

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΠΙΩΝ ΜΟΡΦΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ & ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΜΕΡΙΚΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ
ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΩΝ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ**

ΗΛΙΑΣ ΛΕΩΝΙΔΑΣ
Α.Μ.: 45879

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
Δρ Κ. Α. ΚΑΒΒΑΛΙΑΣ

ΑΘΗΝΑ
ΙΟΥΛΙΟΣ 2021

UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

**LABORATORY OF MILD FORMS OF ENERGY & ENVIRONMENTAL
PROTECTION**



Diploma Thesis

**PARTIAL SHADING'S IMPACT STUDY ON
ENERGY PRODUCTION OF PHOTOVOLTAIC
PANEL**

ELIAS LEONIDAS
A.M.: 45879

SUPERVISOR

Dr. K.A. KAVADIAS

ATHENS

JULY 2021

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΛΕΞΗΣ Καθηγητής	ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΝΑΖΟΣ Λέκτορας Εφαρμογών	ΚΟΣΜΑΣ ΚΑΒΒΑΔΙΑΣ Επίκουρος Καθηγητής
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΗΛΙΑΣ ΛΕΩΝΙΔΑΣ του ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ, με αριθμό μητρώου 45879 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και 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 αυτούσιες 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 εμένα 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 διπλώματός μου.»

Ο Δηλών
ΗΛΙΑΣ ΛΕΩΝΙΔΑΣ



ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΜΕΡΙΚΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα φωτοβολταϊκά (φ/β) συστήματα έχουν μεγάλη εφαρμογή στη χώρα μας, χάρη στην άφθονη ηλιακή ενέργεια που είναι σε θέση να αξιοποιήσουν. Αποτελούνται από φωτοβολταϊκές κυψέλες, και διαθέτουν απαραίτητες συσκευές για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Στόχος της εργασίας είναι να εξεταστεί ο βαθμός επίδρασης της σκίασης στην ενεργειακή παραγωγή Φ/Β πλαισίων που προκαλείται από εμπόδια – αντικείμενα που βρίσκονται πάνω ή γύρω από το πλαίσιο και επηρεάζουν τον βαθμό απόδοσής του. Η μελέτη αυτή θα οδηγήσει στην κατάλληλη αντιμετώπιση της μειωμένης απόδοσης και στην ανεύρεση τρόπων επίλυσης.

Αρχικά, προσεγγίζονται η ηλιακή ενέργεια και ηλιακή γεωμετρία προκειμένου να υπολογιστεί -είτε μέσω της παρατήρησης είτε μέσω κατάλληλων προγραμμάτων- το μέγεθος και η διάρκεια της σκίασης που προκαλείται από συγκεκριμένα εμπόδια. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η εξέταση του χώρου εγκατάστασης για τον σχεδιασμό του φωτοβολταϊκού συστήματος. Μελετώνται, δηλαδή, και αξιολογούνται βασικές προϋποθέσεις εγκατάστασής των φ/β πλαισίων που σκοπό έχουν την αποφυγή σφαλμάτων.

Αν και ο βασικός στόχος είναι η μέγιστη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, στην πράξη είναι ιδιαίτερα δύσκολο να επιτευχθεί μηδενική σκίαση σε αστικές και ημιαστικές τοποθεσίες. Επίσης, η μείωση της ενεργειακής απόδοσης εξαρτάται από τη διάρκεια της σκίασης μέσα στο χρόνο.

Κατά συνέπεια, είναι απαραίτητη η μελέτη των τρόπων συνδεσμολογίας των φ/β πλαισίων και οι δυνατότητες που δημιουργούνται κάθε φορά αναφορικά με την αντιμετώπιση της ολικής και της μερικής σκίασης. Κι αυτό γιατί η σκίαση ποικίλει ως προς το μέγεθος και τον τρόπο επιρροής στο φ/β σύστημα. Αποτέλεσμα της έρευνας γύρω από τις ενεργειακές απώλειες των φ/β συστημάτων είναι η ανάπτυξη τεχνολογιών αντιμετώπισης, όπως είναι οι δίοδοι bypass.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: ηλιακή ενέργεια, φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ηλιακές εγκαταστάσεις, μερική σκίαση, δίοδοι παράκαμψης, φ/β κυψέλη.

