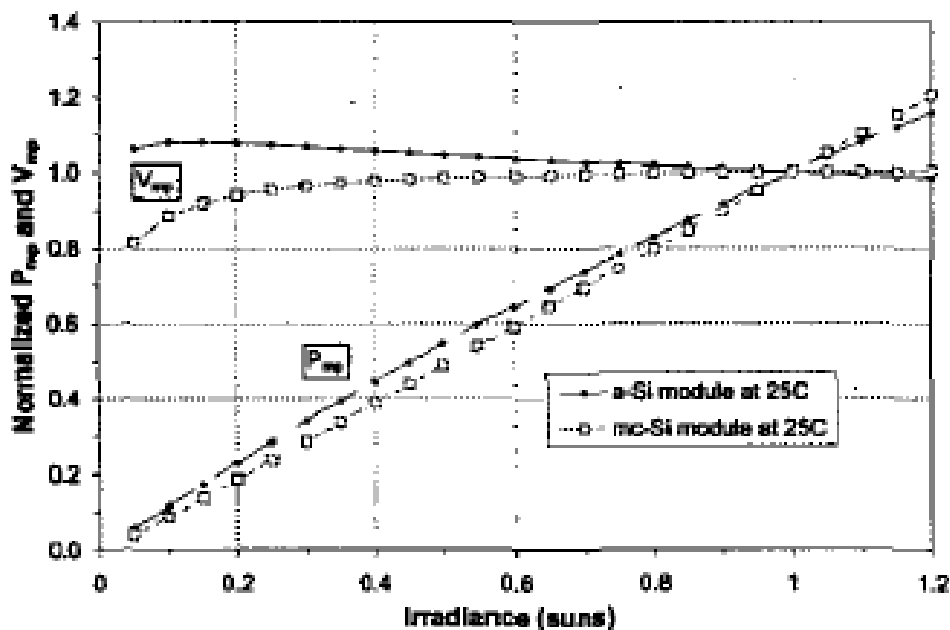
Η ενέργεια που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε ετήσια βάση είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία και, ως εκ τούτου, εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση εγκατάστασης του συστήματος. Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι με τη σειρά της ευθέως εξαρτώμενη από τον προσανατολισμό του πλαισίου ως προς τον ήλιο. Για τη μεγιστοποίηση της ηλιακής απολαβής και επομένως της παραγόμενης ενέργειας, το πλαίσιο μπορεί να τοποθετηθεί σε στρεφόμενη βάση ανίχνευσης δύο αξόνων (2-axis solar tracker) έτσι ώστε να δέχεται συνεχώς κάθετα τις ακτίνες του ηλίου. Σε άλλες περιπτώσεις, μπορεί να είναι επιθυμητή μια οριζόντια ή κατακόρυφη τοποθέτηση των πλαισίων, ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις. Εν γένει, η συνήθης πρακτική προσπάθει τα πλαίσια να τοποθετούνται υπό κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος της θέσης εγκατάστασης και η οποία αποτελεί έναν ικανοποιητικό συμβιβασμό μεταξύ της ετήσιας ηλιακής απολαβής και του υψηλού κόστους μιας στρεφόμενης βάσης. Το Σχήμα 4.0 δίνει την ετήσια ενεργειακή παραγωγή ενός τυπικού πλαισίου πολυκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si) με βάση αναφοράς την περίπτωση πλαισίου υπό κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος, για διαφορετικούς προσανατολισμούς και διατάξεις ανίχνευσης. Όπως προκύπτει, το κέρδος της ανίχνευσης του ήλιου εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση εγκατάστασης με μέγιστη τιμή για περιοχές με υψηλά ποσοστά ακτινικής συνιστώσας της ακτινοβολίας.

	Albuquerque	Sacramento	Buffalo
Κλίση ίση με γεωγραφικό πλάτος	1.00	1.00	1.00
Οριζόντια	0.86	0.90	0.90
Κατακόρυφη	0.73	0.71	0.83
Ανίχνευση σε 1 άξονα	1.21	1.23	1.15
Ανίχνευση σε 2 άξονες	1.32	1.31	1.23

Σχήμα 4.0: Επίδραση της κλίσης, και του συστήματος ανίχνευσης του ήλιου στην ετήσια dc-ενέργεια διαθέσιμη από ένα mc-Si πλαίσιο, ως προς περίπτωση κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος.

4.1.4 Εξάρτηση τάσης μέγιστης ισχύος (V_{mp}) από το επίπεδο ακτινοβολίας

Η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στην τάση μέγιστης ισχύος (V_{mp}), αποτελεί έναν παράγοντα που σχετίζεται μεν με το ίδιο το πλαίσιο, δεν καθορίζεται ούτε μετράται όμως από τους κατασκευαστές των πλαισίων. Ο παράγοντας αυτός, ο οποίος μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην ετήσια ενεργειακή παραγωγή, ουσιαστικά περιγράφει πόσο καλά συμπεριφέρεται το πλαίσιο σε χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας. Το σχήμα 4.1 απεικονίζει την εξάρτηση της τάσης V_{mp} από την ακτινοβολία, όπως μετρήθηκε για δύο διαφορετικά πλαίσια. Στην περίπτωση του πλαισίου άμορφου πυριτίου (a-Si), η τάση V_{mp} αυξάνεται καθώς μειώνεται η ακτινοβολία, με αποτέλεσμα η τάση λειτουργίας του να είναι υψηλότερη σε χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να αποδειχθεί σημαντική ιδιαίτερα σε τοποθεσίες με υψηλό ποσοστό συννεφιασμένων ημερών, καθώς είναι δυνατόν να οδηγήσει σε αυξημένη ετήσια παραγωγή μέχρι και 10%.



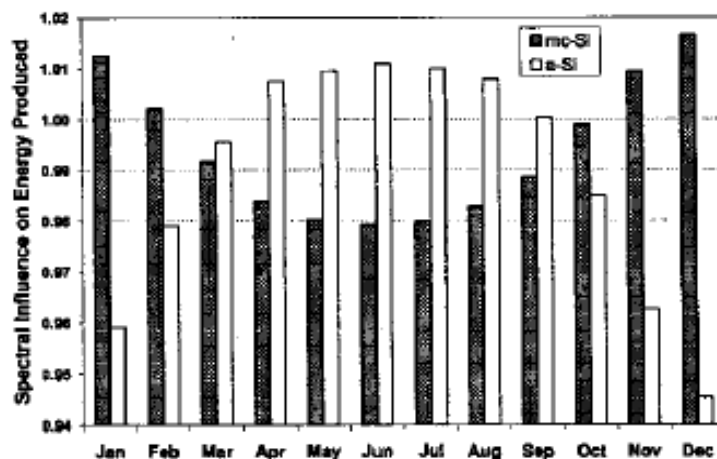
Σχήμα 4.1: Μεταβολή V_{mp} και P_{mp} συναρτήσει της ακτινοβολίας όπως μετράται για δύο διαφορετικά πλαίσια, a-Si και mc-Si.

