



Τ.Ε.Ι Κρήτης

**Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τμήμα Μηχανολογίας**

Πτυχιακή Εργασία

**Εξωτερικές συνθήκες που επηρεάζουν την απόδοση των
φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων.**



**Όνοματεπώνυμο σπουδαστή:
Γκεβοργκιάν Αρμέν**

A.M: 4759

**Επιβλέπων Καθηγητής:
Δρ. Νεκτάριος Βιδάκης**

**Ηράκλειο,
Ιούνιος, 2014**

Πρόλογος

Σκοπός της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η συλλογή, ταξινόμηση και επεξεργασία μετρήσεων απόδοσης φωτοβολταϊκών καθώς και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την απόδοση των εγκαταστάσεων αυτών. Αρχικά θα γίνει συλλογή και ταξινόμηση μετρήσεων από εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών, δίνοντας έμφαση στη συλλογή, όχι μόνο στοιχείων σχετικών με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και μετρήσεων των εξωτερικών συνθηκών που επικρατούν στις περιοχές των εγκαταστάσεων, όπως ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία πάνελ, ταχύτητα ανέμου, κτλ. Στη συνέχεια θα συσχετιστούν αυτά τα δεδομένα προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την απόδοση των εγκαταστάσεων σε σχέση με τις εξωτερικές συνθήκες.

Συγκεκριμένα οι μετρήσεις θα παρθούν από τρία ΦΒ πάρκα (Μελιδοχώρι, Κόρτε Γκούλε και Μάκρες) διότι μόνο σε αυτά είχαμε ημερήσιες καταγραφές ανά ώρα για ένα ολόκληρο χρόνο χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα και σφάλματα στα αισθητήρια όργανα. Πάρθηκαν μετρήσεις όπως η ταχύτητα ανέμου, η εξωτερική θερμοκρασία, η θερμοκρασία πανέλ, η ισχύς, η συνολική ενεργειακή παραγωγή, η ηλιακή ακτινοβολία και η τάση DC.

Αρχικά, σύμφωνα με τα δεδομένα που θα συλλέξουμε θα φτιάξουμε χαρακτηριστικές καμπύλες και γραφικές παραστάσεις για να δούμε κατά πως και πόσο οι κυριότεροι εξωτερικοί παράμετροι αλληλεπιδρούν στην απόδοση των ΦΒ συστημάτων. Θα γίνει μια προσπάθεια προσομοίωση της απόδοσης των ΦΒ συστημάτων με την μεταβολή της ταχύτητας ανέμου και μια σύγκριση των αποτελεσμάτων των τριών ΦΒ πάρκων. Θα δούμε τις αποκλίσεις των πειραματικών μετρήσεων από τις τιμές σε Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς (STC) και τη συμπεριφορά του φβ στοιχείου υπό πραγματικές συνθήκες. Επίσης θα γίνει μία σύγκριση της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου κατά τη θερινή και χειμερινή περίοδο.

Ύστερα θα γίνει μελέτη για το πως η θερμοκρασία λειτουργίας ενός στοιχείου έχει άμεση επίδραση στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Θα δούμε ότι οι μεγάλες θερμοκρασίες κυττάρου έχουν αρνητική επίδραση στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Στη συνέχεια, θα μελετηθεί η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία όπως ήταν αναμενόμενο, θα είναι θετική αλλά οι μεγάλες τιμές της συνεπάγονται τις περισσότερες φορές μεγάλες θερμοκρασίες λειτουργίας που επηρεάζουν αρνητικά το βαθμό απόδοσης. Τέλος θα δούμε πως η ταχύτητα του ανέμου και η κατεύθυνση του παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου καθώς οι μεγάλες ταχύτητες ανέμου έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας του ΦΒ συστήματος, με αποτέλεσμα την καλύτερη απόδοση και καλύτερη ηλεκτρική παραγωγή των ΦΒ συστημάτων.

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΟΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	6
1.1 Περιγραφή Α.Π.Ε.....	6
1.1.1 Η ηλιακή ενέργεια.....	6
1.1.2 Η αιολική ενέργεια.....	7
1.1.3 Η υδροηλεκτρική-κυματική ενέργεια.....	7
1.1.4 Η βιομάζα.....	7
1.1.5 Η γεωθερμία.....	8
1.1.6 Η τεχνολογία υδρογόνου.....	8
1.2 Το Διεθνές ενδιαφέρον για το περιβάλλον.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ο ΗΛΙΟΣ ΚΑΙ Η ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....	10
2.1 Χαρακτηριστικά ηλιακής ακτινοβολίας.....	10
2.2 Ενεργειακή απολαβή ηλιακής ακτινοβολίας - Γεωγραφική κατανομή.....	12
2.3 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά.....	15
2.4 Μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική-φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ.....	20
3.1 Οι ηλιακές κυψέλες.....	20
3.1.1 Η δομή των ηλιακών κυψελών.....	21
3.1.2 Τα είδη των ηλιακών κυψελών.....	21
3.2 Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.....	24
3.3 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκής κυψέλης.....	25
3.3.1 Ισοδύναμο κύκλωμα.....	25
3.3.2 Τάση ανοιχτού κυκλώματος – ρεύμα βραχυκύκλωσης.....	26
3.3.3 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V φωτοβολταϊκής κυψέλης.....	27
3.3.4 Σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος (ΣΜΙ).....	29
3.3.5 Καμπύλη φόρτου.....	30
3.3.6 Εξάρτηση ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ΦΒ στοιχείου από την πυκνότητα ισχύος της ΗΜ ακτινοβολίας.....	31
3.3.7 Παράγων πλήρωσης (FF – Fill Factor).....	32
3.3.8 Επίδραση θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ΦΒ στοιχείου.....	33
3.3.9 Απόδοση φωτοβολταϊκής κυψέλης.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΦΒ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	38
4.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη.....	38
4.1.1 Πρότυπες Συνθήκες.....	38
4.1.2 Ονομαστική ισχύς ενός φβ πλαισίου.....	38
4.1.3 Ονομαστική Θερμοκρασία Λειτουργίας φβ κυψελίδας (NOCT).....	39
4.1.4 Συνθήκες λειτουργίας της φβ κυψελίδας κάτω από τις οποίες η θερμοκρασία της ισούται με την ονομαστική τιμή της (NOCT).....	39
4.2 Απώλειες και συντελεστής απόδοσης.....	40

4.2.1 Συντελεστής απόδοσης φωτοβολταϊκού πλαισίου.....	40
4.2.2 Συντελεστής απόδοσης μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας (array).....	41
4.2.3 Δίοδοι αντεπιστροφής.....	42
4.2.4 Συντελεστής γήρανσης.....	44
4.2.5 Οπτικές ενεργειακές απώλειες.....	45
4.2.5.1 Απώλειες λόγω διακύμανσης του ηλιακού φάσματος.....	45
4.2.5.2 Απώλειες λόγω χαμηλής ακτινοβολίας.....	45
4.2.5.3 Απώλειες λόγω ρυπανσης και επικάθησης αιωρούμενων σωματιδίων.....	45
4.2.6 Απώλειες λόγω ανακρίβειας ποιοτικών χαρακτηριστικών πλαισίου (ModuleQuality Loss).....	46
4.2.7 Απώλειες λόγω αναντιστοιχίας μεταξύ των χαρακτηριστικών των πλαισίων (Mismatch Loss).....	46
4.2.8 Απώλειες λόγω σκίασης.....	47
4.2.9 Ωμικές απώλειες λόγω καλωδιώσεων.....	48
4.2.10 Θερμικές απώλειες λόγω της θερμοκρασίας των κυψελίδων.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΦΒ ΠΑΡΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ 80KW.....	54
5.1 Περιγραφή ΦΒ πάρκων απ' όπου έγινε η συλλογή δεδομένων.....	54
5.2 Απαραίτητα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός ΦΒ πλαισίου.....	55
5.3 Συλλογή και καταγραφή δεδομένων.....	56
5.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες από το σύνολο των μετρήσεων.....	67
5.5 Προσομοίωση της απόδοσης των ΦΒ συστημάτων με την μεταβολή της ταχύτητας ανέμου.....	74
5.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων των τριών ΦΒ πάρκων.....	75
5.7 Σύγκριση λειτουργίας πάρκου τη θερινή και τη χειμερινή περίοδο.....	79
5.8 Αποκλίσεις των πειραματικών μετρήσεων από τις τιμές σε Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς.....	80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΟΥ ΕΠΙΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ.....	82
6.1 Η συμπεριφορά του φβ στοιχείου υπό πραγματικές συνθήκες.....	82
6.2 Επίδραση της θερμοκρασίας στις χαρακτηριστικές παραμέτρους φβ πάρκου.....	82
6.3 Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στις χαρακτηριστικές παραμέτρους φβ πάρκου.....	87
6.4 Επίδραση της ταχύτητας ανεμου στις χαρακτηριστικές παραμέτρους φβ πάρκου...94	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	96
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	98

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΟΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ονομάζονται όλες εκείνες οι πηγές που δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον και εκμεταλλεύονται ανεξάντλητα αποθέματα όπως ο ήλιος και η γεωθερμία ή περιοδικά επαναλαμβανόμενους φυσικούς κύκλους όπως του αέρα και του νερού. Στις ΑΠΕ περιλαμβάνονται επίσης η βιομάζα και η τεχνολογία υδρογόνου.

Το Πρωτόκολλο του Κιότο (1997) που προβλέπει την μείωση των εκπομπών των έξι αερίων του θερμοκηπίου (διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, υποξείδιο του αζώτου, υδροφθοράνθρακες, πλήρως φθοριομένοι υδρογονάνθρακες και εξαφθοριούχο θείο) οδήγησε στην ανάπτυξη των ΑΠΕ.

1.1 Περιγραφή Α.Π.Ε.

1.1.1 Η ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια ανεξάντλητη μορφή ενέργειας που προέρχεται από τον ήλιο.

Κύριες εφαρμογές της είναι για την παραγωγή θερμότητας και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην πρώτη περίπτωση θερμαίνουμε κάποιο υγρό, συνήθως νερό, ενώ στην δεύτερη εκμεταλλευόμαστε τις ιδιότητες των φωτοβολταϊκών και μετατρέπουμε την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ισχύ. Επίσης παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορούμε να έχουμε χρησιμοποιώντας κάτοπτρα τα οποία συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα απορροφητή θερμότητας ο οποίος φέρει το ρευστό εργασίας (συνήθως συνθετικό έλαιο), το ρευστό θερμαίνεται και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού.

1.1.2 Η αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια είναι και αυτή μία ανεξάντλητη μορφή ενέργειας που προέρχεται από την δύναμη του ανέμου .

Η εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού γίνεται με την χρήση ανεμογεννητριών που παράγουν ηλεκτρική ισχύ και τη διοχετεύουν είτε στο δίκτυο (αιολικά πάρκα) είτε σε οικιακούς καταναλωτές (μικρές εφαρμογές).

1.1.3 Η υδροηλεκτρική-κυματική ενέργεια

Η υδροηλεκτρική ενέργεια όπως και οι παραπάνω αποτελεί αστείρευτη πηγή που εκμεταλλεύεται το νερό και χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας .

Χρησιμοποιούνται υδροστρόβιλοι για την μετατροπή της κινητικής ή δυναμικής ενέργειας του νερού, και ανάλογα με την υψομετρική διαφορά του νερού διακρίνονται σε σταθμούς χαμηλής (0-20 m) μέσης (20-100 m) και υψηλής πίεσης (> 100 m). Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί (ΥΗΣ) κατασκευάζονται είτε σε ποταμούς και εκμεταλλεύονται την φυσική ροή είτε με τεχνητά φράγματα .

Τα τελευταία χρόνια εκμεταλλεύομαστε και την ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων που αποτελεί μια σχετικά νέα τεχνολογία και βρίσκεται ακόμα σε πρώιμα στάδια εξέλιξης και ερευνών.

1.1.4 Η βιομάζα

Γενικά ως βιομάζα ορίζεται η ύλη που έχει οργανική προέλευση, όπως φυτικές ύλες, φυτικά και ζωικά υποπροϊόντα και κατάλοιπα, ακόμα και βιολογικά αστικά λύματα. Αποτελεί μια δεσμευμένη και αποθηκευμένη μορφή ενέργειας αποτέλεσμα του φαινομένου της φωτοσύνθεσης.

Η χρήση της βιομάζας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας οδήγησε στην καλλιέργεια ενεργειακών φυτών όπως το σιτάρι, το κριθάρι, ο αραβόσιτος, τα ζαχαρότευτλα, ο ηλιανθος και η ελαιοκράμβη. Αυτό είχε ως συνέπεια την αύξηση των τιμών των παραπάνω προϊόντων και ίσως έχει συντελέσει στην αποψίλωση

δασικών εκτάσεων για την δημιουργία ενεργειακών καλλιεργειών .

1.1.5 Η γεωθερμία

Γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμότητα της γης. Ανάλογα με τη θερμοκρασία με την οποία μεταφέρεται στην επιφάνεια, η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται για παραγωγή ηλεκτρισμού ($\theta > 80^\circ$), για θέρμανση κτιρίων, για θέρμανση θερμοκηπίων και εδαφών, για ιχθυοκαλλιέργειες και για θερμά λουτρά.

Η τεχνολογία εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας εξαρτάται από τη μορφή στην οποία βρίσκεται η γεωθερμική ενέργεια (ή γεωθερμικό δυναμικό) μέσα στη γη. Το γεωθερμικό δυναμικό μπορεί να ταξινομηθεί σε θερμά ξηρά πετρώματα με θερμοκρασία $100-150^\circ\text{C}$, σε υδροφόρους ορίζοντες με θερμοκρασίες 150°C ως $300+^\circ\text{C}$ που αποτελούν τα γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας, σε υδροφόρους ορίζοντες με θερμοκρασίες $25^\circ\text{C}-100+^\circ\text{C}$ που αποτελούν τα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας, σε υδροφόρους ορίζοντες με θερμοκρασίες $15^\circ\text{C}-30^\circ\text{C}$ και σε εδάφη με σταθερή θερμοκρασία 15°C παντού μερικά μέτρα κάτω από την επιφάνεια.

Οι κυριότερες εφαρμογές είναι, για θέρμανση με τη χρήση αντλιών θερμότητας για θερμοκρασίες μικρότερες των 25°C , για άμεση θέρμανση για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 25°C και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ειδικότερα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται εγκαταστάσεις ξηρού ατμού στις οποίες ο ατμός πηγαίνει άμεσα στον στρόβιλο, εγκαταστάσεις τύπου "flash" στις οποίες το ρευστό ψεκάζεται σε μια δεξαμενή που κρατιέται σε μια πολύ χαμηλότερη πίεση από ότι είναι το ρευστό, αναγκάζοντας μέρος του ρευστού να ατμοποιείται γρήγορα και τέλος εγκαταστάσεις με την χρήση δυαδικών συστημάτων (π.χ. κύκλος Kalina) που εκμεταλλεύονται το χαμηλό σημείο ζέσης και την υψηλή τάση ατμών σε χαμηλές θερμοκρασίες, ενός δευτερεύοντος ρευστού, σε σύγκριση με τον υδάτινο ατμό.

1.1.6 Η τεχνολογία υδρογόνου

Ουσιαστικά πρόκειται για κυψέλες καυσίμου που είναι μη στρεφόμενες συσκευές που παράγουν ηλεκτρική και θερμική ενέργεια από την χημική αντίδραση οξείδωσης του υδρογόνου χωρίς καύση.

Μια τυπική κυψέλη αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια που χωρίζονται από ένα

κατάλληλο ηλεκτρολυτικό καταλύτη με μορφή μεμβράνης. Το οξυγόνο οδηγείται στο ένα ηλεκτρόδιο (κάθοδος) και το υδρογόνο στο άλλο (άνοδος), το ρεύμα που παράγεται είναι συνεχές. Τα μειονεκτήματα αυτών των διατάξεων είναι το υψηλό κόστος, η έλλειψη υποδομών για παραγωγή, αποθήκευση και διανομή υδρογόνου.

1.2 Το Διεθνές ενδιαφέρον για το περιβάλλον

Η χρήση των ορυκτών καυσίμων και της πυρηνικής ενέργειας επηρέασε τις κλιματικές συνθήκες του πλανήτη, συσσώρευσε αέριους ρύπους στην ατμόσφαιρα, ρύπανε σε σημαντική έκταση τα επιφανειακά ύδατα, μείωσε τη βιοποικιλότητα και ακόμη μόλυνε περιοχές λόγω των πυρηνικών αποβλήτων. Η χρήση των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προκάλεσε και συνεχίζει να προκαλεί έντονη περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Η ανάγκη για παγκόσμιο περιορισμό των εκπομπών των αέριων ρύπων οδήγησε στην Παγκόσμια Συνδιάσκεψη του Ρίο το 1992, όπου, στο πλαίσιο της Συνθήκης για τις Κλιματικές Αλλαγές, οι 106 επικεφαλής των βιομηχανικών χωρών δεσμεύτηκαν μεταξύ τους να μειώσουν μέχρι το 2000 τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η δέσμευση αυτή ωστόσο δεν τηρήθηκε (π.χ. από τις ΗΠΑ). Στη συνέχεια στην Διάσκεψη του Βερολίνου, το Μάρτιο του 1995, η Γερμανία εξήγγειλε μείωση των εκπομπών άνθρακα κατά 30% έως το 2005.

Η Τρίτη Διακυβερνητική Διάσκεψη για το Κλίμα στο Κιότο το 1997 δεν άλλαξε το τοπίο, αφού όχι μόνο δεν τηρήθηκε η απόφαση για την περιβόητη μείωση στην εκπομπή ρύπων κατά 5% μέχρι το 2010, αλλά πολλές ευρωπαϊκές χώρες αύξησαν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Η Συνθήκη αναφέρει την εξαγορά δικαιωμάτων και ποσοστών ρύπων των λιγότερο αναπτυγμένων βιομηχανικών χωρών από τις πλέον αναπτυγμένες.

Σήμερα, η παγκόσμια αγορά φωτοβολταϊκών είναι της τάξεως του 1 δις δολαρίων με ετήσια παραγωγή 151 MW, αποτελώντας μόλις το 1% της παγκόσμιας παραγωγής. Στόχος της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι έως το 2020, οι χώρες να είναι λιγότερο εξαρτημένες από συμβατικά καύσιμα και ταυτόχρονα ενεργειακά αποτελεσματικές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ο ΗΛΙΟΣ ΚΑΙ Η ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

2.1 Χαρακτηριστικά ηλιακής ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία έχει ορισμένα χαρακτηριστικά τα οποία επηρεάζουν τις μεταβολές που προκαλεί στα διάφορα υλικά. Γενικά η ηλιακή ακτινοβολία προέρχεται από τις θερμοπυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του ήλιου. Σαν αποτέλεσμα των αντιδράσεων αυτών μεγάλες ποσότητες υδρογόνου μετατρέπονται σε ήλιο με τη σύγχρονη ελευθέρωση μεγάλων ποσών ενέργειας και με συνέπεια την ελάττωση της μάζας του ήλιου που συντελείται με ρυθμό 4.000.000 τόνους το δευτερόλεπτο . Σε αυτά τα ποσά ενέργειας που έφτασαν στη γη κατά το παρελθόν, οφείλεται και η δημιουργία όλων των ποσοτήτων πετρελαίου και άνθρακα που υπάρχουν στο εσωτερικό της γης. Η ηλιακή ακτινοβολία ταξιδεύει προς τη γη με ταχύτητα περίπου 300.000 χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο και μεταφέρει ενέργεια με τα κύματα (ή φωτόνια) της. Όταν γίνει φασματοσκοπική ανάλυση της ακτινοβολίας, εμφανίζονται τα διάφορα χρώματα που περιέχονται σε αυτή. Το σύνολο αυτών των χρωμάτων αποτελεί το φάσμα του ηλιακού φωτός. Σε κάθε χρώμα αντιστοιχεί μια συχνότητα. Στο ένα άκρο του φάσματος υπάρχει το κόκκινο χρώμα με συχνότητα $4,3 \times 10^{14}$ ταλαντώσεις το δευτερόλεπτο και στο άλλο άκρο το ιώδες χρώμα με συχνότητα $7,5 \times 10^{14}$ ταλαντώσεις το δευτερόλεπτο.

Ο χρόνος μιας ταλάντωσης ενός σημείου που βρίσκεται στη διεύθυνση μετάδοσης του κύματος ονομάζεται περίοδος (T). Η περίοδος είναι $1,3 \times 10^{-15}$ δευτερόλεπτα και για το κόκκινο $2,3 \times 10^{-15}$ δευτερόλεπτα. Η σχέση μεταξύ συχνότητας και περιόδου είναι :

$$T = 1 / f$$

Το μήκος κύματος λ είναι η απόσταση που διανύει το κύμα μέσα στο χρόνο της περιόδου και βρίσκεται από τον τύπο.

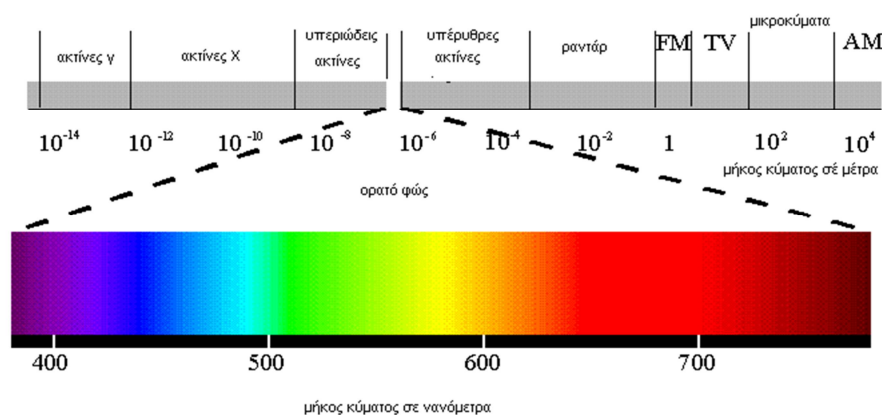
$$\lambda = U \times t$$

$$\text{Απόσταση} = \text{Ταχύτητα} \times \text{Χρόνος}$$

Ωστε το μήκος κύματος για το ιώδες είναι 400 nm και το μήκος κύματος για το κόκκινο είναι 700 nm (1 nm = 10⁻⁹ m)

Μεταξύ του κόκκινου και του ιώδους χρώματος περιλαμβάνεται το ορατό ηλιακό φάσμα που αποτελείται από όλα τα γνωστά χρώματα και περιλαμβάνει μόνο τα 44% περίπου της ηλιακής ακτινοβολίας .

Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας δεν περιορίζεται μεταξύ του κόκκινου και ιώδους άκρου. Αυτό σημαίνει ότι εκτός από τις ακτινοβολίες της ορατής περιοχής υπάρχουν και ακτινοβολίες αόρατες. Έτσι μετά το άκρο που βρίσκεται το κόκκινο υπάρχει η αόρατη υπέρυθη ακτινοβολία με μήκος κύματός μεγαλύτερο των 700 nm, που αποτελεί τα 50% περίπου της ηλιακής ακτινοβολίας. Τέλος, μετά το άκρο του ιώδους χρώματος υπάρχει η αόρατη υπεριώδης ακτινοβολία, με μήκος κύματος μικρότερο των 400 nm, που αποτελεί τα 6% περίπου της ηλιακής ακτινοβολίας (Εικόνα 1.1)



Εικόνα 1.1 – Φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας

Η ενέργεια E_{ϕ} κάθε φωτονίου βρίσκεται από τον τύπο:

$$E_{\phi} = h \times f \quad (3)$$

Η σταθερά του Planck h έχει την τιμή $6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \times \text{s}$. Το f είναι η συχνότητα του κύματος στο οποίο ανήκει το φωτόνιο.

Εφαρμόζοντας τον τύπο βρίσκεται ότι η ενέργεια κάθε φωτονίου του ορατού ηλιακού φάσματος κυμαίνεται μεταξύ της τιμής $2,85 \times 10^{-19}$ που έχει το φωτόνιο του κόκκινου χρώματος και της τιμής $4,97 \times 10^{-19}$ που έχει το φωτόνιο του ιώδους χρώματος.

Από όλες τις συχνότητες του ηλιακού φάσματος μόνο οι μεγάλες συχνότητες στις οποίες αντιστοιχούν φωτόνια σχετικά μεγάλης ενέργειας είναι δυνατό να προκαλέσουν ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Οι συχνότητες αυτές αποτελούν το 75% του φάσματος περίπου ενώ οι υπόλοιπες δεν προκαλούν αξιοσημείωτα αποτελέσματα στα φωτοβολταϊκά στοιχεία.

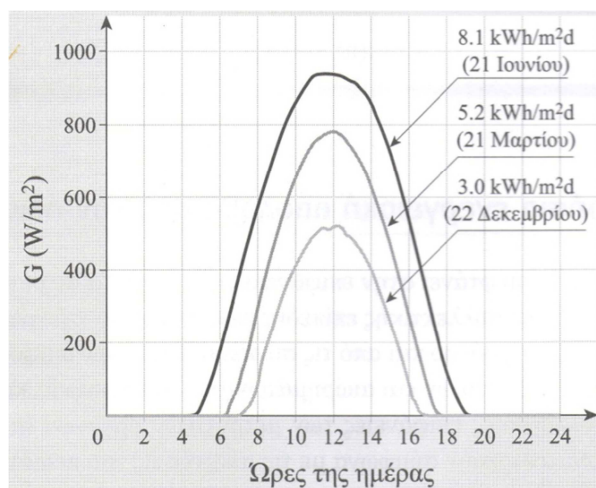
2.2 Ενεργειακή απολαβή ηλιακής ακτινοβολίας - Γεωγραφική κατανομή

Η ενέργεια ανά m^2 , που φτάνει στην επιφάνεια της Γης μέσα σε μια μέρα, εξαρτάται από την κλίση της συλλεκτικής επίπεδης επιφάνειας, το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, τη μέρα του χρόνου και από τις συγκεντρώσεις των διαφόρων αερίων, υγρών και στερεών συστατικών και αιωρημάτων της ατμόσφαιρας, κατά την ημέρα εκείνη. Οι συλλεκτικές επιφάνειες των μετρητικών οργάνων (αισθητήρων), μπορεί να προσανατολιστούν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του πειράματος και τις προδιαγραφές των οργάνων αυτών.

Προκειμένου, όμως, να υπάρχουν συγκρίσιμα στοιχεία, σε διεθνή κλίμακα, αναφερόμαστε σε μετρήσεις με αισθητήρες, οι οποίοι τοποθετούνται με τη συλλεκτική τους επιφάνεια, οριζόντια. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μέσες ημερήσιες τιμές της πυκνότητας ισχύος και της πυκνότητας ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας, σε οριζόντια επιφάνεια, μέσα σε κάθε μήνα και μέσα στο έτος. Για να αξιοποιηθούν αυτά τα μετεωρολογικά στοιχεία σε πρακτικές εφαρμογές (π.χ. σε ενεργειακές μελέτες), απαιτούνται μετρήσεις που να καλύπτουν περίοδο πολλών ετών (π.χ. 10 έως 30 ετών). Σε περιπτώσεις που λείπουν στοιχεία μακράς περιόδου για κάποιο τόπο, μπορούν να αξιοποιούνται στοιχεία που έχουν συλλεχθεί σε μικρότερες χρονικές περιόδους, με την επιφύλαξη τις μικρότερης αξιοπιστίας τους.

Τυπικές μορφές εξέλιξης μέσα στην ημέρα, της πυκνότητας ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο (G (W/m^2)), απεικονίζονται στο σχήμα 1.2. Στο ίδιο σχήμα σημειώνονται και οι αντίστοιχες ενεργειακές πυκνότητες H (σε kWh/m^2d), οι οποίες προκύπτουν ως ολοκλήρωμα ή «εμβαδόν» κάτω απ' την αντίστοιχη καμπύλη. Σημειώνεται πάντως, ότι, κατά τη διάρκεια μερικής παρουσίας σύννεφων,

γύρω απ' την κατεύθυνση του ήλιου, μπορεί να παρατηρηθούν τιμές της πυκνότητας ισχύος μεγαλύτερες των τιμών που θα καταγράφονταν χωρίς την παρουσία τους. Οι συγκεκριμένες γραφικές παραστάσεις προέρχονται από μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο "Φωτοβολταϊκό Πάρκο", στο Ηράκλειο της Κρήτης, με γεωγραφικό πλάτος $35,5^\circ$ και γεωγραφικό μήκος $25,2^\circ$.

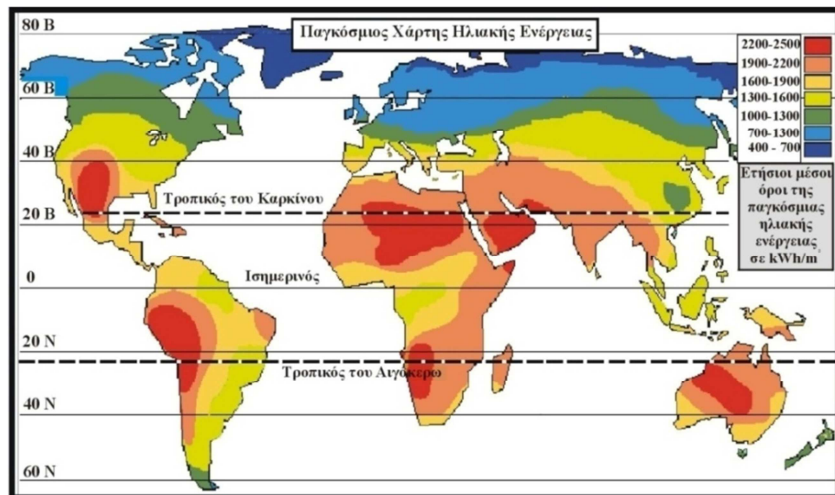


Σχήμα 1.2. Καταγραφή της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, σε πυρανόμετρο με οριζόντια επιφάνεια, στο Ηράκλειο της Κρήτης ($\varphi = 35,5^\circ$), σε τρεις χαρακτηριστικές μέρες κατά τη διάρκεια του έτους

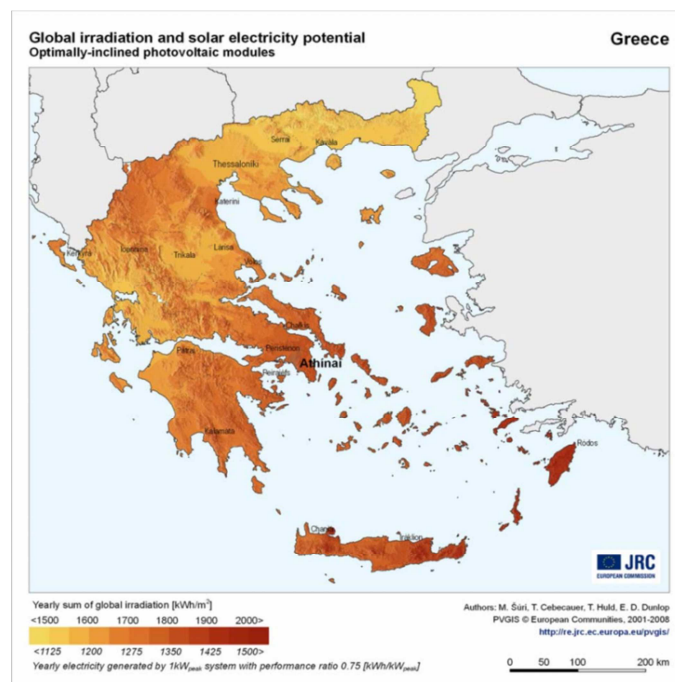
Στον τόπο αυτό, η μέση, καθ' όλο το έτος, ημερήσια τιμή της ηλιακής ενέργειας, σε οριζόντιο επίπεδο, για μια σειρά πέντε ετών, έχει προκύψει ίση με $5 \text{ kWh/m}^2\text{d}$. Τα ολοκληρώματα κάτω από τις καμπύλες του σχήματος, ισούνται με την αντίστοιχη ημερήσια ενέργεια που προσφέρει ο ήλιος στο συλλέκτη ανά μονάδα επιφάνειας. Η ημερήσια μέση πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας τη συγκεκριμένη ημέρα, προκύπτει διαιρώντας το αντίστοιχο ολοκλήρωμα H (εκφρασμένο π.χ. σε $\text{kWh/m}^2\text{d}$), δια των 24 h (H/T , όπου $T=24$ h). Η μέση τιμή της πυκνότητας ισχύος αντιπροσωπεύει την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, με την οποία αν ο τόπος φωτιζόταν όλο το εικοσιτετράωρο, η συνολική πυκνότητα ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας θα ήταν ίση με την πραγματικά αποδοθείσα κατά τη συγκεκριμένη μέρα. Αποτελεί τυπικό συγκριτικό στοιχείο ηλιακής ακτινοβολίας, για διαφορετικούς τόπους.

Σε περιοχές περί τους τροπικούς του Καρκίνου και του Αιγόκερω, η μέση ετησίως τιμή της είναι μεγαλύτερη (μέχρι και $7 \text{ kWh/m}^2\text{d}$) και αντίστοιχα, σε περιοχές στα όρια των Εύκρατων ζωνών, είναι μικρότερη ($<3 \text{ kWh/m}^2\text{d}$). Ο χάρτης στην εικόνα 1.3, δείχνει

την κατανομή της μέσης, ετησίως, ημερήσιας ενεργειακής απολαβής από τον ήλιο, ανά τον κόσμο, ενώ στο εικόνα 1.4 ανά την Ελλάδα. Άξιο παρατήρησης είναι η ελαττωμένη τιμή της σε περιοχές της Τροπικής ζώνης (γύρω από τον Ισημερινό). Η υψηλή υγρασία των περιοχών αυτών, με την έντονη βλάστηση, έχει ως αποτέλεσμα την ισχυρή ελάττωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.



Εικόνα 1.3 Παγκόσμιος χάρτης κατανομής του ετήσιου ηλιακού δυναμικού σε οριζόντιο επίπεδο, σε kWh/m^2 γ



Εικόνα 1.4 Κατανομή ετήσιων τιμών ενεργειακής απολαβής (kWh/m^2 γ) ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια νότια προσανατολισμένου συλλέκτη σε βέλτιστη γωνία κλίσης και αντίστοιχης ενεργειακής αποδοτικότητας (kWh/kWp γ) ΦΒ στοιχείων, στην Ελλάδα

2.3 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά

Ένας τρόπος εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας, ο οποίος αναπτύχθηκε μέσα στο δεύτερο ήμισυ του 20ου αιώνα, είναι η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια με χρήση των φωτοβολταϊκών στοιχείων (photovoltaic cells).

Στα πλαίσια μιας πρώτης γνωριμίας, το φωτοβολταϊκό στοιχείο, στη συνήθη του μορφή, είναι απλά μια δίοδος επαφής δύο ημιαγωγών, τύπου p και n αντίστοιχα. Η περιοχή απογύμνωσής της έχει διαμορφωθεί έτσι ώστε να καταλαμβάνει μεγάλη έκταση. Το πάχος του στρώματος του ημιαγωγού που πρωτοσυναντά το φως, είναι τόσο, ώστε να επιτρέπει στο φως, που θα συμβάλει στο ΦΒ φαινόμενο, να διεισδύει, τουλάχιστο στην περιοχή απογύμνωσης. Η περιοχή αυτή, αποτελεί την ενεργό περιοχή για το ΦΒ φαινόμενο. Τα δημιουργούμενα επιπλέον ελεύθερα ηλεκτρόνια στη μια μεριά της διάταξης και οι επιπλέον οπές, στην άλλη, ως αποτέλεσμα της απορρόφησης των φωτονίων, κυρίως μέσα στην περιοχή απογύμνωσης, ωθούνται από το ηλεκτρικό πεδίο της επαφής, συνθέτοντας ηλεκτρικό ρεύμα, που καλείται φωτόρευμα. Η συσσώρευση των φορέων αυτών στα δύο άκρα, συντηρεί, ανάλογα με την εξωτερική ηλεκτρική αντίσταση, μια αξιόλογη διαφορά δυναμικού μεταξύ των άκρων τύπου n και τύπου p. Ως τελικό αποτέλεσμα έχουμε το ΦΒ φαινόμενο, που συνίσταται στη μετατροπή της ενέργειας της ΗΜ (ηλεκτρομαγνητικής) ακτινοβολίας σε ηλεκτρική. Η ένταση του ρεύματος που μπορεί να δώσει μια ΦΒ επαφή, εξαρτάται, κατά γενικό τρόπο, από την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ΗΜ ακτινοβολίας, από την έκταση της επαφής και από τη φύση και την θερμοκρασία των σωμάτων που την αποτελούν.