PARTIAL SHADING'S IMPACT STUDY ON ENERGY PRODUCTION OF PHOTOVOLTAIC PANEL

SUMMARY

Photovoltaic (PV) systems have a high application in our country, due to the high solar energy that can be exploited. They are consisted of photovoltaic cells with the necessary devices for the conversion of electricity.

The aim of this work is to examine the degree of effect of shading on the energy production of PV panels caused by obstacles that are located on or around PV panel and affect its efficiency. This study will solve the problem of reduced efficiency and finding solutions.

First of all, the solar energy and geometry are approached by observation and suitable programs in order the size and the duration of the shade be defined. For this reason, differences in the use of the same installation are required for updating the PV system. Basic requirements of PV installation of PVs are studied for avoiding damages.

Although, the basic goal is the maximum solar energy exploitation, in practice this is not possible, as it is particularly difficult to achieve zero shading in urban and suburban areas. In addition, the reduction of energy efficiency depends on the duration of shading over time.

Therefore, it is necessary to study the ways of wiring the PV panels and the possibilities that are created each time regarding the treatment of total and partial shading. This is because shading varies in size and in how it affects the PV system. The result of research on the energy losses of PV systems is the development of control technologies, such as bypass diodes.

KEY WORDS: solar energy, photovoltaic panels, solar collectors, partial shading, by pass diode, photovoltaic cell.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη διπλωματική εργασία του φοιτητή Ηλία Λεωνίδα με σκοπό την απόκτηση του διπλώματος του Μηχανολόγου Μηχανικού του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η μελέτη επίδρασης μερικής σκίασης στην ενεργειακή παραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Παρακάτω δίδεται μια συνοπτική παρουσίαση των θεμάτων που αναλύονται σε κάθε κεφάλαιο.

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται εισαγωγικές έννοιες για τον ήλιο, όπως η ηλιακή ενέργεια, τα χαρακτηριστικά της, η ηλιακή γεωμετρία και οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και η χρήση ορισμένων λογισμικών για την καταγραφή της σκίασης.

Στο Κεφάλαιο 2 εξετάζονται μερικές κυψέλες αρχής λειτουργίας, η επιλογή συνδεσμολογίας του φωτοβολταϊκού και κριτήρια Τάσης, Έντασης.

Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται ο βαθμός επιρροής τόσο της ολικής όσο και της μερικής σκίασης της κυψέλης των φωτοβολταϊκών κυψελών στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται λόγος για τεχνικές τεχνολογίας αντιμετώπισης - διόδους (PV cell diode).

Στο Κεφάλαιο 5, που είναι και το τελευταίο, παρατίθενται τα συμπεράσματα που αποκομίσθηκαν από την παρούσα διπλωματική εργασία.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	7
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	8
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</u> Υπολογισμός Σκιάσεων σε ηλιακές εγκαταστάσεις	10
1.1 Υπολογισμός και συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας	10
1.2 Διαθέσιμη Ηλιακή Ενέργεια σε Επίπεδες Επιφάνειες.....	12
1.3 Ηλιακή γεωμετρία και ηλιακές γωνίες.....	13
1.4 Μέθοδοι υπολογισμού σκίασης.....	16
1.4.1 Υπολογισμοί με βάση την παρατήρηση	18
1.4.2 Υπολογισμός σκίασης με ημικύκλιο	21
1.4.3 Λογισμικά καταγραφής σκίασης.....	25
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</u> Φωτοβολταϊκά Συστήματα.....	29
2.1 Φωτοβολταϊκή Κυψέλη	30
2.2 Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο	30
2.3 Λειτουργία των Φ/Β συστοιχιών	31
2.4 Σύνδεση Φωτοβολταϊκών Κυψελών σε Σειρά και Παράλληλα	32
2.4.1. Σύνδεση σε Σειρά	33
2.4.2. Σύνδεση σε Παραλληλία	34
2.5. Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών Κυψελών	36
2.6. Μετατροπείς (inverters)	37
2.6.1. Μετατροπείς συνεχούς τάσης DC/DC.....	37
2.6.2. DC-AC Μετατροπέας Τάσης	38

