



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Διπλωματική εργασία
Πειραματική διερεύνηση της τεχνολογικής εξέλιξης των φωτοβολταϊκών
συστημάτων



Βιτάλης Ιωσήφ Α.Μ 04314

Επιβλέπων καθηγητής: Καβαδίας Κοσμάς

Αθήνα, Φεβρουάριος 2022



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL
ENGINEERING**

Diploma Thesis

Experimental investigation of the photovoltaic panels' technological development



**Vitalis Iosif
Registration Number: 04314**

Supervisor: Kavadias Kosmas

Athens, February 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

Πειραματική διερεύνηση της τεχνολογικής εξέλιξης των φωτοβολταϊκών συστημάτων

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	ΚΑΒΒΑΔΙΑΣ Κ.	Αναπληρωτής Καθηγητής	
2	ΜΟΥΣΤΡΗΣ Κ.	Αναπληρωτής Καθηγητής	
3	ΖΑΦΕΙΡΑΚΗΣ Δ.	Επίκουρος Καθηγητής	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένοςΒιτάλης Ιωσήφ..... του.....Νικολάου....., με αριθμό μητρώου51204314..... φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο/Η Δηλών/ούσα

Βιτάλης Ιωσήφ



Ονοματεπώνυμο/ Ιδιότητα

Ψηφιακή Υπογραφή Επιβλέποντα

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κεφάλαιο 1

Φωτοβολταϊκά συστήματα.....	7
1.1 Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	7
1.2 Τρόποι κατασκευής φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	9
1.3 Βασικά υλικά από τα οποία αποτελούνται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.....	11

Κεφάλαιο 2

Απόδοση φωτοβολταϊκών	14
2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των συστημάτων.....	15
2.1.1 Ηλιακή ακτινοβολία.....	15
2.1.2 Θερμοκρασία.....	15
2.1.3 Αντίσταση σειράς R_s	16
2.1.4 Παράλληλη αντίσταση R_{sh}	18
2.1.5 Ηλεκτρικές απώλειες.....	18
2.1.6 Οπτικές απώλειες.....	18
2.1.7 Σκίαση.....	19
2.1.8 Αέρας.....	18
2.1.9 Γήρανση.....	19
2.1.11 Φωτοβολταϊκή συστοιχία.....	20
2.2 Τρόποι και τεχνικές αύξησης απόδοσης.....	21
2.2.1 P_{rec} – Παθητικά κελιά.....	22
2.2.2 Πολλαπλό πλαίσιο ηλεκτρικών επαφών – MBB.....	22
2.2.3 Τεχνολογία κοπής Φ/Β κυψελών κατά το ήμισυ	22
2.2.4 Πλαίσια υψηλής πυκνότητας.....	25
2.2.6 Τεχνολογία επικάλυψης κελίων Tilingribbon.....	26
2.2.7 Φ/Β κελιά τεχνολογίας IBC.....	27
2.2.8 Ηλιακά κελιά τύπου – N.....	29
2.2.9 Ηλιακές κυψέλες TopCon.....	29

Κεφάλαιο 3

Πειραματική διαδικασία.....	32
3.1 Τρόπος λειτουργίας οργάνου μέτρησης.....	32
3.2 Όργανα μέτρησης	33
3.3 Ηλιακά πλαίσια που χρησιμοποιήθηκαν.....	35
3.4 Διαδικασία μετρήσεων.....	39

Κεφάλαιο 4

Αποτελέσματα.....	43
-------------------	----

Κεφάλαιο 5

Σχόλια – συμπεράσματα.....	51
Βιβλιογραφική αναφορά.....	52
Παράρτημα.....	53

Διπλωματική εργασία

Πειραματική διερεύνηση της τεχνολογικής εξέλιξης των φωτοβολταϊκών συστημάτων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη εργασία αναφέρεται στην τεχνολογική εξέλιξη των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Στην αρχή γίνεται αναφορά στον τρόπο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος, στα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του καθώς και στον τρόπο με τον οποίο κατασκευάζεται μια τέτοια συσκευή. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου και γίνεται εκτεταμένη αναφορά στις νέες τεχνολογίες που υπάρχουν, με τη χρήση των οποίων αυξάνεται εργοστασιακά ο βαθμός απόδοσης μιας εγκατάστασης. Τέλος, μέσω πειραματικής μελέτης η οποία έγινε σε διαφορετικής χρονολογίας και τεχνολογίας φωτοβολταϊκά πλαίσια εξάγονται συμπεράσματα για την αποδοτικότερη τεχνολογία στην πάροδο των χρόνων.

Λέξεις κλειδιά: Φωτοβολταϊκές κυψέλες, τεχνολογίες φωτοβολταϊκών συστημάτων, απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων

Diploma Thesis

Experimental investigation of the photovoltaic panels' technological development

ABSTRACT

This work refers to the technological development of photovoltaic panels. In the beginning, a reference is made to the way a photovoltaic system works, to the materials used in its construction, as well as in which such a device is manufactured. Then, the factors that affect the performance of a photovoltaic panel are presented and then extensive reference is made to the new technologies that exist, in order to increase the efficiency of an installation. Finally, through an experimental study that was done in different chronology and technology photovoltaic panel we draw conclusions about which technology is most efficient over the years.

Keywords: Photovoltaic cells, photovoltaic systems technologies, photovoltaic systems efficiency.

Κεφάλαιο 1

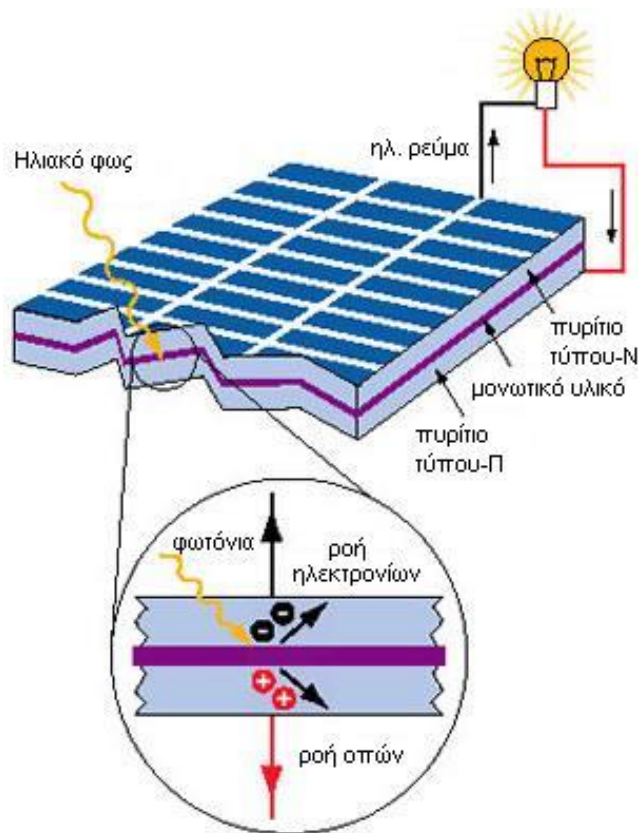
Φωτοβολταϊκά συστήματα

1.1 Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκών συστημάτων

Η αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων είναι η ικανότητα που έχουν οι ημιαγωγοί, από τους οποίους είναι κατασκευασμένα, να μετατρέπουν το ηλιακό φως (ηλιακή ακτινοβολία) σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι ημιαγωγοί είναι διάφορα υλικά τα οποία έχουν μικρό αριθμό ελεύθερων ηλεκτρονίων και σχετικά μικρό ενεργειακό χάσμα. Αντίθετα, οι αγωγοί έχουν μεγάλο πλήθος ελεύθερων ηλεκτρονίων και μηδενικό ενεργειακό χάσμα, ενώ οι μονωτές έχουν πολύ λίγα ελεύθερα ηλεκτρόνια και μεγάλο ενεργειακό χάσμα.

Το κύριο χαρακτηριστικό ενός γνήσιου ημιαγωγού είναι ότι έχει την ζώνη σθένους του πλήρης από ηλεκτρόνια ενώ έχει την ζώνη αγωγιμότητας κενή. Έτσι, δεν υπάρχει μετακίνηση ηλεκτρονίων μεταξύ των δύο ζωνών και το υλικό αυτό συμπεριφέρεται ως μονωτής. Για να αλλάξει αυτή η κατάσταση, δηλαδή να έχουμε κίνηση ηλεκτρονίων, πρέπει φορείς ηλεκτρισμού (ηλεκτρόνια) να ενταχθούν στην ζώνη αγωγιμότητας ή να απομακρυνθούν από την ζώνη σθένους. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται διάφορες προσμίξεις ημιαγωγών με άλλα στοιχεία. Για παράδειγμα αν γίνει πρόσμιξη με άτομα τα οποία έχουν 5 ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα, τα 4 από αυτά σχηματίζουν δεσμούς στο κρυσταλλικό πλέγμα του ημιαγωγού και το πέμπτο μεταπηδά στην ζώνη αγωγιμότητας. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια αρνητικά φορτισμένη πρόσμιξη (negative / n-type) επειδή στη ζώνη αγωγιμότητας υπάρχει περίσσια ηλεκτρονίων τα οποία είναι αρνητικά φορτισμένα. Αντίθετα, αν γίνει πρόσμιξη με άτομα τα οποία έχουν 3 ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα τότε δημιουργείται έλλειμα ηλεκτρονίων στην ζώνη σθένους και σχηματίζονται φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος, οι λεγόμενες οπές. Αυτού του είδους οι προσμίξεις ονομάζονται θετικές (positive / p-type).

Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών κυψελών (κελιών) βασίζεται στο σχηματισμό επαφών ανάμεσα στους ημιαγωγούς. Ένας συνηθισμένος τύπος επαφής είναι η p-n. Δηλαδή όταν ένας ημιαγωγός τύπου p έρχεται σε επαφή με έναν αγωγό τύπου n. Οι επαφές αυτές δημιουργούν ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο, επειδή ηλεκτρόνια από τον αγωγό n διαχέονται προς τον αγωγό p. Αυτή η κίνηση λειτουργεί ως φράγμα δυναμικού αποτρέποντας την ροή ηλεκτρικού φορτίου. Όμως για να έχουμε παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος την οποία μπορούμε να εκμεταλλευτούμε, πρέπει η σύνδεση μεταξύ των δύο αγωγών να γίνεται με εξωτερικό τρόπο ώστε να υπάρχει η δυνατότητα κίνησης και μεταφορά ηλεκτρονίων μεταξύ των δύο ζωνών (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1: Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο .

Πηγή: <http://www.ostrisolar.gr/index.php/2011-03-04-23-37-35>

Οι τύποι των φωτοβολταϊκών που χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές είναι:

- **(A) Μονοκρυσταλλικού πυριτίου (mono-Si):** Ο τύπος αυτός σήμερα επιτυγχάνει βαθμό απόδοσης 20%-21%, αλλά η διαδικασία παραγωγής είναι ακριβότερη και δυσκολότερη καθώς το πυρίτιο κρυσταλλώνεται στο ίδιο πλέγμα. Κατά τη διαδικασία παραγωγής αυτού του τύπου φωτοβολταϊκών, παράγεται σημαντική ποσότητα αποβλήτων. Έχουν ομοιόμορφο μπλε σκούρο/μαύρο χρώμα και σχήμα τετραγωνικής κυψέλης (Σχήμα 1.2 A).
- **(B) Πολυκρυσταλλικού πυριτίου (poly-Si):** Πρόκειται για τα συνηθέστερα φωτοβολταϊκά στην αγορά αλλά έχουν μικρότερο βαθμό απόδοσης από τα μονοκρυσταλλικά φθάνοντας έως 18%. Η διαδικασία παραγωγής είναι απλή κατά την οποία δεν παράγονται τόσο πολλά απόβλητα. Έχουν μπλε χρώμα το οποίο δεν είναι ομοιόμορφο σε όλη την επιφάνεια ενώ το σχήμα τους είναι τετραγωνικό (Σχήμα 1.2 B).

- **(Γ) Λεπτού υμενίου:** Η τεχνολογία αυτή έχει ως χαρακτηριστικό το χαμηλό βαθμό απόδοσης αλλά και το χαμηλό κόστος παραγωγής. Οι ημιαγωγοί που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι άμορφου – πυριτίου (a – Si), καδμίου – τελουρίου (CdTe) και χαλκού – ινδίου – γαλλίου (CIS) με βαθμό απόδοσης έως 9% το οποίο εργαστηριακά έχει φτάσει και στο 16%, Το χρώμα τους ανάλογα με τον τύπο είναι μαύρο, μπλε ή σκούρο μωβ, ενώ έχουν τετράγωνο σχήμα (Σχήμα 1.2 Γ).

Οι συνηθισμένοι ημιαγωγοί που χρησιμοποιούνται κυρίως στις κατασκευές των φωτοβολταϊκών πάνελ είναι το άμορφο πυρίτιο, το κρυσταλλικό πυρίτιο, το τελουριούχο κάδμιο (CdTe), το αρσενικούχο γάλλιο (GsAs), το φωσφίδιο του ινδίου (InP) και ο δισηληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe₂). [1]



Σχήμα 1.2: Τύποι φωτοβολταϊκών κυψελών

Πηγή: Πολυζάκης, Α., 2017. Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος.

1.2 Τρόποι κατασκευής φωτοβολταϊκών κυψελών

Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες αναπτύχθηκαν τεχνολογικά, με πολύ γοργούς ρυθμούς αυξάνοντας την απόδοσή τους και μειώνοντας το κόστος κατασκευής τους με αποτέλεσμα να έχουν μεγάλη αύξηση στο μέλλον. Όμως παρά την μεγάλη τεχνολογική εξέλιξη η βασική κατασκευή δεν έχει αλλάξει πολύ με την πάροδο των χρόνων. Μεγάλο μέρος από τις φωτοβολταϊκές κυψέλες που χρησιμοποιούνται σε κατασκευές, αποτελούνται από σειρές κρυσταλλικών κελιών πολυμερούς πυριτίου που είναι ανάμεσα σε μια γυάλινη επιφάνεια στο μπροστινό μέρος και ενός πολυμερούς φύλλου πλαστικού στο πίσω και στηρίζονται σε πλαίσιο αλουμινίου. Όταν τα πλαίσια εγκατασταθούν και έρθουν αντιμέτωπα με ακραίες καιρικές συνθήκες ασκείται τεράστια πίεση η οποία μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή τους. Επομένως τα πλαίσια αυτά είναι σκόπιμο να κατασκευάζονται από πολύ ποιοτικά υλικά ώστε να αντέχουν για περίπου 25 χρόνια η οποία είναι μια μέση διάρκεια ζωής. Παρακάτω θα αναλύσουμε τον τρόπο με τον οποίο κατασκευάζεται ένα τέτοιο ηλιακό σύστημα.

Τα φωτοβολταϊκά κελιά κατασκευάζονται με τη χρήση λεπτών πλακιδίων (wafers) κρυσταλλικού πυριτίου τα οποία είναι παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται στους επεξεργαστές ηλεκτρονικών συσκευών. Τα πλακίδια αυτά μπορεί να είναι είτε μονοκρυσταλλικά είτε πολυκρυσταλλικά και κατασκευάζονται με διαφορετικές μεθόδους. Η μέθοδος Czochralski είναι μια από αυτές με την οποία κατασκευάζονται τα αποδοτικότερα μονοκρυσταλλικά κελιά. Όμως αυτή η διαδικασία είναι ποιο ενεργοβόρα σε σύγκριση με την πολυκρυσταλλική τεχνολογία και επομένως ποιο ακριβή. Για να μειωθεί το κόστος κατασκευής των μονοκρυσταλλικών κυψελών, οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν μια χαμηλού κόστους διαδικασία χύτευσης η οποία είναι ίδια με αυτήν που παράγονται οι πολυκρυσταλλικές κυψέλες. Έτσι, οι μονοκρυσταλλικές κυψέλες κερδίζουν δημοτικότητα. Παρόλα αυτά, τα χυτά μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κελιά δεν είναι τόσο αποτελεσματικά και αποδοτικά όσο είναι αυτά τα οποία κατασκευάστηκαν με την μέθοδο Czochralski.

Συμπερασματικά αναφέρουμε ότι

- Οι κυψέλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου έχουν χαμηλότερη απόδοση και χαμηλότερο κόστος (Σχήμα 1.3 Α).
- Οι κυψέλες χυτού μονοκρυσταλλικού πυριτίου έχουν υψηλή απόδοση και χαμηλότερο κόστος (Σχήμα 1.3 Β).
- Οι μονοκρυσταλλικές κυψέλες πυριτίου έχουν υψηλότερη απόδοση και υψηλότερο κόστος (Σχήμα 1.3 Γ).



(Α) Πολυκρυσταλλικό πλαίσιο (Β) Χυτό μονοκρυσταλλικό πλαίσιο (Γ) Μονοκρυσταλλικό πλαίσιο

Σχήμα 1.3: Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών πλαισίων

Πηγή εικόνας: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>

Κατασκευή φωτοβολταϊκών κυψελών πυριτίου:

Το κύριο συστατικό που χρησιμοποιείται για να παραχθούν οι ηλιακές κυψέλες κρυσταλλικού πυριτίου είναι ο χαλαζίτης ο οποίος είναι μια μορφή πετρωμάτων χαλαζία από ψαμμίτη. Στην συνέχεια, αυτό το οποίο ονομάζεται και άμμος πυριτίου, εισέρχεται σε κλίβανο τόξου και κάτω από πολύ υψηλές θερμοκρασίες μετατρέπεται σε πυρίτιο μεταλλουργικής ποιότητας συνδυάζοντας άνθρακα και χαλαζίτη. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι 99% καθαρό πυρίτιο. Έπειτα, το πυρίτιο μετατρέπεται σε καθαρό πολυπυρίτιο (polysilicon) με την διαδικασία Siemens η οποία είναι μια χημική διαδικασία καθαρισμού, είτε χρησιμοποιώντας αναβαθμισμένο πυρίτιο μεταλλουργικής ποιότητας. Το πολυπυρίτιο εμπλουτίζεται με στοιχεία βορίου ή φωσφόρου και γίνεται πυρίτιο τύπου P ή πυρίτιο τύπου N. Μετά τον εμπλουτισμό το πυρίτιο λιώνει, χύνεται σε μεγάλα τεμάχια και κόβεται για να παραχθούν τα πολυκρυσταλλικά πλακίδια (wafers). Για την κατασκευή των μονοκρυσταλλικών πλακιδίων το ίδιο αυτό πυρίτιο μετατρέπεται σε καθαρό στερεό κρυσταλλικό πλίνθο. Για να γίνει αυτό, το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο τήκεται υπό υψηλή πίεση και θερμοκρασία ώστε να παραχθεί αργά ένας ενιαίος κρύσταλλος.