2.4 Μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική- φωτοβολταϊκό φαινόμενο

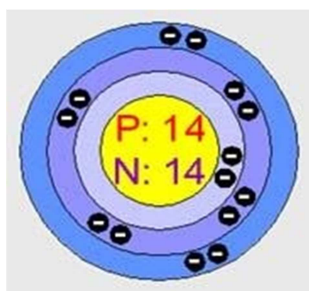
Η πρώτη παρατήρηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου έγινε το 1839 από τον Γάλλο φυσικό Henri Becquerel. Ο Becquerel ανακάλυψε πως είναι δυνατόν να εμφανισθεί ηλεκτρικό ρεύμα όταν μια φωτεινή πηγή εφαρμοσθεί σε ορισμένα χημικά διαλύματα. Το 1883, η πρώτη ηλιακή κυψέλη κατασκευάστηκε από τον Charles Fritts, ο οποίος χρησιμοποίησε το σελήνιο με ένα εξαιρετικά λεπτό στρώμα χρυσού για την κατασκευή των ενώσεων. Η συσκευή ήταν περίπου 1% αποτελεσματική. Στη συνέχεια, ο Ρώσος

φυσικός Aleksandr Stoletov κατασκεύασε την πρώτη ηλιακή κυψέλη με βάση το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (το ανακάλυψε ο Heinrich Hertz νωρίτερα το 1887). Ενώ, το 1946 ο Russell Ohl κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας την κατασκευή ενώσεων ηλιακών κυψελών. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο άρχισε να γίνεται παγκοσμίως γνωστή κυρίως με την ανακοίνωση της πρώτης κατασκευής ηλιακής κυψέλης πυριτίου από τους Fuller, Pearson και Chappin το 1954 .

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και η λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος στηρίζεται στις βασικές ιδιότητες των ημιαγωγών. Όταν το φως προσπίπτει σε μια επιφάνεια είτε ανακλάται, είτε την διαπερνά (διαπερατότητα) είτε απορροφάται από το υλικό της επιφάνειας. Η απορρόφηση του φωτός ουσιαστικά σημαίνει την μετατροπή του σε μια άλλη μορφή ενέργειας (σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας) η οποία συνήθως είναι η θερμότητα.

Παρόλα αυτά όμως υπάρχουν κάποια υλικά τα οποία έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν την ενέργεια των προσπιπτόντων φωτονίων σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτά τα υλικά είναι οι ημιαγωγοί και σε αυτά οφείλεται επίσης η τεράστια τεχνολογική πρόοδος που έχει συντελεστεί στον τομέα της ηλεκτρονικής και συνεπακόλουθα στον ευρύτερο χώρο της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών.

Το χαρακτηριστικό στοιχείο ενός ημιαγωγού που το διαφοροποιεί από τα υπόλοιπα υλικά είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων του ατόμου στην εξωτερική του στοιβάδα (σθένους). Ο περισσότερο γνωστός ημιαγωγός και το πιο σύνηθες υλικό κατασκευής των ηλιακών κυψελών είναι το πυρίτιο (Si).



Σχήμα 1.5: Ατομο πυριτίου

Το πυρίτιο έχει κάποιες ιδιαίτερες χημικές ιδιότητες στην κρυσταλλική του δομή. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5, ένα άτομο πυριτίου έχει 14 ηλεκτρόνια κατανομημένα σε

τρεις διαφορετικές στοιβάδες. Οι πρώτες δύο στοιβάδες, αυτές που είναι πιο κοντά στο κέντρο, είναι συμπληρωμένες (2 και 8 ηλεκτρόνια αντίστοιχα). Η εξωτερική στοιβάδα όμως έχει μόνο 4 ηλεκτρόνια ενώ θα έπρεπε να έχει 8. Γι' αυτό μοιράζεται ηλεκτρόνια με τα γειτονικά του άτομα. Έτσι, τα άτομα συνδέονται μεταξύ τους και σχηματίζουν την κρυσταλλική δομή του πυριτίου, που είναι πολύ σημαντική για τις ηλιακές κυψέλες.

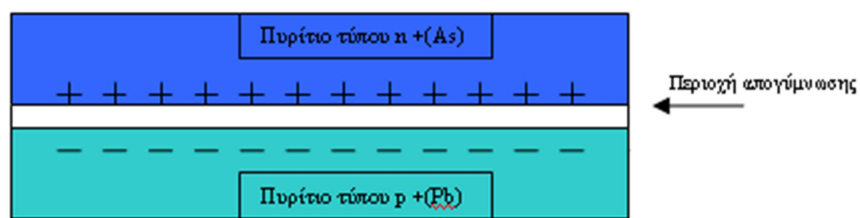
Αυτό είναι το καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο. Το καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού αφού κανένα ηλεκτρόνιο του δεν είναι ελεύθερο να μετακινηθεί όπως τα ηλεκτρόνια στους καλούς αγωγούς, σαν το χαλκό. Αντίθετα τα ηλεκτρόνια του είναι 'κλειδωμένα' στην κρυσταλλική δομή του. Το πυρίτιο σε μια ηλιακή κυψέλη τροποποιείται ελαφρά έτσι ώστε να μπορέσει να λειτουργήσει σαν ηλιακή κυψέλη. Το κρυσταλλικό πυρίτιο αναμιγνύεται με άτομα φωσφόρου. Ο φώσφορος έχει 5 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα και όχι 4 όπως το πυρίτιο. Πάλι συνδέεται με τα γειτονικά του άτομα πυριτίου αλλά ο φώσφορος έχει ένα ηλεκτρόνιο που δεν συνδέεται με κάποιο άλλο. Δεν σχηματίζει δεσμό, αλλά υπάρχει ένα θετικό πρωτόνιο στον πυρήνα του φωσφόρου που το συγκρατεί.

Όταν διοχετεύεται ενέργεια στο καθαρό πυρίτιο, για παράδειγμα με τη μορφή θερμότητας, μερικά ηλεκτρόνια σπάζουν τους δεσμούς τους και φεύγουν από τα άτομα τους. Τότε δημιουργείται μια κενή θέση στο άτομο. Αυτά τα ηλεκτρόνια περιφέρονται τυχαία μέσα στο κρυσταλλικό πυρίτιο αναζητώντας μια άλλη θέση. Έτσι μεταφέρουν την ενέργεια (ηλεκτρικό ρεύμα). Είναι τόσο λίγα που δεν είναι πολύ χρήσιμα. Το πυρίτιο, όμως, με άτομα φωσφόρου είναι κάτι διαφορετικό. Χρειάζεται λιγότερη ενέργεια για να ελευθερωθεί το επιπλέον ηλεκτρόνιο του φωσφόρου, αφού αυτό δεν σχηματίζει δεσμό με άλλο (τα γειτονικά ηλεκτρόνια δεν το συγκρατούν). Σαν αποτέλεσμα τα περισσότερα από αυτά τα ηλεκτρόνια ελευθερώνονται και γίνονται φορείς ηλεκτρικού ρεύματος, που είναι πολύ περισσότεροι από αυτούς του κρυσταλλικού πυριτίου. Η διαδικασία μίξης ατόμων κρυσταλλικού πυριτίου με άτομα φωσφόρου δημιουργεί πυρίτιο που ονομάζεται πυρίτιο τύπου N (Negative, Αρνητικό) εξαιτίας της υπεροχής του αριθμού των ηλεκτρονίων και είναι καλός αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος.

Στην πραγματικότητα μόνο ένα μέρος της ηλιακής κυψέλης είναι πυρίτιο τύπου N. Το άλλο μέρος είναι ανάμειξη κρυσταλλικού πυριτίου με βόριο, το οποίο έχει μόνο 3 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα αντί για 4, και μετατρέπεται σε πυρίτιο τύπου

P. Αντί να έχει ελεύθερα ηλεκτρόνια, το πυρίτιο τύπου P (Positive, θετικό) έχει ελεύθερες θέσεις. Οι θέσεις αυτές είναι ουσιαστικά απουσία ηλεκτρονίων, και έτσι μεταφέρουν αντίθετο φορτίο (θετικό) και περιφέρονται όπως και τα ηλεκτρόνια.

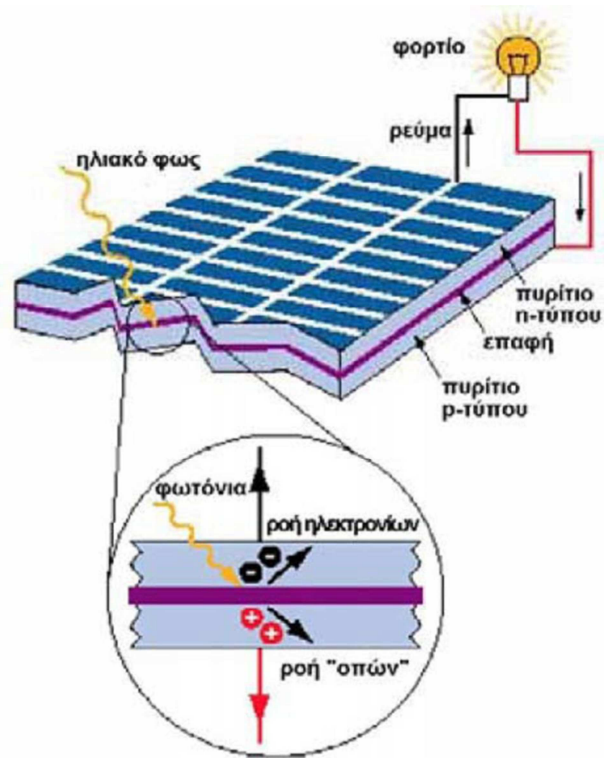
Όταν τοποθετηθούν μαζί πυρίτιο τύπου P και N, η ηλιακή κυψέλη έχει τουλάχιστον ένα ηλεκτρικό πεδίο. Χωρίς ηλεκτρικό πεδίο, η κυψέλη δεν θα λειτουργούσε. Ξαφνικά τα ηλεκτρόνια του πυριτίου τύπου N ψάχνουν για ελεύθερες θέσεις και προσπαθούν να καλύψουν τις κενές θέσεις στο πυρίτιο τύπου P. Το ηλεκτρικό πεδίο λειτουργεί σαν ηλεκτρόδιο, επιτρέποντας τα ηλεκτρόνια να περάσουν από το πυρίτιο P στο N αλλά όχι αντίστροφα. Έτσι, δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο που λειτουργεί σαν ηλεκτρόδιο, στο οποίο τα ηλεκτρόνια μπορούν να κινηθούν σε μια μόνο κατεύθυνση.



Σχήμα 1.6: Το ηλεκτρικό πεδίο μιας ηλιακής κυψέλης

Άρα λοιπόν, η λειτουργία των ηλιακών κυψελών βασίζεται στην δημιουργία ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού. Όσο διαρκεί η ακτινοβολή της κυψέλης, δημιουργείται μια περίσσεια από ζεύγη φορέων. Αν οι ελεύθεροι αυτοί φορείς δεν επανασυνδυαστούν αλλά βρεθούν στην περιοχή της ένωσης P-N, θα δεχτούν το ενσωματωμένο ηλεκτροστατικό πεδίο της διόδου και θα διαχωριστούν. Έτσι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου N και οι οπές μεταφέρονται προς το τμήμα τύπου P, με αποτέλεσμα η συσσώρευση αυτή του φορτίου στα δυο τμήματα να δημιουργεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες της διόδου. Η διάταξη, δηλαδή, λειτουργεί ως ορθά πολωμένη δίοδος και ως πηγή ηλεκτρικού ρεύματος για όσο διαρκεί η οπτική διέγερση.

Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δυο όψεις της ηλιακής κυψέλης σύμφωνα με την διαδικασία που προαναφέρθηκε ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

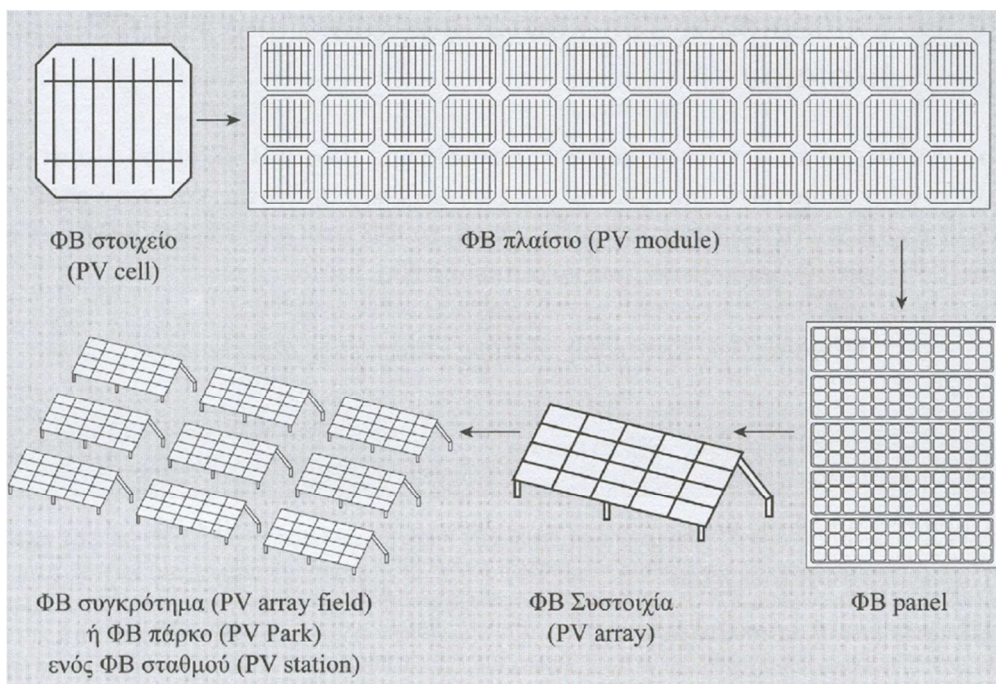


Σχήμα 1. 7: Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ

3.1 Οι ηλιακές κυψέλες

Επειδή η ενέργεια που παράγεται από μια ηλιακή κυψέλη είναι περιορισμένη και προκειμένου να παραχθεί μια σημαντική ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος, πολλές ηλιακές κυψέλες συνδέονται μεταξύ τους ηλεκτρονικά, σχηματίζοντας έτσι ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Όταν πρόκειται για εγκαταστάσεις, στις οποίες γίνεται παραγωγή μέσης ή μεγάλης ποσότητας ηλεκτρικής ισχύος, απαιτείται η ύπαρξη πολλών φωτοβολταϊκών πλαισίων, τα οποία συνδέονται και σχηματίζουν ένα φωτοβολταϊκό πάρκο. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια διατάσσονται με τέτοιο τρόπο, στο διαθέσιμο χώρο, ώστε να μην προκαλούνται προβλήματα σκίασης μεταξύ των διαφορετικών σειρών των πλαισίων.



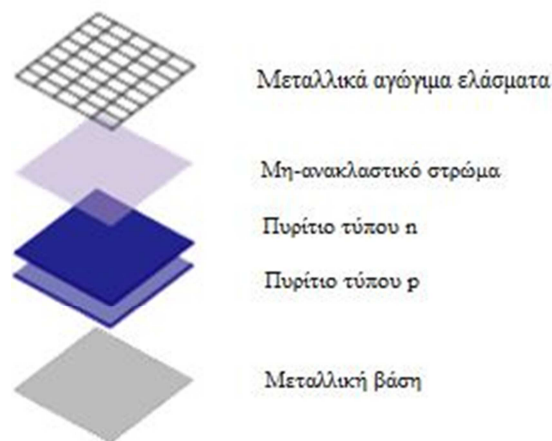
Σχήμα 3.1: Σύνθεση ηλιακών κυψελών και πλαισίων

3.1.1 Η δομή των ηλιακών κυψελών

Για λόγους μηχανικής αντοχής και ευχρηστίας, οι ηλιακές κυψέλες έχουν ενσωματωμένα στο περίγραμμά τους μεταλλικά ελάσματα ανοδιωμένου αλουμινίου και, για λόγους προστασίας είναι αεροστεγώς και υδατοστεγώς κλεισμένα μέσα σε ειδικό γυαλί και ειδικό μονωτικό πλαστικό.

Οι ηλιακές κυψέλες αποτελούνται από:

- Μεταλλική βάση
- Πυρίτιο τύπου P
- Πυρίτιο τύπου N
- Μη-ανακλαστικό στρώμα επικάλυψης
- Μεταλλικά αγωγικά ελάσματα.



Σχήμα 3.2: Δομή ηλιακής κυψέλης

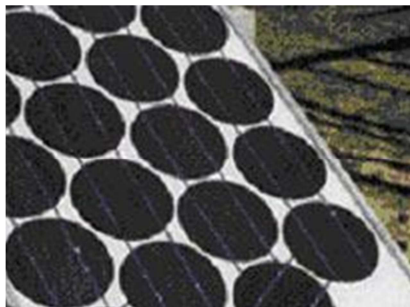
3.1.2 Τα είδη των ηλιακών κυψελών

Οι ηλιακές κυψέλες μπορούν να διαφοροποιηθούν με βάση την κρυσταλλική τους δομή σε:

1. Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο

Οι κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου έχουν κοπεί από ένα κυλινδρικό κρύσταλλο πυριτίου. Το πυρίτιο πρέπει να είναι πολύ υψηλής καθαρότητας και να έχει τέλεια δομή κρυστάλλου. Αυτού του είδους οι ηλιακές κυψέλες έχουν και

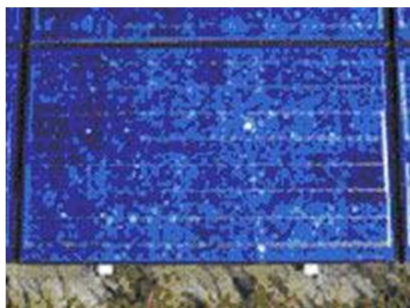
την μεγαλύτερη απόδοση, δηλαδή μετατρέπουν μεγαλύτερο ποσοστό της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό. Η κατασκευή τους όμως είναι πιο πολύπλοκη γιατί απαιτεί την κατασκευή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου με αποτέλεσμα υψηλότερο κόστος κατασκευής.



Σχήμα 3.3: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο μονοκρυσταλλικού πυριτίου

2. Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο

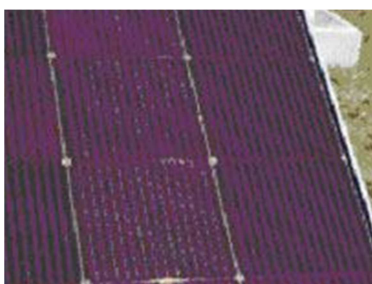
Οι ηλιακές κυψέλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται από ράβδους λιωμένου και επανακρυσταλλομένου πυριτίου. Για την παραγωγή τους, οι ράβδοι του πυριτίου κόβονται σε λεπτά τμήματα από τα οποία κατασκευάζεται η κυψέλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου με την διαδικασία χύτευσης. Η διαδικασία κατασκευής τους είναι απλούστερη από εκείνη των μονοκρυσταλλικών ηλιακών κυψελών με αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος παραγωγής. Όμως, παρουσιάζουν μικρότερη απόδοση από τις ηλιακές κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου που οφείλεται στις ατέλειες στη δομή του κρυστάλλου ως αποτέλεσμα της διαδικασίας χύτευσης.



Σχήμα 3.4: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου

3. Άμορφο πυρίτιο

Το άμορφο πυρίτιο ανήκει σε μια από τις τεχνολογίες λεπτού υμενίου (thin film technology). Οι ηλιακές κυψέλες αυτής της κατηγορίας αποτελούνται από ένα λεπτό στρώμα πυριτίου που έχει εναποτεθεί ομοιόμορφα σε κατάλληλη βάση. Σαν βάση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μεγάλη ποικιλία υλικών από δύσκαμπτα μέχρι ελαστικά με αποτέλεσμα μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών, ιδιαίτερα σε καμπύλες ή εύκαμπτες επιφάνειες. Ενώ το άμορφο πυρίτιο παρουσιάζει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στην απορρόφηση του φωτός, εντούτοις η φωτοβολταϊκή απόδοση του είναι η μικρότερη των κρυσταλλικών. Το φθινό όμως κόστος κατασκευής τους τα κάνει ιδανικά σε εφαρμογές όπου δεν απαιτείται υψηλή απόδοση.



Σχήμα 3.5: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο άμορφου πυριτίου

Εκτός από τους παραπάνω τρεις τύπους ηλιακών κυψελών από πυρίτιο που διατίθενται στην παγκόσμια αγορά, γίνονται έρευνες και προσπάθειες για τη χρησιμοποίηση και άλλων στοιχείων (είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό) όπως γάλλιο-αρσενικό (GaAs), θείο-κάδμιο (CdS), φώσφορο-ίνδιο (InP).

Ο Πίνακας 3.6 απεικονίζει την απόδοση των τριών συνηθέστερων τύπων ηλιακών κυψελών .

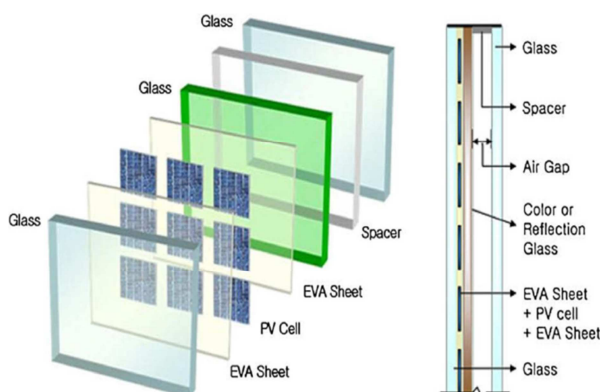
Υλικό της ηλιακής κυψέλης	Απόδοση ηλιακής κυψέλης
Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο	13-16%
Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο	12-14%
Άμορφο πυρίτιο	6-8%

Πίνακας 3.6: Απόδοση ηλιακών κυψελών πυριτίου

3.2 Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια

Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από έναν αριθμό ηλιακών κυψελών. Για να γίνει εφικτή η λειτουργία του πλαισίου, είναι σημαντικό να προστατεύονται οι ηλιακές κυψέλες από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Για παράδειγμα, οι ηλιακές κυψέλες είναι πολύ λεπτές και άρα επιρρεπείς σε μηχανικές βλάβες. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι φωτοβολταϊκών πλαισίων και η δομή τους συχνά είναι διαφορετική για τα διάφορα είδη ηλιακών κυψελών ή για τις ποικίλες εφαρμογές τους.

Οι ηλιακές κυψέλες περικλείονται συνήθως από δυο κομμάτια γυαλιού ή ένα φύλλο γυαλιού και ένα πλαστικού, ενώ μερικές φορές εξ ολοκλήρου από πλαστικό. Τα είδη των γυαλιών που χρησιμοποιούνται είναι διαφανή, χρωματισμένα και αντανακλούν την θερμότητα. Το συμπυκνωμένο υλικό είναι συνήθως EVA, υλικό που εμφανίζει πολύ καλή ηλεκτρική μόνωση και μεγάλη διαπερατότητα στο φως. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο Σχήμα 3.7.



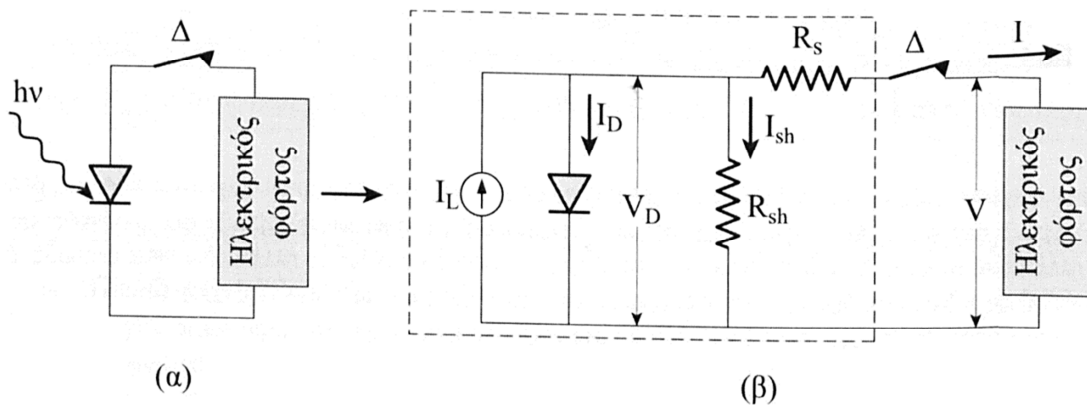
Σχήμα 3.7: Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου

Οι ηλιακές κυψέλες συνδέονται σε σειρά, παράλληλα ή και συνδυασμένες προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες σε τάση και σε ρεύμα. Επίσης, οι ηλιακές κυψέλες πρέπει να όμοιες, για να εμφανίζουν όμοια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και να επιτυγχάνεται η ομαλή λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται επάνω σε περιστρεφόμενα στηρίγματα που ακολουθούν την τροχιά του ήλιου. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και, συνακόλουθα, η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

3.3 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκής κυψέλης

3.3.1 Ισοδύναμο κύκλωμα

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου δίνεται στην παρα- κάτω εικόνα (εικόνα 3.8) και είναι μέσα στο πλαίσιο διακεκομμένης γραμμής. Περιλαμβάνει μια πηγή σταθερού ρεύματος I_L σε συνδυασμό με μια ιδανική διόδο και το μη ιδανικό τμήμα του που αποτελείται από μια αντίσταση απωλειών διαρροής του ρεύματος R_{sh} μεταξύ των άκρων του στοιχείου παράλληλα συνδεδεμένη στα άκρα της διόδου και μια αντίσταση απωλειών στο δρόμο ροής του ρεύματος της διόδου R_s συνδεδεμένη σε σειρά με αυτήν.



Εικόνα 3.8 :Ισοδύναμο κύκλωμα ΦΒ. (α) Απλό και (β) Πλήρες

Η αντίσταση R_{sh} αφορά διαδρομές του ρεύματος διαρροής στο εσωτερικό της επαφής p-n μεταξύ των σημείων που βρίσκονται σε διαφορά δυναμικού ίση με την τάση στα άκρα της διόδου. Αναλυτικότερα, οι διαδρομές αυτές αφορούν ρεύματα:

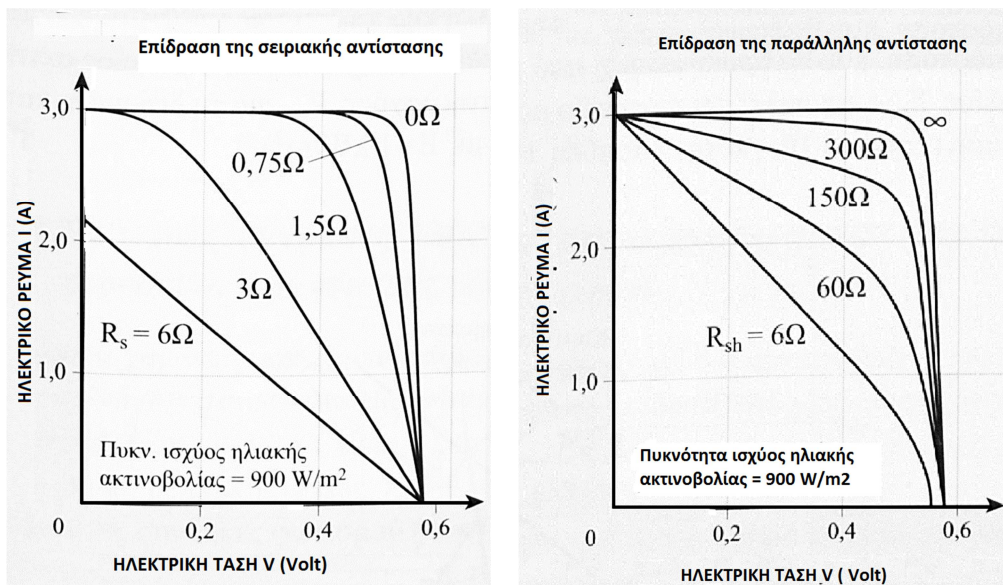
1. Διαμέσου του σώματος της διάταξης επαφής
2. Δια των εξωτερικών επιφανειών της επαφής, παράλληλα προς το ηλεκτρικό πεδίο της επαφής και
3. Διαμέσου της ηλεκτρικής διάβασης που δημιουργούν οι προσμίξεις της επαφής.

Η αντίσταση R_s αφορά στην αντίσταση που παρουσιάζει η επαφή :

1. Κατά την διόδο του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από το σώμα της διόδου και

2. Στις ωμικές αντιστάσεις των σημείων πρόσφυσης των ηλεκτροδίων της επαφής καθώς και κατά μήκος των μεταλλικών κλάδων τους.

Η επίδραση των αντιστάσεων R_{sh} και R_s φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 3.9) από την οποία γίνεται φανερό ότι μικρή R_{sh} ($< 500 \Omega$) έχει ως αποτέλεσμα την έντονη ελάττωση του ρεύματος καθώς προχωρούμε προς την τάση V_{oc} , ενώ μεγάλη R_s οδηγεί σε μείωση της μέγιστης ισχύος λόγω ότι μια αύξηση της R_s περιορίζει την περιοχή τάσεων στην οποία αντιστοιχεί σταθερό ρεύμα βραχυκύκλωσης.



Εικόνα 3.9: Επίδραση σειριακής και παράλληλης αντίστασης

3.3.2 Τάση ανοιχτού κυκλώματος – ρεύμα βραχυκύκλωσης

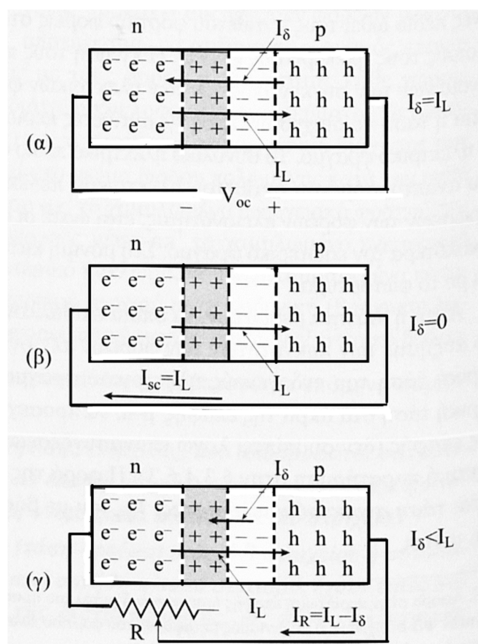
Ανοιχτό κύκλωμα

Στην περίπτωση που το φωτοβολταϊκό στοιχείο βρίσκεται σε ανοικτό κύκλωμα και κάτω από συνθήκες σταθερού φωτισμού τα ρεύματα που κυκλοφορούν μέσα στην επαφή είναι αντίθετης φοράς και ίσα κατά απόλυτη τιμή $I_d = - I_L$ (εικόνα 3.10α). Αυτή η ισότητα ρευμάτων, τα οποία επιβάλλονται αφενός από την διάχυση, λόγω αύξησης των πυκνοτήτων των φορέων πλειονότητας, αφετέρου από την ηλεκτρική τάση του ενδογενούς ηλεκτρικού φραγμού, έχει ως αποτέλεσμα η τάση στα άκρα της επαφής p-n να προσεγγίζει το ύψος της τάσης V_{bi} (τάση διάχυσης : η τάση που διακόπτει το φαινόμενο της διάχυσης από το ένα τμήμα της επαφής στο άλλο) με φορά αντίθετη

αυτής. Ονομάζεται τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}) και ισχύει : $V_{oc} \leq V_{bi}$ η ισότητα αφορά την ιδανική περίπτωση που δεν συμβαίνουν επανασυνδέσεις.

Κλειστό κύκλωμα

Αν, τώρα, τα άκρα της επαφής p-n που φωτίζεται όπως και πριν κάτω από συνθήκες σταθερού φωτισμού, είναι βραχυκυκλωμένα (με χάλκινο σύρμα πρακτικά



Εικόνα 3.10 : Επαφή p-n

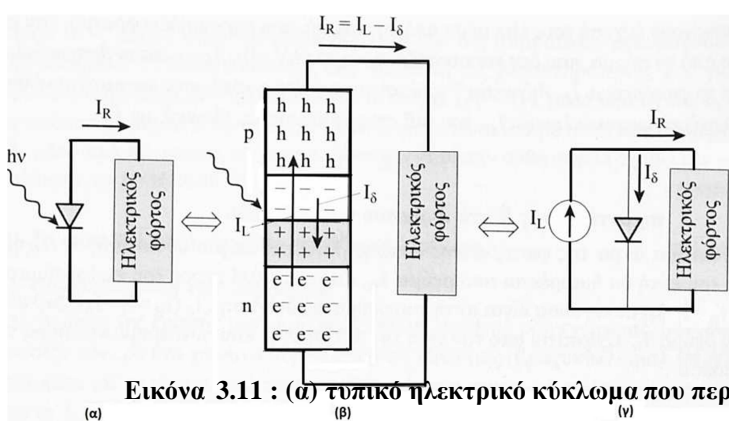
μηδενικής αντίστασης), οι αυξημένες πυκνότητες των φορέων πλειονότητας στα άκρα της επαφής δημιουργούν έκχυση τους είτε μέσα από την επαφή, που παρουσιάζει φραγμό, είτε μέσα από το σύρμα, που δεν παρουσιάζει φραγμό. Άρα κατά το βραχυκύκλωμα το ρεύμα I_L διέρχεται από τον αγωγό βραχυκύκλωσης (εικόνα 3.10β), οπότε ισχύει :

$$I_{sc} = I_L$$

Όταν όμως στα άκρα της επαφής συνδέσουμε μια αντίσταση R (εικόνα 3.10γ) αυτή θα διαρρέεται από ρεύμα $I_R = I_L - I_s$, δηλαδή το ρεύμα I_R εξαρτάται από την τιμή της αντίστασης που συνδέουμε στα άκρα της επαφής.

3.3.3 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V φωτοβολταϊκής κυψέλης

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, φώς δεδομένης πυκνότητας ισχύος και φάσματος δημιουργεί μέσα στο σώμα της φωτοβολταϊκής κυψέλης ηλεκτρικό ρεύμα I_L . Το ρεύμα αυτό παραμένει σταθερό καθώς αλλάζει η ωμική αντίσταση που είναι συνδεδεμένη στα άκρα του. Έτσι η λειτουργία της ΦΒ κυψέλης είναι ισοδύναμη με εκείνη που θα δημιουργούσε η σύνδεση μιας πηγής σταθερού ρεύματος στα άκρα της



Εικόνα 3.11 : (α) τυπικό ηλεκτρικό κύκλωμα που περιλαμβάνει ΦΒ στοιχείο (β)

διόδου, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.11, ειδικότερα θα μπορούσαμε να πούμε ότι η πηγή αυτή προσαρμόζει την τάση στα άκρα της ώστε να διατηρεί το ρεύμα πρακτικά σταθερό, για αυτό παρουσιάζεται και ως πηγή σταθερού ρεύματος.

Αναλυτική παρουσίαση ρευμάτων στο κύκλωμα (γ) Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα

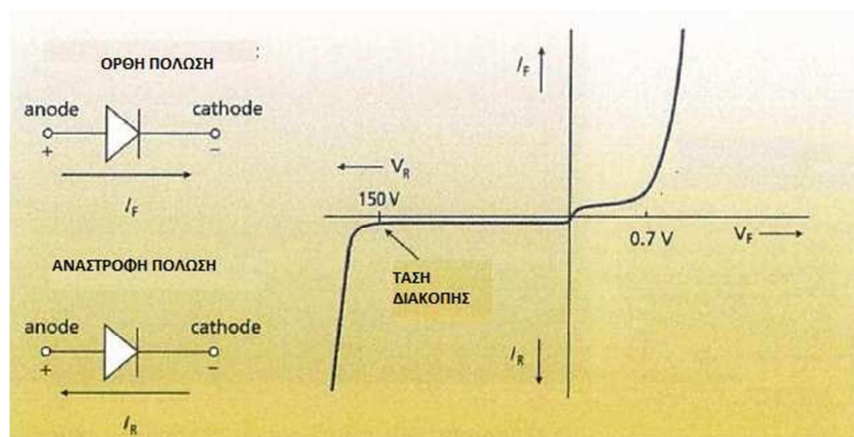
Σύμφωνα με προηγούμενη ανάλυση το ρεύμα I_s είναι σαν να προέρχεται από μια ορθή τάση V_F , επειδή οφείλεται στην αύξηση των πυκνοτήτων των φορέων πλειονότητας. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι οι τιμές του I_s ακολουθούν την καμπύλη I-V της διόδου (εικόνα 3.12).

Έτσι, για να κατασκευάσουμε την καμπύλη I-V της φωτιζόμενης διόδου πρέπει να προσθέσουμε την καμπύλη I-V της μη φωτιζόμενης διόδου και την ευθεία $I = -I_L$, του φωτορεύματος που αποτελεί την καμπύλη I-V της πηγής σταθερού ρεύματος. Το ρεύμα I_R όμως έχει αντίθετη φορά από το επιβαλλόμενο στη δίοδο ρεύμα από μία εξωτερική πηγή με ορθή πόλωση, συνεπώς στο διάγραμμα I-V της μη φωτιζόμενης επαφής θα τοποθετήσουμε τις τιμές I_R στον αρνητικό ημιάξονα και σε κάθε τιμή του I_D θα προσθέτουμε το $-I_L$ και θα βρίσκουμε το I_R .