4.1.5 Μεταβολές Ηλιακού Φάσματος

Ο προσδιορισμός της επίδρασης της ωριαίας μεταβολής του ηλιακού φάσματος στην ενεργειακή παραγωγή ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου συνιστά μια αρκετά σύνθετη διαδικασία. Καθώς το AM=1,5 ηλιακό φάσμα, όπως έχει καθοριστεί από την ASTM, χρησιμοποιείται ως αναφορά για τις προδιαγραφές απόδοσης των πλαισίων, η ετήσια

παραγωγή του πλαισίου θεωρείται σχετικά ανεξάρτητη από τις μεταβολές του ηλιακού φάσματος. Οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται στην απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων κατά τη διάρκεια της ημέρας και με την πάροδο των εποχών εξαλείφονται κατά μέσο όρο σε ετήσια βάση. Η ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας, στην οποία αποκρίνεται ένα συγκεντρωτικό πλαίσιο, παρουσιάζει σχετικά μικρότερη διακύμανση στη φασματική κατανομή, σε σύγκριση με την ολική (global) ακτινοβολία στην οποία αποκρίνονται τα επίπεδα πλαίσια.

Παρόλο που η μέση ετήσια επίδραση στην ενέργεια μπορεί να είναι μικρή, η κατανόηση της ημερήσιας και εποχιακής επίδρασης που έχει το μεταβαλλόμενο ηλιακό φάσμα στην απόδοση ενός φβ πλαισίου είναι άκρως σημαντική. Η φασματική αυτή επίδραση στην ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια έχει επίσης μια εποχιακή διαφοροποίηση, καθώς το καλοκαίρι ο ήλιος παραμένει σε υψηλές γωνίες ανύψωσης (χαμηλές τιμές αέριας μάζας) για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σχέση με το χειμώνα, όπου παρατηρούνται μικρότερες γωνίες ανύψωσης (υψηλές τιμές αέριας μάζας). Για να γίνει εμφανές αυτό το εποχιακό φαινόμενο, υπολογίζεται η μέση ημερήσια παραγόμενη ενέργεια ανά μήνα, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του ηλιακού φάσματος, και οι τιμές που προκύπτουν διαιρούνται με την αντίστοιχη παραγόμενη ενέργεια θεωρώντας την αυτή τη φορά ανεξάρτητη από τις μεταβολές του ηλιακού φάσματος. Το σχήμα 4.2 δείχνει τις προκύπτουσες αναλογίες για δύο πλαίσια, ένα mc-Si κι ένα a-Si, και τα δύο με κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος της θέσης εγκατάστασης. Όπως προκύπτει, η φασματική επίδραση έχει σαν αποτέλεσμα μια εποχιακή διακύμανση και για τις δύο τεχνολογίες, με σημαντικότερη όμως αυτή για το a-Si πλαίσιο. Η ιδιάζουσα αυτή εποχιακή συμπεριφορά για τα a-Si πλαίσια έχει παρατηρηθεί σε μακροχρόνιες παρακολουθήσεις απόδοσης a-Si φβ συστημάτων.



Σχήμα 4.2: Εποχιακή (μηνιαία) μεταβολή της επίδρασης του μεταβαλλόμενου ηλιακού φάσματος στην ενέργεια που διατίθεται από ένα mc-Si και ένα a-Si φβ πλαίσιο

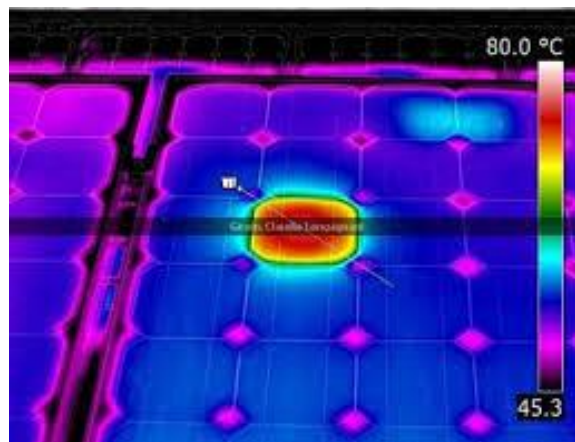
4.1.6 Σκίαση

Ένας ακόμη παράγοντας επίδρασης της DC-ενεργειακής απόδοσης των φβ πλαισίων είναι η σκίαση. Το φαινόμενο της σκίασης εμφανίζεται είτε σε περιπτώσεις που συναντώνται εμπόδια στον ορίζοντα των πλαισίων (όπως παρακείμενα κτίρια, βλάστηση κλπ) είτε σε περιπτώσεις μεγάλων φβ σταθμών οι οποίοι αποτελούνται από

πολλές διαδοχικές σειρές συστοιχιών, όπως και σε άλλες περιπτώσεις με περιορισμένη έκταση εγκατάστασης (για παράδειγμα στις στέγες των κτιρίων), και στις οποίες προκαλείται σκίαση από τη μια σειρά στην επόμενη. Ιδιαίτερα στην δεύτερη περίπτωση, οι επιπτώσεις της σκίασης μπορεί να είναι σημαντικές και για το λόγο αυτό είναι αναγκαίος ο λεπτομερής προσδιορισμός των απωλειών που προκαλούν. Η αλλοίωση των χαρακτηριστικών ενός και μόνο κυττάρου, λόγω σκίασής του, μπορεί να προκαλέσει απώλεια ισχύος μέχρι και να αποβεί καταστροφική για το όλο το Φ/Β πλαίσιο.

Σε μία σειριακή σύνδεση Φ/Β στοιχείων με ίδια χαρακτηριστικά έχουμε συνολική τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} ίση με το άθροισμα των επιμέρους τάσεων, ενώ ρεύμα I_{sc} όσο είναι το ρεύμα ενός στοιχείου. Αντίστοιχα μια παράλληλη σύνδεση οδηγεί σε μια V_{oc} κοινή με όση έχει ένα στοιχείο ($\sim 0,6V$) και ολικό ρεύμα I_{sc} το άθροισμα των επιμέρους ρευμάτων. Στην περίπτωση όμως που τα χαρακτηριστικά των στοιχείων δεν είναι ακριβώς τα ίδια, στη σύνδεση σε σειρά, το στοιχείο με το μικρότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης επιβάλλει στο κύκλωμα το δικό του ρεύμα. Στην ακραία περίπτωση που ένα κύτταρο σκιάζεται πλήρως, τότε το ολικό ρεύμα ενός σειριακού κλάδου είναι 0. Για να αποφύγουμε τέτοιες απώλειες ισχύος προσθέτουμε πλεονάζουσες ηλεκτρικές συνδέσεις μεταξύ των ηλιακών κυττάρων.

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στο φαινόμενο της θερμής κηλίδας (Hot-Spot). Ένα σκιασμένο κύτταρο συμπεριφέρεται όπως η απλή διόδος p-n, η οποία όταν το κύκλωμα είναι κλειστό δέχεται από τα υπόλοιπα στοιχεία που φωτίζονται μια υψηλή ανάστροφη τάση. Αν λοιπόν αυτά τα “υγιή” κύτταρα είναι πολλά, η ανάστροφη αυτή τάση μπορεί να φτάσει την τάση διάσπασης της σκιασμένης διόδου, προκαλώντας την καταστροφή της. Στην πράξη η σκιασμένη κυψελίδα λειτουργεί ως μια μεγάλη αντίσταση, όπου αποδίδεται η ενέργεια που προσφέρουν οι υπόλοιπες. Παρατεταμένος σκιασμός της σε συνδυασμό με έντονο φωτισμό των υπολοίπων κυττάρων, μπορεί να οδηγήσει σε τοπική υπερθέρμανση και τελικά σε σπάσιμο του γυαλιού ή λιώσιμο των κολλήσεων ή ακόμα και καταστροφή του στοιχείου αυτού και κατά συνέπεια στην αχρήστευση όλου του πλαισίου, επειδή δεν υπάρχει δυνατότητα αντικατάστασης ενός κατεστραμμένου στοιχείου του. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο θερμής κηλίδας ή Hot Spot και για να αποτραπεί χρησιμοποιούμε τις λεγόμενες διόδους παράκαμψης.