Τα βασικά υλικά και βήματα που χρησιμοποιούνται για να παραχθεί ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι: (Σχήμα 1.4)



Σχήμα 1.4: Υλικά φωτοβολταϊκών πλαισίων

Πηγή εικόνας: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>

1.3 Βασικά υλικά από τα οποία αποτελούνται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια

Φωτοβολταϊκά κελιά

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα ηλιακά φωτοβολταϊκά κελιά μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, συνεχούς ρεύματος. Οι δύο τύποι κυψελών που χρησιμοποιούνται είναι τα μονοκρυσταλλικά και τα πολυκρυσταλλικά. Από τον τύπο καθορίζεται και η απόδοση του ηλιακού πλαισίου.

Η Φ/Β κυψέλη αποτελείται από ένα πολύ λεπτό πλακίδιο πάχους 0,1 mm. Είναι κατασκευασμένη από θετικό πυρίτιο τύπου p είτε από αρνητικό τύπου n. Στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων υπάρχουν πολλές διαμορφώσεις διαθέσιμες οι οποίες προσφέρουν διαφορετικά επίπεδα απόδοσης και θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο. Τα πιο συνηθισμένα φωτοβολταϊκά πλαίσια, περιέχουν 60 κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά και παράγουν ηλεκτρική τάση της τάξης των 30-40Volt (V). Όμως υπάρχουν και μεγαλύτερα πλαίσια που χρησιμοποιούνται σε εμπορικά συστήματα τα οποία περιέχουν 72 ή περισσότερες κυψέλες και αποδίδουν υψηλότερη τάση.

Προστατευτικό γυαλί

Για την προστασία των φωτοβολταϊκών κελιών στην μπροστινή πλευρά, τοποθετείται γυάλινο φύλλο υψηλής αντοχής με πάχος 3-4 mm που έχει σχεδιαστεί να αντέχει σε ακραίες καιρικές συνθήκες. Το γυαλί αυτό έχει πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο για την μείωση των απωλειών.

Πλαίσιο αλουμινίου

Για να τοποθετηθούν τα ηλιακά κελιά στις κατάλληλες θέσεις και να δημιουργήσουν τα Φ/Β πλαίσια τοποθετείται περιμετρικά ένα μεταλλικό περίβλημα. Το μεταλλικό αυτό περίβλημα είναι κατασκευασμένο από αλουμίνιο έτσι ώστε να είναι ανθεκτικό και ελαφρύ, ικανό να αντέχει σε ακραίες πιέσεις.

Αντιανακλαστικό στρώμα

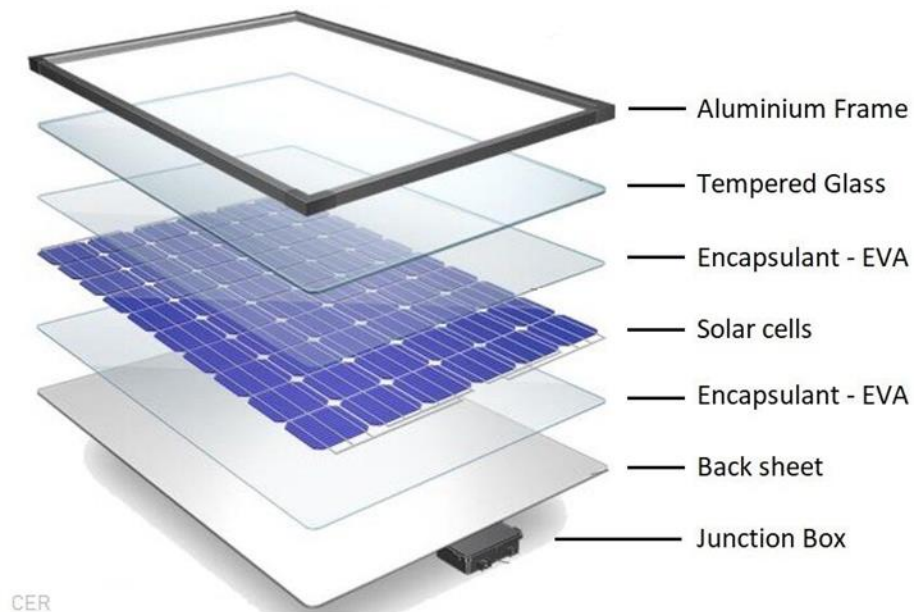
Για να αποφευχθεί η εισροή νερού και να γίνεται απορρόφηση των κραδασμών που μπορεί να υπάρχουν λόγω πετρών ή χαλαζόπτωσης, τοποθετείται ανάμεσα στα Φ/Β κελιά και στο γυαλί ένα εξαιρετικά διαφανές πολυμερές στρώμα. Αυτό το υλικό παίζει σημαντικό ρόλο στην μακροπρόθεσμη απόδοση του συστήματος αποτρέποντας την είσοδο βρωμιάς μέσα στις κυψέλες.

Προστατευτικό πίσω φύλλο

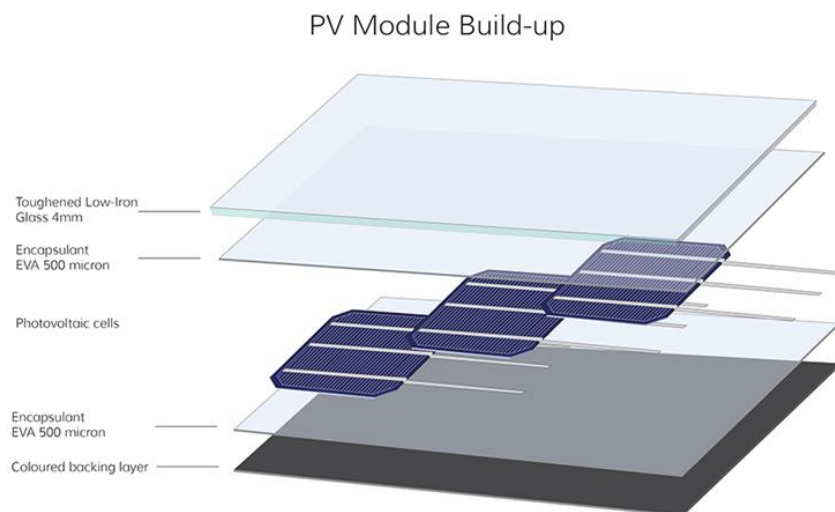
Στο πίσω μέρος των κοινών ηλιακών συλλεκτών τοποθετείται ένα στρώμα κατασκευασμένο από διάφορα υλικά (πολυμερή ή πλαστικά) που λειτουργεί ως φράγμα υγρασίας και τελικό εξωτερικό πλαίσιο για την παροχή μηχανικής προστασίας. Η στρώση αυτή είναι συνήθως λευκή. Επίσης αυτό το υλικό μπορεί να είναι

κατασκευασμένο και από γυαλί το οποίο είναι ποιο ανθεκτικό και παρέχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, άνω των 30 ετών.[2]

Παρακάτω παρατίθενται εικόνες από όλα τα απαραίτητα στοιχεία και ο τρόπος σύνδεσης τους για την κατασκευή ολοκληρωμένου και τεχνικά άριτου φωτοβολταϊκού πλαισίου (Σχήμα 1.5)



Πηγή εικόνας: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>



Σχήμα 1.5: Τυπικά διαγράμματα φωτοβολταϊκών πλαισίων

Πηγή εικόνας: <https://www.viridiansolar.co.uk/resources-4-3-PV-solar-modules.html>

Κεφάλαιο 2

Απόδοση φωτοβολταϊκών πάνελ

Απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ονομάζεται το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα. Λόγο της εξέλιξης της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων το ποσοστό απόδοσης έχει αυξηθεί από 15% σε πάνω από 20% - 21%. Το υπόλοιπο ποσοστό αυτής της ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα και αποβάλλεται στο περιβάλλον. Όμως υπάρχουν συστήματα και διαδικασίες που επιτρέπουν την αξιοποίηση αυτής της χαμένης ενέργειας, όπως για παράδειγμα την θέρμανση του νερού χρήσης στην κατοικία, αυξάνοντας έτσι τον βαθμό απόδοσης ενός ολοκληρωμένου συστήματος.

Η δομή και το υλικό του πυριτίου που χρησιμοποιείται, τύπος p ή τύπος n , καθορίζει και την αποδοτικότητα των κελίων. Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου υπολογίζεται με την μέγιστη ισχύς (W) μετρούμενη υπό κανονικές συνθήκες δοκιμής (STC) δηλαδή, θερμοκρασία κυψελών $25^{\circ}C$, ηλιακή ακτινοβολία $1000W/m^2$ και μάζα αέρα 1,5 διαιρούμενη δια της ενεργής συνολικής επιφάνειας του Φ/B πλαισίου. [3]

Απόδοση ηλιακού πλαισίου:

$$\eta = \frac{P_{max}}{A_c * G} * 100\% \text{ (Σχέση 1)}$$

Όπου: P_{max} : Μέγιστη ισχύς (W)

A_c : Ενεργή συνολική επιφάνεια φωτοβολταϊκού πλαισίου (m^2)

G : Ηλιακή ακτινοβολία ($\frac{W}{m^2}$)

2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των συστημάτων

2.1.1 Ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε ετήσια βάση και εξαρτάται από την γεωγραφική θέση εγκατάστασης του συστήματος. Πολύ σημαντικό ρόλο σε αυτό παίζει ο προσανατολισμός του κάθε πάνελ ως προς τον ήλιο. Για μεγαλύτερα λαμβανόμενα ποσά της ηλιακής ενέργειας, τα πλαίσια πρέπει να προσανατολίζονται κατάλληλα και να είναι τοποθετημένα στη βέλτιστη γωνία κλίσης με τον ήλιο. Ιδανικά πρέπει η γωνία πρόσπτωσης του ηλίου στο φωτοβολταϊκό να είναι 0 μοίρες. Η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και ως εκ τούτου, μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύ. [7]

2.1.2 Θερμοκρασία

Ο βαθμός απόδοσης και τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός κελιού, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την θερμοκρασία της επιφάνειας του πλαισίου. Η επίδραση της θερμοκρασίας είναι δύσκολο να μετρηθεί θεωρητικά διότι μεταβάλλονται και άλλες παράμετροι που έχουν σύνθετη συμπεριφορά. Για τον λόγο αυτόν οι κατασκευαστές, δίνουν μετά από μετρήσεις, συντελεστές θερμοκρασιακής μεταβολής των βασικών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών.

- Συντελεστής θερμοκρασιακής μεταβολής έντασης α_i
- Συντελεστής θερμοκρασιακής μεταβολής τάσης α_v
- Συντελεστής θερμοκρασιακής μεταβολής ισχύος α_p

Οι συντελεστές αυτοί επιδρούν στα τρία βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη ενός Φ/Β με βάση τις σχέσεις:

$$I'_{sc} = I_{sc}[1 + \alpha_i(T - T')] \quad (\text{Σχέση 2})$$

$$V'_{oc} = V_{oc}[1 + \alpha_v(T - T')] \quad (\text{Σχέση 3})$$

$$P'_{mp} = P_{mp}[1 + \alpha_p(T - T')] \quad (\text{Σχέση 4})$$

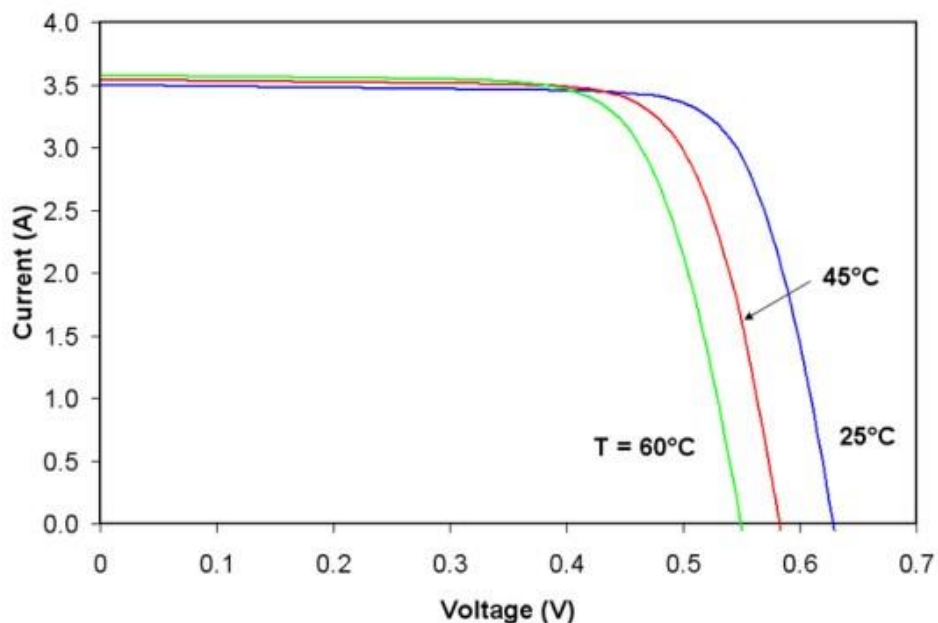
όπου T η θερμοκρασία του πλαισίου και T' η θερμοκρασία αναφοράς (25°C).

Με τις ίδιες σχέσεις επιδρά η θερμοκρασία σε οποιονδήποτε άλλο σημείο της καμπύλης για το αντίστοιχο μέγεθος, ενώ οι συντελεστές α_i , α_v και α_p μεταβάλλονται ελάχιστα. Οι συντελεστές δείχνουν την ποσοστιαία μεταβολή του μεγέθους για αύξηση της θερμοκρασίας κατά έναν βαθμό.

Έτσι, πρακτικά με την αύξηση της θερμοκρασίας κατά έναν βαθμό κελσίου, εάν οι υπόλοιπες συνθήκες παραμείνουν σταθερές, η παραγόμενη τάση στα άκρα ενός Φ/Β πλαισίου κρυσταλλικού πυριτίου μειώνεται περίπου κατά 0,3%, η ένταση του ρεύματος

αυξάνεται κατά 0,04%, ενώ η ισχύς μειώνεται κατά 0,45% και η απόδοση κατά 0,5% (του άμορφου πυριτίου μειώνεται κατά 0,15- 0,25%).

Συμπέρασμα: Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αντίστοιχη αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωσης των φορέων του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται περισσότερες επανασυνδέσεις φορέων. Έτσι, εκδηλώνεται ισχυρό ρεύμα διαρροής, που συνεπάγεται μείωση της V_{oc} . Παράλληλα μειώνεται και η απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου (Σχήμα 2.1).



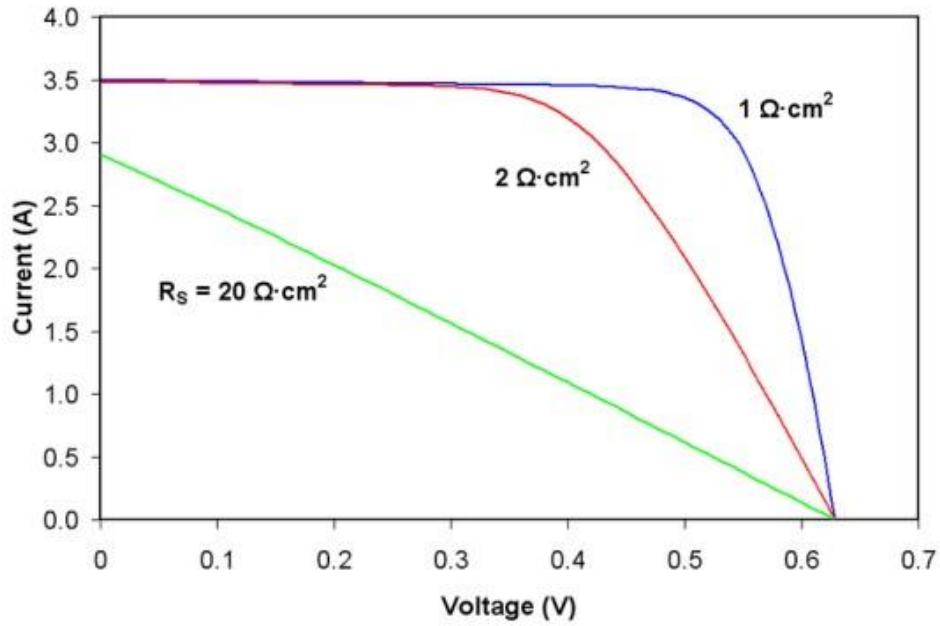
Σχήμα 2.1: Επίδραση της θερμοκρασίας σε ένα Φ/Β πλαίσιο.

Πηγή: Πολυζάκης, Α.,2017. Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος.

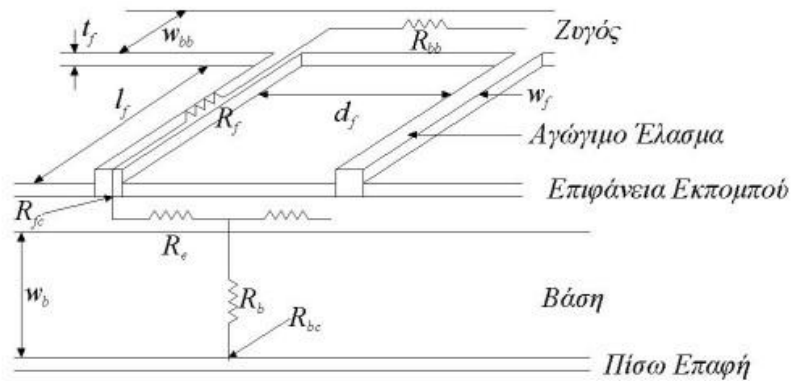
2.1.3 Αντίσταση σειράς R_s

Η αντίσταση R_s είναι σημαντικός παράγοντας που παίζει ρόλο στον βαθμό απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου, επειδή εμποδίζει τη διέλευση των φορέων (ηλεκτρόνια) μέσα στον ημιαγωγό. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ της ένωσης p-n τόσο μεγαλύτερη είναι και η αντίσταση αυτή, άρα και οι απώλειες ισχύος (Σχήμα 2.2A).

Η αύξηση της αντίστασης σειράς οδηγεί σε αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος στα άκρα της και η οποία αφαιρεί ισχύ από το φωτοβολταϊκό. Στο σχήμα 2.2B φαίνεται η δομή του φωτοβολταϊκού στοιχείου καθώς και οι αντιστάσεις από τις οποίες αποτελείται η αντίσταση σειράς.