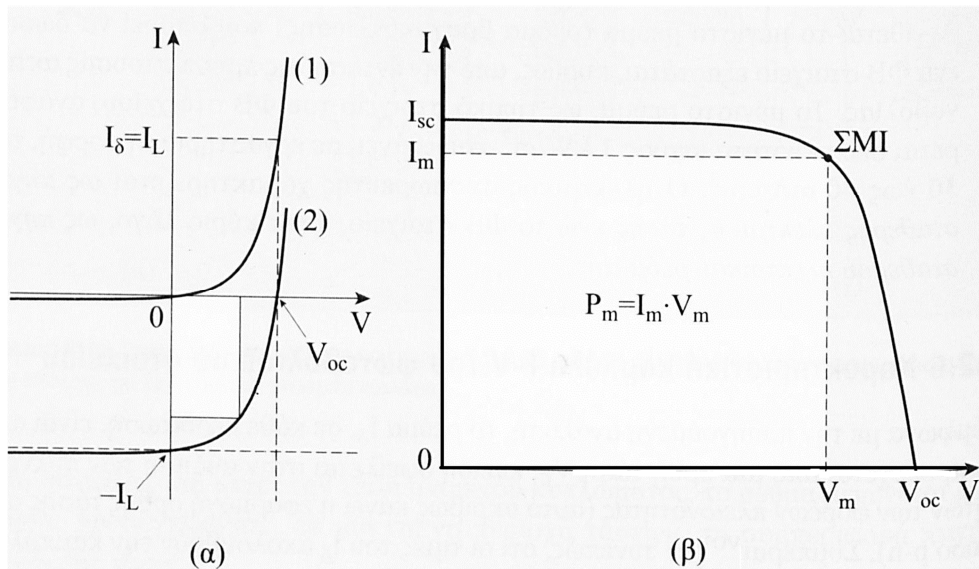
$$I = I_s [e^{qV / kT} - 1] - I_L$$

(όπου q ο παράγων ιδανικότητας της διόδου)

Στην εικόνα 3.13α φαίνεται η καμπύλη I-V της φωτοβολταϊκής κυψέλης στο σκοτάδι (1) και στο φως (2), ενώ στην εικόνα 3.13β δίνεται σε μεγέθυνση το τμήμα της καμπύλης που βρίσκεται στο τέταρτο τεταρτημόριο ανεστραμμένο ως προς τις τιμές του ρεύματος, στο οποίο η επαφή p-n συμπεριφέρεται ως φωτοβολταϊκό στοιχείο. Σε εκείνη την περιοχή η φωτοβολταϊκή κυψέλη φέρεται σαν πηγή ενέργειας και παρέχει ενέργεια σ' ένα καταναλωτή ($P = V \cdot I < 0$).



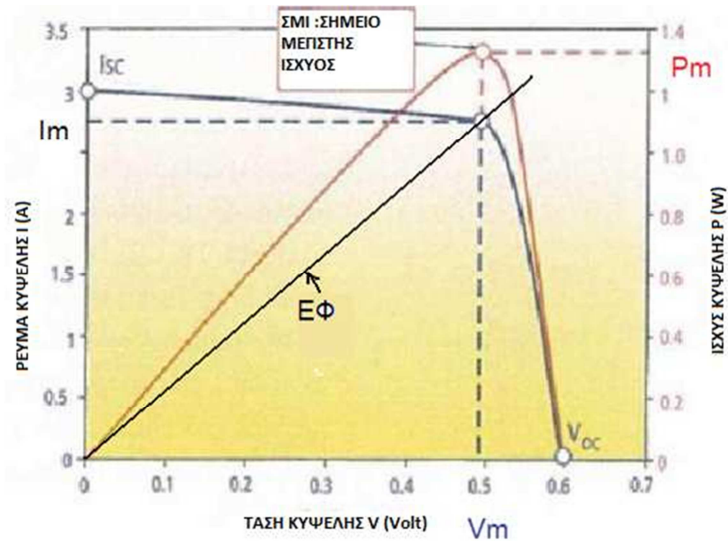
Εικόνα 3.12: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V επαφής p-n, σε ορθή και ανάστροφη πόλωση



Εικόνα 3.13 (α) Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V, ενός ΦΒ στοιχείου, στο σκοτάδι (1) και στο φως (2)
 (β) Σε μεγέθυνση το τμήμα της καμπύλης στο τέταρτο τεταρτημόριο

3.3.4 Σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος (ΣΜΙ)

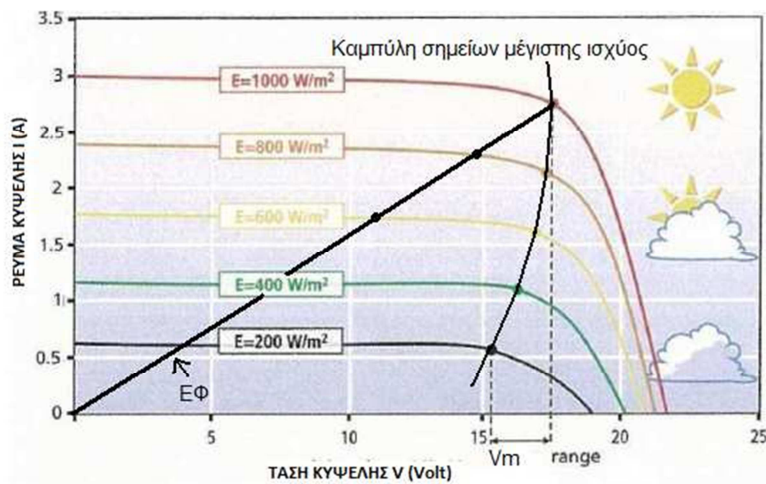
Για την καλύτερη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του φωτοβολταϊκού πρέπει να προσαρμόσουμε την αντίσταση του καταναλωτή ώστε η τάση και το ρεύμα σε αυτόν να αντιστοιχούν στο σημείο μέγιστης λειτουργίας. Το συμπέρασμα αυτό γίνεται εμφανές αν στην καμπύλη I-V κατασκευάσουμε και την καμπύλη της ισχύος σε συνάρτηση με την τάση στα άκρα του φωτοβολταϊκού, $P = f(V)$, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.14. Προφανώς στις ακραίες συνθήκες για τάση μηδέν και τάση ίση με την V_{oc} , η παρεχόμενη ισχύς είναι μηδέν συνεπώς είναι αναμενόμενο η καμπύλη της ισχύος να εμφανίζει μέγιστο, το οποίο παρουσιάζεται κοντά στο σημείο που αρχίζει η έντονη πτώση του ρεύματος.



Εικόνα 3.14: Ανεστραμμένη καμπύλη I-V στο τεταρτημόριο που το ΦΒ στοιχείο παρέχει ενέργεια, καμπύλη ισχύος και ευθεία φόρτου (ΕΦ)

3.3.5 Καμπύλη φόρτου

Καμπύλη φόρτου είναι η καμπύλη του ρεύματος I που διαρρέει τη διάταξη σε συνάρτηση με την τάση που εφαρμόζεται στην είσοδό της, $I=f(V)$. Αν την τοποθετήσουμε στην καμπύλη I-V του φωτοβολταϊκού τότε το σημείο τομής αυτών των δύο μας δίνει το σημείο λειτουργίας του συστήματος. Στην εικόνα 3.9 φαίνεται η καμπύλη φόρτου (ΕΦ) για ωμική κατανάλωση, το οποίο είναι ταυτόσημο με το ΣΜΙ. Προφανώς αν μεταβληθεί η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας η καμπύλη I-V αλλάζει και το σημείο λειτουργίας για δεδομένο φορτίο δεν συμπίπτει με το ΣΜΙ (εικόνα 3.15).



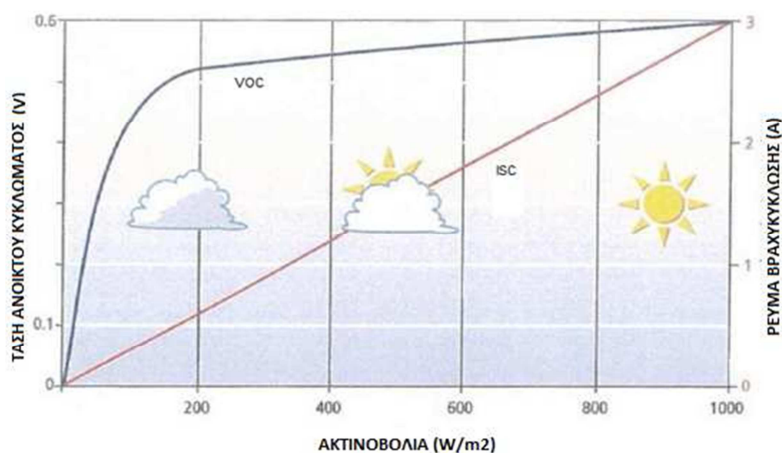
Εικόνα 3.15 : Χαρακτηριστική I-V συναρτήση ηλιακής ακτινοβολίας.

Για να συμπίπτει το σημείο λειτουργίας με το ΣΜΙ, προφανώς θα πρέπει να αλλάξει η ωμική αντίσταση έτσι ώστε η νέα ευθεία φορτίου να περνά από το αντίστοιχο νέο ΣΜΙ. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να δώσει το ΦΒ στοιχείο είναι $P_m = V_m \cdot I_m$, όπου V_m και I_m η μέγιστη τάση και ρεύμα στο σημείο μέγιστης λειτουργίας.

3.3.6 Εξάρτηση ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ΦΒ στοιχείου από την πυκνότητα ισχύος της ΗΜ ακτινοβολίας

Είναι προφανές παρατηρώντας την εικόνα 3.15 ότι η πυκνότητα ισχύος της ΗΜ ακτινοβολίας έχει άμεση εξάρτηση με την μέγιστη ισχύ που μπορεί να προσφέρει το ΦΒ στοιχείο. Όσο λιγότερη είναι η ακτινοβολία τόσο λιγότερο είναι και το ρεύμα που διαρρέει την διάταξη, αντιθέτως η τάση μέγιστου σημείου ισχύος παραμένει σχετικά σταθερή. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.16 παρακάτω, παρατηρούμε ότι:

1. το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC} είναι ανάλογο της πυκνότητας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (γραμμική εξάρτηση) και
2. η τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{OC} αρχικά αυξάνει ως συνάρτηση της ακτινοβολίας και παραμένει πρακτικά σταθερή για μεγαλύτερη αύξηση της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας.



Εικόνα 3.16 : Τάση V_{OC} και I_{SC} σε συνάρτηση με την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ΗΜ ακτινοβολίας

3.3.7 Παράγων πλήρωσης (FF – Fill Factor)

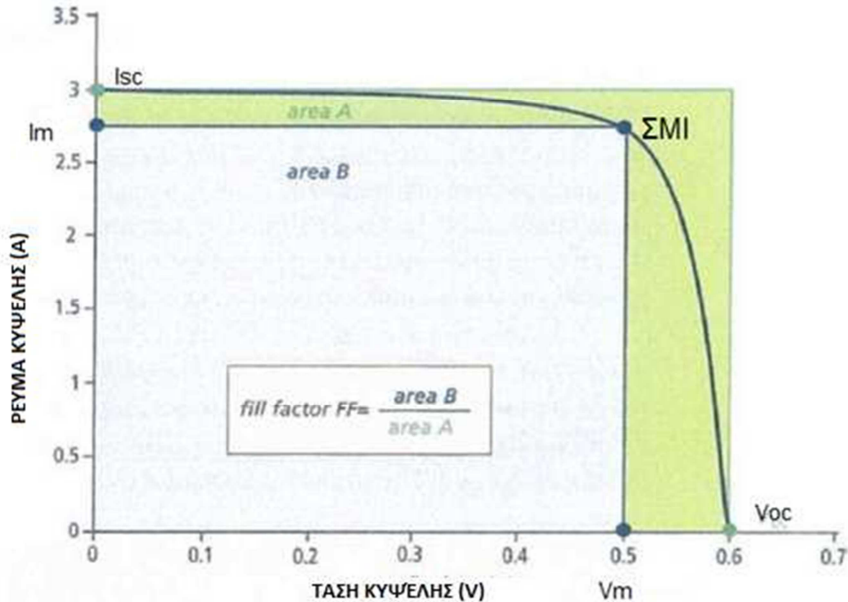
Ο παράγων πλήρωσης FF της ΦΒ κυψέλης δίνεται από την σχέση

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}}$$

Οι τιμές του καθορίζονται από το υλικό του ΦΒ και τις συνθήκες και είναι μεταξύ 0 και 1. Η τιμή αναφοράς ελέγχου δίνεται σε πρότυπες συνθήκες (STC) και όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι τόσο η λειτουργία του ΦΒ πλησιάζει την ιδανική συμπεριφορά της πηγής σταθερού ρεύματος στην περιοχή 0-V_{oc}. Σε αυτήν την περίπτωση η διάταξη χαρακτηρίζεται από μικρή R_s και μεγάλη R_{sh}.

Οι πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC) είναι :

1. Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πυκνότητας ισχύος 1 kW/m² και φάσματος αντίστοιχου του ηλιακού με AM1,5 (κάθετη πρόσπτωση)
2. Θερμοκρασία του ΦΒ στοιχείου ίση με 25 °C ±2 °C



Εικόνα 3.17: Παράγων πλήρωσης

3.3.8 Επίδραση θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ΦΒ στοιχείου

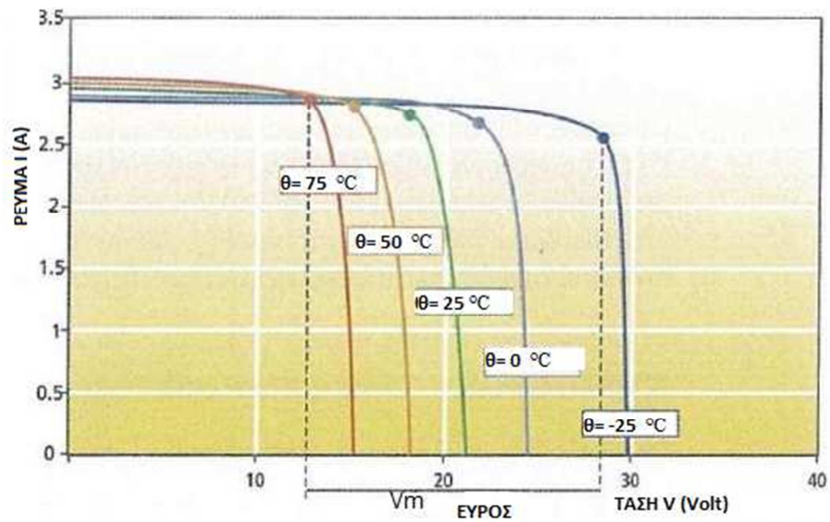
Η θερμοκρασία της κυψέλης αυξάνεται με τον φωτισμό, εξαιτίας της μετατροπής μέρους της ηλιακής ενέργειας σε θερμική (αύξηση της εσωτερικής ενέργειας του υλικού). Στην περίπτωση που το ΦΒ στοιχείο είναι ενσωματωμένο στο ΦΒ πλαίσιο η διαφορά $\theta_c - \theta_a$, όπου θ_c η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψελίδας και θ_a του περιβάλλοντα αέρα, αυξάνει σχεδόν γραμμικά ως συνάρτηση της πυκνότητας της ολικής ακτινοβολίας, E , με τυπικό ρυθμό:

$$\frac{\theta_c - \theta_a}{E} \approx 30 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{kW}/\text{m}^2) \quad (\text{όπου } E \text{ η ακτινοβολία})$$

Συνεπακόλουθα μεταβάλλεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} και η τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} . Παρατηρώντας την εικόνα 3.18 βλέπουμε ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} αυξάνεται ελαφρώς με την θερμοκρασία λόγω της αύξησης του μήκους διάχυσης των φωτοδημιουργούμενων φορέων μειονότητας με την θερμοκρασία, άρα και αύξηση του πλήθους των φορέων που καταφέρνουν να φτάσουν στους απέναντι χώρους της διάταξης, όπου οι φορείς αυτοί αποτελούν πλειονότητα. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} δίνεται από την σχέση:

$$I_{sc} = \frac{E}{E_{stc}} I_{sc, stc} [1 + a_{1sc} * (\theta_c - \theta_{stc})]$$

Όπου $a_{1sc} = dI_{sc}/I_{sc}dT$, ο θερμικός συντελεστής του ρεύματος βραχυκύκλωσης του ΦΒ, $I_{sc, stc}$ η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης σε STC (πρότυπες συνθήκες ελέγχου), E η πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας, $E_{stc} = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$ και $T = 273 + \theta$



Εικόνα 3.18 : Μεταβολή της καμπύλης I-V με την αύξηση της θερμοκρασίας για ακτινοβολία 1000W/m²

Αντίθετα η τάση ανοικτού κυκλώματος Voc μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και μάλιστα η ποσοστιαία ελάττωσή της, ανά βαθμό θερμοκρασίας είναι σχεδόν μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη της αντίστοιχης αύξησης του ρεύματος βραχυκύκλωσης Isc. Αυτή η έντονη ελάττωση της Voc οφείλεται στην ισχυρή εξάρτηση του ρεύματος κόρου, Is, της διόδου από την θερμοκρασία. Η τάση ανοικτού κυκλώματος Voc δίνεται από την σχέση :

$$V_{oc} = V_{oc,STC} [1 + \beta_{voc} * (\theta_c - \theta_{STC})] * [1 + \delta(\theta) * \ln \frac{E}{E_{STC}}]$$

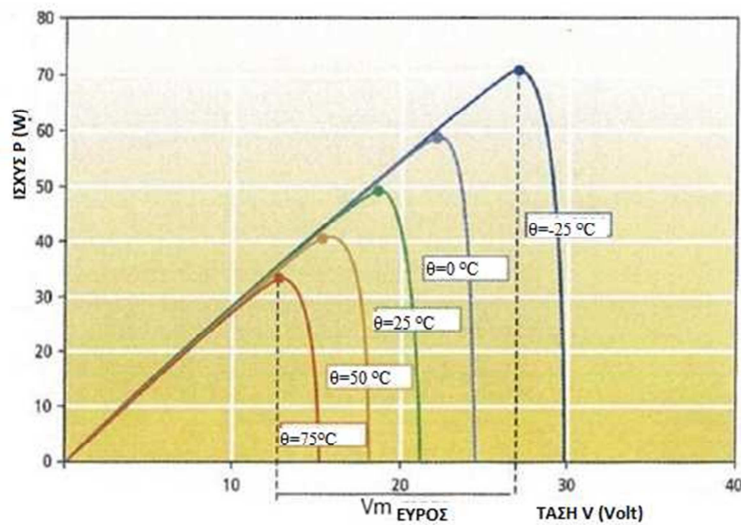
όπου,

$V_{oc,STC}$ η τάση ανοικτού κυκλώματος σε STC,

$\delta(\theta)$ ο διορθωτικός παράγοντας της εξάρτησης Voc από την E και,

$\beta_{voc} = dV_{oc} / V_{oc}dT^2$ ο θερμικός συντελεστής τάσης του ανοικτού κυκλώματος του ΦΒ.

Φυσικά η αύξηση της θερμοκρασίας έχει επιπτώσεις και στην ισχύ του ΦΒ στοιχείου. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.19 επιδρά αρνητικά με αποτέλεσμα η ισχύς να μειώνεται σημαντικά.



Εικόνα 3.19 : Μεταβολή της ισχύος σε συνάρτηση με την θερμοκρασία για ακτινοβολία $1000\text{W}/\text{m}^2$

3.3.9 Απόδοση φωτοβολταϊκής κυψέλης

Η απόδοση ενεργειακής μετατροπής (βαθμός απόδοσης) του ΦΒ στοιχείου καθορίζεται από την σχέση :

$$\eta_c = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m \cdot V_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{in}}$$

και ορίζεται ως το πηλίκο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος P_m που αποδίδεται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο προς την ισχύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας $P_{in} = E \cdot S$. Επειδή αναφερόμαστε σε απόδοση ΦΒ στοιχείου το εμβαδό S αντιστοιχεί στην ενεργό επιφάνεια του ΦΒ μη λαμβάνοντας υπόψη την επιφάνεια της μεταλλικής σχάρας του.

Σύμφωνα λοιπόν με προηγούμενη ανάλυση η απόδοση αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας E και μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Πολλές φορές, όταν γνωρίζουμε την ονομαστική τιμή της απόδοσης στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC) και θέλουμε την απόδοση σε διαφορετική θερμοκρασία, για κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιούμε την

σχέση :
$$\eta_c = \eta_T * \eta_{c,STC}$$

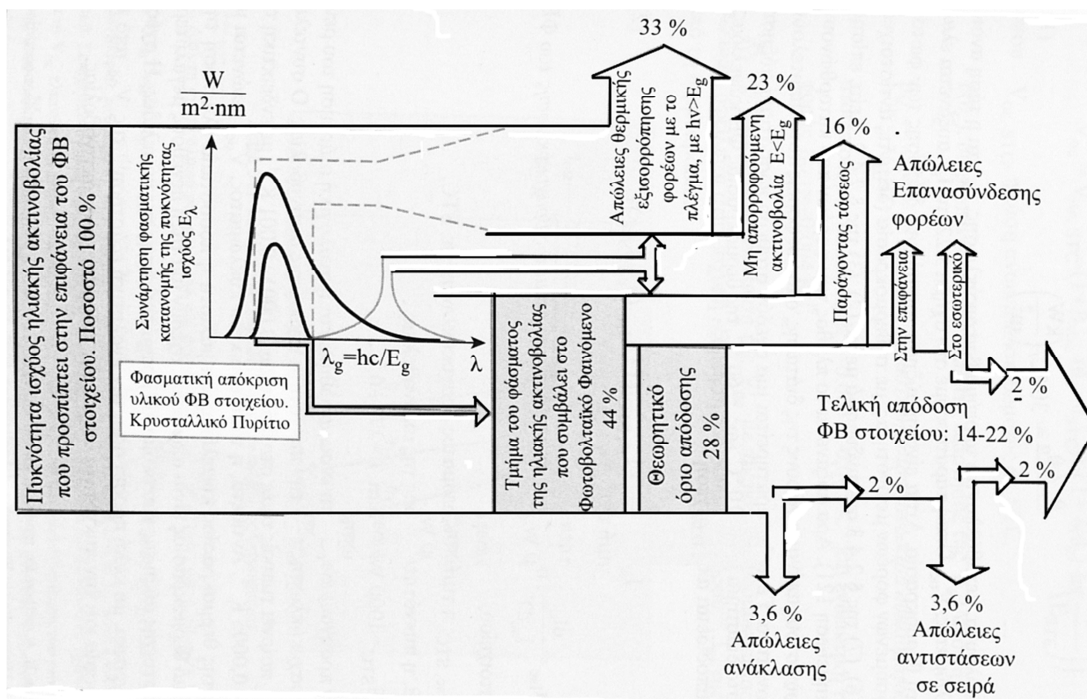
όπου,

$\eta_T = 1 + \gamma_{mp} * (\theta_c - \theta_{STC})$, συντελεστής ή παράγων θερμοκρασίας του ΦΒ στοιχείου

γ_{mp} , ο θερμοκός συντελεστής μέγιστης ισχύος του ΦΒ στοιχείου

$\eta_{c,STC}$, ονομαστική τιμή απόδοσης στις πρότυπες συνθήκες.

Στην εικόνα 3.20 παρουσιάζεται το διάγραμμα Sankey που περιγράφει την ροή ενέργειας κατά την μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια και προσδιορίζει την τελική απόδοση του ΦΒ στοιχείου. Το συγκεκριμένο διάγραμμα αναφέρεται σε κρυσταλλικό πυρίτιο, περιγράφει όμως και την γενικότερη συμπεριφορά των ΦΒ στοιχείων ανεξάρτητα από το υλικό παρασκευής και τον τύπο του.



Εικόνα 3.20 :Διάγραμμα ροής ενέργειας κατά την μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια (διάγραμμα Sankey)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΦΒ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

4.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη

4.1.1 Πρότυπες Συνθήκες

Για την ποσοτικοποίηση των επιδόσεων των ηλιακών κυψελών έχει διεξαχθεί πλήθος εργαστηριακών δοκιμών και έχουν καθιερωθεί κάποιες συνθήκες ως βιομηχανικά πρότυπα για τις δοκιμές, οι Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμών (STC), συγκεκριμένα:

- Θερμοκρασία κυψελίδας : $25^{\circ}C$
- Πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας : $1000 W/m^2$
- Αέρια μάζα = AM 1,5

4.1.2 Ονομαστική ισχύς ενός φβ πλαισίου

Ισχύς αιχμής ενός πλαισίου P_p : είναι η μέγιστη ισχύς με την οποία αυτό αποδίδει ηλεκτρική ενέργεια κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC.

Έστω για παράδειγμα ότι η ισχύς αιχμής ενός πλαισίου είναι 300Wp. Αυτό σημαίνει ότι όταν το πλαίσιο δέχεται ακτινοβολία πυκνότητας ισχύος $E=1 kW/m^2$, φάσματος AM1,5 και η θερμοκρασία του είναι $25^{\circ}C$ τότε παράγει ηλεκτρική ενέργεια με ισχύ 300W.

Κατά την λειτουργία του σε πραγματικές συνθήκες η θερμοκρασία του πλαισίου είναι διαφορετική από τους $25^{\circ}C$ και η πυκνότητα ισχύος της ΗΜ ακτινοβολίας από 0 ως $1200 W/m^2$. Η μέγιστη παραγόμενη ισχύς είναι διαφορετική και μάλιστα μικρότερη από την ισχύ αιχμής του.

Μερικά από τα συνήθη στοιχεία των φβ πλαισίων που δίνουν οι κατασκευαστές για τις Πρότυπες Συνθήκες Ελέγχου (STC) είναι η ισχύς αιχμής P_p , η ένταση ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{sc} και τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} .

4.1.3 Ονομαστική Θερμοκρασία Λειτουργίας φβ κυψελίδας (NOCT)

Σε κάθε πλαίσιο μπορεί να αναγράφεται επιπλέον και η θερμοκρασία την οποία αποκτά το πλαίσιο σε καθορισμένες συνθήκες περιβάλλοντος που προσεγγίζουν μια μέση πραγματική κατάσταση. Αντιπροσωπευτικές τιμές αυτής της θερμοκρασίας μπορεί να είναι $45^{\circ}C$ - $50^{\circ}C$. Η περιοχή αυτή των θ αφορά τη μέση κατάσταση του υλικού του φβ στοιχείου στο χρονικό διάστημα 2-3 ώρες πριν και μετά το μεσημέρι μιας αίθριας καλοκαιρινής μέρας σε μέσα γεωγραφικά πλάτη.

Χαρακτηρίζεται ως Ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας ΦΒ κυψελίδας- Nominal Operating Cell Temperature-NOCT conditions.

4.1.4 Συνθήκες λειτουργίας της φβ κυψελίδας κάτω από τις οποίες η θερμοκρασία της ισούται με την ονομαστική τιμή της (NOCT)

Το φβ πλαίσιο σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος.

Πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας $G_{NOCT}=800 \text{ W/m}^2$.

Θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα $\theta_a = 20^{\circ}C$.

Μέση ταχύτητα ανέμου 1m/sec .

Η σημασία της NOCT:

Χαμηλή NOCT για την κυψελίδα σημαίνει ότι αποβάλλει ταχύτερα στο περιβάλλον το μέρος εκείνο της ηλιακής ακτινοβολίας που συμβάλλει ουσιαστικά στην αύξηση της θερμοκρασίας του. Άρα όσο μικρότερη είναι η NOCT για ένα πλαίσιο τόσο μικρότερη είναι η μείωση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος σε σχέση με άλλο πλαίσιο ίδιας ισχύος αιχμής το οποίο όμως έχει μεγαλύτερη NOCT.

4.2 Απώλειες και συντελεστής απόδοσης

4.2.1 Συντελεστής απόδοσης φωτοβολταϊκού πλαισίου

Ο στιγμιαίος συντελεστής απόδοσης (η_m) του πλαισίου προσδιορίζεται από το πηλίκο της αποδιδόμενης μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος P_m στην έξοδο του προς την προσπίπτουσα στο πλαίσιο ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας $E \times S$.

$$\eta_m = \frac{P_m}{E \times S}$$

Όπου E ($W m^{-2}$) είναι η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του φβ πλαισίου και S (m^2) η συνολική επιφάνεια του.

Η τιμή του στιγμιαίου συντελεστή απόδοσης του φβ πλαισίου η_m καθορίζεται από τις αποκλίσεις που υφίσταται από την τιμή του $\eta_{m,STC}$, ο οποίος προσδιορίζεται σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC). Δηλαδή ο συντελεστής απόδοσης αναφοράς ενός πλαισίου λαμβάνεται στις συνθήκες STC ($\eta_{m,STC}$) και είναι ο μέγιστος. Σε συνθήκες όμως πραγματικής λειτουργίας ο στιγμιαίος συντελεστής απόδοσης η_m αποκλίνει από τον κανονικοποιημένο συντελεστή $\eta_{m,STC}$ λόγω απωλειών. Προκύπτει έτσι μικρότερος συντελεστής απόδοσης για το πλαίσιο κάτι που προφανώς σημαίνει μείωση της πραγματικής απόδοσης του πλαισίου για τις δοσμένες συνθήκες λειτουργίας σε σχέση με την απόδοσή του στις πρότυπες συνθήκες.

Σε συνθήκες λοιπόν διαφορετικές από τις πρότυπες οι απώλειες αφορούν κυρίως στη διαφορά της θερμοκρασίας λειτουργίας του πλαισίου από τη θερμοκρασία λειτουργίας του στις πρότυπες καθώς και στην διαφορά της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη από αυτήν που προσπίπτει στις Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμής.

Για ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό των απωλειών της απόδοσης του πλαισίου θα πρέπει για το συντελεστή η_m να λάβουμε υπόψη επιπλέον οπτικές και θερμικές απώλειες. Οι απώλειες αυτές συμβάλουν περαιτέρω στη μείωση του συντελεστή απόδοσης η_m του πλαισίου σε σχέση με τον $\eta_{m,STC}$. Συνοψίζοντας, ο η_m μπορεί να αποδοθεί ως γινόμενο των επί μέρους στιγμιαίων συντελεστών

ενεργειακών απωλειών που προσδιορίζουν την απόκλιση της απόδοσης από αυτή των πρότυπων συνθηκών. Έτσι προκύπτει η σχέση:

$$\eta_m = \eta_{STC} \times \eta_T \times \eta_{LI} \times \eta_S \times \eta_P \times \eta_R \times \eta_{καθ} \times \eta_D, \text{ όπου:}$$

η_{STC} : απόδοσης φβ πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες STC.

η_T : απόκλισης της απόδοσης του ΦΒ πλαισίου εξαιτίας της διαφοροποίησης της θ της κυψελίδας σε σχέση με τη θ αναφοράς $25^\circ C$

η_{LI} : απόκλισης στην περιοχή χαμηλών τιμών πυκνότητας ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας. (Low Irradiance losses)

η_S : φασματικής απόκλισης λόγω διαφορετικού φάσματος σε σχέση με το φάσμα AM1,5 (STC).

η_P : απόκλισης λόγω της πόλωσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

η_R : απόκλισης λόγω διαφοροποίησης της ανακλαστικότητας σε γωνίες πρόσπτωσης διάφορες της καθέτου στο πλαίσιο. Ο η_R λαμβάνεται περίπου ίσος με 0.97 κάτι που αντιστοιχεί σε μέσες ετήσιες απώλειες $\approx 3\%$.

$\eta_{καθ}$: συντελεστής καθαρότητας υαλοπίνακα πλαισίου

η_D : απωλειών από τη δίοδο αντεπιστροφής.

Τέλος να σημειώσουμε ότι η απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι μικρότερη από την απόδοση καθενός από τα φβ στοιχεία που το απαρτίζουν. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μη πλήρη κάλυψη της γεωμετρικής επιφάνειας του πλαισίου από επιφάνεια στοιχείων, στην ανομοιογένεια των χαρακτηριστικών των φβ στοιχείων που απαρτίζουν το πλαίσιο και στην ανακλαστικότητα του υαλοπίνακα του πλαισίου.

4.2.2 Συντελεστής απόδοσης μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας (array)

Ο ολικός συντελεστής απόδοσης μιας φβ συστοιχίας (η_{σ}) εκφράζεται με βάση το συντελεστή απόδοσης του πλαισίου (η_m) λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της εκ κατασκευής ανομοιογένειας (Mismatch) των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των χρησιμοποιούμενων φβ πλαισίων ($\eta_{ανομ}$) καθώς επίσης και την απώλεια στα καλώδια σύνδεσης (Wiring) μεταξύ των πλαισίων της συστοιχίας (η_{ws}).

Έτσι προκύπτει:

$$n_{\sigma} = n_m \times n_{\text{ανομ}} \times n_{w\sigma}$$

Οι απώλειες ανομοιογένειας αφορούν στην ανομοιογένεια των χαρακτηριστικών I-V των πλαισίων που απαρτίζουν τη φβ συστοιχία και εκφράζονται από το συντελεστή ανομοιογένειας $n_{\text{ανομ}}$ ο οποίος παίρνει την τυπική τιμή 0.98.

Οι διατομές των καλωδίων σύνδεσης μεταξύ των φβ πλαισίων της συστοιχίας επιλέγονται έτσι ώστε οι απώλειες σε αυτά να μην ξεπερνούν το 2% με 3%. Μια τυπική τιμή για το συντελεστή απωλειών στις καλωδιώσεις της συστοιχίας λαμβάνεται $n_{w\sigma}=0.98$.

4.2.3 Δίοδοι αντεπιστροφής

Οι απώλειες στη δίοδο αντεπιστροφής λαμβάνονται υπόψη με το συντελεστή n_D που συνήθως παίρνει την τυπική τιμή $n_D = 0.99$ ανεξάρτητα από το πλήθος των φβ πλαισίων ανά κλάδο.

Οι δίοδοι αντεπιστροφής ή δίοδοι απομόνωσης χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν μια αλυσίδα πλαισίων με τέτοιο τρόπο ώστε η αλυσίδα να άγει ρεύμα στο ζυγό (ορθή πόλωση της διόδου) όταν τα κύτταρα φωτίζονται αλλά να εμποδίζουν τη ροή ρεύματος από το ζυγό στην αλυσίδα των πλαισίων (ανάστροφη πόλωση της διόδου) στην περίπτωση που για οποιοδήποτε λόγο η τάση εξόδου της αλυσίδας είναι μικρότερη από την τάση του ζυγού.

Οι δίοδοι αντεπιστροφής προκαλούν μια πτώση τάσης που αφαιρείται από την τάση εξόδου της συστοιχίας, προκαλούν δηλαδή απώλειες ενέργειας υπό μορφή θερμότητας όταν η συστοιχία παράγει ενέργεια.

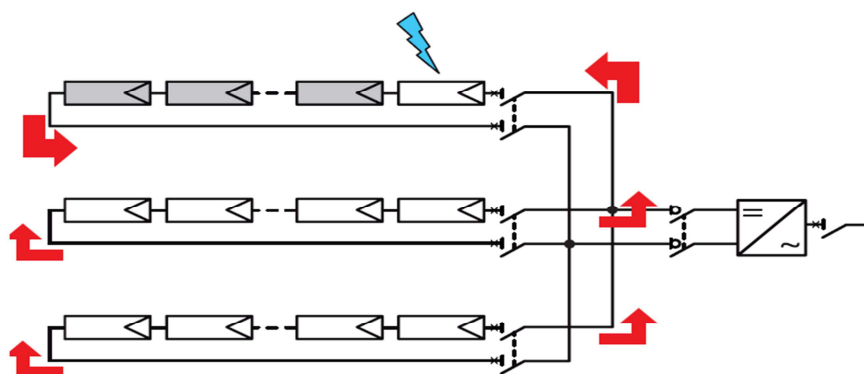
Κατάλληλη τοποθέτηση διόδων αντεπιστροφής μπορεί να προλάβει σοβαρές ή ακόμα και καταστροφικές βλάβες όταν για κάποιο λόγο συμβεί βραχυκύκλωμα σε καλώδια, συνδετήρες, ακροδέκτες μεταξύ γειτονικών πλαισίων και αλυσίδων ή μεταξύ κυττάρων και μεταλλικών υποστρωμάτων των πλαισίων.

Ως δίοδοι αντεπιστροφής χρησιμοποιούνται συνήθως κοινές ανορθωτικές δίοδοι επαφής p-n με κατάλληλα χαρακτηριστικά. Παρουσιάζουν πτώση τάσης περί τα 0.7V με 0.9V. σε μικρότερα συστήματα τάσεις μικρότερες των 24V μπορούν να χρησιμοποιηθούν δίοδοι schottky που παρουσιάζουν μικρότερη πτώση τάσης από τις κανονικές δίοδους αλλά είναι πιο ακριβές.

Γενικά κριτήρια επιλογής δίοδων αντεπιστροφής:

- Ελάχιστη δυνατή πτώση τάσης σε ορθή πόλωση σε ονομαστικό ρεύμα και πραγματική θερμοκρασία.
- Ικανοποιητική μέγιστη ανάστροφη τάση που πρέπει να σχετίζεται με τη μέγιστη τάση του ζυγού όπου συνδέονται οι αλυσίδες (strings) μαζί με τις υπερτιθέμενες στιγμιαίες υπερτάσεις καθώς και με τις πιθανές συνθήκες βραχυκύκλωσης των αλυσίδων.
- Μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία λειτουργίας σε σταθερή κατάσταση.
- Αξιοπιστία.

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε μια περίπτωση ροής ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε μια αλυσίδα όπου έχει συμβεί σφάλμα. Το σφάλμα μπορεί να αφορά όλους τους λόγους που είδαμε παραπάνω.



Σχέδιο 4.1. Ροή ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε μια συστοιχία. Στο σχήμα η προστασία γίνεται με διακοπτικά στοιχεία.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης των φωτοβολταϊκών I_{sc} είναι λίγο μεγαλύτερο από το I_{MPPT} . Σε περίπτωση ωστόσο βραχυκυκλώματος σε μια αλυσίδα μιας συστοιχίας με πολλές παράλληλες αλυσίδες το ρεύμα βραχυκύκλωσης που θα διαρρεύσει την «προβληματική» αλυσίδα θα ισούται με το άθροισμα των ρευμάτων I_{sc} των υπόλοιπων παράλληλων αλυσίδων. Αυτό το ρεύμα μπορεί να είναι αρκετά μεγάλο, ανάλογα με τον αριθμό των παράλληλων αλυσίδων και το I_{sc} του κάθε πλαισίου, και μπορεί να καταστρέψει συνολικά την αλυσίδα. Παράλληλα θέτει εκτός παραγωγής όλη τη συστοιχία.