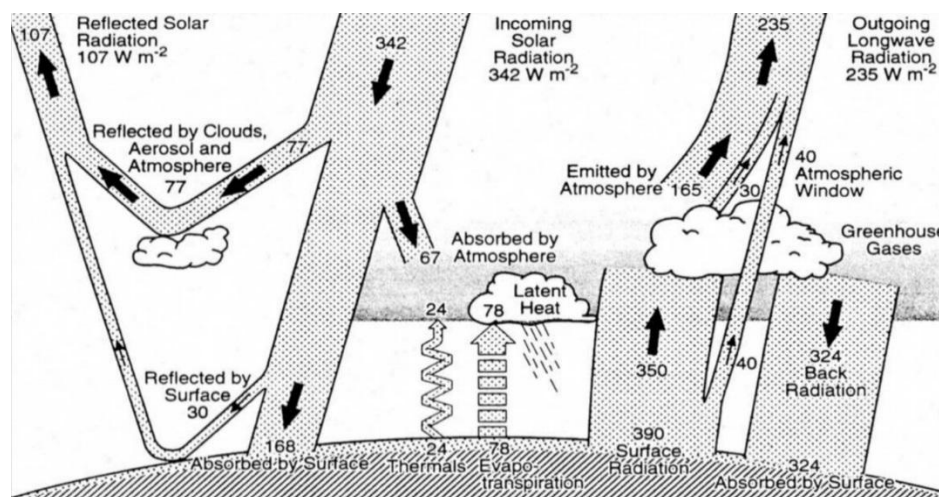
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</u>	Επίδραση Σκίασης στην Ενεργειακή Παραγωγή των Φωτοβολταϊκών Κυψελών	40
3.1	Παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από φωτοβολταϊκή κυψέλη χωρίς σκίαση..	43
3.2	Επίδραση της μερικής σκίασης των φ/β κυψελών.....	45
3.2.1.	Επίδραση ποσοστού σκίασης.....	47
3.2.2.	Αριθμός σκιασμένων κυψελών ανά ομάδα.....	49
3.2.3.	Σκίαση καθέτων σειρών στο κατακόρυφο φ/β πλαίσιο	52
3.2.4.	Σκίαση οριζόντιων σειρών στο κατακόρυφο φ/β πλαίσιο	54
3.2.5.	Επίδραση της μερικής σκίασης στις επιδόσεις του φ/β ανάλογα με τον αριθμό των κυψελών στο πλαίσιο	57
3.2.6.	Υπολογισμός ενεργειακής απώλειας λόγω μερικής σκίασης σε επίπεδο φωτοβολταϊκής κυψέλης.....	59
3.2.7.	Σκίαση από διαφορετικά εμπόδια.....	63
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</u>	Δίοδοι – Τρόποι Αντιμετώπισης	68
4.1	Δίοδοι κυκλωμάτων	68
4.2	Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου	74
4.3	Ο ρόλος των διόδων παράκαμψης (bypass).....	75
4.4	Συντελεστής επίδρασης σκίασης (SIF)	77
4.4.1.	Περίπτωση κυψελών σε παράλληλη σύνδεση.....	77
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		81

1. Υπολογισμός σκιάσεων σε ηλιακές εγκαταστάσεις

1.1 Υπολογισμός και συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας

Ο ήλιος παράγει τεράστιες ποσότητες ενέργειας. Ένα μέρος της ηλιακής ενέργειας φτάνει στη Γη σε ικανοποιητική ποσότητα (20-30%) παρά τη μεγάλη απόσταση που χωρίζει την Γη από τον Ήλιο. Η ένταση της ηλιακής ενέργειας και η μετατρεψιμότητά της σε άλλες μορφές ενέργειας τροποποιείται βάσει διαφόρων παραγόντων, όπως είναι ο χρόνος, η περιστροφική κίνηση της γης από το ύψος του ηλίου πάνω από τον ορίζοντα του τόπου, από την πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα και από γεωγραφικές συντεταγμένες που αφορούν στον χώρο.

Γνωστό είναι ακόμη και το λεγόμενο ατμοσφαιρικό παράθυρο. Πρώτα απ' όλα, είναι γνωστό πως τα κύρια αέρια συστατικά της ατμόσφαιρας (N_2 , O_2) δεν απορροφούν υπέρυθρη ακτινοβολία. Αντιθέτως, δευτερεύοντα συστατικά, όπως H_2O , CO_2 , O_3 - γνωστά και ως αέρια του θερμοκηπίου- απορροφούν υπέρυθρη ακτινοβολία. Η φασματική περιοχή μεταξύ 8 και 13,5 μm συμπίπτει με το μέγιστο της εκπεμπόμενης από τη Γη υπέρυθρης ακτινοβολίας και είναι γνωστή ως ατμοσφαιρικό παράθυρο. (Φωτιάδη, 2015)



Σχήμα 1.1: Το ισοζύγιο ακτινοβολίας και ενέργειας της Γης.