Σχήμα 2.2Α: Χαρακτηριστική καμπύλη Φ/B εξαρτώμενη από την αντίσταση R_s

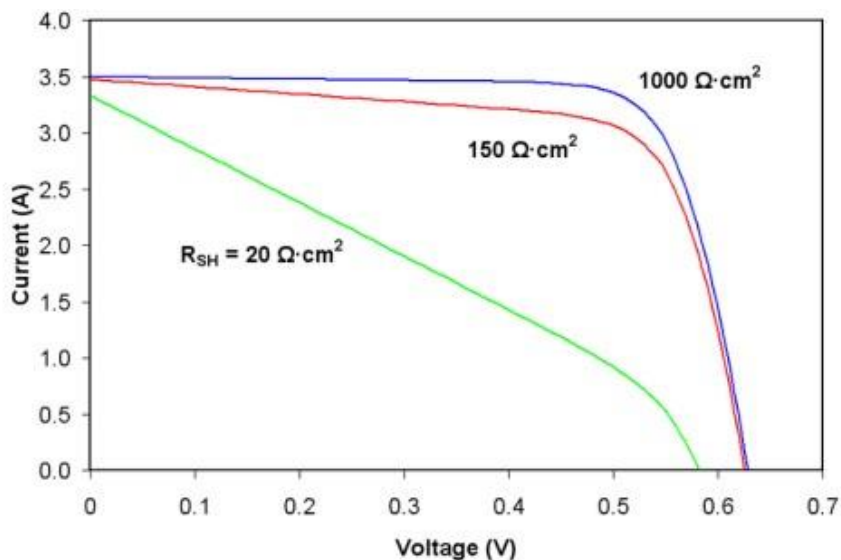


Σχήμα 2.2Β: Ισοδύναμο κύκλωμα Φ/B στοιχείου

Πηγή: Πολυζάκης, Α., 2017. Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος.

2.1.4 Παράλληλη αντίσταση R_{sh}

Όταν η παράλληλη αντίσταση μειώνεται, τότε η ένταση του ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση R_{sh} αυξάνεται για δεδομένη τιμή της τάσης V στα άκρα της, με αποτέλεσμα να μειώνεται η τιμή της έντασης του ρεύματος φορτίου I και συνεπώς η τάση V_{oc} . Για μικρές τιμές της R_{sh} θα υπάρξει σημαντική μείωση της τάσης V_{oc} (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3: Χαρακτηριστική καμπύλη Φ/Β εξαρτώμενη από αντίσταση R_{sh}

Πηγή: Πολυζάκης, Α., 2017. Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος.

2.1.5 Ηλεκτρικές απώλειες

Οι ηλεκτρικές απώλειες είναι οι απώλειες οι οποίες εντοπίζονται στους αγωγούς και στα καλώδια, που συνδέουν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα με τις μπαταρίες, τους μετατροπείς και τα υπόλοιπα μέρη του δικτύου.

2.1.6 Οπτικές απώλειες

Με τον όρο οπτικές απώλειες εννοούμε τη διαφοροποίηση της ανακλαστικότητας του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή σε Standard Test Condition (STC). Επίσης οπτικές απώλειες έχουμε και με την διαφοροποίηση του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας σε ετήσια βάση. Επιπλέον υπάρχουν απώλειες λόγω της διαφοροποίησης της πόλωσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ημέρας καθώς και λόγω χαμηλών τιμών της πυκνότητας ισχύος της.

2.1.7 Σκίαση

Το φαινόμενο της σκίασης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ή μιας εγκατάστασης είναι αρκετά σημαντικό για τη σωστή και εύρυθμη λειτουργία. Αρχικά, ο παρατεταμένος σκιασμός ενός κελιού σε συνδυασμό με τον έντονο φωτισμό των υπολοίπων, μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή αυτού και κατά συνέπεια στην αχρήστευση όλου του πλαισίου, επειδή δεν υπάρχει δυνατότητα αντικατάστασης ενός κατεστραμμένου κελιού. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ως κατάσταση θερμής κηλίδας (Hotspot). Γενικά, για τα τυπικά φωτοβολταϊκά πλαίσια, το σκιασμένο κελί λειτουργεί σαν αντίσταση όπου αποδίδεται η ενέργεια που έχει συλλεχθεί από τα άλλα.

Το φαινόμενο της σκίασης παρατηρείται είτε σε περιπτώσεις που συναντώνται εμπόδια στον ορίζοντα των πλαισίων όπως κτήρια, δέντρα κλπ., είτε σε περιπτώσεις με περιορισμένη έκταση εγκατάστασης όπως για παράδειγμα στις στέγες κτηρίων, όπου προκαλείται σκίαση από την μια μεριά στην άλλη. Επειδή οι επιπτώσεις της σκίασης μπορεί να είναι σημαντικές, ειδικά στην δεύτερη περίπτωση, καλό είναι πριν από την κατασκευή μια τέτοιας εγκατάστασης να γίνεται λεπτομερής μελέτη και υπολογισμός των απωλειών που προκαλεί μια τέτοια σκίαση, ώστε να γνωρίζει ο κάθε μηχανικός και μελετητής πως μπορεί να αντιμετωπίσει αυτό το φαινόμενο.

2.1.8 Αέρας

Ο αέρας είναι και αυτός ένας παράγοντας που συμβάλει στην απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του αέρα, τόσο μικρότερη είναι και η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού. Με αυτόν τον τρόπο, αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης.

2.1.9 Γήρανση

Με την πάροδο των χρόνων έχει αποδειχθεί ότι υπάρχει μια μικρή βαθμιαία πτώση στην ποσότητα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, που συνήθως υπολογίζεται από 1 έως 2 % κάθε χρόνο. Αυτό συμβαίνει λόγω της φθοράς των πλαισίων καθώς και των υπολοίπων μερών που απαρτίζουν το φωτοβολταϊκό σύστημα.

2.1.10 Ρύπανση

Τέλος, η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων μπορεί να μειωθεί και από την ρύπανση της επιφάνειάς τους, από την εναπόθεση σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από την θάλασσα, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών. Για τον λόγο αυτό υπάρχουν τεχνικές με τις οποίες μπορούμε να καθαρίσουμε την επιφάνεια τους χωρίς όμως να καταστρέψουμε το προστατευτικό γυαλί, χρησιμοποιώντας βούρτσες με μαλακές ίνες και αποιονισμένο νερό (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Καθαρισμός φωτοβολταϊκών πλαισίων

Πηγή: <https://www.pvtech.gr/solar/clean>

Πηγή: <https://www.diafania.net/fwtovoltaika/>

2.1.11 Φωτοβολταϊκή συστοιχία

Η φωτοβολταϊκή συστοιχία αποτελείται από πλαίσια κατάλληλα συνδεδεμένα μεταξύ τους (σε σειρά ή παράλληλα) έτσι ώστε στους ακροδέκτες να υπάρχουν οι κατάλληλες υποδοχές ώστε να μπορέσουν να συνδεθούν με άλλες συσκευές για την πραγματοποίηση κάποιας συγκεκριμένης εργασίας. Όμως, υπάρχουν συγκεκριμένοι περιορισμοί στον σχεδιασμό και την κατασκευή της συστοιχίας για να μην υπάρχουν απώλειες που θα μειώσουν τον βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης. Αυτοί οι περιορισμοί είναι οι παρακάτω:

- Η σύνδεση ανόμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων στην ίδια συστοιχία απαγορεύεται καθώς τα διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά δημιουργούν απώλειες. Ακόμη και φωτοβολταϊκά πλαίσια του ίδιου μοντέλου έχουν μικρές διαφορές στα τεχνικά χαρακτηριστικά τους. Γι' αυτό στην πράξη γίνεται ταίριασμα των χαρακτηριστικών με βάση τις μετρήσεις και τις πιστοποιήσεις του κατασκευαστή που συνοδεύει του εκάστοτε πλαίσιο.
- Τα πλαίσια της κάθε συστοιχίας πρέπει να έχουν κοινό προσανατολισμό. Ο διαφορετικός προσανατολισμός μπορεί να αλλάξει την ένταση της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στα πλαίσια με αποτέλεσμα να έχουμε αρκετές απώλειες.
- Η μερική σκίαση των πλαισίων θα πρέπει να αποφεύγεται διότι θα υπάρχει μειωμένη παραγωγή ενέργειας. Εάν υπάρχουν σκιασμένα φωτοβολταϊκά τότε το φωτοβολταϊκό αυτό λειτουργεί ως διακόπτης με αποτέλεσμα να χάνεται η παραγωγή, όχι μόνο από το πλαίσιο που είναι σκιασμένο αλλά και από όσα πλαίσια είναι συνδεδεμένα σε σειρά. Για τον λόγω αυτόν χρησιμοποιούνται δίοδοι παράκαμψης οι οποίες μειώνουν τις απώλειες. [4]

2.2 Τρόποι και τεχνικές αύξησης απόδοσης

Τον τελευταίο καιρό υπάρχει μια αύξηση στις νέες τεχνολογίες κατασκευής ηλιακών φωτοβολταϊκών κελιών που κυκλοφορούν στην αγορά που συμβάλουν στην ενίσχυση της απόδοσής τους. Ορισμένες από αυτές, όπως για παράδειγμα οι ηλιακές κυψέλες χωρίς κενά, έχουν υιοθετηθεί από αρκετούς κατασκευαστές, αλλά εξακολουθούν να υπάρχουν αρκετές ακόμα που μπορούν να βοηθήσουν σε αυτήν την ανάπτυξη.

Η μέση απόδοση των ηλιακών πλαισίων έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια, επειδή οι περισσότεροι από τους κατασκευαστές παγκοσμίως έχουν ενσωματώσει νέες τεχνολογίες κατασκευής. Αυτές εξαρτώνται τόσο από τον τύπο των φωτοβολταϊκών κελιών όσο και από την διαμόρφωση ολόκληρου του πλαισίου. Ο περισσότερος αποτελεσματικός τύπος κυψελών που χρησιμοποιούνται με βαθμό απόδοσης άνω του 22%, είναι τα μονοκρυσταλλικά κελιά πυριτίου τύπου IBC N. Καθώς οι κυψέλες αυτές είναι πολύ ακριβές στην κατασκευή τους, αντισταθμίζουν το υψηλότερο κόστος με την αυξημένη απόδοση.

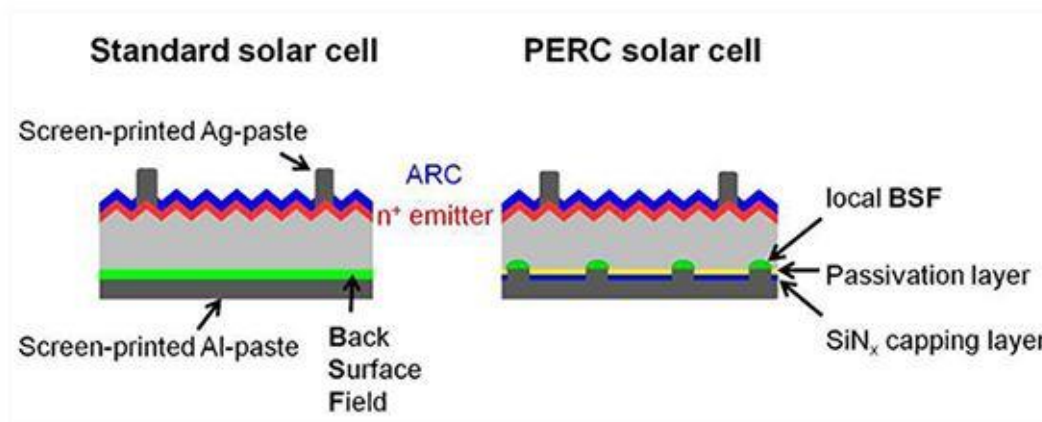
Βασικός παράγοντας που μειώνει την απόδοση είναι η αυξημένη θερμοκρασία. Όλα τα πλαίσια έχουν την ικανότητα να μειώνουν αργά την ισχύ εξόδου καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία των κελιών τους. Γενικά η θερμοκρασία αυτή είναι 20-35°C υψηλότερη από τη θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα που ισοδυναμεί με μείωση της ισχύος κατά 8-14%. Τα μονοκρυσταλλικά κελιά IBC που περιγράφονται λεπτομερέστερα παρακάτω, έχουν πολύ χαμηλότερο συντελεστή θερμοκρασίας -0,30% /°C σε σύγκριση με τα τυποποιημένα πολυκρυσταλλικά και μονοκρυσταλλικά κελιά. Στην συνέχεια θα αναλυθούν και άλλες τεχνικές που μας βοηθούν να αυξήσουμε την απόδοση του συστήματός μας.

Συνοπτικά αναφέρονται:

- ✓ PERC – Παθητικά κελιά
- ✓ Πολλαπλό πλαίσιο ηλεκτρικών επαφών – MBB
- ✓ Τεχνολογία κοπής φωτοβολταϊκών κυψελών κατά το ήμισυ
- ✓ Πλαίσια υψηλής πυκνότητας
- ✓ Τεχνολογία επικάλυψης κελιών TilingRibbon
- ✓ Φωτοβολταϊκά κελιά τεχνολογίας IBC
- ✓ Ηλιακά κελιά τύπου – N
- ✓ Ηλιακές κυψέλες TOPCon

✓ 2.2.1 PERC – Παθητικά κελιά

Η συγκεκριμένη τεχνολογία επιλέγεται από αρκετούς κατασκευαστές φωτοβολταϊκών συστημάτων τόσο για μονοκρυσταλλικά όσο και για πολυκρυσταλλικά. PERC σημαίνει «παθητικός πομπός σε συνδυασμό με κυψέλες στο πίσω μέρος». Πρόκειται για μια προηγμένη αρχιτεκτονική κελιών που χρησιμοποιεί πρόσθετα στρώματα στην πίσω πλευρά για να απορροφήσει περισσότερα φωτόνια και με τον τρόπο αυτό να αυξήσει την συνολική του απόδοση (Σχήμα 2.5).

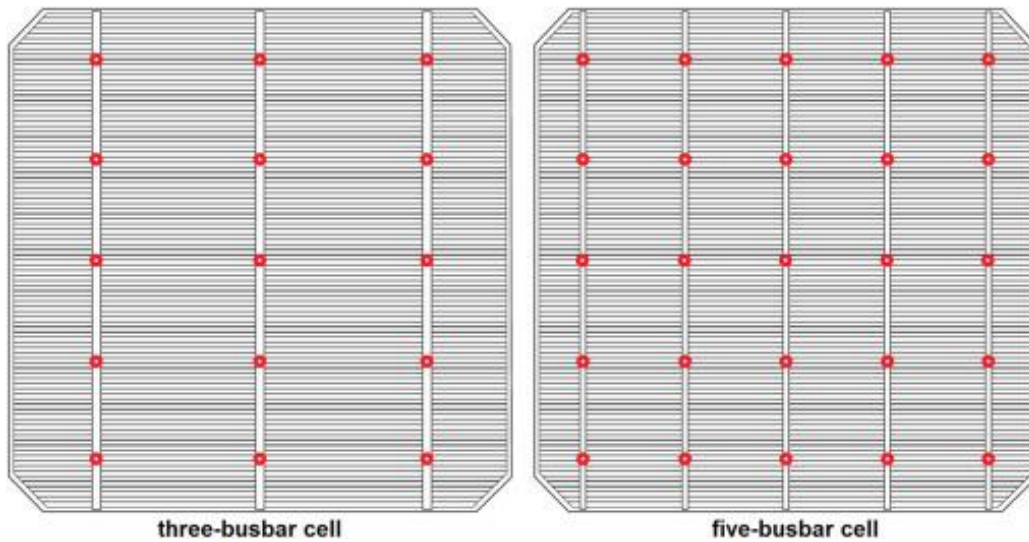


Σχήμα 2.5: Σχέδιο τεχνολογίας παθητικών κυψελών

Πηγή εικόνας: <https://gr.dsnsolar.com/solar-cells/p-type/166mm-monocrystalline-perc-solar-cell.html>

✓ 2.2.2 Πολλαπλό πλαίσιο ηλεκτρικών επαφών – MBV

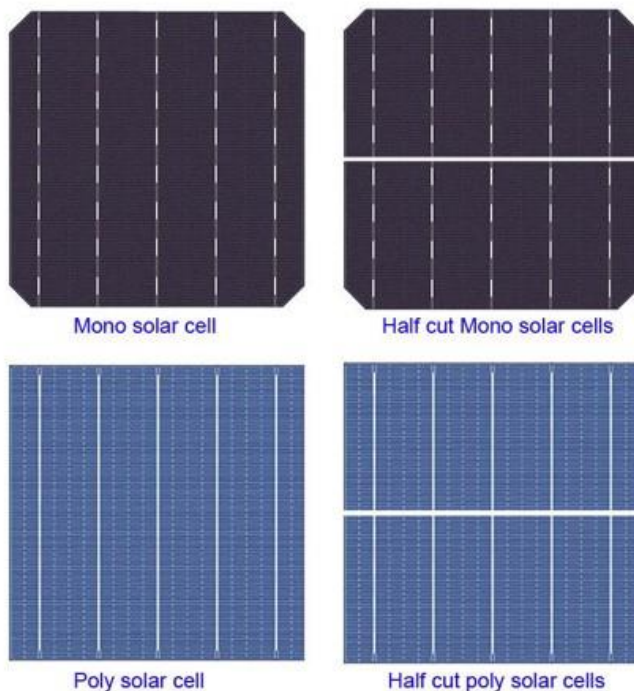
Το πλαίσιο ηλεκτρικών επαφών αποτελείται από λεπτά καλώδια το οποίο τοποθετείται κάτω από κάθε κυψέλη και είναι ορατό στα περισσότερα φωτοβολταϊκά. Η δουλειά του είναι πολύ απλή. Συλλέγει τα ηλεκτρόνια από την επιφάνεια του κελιού και συνδέει το μπροστινό μέρος του με την πίσω πλευρά του παρακείμενου, δημιουργώντας έτσι ένα ενιαίο κύκλωμα σε όλο το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Τα τελευταία χρόνια, λόγω της μεγάλης τεχνολογικής εξέλιξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων οι περισσότεροι κατασκευαστές χρησιμοποιούν σε τυποποιημένη μορφή, 6 ή 9 τέτοια καλώδια αντί για 4 ή 5 που χρησιμοποιούσαν στο παρελθόν. Αυτό δίνει πρόσθετο όφελος στην αύξηση της απόδοσης του πλαισίου, καθώς αν εμφανιστεί μια μικρή ρωγμή στην επιφάνεια ενός κελιού από κάποια πρόσκρουση αντικειμένου, δύσκολα θα αναπτυχθεί ένα καυτό σημείο σε εκείνη την περιοχή. Αυτό συμβαίνει επειδή το ρεύμα θα βρει περισσότερες διόδους και εναλλακτικές διαδρομές για να κινηθεί και έτσι δεν καταστρέφεται το ηλιακό σύστημα (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.6: Σχέδιο τεχνολογίας πολλαπλού πλαισίου ηλεκτρικών επαφών

Πηγή εικόνας: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927024815006042>