Μια έκφραση για το αντίστροφο ρεύμα του παραπάνω τύπου είναι:

$$I_r = (n_{sp} - 1) \times I_{sc}$$

I_r : μέγιστο αντίστροφο ρεύμα

n_{sp} : αριθμός παράλληλων αλυσίδων

I_{sc} : ρεύμα βραχυκύκλωσης ενός πλαισίου/αλυσίδας.

Να πούμε ότι αρκετοί σχεδιαστές εκτιμούν ότι οι δίοδοι αντεπιστροφής δεν προστατεύουν ικανοποιητικά τις συστοιχίες από τα αντίστροφα ρεύματα. Για αυτό και προτείνουν τον εφοδιασμό των συστοιχιών με διακοπτικά μέσα όπως ασφάλειες ή αυτόματους διακόπτες.

4.2.4 Συντελεστής γήρανσης

Αφορά στη μείωση της απόδοσης των ΦΒ πλαισίων στο χρόνο ζωής τους και εκφράζεται συνήθως με το ποσοστό γήρανσης ανά έτος χρήσης. Προσδιορίζει την ελάττωση της απόδοσής τους άρα και της ισχύος αιχμής και οφείλεται κυρίως σε υπερθερμάνσεις των ΦΒ κυψελών που καταστρέφουν την δομή του υλικού τους.

4.2.5 Οπτικές ενεργειακές απώλειες

Αποτελούν όλες εκείνες τις απώλειες που καθορίζονται από την απόκλιση της απόδοσης σε σχέση με τις πρότυπες συνθήκες, λόγω των παρακάτω αιτιών:

- Διαφοροποίηση ανακλαστικότητας ΦΒ πλαισίου σε σχέση με την αντίστοιχη σε STC.
- Επίδραση διαφοροποίησης φάσματος ακτινοβολίας σε σχέση με το AM1,5 (STC)
- Απώλειες χαμηλών τιμών πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας
- Καθαρότητα όψεως του ΦΒ πλαισίου

4.2.5.1 Απώλειες λόγω διακύμανσης του ηλιακού φάσματος

Ο παράγοντας αυτός περιγράφει τις απώλειες που προκαλούνται από την διακύμανση του ηλιακού φάσματος, η οποία οφείλεται στη διαφοροποίηση της τιμής μάζας του αέρα (AM) από την αντίστοιχη τιμή των STC (AM=1,5).

4.2.5.2 Απώλειες λόγω χαμηλής ακτινοβολίας

Ο παράγοντας αυτός περιγράφει τις απώλειες που προκαλούνται λόγω χαμηλής έντασης της ακτινοβολίας. Για τον υπολογισμό του παράγοντα αυτού χρησιμοποιούνται τα δεδομένα για την απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε συνθήκες χαμηλής ακτινοβολίας (200 W/m^2) και σε Standart Test Conditions (STC) του κάθε τύπου πλαισίου.

4.2.5.3 Απώλειες λόγω ρυπανσης και επικάθησης αιωρούμενων σωματιδίων

Η ηλεκτροπαραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων μπορεί να μειωθεί από ρύπανση της επιφάνειάς τους, από την επικάθηση σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από τη θάλασσα, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών. Η μείωση είναι σημαντικότερη σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και

προσκολλάται ισχυρά στη γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων, χωρίς να μπορεί η βροχή να την ξεπλύνει αρκετά. Στις περιπτώσεις αυτές χρειάζεται να γίνεται περιοδικός καθαρισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων με απορρυπαντικό. Πάντως, σε περιοχές με συχνές χιονοπτώσεις ή ανεμοθύελλες, οι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται συνήθως με κλίση 90 μοίρες (κάθετοι) για την αποφυγή συσσώρευσης χιονιού, ή τουλάχιστον 45 μοίρες για να μην συγκρατείται η σκόνη. Όταν η φωτοβολταϊκή γεννήτρια βρίσκεται σε μία περιοχή που εκτιμάμε ότι ο βαθμός ρύπανσης είναι σημαντικός, είναι σκόπιμο να προβλέπεται στους υπολογισμούς μας η αντίστοιχη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια

4.2.6 Απώλειες λόγω ανακρίβειας ποιοτικών χαρακτηριστικών πλαισίου (Module Quality Loss)

Μια ακόμα παράμετρος που πρέπει να λάβουμε υπόψη για τον καθορισμό των απωλειών του μελετώμενου συστήματος είναι η απώλειες λόγω ανακριβειών των ποιοτικών χαρακτηριστικών των φβ πλαισίων (Module Quality Loss). Τις περισσότερες φορές οι κατασκευαστές των φβ παρέχουν ανακριβή στοιχεία για τα ονομαστικά χαρακτηριστικά των πλαισίων τα οποία όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό είναι για εμπορικούς λόγους υπερεκτιμημένα. Κάτι τέτοιο μπορεί να αφορά για παράδειγμα την ονομαστική ισχύ ή αλλιώς την ισχύ αιχμής που αποδίδει ο κατασκευαστής στο πλαίσιο για τις συνθήκες STC.

4.2.7 Απώλειες λόγω αναντιστοιχίας μεταξύ των χαρακτηριστικών των πλαισίων (Mismatch Loss)

Οι απώλειες αναντιστοιχίας οφείλονται στο γεγονός ότι τα πλαίσια που αποτελούν τη συστοιχία στην πραγματικότητα δεν είναι μεταξύ τους πανομοιότυπα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρουσιάζονται αποκλίσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών τάσης ρεύματος (I-V) των πλαισίων. Στην ουσία τα πλαίσια έχουν μεταξύ τους, έστω και ελάχιστα, διαφορετικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Στην πράξη αυτό το φαινόμενο επηρεάζει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ολόκληρης της συστοιχίας με συνέπεια να παρουσιάζεται απώλεια ισχύος στο MPP.

4.2.8 Απώλειες λόγω σκίασης

Ένας άλλος παράγοντας επίδρασης της DC ενεργειακής απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι η σκίαση. Το φαινόμενο της σκίασης εμφανίζεται είτε σε περιπτώσεις που συναντώνται εμπόδια στον ορίζοντα των πλαισίων όπως παρακείμενα κτήρια, βλάστηση κλπ, είτε σε περιπτώσεις με περιορισμένη έκταση εγκατάστασης όπως για παράδειγμα στις στέγες κτηρίων όπου προκαλείται σκίαση από τη μία σειρά στην επόμενη. Ιδιαίτερα στη δεύτερη περίπτωση, οι επιπτώσεις της σκίασης μπορεί να είναι σημαντικές και για το λόγο αυτό είναι αναγκαίος ο λεπτομερής προσδιορισμός των απωλειών που προκαλούν.

Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο, αποτελείται από φωτοβολταϊκά στοιχεία ίδιων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών συνδεδεμένων σε σειρά. Συνεπώς, η σκίαση ή η βλάβη ενός και μόνο φωτοβολταϊκού στοιχείου, θα μπορούσε να επιφέρει ολική αχρήστευση του πλαισίου. Ένα σκιασμένο κύτταρο, συμπεριφέρεται κατά βάση όπως η απλή δίοδος p-n, η οποία, όταν το κύκλωμα είναι κλειστό, δέχεται από τα υπόλοιπα υγιή κύτταρα μία υψηλή ανάστροφη τάση. Αν τα υπόλοιπα φωτιζόμενα ηλιακά στοιχεία του πλαισίου είναι μεγάλου πλήθους, αυτή η τάση μπορεί να φτάσει την τάση διάσπασης της σκιασμένης διόδου, προκαλώντας την καταστροφή της.

Στην πράξη, για τα τυπικά φωτοβολταϊκά πλαίσια, το σκιασμένο κύτταρο λειτουργεί ως μία μεγάλη αντίσταση, όπου αποδίδεται η ενέργεια που προσφέρουν τα υπόλοιπα. Παρατεταμένος σκιασμός ενός στοιχείου σε συνδυασμό με έντονο φωτισμό των υπολοίπων μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή του στοιχείου αυτού και κατά συνέπεια στην αχρήστευση όλου του πλαισίου, επειδή δεν υπάρχει δυνατότητα αντικατάστασης ενός κατεστραμμένου στοιχείου.

Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως φαινόμενο Hot Spot (κατάσταση “θερμής κηλίδας”). Για να αποτραπεί μία τέτοια εξέλιξη, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο εφοδιάζεται με διόδους (δίοδοι παράκαμψης), οι οποίες συνδέονται παράλληλα σε τμήματα των κυττάρων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά, επιτρέποντας έτσι την χρησιμοποίηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου, ακόμα και αν κάποιο φωτοβολταϊκό στοιχείο του υστερεί ή καταστραφεί

4.2.9 Ωμικές απώλειες λόγω καλωδιώσεων

Οι ωμικές απώλειες λόγω καλωδιώσεων εκφράζουν την ενέργεια που χάνεται πάνω στις γραμμές, κατά την μετατροπή της σε θερμότητα. Οι καλωδιώσεις αφορούν στη σύνδεση μεταξύ των φβ πλαισίων εν σειρά για τη συγκρότηση μιας αλυσίδας πλαισίων (string), στις καλωδιώσεις που χρειάζονται για να συνδεθούν οι αλυσίδες μεταξύ τους στους κόμβους (κουτιά), στις καλωδιώσεις για να συνδεθούν οι κόμβοι με τους μετατροπείς. Προφανώς οι ωμικές απώλειες, που μεταφράζονται σε πτώση τάσης, ελαττώνουν την ωφέλιμη ενέργεια που τελικά φτάνει στη dc μεριά του μετατροπέα σε σχέση με αυτή που παράγεται από το σύνολο των πλαισίων της συστοιχίας και επηρεάζουν το σημείο μέγιστης ισχύος.

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι στο σχεδιασμό του συστήματος πρέπει να γίνει κατάλληλη επιλογή τύπου και μήκους καλωδίων, ώστε οι ωμικές απώλειες να περιορίζονται κοντά στην τυπική τιμή του 3%. Ταυτόχρονα βέβαια πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι αντίστοιχοι κανονισμοί ασφαλείας και βέλτιστης απόδοσης σχετικά με το ρεύμα, τη διατομή, το μήκος και την προκαλούμενη πτώση τάσης κατά μήκος των καλωδίων. Μπορεί τελικά η προκύπτουσα τιμή των απωλειών λόγω καλωδιώσεων να είναι μικρότερη ή και να υπερβαίνει την τιμή του 3%.

4.2.10 Θερμικές απώλειες λόγω της θερμοκρασίας των κυψελίδων

Στις Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμής (STC) η θερμοκρασία λειτουργίας των κυττάρων λαμβάνεται 25°C. Ωστόσο στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας η θερμοκρασία των κυττάρων ανέρχεται σε τιμές αρκετά πιο υψηλές κάτι που όπως έχουμε δει επηρεάζει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των κύτταρων και συνεπώς των πλαισίων και των συστοιχιών που αποτελούν τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια. Έχουμε αλλαγές στη I-V χαρακτηριστική, μετατοπίζεται το MPP και μειώνεται ο βαθμός απόδοσης. Για τον καθορισμό λοιπόν των θερμικών απωλειών, ο οποίος βασίζεται στο μοντέλο της μιας διόδου, καθοριστικό ρόλο παίζει η εκτίμηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του κυττάρου.

Η θερμοκρασία λειτουργίας των κυττάρων του πλαισίου καθορίζεται από μια θερμική ισορροπία. Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στα κύτταρα εν μέρει μετατρέπεται σε θερμότητα και εν μέρει σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι παράγοντες που εμπλέκονται σε αυτή τη διαδικασία είναι η προσπίπτουσα ακτινοβολία που φτάνει στα κύτταρα αφού διαδοθεί δια μέσου των διάφορων στρώσεων υλικών που τα καλύπτουν, η ικανότητα των κυττάρων να απορροφούν ακτινοβολία και να την μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια, η ικανότητα συνολικά του πλαισίου να απάγει θερμότητα, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και η θερμοκρασία των κυττάρων. Μια σχέση που περιγράφει την παραπάνω ισορροπία είναι:

$$k \times (T_{\text{cell}} - T_{\text{amb}}) = A \times G_{\text{inc}} \times (1 - \text{Eta}).$$

Έτσι η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού κυττάρου μπορεί να δοθεί από την παρακάτω σχέση :

$$T_c = \frac{A \cdot G_{\text{inc}} \cdot (1 - \text{Eta}) + k \cdot T_{\text{amb}}}{k}$$

k : ο παράγοντας θερμικών απωλειών που εκφράζει την απαγωγή θερμότητας στο περιβάλλον ή σε οποιαδήποτε κατασκευή εφάπτεται με τα πλαίσια και λαμβάνεται να έχει θερμοκρασία περιβάλλοντος.

T_c : η θερμοκρασία λειτουργίας του κυττάρου.

T_{amb} : η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

G_{inc} : η ολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.

A : συντελεστής που εκφράζει την ικανότητα απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας αφού έχει περάσει μέσα από τις επιφάνειες που επικαλύπτουν τα κύτταρα. Παίρνει τυπική τιμή περίπου 0.9.

Eta : συντελεστής που εκφράζει την απόδοση του κυττάρου και αναφέρεται στην ικανότητα του να μετατρέπει την ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια και λαμβάνεται περίπου 0, 1.

Με βάση τη σχέση αυτή προσδιορίζεται και η θερμική συμπεριφορά της συστοιχίας η οποία προφανώς εξαρτάται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τη θέρμανση των φβ κυττάρων υπό την επίδραση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Καθοριστική σημασία για τα παραπάνω έχει ο παράγοντας θερμικών απωλειών k , ο οποίος εκφράζεται από το άθροισμα του σταθερού όρου k_c και έναν παράγοντα ανάλογο της ταχύτητας του ανέμου k_v . Η αντίστοιχη σχέση είναι:

$$k = k_c + k_v \times v$$

Όπου:

v : η ταχύτητα του ανέμου σε (m/sec).

k, k_c : σε μονάδες $W / m^2 K$.

k_v : σε μονάδες $(W / m^2 K) / (m/sec)$.

Οι παραπάνω παράγοντες εξαρτώνται από τον τρόπο στήριξης των φωτοβολταϊκών πλαίσια p_x σε προσόψεις, οροφές, επικλινή στηρίγματα κλπ. Για ελεύθερη κυκλοφορία αέρα ο συντελεστής k αναφέρεται και στις 2 πλευρές του fb πλαισίου. Αν ωστόσο η πίσω πλευρά του πλαισίου είναι θερμικά μονωμένη η τιμή του k μειώνεται θεωρητικά στη μισή του τιμή, αφού η πίσω πλευρά επί της ουσίας δε συνεισφέρει στη μεταφορά θερμότητας.

Με την χρήση των παραπάνω σχέσεων και προφανώς με κατάλληλες μετρήσεις της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας του ανέμου είναι δυνατόν με ικανοποιητική προσέγγιση να υπολογιστεί η θερμοκρασία υπό την οποία λειτουργούν τα ηλιακά κύτταρα των πλαισίων της συστοιχίας.

Γενικά για τα κύτταρα κρυσταλλικού Si, για κάθε $1^\circ C$ βαθμό αύξησης της θ του κυττάρου έχουμε ελάττωση της απόδοσης του κατά περίπου 0,4% για λειτουργία στο MPP.

Σύμφωνα με μετρήσεις που έχουν γίνει σε εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών, όπου τα πλαίσια βρίσκονταν τοποθετημένα σε επικλινή στηρίγματα των οποίων η πίσω πλευρά δεν ήταν καλυμμένη και με την προϋπόθεση ότι υπήρχε ελεύθερη κυκλοφορία αέρα έχουν προταθεί οι εξής τιμές για τις παραμέτρους k_c και k_v :

$$k_c = 20 W / m^2 k \quad \text{και} \quad k_v = 6 (W / m^2 k) / (m/sec).$$

Ωστόσο πρέπει να επισημανθεί ότι οι τιμές αυτές για την ταχύτητα του ανέμου έχουν παρθεί ακριβώς στο επίπεδο ύψους των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Οι ταχύτητες αυτές είναι αρκετά μικρότερες από ταχύτητες που παρέχονται σε αρχεία με μετεωρολογικά στοιχεία από υπηρεσίες και σταθμούς μιας και συνήθως αυτές διεξάγονται σε μεγαλύτερο ύψος. Γι' αυτό η θερμοκρασία λειτουργίας της συστοιχίας είναι συγκριτικά χαμηλότερες κάτι που σημαίνει ότι μπορούμε να μιλάμε για σχετική υποεκτίμηση των θερμικών απωλειών. Δηλαδή μικρή ταχύτητα ανέμου συνεπάγεται μικρό συντελεστή k κάτι που σημαίνει μικρή θερμοκρασία λειτουργίας για το κύτταρο.

Γενικά πρέπει να πούμε ότι ο υπολογισμός της θ του κυττάρου επηρεάζεται σημαντικά από την ποιότητα των μετρήσεων του ανέμου. Πολλές φορές προτείνεται ένας προσεγγιστικός τρόπος υπολογισμού του k κατά τον οποίο η ταχύτητα του ανέμου θεωρείται 1.5 m/sec .

Έτσι από τη σχέση $k = k_c + k_v \times v$ προκύπτει ότι

$$k = 20 \text{ W/m}^2 \text{ k} + 6 (\text{W/m}^2 \text{ k}) / (\text{m/sec}) \times 1.5 (\text{m/sec}) = 29 \text{ W/m}^2 \text{ k}$$

ή διαφορετικά θεωρείται :

$$k_c = 29 \text{ W/m}^2 \text{ k} \text{ και } k_v = 0 \text{ και συνεπώς } k = k_c = 29 \text{ W/m}^2 \text{ k}.$$

Να σημειωθεί ότι αυτή η τιμή μπορεί να μειωθεί έως και $15 \text{ W/m}^2 \text{ k}$ ανάλογα με τη μόνωση του πίσω μέρους του πλαισίου.

Αρκετές φορές οι κατασκευαστές δίνουν το συντελεστή NOCT (Nominal Operation Condition Temperature), που είναι η θερμοκρασία που φτάνουν τα πλαίσια χάρις κάλυψη της πίσω πλευράς τους, υπό τις standard συνθήκες λειτουργίας οι οποίες θεωρούνται οι εξής :

Προσπίπτουσα ακτινοβολία $G_{inc} = 800$

Θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{amb} = 20^\circ\text{C}$

Ταχύτητα ανέμου 1 m/sec

Κατάσταση λειτουργίας : ανοιχτό κύκλωμα – Open circuit

$$T_c = \frac{A \cdot G_{inc} \cdot (1 - \eta) + k \cdot T_{amb}}{k} \quad \text{συνεπάγεται ότι :}$$

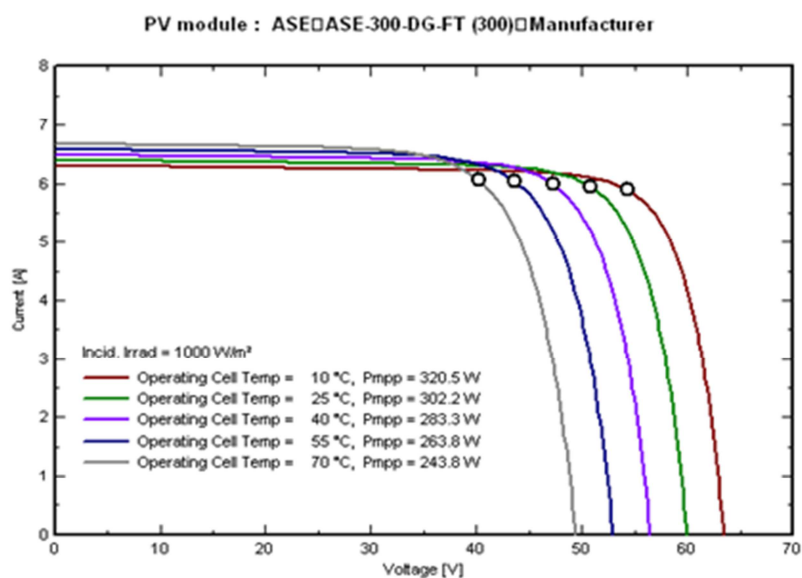
$$NOCT = T_c = \frac{A \cdot 800(W/m^2) \cdot (1 - 0) + k \cdot 20C}{k}$$

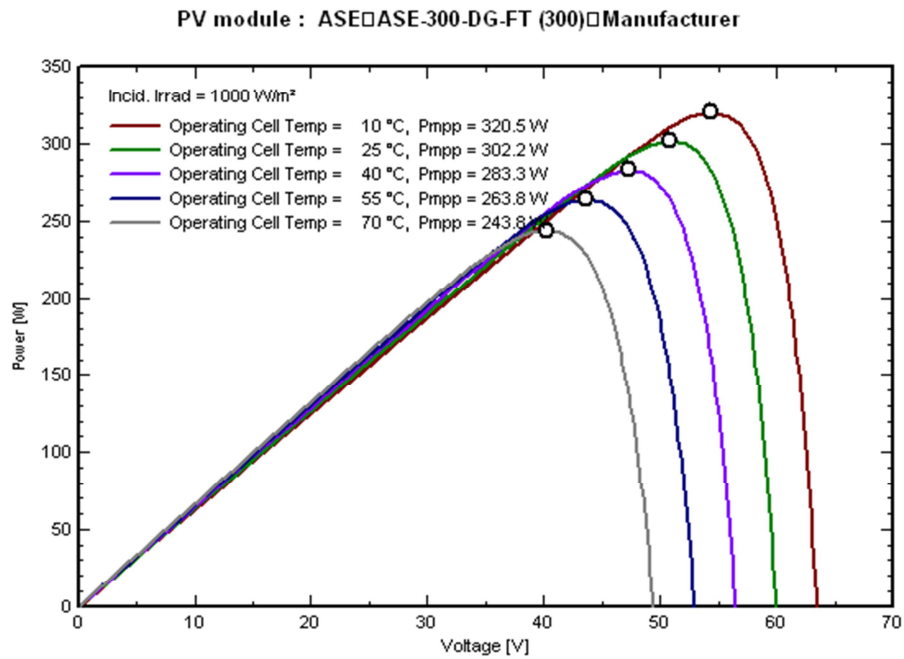
Ο καθορισμός της θερμοκρασίας του κυττάρου είναι εξαιρετικής σημασίας και για τον καθορισμό των τιμών των παραμέτρων R_s και R_{sh} των κυττάρων των πλαισίων από τα οποία αποτελούνται οι συστοιχίες και τελικά η φωτοβολταϊκή γεννήτρια. Οι R_{sh} και R_s αποτελούν βασικούς παράγοντες για τον καθορισμό των I-V χαρακτηριστικών σύμφωνα με το μοντέλο της 1 διόδου.

Ανάλογα λοιπόν με τη μεταβολή της θερμοκρασίας λειτουργίας του κυττάρου έχουμε μεταβολές και στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των πλαισίων της συστοιχίας σε σχέση με αυτά στις συνθήκες STC. Οι μεταβολές αυτές αφορούν στις τιμές των V_{mpp} , I_{mpp} , I_{sc} , V_{oc} και συνεπώς στην παραγόμενη ισχύ $P(W)$ και στο βαθμό απόδοσης, P_{max} efficiency [%], των πλαισίων και τελικά της συστοιχίας.

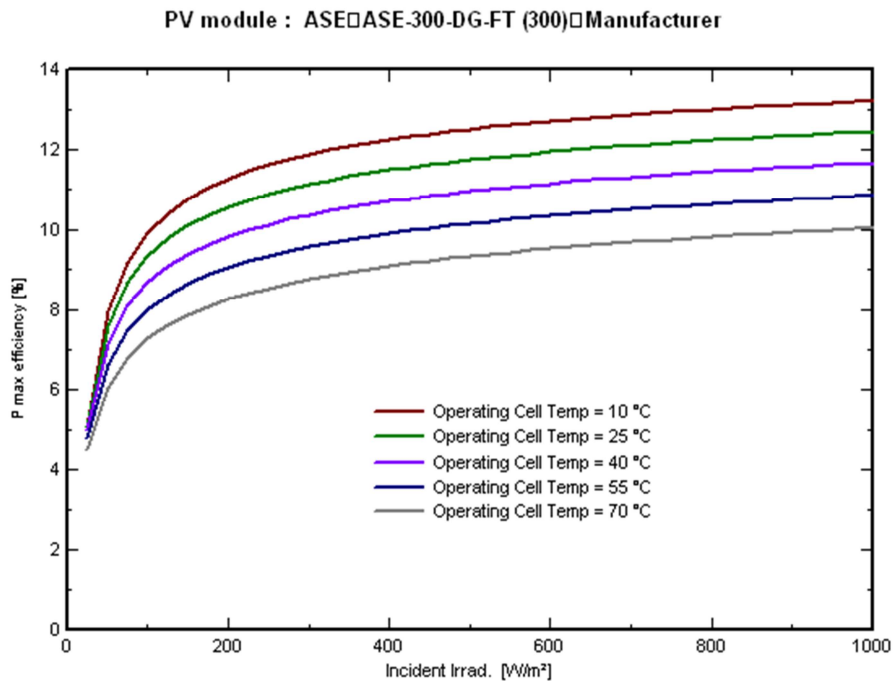
Για αύξηση της θερμοκρασίας άνω των $25^{\circ}C$ και με την υπόθεση ότι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία παραμένει σταθερή στην τιμή των $1000W/m^2$ όπως βλέπουμε στα σχήματα που ακολουθούν οι απώλειες για τα πλαίσια που χρησιμοποιήσαμε αυξάνονται.

Σχέδιο 4.2 Επίδραση της θερμοκρασίας λειτουργίας του κυττάρου στη I-V χαρακτηριστική του πλαισίου.





Σχέδιο 4.3 Επίδραση θερμοκρασίας λειτουργίας κυττάρου στο MPP και την παραγόμενη ισχύ του πλαισίου.



Σχέδιο 4.4 Επίδραση θερμοκρασίας λειτουργίας κυττάρου στην απόδοση του πλαισίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΦΒ ΠΑΡΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ 80KW

5.1 Περιγραφή ΦΒ πάρκων απ' όπου έγινε η συλλογή δεδομένων



Η συλλογή των δεδομένων έγινε από τρία ΦΒ πάρκα ισχύος 80 KW το καθένα.

Το πρώτο πάρκο βρίσκεται στις Μάκρες στο Ζαρό (Μορόνι) με γ.π. (γεωγραφικό πλάτος) $24^{\circ}55'43.32''$. Με ημερομηνία σύνδεσης στο δύκτιο 17/5/2010.

Το δεύτερο στο Κόρτε Γκούλε στο Αρκαλοχώρι με γ.π. $25^{\circ}17'25.68''$ και ημερομηνία σύνδεσης στο δύκτιο 20/4/2010.

Το τρίτο πάρκο στο Μελιδοχώρι με γ.π. $25^{\circ}6'38.99''$ και ημερομηνία σύνδεσης στο δύκτιο 13/7/2010.

Τα τρία αυτά πάρκα χρησιμοποιούν σταθερές βάσεις για την στήριξη των πανέλων. Επίσης και τα τρία πάρκα χρησιμοποιούν

- πανέλα BP Solar BP 3230 N ($A=348*1,667m^2=580m^2$)

- Inverters της SMA (6 x Sunny Mini Central 11000TL, 3 x Sunny Boy 4000TL-20)
- Sensors (Sunny Sensorbox)

5.2 Απαραίτητα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός ΦΒ πλαισίου

1. Ισχύς αιχμής (P_p), σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
2. Ανοιχτοκυκλώμενη τάση (V_{oc}) σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
3. Βραχυκλωμένη ένταση ρεύματος (I_{sc}), σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
4. Τάση (V_m), στις συνθήκες της μέγιστης απόδοσης, σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
5. Ένταση ρεύματος (I_m), στις συνθήκες της μέγιστης απόδοσης, σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
6. Συντελεστής πλήρωσης (FF), που ορίζεται ως ο λόγος του γινομένου $V_m \times I_m$ προς το γινόμενο $V_{oc} \times I_{sc}$.
7. Συντελεστής απόδοσης (η), σε συμβατική θερμοκρασία και συντελεστής διόρθωσης της απόδοσης.
8. Διηλεκτρική αντοχή δηλαδή η ελάχιστη τάση που προκαλεί ηλεκτρική διάσπαση ανάμεσα στα ηλιακά στοιχεία και στο μεταλλικό περίβλημα του Φβ πλαισίου

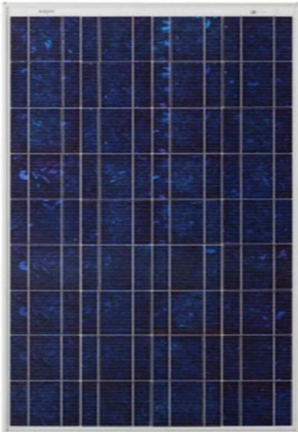
Συχνά, δεν είναι διαθέσιμα όλα τα λεπτομερειακά κατασκευαστικά δεδομένα και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των Φβ πλαισίων (διαστάσεις, συντελεστής κάλυψης, συντελεστής απόδοσης των ηλιακών στοιχείων κ.λπ.), αλλά δίνεται μόνο μια ενδεικτική ισχύς αιχμής (P_a), που αντιστοιχεί στην παραγόμενη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ όταν το Φ/β πλαίσιο δεχτεί ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος 1 kW/m^2

Οι μονάδες ισχύος που εκφράζουν την ισχύ αιχμής ενός Φ/β πλαισίου μιας ολόκληρης Φβ εγκατάστασης ή ενός ηλιακού στοιχείου ονομάζονται συχνά βάτ αιχμής (W_p , Watt peak) και κιλοβάτ αιχμής (KWp).

Τεχνικά χαρακτηριστικά BP Solar BP 3230 N

Διαστάσεις : Μήκος 1667 mm Πλάτος 1000 mm Πάχος 50 mm
Απόδοση : Ονομαστική ισχύς $P_m=165,6 \text{ Wp}$

Ηλεκτρικά χαρ/στικά :



$V_m=26 \text{ V}$
 $I_m=6,3 \text{ A}$
 $I_{sc}=7 \text{ A}$
 $V_{oc}=33,1 \text{ V}$

Συντελεστές διόρθωσης θερμοκρασίας
Ρεύματος : $0,065 \% / \text{C}$
Τάσης : $0,4\% / \text{C}$
Ισχύος: $0,5\%$

5.3 Συλλογή και καταγραφή δεδομένων

Η πηγή συλλογής δεδομένων όπως η ταχύτητα ανέμου, η εξωτερική θερμοκρασία, η θερμοκρασία πάνελου, η ισχύ, η συνολική ενεργειακή παραγωγή, η ηλιακή ακτινοβολία και η τάση DC, έγινε από τον ιστότοπο της sunnyportal.

Ταχύτ. ανέμου	Εξωτ. Θερ.	Θερ. Μον.	Ισχύς	Συ. Εν. Παραγωγή	Ηλιακή ακτιν.	Τάση DC
[m/s]	[°C]	[°C]	kW	[KWh]	[W/m ²]	V

Η καταγραφή έγινε ανά 1 ώρα για όλο το 24ωρο για ένα ολόκληρο χρόνο. Η ταξινόμηση και επεξεργασία των δεδομένων έγινε σε αρχείο excel.

nT	Pm	PRt	PR
	kW		

Αφού γίνει η καταγραφή δεδομένων, με μαθηματικούς τύπους βρίσκουμε τον συντελεστή θερμοκρασίας του ΦΒ στοιχείου **nT**, το οποίο εκφράζει την επίδραση της διαφοροποίησης της θερμοκρασίας της κυψελίδας, σε σχέση με την θερμοκρασία αναφοράς (25*) στην απόδοσή του. Την ηλεκτρική ισχύς **Pm** που αποδίδεται από το ΦΒ στοιχείο όταν λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος.

Τον λόγο επίδοσης **PRt** που οφείλεται στη διαφοροποίηση της θερμοκρασίας κυψελίδας από τη θερμοκρασία αναφοράς των (25*) και **PR** τον λόγο επίδοσης της συστοιχίας.

ΤΥΠΟΛΟΓΙΟ

n_T : Συντελεστής απόκλισης της απόδοσης του ΦΒ πλαισίου εξαιτίας της διαφοροποίησης της θερμοκρασίας της κυψέλης σε σχέση με την θερμοκρασία αναφοράς 25 °C .

$$n_T = 1 + \gamma_{mp} \cdot (\theta_C - \theta_{STC}),$$

όπου,

$\gamma_{mp} = \frac{dP}{P_m \cdot dT}$, ο θερμικός συντελεστής μέγιστης ισχύος του ΦΒ στοιχείου

θ_C , θερμοκρασία κυψέλης θεωρούμενη ίδια για όλες τις κυψέλες.

$$\theta_C = \theta_a + \frac{G_t}{G_{STC}} \cdot (T_1 \cdot e^{B \cdot ws} + T_2 + \Delta\theta),$$

όπου,

θ_a , η θερμοκρασία του περιβάλλοντα αέρα

G_t , η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του ΦΒ πλαισίου

B, εμπειρικός συντελεστής

ws, η ταχύτητα του ανέμου

T_1 , T_2 , εμπειρικοί συντελεστές που υπολογίζονται βάσει τις οριακές τιμές της θερμοκρασίας της κυψέλης σε χαμηλές και υψηλές ταχύτητες ανέμου αντίστοιχα και $\Delta\theta$, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της κυψέλης και της πίσω επιφάνειας του ΦΒ πλαισίου.