(Kiehl & Trenberth, 1997).

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 1.1., διαμορφώνεται ουσιαστικά ένα ισοζύγιο ηλιακής ακτινοβολίας και ενέργειας από και προς τη Γη. Αναλυτικότερα, η ακτινοβολούμενη ισχύς συμβολίζεται ως G και ορίζεται ως ισχύς που λαμβάνεται ανά μονάδα επιφάνειας, με μονάδα μέτρησης το Watt ανά τετραγωνικό μέτρο (W/m^2). Η ακτινοβολούμενη ενέργεια συμβολίζεται ως E και είναι η ενέργεια που λαμβάνεται

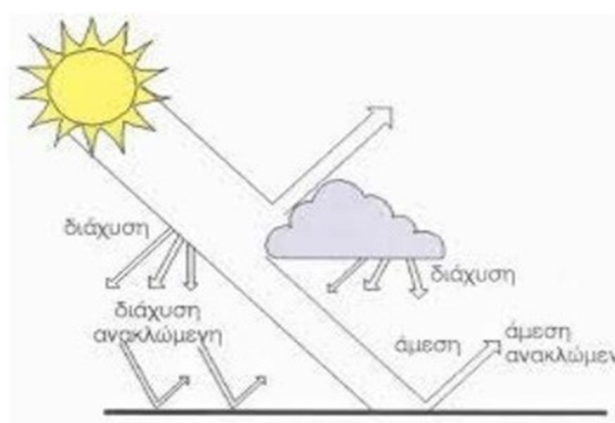
ανά μονάδα επιφάνειας, με μονάδα μέτρησης το Joule ανά τετραγωνικό μέτρο (J/m^2). Συχνή μονάδα είναι και το watt-hour (Wh). Επίσης η I μπορεί να εκφραστεί σε Wh/m^2 .

Η ακτινοβολούμενη ισχύς μετατρέπεται σε ακτινοβολούμενη ενέργεια με πολλαπλασιασμό με τη χρονική διάρκεια. Εάν T είναι η διάρκεια της μέτρησης:

$$G = E \cdot T$$

Η ακτινοβολία μπορεί να διακριθεί σε **ανακλώμενη (I_R)**, **άμεση (I_D)** και **διάχυτη (I_d)**. Πρόκειται για τις τρεις συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.2. Το άθροισμα αυτών των παραπάνω ονομάζεται **ολική ακτινοβολία (I)** και υπολογίζεται από τον τύπο: $I = I_D + I_d + I_R$.

Η ενέργεια από τις αντιδράσεις σύντηξης του εσωτερικού του Ηλίου μεταφέρεται μέσω της φωτόσφαιρας, η οποία απορροφά και εκπέμπει ένα συνεχές φάσμα ακτινοβολίας και είναι η πηγή του μεγαλύτερου μέρους ορατής ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη. Οποιοδήποτε αντικείμενο εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, υπό την προϋπόθεση ότι η θερμοκρασία του είναι πάνω από 0 K.



Σχήμα 1.2: Οι τρεις συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διαδρομή από την ατμόσφαιρα μέχρι την επιφάνεια της γης (Ανδρουτσόπουλος και συν., 2011).