✓ 2.2.3 Τεχνολογία κοπής φωτοβολταϊκών κυψελών κατά το ήμισυ

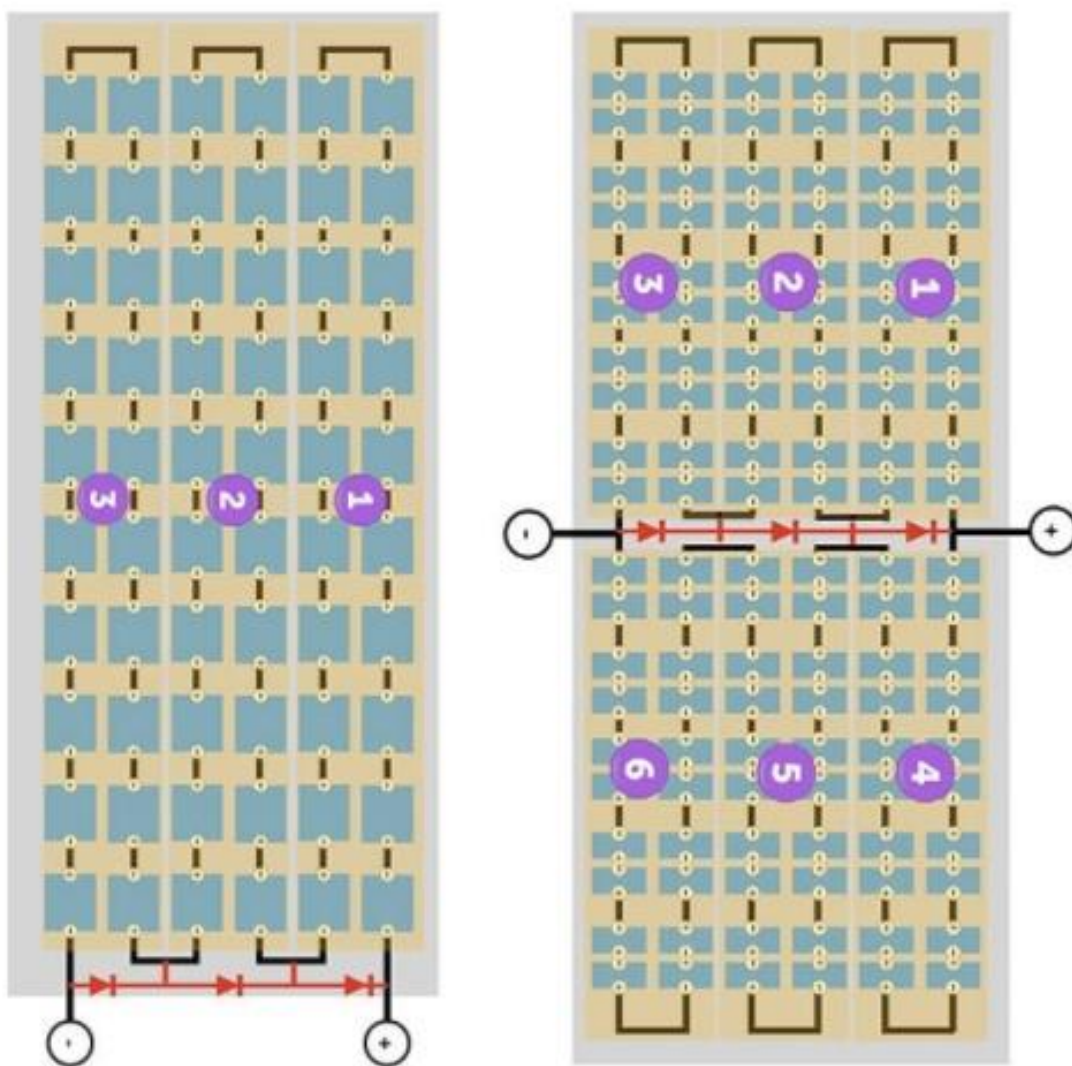


Πηγή εικόνας: <https://gr.dsnsolar.com/info/half-cut-technology-for-solar-panel-design-and-34892175.html>

Η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια στην κατασκευή των ηλιακών φωτοβολταϊκών πλαισίων. Στην συγκεκριμένη διαδικασία οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν τα ίδια ηλιακά κελιά που υπάρχουν και σε άλλες τεχνολογίες αλλά με μια σημαντική διαφορά. Τα τετράγωνα κελιά κόβονται με λέιζερ στη μέση και συναρμολογούνται σε δύο ομάδες (άνω και κάτω) που συνεργάζονται παράλληλα. Η διαδικασία αυτή έχει αρκετά οφέλη στην απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου. Αρχικά, τα πλαίσια αυτά λειτουργούν στην ίδια τάση αλλά το μισό ρεύμα με αποτέλεσμα να έχουμε

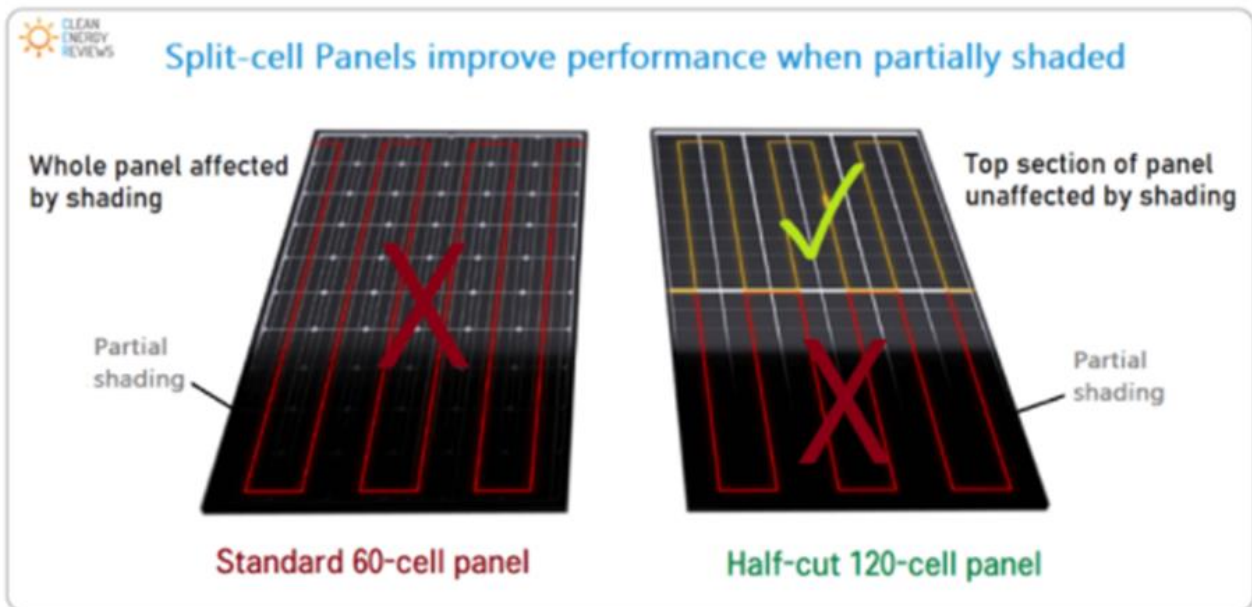
χαμηλότερη αντίσταση στο πλαίσιο ηλεκτρικών επαφών. Επίσης, με το μισό ρεύμα λειτουργίας, καταφέρνουμε να έχουμε χαμηλότερη θερμοκρασία με αποτέλεσμα

αυξημένη απόδοση (Σχήμα 2.7). Έτσι, αρκετοί κατασκευαστές έχουν αρχίσει να παράγουν εξαιρετικά μεγάλα τετραγωνικά κελιά 210mm τα οποία μπορούν να κοπούν σε τρία τμήματα, γνωστά ως κυψέλες κοπής 1/3. Αυτά χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πλαισίων υψηλής ισχύος έως 600W. Τέλος, με αυτή την τεχνολογία έχουμε αρκετά βελτιωμένη ανοχή στην σκιά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα δύο τμήματα ή ομάδες, συνδέονται παράλληλα και δρουν σαν δύο μικρά μεμονωμένα πλαίσια. Έτσι όταν είναι σκιασμένο ένα κομμάτι του δεν επηρεάζει το υπόλοιπο. Κατά τη διάρκεια της μερικής σκίασης, η τάση διατηρείται και η απώλεια ρεύματος μειώνεται κατά 50%, με αποτέλεσμα πολύ καλύτερη απόδοση του συστήματος όταν σκιάζεται μερικώς (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.7: Σχέδιο συνδεσμολογίας της συγκεκριμένης τεχνολογίας

Πηγή εικόνας: <https://gr.dsnsolar.com/info/half-cut-technology-for-solar-panel-design-and-34892175.html>



Σχήμα 2.8: Μερική σκίαση φωτοβολταϊκών πλαισίων

Πηγή εικόνας: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/2017/9/11/best-solar-panels-top-modules-review>

✓ 2.2.4 Πλαίσια υψηλής πυκνότητας

Ένας ακόμα τρόπος για να αυξήσουμε την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι να καταφέρουμε να μειώσουμε το κενό που υπάρχει ανάμεσα στα κελιά του πλαισίου. Αυτό το κενό είναι συνήθως 2 mm και οι περισσότεροι κατασκευαστές προσπαθούν να το μειώσουν σε περίπου 0,5 mm γιατί εξακολουθεί να χρειάζεται χώρος ώστε να συνδεθούν οι φωτοβολταϊκές κυψέλες μεταξύ τους. Για να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν λεπτότερα συρμάτινα καλώδια στο πλαίσιο των ηλεκτρικών επαφών ώστε να χρειάζονται λιγότερο χώρο για να λυγίσουν ανάμεσα στα κελιά. Με αυτόν τον τρόπο καταφέρνουμε να τοποθετήσουμε περισσότερα κελιά σε έναν τέτοιο Φ/Β από ότι θα τοποθετούσαμε αν είχαμε το κενό των 2 mm (Σχήμα 2.8).

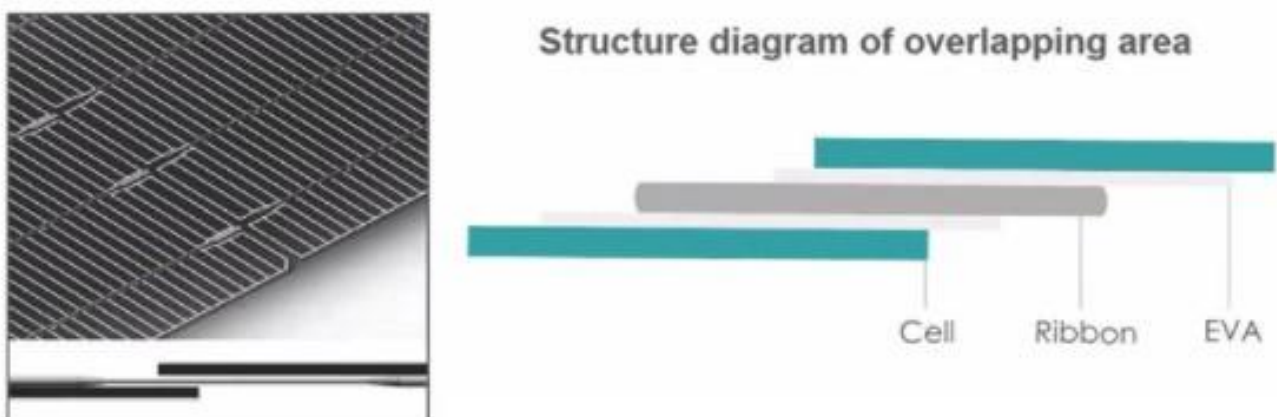


Σχήμα 2.8: Σχέδιο πλαισίου υψηλής πυκνότητας

Πηγή εικόνας: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/2017/9/11/best-solar-panels-top-modules-review>

✓ 2.2.5 Τεχνολογία επικάλυψης κελιών Tiling Ribbon

Αυτή η τεχνολογία είναι αναπτυσσόμενη από τον μεγαλύτερο κατασκευαστή ηλιακών πλαισίων στον κόσμο, την Jinko Solar. Με αυτόν τον τρόπο η εταιρία έχει καταφέρει να εξαλείψει το κενό μεταξύ των κυψελών, επικαλύπτοντας τις ελαφρά μεταξύ τους. Έτσι, δημιουργείται μεγαλύτερη επιφάνεια κυψέλης και ενισχύεται σημαντικά η απόδοση του. Επίσης, με την χρήση αυτής της τεχνολογίας μειώνεται κατά πολύ η ποσότητα υλικού συγκόλλησης επειδή η σύνδεση των κυψελών γίνεται με χρήση μεθόδων συμπίεσης (Σχήμα 2.9). [5]



Σχήμα 2.9: Σχέδιο τεχνολογίας επικάλυψης κελιών -Tiling Ribbon

Πηγή εικόνας: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-powerful-solar-panels>

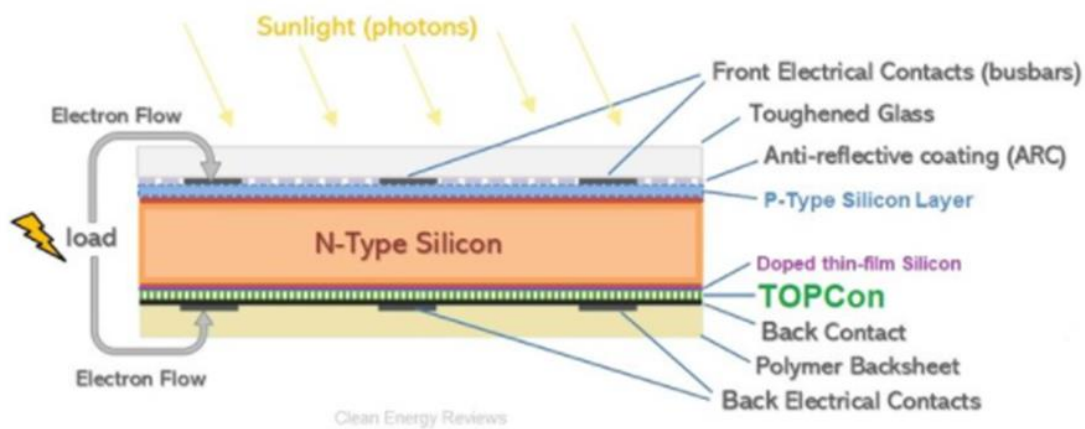
✓ 2.2.7 Φωτοβολταϊκά κελιά τεχνολογίας IBC

Αυτή η τεχνολογία δεν έχει μεγάλες κατασκευαστικές διαφορές από τις κλασικές μεθόδους. Η μόνη διαφορά τους είναι η τοποθέτηση των ηλεκτρικών πλεγμάτων επαφής στην πίσω πλευρά των κελιών αντί στην μπροστινή, που είναι τοποθετημένα συνήθως. Αυτός ο τρόπος κατασκευής αυξάνει την απόδοση όλου του πλαισίου επειδή μειώνεται η σκίαση της μπροστινής πλευράς. Για να κατασκευαστούν αυτά, χρησιμοποιούνται υψηλής ποιότητας υλικά για να καταφέρουν να απορροφήσουν τα ζεύγη ηλεκτρονίων οπών που δημιουργούνται από το φως στην μπροστινή πλευρά και να τα οδηγήσουν στην πίσω που είναι το μεταλλικό πλέγμα, ώστε να παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι οι κυψέλες αυτές μπορούν συνδεθούν ευκολότερα μεταξύ τους και να τοποθετηθούν πιο κοντά. Έτσι δεν υπάρχει ανάγκη για κανένα διάστημα μεταξύ των κυψελών και εγκαθίστανται περισσότερα κελιά στο πλαίσιο αυξάνοντας την απόδοση του (Σχήμα 2.10).[6]



Σχήμα 2.10: Σύγκριση μεταξύ ενός απλού Φ/Β κελιού και ενός κελιού κατασκευασμένο με την τεχνολογία IBC

Πηγέ: https://www.wsl-solar.com/Product_News/2019/1217/IBC-Solar-Cell.html



Σχήμα 2.11: Σχέδιο ηλιακών πλαισίων με την προσθήκη του υλικού TOPCon

Πηγή : <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/2017/9/11/best-solar-panels-top-modules-review>

Παρακάτω παρατίθενται φωτογραφίες από φωτοβολταϊκά πάρκα (Σχήμα 2.11):

Φωτοβολταϊκό πάρκο στα Τέμπη με πάνω από 28.125 φωτοβολταϊκά πλαίσια με ισχύ 320 W το καθένα.



Πηγή: <https://www.ethnos.gr/greece/article/50521/statemphenaapotamegalyterafotoboltaikaparathsxoras>

Φωτοβολταϊκό πάρκο στην μεγάλη Βρετανία με ισχύ 48 MW



Σχήμα 2.12: Εικόνες φωτοβολταϊκών πάρκων

Πηγή:https://www.real.gr/archive_planet/arthro/to_pio_oikologiko_fotovoltaiko_parko_ston_kosmo-167323/

Κεφάλαιο 3

Πειραματική διαδικασία

Για να έχουμε μια ολοκληρωμένη εικόνα για το πως μειώνεται η απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων με την πάροδο των χρόνων, ώστε να μπορούμε να εφαρμόσουμε τις παραπάνω κατάλληλες τεχνικές αύξησης του βαθμού, πραγματοποιήσαμε κάποιες μετρήσεις σε εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

3.1 Τρόπος λειτουργίας οργάνου μέτρησης solar IV:

Το όργανο solar IV λαμβάνει μια σειρά από μετρήσεις από ένα μεμονωμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο ή και από ολόκληρη συστοιχία, ώστε να μπορεί να υπολογίσει και να εμφανίσει στην οθόνη με την οποία είναι εξοπλισμένο, την χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος IV. Όλη αυτή η διαδικασία γίνεται αυτόματα και με αρκετά μεγάλη ταχύτητα λίγων δευτερολέπτων. Το εύρος της μέτρησης είναι μέχρι 1000 V και 10 A. Όλα αυτά τα δεδομένα αποθηκεύονται στην μνήμη που υπάρχει στο εσωτερικό του οργάνου ώστε ο χρήστης να έχει τη δυνατότητα επεξεργασίας των στοιχείων στο εργαστήριο του (Σχήμα 3.1 A)

Επίσης, το όργανο συνδέεται ασύρματα μέσω ραδιοσυχνοτήτων (RF) με το όργανο μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας HT304N, ώστε να μπορεί να λαμβάνει τα δεδομένα του ήλιου που χρειάζεται για τον υπολογισμό της καμπύλης ισχύος. Ακόμη, στο όργανο συνδέεται και ένας αισθητήρας θερμοκρασίας ο οποίος τοποθετείται πάνω στα φωτοβολταϊκά πλαίσια ώστε να δέχεται τη θερμοκρασία των πλαισίων και να υπολογίζει με ακρίβεια την καμπύλη (Σχήμα 3.1 B και Σχήμα 3.1 Δ).

Τέλος με την ολοκλήρωση όλων των απαραίτητων μετρήσεων, το solar IV έχει τη δυνατότητα σύνδεσης με την βοήθεια καλωδίου USB με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Μέσω προγράμματος, το οποίο παρέχεται με την αγορά του προϊόντος, γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων που πήραμε από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και η εξαγωγή των συμπερασμάτων μας για την σωστή λειτουργία του συστήματος. (Σχήμα 3.1 E).