Σχήμα 4.3: Φαινόμενου θερμής κηλίδας

4.1.7 Ρύπανση

Ο παράγοντας ρύπανσης περιλαμβάνει ρύπους (σκόνη), χιόνι και άλλα “ξένα” προς το φβ πλαίσιο στοιχεία που εμποδίζουν την ηλιακή ακτινοβολία να φτάσει στην επιφάνεια των ηλιακών στοιχείων. Συντελούν δηλαδή στη μείωση της ενεργού ακτινοβολίας, της ακτινοβολίας στην οποία τα στοιχεία ουσιαστικά αποκρίνονται, με αποτέλεσμα να μειώνεται τελικά η παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ισχύς. Η συσσώρευση ρύπων στην επιφάνεια των πλαισίων εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση εγκατάστασης και τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Το χιόνι μειώνει την παραγόμενη ενέργεια κατά ένα ποσό το οποίο εξαρτάται από την ποσότητα του χιονιού και τη διάρκεια παραμονής του στην επιφάνεια των φβ πλαισίων. Σε περιοχές με έντονη κινητικότητα και υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, όπου επίσης υπάρχουν περίοδοι με αισθητά μειωμένη βροχόπτωση για κάποιους μήνες, οι απώλειες εξαιτίας της ρύπανσης έχουν σημαντική επίπτωση στην τελική διαθέσιμη από τα φβ πλαίσια ενέργεια. Κατά συνέπεια, ιδιαίτερα σε τέτοιες περιπτώσεις είναι απαραίτητο οι εν λόγω απώλειες να λαμβάνονται υπόψη σε ένα μοντέλο ενεργειακής απόδοσης. Αποτελεί συνηθισμένη πρακτική να λαμβάνουν οι απώλειες αυτές μια σταθερή τιμή καθ’ όλη τη διάρκεια του έτους, ωστόσο, κάτι τέτοιο μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση του βαθμού επίπτωσής τους. Για μια ορθότερη προσέγγιση και πιο αναλυτική μοντελοποίηση των απωλειών λόγω ρύπανσης εξετάζεται διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 4.4: Μερική κάλυψη φωτοβολταϊκού πλαισίου από χιόνι

Παραπομπές:[1], [5], [23]

4.2 Παράγοντες επίδρασης επιπέδου Φ/Β συστήματος

Η κατανόηση όλων των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων και κλονίζουν την αξιοπιστία τους είναι άκρως σημαντική. Η ανάλυση των βασικών παραγόντων που επιδρούν στην dc-ενεργειακή παραγωγή μεμονωμένων πλαισίων, αποτελεί βασικό βήμα προς αυτή την κατεύθυνση. Ωστόσο, οι παράγοντες επιπέδου πλαισίου που συζητήθηκαν προηγουμένως, θα πρέπει να εξεταστούν σε σχέση με τους παράγοντες επιπέδου συστήματος, οι οποίοι είναι δυνατόν να τους υπερκεράσουν. Οι παράγοντες σε επίπεδο συστήματος εισάγουν ενεργειακές απώλειες εξαιτίας διαφοροποιήσεων (mismatch) στα πλαίσια εντός της συστοιχίας, ρύπανσης, καλωδιακών και τερματικών αντιστάσεων, φθοράς (degradation) λόγω ηλικίας (μείωση απόδοσης συστοιχίας) και ασυμβατότητας των μερών του συστήματος. Επιπροσθέτως, τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζουν απώλειες που σχετίζονται με την απόδοση του μετατροπέα συναρτήσεως του φορτίου και της θερμοκρασίας, κυκλωματικές απώλειες μετατροπέα, ικανότητα παρακολούθησης του σημείου μέγιστης ισχύος (maximum-power-point-tracking, MPPT), μόνωση μετασχηματιστών κλπ.

Από την άλλη, τα αυτόνομα συστήματα παρουσιάζουν επιπλέον απώλειες και περιορισμούς στο σχεδιασμό τους που σχετίζονται με την ικανότητα του ρυθμιστή φορτίου (charge controller) (αξιοποίηση της dc ενέργειας που διατίθεται από τη συστοιχία), τη χωρητικότητα του συσσωρευτή, την ικανότητα φόρτισης και εκφόρτισης του συσσωρευτή. Σε περιπτώσεις ελλειπών σχεδιασμένων συστημάτων, συνδυασμοί των παραπάνω παραγόντων μπορεί να έχουν σαν συνέπεια αδυναμία οδήγησης του φορτίου, προκαλώντας την απώλειά του.

Η επιλογή των διαφόρων μερών του συστήματος, με στόχο την αξιοποίηση της dc-ενέργειας που διατίθεται από τη συστοιχία και συνεπώς τη μέγιστη δυνατή προκύπτουσα ετήσια ac-ενέργεια, είναι πολύ σημαντική. Επιπλέον, υπερτίθεται σε αυτό το “παράθυρο τάσης εισόδου” του μετατροπέα που χρησιμοποιείται στο ΦΒ σύστημα. Σε αυτή την περίπτωση, οι απαιτήσεις του μετατροπέα δεν ταιριάζουν με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της συστοιχίας, ή με άλλα λόγια, το αποτέλεσμα είναι σημαντική μείωση στην ενέργεια εξαιτίας της μειωμένης απόδοσης του μετατροπέα.

Συνοψίζοντας, είναι πλέον ξεκάθαρο ότι υπάρχουν πολλοί παράγοντες που μπορούν να έχουν σημαντική επίδραση στην AC ενεργειακή παραγωγή και την αξιοπιστία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος και για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η όσο το δυνατόν καλύτερη κατανόησή τους με στόχο την καλύτερη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων των φβ πλαισίων.

Παρόλο που τα εκάστοτε αποτελέσματα εξαρτώνται κατά κάποιο τρόπο από το είδος και την τοποθεσία του πλαισίου, στο σχήμα 4.5 παρουσιάζει μια προσπάθεια κατηγοριοποίησης των διαφορετικών παραγόντων που επιδρούν στην AC παραγωγή του συστήματος, δίνοντας παράλληλα και το εύρος της πιθανής μεταβολής που προκαλούν.

Είδος Απώλειας	Τυπική τιμή	Εύρος
Μετατροπέας (Inverter)	0,97	0,93 – 0,98
Φθορά λόγω πρωτογενούς έκθεσης στον ήλιο	0,98	0,90 – 0,99
Μετασχηματιστές Ισχύος	0,97	0,96 – 0,98
Διαφοροποιήσεις πλαισίων	0,98	0,97 – 0,985
DC καλωδιώσεις	0,98	0,97 – 0,99
Ισχύς πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες αναφοράς	0,97	0,85 – 1,05
AC καλωδιώσεις	0,99	0,98 – 0,993
Ανίχνευση ήλιου	1,00	0,98–1,00
Δίοδοι και διασυνδέσεις	0,995	0,99 – 0,997
Γήρανση	1,00	0,70 – 1,00
Διαθεσιμότητα συστήματος	0,98	0,00 – 0,995
Σύνολο	0,83	

Σχήμα 4.5: Παράγοντες επίδρασης AC παραγωγής ΦΒ συστήματος

Για λόγους συνοχής παρακάτω περιγράφονται οι παράγοντες μείωσης του παραπάνω πίνακα.