P_m : Αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς ΦΒ πλαισίου

$$P_m = H_t / E_{stc} \cdot P_p \cdot n_T$$

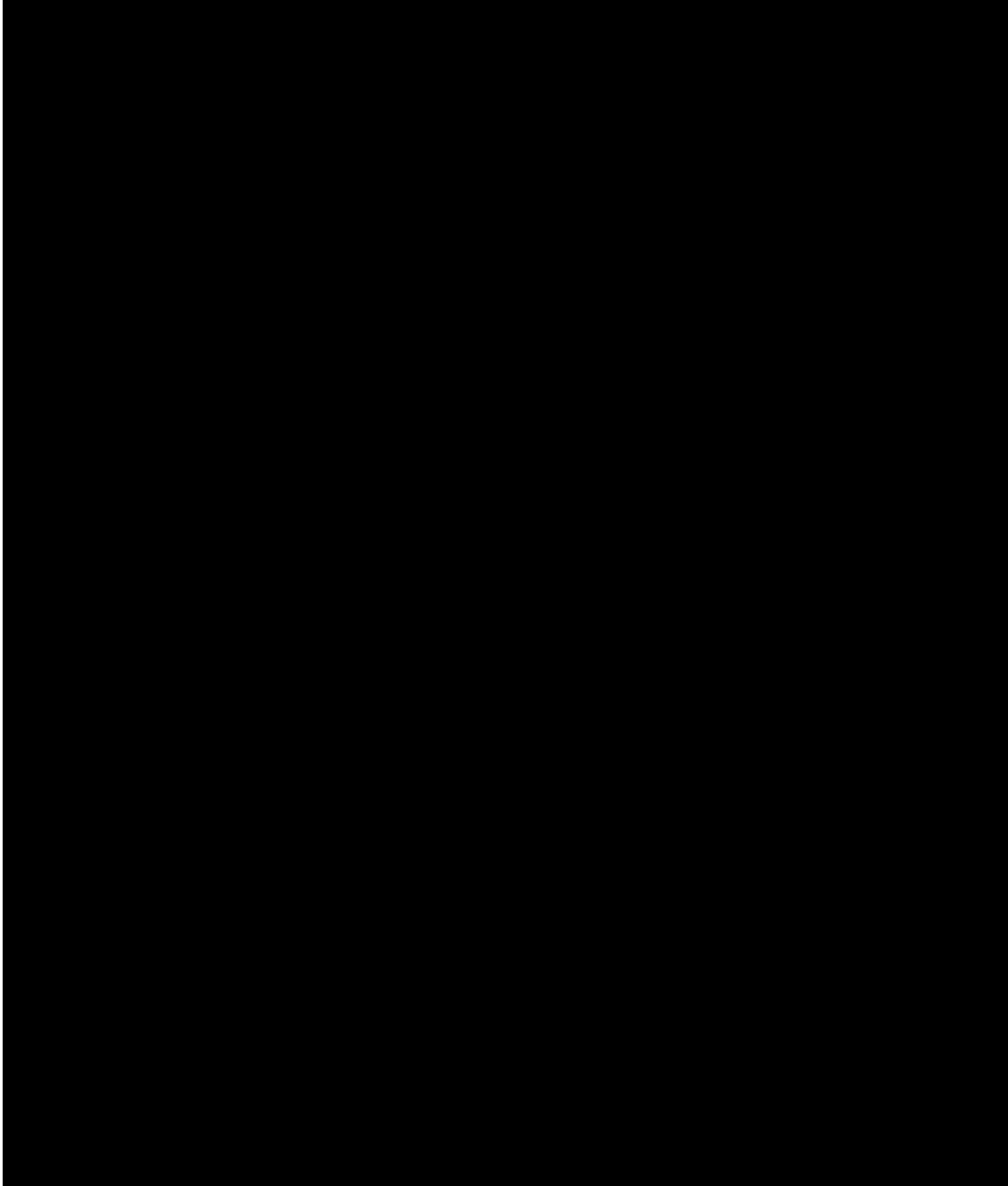
PR_t : Λόγος επίδοσης που οφείλεται στη διαφοροποίηση της θερμοκρασίας κυψελίδας από τη θερμοκρασία αναφοράς των 25 °C

$$PR_t = H_t \cdot n_T / G_{stc}$$

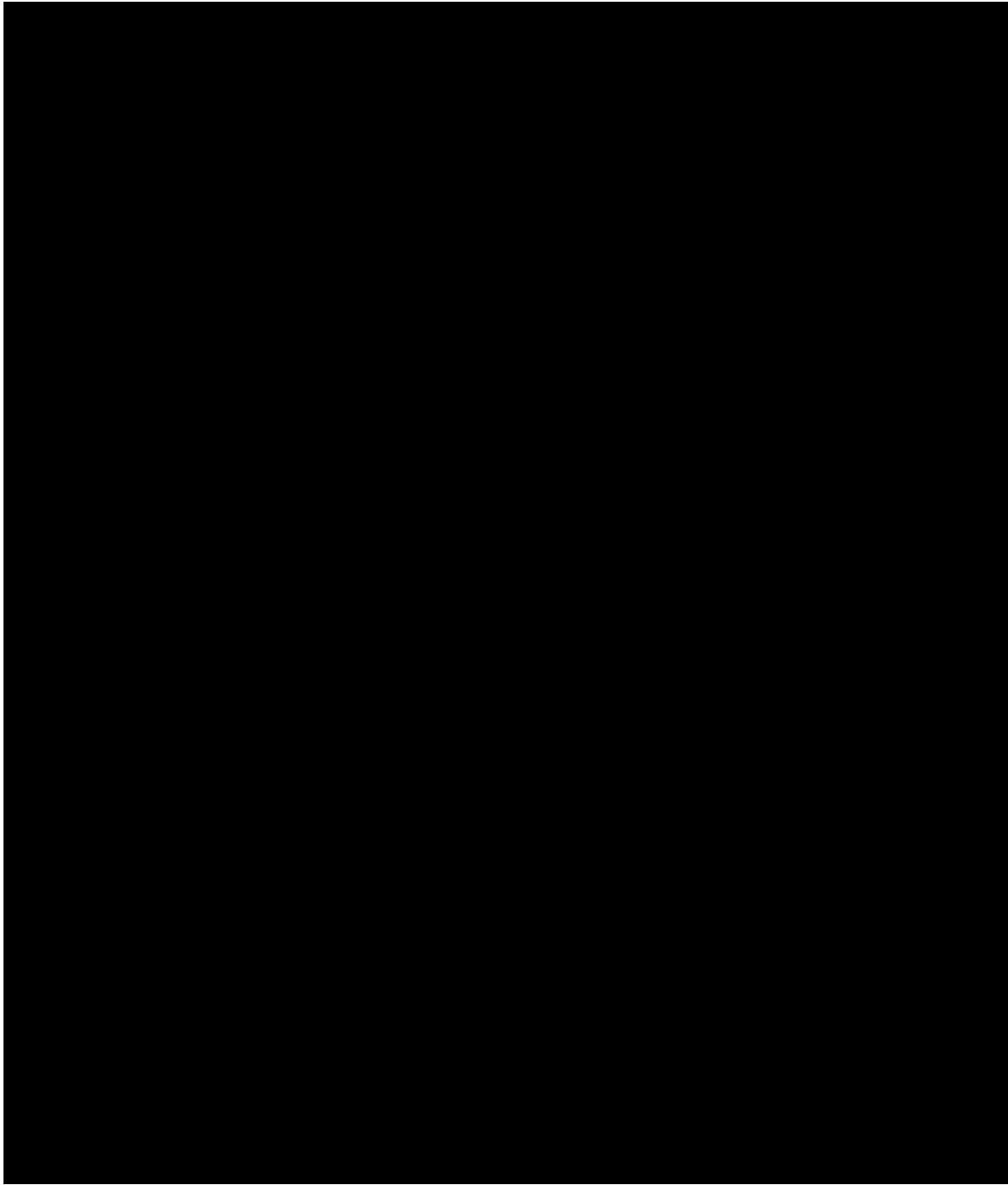
PR : Λόγος επίδοσης της συστοιχίας

$$PR = E \cdot G_{stc} / P_p \cdot H_t$$

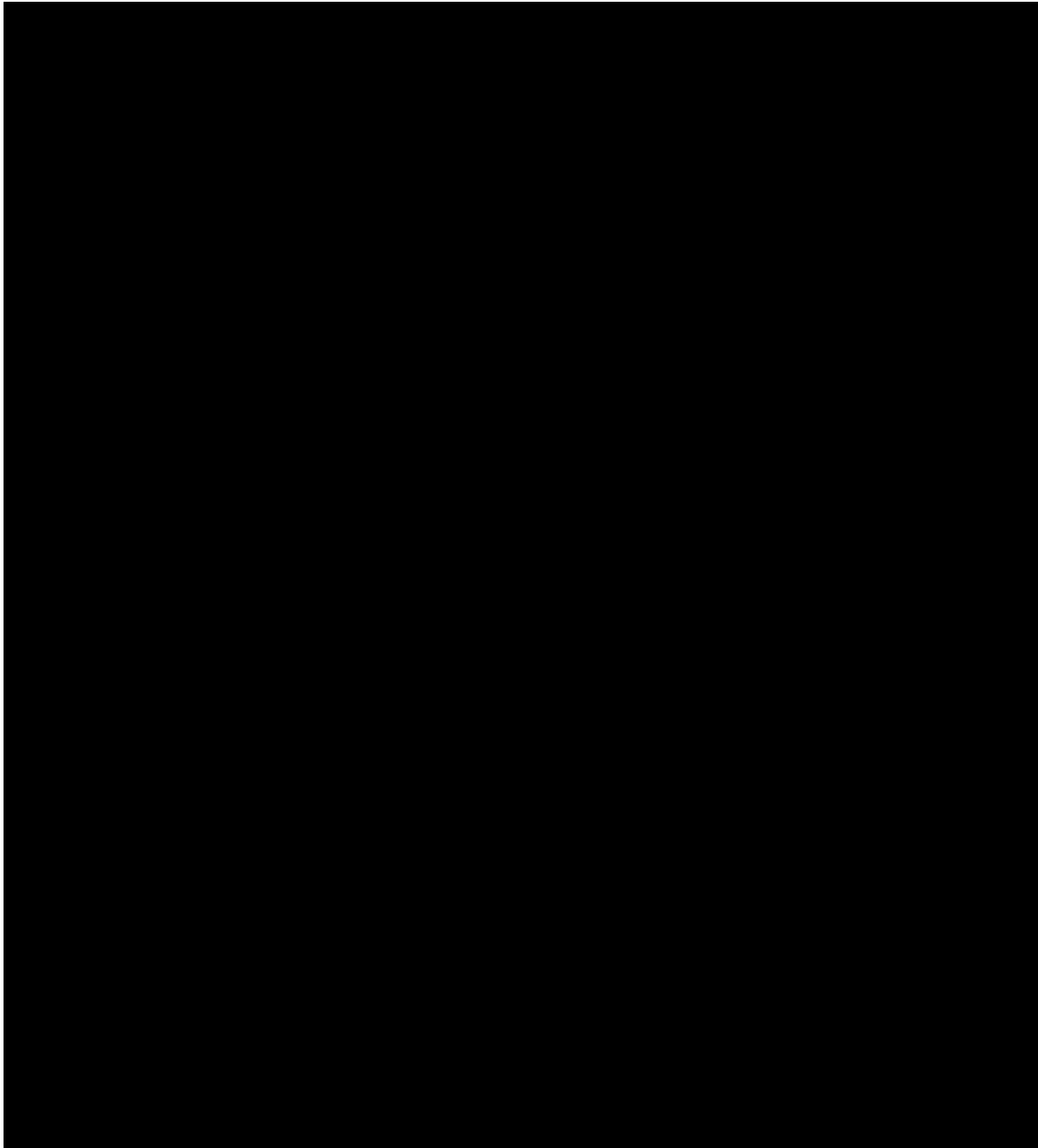
Επειδή τα δεδομένα είναι πολύ μεγάλα σε όγκο θα ακολουθήσουν κάποιοι πίνακες από τα τρία ΦΒ πάρκα με διαφορετικές ημερομηνίες.



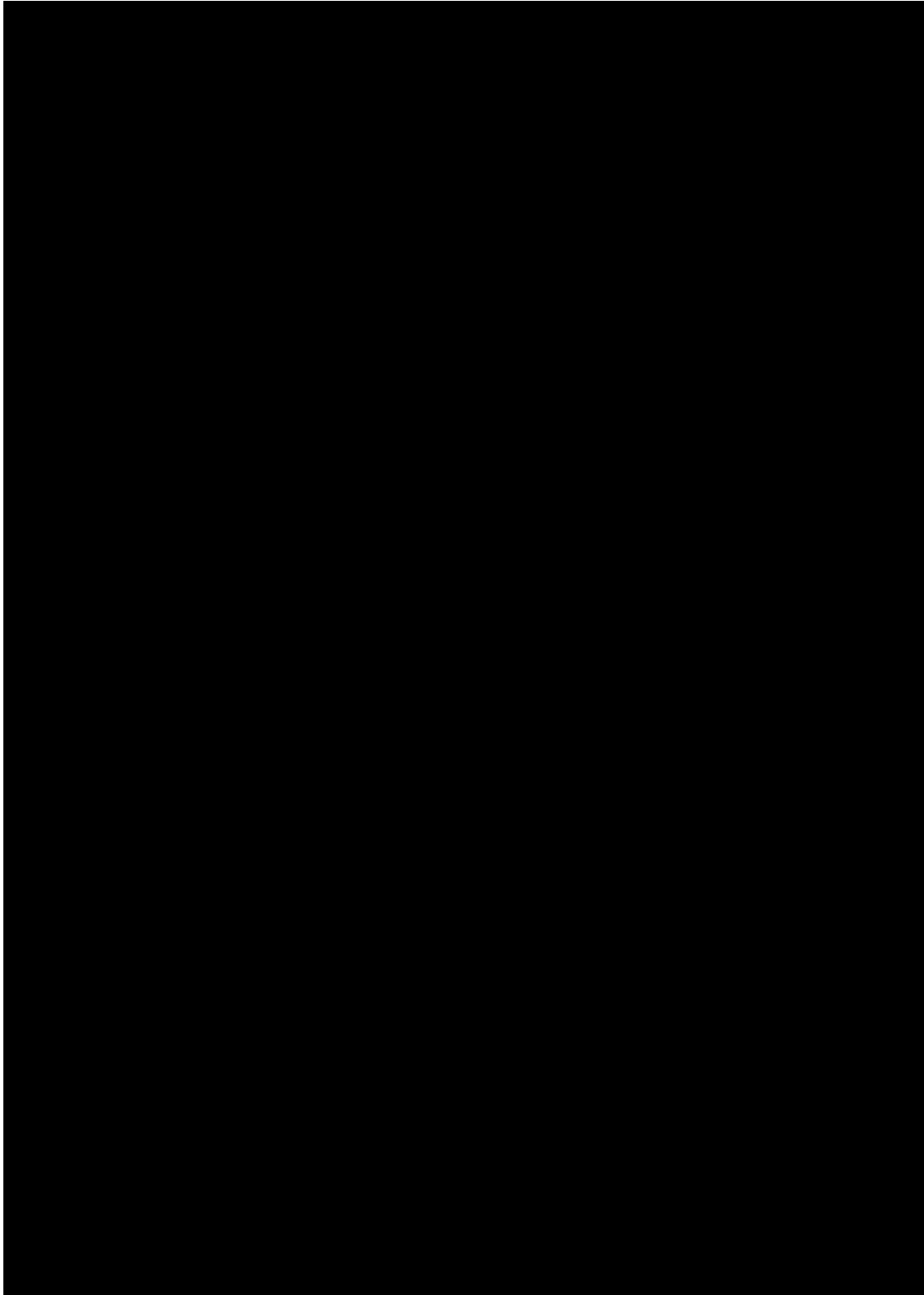
Πίνακας 5.1 Ημερήσιες καταγραφές δεδομένων ανά ώρα από το πάρκο στο Κόρτε Γκούλε Αρκαλοχώρι 1-2/7/2011



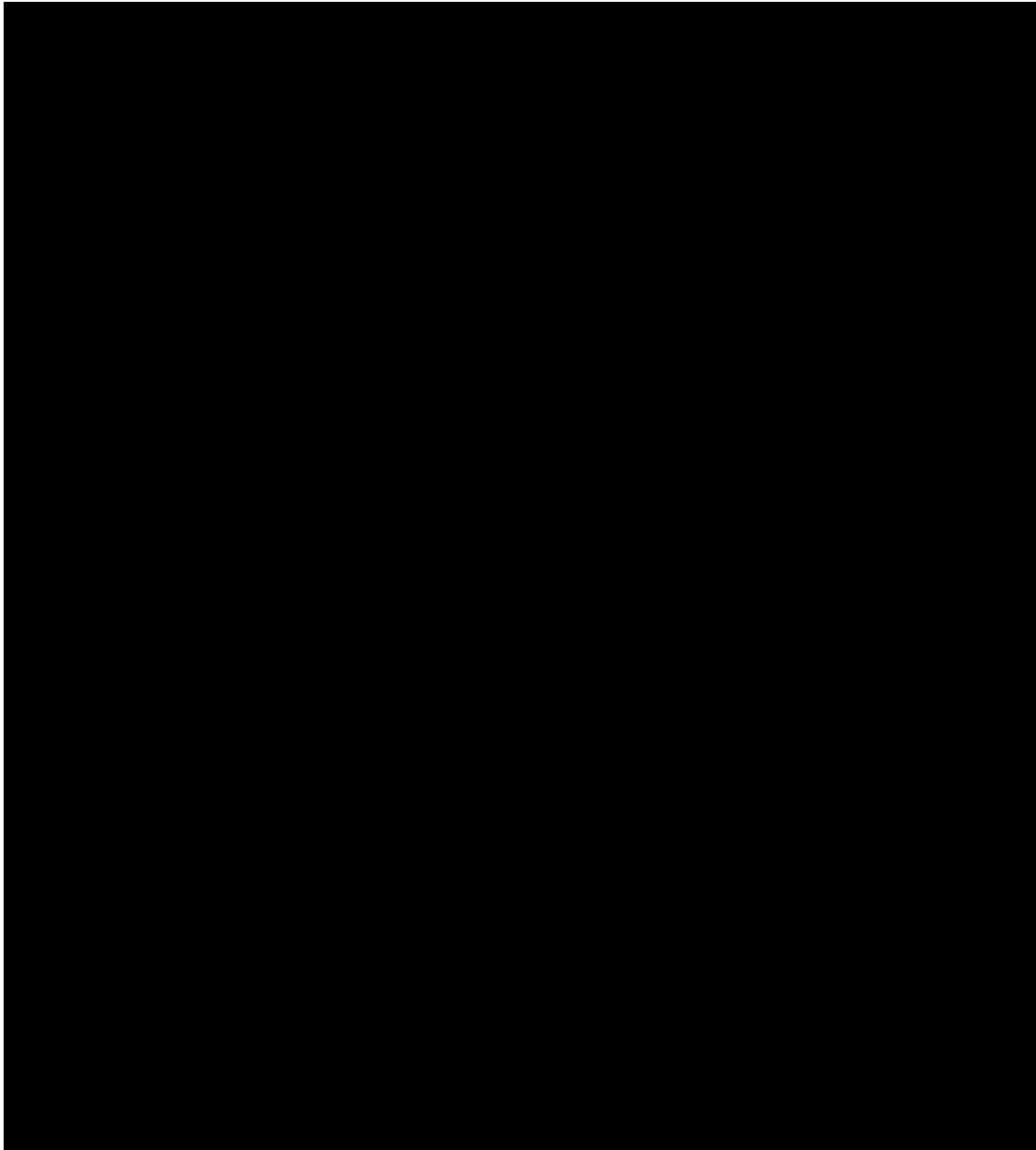
Πίνακας 5.2 Ημερήσιες καταγραφές δεδομένων ανά ώρα από το πάρκο στο Κόρτε Γκούλε Αρκαλοχώρι 24-25/1/2011



Πίνακας 5.3 Ημερήσιες καταγραφές δεδομένων ανά ώρα από το πάρκο στις Μάκρες στο Ζαρό στις 20-21/6/2011



Πίνακας 5.4 Ημερήσιες καταγραφές δεδομένων ανά ώρα από το πάρκο στο Μελιδοχώρι από της 8 εως και της 10/8/2011



Πίνακας 5.5 Ημερήσιες καταγραφές δεδομένων ανά ώρα από το πάρκο στο Μελιδοχώρι από της 7-8/8/2011

Στους παρακάτω πίνακες προσθέσαμε τα θεωρητικά αποτελέσματα του **nT**, **Pm**, **PRt** και **PR**, τα οποία βγήκανε απο το τύπο **θc** της θερμοκρασίας κυψελίδας. Στον τύπο αυτό συμπεριλαμβάνεται η ταχύτητα ανέμου **ws** που χρειαζόμαστε για να αποδείξουμε ότι η ταχύτητα ανέμου παίζει ένα σημαντικό ρόλο στην ψύξη των ΦΒ πανέλων με αποτέλεσμα την μείωση της θερμοκρασίας της κυψελίδας και την καλύτερη παραγωγή. Λύνοντας τον τύπο, βρίσκουμε τη θεωρητική/πειραματική θερμοκρασία κυψελίδας. Αναλύοντας τα αποτελέσματα παρατηρούμε μια μικρή διαφορά στις τιμές των πραγματικών τιμών της θερμοκρασίας με τις θεωρητικές/πειραματικές τιμές. Αυτό μπορεί να

οφείλεται στους εμπειρικούς συντελεστές B, T1 και T2 οι οποίοι μένουν και σταθεροί στους υπολογισμούς.

$$\theta_c = \theta_a + \frac{G_t}{G_{STC}} \cdot (T_1 \cdot e^{B \cdot ws} + T_2 + \Delta\theta),$$

όπου,

θ_a , η θερμοκρασία του περιβάλλοντα αέρα

G_t , η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του ΦΒ πλαισίου

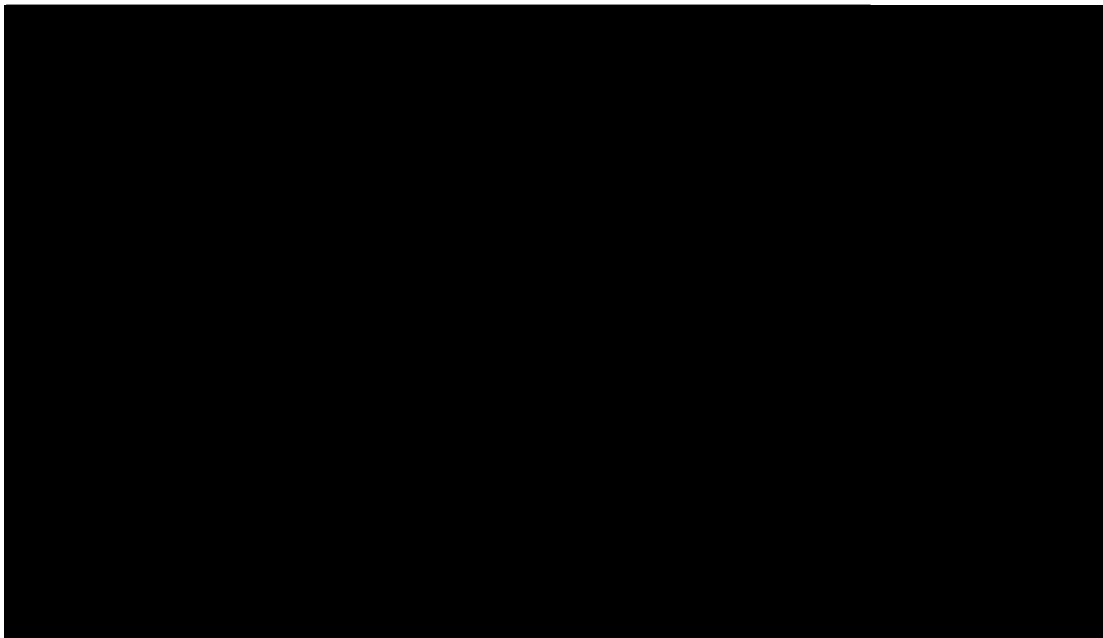
B, εμπειρικός συντελεστής

ws, η ταχύτητα του ανέμου

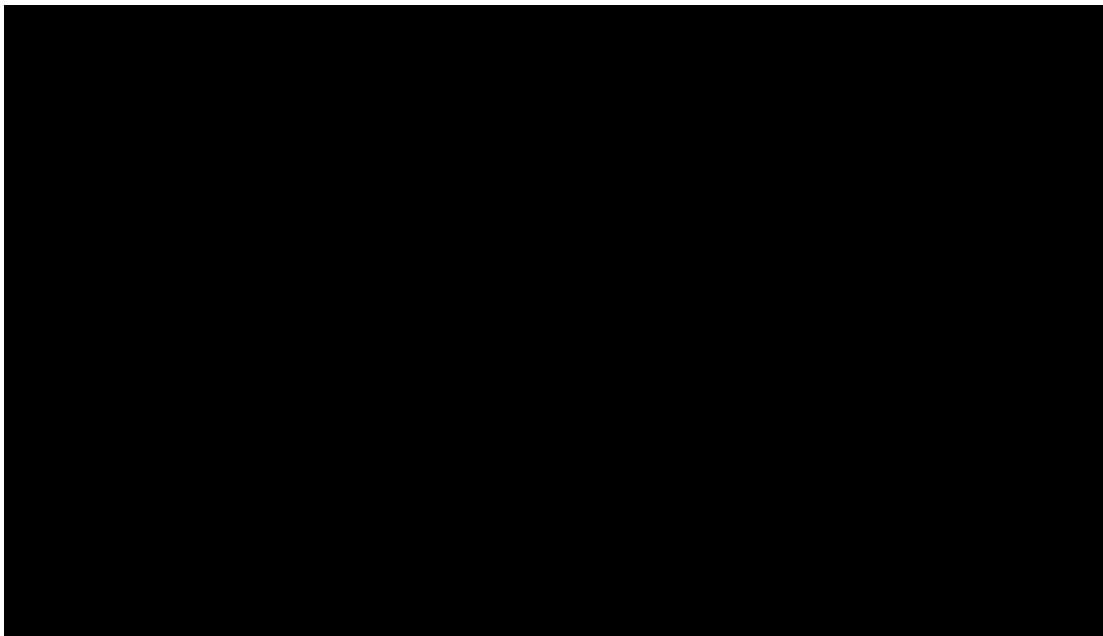
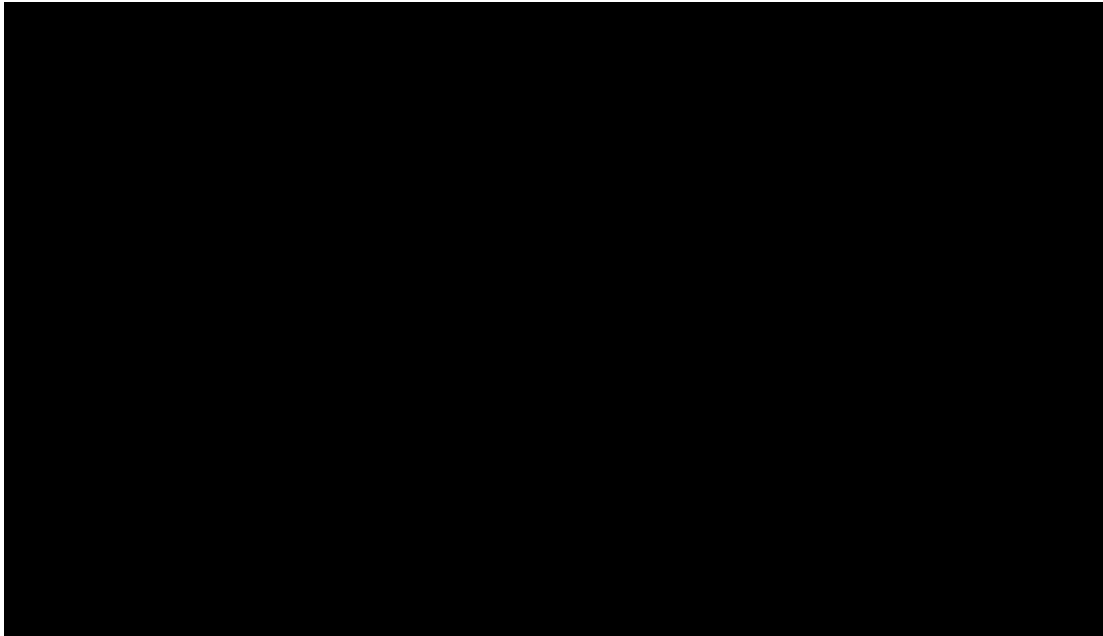
T₁, T₂, εμπειρικοί συντελεστές που υπολογίζονται βάση τις οριακές τιμές της θερμοκρασίας της κυψέλης σε χαμηλές και υψηλές ταχύτητες ανέμου αντίστοιχα και Δθ, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της κυψέλης και της πίσω επιφάνειας του ΦΒ πλαισίου.

Ο λόγος επίδοσης της συστοιχίας **PR** μεταξύ πραγματικών τιμών και θεωρητικών/πειραματικών έχει ένα σφάλμα της τάξεως του 10%.

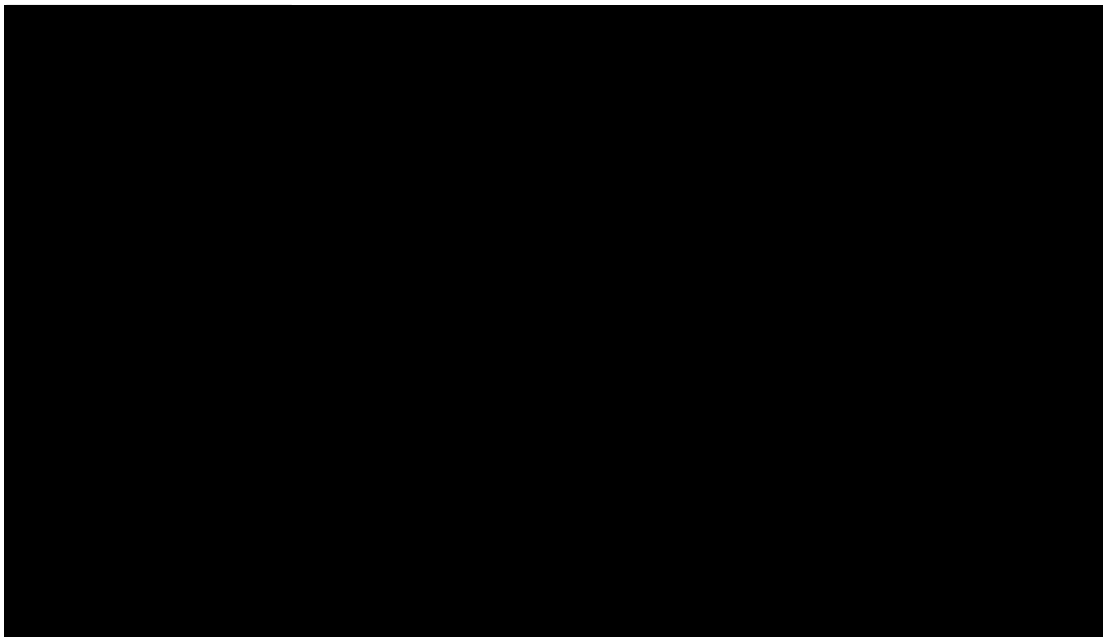
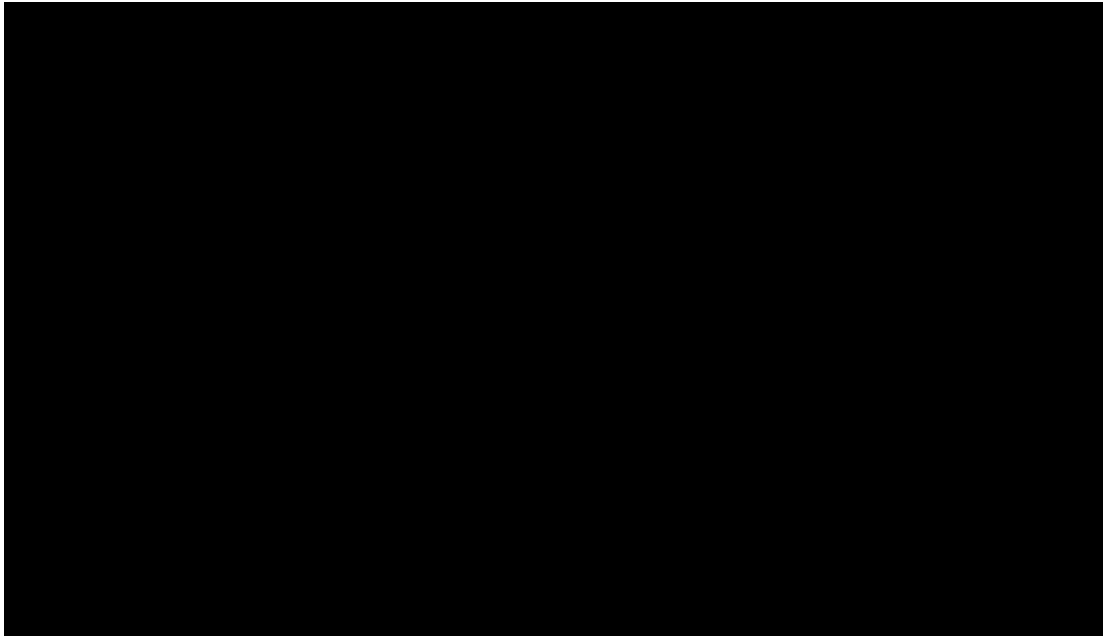
Κάποιες τιμές μετρήσεων έχουν σφάλματα, δηλαδή κάποια νούμερα είναι πολύ μεγαλύτερα από το κανονικό-παραγματικό χωρίς κάποια αιτιολογία. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε σφάλματα των αισθητήριων οργάνων, του συστήματος καταγραφής δεδομένων ή και από υπολογιστικά σφάλματα.



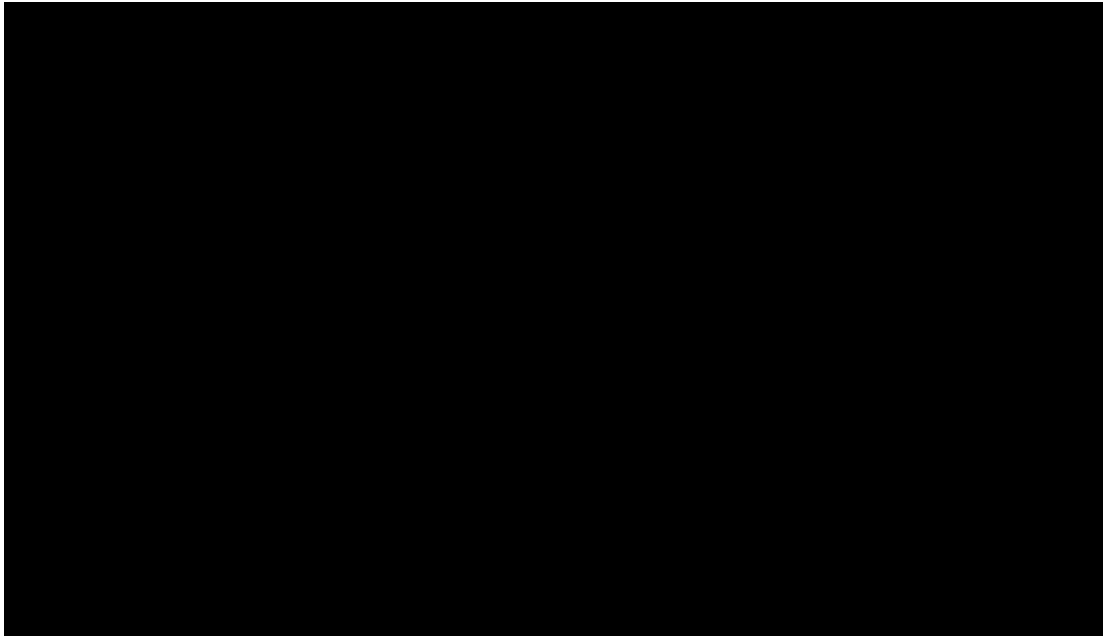
Πίνακας 5.6 Μηνιαίες καταγραφές δεδομένων και τιμών μοντέλου προσομοίωσης από το πάρκο στο Μελιδοχώρι.



Πίνακας 5.7 Μηνιαίες καταγραφές δεδομένων και τιμών μοντέλου προσομοίωσης από το πάρκο στο Μελιδοχώρι.



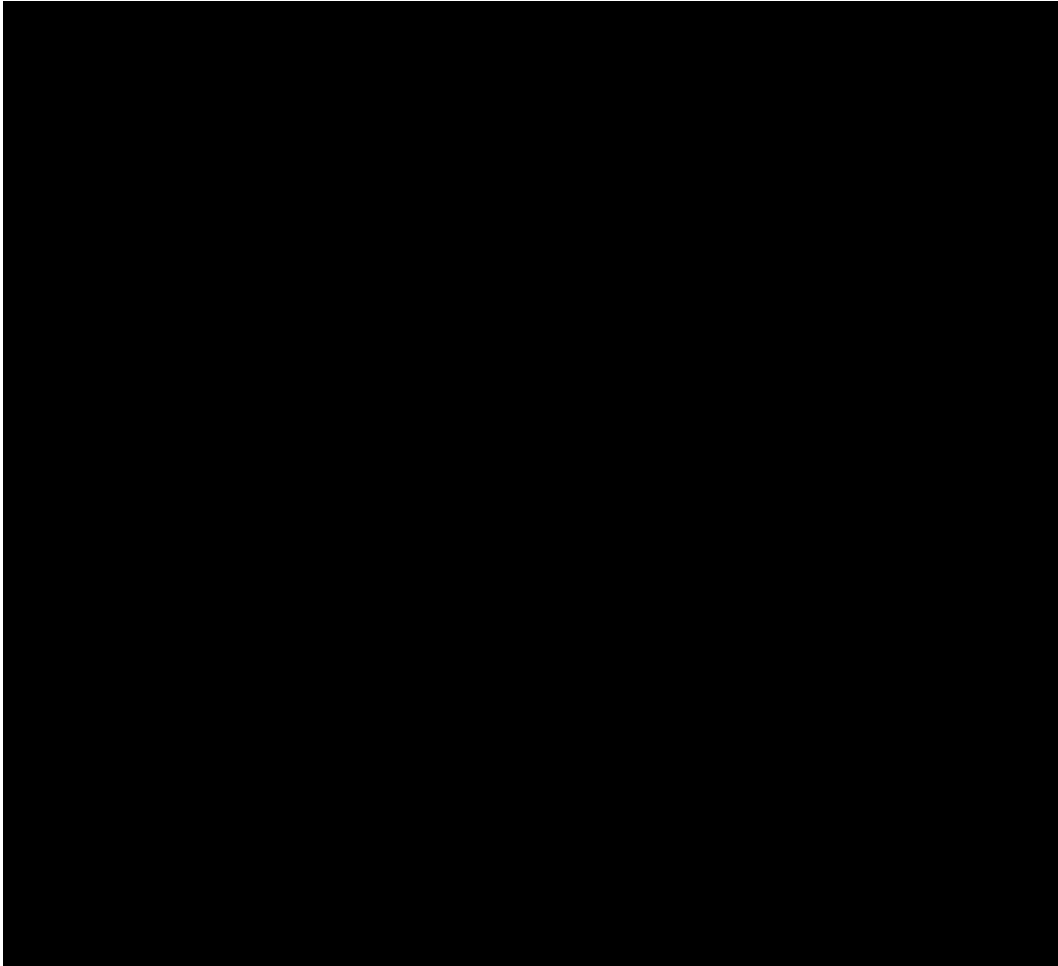
Πίνακας 5.8 Μηνιαίες καταγραφές δεδομένων και τιμών μοντέλου προσομοίωσης από το πάρκο στο Κόρτε Γκούλε.