1.2 Διαθέσιμη Ηλιακή Ενέργεια σε Επίπεδες Επιφάνειες

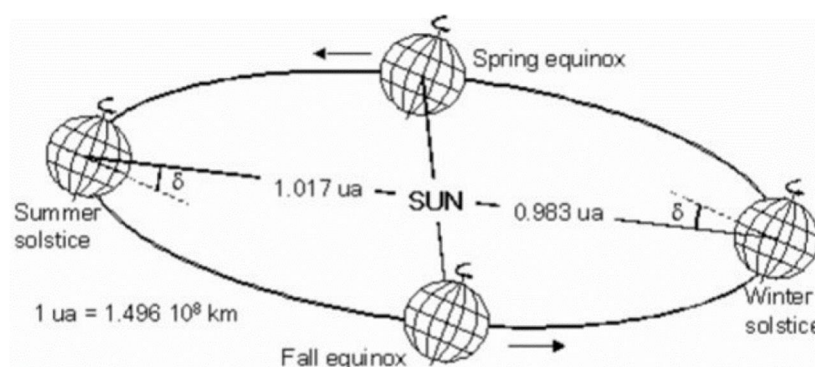
Τα συστήματα ηλιακής ενέργειας διαθέτουν επιφάνεια που συλλέγει την ηλιακή ακτινοβολία, για παράδειγμα μία **φωτοβολταϊκή συστοιχία** ή έναν **ηλιακό συλλέκτη**. Προκειμένου αυτή η επιφάνεια να τοποθετηθεί στην κατάλληλη θέση, πρέπει να μπορεί να εκτιμηθεί η ποσότητα ηλιακής ενέργειας που συλλέγουν οι επιφάνειες με διαφορετικό προσανατολισμό. Αυτό είναι πολύπλοκο αφενός γιατί ο Ήλιος κινείται στον ουρανό και φτάνει απευθείας σε μια σταθερή επιφάνεια και αφετέρου επειδή οι διαφορετικές συνιστώσες της ακτινοβολίας (**άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη** από το έδαφος) φτάνουν στην επιφάνεια από διαφορετικές γωνίες. Οι μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες κάνουν επίσης τη διαθεσιμότητα αυτών των διαφορετικών συνιστωσών να διαφέρουν από τη μια χρονική στιγμή στην άλλη. Για έναν αξιόπιστο υπολογισμό της απόδοσης, πρέπει να είναι δυνατή η μετατροπή των διαθέσιμων δεδομένων ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας προς το οριζόντιο επίπεδο σε τιμές ακτινοβολίας προς την κεκλιμένη επίπεδη επιφάνεια (Ανδρουτσόπουλος και συν., 2011).

Επομένως είναι ανάγκη να οριστεί ένα μαθηματικό πλαίσιο για τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας που μετράται στο οριζόντιο επίπεδο σε ακτινοβολία σε μια επίπεδη επιφάνεια με μη καθορισμένο προσανατολισμό. Αυτό το σύνολο εξισώσεων χρησιμοποιείται συχνά σε επαγγελματικό λογισμικό για προσομοίωση και βελτιστοποίηση των ηλιακών θερμικών ή φωτοβολταϊκών συστημάτων που βασίζεται σε μετρημένη οριζόντια ακτινοβολία, ενώ είναι χρήσιμο και για την κατανόηση των σημαντικών παραμέτρων που επηρεάζουν τη συλλογή της ηλιακής ενέργειας σε μια επιφάνεια.

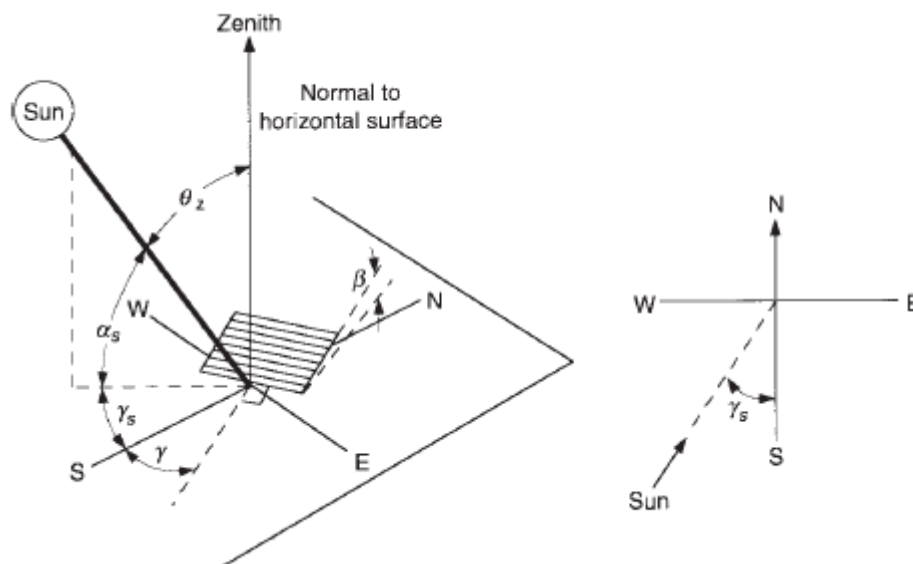
1.3 Ηλιακή Γεωμετρία και ηλιακές γωνίες

Η ποσότητα της ακτινοβολίας που διαπερνά την ατμόσφαιρα εξαρτάται από τη συγκεκριμένη θέση της γης στην τροχιά της γύρω από τον ήλιο, την περιστροφή της γύρω από τον πολικό άξονά της και τη θέση αυτού του σημείου στη γη.