Δίοδοι και συνδέσεις

Ο συγκεκριμένος παράγοντας μείωσης υπεισέρχεται για να συμπεριλάβει τις απώλειες λόγω πτώσης τάσης κατά μήκος διόδων που χρησιμοποιούνται για την παρεμπόδιση των ανάστροφων ρευμάτων καθώς και τις ωμικές απώλειες στις ηλεκτρικές συνδέσεις.

Ισχύς πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες αναφοράς (Standard Test Conditions, STC)

Ο εν λόγω παράγοντας παρέχει μια εκτίμηση της απόκλισης από τις ονομαστικές προδιαγραφές που παρέχονται από τους κατασκευαστές των πλαισίων. Πραγματικές μετρήσεις απόδοσης έχουν αποδείξει ότι τα φβ πλαίσια παρουσιάζουν διαφορές από τις παραπάνω προδιαγραφές είτε υπόκεινται σε φθορά λόγω πρωτογενούς έκθεσης στον ήλιο.

Φθορά λόγω πρωτογενούς έκθεσης στον ήλιο (initial light – induced degradation)

Ο παράγοντας αυτός λαμβάνει υπόψη την αρχική υποβάθμιση – φθορά του πλαισίου όταν αυτό υπόκειται για πρώτη φορά σε έκθεση ηλιακής ακτινοβολίας.

AC καλωδιώσεις

Ο παράγοντας μείωσης για τις ac καλωδιώσεις περιλαμβάνει τις ωμικές απώλειες των καλωδιώσεων για τη σύνδεση μεταξύ του μετατροπέα και του δικτύου παροχής ηλεκτρικής ενέργειας

DC καλωδιώσεις

Ο παράγοντας μείωσης για τις dc καλωδιώσεις περιλαμβάνει τις ωμικές απώλειες των καλωδιώσεων για τη σύνδεση μεταξύ των πλαισίων καθώς και μεταξύ φβ συστοιχίας και μετατροπέα.

Μετατροπέας και Μετασχηματιστής

Ο παράγοντας αυτός αντανακλά τις ικανότητες των συγκεκριμένων μερών του συστήματος στην μετατροπή της dc ισχύος σε ac. Η ικανότητα των μετατροπέων περιλαμβάνει απώλειες μετασχηματιστών όταν οι τελευταίοι απαιτούνται από τους κατασκευαστές.

Γήρανση

Ο εν λόγω παράγοντας ενσωματώνει τις απώλειες στην απόδοση των πλαισίων με την πάροδο του χρόνου, λόγω γήρανσης. Η απώλεια αυτή είναι τυπικά περίπου 1%, ωστόσο, με τη θεώρηση μοναδιαίας τιμής υποτίθεται ότι το φβ σύστημα διανύει τον πρώτο χρόνο λειτουργίας του.

Διαφοροποιήσεις πλαισίων

Ο εν λόγω παράγοντας εκτιμά τις απώλειες που οφείλονται σε μικρές αποκλίσεις των χαρακτηριστικών των πλαισίων. Ως εκ τούτου, όταν συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους δεν λειτουργούν σε μέγιστη απόδοση.

Διαθεσιμότητα συστήματος

Ο παράγοντας μείωσης για τη διαθεσιμότητα του συστήματος περικλείει τις περιπτώσεις κατά τις οποίες το σύστημα βρίσκεται εκτός λειτουργίας για λόγους συντήρησης είτε λόγω πτώσης του δικτύου ή βλάβης του μετατροπέα.

5. Επίδραση Ρύπανσης

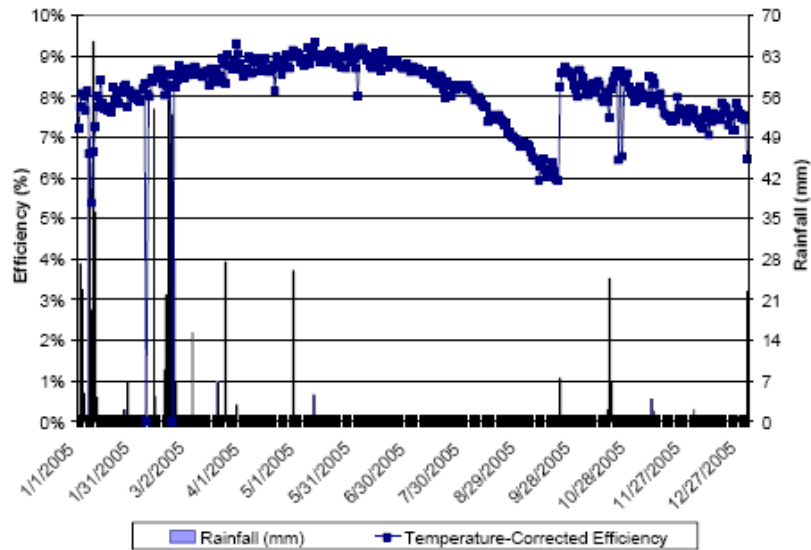
Η συσσώρευση ρύπων στην επιφάνεια των φβ πλαισίων (“soiling” – ρύπανση) μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε περιοχές όπου επικρατεί ξηρό κλίμα και υπάρχουν περίοδοι κατά τη διάρκεια του έτους με αισθητά μειωμένη βροχόπτωση (dry seasons) για κάποιους μήνες. Το φαινόμενο αυτό είναι αρκετά σημαντικό και εντείνεται σε εκείνες τις περιοχές που παρατηρείται πλήρης απουσία βροχόπτωσης τους καλοκαιρινούς μήνες.

Παρά το γεγονός ότι οι απώλειες ενέργειας που παρατηρούνται στα φβ συστήματα εξαιτίας της ρύπανσης είναι μεγάλης σημασίας για τους ιδιοκτήτες και τους διαχειριστές τους, δεν υπάρχουν μέχρι στιγμής αρκετές διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με το θέμα αυτό. Μεγάλο μέρος χρήσιμων πληροφοριών έχει εφαρμογή μόνο στη συγκεκριμένη τοποθεσία όπου διεξάγονται οι πειραματικές δοκιμές, και εγείρεται η ανάγκη για μια γενικότερη προσέγγιση της επίδρασης της ρύπανσης στην ενεργειακή απόδοση των φβ συστημάτων. Μια τέτοια ευρύτερη μελέτη απαιτεί την εξέταση της απόδοσης πληθώρας φβ συστημάτων εγκατεστημένων σε διαφορετικές περιοχές με διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Στην παρούσα ενότητα δίνεται μια αναλυτική περιγραφή του φαινομένου της ρύπανσης και της επίδρασης που έχει στην ενεργειακή παραγωγή μεγάλων διασυνδεδεμένων φβ συστημάτων, βασισμένη σε έρευνες που πραγματοποιήθηκαν σε διάφορες περιοχές των ΗΠΑ με ξηρό κλίμα [24].