3.2 Όργανα και συστήματα μέτρησης:

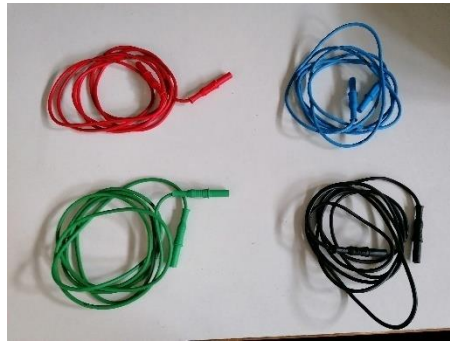
Όλα τα όργανα και τα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση των μετρήσεων προέρχονται από την Ιταλική εταιρία HT instruments η οποία εξειδικεύεται στα όργανα μέτρησης και υποστήριξης των φωτοβολταϊκών συστημάτων.



Σχήμα 3.1 A: Βασικό όργανο μέτρησης Solar I-V.



Σχήμα 3.1 B: Όργανο μέτρησης ηλιακής ακτινοβολίας HT304N



Σχήμα 3.1 Γ: Καλώδια και ακροδέκτες σύνδεσης οργάνων μέτρησης με τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.



Σχήμα 3.1 Δ: Αισθητήριο θερμοκρασίας



Σχήμα 3.1 Ε: Καλώδιο σύνδεσης οργάνου με τον υπολογιστή

3.3 Ηλιακά πλαίσια που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα:

Τα ηλιακά πλαίσια που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία βρίσκονται εγκατεστημένα στην ταράτσα του Εργαστηρίου Ήπιων Μορφών Ενέργειας και Προστασίας Περιβάλλοντος, της Σχολής Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής όπως περιγράφονται στην συνέχεια.

- Μία συστοιχία από δύο πλαίσια της Εταιρίας aleo – solar κατασκευής στην Γερμανία, με κωδικό μοντέλου S_18 και με μέγιστη ισχύ (P_{MPP}) το καθένα 235 W. Ο βαθμός απόδοσης που αποδίδει το καθένα, σύμφωνα με τον κατασκευαστή είναι περίπου 12,8%.
Έτος κατασκευής: 2010

Τα συγκεκριμένα πλαίσια είναι πολυκρυσταλλικού πυριτίου με 60 ηλιακές κυψέλες με μέγεθος 156 x 156 mm². Το μπροστινό κάλυμμα είναι κατασκευασμένο από γυαλί (TSG) και το πλαίσιο είναι από κράμα αλουμινίου. (Σχήμα 3.2 και Σχήμα 3.3)



Σχήμα 3.2: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο AleoSolarS_18



aleo s_18

Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (STC)		S18.235	S18.240	Διεύθυνση
Όνομαστική ισχύς	P_{MPP} [W]	235	240	aleo solar AG Gewerbegebiet Nord Krummer Weg 1 17291 Prenzlau Γερμανία
Όνομαστική τάση	U_{MPP} [V]	29,3	29,5	
Όνομαστικό ρεύμα	I_{MPP} [A]	8,01	8,13	
Τάση άνευ φορτίου	U_{OC} [V]	36,8	37,0	
Ρεύμα βραχυκύκλωσης	I_{SC} [A]	8,54	8,65	
Απόδοση	η	14,3	14,6	Διεύθυνση επικωνομίας
Επιφάνεια ανά μονάδα ισχύος	A_p [m^2/kW_p]	6,99	6,85	

Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά σε τυπικές συνθήκες δοκιμών (STC): 1000 W/m ² ; 25° C; AM 1,5		S18.235	S18.240	Βαθμός αποδοτικότητας με βάση τη συνολική επιφάνεια των πλαισίων
Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (NOCT)				
Ισχύς	P_{MPP} [W]	169	173	Βαθμός αποδοτικότητας με βάση τη συνολική επιφάνεια των πλαισίων
Τάση	U_{MPP} [V]	27,9	28,3	
Ρεύμα	I_{MPP} [A]	6,05	6,11	
Τάση άνευ φορτίου	U_{OC} [V]	33,8	34,0	
Ρεύμα βραχυκύκλωσης	I_{SC} [A]	6,67	6,72	
Απόδοση	η [%]	12,8	13,1	
Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας κυμελών: 800 W/m ² ; 20° C; AM 1,5; άνεμος 1 m/s NOCT: 48° C (ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας κυμελών)				

Άλλα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά			
Μείωση της απόδοσης STC Από 1000 W/m ² σε 200 W/m ²	[%]	< 6	
Εύρος κατηγορίας (θετική ταξινόμηση)	[W]	-0/+4,99	
Ακρίβεια μέτρησης P_{MPP} σε STC	[%]	-3/+3	
Ανοχή λοιπών ηλεκτρικών τιμών	[%]	-10/+10	

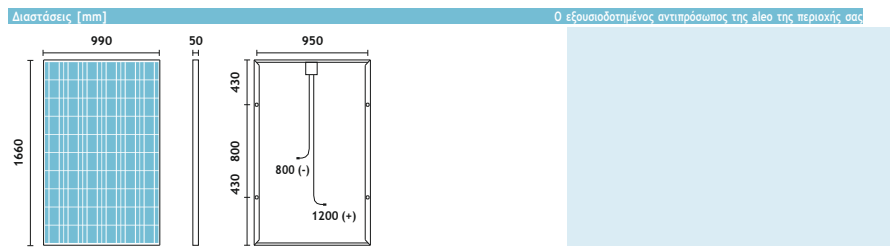
Φορτία			
Μηχανική καταπόνηση πλαισίων	[Pa]	5400	
Μέγιστη τάση αισθητήματος	[V _{oc}]	1000	
Ρεύμα επιστροφής	I_b [A]	15	
Μηχανική καταπόνηση κατά IEC/EN 61215			

Συντελεστές θερμοκρασίας			
1. Συντελεστής θερμοκρασίας	α (I_{sc})	[%/K]	+0,04
2. Συντελεστής θερμοκρασίας	β (U_{oc})	[%/K]	-0,34
3. Συντελεστής θερμοκρασίας	η (P_{MPP})	[%/K]	-0,46

Βασικά στοιχεία			
Μήκος x πλάτος x ύψος	[mm ³]	1660 x 990 x 50	
Βάρος	[kg]	21	
Αριθμός κυμελών		60	
Μέγεθος κυμελών	[mm ²]	156 x 156	
Υλικό κυμελών		Πολυκρυσταλλικό Si	
Μπροστινό κάλυμμα		Ηλιακό γυαλί (TSG)	
Πίσω κάλυμμα		Πολυμερής μεμβράνη	
Υλικό πλαισίου		Κράμα αλουμινίου	
Μήκος καλωδίου	[mm]	1200 (+), 800 (-)	
Φως		Κατηγορία MC3	
Κατηγορία IP		IP65	
Δίοδοι by-pass		3	

Για επιπλέον πληροφορίες σχετικά με τις εγγυήσεις στα προϊόντα και τις υπηρεσίες μας, μπορείτε να επικοινωνήσετε μαζί μας οποιαδήποτε στιγμή ή να ανατρέξετε στην ιστοσελίδα μας στη διεύθυνση www.aleo-solar.gr

© aleo solar AG | 08/2010 | Με κάθε επιφύλαξη για τυχόν λάθη και ενημερώσεις



Σχήμα 3.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου
 Πηγή: https://www.pvtech.gr/files2/aleo/S18%20235_2%20GR%20GR.pdf

- Ένα Φ/Β πλαίσιο από της Εταιρίας First Solar, κατασκευασμένο στη Μαλαισία με κωδικό μοντέλου FS_377 μέγιστης ισχύος (P_{MPP}) 77,5 W. Ο βαθμός απόδοσης που αποδίδει το συγκεκριμένο, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, είναι περίπου 16%.

Έτος κατασκευής: 2011

Το συγκεκριμένο πλαίσιο είναι λεπτού υμενίου, κατασκευασμένο από τελουριούχο κάδμιο (CdTe) με 154 ενεργά ηλιακά κελιά (Σχήμα 3.4 και Σχήμα 3.5).



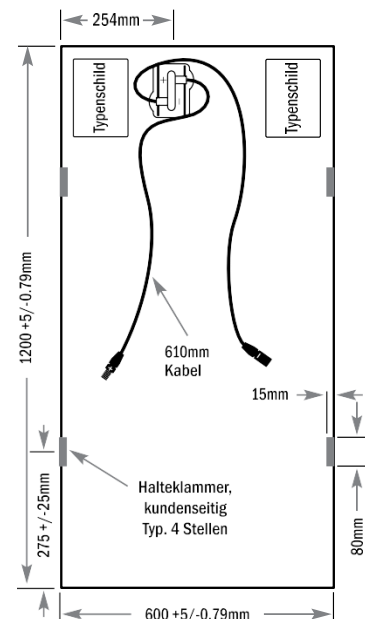
Σχήμα 3.4: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο FirstSolarFS_377

Elektrische Spezifikationen

TYPEN UND NENNDATEN BEI STANDARDTESTBEDINGUNGEN ^{1*}						
Nennwerte		FS-377	FS-380	FS-382	FS-385	FS-387
Nennleistung (+/-5%)	$P_{MPP}(W)$	77,5	80,0	82,5	85,0	87,5
Spannung bei P_{MAX}	$V_{MPP}(V)$	48,3	48,5	48,3	48,5	49,2
Elektrischer Strom bei P_{MAX}	$I_{MPP}(A)$	1,61	1,65	1,71	1,76	1,78
Leerlaufspannung	$V_{OC}(V)$	60,7	60,8	60,8	61,0	61,7
Kurzschlussstrom	$I_{SC}(A)$	1,84	1,88	1,94	1,98	1,98
Maximale Systemspannung	$V_{SYS}(V)$			1000		
Temperaturkoeffizient von P_{MPP}	$T_K(P_{MPP})$			-0,25%/°C		
Temperaturkoeffizient von V_{OC} , für hohe Temp. (>25°C)	$T_K(V_{OC}, \text{hohe Temp})$			-0,27%/°C		
Temperaturkoeffizient von V_{OC} , niedrige Temp. (-40°C bis +25°C)	$T_K(V_{OC}, \text{niedrige Temp})$			-0,20%/°C		
Temperaturkoeffizient von I_{SC}	$T_K(I_{SC})$			+0,04%/°C		
Rückstrombelastbarkeit	$I_R(A)$			3,5		
Strangsicherung max.	$I_{CF}(A)$			3,5		

TYPEN UND NENNDATEN BEI 800 W/m ² , NOCT ² 45°C, AM 1,5*						
Nennwerte		FS-377	FS-380	FS-382	FS-385	FS-387
Nennleistung (+/-5%)	$P_{MPP}(W)$	58,1	60,0	61,9	63,8	65,6
Spannung bei P_{MAX}	$V_{MPP}(V)$	45,3	45,5	45,3	45,5	46,2
Elektrischer Strom bei P_{MAX}	$I_{MPP}(A)$	1,29	1,32	1,37	1,41	1,42
Leerlaufspannung	$V_{OC}(V)$	56,5	56,5	56,5	56,7	57,4
Kurzschlussstrom	$I_{SC}(A)$	1,51	1,54	1,59	1,62	1,62

Technische Zeichnung



* Alle Werte +/-10%, falls nicht anders ausgewiesen. Änderungen vorbehalten.

¹ Standardtestbedingungen: 1000 W/m², AM 1,5, 25°C

² Zelltemperatur im Nominalbetrieb : Modultemperatur bei 800 W/m² Einstrahlung, 20°C Lufttemperatur, 1 m/s Windgeschwindigkeit

Zuverlässigkeit und Sicherheit

Von international führenden Instituten getestet und für Zuverlässigkeit und Sicherheit zertifiziert:

- Zertifiziert nach IEC 61646
- Zertifiziert nach IEC 61730
- CE-Kennzeichnung
- Schutzklasse II @1000V



Σχήμα 3.5: Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου

Πηγή: <https://www.secondsol.com/en/anzeige/27054/pv-module/duenschicht/first-solar/fs-377>

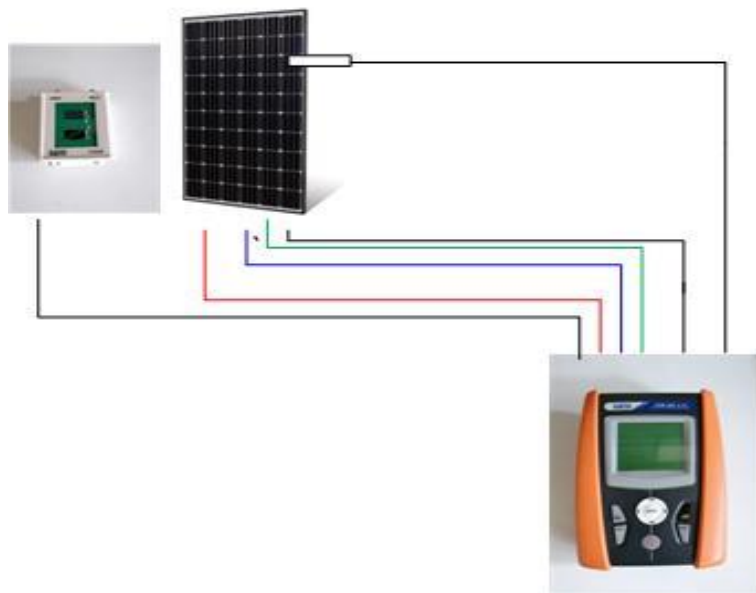
3.4 Διαδικασία μετρήσεων:

Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία με την οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις στα φωτοβολταϊκά πλαίσια:

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, της Σχολής Μηχανικών, που βρίσκεται στο Αιγάλεω Αττικής στις 22/11/2021 και ώρα έναρξης στις 11:25 και λήξης 12:22.

Αφού έχουμε επιλέξει τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που θα χρησιμοποιήσουμε στην εργασία, βεβαιωνόμαστε ότι είναι πλήρως λειτουργικά ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν το βέλτιστο αποτέλεσμα στις μετρήσεις μας. Στην συνέχεια τα καθαρίζουμε πολύ σχολαστικά με αποιονισμένο νερό και πολύ μαλακό πανί ώστε να μην υπάρχουν πάνω τους ίχνη από σκόνη, ακαθαρσίες και άλλα βλαβερά στοιχεία. Η διαδικασία του καθαρισμού είναι απαραίτητη για να έχουμε όσο το δυνατόν καλύτερο αποτέλεσμα στις μετρήσεις μας διότι όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η σκόνη είναι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος (Σχήμα 3.2 και Σχήμα 3.4) .

Έπειτα, συνδέουμε το όργανο μέτρησης, solarIV, σύμφωνα με το σχέδιο σύνδεσης του κατασκευαστή, χρησιμοποιώντας τα καλώδια και τους ακροδέκτες που περιεγράφηκαν παραπάνω και τοποθετούμε το όργανο μέτρησης της ακτινοβολίας του ήλιου δίπλα ακριβώς από τα πλαίσια που επιλέξαμε για τις μετρήσεις. Το συγκεκριμένο όργανο έχει δύο εξόδους σύνδεσης. Η μία είναι για μονοκρυσταλλικά πλαίσια και η άλλη για πολυκρυσταλλικά. Η σύνδεση πρέπει να γίνει προσεκτικά ανάλογα με την τεχνολογία κατασκευής του κάθε πλαισίου. Επίσης, τοποθετούμε τον αισθητήρα θερμοκρασίας πίσω από το μετρούμενο πλαίσιο (Σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6: Σχέδιο σύνδεσης οργάνου solarIV με τα φωτοβολταϊκά.

Μόλις συνδέσουμε τα όργανα μέτρησης στα πλαίσια και βεβαιωθούμε ότι η συνδεσμολογία μας είναι σωστή, ρυθμίζουμε τις πληροφορίες και τα δεδομένα του κατασκευαστή, από το κάθε ένα στο όργανο (ισχύς P_{MPP} , τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} , ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} και συντελεστές θερμοκρασίας α , β , γ) ώστε να είναι σε θέση να υπολογίσει την θεωρητική καμπύλη ισχύος. Μετά από όλες αυτές τις διαδικασίες και ρυθμίσεις είμαστε σε θέση να ξεκινήσουμε τις μετρήσεις μας.

Ξεκινάμε τις μετρήσεις μας πατώντας το αντίστοιχο πλήκτρο στο όργανο μέτρησης. Το πλήθος και η διαφορά ώρας μεταξύ των μετρήσεων είναι στην κρίση μας. Για να μπορούμε να βγάλουμε ασφαλή συμπεράσματα για την απόδοση του κάθε πλαισίου σκόπιμο είναι να προβούμε σε αρκετές μετρήσεις. Ως εκ τούτου στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, επιλέξαμε να πάρουμε 12 μετρήσεις, με διαφορά ώρας δύο - τριών λεπτών, ώστε να έχουμε αλλαγή στην ακτινοβολία και την θερμοκρασία. Το πρώτο που επιλέξαμε ήταν το FS_377 και στη συνέχεια το aleoS_18 (Σχήμα 3.8 και Σχήμα 3.7 αντίστοιχα).





Σχήμα 3.7: Εικόνα από το πείραμα στα πλαίσια AleoSolar



Σχήμα 3.8: Εικόνα από το πείραμα στο πλαίσιο FirstSolar

Κεφάλαιο 4

Αποτελέσματα

Μόλις ολοκληρώθηκε το πειραματικό μέρος και είχαμε στην διάθεση μας τις απαραίτητες μετρήσεις, προχωρήσαμε με την κατάλληλη επεξεργασία στον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης του κάθε πλαισίου. Με τη ολοκλήρωση της διαδικασίας είχαμε την δυνατότητα σύγκρισης των καμπυλών ισχύος I-V από τα δύο Φ/Β πλαίσια και εξετάσαμε αν υπάρχουν τυχών διαφορές.