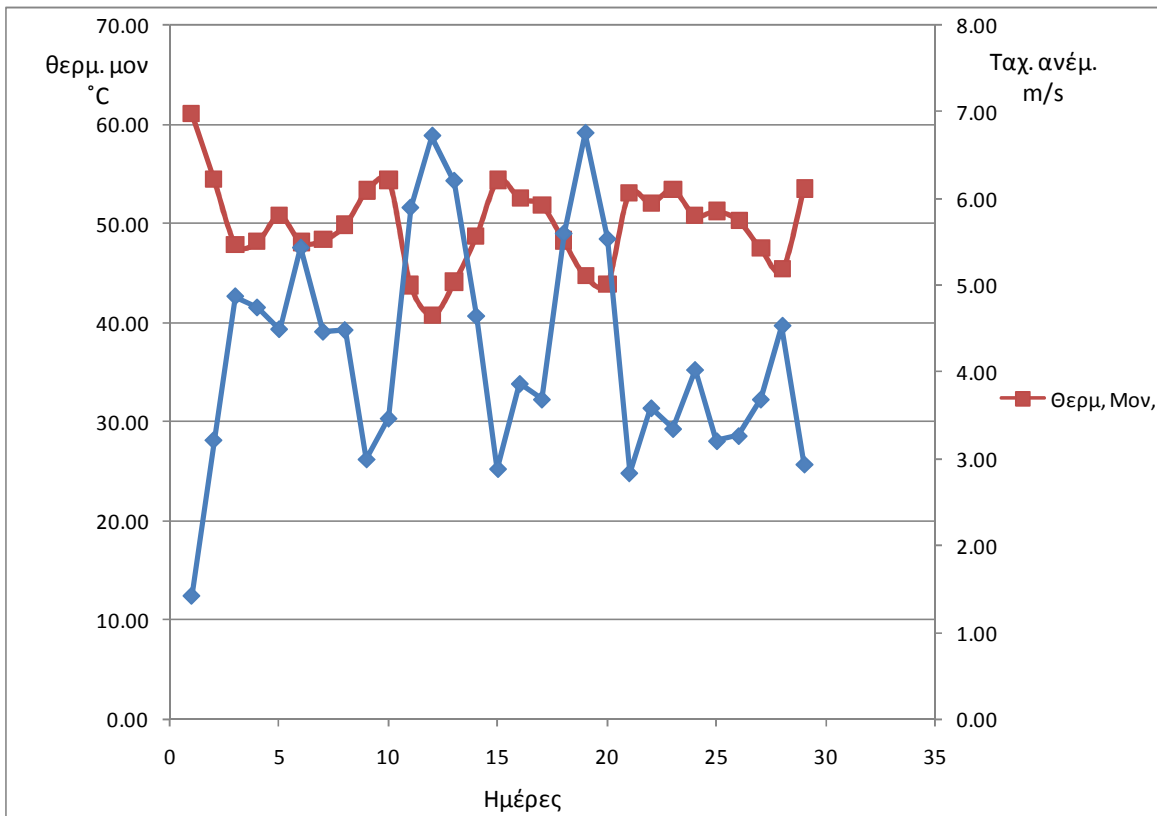
Πίνακας 5.8 Μηνιαίες καταγραφές δεδομένων και τιμών μοντέλου προσομοίωσης από το πάρκο στο Κόρτε Γκούλε.

5.5 Χαρακτηριστικές καμπύλες από το σύνολο των μετρήσεων

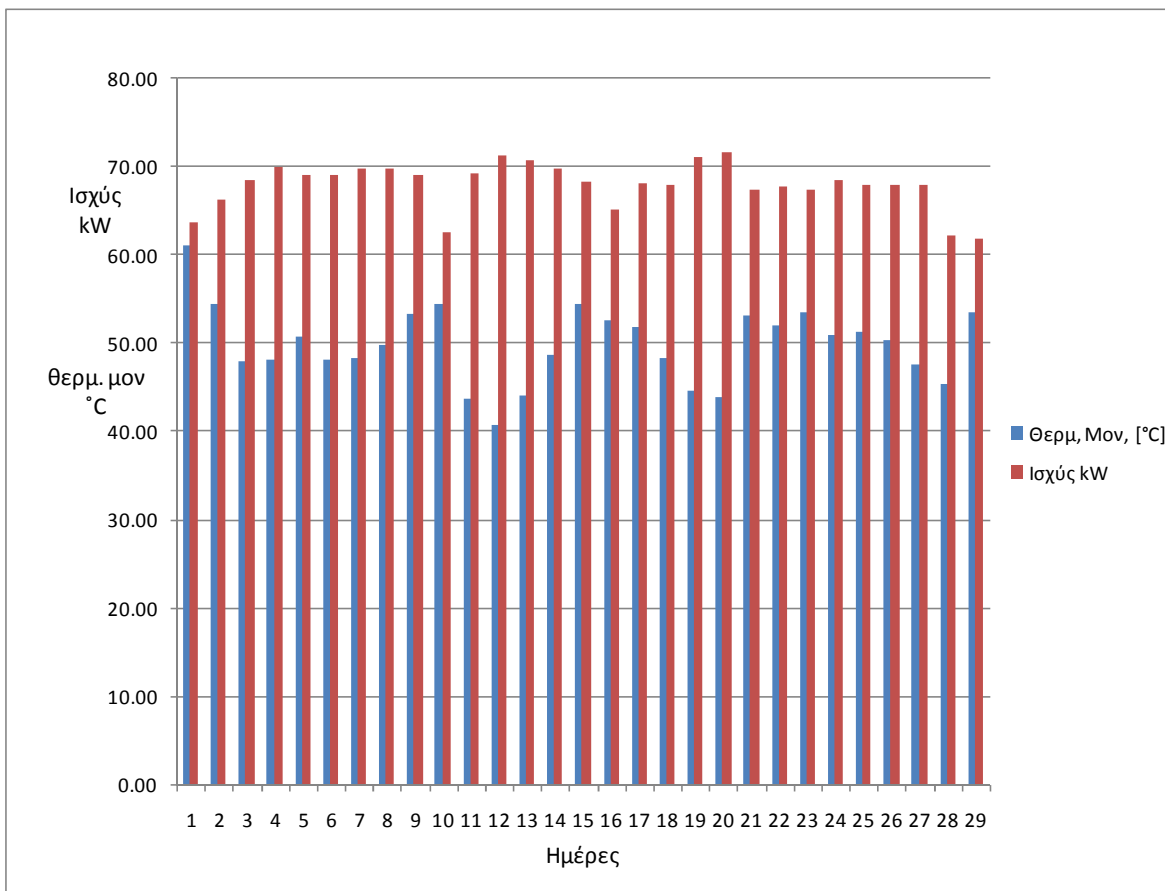
Σε αυτή τη παράγραφο θα δούμε σε πίνακες και γραφικές παραστάσεις τις αλληλεπιδράσεις των εξωτερικών συνθηκών στην απόδοση και παραγωγή των ΦΒ πάρκων. Θα γίνει συσχετισμός των δεδομένων προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την απόδοση των εγκαταστάσεων.



Πίνακας 5.9 Δεδομένα για της 2 η ώρα μ.μ. για τον Αύγουστο από το πάρκο στο Μελιδοχώρι.



Γραφική παράσταση 5.10 Στον οριζόντιο άξονα είναι οι μέρες και στον κάθετο αριστερά η θερμοκρασία και δεξιά η ταχύτητα ανέμου. Η γ.π. απεικονίζει την αλληλεπίδραση θερμοκρασίας και ταχύτητας ανέμου.

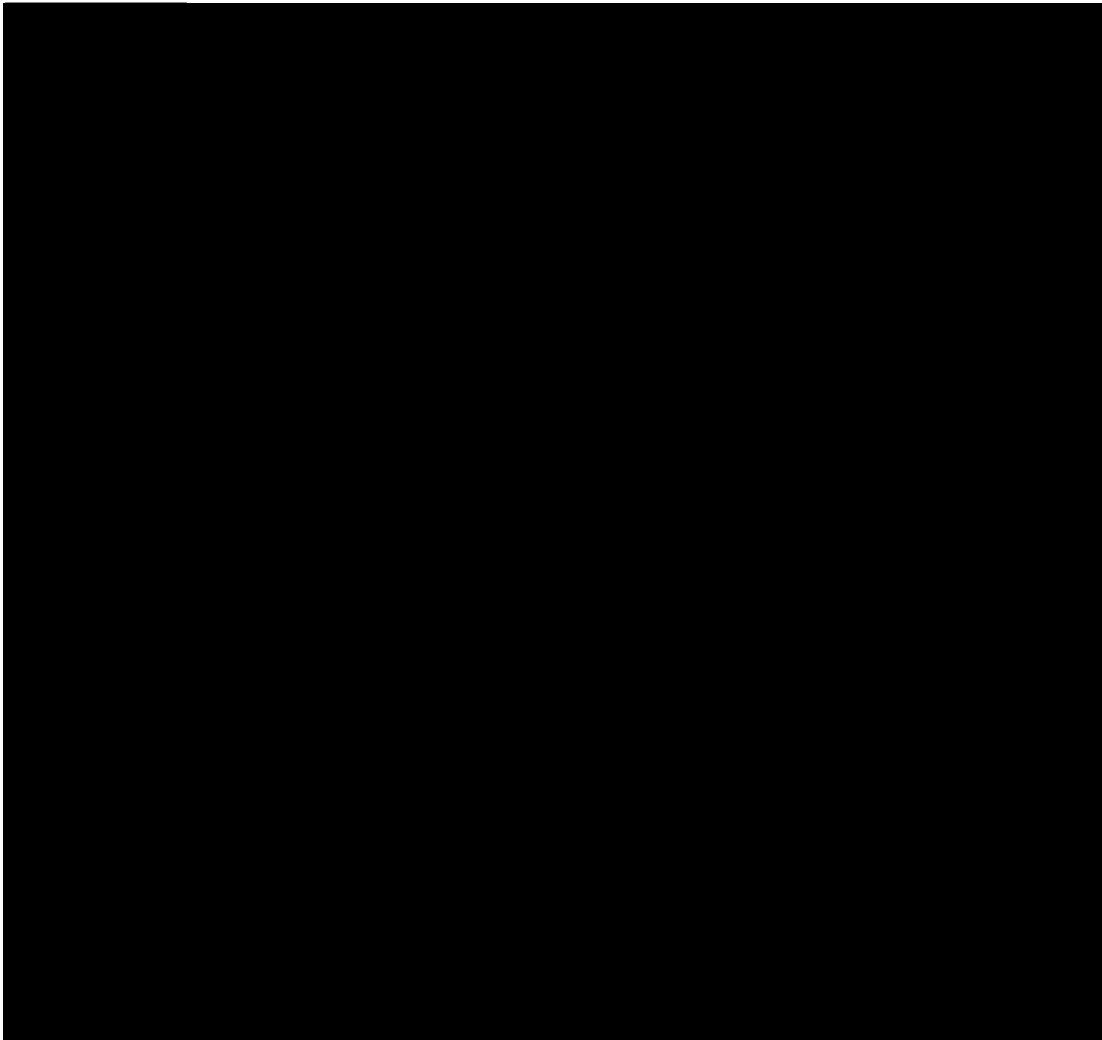


Γραφική παράσταση 5.11 Στον οριζόντιο άξονα είναι οι μέρες και στο κάθετο η θερμοκρασία και τα kW. Η γ.π. απεικονίζει την αλληλεπίδραση της θερμοκρασίας στην παραγωγή του πάρκου.

Στις δυο γραφικές παραστάσεις 5.10 και 5.11 βλέπουμε την επίδραση της θερμοκρασίας των πανέλων στην παραγωγή της ΦΒ μονάδας. Επίσης βλέπουμε την αλληλεπίδραση της θερμοκρασίας των πανέλων και της ταχύτητας ανέμου για τον μήνα Αύγουστο. Παρατηρούμε πως όταν η θερμοκρασία είναι υψηλή, η ταχύτητα ανέμου είναι χαμηλή και καθώς αυτή αυξάνεται, πεφτει η θερμοκρασία του πανέλου.

Στον πίνακα 5.9 βλέπουμε ενδεικτικά οτι στις 9/8/11 η ταχυτητα ανεμου ειναι 2.99 m/s με θερμοκρασια πανελου 53.3 °C και nt 0.86.

Ενώ στις 11/8/11 η ταχυτητα ανεμου ειναι 5.89 m/s με θερμοκρασια πανελου 43.8 °C και nt 0.91. Έχουμε σχεδόν 10 °C διαφορά στη θερμοκρασία.

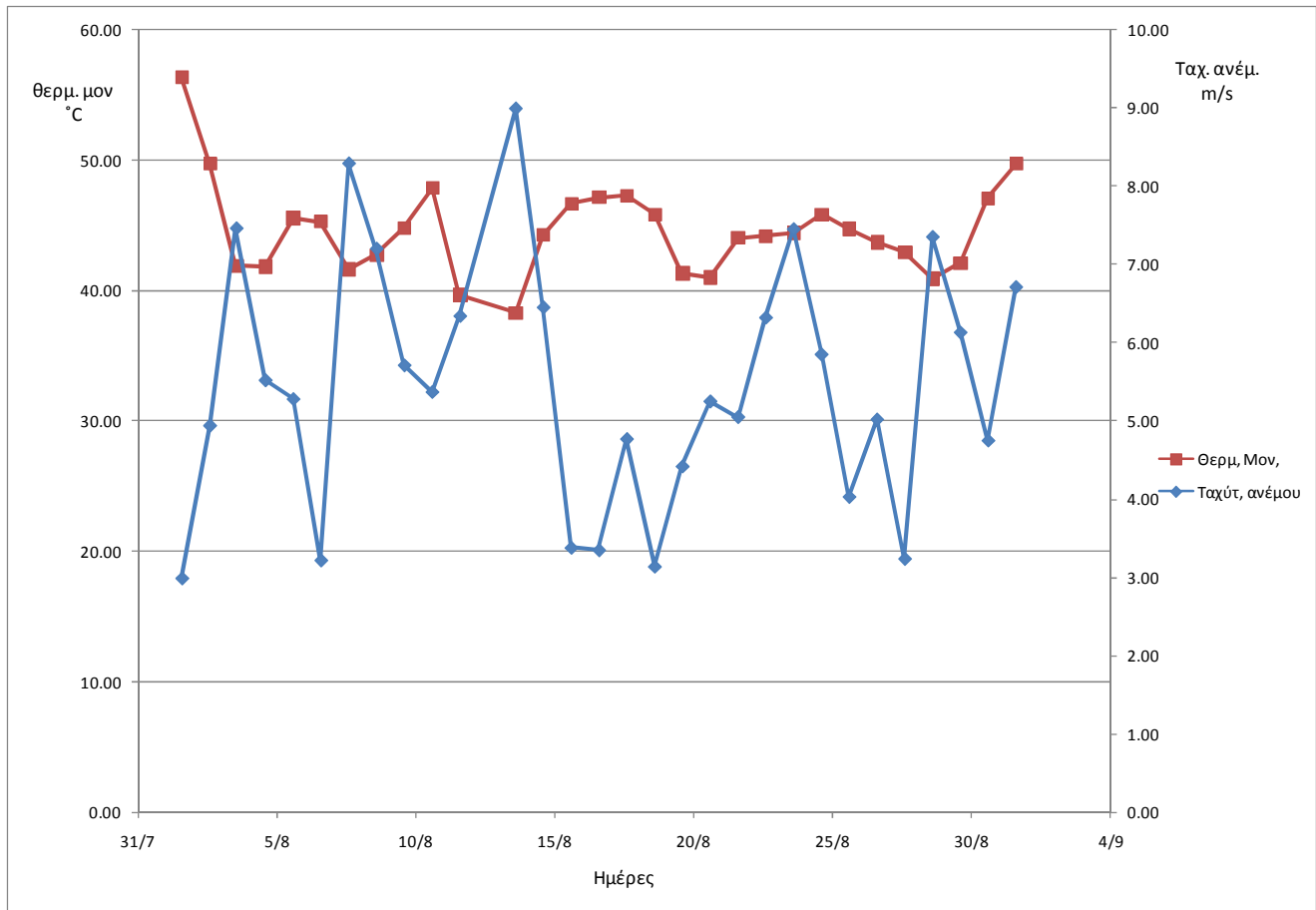


Πίνακας 5.12 Δεδομένα για της 2 η ώρα μ.μ. για τον Αύγουστο από το πάρκο στο Κόρτε Γκούλε.

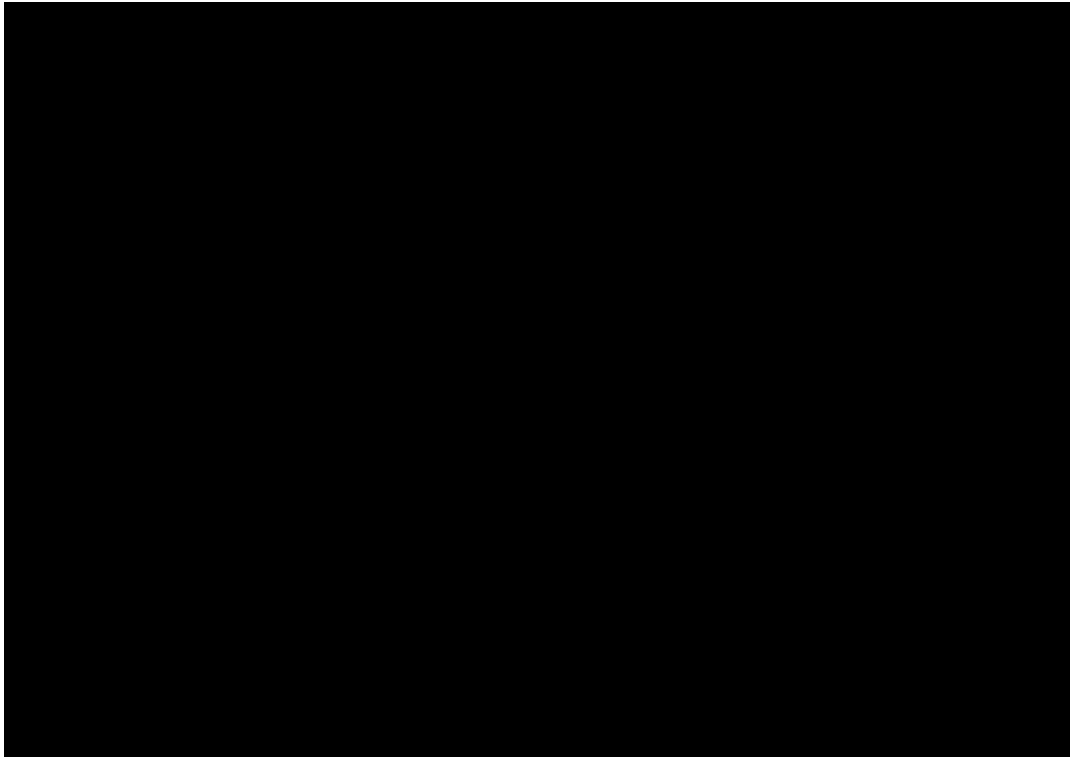
Και εδώ επίσης βλέπουμε την αλληλεπίδραση της θερμοκρασίας των πανέλων και της ταχύτητας ανέμου για τον μήνα Αύγουστο στην παραγωγή του ΦΒ πάρκου.

Ενδεικτικά στον πίνακα 5.12 βλέπουμε ότι στις 13/8/11 η ταχύτητα ανέμου είναι 8.99 m/s με θερμοκρασία πανελου μόλις 38 °C και nt 0.934.

Ενώ στις 18/8/11 η ταχύτητα ανέμου είναι 3.14 m/s με θερμοκρασία πανελου 45.8 °C και nt 0.896. Έχουμε σχεδόν 8 °C διαφορά στη θερμοκρασία

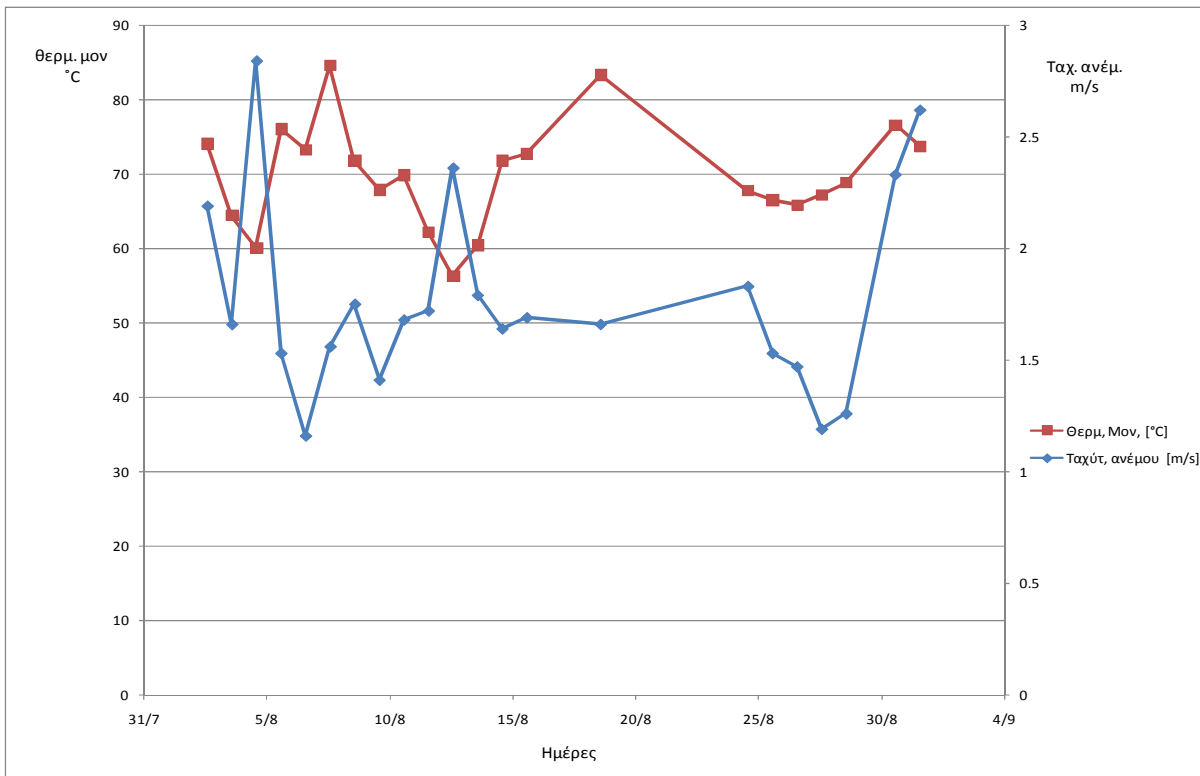


Γραφική παράσταση 5.13 Στον οριζόντιο άξονα είναι οι μέρες και στον κάθετο αριστερά η θερμοκρασία και δεξιά η ταχύτητα ανέμου. Η γ.π. απεικονίζει την αλληλεπίδραση θερμοκρασίας και ταχύτητας ανέμου.



Πίνακας 5.14 Δεδομένα για της 2 η ώρα μ.μ. για τον Αύγουστο από το πάρκο στις Μάκρες.

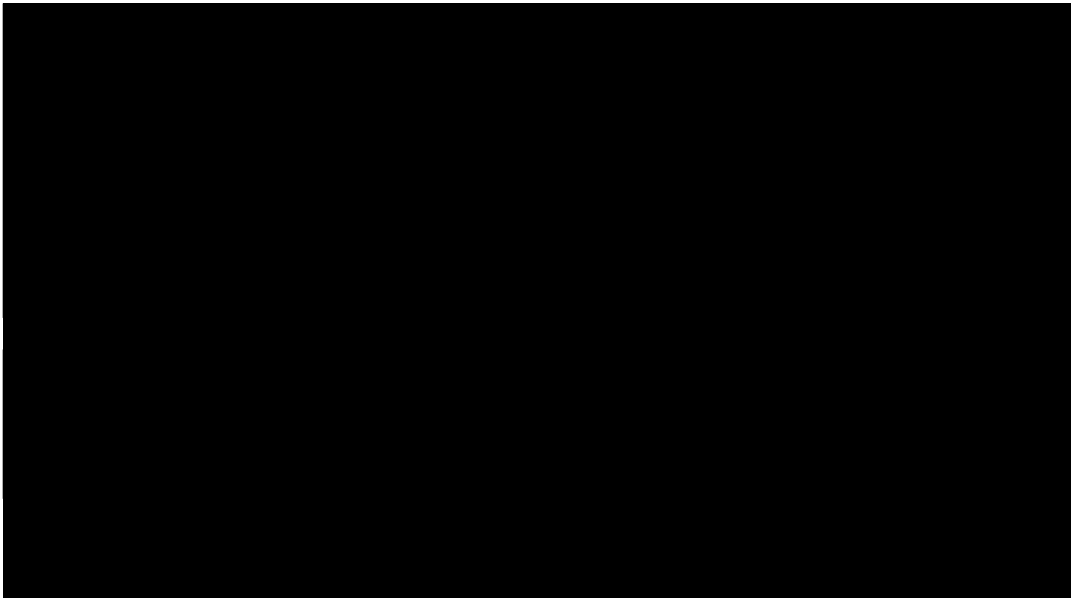
Σε αυτόν τον πίνακα βλέπουμε πως η ταχύτητα ανέμου είναι πολύ χαμηλή με αποτέλεσμα οι θερμοκρασίες των πανέλων να είναι πολύ υψηλές με το Pt να πεφτει αρκετά.



Γραφική παράσταση 5.15 Στον οριζόντιο άξονα είναι οι μέρες και στον κάθετο αριστερά η θερμοκρασια και δεξιά η ταχύτητα ανέμου. Η γ.π. απεικονίζει την αλληλεπίδραση θερμοκρασίας και ταχύτητας ανέμου.

Στον πίνακα 5.16 βλέπουμε πραγματικές μετρήσεις για τον Αύγουστο μήνα. Εδώ βλέπουμε πιο συγκεκριμένα κατά πόσο η ταχύτητα ανέμου επιρεάζει τη θερμοκρασία μονάδας και κατά επέκταση την απόδοση του ΦΒ συστήματος. Βλέπουμε δυο παραδείγματα της επίδρασης αυτής. Στο πρώτο παράδειγμα βλέπουμε χαρακτηριστικά ότι στις 27/8 η ταχύτητα ανέμου είναι στους 6.37m/s και η θερμοκρασία μονάδας είναι στους 43.88 °C. Ενώ στις 29/8 η ταχύτητα ανέμου είναι 8.62 m/s και η θερμοκρασία των πάνελ πέφτει στα 39.79 °C. Επίσης παρατηρούμε ότι ενώ στις 27/8 έχουμε μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία απ'ότι στις 29/8 παρ'όλα αυτά έχουμε μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, διότι το ΦΒ σύστημα στις 29/8 έχει καλύτερη απόδοση στο ΠΤ συντελεστή θερμοκρασίας.

Το ίδιο συμβαίνει και στο δεύτερο παράδειγμα. Τη μέρα που η ταχύτητα ανέμου είναι μεγαλύτερη έχουμε και μεγαλύτερη παραγωγή.

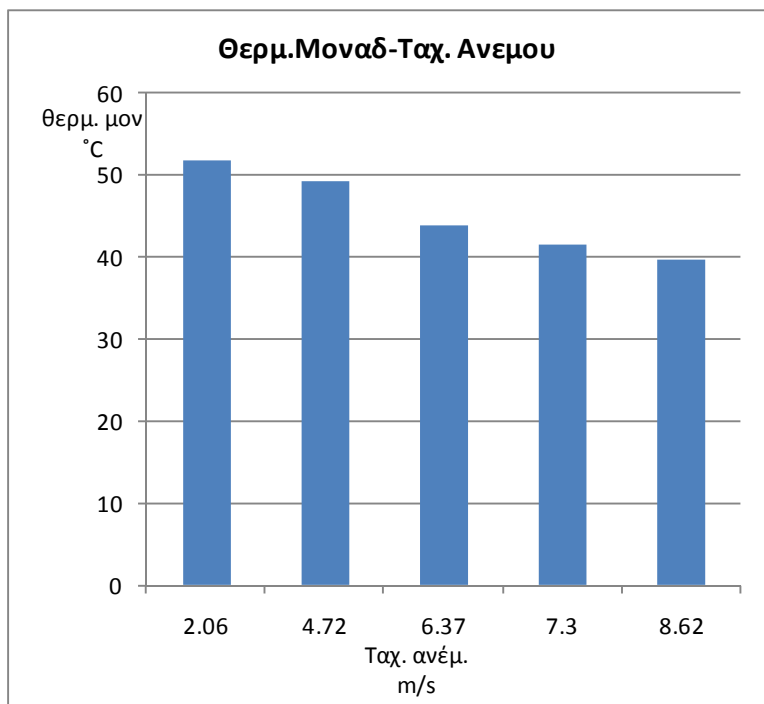


Πίνακας 5.16 Δεδομένα για της 2 η ώρα μ.μ. για τον μήνα Αύγουστο.

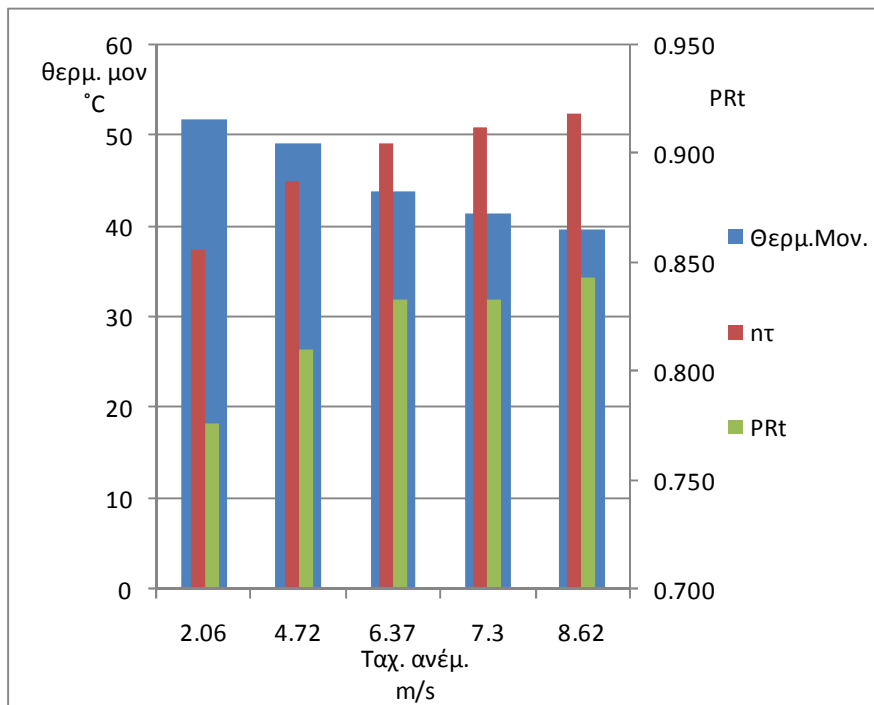
Στη γραφική παράσταση 5.17 βλέπουμε την επίδραση της ταχύτητας ανέμου στη θερμοκρασία μονάδας. Παρατηρούμε ότι όσο μεγαλώνει η ταχύτητα ανέμου τόσο πέφτει και η θερμοκρασία της μονάδας.

Η γραφική παράσταση 5.18 απεικονίζει την αλληλεπίδραση της ταχύτητας ανέμου στη θερμοκρασία μονάδας και ταυτόχρονα την επίδραση στο συντελεστή θερμοκρασίας και στο λόγο

επίδοσης. Όπως βλέπουμε καθώς η ταχύτητα ανέμου ψύχει και κατεβάζει τη θερμοκρασία των ΦΒ συστημάτων, ο συντελεστής θερμοκρασίας ο λόγος επίδοσης αυξάνονται.

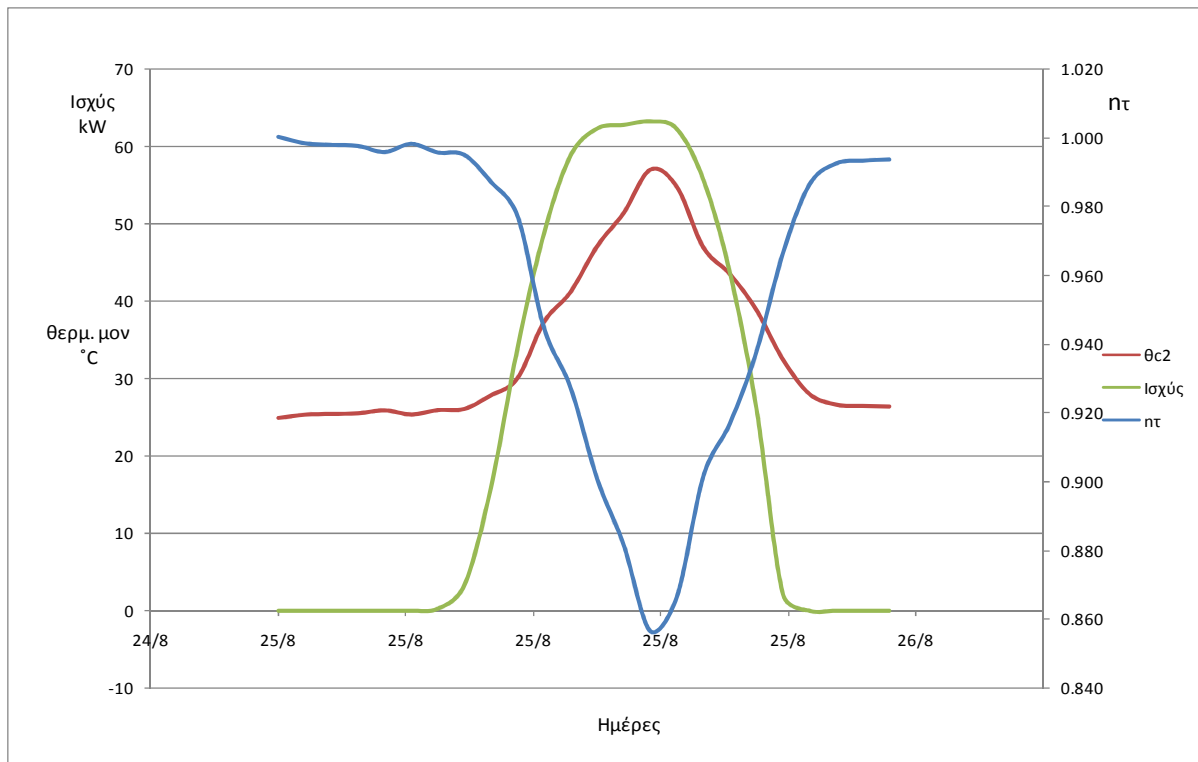


Γραφική παράσταση 5.17 Η γ.π. απεικονίζει την αλληλεπίδραση της ταχύτητας ανέμου στη θερμοκρασία μονάδας.



Γραφική παράσταση 5.18 Η γ.π. απεικονίζει την αλληλεπίδραση της ταχύτητας ανέμου στη θερμοκρασία μονάδας και ταυτόχρονα την επίδραση στο συντελεστή θερμοκρασίας και στο λόγο επίδοσης.

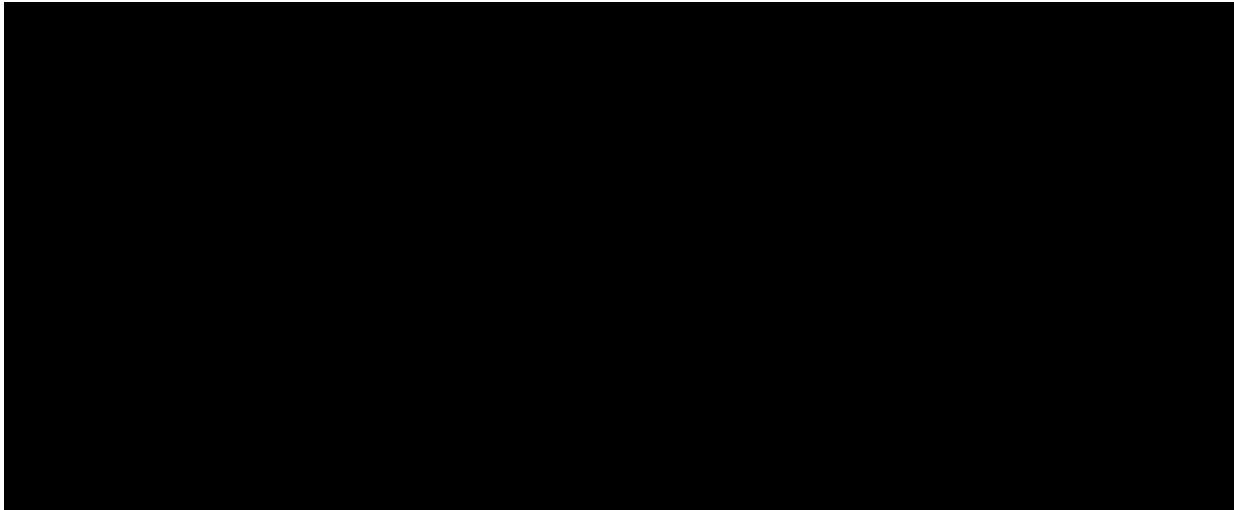
Η γραφική παράσταση 5.19 απεικονίζει την αλληλεπίδραση της θεωρητικής/πειραματικής θερμοκρασίας μονάδας στον συντελεστή θερμοκρασίας και στην ισχύ του ΦΒ συστήματος. Όπως βλέπουμε καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, ο συντελεστής θερμοκρασίας μειώνεται ενώ η ισχύς του συστήματος αυξάνεται μέχρι ένα σημείο και μετά μένει σταθερή μέχρι να πέσει.



Γραφική παράσταση 5.19 Η γ.π. απεικονίζει την αλληλεπίδραση της θεωρητικής/πειραματικής θερμοκρασίας μονάδας στον συντελεστή θερμοκρασίας και στην ισχύ του ΦΒ συστήματος.