Το φαινόμενο της ρύπανσης γίνεται έντονα αισθητό και αποκτά ιδιαίτερη σημασία στη λειτουργία των φβ συστημάτων, εγκατεστημένων σε περιοχές με πολύ ξηρά κλίματα και πλήρη απουσία βροχής κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών. Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται στοιχεία από αρκετές περιοχές των Ηνωμένων Πολιτειών, για παράδειγμα της California και των νοτιοδυτικών περιοχών. Η μετρούμενη απόδοση των ΦΒ συστημάτων τείνει να έχει μια σταδιακή αλλά αξιοσημείωτη μείωση κατά την διάρκεια άνυδρων περιόδων, οι οποίες εμφανίζονται σε περιοχές με ξηρά κλίματα. Η απόδοσή των συστημάτων αυτών επιστρέφει σε φυσιολογικά επίπεδα ύστερα από κάποιο συμβάν βροχόπτωσης που ακολουθεί την περίοδο ξηρασίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1, για ένα τυπικό σύστημα εγκατεστημένο σε στέγη στη νότια California. Με τον όρο “συμβάν βροχόπτωσης” υποδηλώνεται το φαινόμενο της αδιάλειπτης βροχόπτωσης που συντελείται κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος, ανεξαρτήτου μεγέθους (είτε είναι δηλαδή μία ώρα είτε μια ημέρα). Οποιαδήποτε παύση της βροχόπτωσης συνεπάγεται άμεσα και τη λήξη του συμβάντος.

Τα περισσότερα διαθέσιμα προγράμματα προσομοίωσης ΦΒ συστημάτων υιοθετούν την ύπαρξη ενός σταθερού παράγοντα απωλειών ρύπανσης καθ’ όλη τη διάρκεια του έτους. Ωστόσο, από την παρατήρηση των πειραματικών δεδομένων, συμπεραίνεται ότι οι απώλειες ενέργειας που οφείλονται στη ρύπανση του συστήματος δεν είναι σταθερές με την πάροδο του χρόνου, αλλά εξαρτώνται από την ποσότητα και τη συχνότητα της βροχής που πέφτει σε ένα σύστημα.



Σχήμα 5.1: Απόδοση φβ συστήματος σε συνδυασμό με τη βροχόπτωση

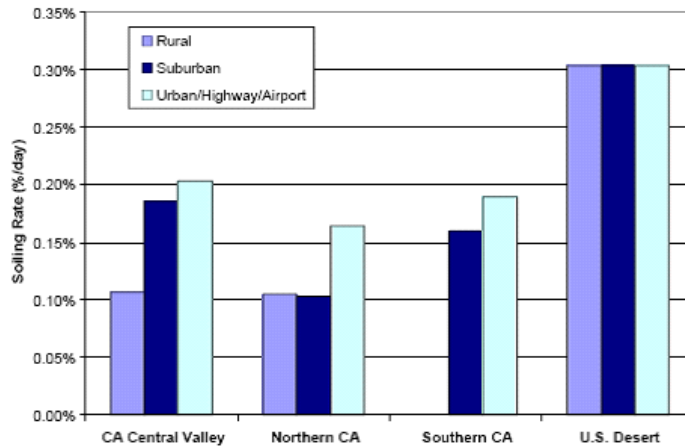
Όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 5.1, η παρατηρούμενη μείωση στην απόδοση του συστήματος εμφανίζεται σχεδόν γραμμική κατά τη διάρκεια της περιόδου ξηρασίας. Ωστόσο, ο ρυθμός μείωσης κατά τη διάρκεια της περιόδου ξηρασίας δεν είναι ίδιος για όλα τα συστήματα και εξαρτάται από το επίπεδο δραστηριότητας στο άμεσο περιβάλλον του συστήματος. Με τα δεδομένα αυτά και με στόχο την ακριβέστερη πρόβλεψη της επίδρασης της ρύπανσης στην ενεργειακή απόδοση των φβ συστημάτων, συνίσταται η εφαρμογή ενός γραμμικού μοντέλου μείωσης της απόδοσης.

Από τα δεδομένα της παραπάνω μελέτης [24] παρατηρούμε ότι κάποια φβ συστήματα παρουσιάζουν μία “περίοδο χάριτος” που ακολουθεί μετά την τελευταία ανοιξιάτικη βροχή. Πιο συγκεκριμένα, στην περίοδο αυτή η ρύπανση είναι αμελητέα ή με άλλα λόγια, ο ρυθμός μείωσης της απόδοσης λόγω ρύπανσης είναι σημαντικά μικρότερος σε σχέση με το μεταγενέστερο τμήμα της περιόδου ξηρασίας. Στο σχήμα 5.1, απεικονίζεται το εν λόγω φαινόμενο. Η τελευταία αξιοσημείωτη βροχόπτωση την άνοιξη συνέβη στα τέλη Απριλίου, αλλά ο ρυθμός μείωσης της απόδοσης δεν αρχίζει να αυξάνεται αισθητά μέχρι και τα μέσα Ιουνίου. Οι παρατηρούμενες περίοδοι χάριτος για περιοχές που εκδήλωσαν μια τέτοια συμπεριφορά είναι, όπως αναφέρεται, 20-50 ημέρες. Ωστόσο, άλλες τόσες περιοχές δεν παρουσίασαν την εν λόγω περίοδο χάριτος. Ένα άλλο παράδειγμα μη ομοιόμορφης συμπεριφοράς συνιστά η απρόβλεπτη συμπεριφορά της απόδοσης του συστήματος που εκδηλώνεται έπειτα από μία ασθενή βροχόπτωση στα τέλη της άνυδρης περιόδου. Σε ορισμένες περιπτώσεις μια τέτοια βροχόπτωση μπορεί να προκαλέσει την απότομη μείωση της απόδοσης του συστήματος.

Οι ανώμαλες συμπεριφορές που μόλις περιγράφηκαν, υποδεικνύουν ότι είναι απαραίτητη περαιτέρω έρευνα σχετικά με την ποσότητα της βροχής που απαιτείται για τον πλήρη καθαρισμό ενός ΦΒ συστήματος, καθώς και προσεκτικότερη επιλογή της έναρξης και λήξης της καθορισμένης περιόδου ρύπανσης (άνυδρης περιόδου), προκειμένου να αποφευχθεί η απρόβλεπτη συμπεριφορά στο τέλος της περιόδου αυτής.