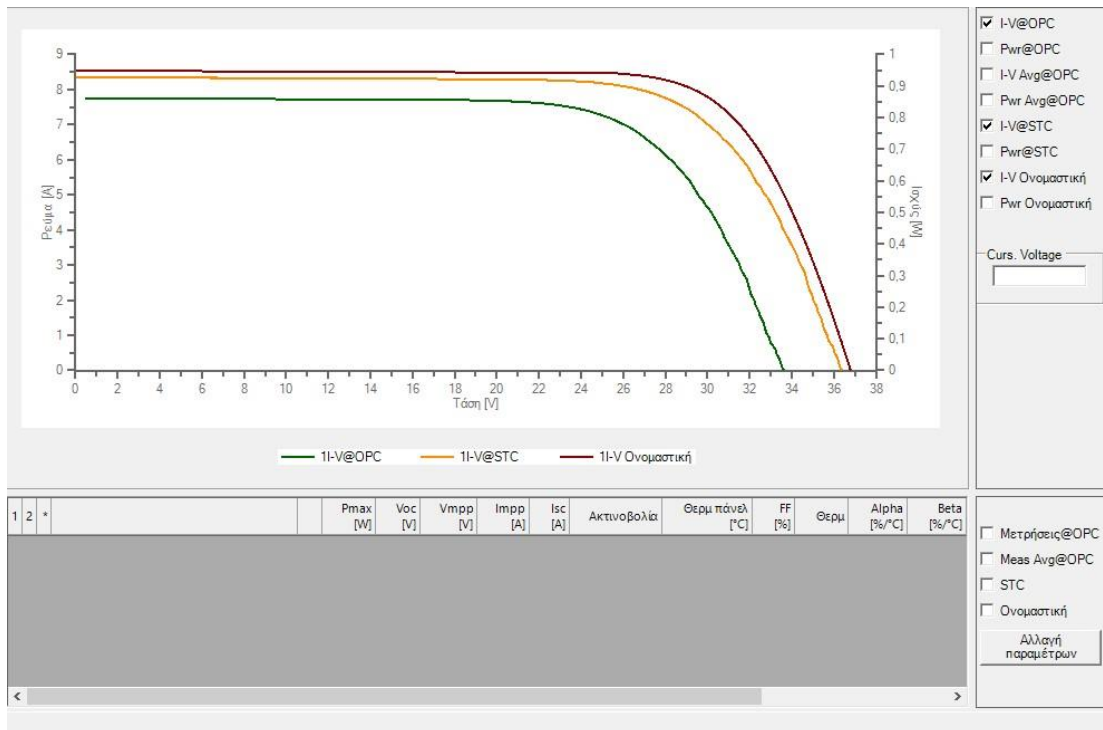
Πίνακες μετρήσεων:

Οι πίνακες μετρήσεων, όπως παρατίθενται παρακάτω στο **Παράρτημα Α (Πίνακας Α I, Πίνακας Α II)**, παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων σύμφωνα με τις σχετικές απεικονίσεις στο όργανο μετρήσεων solarHT.

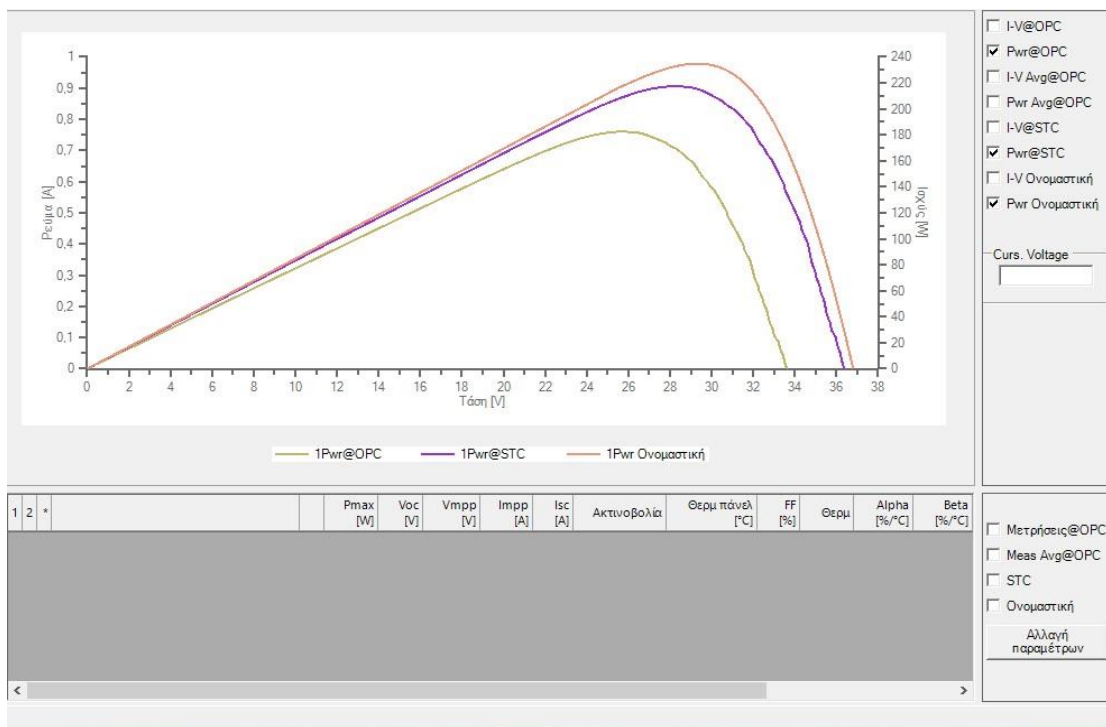
Αναλυτικότερα,

- στην πρώτη στήλη του Πίνακα αναφέρονται οι πληροφορίες της κάθε μέτρησης, δηλαδή, η ημερομηνία και η ώρα που πραγματοποιήθηκε η κάθε μέτρηση καθώς και ο αριθμός της. Επίσης βλέπουμε και σε ποιες συνθήκες έγινε η μέτρηση (λειτουργίας OPC, ονομαστική, τυπικές συνθήκες STC).
- στην επόμενη στήλη παρατηρούμε την μέγιστη ισχύ του αντίστοιχου πλαισίου την συγκεκριμένη στιγμή της μέτρησης.
- στην συνέχεια παρατίθεται η τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}), η μέγιστη τάση (V_{mpp}), το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}) και η μέγιστη ένταση του (I_{mpp}).
- στην έβδομη στήλη υπάρχει η ακτινοβολία του ήλιου εκείνη την χρονική στιγμή ενώ στην όγδοη η θερμοκρασία του πλαισίου η οποία διαδραματίζει και πολύ σημαντικό ρόλο στην απόδοση του.
- Τέλος, στις τελευταίες στήλες παρατηρούμε τους συντελεστές θερμοκρασίας τόσο για το ρεύμα (α), όσο και για την τάση εξόδου (β) καθώς και το συντελεστή πλήρωσης (FF).

Για την εξαγωγή των δεδομένων αυτών στον ηλεκτρονικό υπολογιστή χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα Torview, το οποίο παραδίδεται μαζί με την αγορά του οργάνου και μας παρέχει αρκετές πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Μέσω του προγράμματος αυτού, μπορούμε να συγκρίνουμε τις καμπύλες τάσης – ρεύματος καθώς και τις καμπύλες ισχύος από δύο ή και περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια σε ένα διάγραμμα. Αυτό μας δίνει την δυνατότητα άμεσης εξαγωγής συμπερασμάτων καλής λειτουργίας και εύκολης επιδιόρθωσης τυχών σφαλμάτων. (Σχήμα 4.1 Α και Β).



Σχήμα 4.1A: Ενδεικτικό διάγραμμα καμπυλών I-V από πρόγραμμα TopView



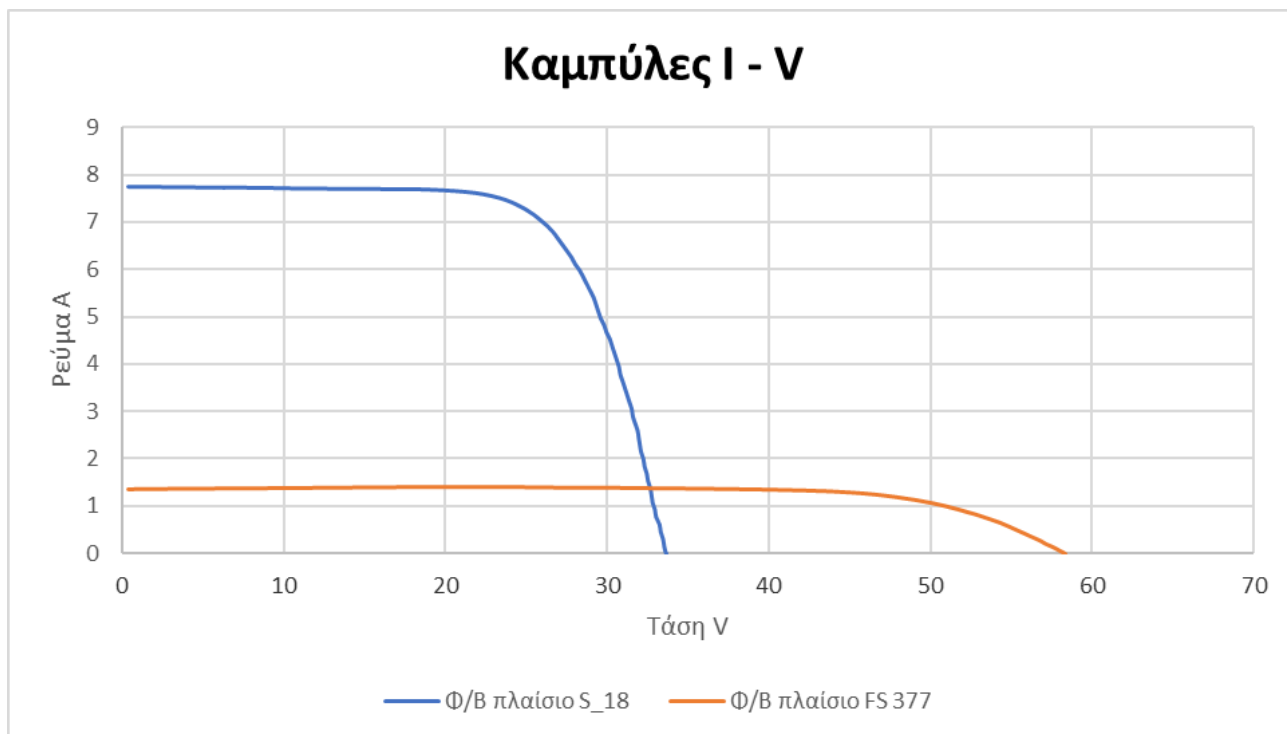
Σχήμα 4.1B: Ενδεικτικό διάγραμμα καμπυλών ισχύος από πρόγραμμα TopView

Ανάλυση αποτελεσμάτων:

Για να κατανοήσουμε καλύτερα τα αποτελέσματα των μετρήσεων και για να εξάγουμε σαφή συμπεράσματα από τις μετρήσεις που πήραμε, παραθέτουμε παρακάτω σχετικό **Διάγραμμα Καμπυλών I – V**.

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα μπορούμε να δούμε τις χαρακτηριστικές καμπύλες I–V για τα δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια που μελετήσαμε. Αρχικά παρατηρούμε ότι το πλαίσιο της εταιρίας First Solar παρέχει στους ακροδέκτες εξόδου, υψηλότερη τάση και χαμηλότερο ρεύμα από αυτό της εταιρίας Aleo Solar. Βλέπουμε ότι η τάση εξόδου χωρίς φορτίο του πλαισίου FS_377 είναι περίπου 58 Volt (V) ενώ το Φ/Β πλαίσιο S_18 έχει τάση εξόδου χωρίς φορτίο στα άκρα του περίπου 33 Volt (V).

Επίσης υπάρχει διαφορά και στην ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος ανάμεσα στα δυο φωτοβολταϊκά πλαίσια. Αυτή η διαφορά είναι εύλογη διότι προκύπτει λόγω των διαφορετικών τεχνικών χαρακτηριστικών των δύο πλαισίων. Επίσης η διαφορά αυτή εξηγείται και λόγω της διαφοράς μισής ώρας περίπου μεταξύ των δύο μετρήσεων. Σε αυτή τη διαφορά ώρας άλλαξαν αρκετές παράμετροι που επηρεάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων, όπως η θερμοκρασία του αντίστοιχου πλαισίου και η ακτινοβολία του ήλιου. (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα καμπυλών I – V

Έπειτα, θέλαμε να διαπιστώσουμε πόσο μειώνεται η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του και καταλήξαμε στους πίνακες όπως παρατίθενται στο **Παράρτημα Β** (Πίνακας Β Ι και Πίνακας Β ΙΙ).

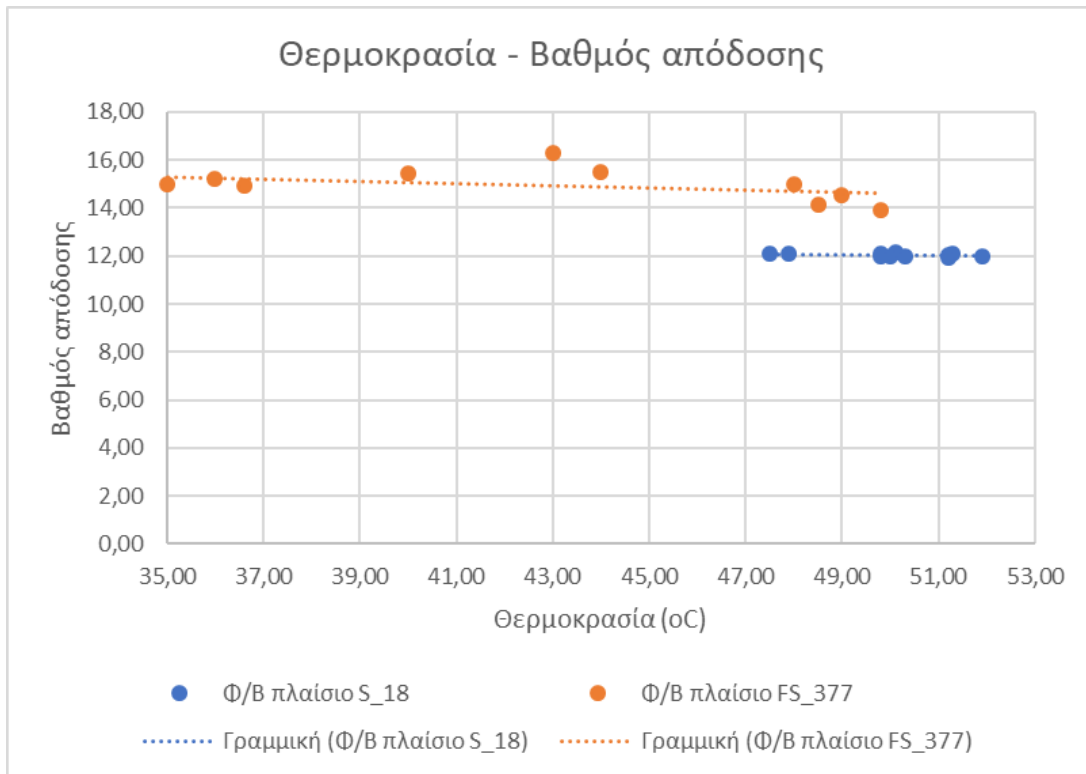
Για να συμπληρωθούν οι συγκεκριμένοι πίνακες επιλέξαμε μία μέτρηση από το πλήθος της κάθε ομάδας του αρχικού πίνακα (Παράρτημα Α, Πίνακας Α Ι).

Συγκεκριμένα πήραμε την μέτρηση σε συνθήκες λειτουργίας (ΟΡC). Αρχικά υπολογίσαμε τον βαθμό απόδοσης του πλαισίου στις διαφορετικές τιμές της ακτινοβολίας με βάση τον τύπο που έχουμε αναλύσει παραπάνω (Σχέση 1). Στην συνέχεια, υπολογίσαμε την τελική ισχύ εξόδου με την επίδραση που έχει η αύξηση της θερμοκρασίας του πλαισίου όσο περνάει η ώρα του πειράματος (Σχέση 4) και τέλος υπολογίσαμε το ποσοστό της ισχύς που χάνεται λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας, για να δούμε πόσο σημαντικό ρόλο έχει το να κρατάμε σε χαμηλά επίπεδα την θερμοκρασία του πλαισίου.

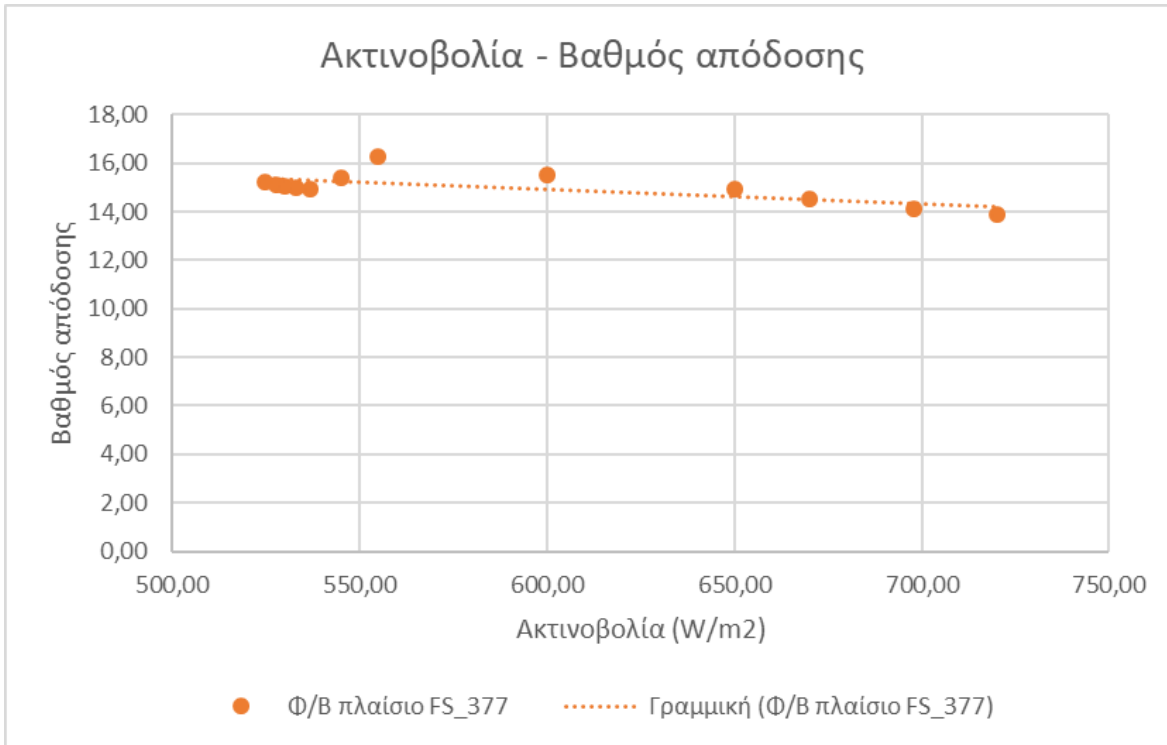
Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα από τους υπολογισμούς στους πίνακες του Παραρτήματος Β όπως περιγράφονται παραπάνω, **κατασκευάστηκαν διαγράμματα** για την ανάλυση της επίδρασης θερμοκρασίας και ακτινοβολίας ως ακολούθως:

Διαγράμματα αποτελεσμάτων:

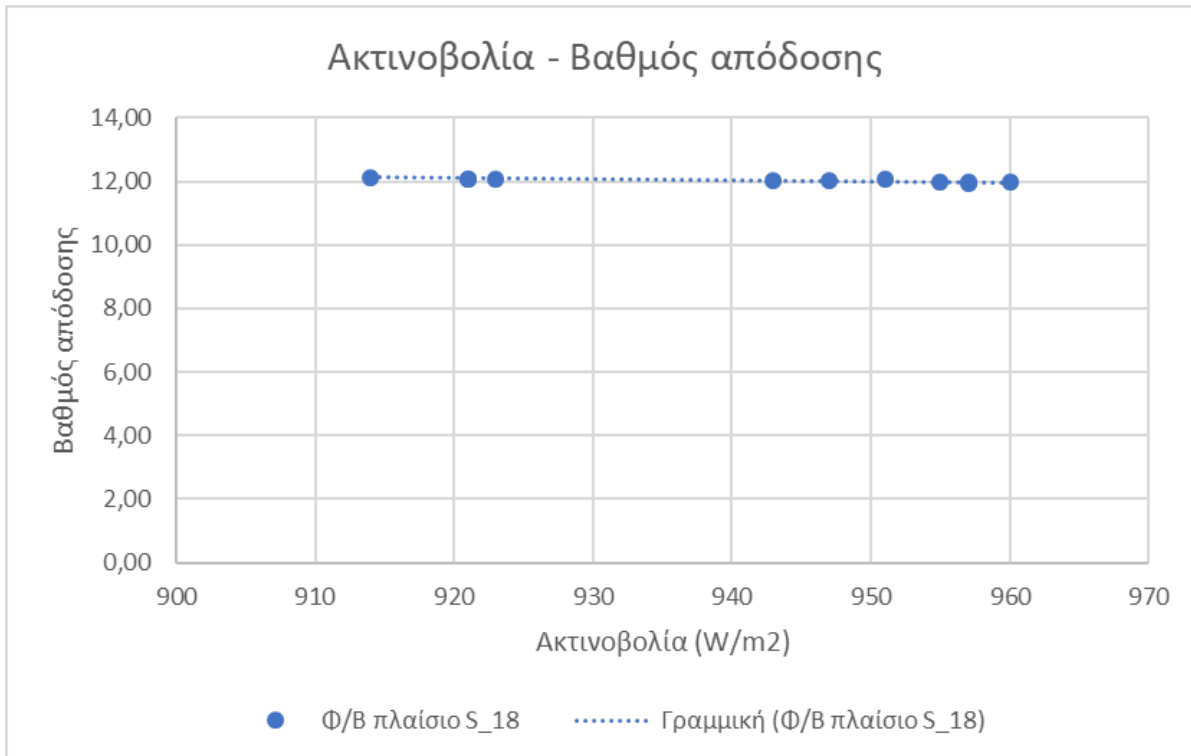
Στα παρακάτω διαγράμματα παρατηρούμε τον τρόπο με τον οποίο επιδρά η θερμοκρασία και η ακτινοβολία του ήλιου στον βαθμό απόδοσης των Φ/Β πλαισίων. Παρατηρούμε ότι, όσο αυξάνεται η ακτινοβολία και κατ' επέκταση η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού μειώνεται ο βαθμός απόδοσης του συστήματος. Όμως υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών πλαισίων οι οποίες συμπεριφέρονται διαφορετικά στις θερμοκρασιακές διαφορές. Αυτό παρατηρήθηκε και στην συγκεκριμένη περίπτωση. Στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο FS_377, το οποίο έχει κατασκευαστεί με την τεχνολογία λεπτού υμενίου, έχουμε αυτήν την πολύ μικρή μείωση της απόδοσης του, ενώ στο πλαίσιο S_18 δεν υπάρχει τέτοιο πρόβλημα (Σχήμα 4.3 Α και Σχήμα 4.3 Β).



Σχήμα 4.3 Α: Επίδραση της θερμοκρασίας στον βαθμό απόδοσης



Σχήμα 4.3 Β: Επίδραση της ακτινοβολίας στον βαθμό απόδοσης στο πλαίσιο FS_377

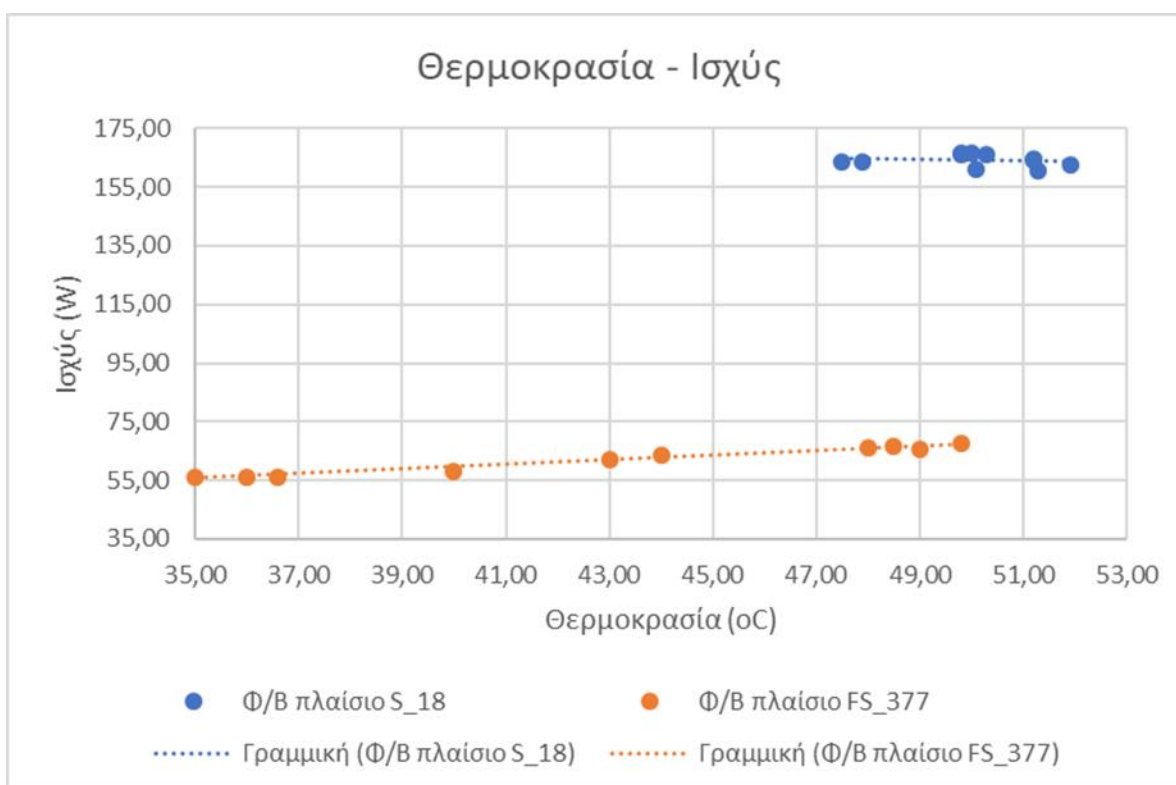


Σχήμα 4.3 Β: Επίδραση της ακτινοβολίας στον βαθμό απόδοσης στο πλαίσιο FS_377

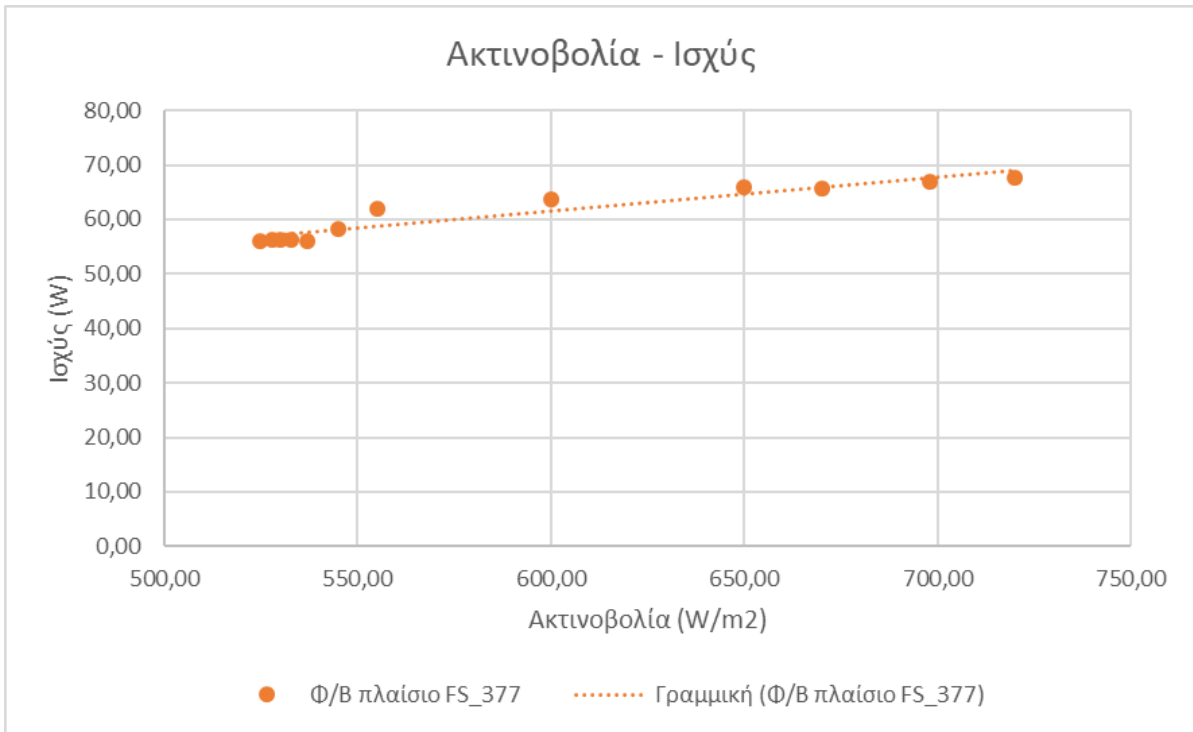
Στα επόμενα δύο διαγράμματα παρατηρούμε την επίδραση που έχει η αύξηση της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στην τελική ισχύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η ακτινοβολία που υπάρχει την ατμόσφαιρα αυξάνεται και η ισχύς εξόδου και στα δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια με διαφορετικό όμως ρυθμό. Αυτό συμβαίνει λόγω της διαφοράς παλαιότητας των δύο αυτών φωτοβολταϊκών.

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο FS_377 δεν έχει λειτουργήσει αρκετά επειδή βρίσκεται σε εκθεσιακή θέση στο εργαστήριο.

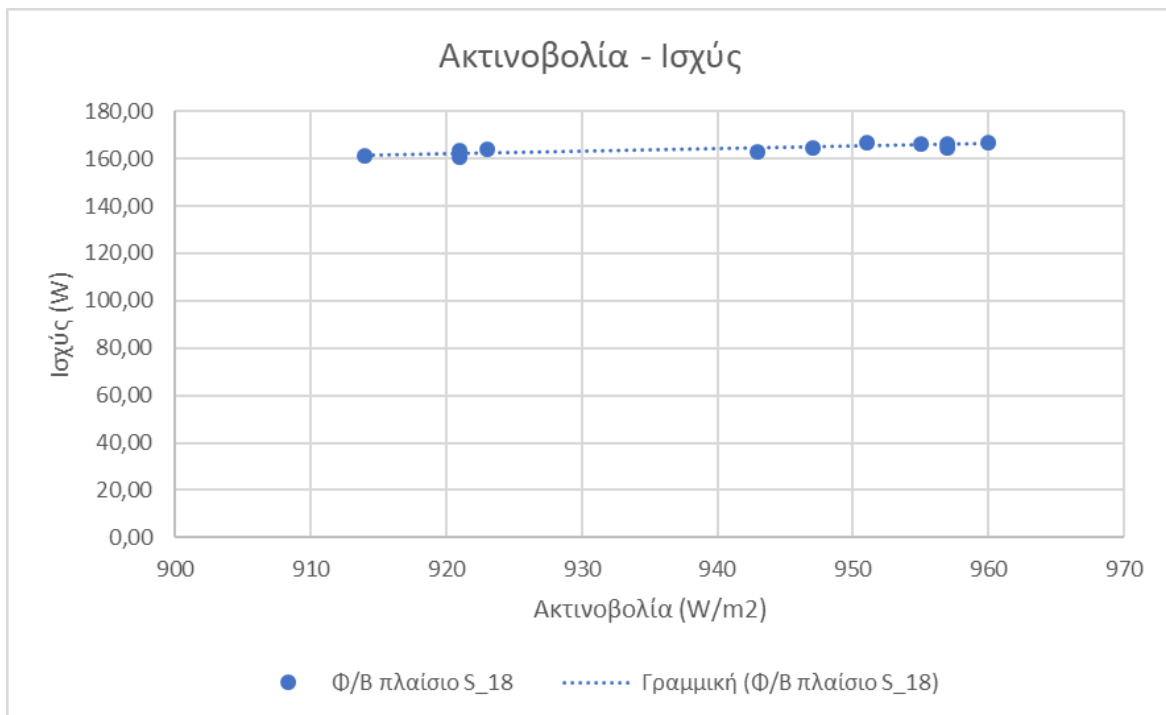
Αντίθετα, τα πλαίσια S_18 λειτουργούν περίπου μια δεκαετία και ως εκ τούτου έχουν χάσει λίγο την ιδιότητα τους να απορροφούν μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας (Σχήμα 4.4 Α και Σχήμα 4.4 Β).



Σχήμα 4.4 Α: Επίδραση της θερμοκρασίας στην ισχύ



Σχήμα 4.4 Β: Επίδραση της ακτινοβολίας στην ισχύ στο πλαίσιο FS_377



Σχήμα 4.4 Β: Επίδραση της ακτινοβολίας στην ισχύ στο πλαίσιο S_18

Κεφάλαιο 5

Σχόλια – Συμπεράσματα

Από την έρευνα που κάναμε στα φωτοβολταϊκά συστήματα, για την πραγματοποίηση αυτής της εργασίας εξάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα:

Αρχικά παρατηρούμε ότι το πάνελ της εταιρίας First Solar το οποίο έχει λειτουργήσει ελάχιστα έως καθόλου, μπορεί να πετύχει υψηλά ποσοστά απόδοσης της τάξης του 15 – 16%. Σημειώνεται ότι ο βαθμός απόδοσης του πάνελ μόλις βγει από το εργοστάσιο ανέρχεται περίπου στο 16%. Αντίθετα, τα πλαίσια Aleo Solar έχουν μειώσει την απόδοση τους όσο περνούν τα χρόνια. Πιο συγκεκριμένα η απόδοση που έχουν πετύχει είναι περίπου 10–11% και είναι μειωμένη σε σχέση με αυτήν που είχαν μόλις κατασκευάστηκαν στο εργοστάσιο η οποία ανερχόταν σε 12–13%. Η μείωση δεν είναι μεγάλη αλλά μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο με την πάροδο των χρόνων.

Επομένως, το πρώτο συμπέρασμα που εξάγουμε είναι ότι όσο πιο καινούργιο είναι ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, τόσο μεγαλύτερες αποδόσεις στην μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να πετύχει.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που είναι εγκατεστημένα σε διαφορές περιοχές ανά τον κόσμο δεν αποδίδουν την μέγιστη ισχύ που είχαν όταν αρχικά εγκαταστάθηκαν αλλά η απόδοση τους μειώνεται με τη πάροδο των χρόνων. Για αυτόν τον λόγο οι κατασκευαστές έχουν υπολογίσει ότι ένας μέσος όρος ζωής ενός κοινού φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι περίπου 25 χρόνια. Με την ανάπτυξη των νέων τεχνολογιών αφενός και αφετέρου με την αύξηση της ζήτησης για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, η μέση διάρκεια ενός σχετικά ακριβού φωτοβολταϊκού πλαισίου κυμαίνεται πλέον περίπου στα 30 χρόνια με δυνατότητα περαιτέρω αύξησης.

Στην συνέχεια παρατηρούμε ότι, διαφορά στην απόδοση παρουσιάζεται και λόγω της διαφορετικής τεχνολογίας των συστημάτων. Τα πάνελ λεπτού υμενίου τα οποία είναι κατασκευασμένα από τελουριούχο κάδμιο (στην περίπτωση της παρούσας έρευνας το FS 377) έχουν την ιδιότητα να απορροφούν σχεδόν όλη την ηλιακή ακτινοβολία που δέχονται (περίπου το 99%) και να μετατρέπουν ένα αρκετά μεγάλο μέρος αυτής σε ηλεκτρικό ρεύμα. Αντίθετα τα πολυκρυσταλλικά και τα μονοκρυσταλλικά κελιά, ενώ και αυτά απορροφούν ένα μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας, δεν έχουν την δυνατότητα να την μετατρέψουν ολόκληρη σε ηλεκτρική ενέργεια. Σημαντικό ποσοστό της ενέργειας αυτής αποβάλλεται στο περιβάλλον μέσω της θερμότητας. Αυτό παρατηρήθηκε και στην συγκεκριμένη περίπτωση. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο aleo S_18 έχει μια μείωση στην απόδοση του όσο αυξάνεται η θερμοκρασία της τάξης του 13 με 14% ποσοστό το οποίο είναι στα όρια του κατασκευαστή για αυτού του είδους την τεχνολογία. Αντίθετα, το πλαίσιο FS_377 έχει πολύ μικρότερο ποσοστό μείωσης του απόδοσης το οποίο κυμαίνεται κοντά στο 4 με 6 % με τον κατασκευαστή να δηλώνει ότι το ποσοστό

μείωσης είναι κοντά στο 8 με 9 %. Αυτήν την διαφορά την παρατηρούμε λόγω της μη εγκατάστασης του πλαισίου αυτού σε μόνιμη θέση λειτουργίας, οπότε δεν έχει χάσει την απόδοση του με την πάροδο των χρόνων.

Συμπερασματικά, τα πλαίσια τελουριούχου καδμίου είναι περισσότερο αποδοτικά όσο περνάνε τα χρόνια από τα πολυκρυσταλλικά ενώ παράλληλα είναι ακριβότερα στην αγορά τους από πλαίσια άλλης τεχνολογίας. Επίσης, αυτού του είδους τα φωτοβολταϊκά έχουν αρκετά ποιο δύσκολη κατασκευή επειδή τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται δεν είναι πάντα διαθέσιμα στην αγορά. Ένας ακόμη ανασταλτικός παράγοντας για την κατασκευή τους είναι ότι χρησιμοποιούνται πρώτες ύλες καρκινογόνες, κάνοντας έτσι τις περισσότερες οργανώσεις προστασίας περιβάλλοντος να είναι ενάντια στην κατασκευή αυτών των πλαισίων.

Οι κατασκευαστές φωτοβολταϊκών στέφουν πλέον την προσοχή τους στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών (που έχουν περιγράψει σε ξεχωριστό κεφάλαιο παραπάνω) για την αύξηση της απόδοσης των πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών πλαισίων, τα οποία είναι φιλικά στο περιβάλλον καθώς και ποιο εύκολα και οικονομικότερα στην κατασκευή τους. Τα περισσότερα φωτοβολταϊκά συστήματα που είναι εγκατεστημένα σε όλο τον κόσμο χρησιμοποιούν Φ/Β κυψέλες που είναι κατασκευασμένες από πολυκρυσταλλικό ή μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Οι αποδόσεις στην μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα που έχουν πετύχει όλοι οι μεγάλοι κατασκευαστές σε όλο τον κόσμο, ανέρχεται περίπου στο 20% - 23%.