5.4 Προσομοίωση της απόδοσης των ΦΒ συστημάτων με την μεταβολή της ταχύτητας ανέμου

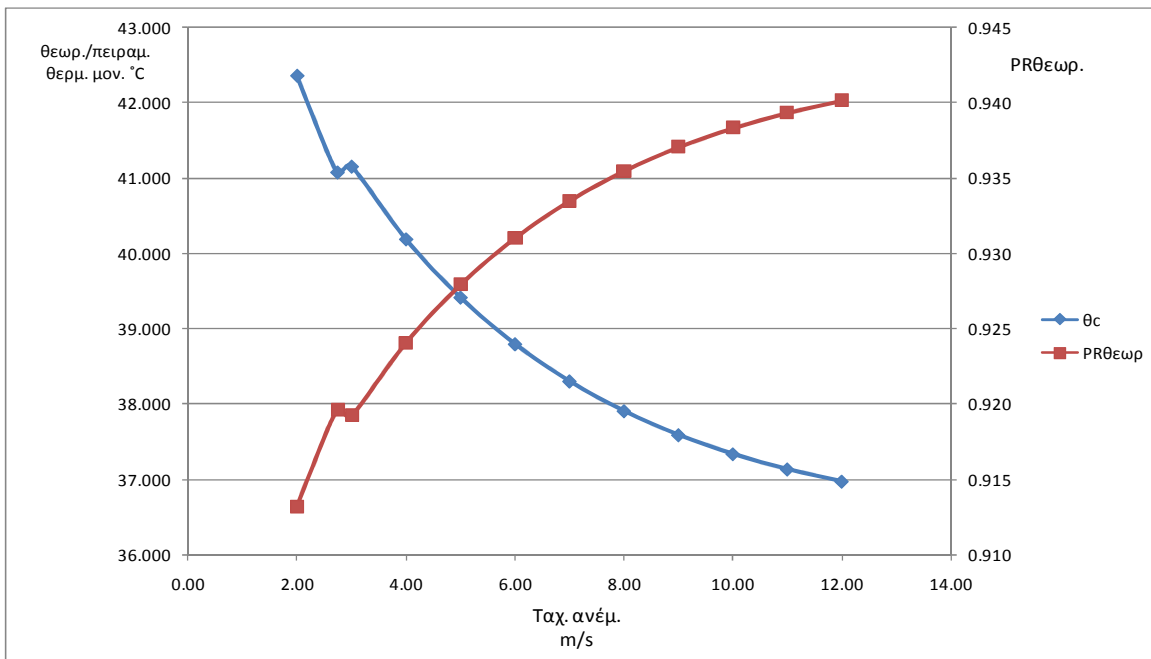
Σε αυτή τη παράγραφο θα προσπαθήσουμε να κάνουμε μια προσομοίωση της απόδοσης ΦΒ συστήματος. Συγκεκριμένα θα γίνει ανάλυση του τύπου της θερμοκρασίας της κυψέλης θ_c . Με όλα τα δεδομένα γνωστά θα αντικαταστήσουμε το w_s με διάφορες τιμές της ταχύτητας του αέρα για να δούμε πως θα μεταβληθούν οι τιμές των η_T συντελεστή απόκλιση της απόδοσης του ΦΒ πλαισίου εξαιτίας της διαφοροποίησης της θερμοκρασίας της κυψέλης σε σχέση με την θερμοκρασία αναφοράς $25\text{ }^\circ\text{C}$, την P_m αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς ΦΒ και το PR λόγο επίδοσης της συστοιχίας.



Πίνακας 5.20 Προσομοίωση της επίδρασης της ταχύτητας ανέμου στην απόδοση του ΦΒ συστήματος.

Στον πίνακα 5.20 βλέπουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Αρχικά η ταχύτητα ανέμου ξεκινάει από τα 2m/s και φτάνει στα 12m/s αυξάνοντας κάθε φορά κατά 1 m/s. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα ανέμου η θεωρητική θερμοκρασία μονάδας πέφτει με αποτέλεσμα ο συντελεστής θερμοκρασίας να αυξάνεται, το ίδιο και η ισχύς και ο λόγος επίδοσης της συστοιχίας. Με αυτόν τον τρόπο θέλουμε να αποδείξουμε μέσω του τύπου της θερμοκρασίας κυψελίδας ότι όντως η ταχύτητα ανέμου επηρεάζει θετικά την απόδοση της ΦΒ συστοιχίας.

Στη γραφική παράσταση 5.21 βλέπουμε την μείωση της θεωρητικής θερμοκρασίας μονάδας επί την επίδραση της ταχύτητας ανέμου και παράλληλα την αύξηση του PR λόγου επίδοσης της συστοιχίας.



Γραφική παράσταση 5.21 Η γ.π. απεικονίζει απεικονίζει την αλληλεπίδραση της θεωρητικής/πειραματικής θερμοκρασίας μονάδας στον PR λόγο επίδοσης της συστοιχίας.

5.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων των τριών ΦΒ πάρκων

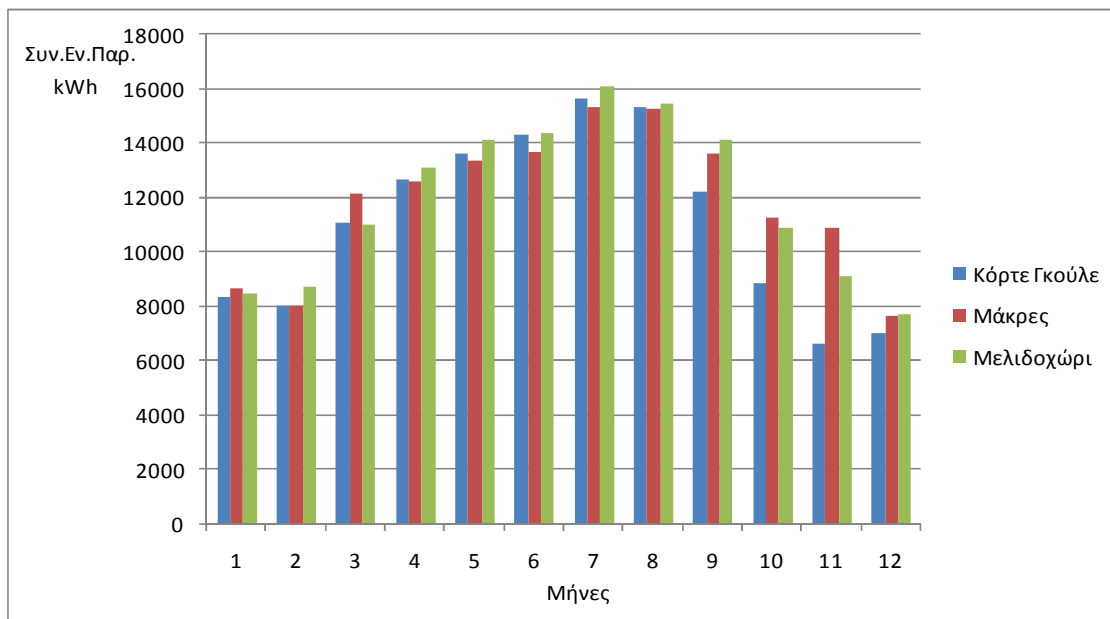
Στους παρακάτω πίνακες 5.24 θα δούμε συγκεντωμένους τις μηνιαίες καταγραφές των δεδομένων των εξωτερικών παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση του Φβ συστήματος τις τιμές των nT συντελεστή απόκλιση της απόδοσης του Φβ πλαισίου εξαιτίας της διαφοροποίησης της θερμοκρασίας της κυψέλης σε σχέση με την θερμοκρασία αναφοράς 25 °C , την Pm αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς Φβ και το PR λόγο επίδοσης της συστοιχίας.

Παρατηρώντας προσεκτικά όλες τις τιμές των παραγόντων μεταξύ των τριών Φβ πάρκων, βλέπουμε πως δεν έχουν την ίδια απόδοση, ίδια σχετική ηλεκτρική παραγωγή ενώ και τα τρία πάρκα είναι κατασκευασμένα από την ίδια τεχνική εταιρεία με τα ίδια ακριβώς πάνελ, καλώδια, inverters κτλ.

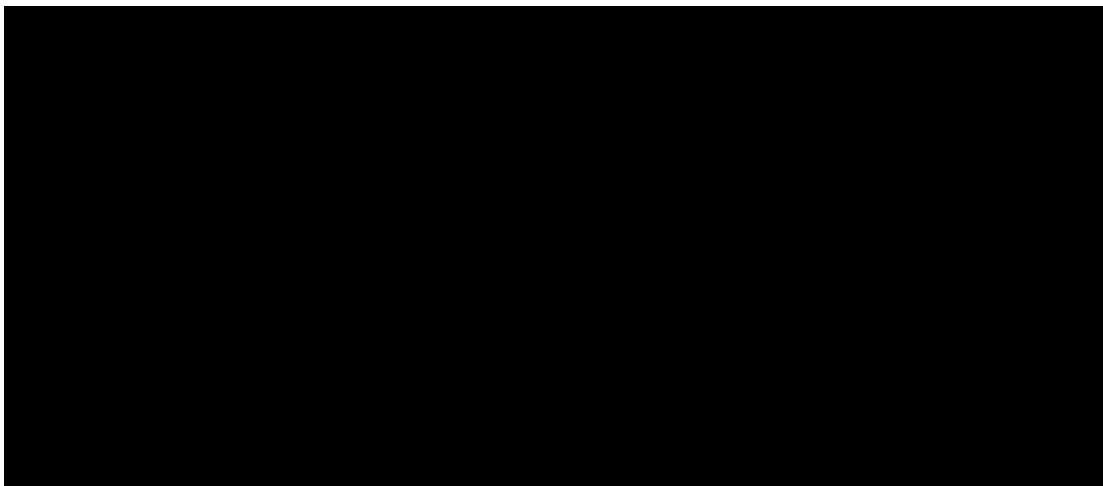
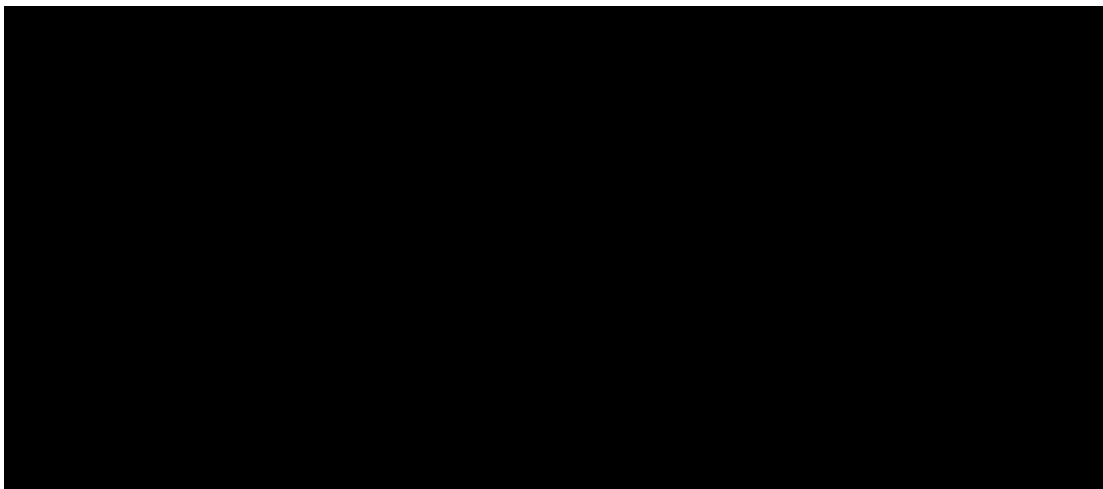
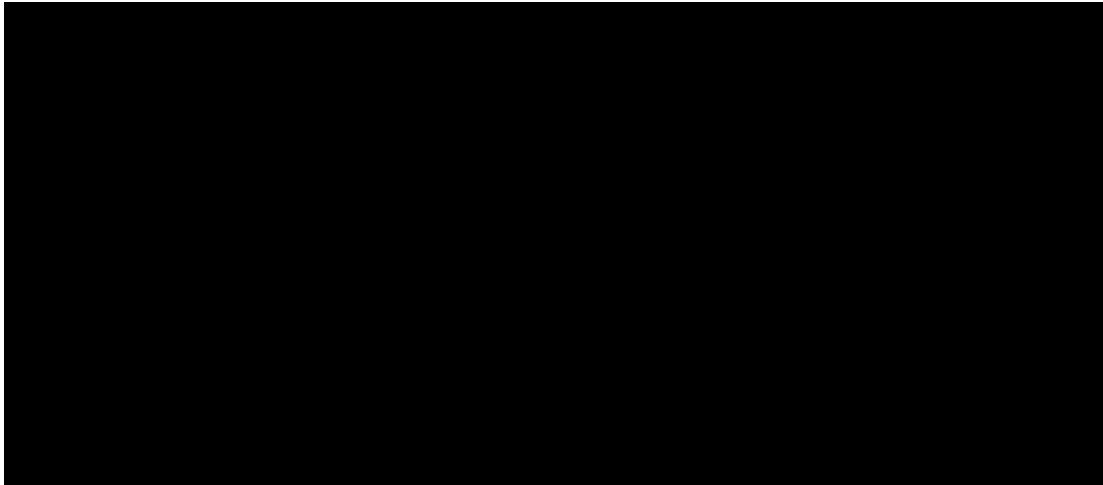
Βλέπουμε ότι στα πάρκα στο Μελιδοχώρι και Κόρτε Γκούλε η μηνιαία ταχύτητα ανέμου είναι περίπου 2-4,2 m/s ενώ στο πάρκο στις Μάκρες είναι στα 1-1,5m/s. Όπως γίνεται κατανοητό στο πάρκο στις Μάκρες οι απώλειες είναι πολύ μεγαλύτερες γιατί τα πάνελ δεν ψύχονται από την ταχύτητα του ανέμου με αποτέλεσμα να έχουμε και μικρότερη παραγωγή όπως βλέπουμε και από το πίνακα 5.22 και τη γραφική παράσταση 5.23

Μήνες	Κόρτε Γκούλε	Μάκρες	Μελιδοχώρι
	Συν. Εν. Παρ.kWh	Συν. Εν. Παρ.kWh	Συν. Εν. Παρ.kWh
1	8344	8645	8437
2	8014	7997	8700
3	11095	12173	10979
4	12658	12614	13094
5	13600	13373	14106
6	14326	13694	14363
7	15659	15341	16113
8	15324	15273	15477
9	12183	13593	14114
10	8841	11244	10869
11	6604	10878	9078
12	6986	7648	7720
Σύνολο	133633	142475	143050

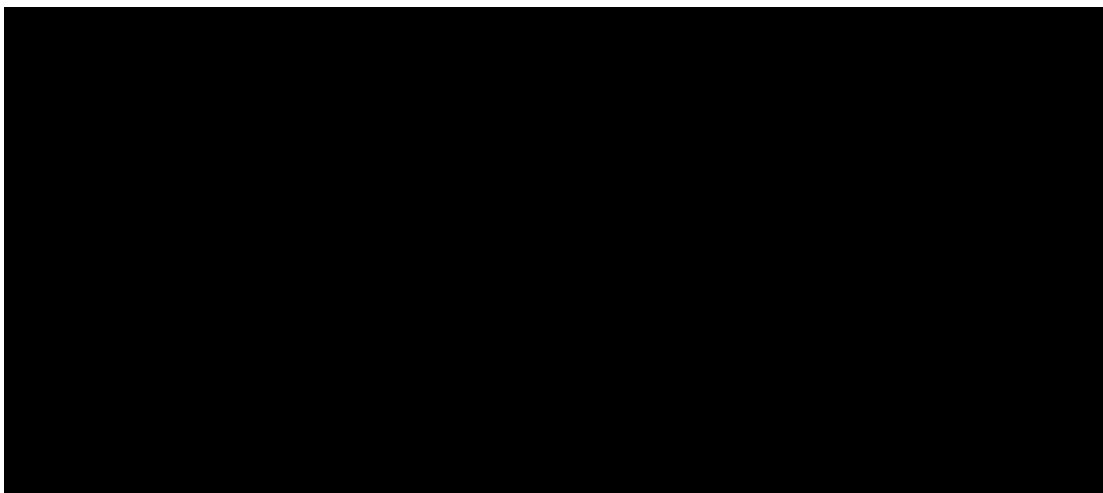
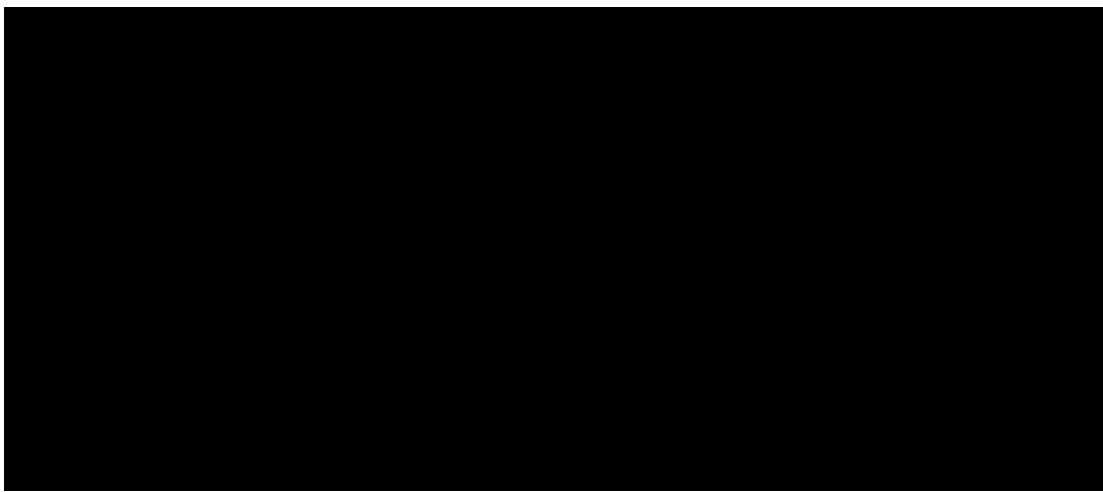
Πίνακας 5.22 Μηνιαίες συνολικές παραγωγές των τριών Φβ πάρκων.



Γραφική παράσταση 5.23 Μηνιαίες συνολικές παραγωγές των τριών ΦΒ πάρκων.



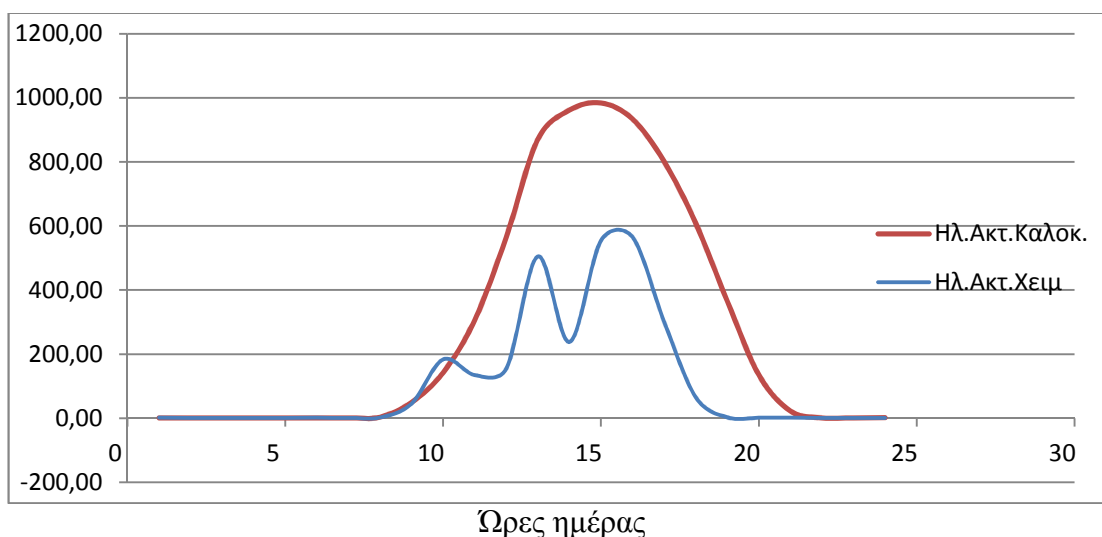
Πίνακας 5.24 Πίνακες με τις μηνιαίες καταγραφές δεδομένων των εξωτερικών παραγόντων και των αποδόσεων/επιδόσεων για τα τρία ΦΒ πάρκα.



Πίνακας 5.24 Πίνακες με τις μηνιαίες καταγραφές δεδομένων των εξωτερικών παραγόντων και των αποδόσεων/επιδόσεων για τα τρία ΦΒ πάρκα.

5.7 Σύγκριση λειτουργίας πάρκου τη θερινή και τη χειμερινή περίοδο

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα, έχουν το μειονέκτημα ότι η τροφοδοσία τους δεν είναι σταθερή, καθώς τα ποσά της λαμβανόμενης ηλιακής ενέργειας μεταβάλλονται λόγω αλλαγής της θέσης του ήλιου σε σχέση με τη γη κατά τη διάρκεια της ημέρας, καθώς και λόγω άλλων διακυμάνσεων που οφείλονται σε μεταβολές καιρικών συνθηκών. Με άλλα λόγια, η ένταση της λαμβανόμενης ηλιακής ακτινοβολίας αυξομειώνεται μεταξύ μίας μέγιστης και μίας μηδενικής τιμής κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου, παρουσιάζοντας συχνά απότομες διακυμάνσεις. Όταν επικρατεί συννεφιά, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται ανώμαλη. Ειδικά σε περιπτώσεις αραιής συννεφιάς, ενώ ο άνεμος μετακινεί το νέφος, ο συλλέκτης λαμβάνει μία συνεχώς μεταβαλλόμενη ενέργεια με απότομες αυξομειώσεις (διάχυτη ακτινοβολία).



Σχήμα 5.25: Ηλιακή ακτινοβολία δύο τυπικών ημερών κατά τη θερινή και κατά τη χειμερινή περίοδο.

Στο σχήμα 5.25, φαίνονται στο ίδιο διάγραμμα, η διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας μία τυπική καλοκαιρινή ημέρα η οποία διακρίνεται με την κόκκινη γραμμή και μία χειμερινή η οποία διακρίνεται με τη μπλε γραμμή. Κατά τη χειμερινή περίοδο, οι ώρες ηλιοφάνειας είναι λιγότερες, όχι μόνο γιατί η ανατολή του ήλιου συμβαίνει πιο αργά και η δύση νωρίτερα από ότι κατά τη θερινή περίοδο, αλλά και γιατί συνήθως επικρατεί έντονη συννεφιά. Αυτό, σαφώς έχει αντίκτυπο στα ποσά λαμβανόμενης ενέργειας από μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια, η παραγωγή DC ισχύος είναι αρκετά μικρότερη συγκριτικά με ημέρες που έχουμε πολλές ώρες ηλιοφάνειας.

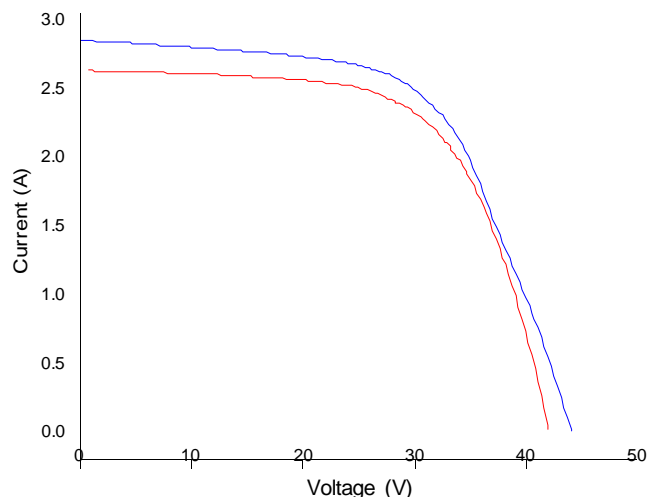
Είναι σημαντικό λοιπόν, να γνωρίζουμε περίπου τις συνολικές ώρες ηλιοφάνειας μίας περιοχής πριν την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών, ώστε να υπολογίσουμε τα ποσοστά της DC ισχύος που κατά μέσο όρο δύναται να παράγουν τα πλαίσια που θα τοποθετηθούν στη συγκεκριμένη περιοχή.

5.8 Αποκλίσεις των πειραματικών μετρήσεων από τις τιμές σε Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς

Κάθε φορά που αναφερόμαστε στην ισχύ που μπορεί να δώσει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, εννοούμε συνήθως την ισχύ, η οποία έχει παραχθεί σε εργαστηριακό περιβάλλον και δίνεται από τον κατασκευαστή. Οι εργαστηριακές μετρήσεις γίνονται σε STC που είναι για 25°C θερμοκρασία στοιχείου και 1000 W/m² προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Μέσα από όλες τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια ενός έτους, βρέθηκε μία η οποία έγινε κάτω από κανονικές συνθήκες που πλησιάζουν τις Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς. Βάσει αυτής, γίνεται μία σύγκριση των πειραματικών τιμών με τις τιμές των παραμέτρων που δίνουν τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Η μέτρηση αυτή, έγινε ενώ η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ήταν σταθερή στα 1000 W/m² και η θερμοκρασία κυττάρου 36.5°C. Αυτή ήταν η μέτρηση η οποία πραγματοποιήθηκε σε περιβαλλοντικές συνθήκες που πλησιάζουν όσο το δυνατό περισσότερο τις εργαστηριακές.

Σχήμα 5.50: Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης σε εργαστηριακές συνθήκες λειτουργίας και πραγματικές συνθήκες που πλησιάζουν τις Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς



Παρατηρώντας την χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος- τάσης στο σχήμα 5.50, βλέπουμε πώς τόσο η τιμή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος όσο και η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης, είναι μειωμένες σε σχέση με αυτές που αναφέρονται στα τεχνικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού πλαισίου από τον κατασκευαστή. Λόγω των μειωμένων τιμών αυτών των παραμέτρων, αναμένεται και μία σχετικά μειωμένη τιμή της ηλεκτρικής ισχύος που δύναται να παράξει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

Όταν μελετούσαμε την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας είχαμε πει πως, όταν έχουμε μεγάλα ποσά προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας, τότε αναπτύσσονται και στην ενεργή επιφάνεια του πλαισίου μεγάλες σχετικά θερμοκρασίες. Είναι πολύ δύσκολο υπό πραγματικές συνθήκες να πετύχουμε τις Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς. Ακόμα και οι περιβαλλοντικές συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιήθηκε η μέτρηση που χρησιμοποιήσαμε για τη σύγκριση αυτή, σπάνια συμβαίνει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΟΥ ΕΠΙΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

6.1 Η συμπεριφορά του φβ στοιχείου υπό πραγματικές συνθήκες

Όπως είδαμε υπάρχουν τρεις παράγοντες που επιδρούν δραστικά στη λειτουργία του φβ στοιχείου :

- α) Η ένταση και φασματική κατανομή της ακτινοβολίας
- β) Η θερμοκρασία του στοιχείου και
- γ) η αντίσταση του φορτίου

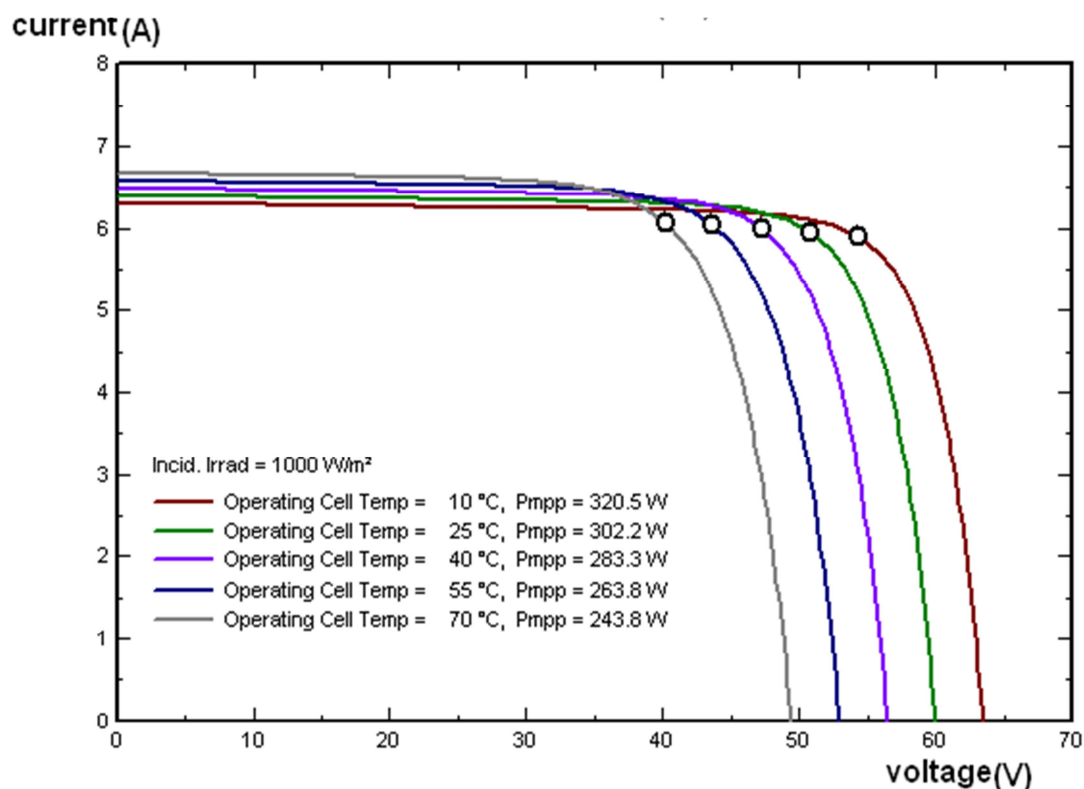
Λόγω της μεταβολής και των τριών αυτών παραμέτρων κατά τη λειτουργία των φβ στοιχείων είναι πρακτικά αδύνατο να διατηρούνται οι συνθήκες βέλτιστης λειτουργίας του στοιχείου. Δεδομένου πως τα α και β εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες θα έπρεπε κάθε στιγμή να ρυθμίζουμε την αντίσταση του κυκλώματος (κατανάλωση) γεγονός που ασφαλώς δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα.

6.2 Επίδραση της θερμοκρασίας στις χαρακτηριστικές παραμέτρους φβ πάρκου

Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η θερμοκρασία λειτουργίας ενός στοιχείου έχει άμεση επίδραση στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η αύξηση της θερμοκρασίας σε ένα ηλιακό πλαίσιο, επιδρά αρνητικά. Δηλαδή, η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως επακόλουθο την μείωση παραγωγής ισχύος του πλαισίου

Χρησιμοποιώντας μετρήσεις με σταθερή ακτινοβολία στα 1000 W/m^2 και διαφορετικές θερμοκρασίες της ενεργούς επιφάνειας του πλαισίου καταλήγουμε στο σχήμα 6.10, όπου παρουσιάζονται τρεις I-V καμπύλες από αυτές στο ίδιο γράφημα.

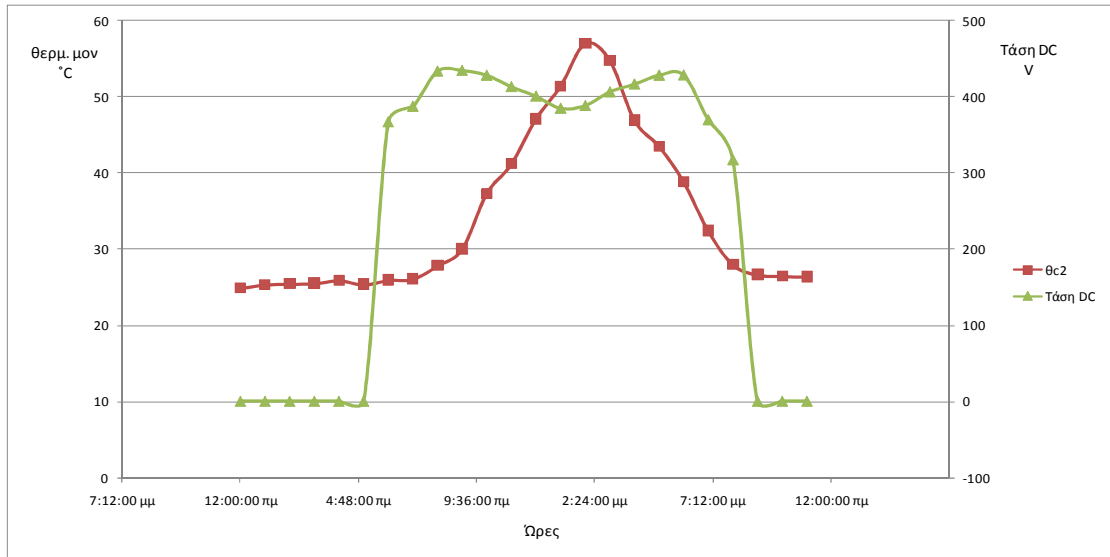
Πριν προχωρήσουμε σε περαιτέρω ανάλυση, να αναφέρουμε ότι τα διαγράμματα που θα ακολουθήσουν, έχουν κατασκευαστεί, λαμβάνοντας υπόψιν πως, για να φανεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η επίδραση της θερμοκρασίας, πρέπει η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στο πλαίσιο να είναι σταθερή. Για την κατασκευή τους, επιλέχτηκαν μετρήσεις, οι οποίες έγιναν κάτω από σταθερή ακτινοβολία στα 1000 W/m², για διαφορετικές θερμοκρασίες.



Σχήμα 6.1 I-V χαρακτηριστικές καμπύλες φωτοβολταϊκού πλαισίου για διαφορετικές θερμοκρασίες κυττάρου, υπό ηλιακή ακτινοβολία 1000 W/m².

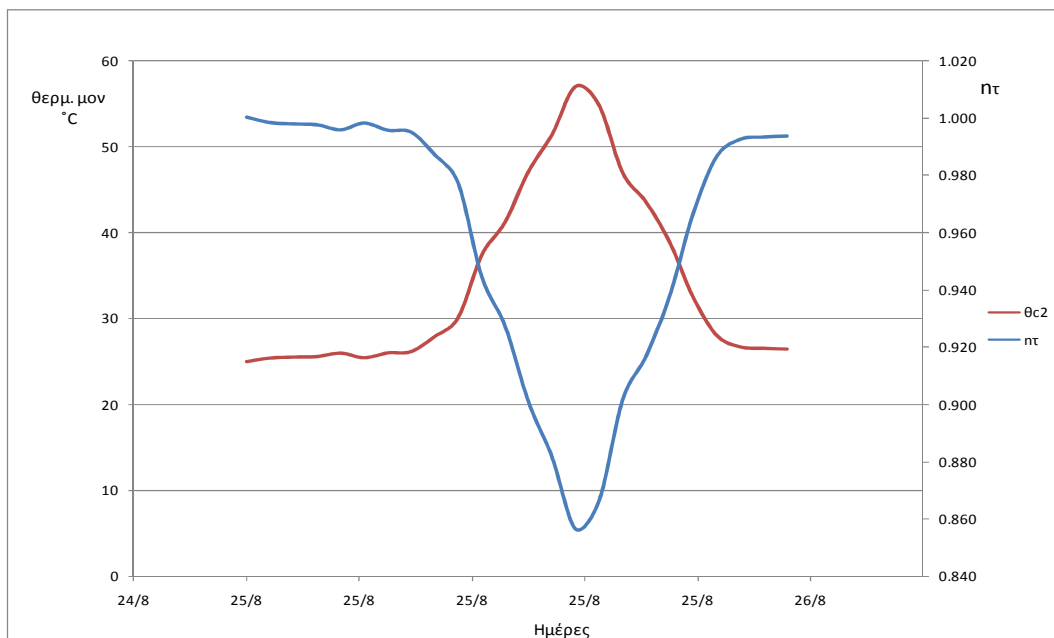
Παρατηρώντας και πάλι το σχήμα 6.1, εύκολα διαπιστώνουμε ότι η τάση ανοιχτού κυκλώματος στις τρεις χαρακτηριστικές καμπύλες του φωτοβολταϊκού, διαφέρουν αρκετά. Μία μικρότερη μεταβολή παρατηρούμε στο ρεύμα βραχυκύκλωσης όμως δεν διακρίνεται εύκολα.

Παρατηρώντας το σχήμα 6.2, το σχήμα 6.3 και το σχήμα 6.4, μπορούμε να διευκρινίσουμε κατά πόσο οι χαρακτηριστικές Τάση DC, συντελεστής θερμοκρασίας ΦB στοιχείου nT και ηλεκτρική ισχύς P_m μεταβάλλονται συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Σχήμα 6.2 Μεταβολή της τάσης DC συναρτήσει της θερμοκρασίας. Οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για το διάγραμμα είναι απο το μήνα Αύγουστο.

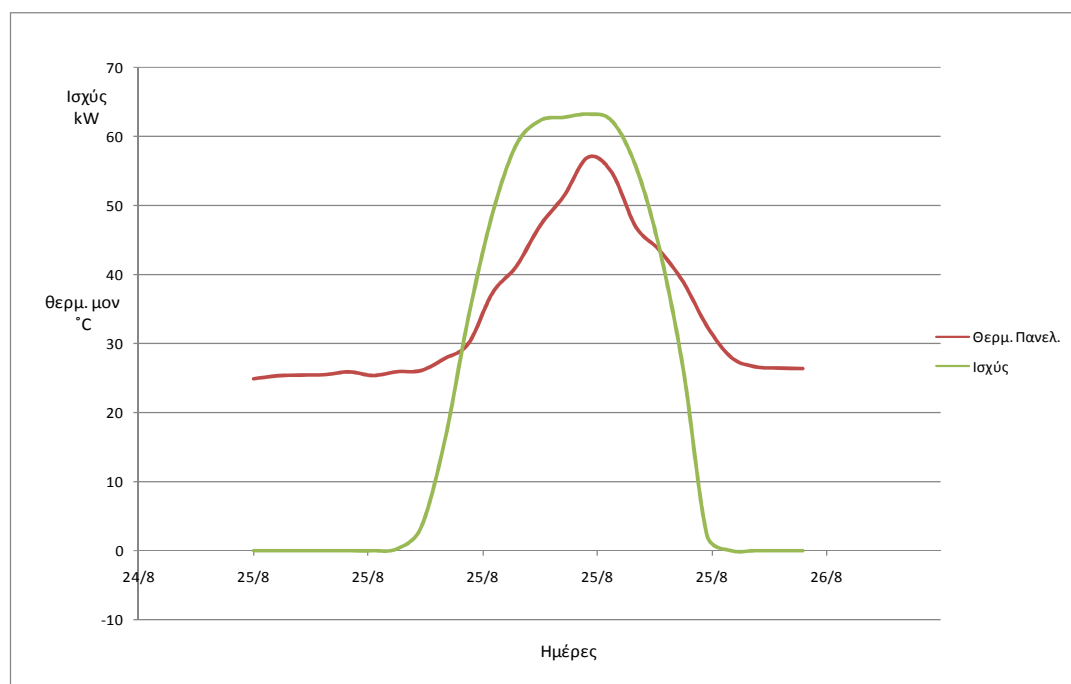
Στο σχήμα 6.2, φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας στην τάση του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Με την αύξηση της θερμοκρασίας κυττάρου αυξάνεται σιγά σιγά και η τάση μέχρι του σημείου όπου η περαιτέρω αύξηση της κυψέλης φέρνει μείωση της τάσης.