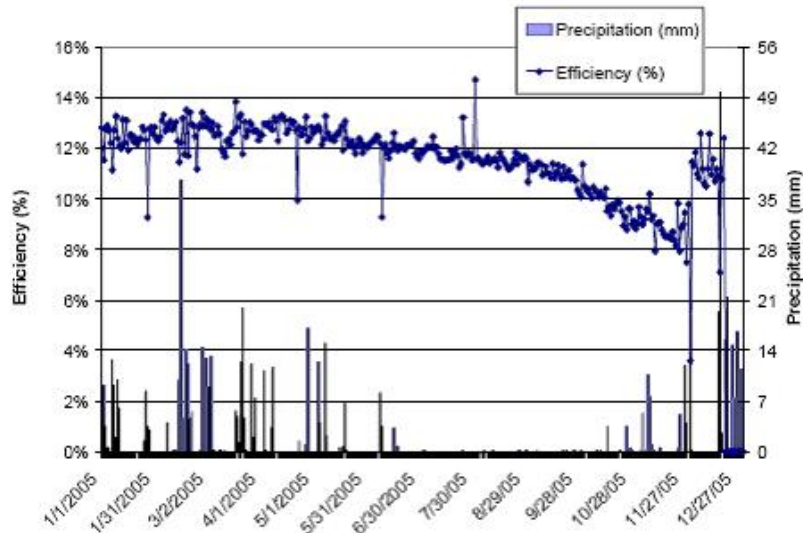
Για περιοχές που παρουσιάζουν υψηλά επίπεδα βροχόπτωσης (τουλάχιστον μια φορά το μήνα) δεν παρατηρείται αισθητή μείωση της απόδοσης. Τα επίπεδα

απόδοσης για συστήματα εγκατεστημένα σε τέτοιες περιοχές παραμένουν σχετικά σταθερά καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, επιβεβαιώνοντας έτσι ότι η ρύπανση σε ΦΒ συστήματα αυτών των περιοχών δεν επηρεάζει σημαντικά την ενεργειακή τους παραγωγή. Ωστόσο, κάποια άλλα συστήματα παρουσιάζουν τη χαρακτηριστική σταδιακή μείωση στην απόδοση που περιγράφεται παραπάνω. Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η μέση ημερήσια απώλεια στην απόδοση κάθε συστήματος για συγκεκριμένο συνδυασμό περιοχής.



Σχήμα 5.2: Μέση ημερήσια τιμή απωλειών ρύπανσης για διαφορετικές τοποθεσίες και τύπους περιβάλλοντος

Γενικά, υποστηρίζεται ότι 5mm (0.2in) βροχής αποτελούν επαρκή ποσότητα για τον πλήρη καθαρισμό των φβ συστημάτων. Παρ' όλα αυτά, η ανάλυση που περιγράφεται εδώ, συμπεραίνει ότι σε κάποια συστήματα απαιτείται σημαντικά μεγαλύτερη ποσότητα βροχόπτωσης για τον πλήρη καθαρισμό των πλαισίων τους. Για παράδειγμα, το σχήμα 5.3 παρουσιάζει τις μετρηθείσες τιμές απόδοσης και βροχόπτωσης ενός φβ συστήματος στη βόρεια California. Αρκετά συμβάντα βροχόπτωσης το φθινόπωρο, πάνω από 5 mm (0.2in), απέτυχαν να καθαρίσουν πλήρως το σύστημα. Η απόδοση του συστήματος συνέχισε να μειώνεται έως ότου ένα συμβάν βροχόπτωσης 20mm (0.82in) την 1η Δεκεμβρίου καθάρισε πλήρως τα πλαίσια. Το γεγονός αυτό είχε σαν συνέπεια την άμεση αύξηση της απόδοσης του συστήματος από 7.5% σε 12.5%, αύξηση της τάξης του 40%.

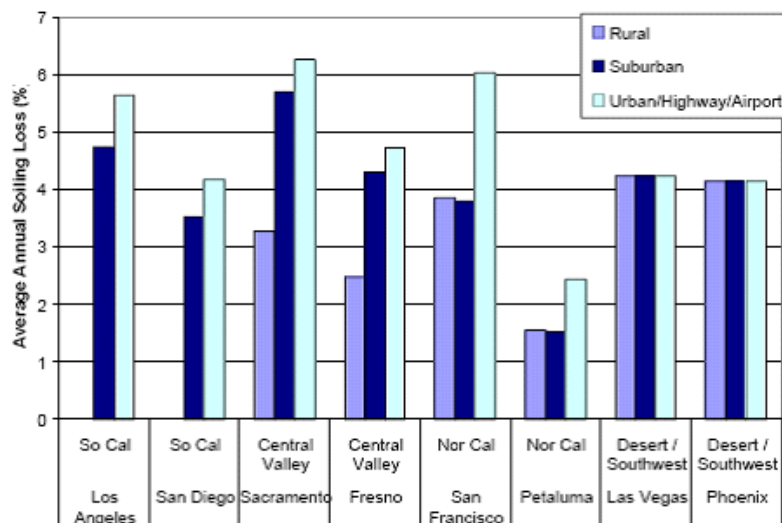


Σχήμα 5.3: Απόδοση φβ συστήματος σε συνδυασμό με τη βροχόπτωση

Έχει αποδειχθεί ότι δεν υπάρχει μια συγκεκριμένη ποσότητα βροχής ικανή να καθαρίσει όλα τα συστήματα. Στην πραγματικότητα, η απόδοση του συστήματος είναι δυνατόν να μειωθεί μετά από μία ασθενή βροχόπτωση, αντίθετα με ότι αναμένεται. Επίσης, εκτιμάται ότι και η ένταση της βροχής είναι πιθανό να επιδρά στον επαρκή καθαρισμό ή μη του συστήματος.

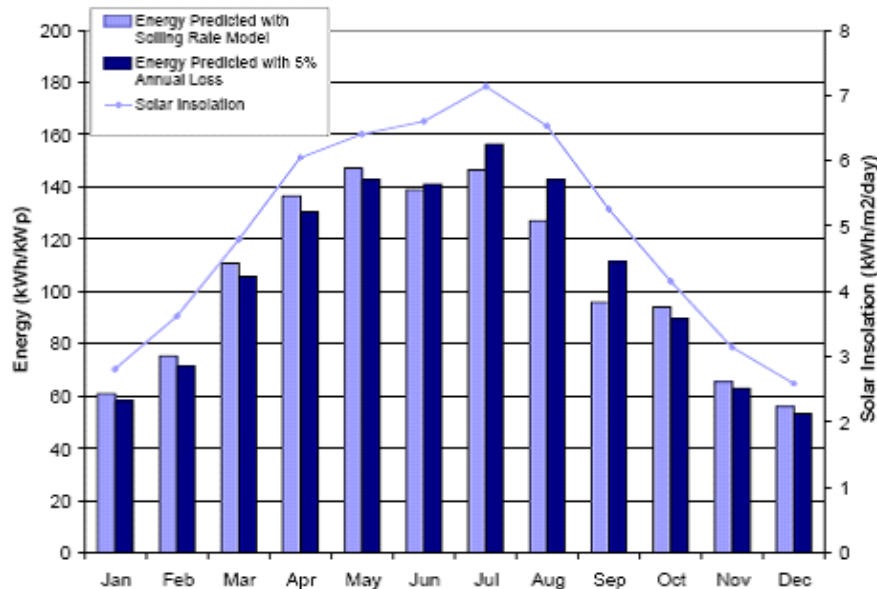
5.1 Μέσες ετήσιες απώλειες λόγω ρύπανσης

Το μοντέλο που προκύπτει με την εφαρμογή της γραμμικής μεθόδου μείωσης των απωλειών λόγω ρύπανσης συγκρίθηκε με την περίπτωση στην οποία υποτίθεται σταθερός παράγοντας ρύπανσης SF, ίσο με 5% για όλο το έτος. Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζεται η μέση ετήσια απώλεια ενέργειας που οφείλεται στη ρύπανση και κυμαίνεται μεταξύ 1.5% και 6.2%.