Τέλος, ο ποιο βασικός παράγοντας μείωσης της απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, ανεξάρτητα με την τεχνολογία ή την χρονολογία που κατασκευάστηκε, είναι ο περιβαλλοντικός παράγοντας. Η ρύπανση από την σκόνη του ατμοσφαιρικού αέρα δυσχεραίνει την απόδοση των συστημάτων κάνοντάς τα μια εγκατάσταση η οποία θέλει ιδιαίτερη προσοχή και φροντίδα. Έτσι, τα πλαίσια θα πρέπει να καθαρίζονται αρκετά συχνά, με τις διαδικασίες που έχουν αναφερθεί, ώστε να διατηρούνται πάντα στις μέγιστες αποδώσεις.

Βιβλιογραφική αναφορά:

- [1] Πολυζάκης, Α., 2017. Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος. Πτολεμαΐδα: Εκδόσεις 'P.H.C' (PowerHeatCool) σσ.412-413
- [2] Cleanenergyreviews, 2020. Solarpanelconstruction [Online] Διαθέσιμο στην σελίδα: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction> (Μετάβαση Οκτώβριος 2021)
- [3] Clean energy reviews, 2021. Most Efficient Solar Panels 2021 [Online] Διαθέσιμο στην σελίδα: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-efficient-solar-panels> (Μετάβαση Οκτώβριος 2021)
- [4] Πολυζάκης, Α., 2017. Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος. Πτολεμαΐδα: Εκδόσεις 'P.H.C' (PowerHeatCool) σσ.418-421
- [5] Clean Energy reviews, 2021. Top 10 Solar Panels - Latest Technology 2021 [Online] Διαθέσιμο στην σελίδα: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/2017/9/11/best-solar-panels-top-modules-review> (Μετάβαση Οκτώβριος 2021)
- [6] Sinovoltaics. IBCSolarcells [Online] Διαθέσιμο στην σελίδα: <https://sinovoltaics.com/learning-center/solar-cells/ibc-solar-cells/> (Μετάβαση Δεκέμβριος 2021)
- [7] Στέφανος Ε. Τελένης, 2011, Προσδιορισμός παραμέτρων γήρανσης φωτοβολταϊκών στοιχείων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διπλωματική εργασία, Αθήνα, σσ 63

Παράρτημα Α: Πίνακες μετρήσεων

Πίνακας Α Ι

Φ/Β πλαίσιοFS_377:

	P _{max} [W]	V _{oc} [V]	V _{mpp} [V]	I _{mp} [A]	I _{sc} [A]	Ακτινοβολία	Θερμ πάνελ [°C]	FF [%]	Alpha [%/°C]	Beta [%/°C]
Μετρ. 1 - FS 377 22/11/2021 11:25										
1 Μετρήσεις@OPC	57,51	58,30	45,86	1,25	1,34	528,00	33,50	74,00	0,04	-0,20
1 MeasAvg@OPC	57,51	58,30	45,86	1,25	1,34	528,00	33,50	74,00	0,04	-0,20
1 STC	104,15	60,64	44,80	2,32	2,54	1000,00	25,00	68,00	0,04	-0,20
1 Ονομαστική	77,00	60,70	48,30	1,60	1,84	1000,00	25,00	69,00	0,04	-0,20
Μετρ. 2 - FS 377 22/11/2021 11:26										
2 Μετρήσεις@OPC	57,54	58,30	45,90	1,30	1,40	530,00	34,52	74,00	0,04	-0,20
2 MeasAvg@OPC	57,54	58,30	45,90	1,30	1,40	530,00	34,52	74,00	0,04	-0,20
2 STC	104,40	60,70	44,85	2,35	2,55	1000,00	25,00	68,00	0,04	-0,20
2 Ονομαστική	77,00	60,70	48,30	1,60	1,84	1000,00	25,00	69,00	0,04	-0,20
Μετρ. 3 - FS 377 22/11/2021 11:28										
3 Μετρήσεις@OPC	57,60	58,32	45,93	1,30	1,42	533,00	35,00	75,00	0,04	-0,20
3 MeasAvg@OPC	57,60	58,32	45,93	1,30	1,42	532,00	35,00	75,00	0,04	-0,20
3 STC	104,42	60,73	44,87	2,35	2,55	1000,00	25,00	68,00	0,04	-0,20
3 Ονομαστική	77,00	60,70	48,30	1,60	1,84	1000,00	25,00	69,00	0,04	-0,20
Μετρ. 4 - FS 377 22/11/2021 11:30										
4 Μετρήσεις@OPC	57,64	58,32	45,94	1,34	1,44	537,00	36,60	75,00	0,04	-0,20
4 MeasAvg@OPC	57,64	58,32	45,94	1,34	1,44	537,00	36,60	75,00	0,04	-0,20
4 STC	104,45	60,73	44,87	2,37	2,57	1000,00	25,00	68,00	0,04	-0,20
4 Ονομαστική	77,00	60,70	48,30	1,60	1,84	1000,00	25,00	69,00	0,04	-0,20
Μετρ. 5 - FS 377 22/11/2021 11:32										
5 Μετρήσεις@OPC	57,50	58,29	45,88	1,28	1,37	525,00	36,00	74,00	0,04	-0,20
5 MeasAvg@OPC	57,50	58,29	45,88	1,28	1,37	525,00	36,00	74,00	0,04	-0,20
5 STC	104,35	60,68	44,83	2,30	2,50	1000,00	25,00	68,00	0,04	-0,20
5 Ονομαστική	77,00	60,70	48,30	1,60	1,84	1000,00	25,00	69,00	0,04	-0,20

Μετρ. 6 - FS 377 22/11/2021 11:37										
6 Μετρήσεις@OPC	60,50	58,37	45,95	1,40	1,42	545,00	40,00	75,00	0,04	-0,20
6 MeasAvg@OPC	60,50	58,37	45,95	1,40	1,42	545,00	40,00	75,00	0,04	-0,20
6 STC	107,00	60,77	44,90	2,40	2,60	1000,00	25,00	68,00	0,04	-0,20
6 Ονομαστική	77,00	60,70	48,30	1,60	1,84	1000,00	25,00	69,00	0,04	-0,20
Μετρ. 7 - FS 377 22/11/2021 11:42										
7 Μετρήσεις@OPC	65,00	58,40	46,00	1,42	1,44	555,00	43,00	75,00	0,04	-0,20
7 MeasAvg@OPC	65,00	58,40	46,00	1,42	1,44	555,00	43,00	75,00	0,04	-0,20
7 STC	110,00	60,80	45,00	2,45	2,63	1000,00	25,00	68,00	0,04	-0,20
7 Ονομαστική	77,00	60,70	48,30	1,60	1,84	1000,00	25,00	69,00	0,04	-0,20
Μετρ. 8 - FS 377 22/11/2021 11:45										
8 Μετρήσεις@OPC	67,00	58,47	46,50	1,43	1,46	600,00	44,00	75,00	0,04	-0,20
8 MeasAvg@OPC	67,00	58,47	46,50	1,43	1,46	600,00	44,00	75,00	0,04	-0,20
8 STC	110,00	60,90	45,30	2,46	2,65	1000,00	25,00	68,00	0,04	-0,20
8 Ονομαστική	77,00	60,70	48,30	1,60	1,84	1000,00	25,00	69,00	0,04	-0,20
Μετρ. 9 - FS 377 22/11/2021 11:50										
9 Μετρήσεις@OPC	70,00	58,50	46,53	1,44	1,45	650,00	48,00	75,00	0,04	-0,20
9 MeasAvg@OPC	70,00	58,50	46,53	1,44	1,45	650,00	48,00	75,00	0,04	-0,20
9 STC	110,00	60,94	45,34	2,45	2,67	1000,00	25,00	68,00	0,04	-0,20
9 Ονομαστική	77,00	60,70	48,30	1,60	1,84	1000,00	25,00	69,00	0,04	-0,20
Μετρ. 10 - FS 377 22/11/2021 11:55										
10 Μετρήσεις@OPC	71,00	58,60	46,60	1,46	1,47	698,00	48,50	75,00	0,04	-0,20
10 MeasAvg@OPC	71,00	58,60	46,60	1,46	1,47	698,00	48,50	75,00	0,04	-0,20
10 STC	110,23	61,00	45,40	2,45	2,67	1000,00	25,00	68,00	0,04	-0,20
10 Ονομαστική	77,00	60,70	48,30	1,60	1,84	1000,00	25,00	69,00	0,04	-0,20
Μετρ. 11 - FS 377 22/11/2021 11:56										
11 Μετρήσεις@OPC	70,00	58,00	46,00	1,43	1,40	670,00	49,00	74,00	0,04	-0,20
11 MeasAvg@OPC	70,00	58,00	46,00	1,43	1,40	670,00	49,00	74,00	0,04	-0,20
11 STC	110,00	58,00	45,00	2,40	2,60	1000,00	25,00	68,00	0,04	-0,20
11 Ονομαστική	77,00	60,70	48,30	1,60	1,84	1000,00	25,00	69,00	0,04	-0,20

Μετρ. 12 - FS 377 22/11/2021 11:58										
12 Μετρήσεις@OPC	72,00	58,62	46,63	1,47	1,49	720,00	49,80	75,00	0,04	-0,20
12 MeasAvg@OPC	72,00	58,62	46,63	1,47	1,49	720,00	49,80	75,00	0,04	-0,20
12 STC	110,00	61,20	45,42	2,46	2,68	1000,00	25,00	68,00	0,04	-0,20
12 Ονομαστική	77,00	60,70	48,30	1,60	1,84	1000,00	25,00	69,00	0,04	-0,20

Πίνακας A II

Φ/Β πλαίσιο Aleo S_18:

	Pmax [W]	Voc [V]	Vmpp [V]	Imp [A]	Isc [A]	Ακτινοβολία	Θερμ πάνελ [°C]	FF [%]	Alpha [%/°C]	Beta [%/°C]
Μετρ. 1 - S18235 22/11/2021 12:00 μμ										
1 Μετρήσεις@OPC	182,41	33,64	25,43	7,17	7,76	921,00	47,50	70,00	0,04	-0,34
1 MeasAvg@OPC	182,41	33,64	25,43	7,17	7,76	921,00	47,50	70,00	0,04	-0,34
1 STC	217,47	36,39	28,18	7,72	8,33	1000,00	25,00	72,00	0,04	-0,34
1 Ονομαστική	235,00	36,80	29,30	8,01	8,54	1000,00	25,00	75,00	0,04	-0,34
Μετρ. 2 - S18235 22/11/2021 12:01 μμ										
2 Μετρήσεις@OPC	182,99	33,64	25,93	7,06	7,78	923,00	47,90	70,00	0,04	-0,34
2 MeasAvg@OPC	182,99	33,64	25,93	7,06	7,78	923,00	47,90	70,00	0,04	-0,34
2 STC	217,74	36,44	28,74	7,58	8,33	1000,00	25,00	72,00	0,04	-0,34
2 Ονομαστική	235,00	36,80	29,30	8,01	8,54	1000,00	25,00	75,00	0,04	-0,34
Μετρ. 3 - S18235 22/11/2021 12:08 μμ										
3 Μετρήσεις@OPC	182,56	33,30	25,86	7,06	7,79	921,00	51,30	70,00	0,04	-0,34
3 MeasAvg@OPC	182,56	33,30	25,86	7,06	7,79	921,00	51,30	70,00	0,04	-0,34
3 STC	220,35	36,44	29,06	7,58	8,35	1000,00	25,00	72,00	0,04	-0,34
3 Ονομαστική	235,00	36,80	29,30	8,01	8,54	1000,00	25,00	75,00	0,04	-0,34
Μετρ. 4 - S18235 22/11/2021 12:08 μμ										
4 Μετρήσεις@OPC	181,95	33,37	25,93	7,02	7,68	914,00	50,10	71,00	0,04	-0,34
4 MeasAvg@OPC	181,95	33,37	25,93	7,02	7,68	914,00	50,10	71,00	0,04	-0,34
4 STC	221,15	36,40	28,61	7,73	8,31	1000,00	25,00	73,00	0,04	-0,34
4 Ονομαστική	235,00	36,80	29,30	8,01	8,54	1000,00	25,00	75,00	0,04	-0,34

Μετρ. 5 - S18235 22/11/2021 12:14 μμ										
5 Μετρήσεις@OPC	185,67	33,35	25,79	7,20	7,93	943,00	51,90	70,00	0,04	-0,34
5 MeasAvg@OPC	185,67	33,35	25,79	7,20	7,93	943,00	51,90	70,00	0,04	-0,34
5 STC	219,59	36,53	28,15	7,80	8,31	1000,00	25,00	72,00	0,04	-0,34
5 Ονομαστική	235,00	36,80	29,30	8,01	8,54	1000,00	25,00	75,00	0,04	-0,34
Μετρ. 6 - S18235 22/11/2021 12:15 μμ										
6 Μετρήσεις@OPC	186,83	33,38	25,43	7,35	7,97	947,00	51,20	70,00	0,04	-0,34
6 MeasAvg@OPC	186,83	33,38	25,43	7,35	7,97	947,00	51,20	70,00	0,04	-0,34
6 STC	220,15	36,52	28,67	7,68	8,31	1000,00	25,00	73,00	0,04	-0,34
6 Ονομαστική	235,00	36,80	29,30	8,01	8,54	1000,00	25,00	75,00	0,04	-0,34
Μετρ. 7 - S18235 22/11/2021 12:16 μμ										
7 Μετρήσεις@OPC	188,23	33,51	25,93	7,26	8,01	951,00	49,80	70,00	0,04	-0,34
7 MeasAvg@OPC	188,23	33,51	25,93	7,26	8,01	951,00	49,80	70,00	0,04	-0,34
7 STC	218,94	36,50	28,98	7,56	8,33	1000,00	25,00	72,00	0,04	-0,34
7 Ονομαστική	235,00	36,80	29,30	8,01	8,54	1000,00	25,00	75,00	0,04	-0,34
Μετρ. 8 - S18235 22/11/2021 12:20 μμ										
8 Μετρήσεις@OPC	187,71	33,50	25,36	7,40	8,07	955,00	49,80	69,00	0,04	-0,34
8 MeasAvg@OPC	187,71	33,50	25,36	7,40	8,07	955,00	49,80	69,00	0,04	-0,34
8 STC	217,93	36,42	28,41	7,67	8,34	1000,00	25,00	72,00	0,04	-0,34
8 Ονομαστική	235,00	36,80	29,30	8,01	8,54	1000,00	25,00	75,00	0,04	-0,34
Μετρ. 9 - S18235 22/11/2021 12:20 μμ										
9 Μετρήσεις@OPC	188,42	33,51	25,36	7,43	8,08	960,00	50,00	70,00	0,04	-0,34
9 MeasAvg@OPC	188,42	33,51	25,36	7,43	8,08	960,00	50,00	70,00	0,04	-0,34
9 STC	217,80	36,50	28,44	7,66	8,30	1000,00	25,00	72,00	0,04	-0,34
9 Ονομαστική	235,00	36,80	29,30	8,01	8,54	1000,00	25,00	75,00	0,04	-0,34
Μετρ. 10 - S18235 22/11/2021 12:21 μμ										
10 Μετρήσεις@OPC	187,88	33,50	25,79	7,29	8,06	957,00	50,30	70,00	0,04	-0,34
10 MeasAvg@OPC	187,88	33,50	25,79	7,29	8,06	957,00	50,30	70,00	0,04	-0,34
10 STC	217,75	36,48	28,90	7,53	8,30	1000,00	25,00	72,00	0,04	-0,34
10 Ονομαστική	235,00	36,80	29,30	8,01	8,54	1000,00	25,00	75,00	0,04	-0,34

Μετρ. 11 - S18235 22/11/2021 12:22 μμ										
11 Μετρήσεις@OPC	187,17	33,43	25,29	7,40	8,07	957,00	51,20	69,00	0,04	-0,34
11 MeasAvg@OPC	187,17	33,43	25,29	7,40	8,07	957,00	51,20	69,00	0,04	-0,34
11 STC	218,26	36,50	28,51	7,66	8,32	1000,00	25,00	72,00	0,04	-0,34
11 Ονομαστική	235,00	36,80	29,30	8,01	8,54	1000,00	25,00	75,00	0,04	-0,34

Παράρτημα Β: Πίνακες υπολογισμών

Πίνακας Β Ι:

Φωτοβολταϊκό πλαίσιο Aleo Solar S_18

A/A	P_{mp} (W)	Ακτινοβολία (W/m ²)	Θερ πάνελ (°C)	Βαθμός απόδοσης	Τελική ισχύς με επίδραση της θερμοκρασίας P_{mp}' (W)	Ποσοστό απώλειας ισχύς
1	182,41	921	47,50	12,08%	163,53	11,54%
2	182,99	923	47,90	12,09%	163,71	11,77%
3	182,56	921	51,3	12,09%	160,47	13,76%
4	181,95	914	50,10	12,14%	160,94	13,05%
5	185,67	943	51,90	12,01%	162,70	14,12%
6	186,83	947	51,20	12,03%	164,31	13,70%
7	188,23	951	49,80	12,07%	166,76	12,88%
8	187,71	955	49,80	11,99%	166,30	12,88%
9	188,42	960	50	11,97%	166,75	12,99%
10	187,88	957	50,30	11,97%	166,01	13,17%
11	187,17	957	51,20	11,93%	164,61	13,70%

Πίνακας Β ΙΙ

Φωτοβολταϊκό πλαίσιο First Solar FS_377

A/A	$P_{mp\text{p}}$ W	Ακτινοβολία W/m^2	Θερ πάνελ $^{\circ}C$	Βαθμός απόδοσης	Τελική ισχύς με επίδραση της θερμοκρασίας ($P_{mp\text{p}'}$) W	Ποσοστό απώλειας ισχύος
1	57,51	528,00	33,50	15,13%	56,29	2,17%
2	57,54	530,00	34,52	15,08%	56,17	2,44%
2	57,60	533,00	35,00	15,01%	56,16	2,56%
4	57,64	537,00	36,60	14,91%	55,97	2,99%
5	57,50	525,00	36,00	15,21%	55,92	2,83%
6	60,50	545,00	40,00	15,42%	58,23	3,90%
7	65,00	555,00	43,00	16,27%	62,08	4,71%
8	67,00	600,00	44,00	15,51%	63,82	4,99%
9	70,00	650,00	48,00	14,96%	65,98	6,10%
10	71,00	698,00	48,50	14,13%	66,83	6,24%
11	70,00	670,00	49,00	14,51%	65,80	6,38%