Σχήμα 6.3 Μεταβολή του συντελεστή θερμοκρασίας ΦΒ στοιχείου nT συναρτήσει της θερμοκρασίας. Οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για το διάγραμμα είναι απο το μήνα Αύγουστο.

Στο σχήμα 6.3, φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας στον συντελεστή θερμοκρασίας ΦΒ στοιχείου nT του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Με την αύξηση της

θερμοκρασίας κυττάρου παρατηρείται μείωση του συντελεστή θερμοκρασίας ΦΒ στοιχείου.



Σχήμα 6.4 Μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύς Pm συναρτήσει της θερμοκρασίας. Οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για το διάγραμμα είναι απο το μήνα Αύγουστο

Στο σχήμα 6.4, φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας στην ηλεκτρική ισχύς Pm του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Με την αύξηση της θερμοκρασίας κυττάρου αυξάνεται και η ηλεκτρική ισχύς μέχρι του σημείου όπου η περαιτέρω αύξηση της κυψέλης η ισχύς μένει σταθερή.

Από τα σχήματα 6.2, 6.3 και 6.4 φαίνεται κατά πόσο η Τάση DC, ο συντελεστής θερμοκρασίας ΦΒ στοιχείου nT, η ηλεκτρική ισχύς Pm και ο παράγοντας ποιότητας FF επηρεάζονται αρνητικά καθώς η θερμοκρασία ανεβαίνει. Μπορούμε να πούμε πως η διαφορά δυναμικού παρουσιάζει μια αρνητική εξάρτηση.

Ο παράγοντας ποιότητας ενός φωτοβολταϊκού, δίνεται από τη παράγραφο 3.3.7

Η τιμή του παράγοντα ποιότητας που υπολογίζεται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πλαισίου, είναι 0.6. Όπως προαναφέραμε, η αύξηση της θερμοκρασίας του ενεργού μέρους του πλαισίου, προκαλεί μεγάλη μείωση στην τάση του φωτοβολταϊκού και μία σχετικά μικρή αύξηση του ρεύματος. Περισσότερο επηρεάζεται η τάση ανοιχτού κυκλώματος VOC απ' ότι η τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος VMPP. Επομένως, εφόσον ο παράγοντας ποιότητας είναι ανάλογος της

τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος και αντιστρόφως ανάλογος της τάσης ανοιχτού κυκλώματος, καταλήγουμε να έχουμε σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες παράγοντα ποιότητας μεγαλύτερο από αυτόν που δίνει ο κατασκευαστής για το πλαίσιο.

Στον πίνακα 6.5, φαίνεται η μέγιστη παραγόμενη ισχύς για τρεις χαρακτηριστικές καμπύλες για διαφορετικές θερμοκρασίες κυττάρου υπό σταθερή ηλιακή ακτινοβολία περίπου στα 1000 W/m² καθώς και ο βαθμός απόδοσης.

Θερμοκρασία	Μέγιστη Ισχύς	Βαθμός
$T_3 = 35.5^{\circ}\text{C}$	72.3W	10.0
$T_2 = 46.8^{\circ}\text{C}$	7	9.7
$T_1 = 50^{\circ}\text{C}$	64.3W	8.9

Πίνακας 6.5 Μέγιστη παραγόμενη ισχύς και βαθμός απόδοσης για διαφορετικές θερμοκρασίες κυττάρου υπό σταθερή ηλιακή ακτινοβολία για 1000 W/m² πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας.

Από τον πίνακα 6.5, φαίνεται ότι μία μεταβολή της θερμοκρασίας κυττάρου σε υψηλές θερμοκρασίες, μειώνει πολύ περισσότερο τον βαθμό απόδοσης, απ' ό,τι μία αντίστοιχη μεταβολή στις χαμηλές. Να πούμε πως ακόμα και κάτω από μέτριες συνθήκες ακτινοβολίας, όταν η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού είναι ήδη υψηλή, μία μικρή αύξηση της, είναι ικανή να μειώσει κατά πολύ το βαθμό απόδοσης.

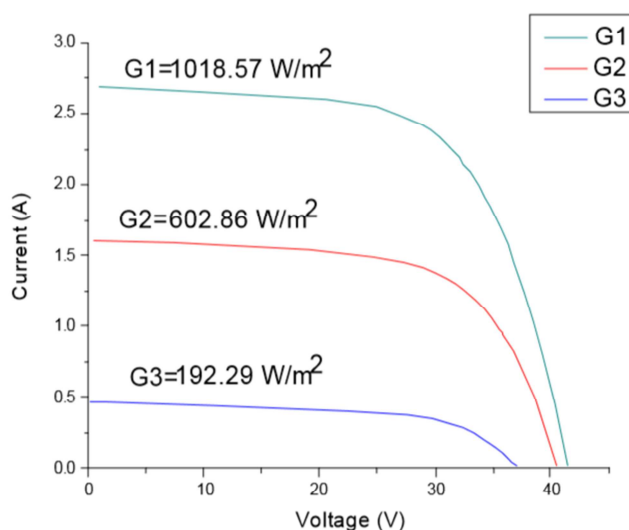
Αυτό συμβαίνει συχνά, ειδικά τους καλοκαιρινούς μήνες, όπου κάτω από μεγάλη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η θερμοκρασία κυττάρου μπορεί να ξεπεράσει και τους 50°C. Στο σημείο αυτό λοιπόν, μπορούμε να πούμε πως τα μεγάλα ποσά ισχύος που μπορεί να παράξει τη θερινή περίοδο το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, οφείλεται στη συνεχή ηλιοφάνεια και όχι στην ικανότητα του να μετατρέψει μεγάλα ποσά της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική, λόγω των μεγάλων θερμοκρασιών που μειώνουν το βαθμό απόδοσης.

6.3 Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στις χαρακτηριστικές παραμέτρους φβ πάρκου

Ένα φωτοβολταϊκό, μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνειά του σε ηλεκτρική. Όσο μεγαλύτερα είναι τα ποσά της ηλιακής ακτινοβολίας σε W/m^2 , τόσο περισσότερη ισχύ μπορούμε να λάβουμε στη DC λειτουργία, εάν η αύξηση της θερμοκρασίας δεν είναι τόσο μεγάλη ώστε να μειώσει κατά πολύ την απόδοση του ηλιακού πλαισίου. Άρα, κατά την τοποθέτησή τους, πρέπει να προσέξουμε κάθε παράγοντα που προκαλεί μείωση του ποσοστού της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στο συλλέκτη. Για παράδειγμα, για την κατασκευή ενός φωτοβολταϊκού πάρκου, πρέπει να γίνει μία μελέτη της περιοχής εγκατάστασης ώστε να βρεθεί η βέλτιστη κλίση λειτουργίας και να τοποθετηθούν τα πλαίσια σε τέτοια απόσταση μεταξύ τους ώστε να μην σκιάζονται.

Επίσης, πρέπει να λάβουμε υπόψη, τις ώρες ηλιοφάνειας που επικρατούν στην περιοχή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Οι τρεις παράγοντες που αναφέρθηκαν πιο πάνω, δηλαδή η κλίση στην οποία είναι τοποθετημένο το φωτοβολταϊκό, η σκίαση και οι καιρικές συνθήκες, επηρεάζουν άμεσα τα την πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνειά του.

Χρησιμοποιώντας μετρήσεις που έγιναν υπό σταθερή θερμοκρασία κυττάρου περίπου στους $35^{\circ}C$ και αισθητά διαφορετικά ποσά λαμβανόμενης ηλιακής ακτινοβολίας καταλήγουμε στο σχήμα 6.6, όπου παρουσιάζονται I-V καμπύλες.



Σχήμα 6.6 I-V χαρακτηριστικές καμπύλες φωτοβολταϊκού πλαισίου για διαφορετικές τιμές της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε W/m^2 , για θερμοκρασία κυττάρου $35^{\circ}C$.

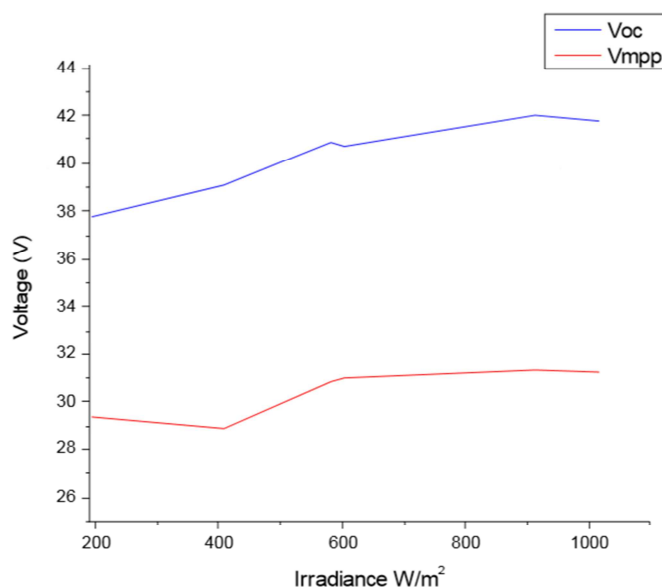
Στο σχήμα 6.6 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές I-V καμπύλες, όπου είναι εμφανής η διαφορά της παραγόμενης ισχύος μεταξύ τους. Η γραφική αυτή παράσταση, συμπεριλαμβάνει μετρήσεις ρεύματος-τάσης που έγιναν υπό θερμοκρασία λειτουργίας $35^{\circ}C$.

Περιπτώσεις όπου έχουμε $1000 W/m^2$ και $25^{\circ}C$ θερμοκρασία λειτουργίας, είναι δύσκολο να πετύχουμε. Αυτό γιατί, όταν επικρατούν καιρικές συνθήκες ώστε το ενεργό μέρος να έχει θερμοκρασία στους $25^{\circ}C$, η ακτινοβολία συνήθως είναι πολύ χαμηλή. Αυτή είναι μία παρατήρηση που έγινε μετά από μία σειρά μετρήσεων που έγιναν στη διάρκεια ενός έτους.

Στο σημείο αυτό, θα δούμε με γραφήματα, την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε μία από τις παραμέτρους του φωτοβολταϊκού ξεχωριστά.

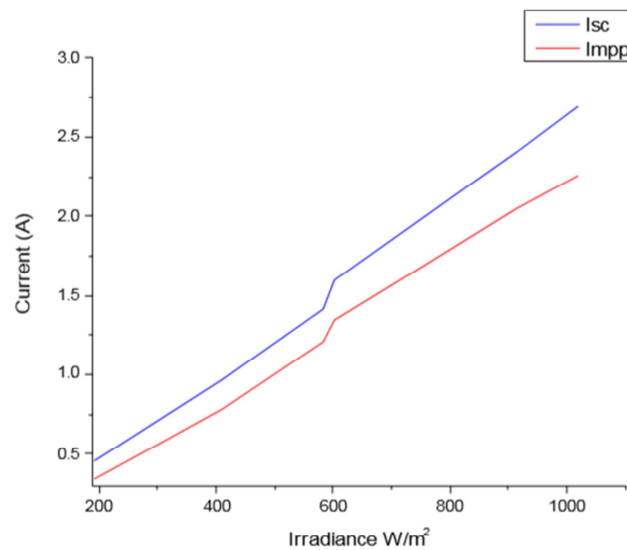
Παρατηρώντας και πάλι το σχήμα 6.6, διακρίνεται η μεγάλη εξάρτηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης ISC από την ηλιακή ακτινοβολία. Μία μικρότερη μεταβολή παρατηρείται στην τάση ανοιχτού κυκλώματος VOC. Με τα διαγράμματα που ακολουθούν, θα γίνει πιο ξεκάθαρη η εξάρτηση κάθε μίας από τις χαρακτηριστικές παραμέτρους από τη μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας και πώς αυτή επηρεάζει την τιμή της παραγόμενης ισχύος.

Στο σχήμα 6.7, φαίνεται η μεταβολή των χαρακτηριστικών τάσεων, VOC και VMPP. Παρατηρούμε μία σχετικά μικρή αύξησή της, ανάλογα με την αύξηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Αυτό συμβαίνει κυρίως όταν ακόμα η πυκνότητα της ακτινοβολίας είναι σχετικά μικρή. Η τάση στο γόνατο VMPP, κυμαίνεται γύρω από μία σταθερή τιμή όταν ξεπερνά τα 800 W/m² περίπου, ενώ η τάση ανοιχτού κυκλώματος VOC παρουσιάζει μικρότερη αύξηση απ' ότι σε χαμηλότερες τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 6.7 Εξάρτηση των χαρακτηριστικών τάσεων από την ηλιακή ακτινοβολία.

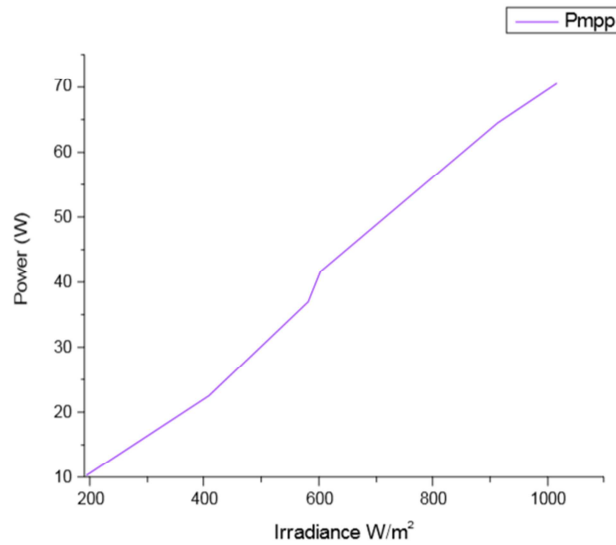
Στο σχήμα 6.8, απεικονίζεται αντίστοιχα η εξάρτηση των ρευμάτων ISC και IMPP. Εδώ, είναι πλέον ξεκάθαρη, η σχέση μεταξύ των δύο αυτών ποσοτήτων και της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας. Και τα δύο ρεύματα, μεταβάλλονται γραμμικά συναρτήσει της ακτινοβολίας. Η γραμμική αυτή εξάρτηση είναι εμφανής αν εξαιρέσουμε μία μικρή απόκλιση που πιθανόν οφείλεται σε κάποιο σφάλμα.



Σχήμα 6.8 Εξάρτηση των χαρακτηριστικών ρευμάτων από την ηλιακή ακτινοβολία

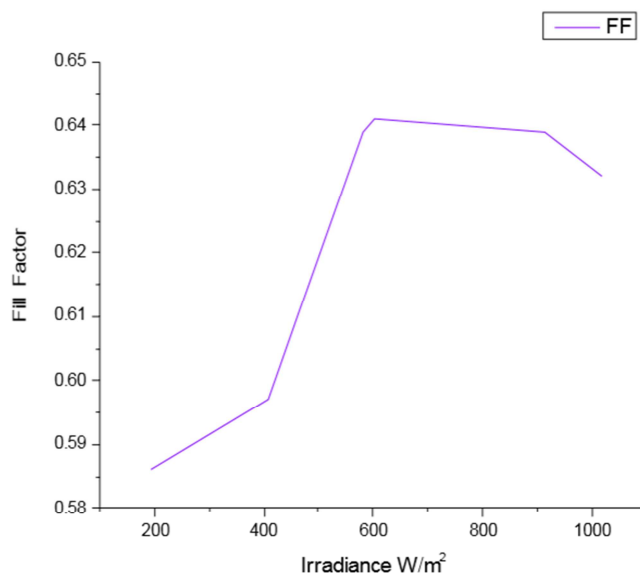
Μετά τα δύο αυτά γραφήματα του σχήματος 6.7 και του σχήματος 6.8, μπορούμε να πούμε ότι η εξάρτηση του ρεύματος από την ηλιακή ακτινοβολία, είναι αρκετά μεγαλύτερη σε αντίθεση με αυτήν της τάσης με αποτέλεσμα η παραγωγή μέγιστης ισχύος, ουσιαστικά να επηρεάζεται κυρίως από την τιμή του ρεύματος. Στο σχήμα 6.9, παρίσταται γραφικά πώς επιδρά η αύξηση της ακτινοβολίας στο σημείο μέγιστης ισχύος. Και στο διάγραμμα αυτό, παρατηρούμε μία γραμμική εξάρτηση της ισχύος όπως αντίστοιχα είδαμε και για το ρεύμα στο σχήμα 6.8.

Για μεγαλύτερα ποσά προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο, έχουμε αντίστοιχα μεγαλύτερη παραγωγή ρεύματος και κατ' επέκταση μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος.



Σχήμα 6.9 Εξάρτηση της παραγόμενης μέγιστης ισχύος από την ηλιακή ακτινοβολία.

Στο σχήμα 6.10, παρίσταται η εξάρτηση του παράγοντα ποιότητας από την ηλιακή ακτινοβολία. Είναι μία ποσότητα που επίσης αυξάνεται με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Όχι όμως για πολύ μεγάλες τιμές της. Όπως φαίνεται στην αντίστοιχη γραφική παράσταση, η παράμετρος αυτή παρουσιάζει αύξηση ενόσω η ακτινοβολία φτάνει μέχρι και τα 600 W/m² περίπου, ενώ περαιτέρω αύξηση αυτής, προκαλεί μία μικρή μείωση του.



Σχήμα 6.10 Εξάρτηση του παράγοντα ποιότητας FF από την ηλιακή ακτινοβολία.

Καθώς η αύξηση του IMPP και ISC είναι περίπου ίδια και επειδή η λογαριθμική αύξηση της VOC είναι μεγαλύτερη απ' ό τι της VMPP, προκύπτει για μεγάλες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας μειωμένος ελαφρώς ο παράγοντας ποιότητας.

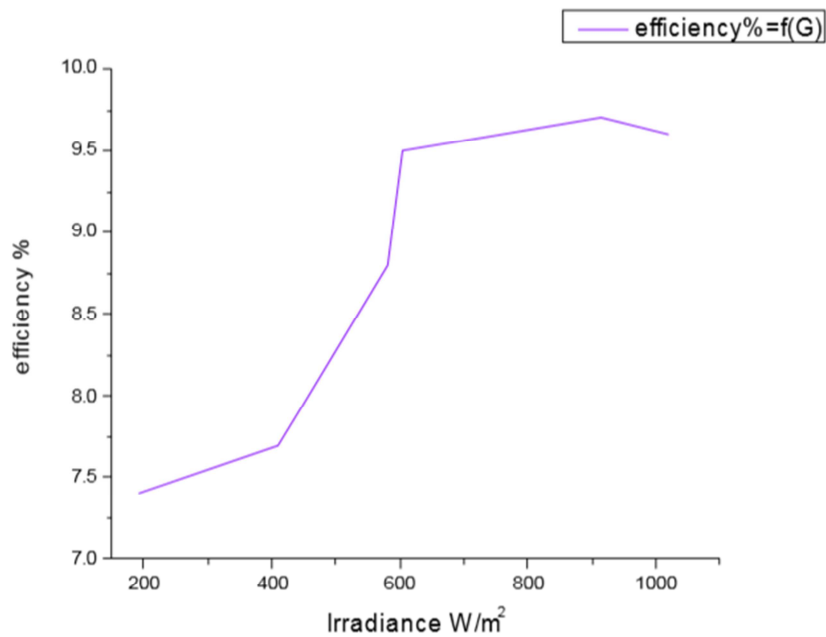
Πυκνότητα Ηλιακής	Μέγιστη Ισχύς	Βαθμός Απόδοσης
G1=1018.57	70.	9.
G2=602.86 W/m ²	41.	9.
G3=192.29 W/m ²	10.	7.

Πίνακας 6.11 Μέγιστη παραγόμενη ισχύς και ο βαθμός απόδοσης για διαφορετικές τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας υπό σταθερή θερμοκρασία κυττάρου, 35 °C.

Από τις τιμές που παρουσιάζονται στον πίνακα 6.11, είναι εμφανές πως ο βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι μεγαλύτερος για μεγάλες σχετικά τιμές της λαμβανόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Όσο μικραίνουν οι τιμές της ακτινοβολίας, μικραίνει και ο βαθμός απόδοσης και η σημαντικότερη μείωση του παρατηρείται σε πολύ χαμηλά ποσά προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Δηλαδή, μία σημαντική μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας μεταξύ ήπιων και υψηλών τιμών της, επιφέρει μικρή μεταβολή του βαθμού απόδοσης.

Αντίθετα, σε μία αντίστοιχη μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας που γίνεται μεταξύ ήπιων και χαμηλών τιμών της, η μεταβολή του βαθμού απόδοσης είναι αρκετά μεγαλύτερη.

Στο σχήμα 6.12 φαίνεται η μεταβολή του βαθμού απόδοσης συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του πλαισίου.

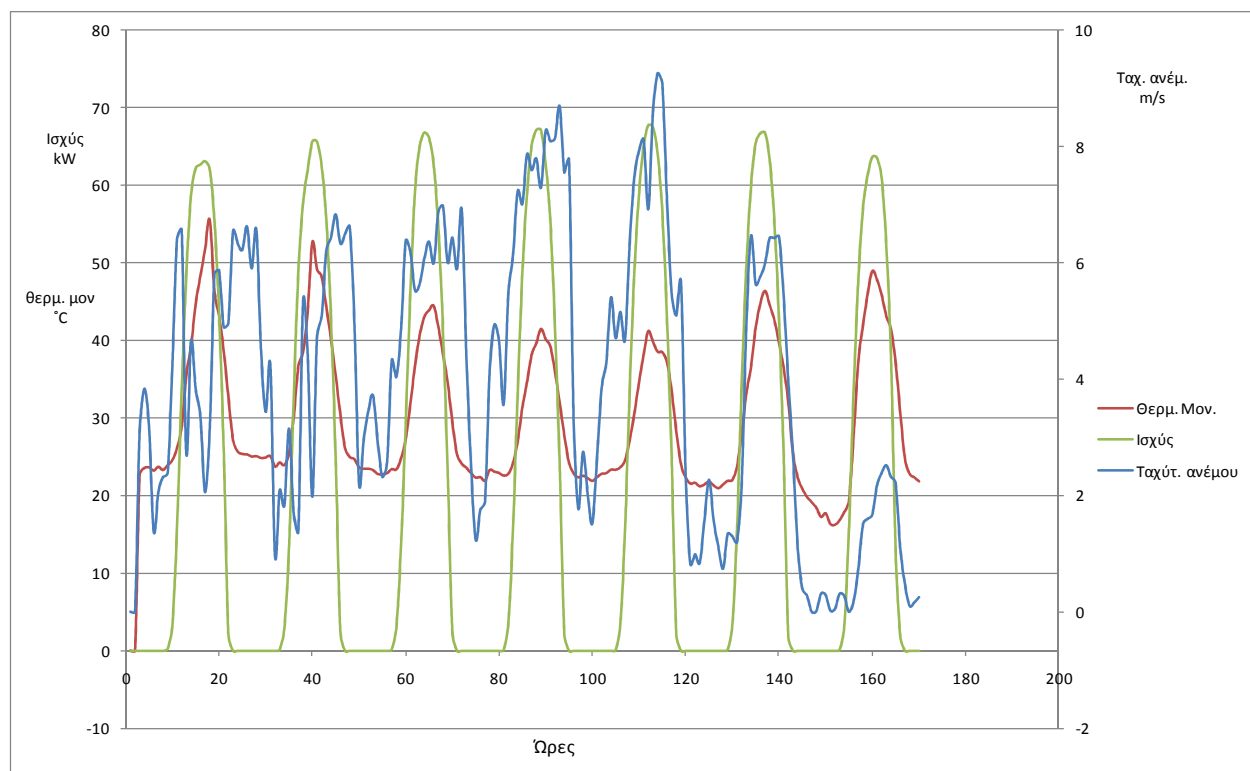


Σχήμα 6.12 Μεταβολή του βαθμού απόδοσης συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του πλαισίου.

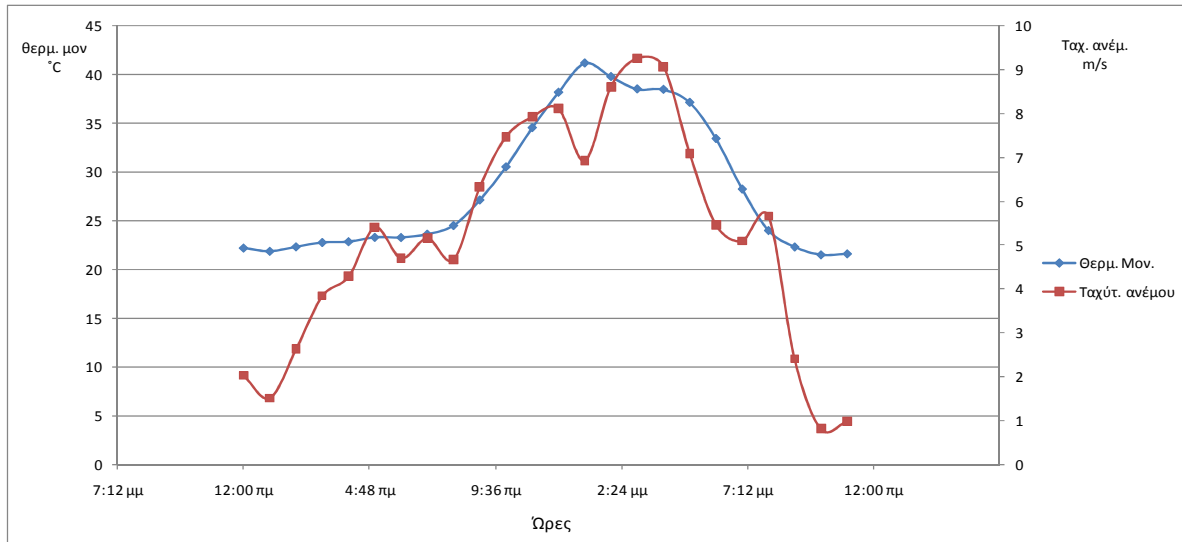
Παρατηρώντας το σχήμα 6.12, είναι εμφανές, πως με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας, έχουμε και αύξηση του βαθμού απόδοσης. Για τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας άνω των 1000 W/m² συνήθως έχουμε μεγάλες θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα ο βαθμός απόδοσης να μειώνεται.

5.4 Επίδραση της ταχύτητας ανέμου στις χαρακτηριστικές παραμέτρους φβ πάρκου

Η ταχύτητα του ανέμου και η κατεύθυνση του παίζουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου καθότι όπως είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια από πίνακες με δεδομένα που καταγράψαμε απο τα πάρκα και από γραφικές παραστάσεις, οι μεγάλες ταχύτητες ανέμου έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας του ΦΒ συστήματος. Όταν οι ανεμισμοί είναι κατα μέσο όρο δυνατοί και ψυχροί, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με αυτές που θα λειτουργούσαν εάν υπήρχε άπνοια, υπό τα ίδια ποσοστά της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

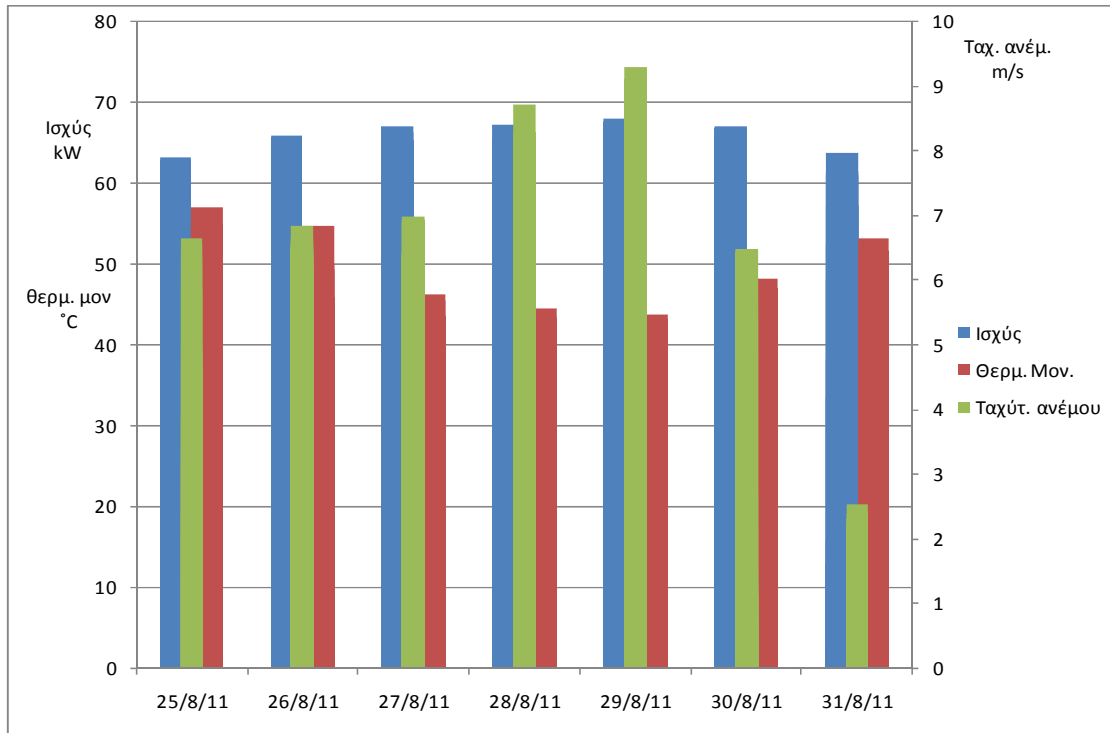


Γραφική παράσταση 6.13 Απεικόνιση αλληλεπιδράσεων της θερμοκρασίας μονάδας της ταχύτητας ανέμου και της παραγόμενης ισχύς.



Γραφική παράσταση 6.14 Απεικόνιση αλληλεπιδράσεων της θερμοκρασίας μονάδας και της ταχύτητας ανέμου της πέμπτης μέρας της γρ. πρ. 6.13

Στη γραφική παράσταση 6.13 και 6.14 απεικονίζεται η αλληλεπίδραση της θερμοκρασίας μονάδας της ταχύτητας ανέμου και της παραγόμενης ισχύς για επτά ημέρες του Αυγούστου. Αν παρατηρήσουμε όταν οι μέσες ημερήσιες ταχύτητες ανέμου αυξάνονται προκαλείτε μείωση της θερμοκρασίας του πάνελ και συνακολούθως αύξηση της παραγόμενης ισχύς.



Γραφική παράσταση 6.15 Απεικόνιση αλληλεπιδράσεων της θερμοκρασίας μονάδας της ταχύτητας ανέμου και της παραγόμενης ισχύς.

Εδώ είναι μια άλλη γραφική παράσταση που δείχνει τα προαναφερθείσα αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης μεταξύ της θερμοκρασίας μονάδας της ταχύτητας ανέμου και της παραγόμενης ισχύς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας, πραγματοποιήθηκε συλλογή και καταγραφή μετρήσεων στη διάρκεια ενός έτους, όπως η ταχύτητα ανέμου, η εξωτερική θερμοκρασία, η θερμοκρασία πανέλου, η ισχύ, η συνολική ενεργειακή παραγωγή, η ηλιακή ακτινοβολία και η τάση DC για τα ΦΒ πάρκα που βρίσκονται στο Μελιδοχώρι, στο Κόρτε Γκούλε και στις Μάκρες. Η επεξεργασία των μετρήσεων αυτών, έγινε με την καλύτερη δυνατή ακρίβεια ώστε να υπολογίσουμε το βαθμό επίδρασης των κυριότερων εξωτερικών παραμέτρων στην απόδοση των ΦΒ συστημάτων. Οι εξωτερικές παράμετροι που ήταν εφικτό να μελετηθούν, ήταν κυρίως η θερμοκρασία, η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και η ταχύτητα ανέμου.

Αρχικά, έγινε μια περιγραφή των πάρκων απ' όπου έγινε η συλλογή και η καταγραφή δεδομένων. Αργότερα, σύμφωνα με τα δεδομένα αυτά φτιάξαμε χαρακτηριστικές καμπύλες και γραφικές παραστάσεις για να δούμε κατά πως και πόσο οι κυριότεροι εξωτερικοί παράμετροι αλληλεπιδρούν στην απόδοση των ΦΒ συστημάτων. Έγινε μια προσπάθεια προσομοίωση της απόδοσης των ΦΒ συστημάτων με την μεταβολή της ταχύτητας ανέμου και μια σύγκριση των αποτελεσμάτων των τριών ΦΒ πάρκων.

Στη συνέχεια γίνεται μία σύγκριση της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου κατά τη θερινή και χειμερινή περίοδο. Λαμβάνοντας υπόψιν την επίδραση της θερμοκρασίας και της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας, μπορούμε να πούμε πώς είναι δύσκολο να λάβουμε ισχύ 80kW όσο και η εγκατεστημένη, εφόσον τους θερινούς μήνες που επικρατεί συνήθως έντονη ηλιοφάνεια, η θερμοκρασία λειτουργίας ανεβαίνει πολύ μειώνοντας την ικανότητα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Όσο για τον χειμώνα, αν και δεν έχουμε συνήθως μεγάλες θερμοκρασίες, οι ώρες ηλιοφάνειας είναι λιγότερες. Αποτέλεσμα αυτού, ακόμα και αν στιγμιαία λόγω διάχυτης ακτινοβολίας έχουμε πρόσπτωση ηλιακής ενέργειας μεγαλύτερη των 1000 W/m² και φτάσουμε κοντά στα 70 με 75 kW παραγωγή, δεν είναι αρκετό ώστε να ανεβάσει την τιμή της μέσης παραγόμενης ισχύος κατά τους χειμερινούς μήνες. Γενικά, καλύτερη εποχή για την απόδοση του

φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι το φθινόπωρο όπου έχουμε αυξημένη ηλιοφάνεια και χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες κυττάρου.

Ύστερα είδαμε πως η θερμοκρασία λειτουργίας ενός στοιχείου έχει άμεση επίδραση στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Οι μεγάλες θερμοκρασίες κυττάρου έχουν αρνητική επίδραση στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διαφοράς δυναμικού του φωτοβολταϊκού με αποτέλεσμα, όταν ένα φορτίο συνδεθεί στα άκρα του, η διαφορά δυναμικού να είναι αισθητά μειωμένη και ως επακόλουθο τη μείωση παραγωγής ισχύος του πλαισίου.

Στη συνέχεια, μελετήθηκε η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία όπως ήταν αναμενόμενο, ήταν θετική. Αν και μεγάλες τιμές της συνεπάγονται τις περισσότερες φορές μεγάλες θερμοκρασίες λειτουργίας που επηρεάζουν αρνητικά το βαθμό απόδοσης. Η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας επιτρέπει μεγαλύτερα ποσά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας με ένα μικρό ποσοστό μειωμένο βαθμό απόδοσης.

Τέλος κατά τη διάρκεια της πτυχιακής εργασίας είδαμε πως η ταχύτητα του ανέμου και η κατεύθυνση του παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου καθώς όπως είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια από πίνακες με δεδομένα που καταγράψαμε από τα πάρκα και από γραφικές παραστάσεις, οι μεγάλες ταχύτητες ανέμου έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας του ΦΒ συστήματος. Όταν οι ανεμισμοί είναι κατα μέσο όρο δυνατοί και ψυχροί, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με αυτές που θα λειτουργούσαν εάν υπήρχε άπνοια, υπό τα ίδια ποσοστά της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Με αποτέλεσμα την καλύτερη απόδοση και καλύτερη ηλεκτρική παραγωγή των ΦΒ συστημάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Κ. Καγκαράκης. “Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία”, Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, 1992
- 2) Ι.Ε Φραγκιαδάκης. “Φωτοβολταϊκά Συστήματα”, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2007
- 3) www.sunnyportal.com
- 4) F.Kreith and J.F.Kreider “Principles of Solar Engineering “ McGraw-Hill (1978)
- 5) www.wikipedia.com
- 6) J.A Duffie & W.A Beckman “Solar Engineering of Thermal processes” Wiley N.Y U.S.A
- 7) Γ.Β.Γιαννακόπουλος&Ν.Α.Βοβός. Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Πάτρα : Πανεπιστήμιο Πατρών, 2005
- 8) C. M. Whitaker, et.al., “Effects of Irradiance and Other Factors on PV Temperature Coefficients
- 9) ASTM E 1144, “Standard Method for Calibration of Non-Concentrator Terrestrial Photovoltaic Primary Reference Cells Under Direct Irradiance