Σχήμα 5.4: Μέσες ετήσιες απώλειες λόγω ρύπανσης

Στο σχήμα 5.5 παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις της μηνιαίας ενεργειακής απόδοσης ενός έτους, για ένα τυπικό φβ σύστημα εγκατεστημένο στο Los Angeles, CA, όπως προκύπτουν από τα δύο μοντέλα: το μοντέλο που προκύπτει με την εφαρμογή της γραμμικής μεθόδου μείωσης των απωλειών λόγω ρύπανσης (πλήρες μοντέλο) και αυτό που λαμβάνει ένα σταθερό παράγοντα ρύπανσης SF ίσο με 5% ετησίως.



Σχήμα 5.5: Μηνιαία προβλεπόμενη από δύο μοντέλα απόδοση

Έχει διαπιστωθεί ότι η απόδοση των φβ συστημάτων μειώνεται κατά μέσο όρο 0.2% την ημέρα απουσία βροχής, σε ξηρά κλίματα. Η ημερήσια αυτή μείωση ισοδυναμεί με μια ετήσια ενεργειακή απώλεια της τάξεως του 1.5% – 6.2% ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης. Τα περισσότερα διαθέσιμα προγράμματα προσομοίωσης ΦΒ συστημάτων υιοθετούν την ύπαρξη ενός σταθερού παράγοντα απωλειών ρύπανσης καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Το πλήρες μοντέλο που περιγράφεται στην ενότητα αυτή αποτελεί βελτίωση της κλασικής υπόθεσης ενός σταθερού παράγοντα και ενσωματώνει τις απώλειες λόγω ρύπανσης που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια περιόδων ξηρασίας.

5.2 Οικονομική Ανάλυση

Το φαινόμενο της ρύπανσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι αρκετά σημαντικό ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονα ξηρό κλίμα. Για την εκτίμηση του οικονομικού αντίκτυπου που μπορεί να έχει η ρύπανση και για τον προσδιορισμό του οικονομικά βέλτιστου χρόνου για τον χειροκίνητο καθαρισμό ενός φβ συστήματος, είναι απαραίτητη η κατανόηση της επίδρασης της ρύπανσης – ρυθμός και δριμύτητα – στη μείωση της απόδοσης.

Η ρύπανση των φβ συστημάτων αποτελεί έναν από τους κυριότερους παράγοντες απωλειών υπό τον έλεγχο του διαχειριστή του συστήματος. Εντούτοις, ο καθαρισμός των φβ συστοιχιών, ιδιαίτερα συστημάτων μεγάλης κλίμακας -διασυνδεδεμένων ή μη-, μπορεί να στοιχίσει ένα σημαντικό χρηματικό ποσό σε εργατικό δυναμικό και

πρώτες ύλες. Συνεπώς, είναι σημαντικός ο χαρακτηρισμός και η πρόβλεψη του ρυθμού και της δριμύτητας της ρύπανσης για την εξεύρεση μιας οικονομικά βέλτιστης λύσης αναφορικά με τη συχνότητα καθαρισμού. Ο ρυθμός ρύπανσης, ή ισοδύναμα ο ρυθμός με τον οποίο μειώνεται η ισχύς εξόδου του συστήματος σε πρότυπες συνθήκες αναφοράς (STC) ανά ημέρα, εξαιτίας της συσσώρευσης ρύπων στις συστοιχίες, θεωρείται προσεγγιστικά γραμμικός συναρτήσεως του χρόνου, στις εκάστοτε περιόδους ξηρασίας. Τα συστήματα υπό εξέταση κατατάσσονται σε ομάδες βάσει της γεωγραφικής περιοχής και του τύπου περιβάλλοντος, προκειμένου να μελετηθούν οι διαφοροποιήσεις στους ρυθμούς ρύπανσης μεταξύ των τοποθεσιών. Μέσοι ρυθμοί ρύπανσης προσδιορίζονται για κάθε συνδυασμό γεωγραφικής περιοχής – τύπου περιβάλλοντος και χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης των ετήσιων απωλειών ενέργειας λόγω ρύπανσης των φβ συστημάτων.

Τα αποτελέσματα της παραπάνω μελέτης [24] και το μοντέλο πρόβλεψης υποδηλώνουν ότι η μέση μείωση της απόδοσης, εξαιτίας της ρύπανσης σε ξηρά κλίματα, συντελείται σε βαθμό 0.002 kWh/kWp/ημέρα απουσία βροχής. Κάτι τέτοιο, ισοδυναμεί με ετήσια ενεργειακή απώλεια της τάξης του 2-6% περίπου, ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή και τον τύπο περιβάλλοντος. Το μοντέλο πρόβλεψης επικυρώνεται μέσω μετρηθέντων τιμών απόδοσης του συστήματος και, όπως προκύπτει, επιτυγχάνεται βελτίωση της ακρίβειας της τάξης του 3.5% ανάλογα με την περιοχή και τον τύπο περιβάλλοντος (συγκριτικά με μια παραδοσιακή προσέγγιση που θεωρεί σταθερές απώλειες λόγω ρύπανσης κατά τη διάρκεια του έτους ίσες με 5%). Κατά μέσο όρο, η ακρίβεια του μοντέλου, ή ισοδύναμα ο βαθμός στον οποίο η προβλεπόμενη απόδοση προσεγγίζει την πραγματική-μετρηθείσα βελτιώνεται κατά 1.5%. Η απόδοση των φβ συστημάτων διατηρείται σχετικά σταθερή κατά τη διάρκεια βροχερών περιόδων σε περιοχές με ξηρό κλίμα, υποδηλώνοντας ότι στο διάστημα αυτό οι απώλειες λόγω ρύπανσης παραμένουν σε μια ελάχιστη τιμή. Αναφέρεται επίσης μια σύντομη “περίοδος χάριτος” κατά τη διάρκεια της οποίας ο ρυθμός ρύπανσης είναι αμελητέος αμέσως μετά την τελευταία βροχόπτωση.

Με βάση τα αποτελέσματα της έρευνας [24], προκύπτει ότι η ρύπανση είναι δυνατόν διαφοροποιείται ακόμη και στην ίδια τοποθεσία, από χρόνο σε χρόνο. Ως εκ τούτου, για την πληρέστερη ποσοτικοποίηση των παραπάνω επιδράσεων, απαιτείται εξέταση των συστημάτων για εκτενέστερες χρονικές περιόδους.

Στα πλαίσια της έρευνας [24], ο καθαρισμός των συστημάτων γίνεται οικονομικά συμφέρων για τιμές ενέργειας περίπου 0.25\$/kWh και άνω, σε μια τυπική περιοχή της νότιας California. Καθώς οι απώλειες λόγω ρύπανσης ποικίλλουν σημαντικά ανάλογα με την περιοχή και τον τύπο περιβάλλοντος, θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη τόσο στο σχεδιασμό όσο και στη λειτουργία των φβ συστημάτων, ιδιαίτερα δε όταν ξεπερνούν κάποιο όριο και είναι πλέον οικονομικά συμφέρουσα η επιλογή του καθαρισμού.

Παραπομπές: [24], [25]

6. Συμπεράσματα

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών έχει μεγάλες προοπτικές ανάπτυξης για το μέλλον. Το γεγονός ότι συγκαταλέγεται στις ήπιες μορφές ενέργειας και μπορεί η κάθε χώρα να τα χρησιμοποιήσει έτσι ώστε να διαφυλάξει την ενεργειακή της ανεξαρτησία (σε όποιο ποσοστό είναι αυτό δυνατό), δίνει την δυνατότητα στα φωτοβολταϊκά συστήματα μέρα με τη μέρα να κάνουν σημαντικά βήματα εξέλιξης. Τέλος σε αυτούς τους δύσκολους καιρούς που διανύει η ανθρωπότητα τόσο με την ατμοσφαιρική ρύπανση και την υπερθέρμανση του πλανήτη, όσο και με την δύσκολη οικονομική κατάσταση αρκετών χωρών, τα φωτοβολταϊκά δίνουν την απάντηση με την προσφορά καθαρής ενέργειας και με την δημιουργία νέων θέσεων εργασίας αντίστοιχα.

Το μεγάλο μειονέκτημα των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι το υψηλό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο γίνονται προσπάθειες για να μειωθεί και αυτό είναι φανερό τα τελευταία χρόνια. σημαντικό ρόλο στην μείωση του κόστους των φωτοβολταϊκών παίζουν και οι κυβερνήσεις. Μια υγιείς και σωστή βιομηχανία μπορεί να προσφέρει θέσεις εργασίας, να καλύψει τις ανάγκες της χώρας για φωτοβολταϊκά συστήματα και να δημιουργήσει σημαντικά οικονομικά οφέλη για τη χώρα.

Στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας μελετήθηκαν εν μέρει οι παράγοντες μείωσης της ενεργειακής απόδοσης των φωτοβολταϊκών σταθμών και κυρίως οι επιδράσεις που επιφέρει ο παράγοντας της ρύπανσης. Τέλος, αναφερθήκαμε στις τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών πλαισίων και στις βασικές δομές λειτουργίας τους.

Από την ανάλυση που επιχειρείται στην παρούσα εργασία, προκύπτει ότι τα περισσότερα διαθέσιμα προγράμματα προσομοίωσης φβ συστημάτων υιοθετούν την ύπαρξη ενός σταθερού παράγοντα απωλειών ρύπανσης καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Το εν λόγω μοντέλο [24], ωστόσο, αποτελεί βελτίωση της κλασικής αυτής υπόθεσης, προτείνοντας γραμμική μεταβολή του συγκεκριμένου παράγοντα προκειμένου να προσεγγιστούν κατά το δυνατόν ορθότερα οι απώλειες λόγω ρύπανσης, οι οποίες συντελούνται κατά τη διάρκεια περιόδων ξηρασίας.

Επιπλέον, καθώς οι απώλειες λόγω ρύπανσης ποικίλλουν σημαντικά ανάλογα με την περιοχή και τον τύπο περιβάλλοντος, θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη τόσο στο σχεδιασμό όσο και στη λειτουργία των φβ συστημάτων, ιδιαίτερα δε στην περίπτωση που ξεπερνούν κάποιο όριο και είναι πλέον οικονομικά συμφέρουσα η επιλογή ενός χειροκίνητου καθαρισμού.

Βιβλιογραφία

[1] Ιωάννης Ε. Φραγκιαδάκης, “ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ”, Εκδόσεις Ζήτη Θεσσαλονίκη, 2η έκδοση 2007

[2] <http://www.allaboutenergy.gr/>

[3] <http://el.wikipedia.org/>

[4] <http://www.helapco.gr/>

[5] Θωμάς Ζαχαρίας, “ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ Ι”, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2006

[6] Thomas Markvart, “ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ ΑΠΟ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ”, Εκδόσεις I-N, 2003

[7] Adolf Goetzberger, Joachim Knobloch, Bernhard Voss, “CRYSTALLINE SILICON SOLAR CELLS ” Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, Germany

[8] First Course on Power Electronics and Drivers, Ned Mohan, Professor of Power Electronics and Systems, University of Minnesota, 2003 Edition.

[9] <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>

[10] Κ. Καγκαράκης, “ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ”, Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, 1992

[11] Θωμάς Ζαχαρίας, “ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΙΙ”, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2007

[12] http://exikonomisi.blogspot.com/2007/11/blog-post_14.html

[13] Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική, Στεφάνος Χ. Χαραλάμπους Καθηγητης Α.Π.Θ. , εκδόσεις Ζήτη 1981 Θεσσαλονίκη

[14] Φυσική Θάνος Δημοσθένους, Παπαχρήστου Παναγιώτης, Σκουντζός Παναγιώτης Ο.Ε.Δ.Β για τη δεύτερη τάξη του 1ου κύκλου του Τ.Ε.Ε

[15] Φυσική, Θερμότητα – Ηλεκτρισμός, σελ 198-199, Δ.Σ. Κυριάκος, αναπληρωτής καθηγητής, Γ.Λ. Μπλέρης, καθηγητής τμήματος Φυσικής Α.Π.Θ. εκδόσεις Ζήτη 1998 Θεσσαλονίκη

[16] Αρχές Γενικής Χημείας σελ 48-50 Γ Μανουσάκη, Π Ασλανίδη

- [17] Electronic Principles, Fifth Edition, Malvino σελ 39 ως 42, εκδόσεις Α. Τζιόλα, 1995 Θεσσαλονίκη
- [18] Γενική Ηλεκτρονική τόμος Α σελ 151 ως 157 Κ.Α. Καρύμπακας, Καθηγητής της Ηλεκτρονικής της Σ.Θ.Ε. του Α.Π.Θ. 1988 Θεσσαλονίκη
- [19] Εγχειρίδιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για δυνητικούς χρήστες, Σύνταξη Τομέας εκπαίδευσης ΚΑΠΕ, 2006 Αθήνα
- [20] Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Antonio Luque and Steven Hegedus
- [21] Πρακτικά Όγδοου Συνεδρίου για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Θεσσαλονίκη 29-31 Μαρτίου 2006, Ινστιτούτο Ηλιακής Ενέργειας.
- [22] Τεχνολογίες Παραγωγής Φωτοβολταϊκών Γεννητριών Κρυσταλλικού Πυριτίου και Λεπτών Υμενίων και η Τρέχουσα κατάσταση στην αγορά Φωτοβολταϊκών Σ. Τσελεπής ΚΑΠΕ 2ο Εθνικό Συνέδριο: Η Εφαρμογή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας - Προτεραιότητες σε Συνθήκες Απελευθερωμένης Αγοράς " Αθήνα, 19 – 21 Μαρτίου 2001
- [23] King D. L., Boyson W. E., Kratochvil J. A. "Analysis of Factors Influencing the Annual Energy Production of Photovoltaic Systems", Albuquerque, New Mexico, 2002
- [24] Kimber A., Mitchell L., Nogradi S., Wenger H. "The Effect of Soiling on Large Grid-Connected Photovoltaic Systems in California and Southwest Region of The United States ", Proceedings of the 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii, USA, 2006
- [25] Πέππα Α. "Μοντέλο Ενεργειακής Απόδοσης Φωτοβολταϊκής Συστοιχίας", Αθήνα, 2007
- [26] ΚΕΝΤΡΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΚΑΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (www.cres.gr)
- [27] Μελέτη Εγκατάστασης Φωτοβολταϊκής Γεννήτριας στο Νέο Κτίριο των Ηλεκτρολόγων του Ε.Μ.Π., Μεταπτυχιακή Διπλωματική, Δημητρόπουλος Δημήτριος, Ε.Μ.Π., Σχολή Η.Μ.Μ.Υ., Αθήνα 2004