Η γη διαγράφει μια ελλειπτική κυκλική τροχιά, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.3. Η μέση απόσταση μεταξύ του ήλιου και της γης είναι περίπου ίση με 1.496×10^8 χλμ., δηλαδή **1 αστρονομική μονάδα (AU)**.



Σχήμα 1.3 : Η τροχιά της γης γύρω από τον ήλιο κατά το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο, όπου δ η γωνία της ηλιακής απόκλισης (Wald, 2019).



Σχήμα 1.4 : Αζιμούθια γωνία γ του πλαισίου, κλίση του πλαισίου β , ω ωριαία γωνία, αζιμούθια γωνία γ_s του ηλίου, ύψος ηλίου α_s , ζενίθια γωνία θ_z . (Duffie & Beckman, 2013)

Δεδομένου ότι ο άξονας της περιστροφής της γης που διέρχεται από τους δύο πόλους είναι κεκλιμένος σε σχέση με το επίπεδο της τροχιάς, το βόρειο ημισφαίριο είναι πιο κοντά στον ήλιο τον Ιούλιο σε σχέση με το νότιο ημισφαίριο. Κατ' αυτό τον τρόπο ορίζεται το αστρονομικό καλοκαίρι που αρχίζει στις 21-22 Ιουνίου, γνωστό ως **θερινό ηλιοστάσιο**, και το οποίο τελειώνει τρεις μήνες αργότερα. Αντίθετα, το βόρειο ημισφαίριο βρίσκεται μακρύτερα από τον ήλιο σε σχέση με το νότιο ημισφαίριο κατά τη διάρκεια του αστρονομικού χειμώνα, ο οποίος αρχίζει στις 21-22 Δεκεμβρίου, γνωστού ως **χειμερινό ηλιοστάσιο**. Αυτά τα καλοκαίρια και οι χειμώνες διαφέρουν από τα μετεωρολογικά καλοκαίρια και τους χειμώνες που υπάρχουν και στα δύο ημισφαίρια.

Τέλος, η καθημερινή περιστροφή της Γης από μόνη της προκαλεί την έννοια μιας μέσης ηλιακής ημέρας χωρισμένης σε 24 ώρες με 60 λεπτά τη κάθε μία. Οι χρονικές παράμετροι (έτος, ημέρα, ώρα) είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό της φαινομενικής θέσης του Ήλιου στον ουρανό και, κατά συνέπεια, της ακτινοβολίας στο επίπεδο του εδάφους που μπορεί να εκμεταλλευτεί.

Προκειμένου να γίνουν αλλαγές μεταξύ οριζόντιων και κεκλιμένων επιπέδων, είναι απαραίτητο να είναι γνωστές οι γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ των επιπέδων και του Ήλιου σε οποιαδήποτε στιγμή του χρόνου. Για τον ορισμό αυτών των σχέσεων χρησιμοποιείται ένα σύνολο γωνιών.

Πρώτα, είναι οι σταθερές γωνίες που καθορίζουν τον προσανατολισμό και τη θέση του κεκλιμένου επιπέδου:

- β κλίση του επιπέδου σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο: $0^{\circ} \leq \beta \leq 180^{\circ}$
- γ γωνία αζιμουθίου της κεκλιμένης επιφάνειας, μηδέν στο νότο και θετική στη δύση: $-180 \leq \gamma \leq 180^{\circ}$
- φ , γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας, θετικό στο βορά: $-90^{\circ} \leq \varphi \leq 90^{\circ}$

Δεύτερον, έχουμε τις δύο χρονικά μεταβαλλόμενες γωνίες που καθορίζουν τη θέση του Ήλιου σε σχέση με την ουράνια σφαίρα και τη Γη:

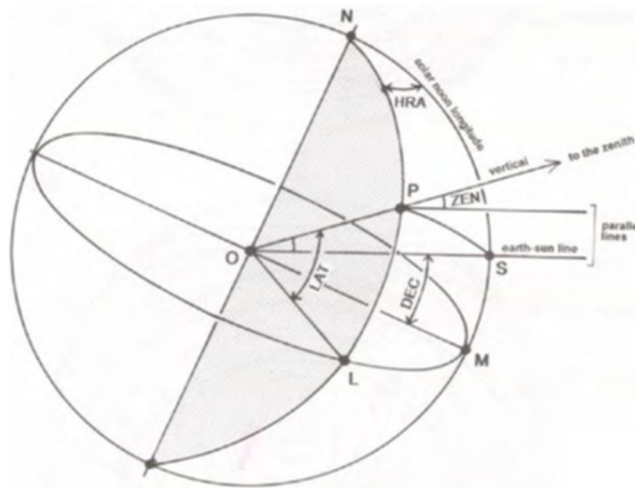
- δ , ηλιακή απόκλιση, η κάθετη απόσταση του ήλιου στην ουράνια σφαίρα, που μετράται σε μοίρες πάνω ή κάτω από τον ουράνιο ισημερινό, θετική στον βορά: $-23.45^{\circ} \leq \delta \leq 23.45^{\circ}$
- ω , ωριαία γωνία, η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου σε σχέση με τον τοπικό μεσημβρινό, μηδέν το μεσημέρι, θετική το απόγευμα: $-180^{\circ} \leq \omega \leq 180^{\circ}$

Η ηλιακή απόκλιση καθιστά έναν πλήρη κύκλο σε ένα χρόνο και συνεπώς μπορεί να υπολογισθεί με λογική ακρίβεια συναρτήσει της ημέρας του έτους **d**:

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \frac{284 + d}{365} \right)$$

Η ωριαία γωνία, η οποία είναι το μέτρο του χρόνου στις εξισώσεις, προσδιορίζεται από τη χρονική στιγμή της ημέρας. Κάνει έναν πλήρη κύκλο για 24 ώρες. Δεδομένου ότι ο Ήλιος μετατοπίζεται 15° προς τα δυτικά κάθε ώρα λόγω της περιστροφής της Γης γύρω από τον δικό της άξονα και είναι μηδέν στο ηλιακό μεσημέρι, η ωριαία γωνία είναι: $\omega = 15 \left(\frac{t_s}{60} - 12 \right)$ (Κατσαπρακάκης & Μονιάκης, 2015).

Όπου t_s είναι η ηλιακή ώρα της ημέρας σε λεπτά. Από αυτές τις γωνίες μπορεί να υπολογιστεί και η γωνία πρόσπτωσης (θ) (Senpınar, 2018).



Σχήμα 1.5.: Σφαιρική τριγωνομετρία: η σφαίρα της Γης και ποικίλες γωνίες για αναλυτικούς υπολογισμούς (Szokolay, 2007).

1.4. Μέθοδοι υπολογισμού σκίασης

Η ανάλυση των διαφόρων επιπτώσεων λόγω της παρουσίας μερικής σκίασης σε φωτοβολταϊκά συστήματα είναι απαραίτητη για την αποφυγή υπερβολικών απωλειών ισχύος και για να προσδιοριστεί, στις περιπτώσεις αυτές, ποιά είναι η καλύτερη διαμόρφωση για την ελαχιστοποίηση των ανεπιθύμητων ενεργειών.

Λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες στην απόδοση που προκαλούνται από διάφορους τύπους σκίασης, η σημασία της συνεκτίμησης των αποτελεσμάτων της σκίασης και της εκτίμησής τους είναι κρίσιμη, καθώς με τον τρόπο αυτό είναι δυνατό να αποφευχθούν απροσδόκητα αποτελέσματα κατά την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος σε κτήριο.

Σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα που σχηματίζεται από πολλές σειρές πλαισίων, η σκίαση που προκαλείται μειώνει την απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε τρεις περιπτώσεις:

- 1. Προσωρινή σκίαση**
- 2. Σκίαση λόγω της τοποθεσίας ή**
- 3. Σκίαση από το ίδιο το κτήριο**

Πρώτα απ' όλα, η προσωρινή σκίαση προκύπτει από την: παρουσία χιονιού, πεσμένων φύλλων σε δασικές περιοχές, περιττωμάτων πουλιών. Για παράδειγμα, το χιόνι μπορεί να είναι ένας σημαντικός παράγοντας για ένα σύστημα που βρίσκεται σε μια διαρκώς χιονισμένη τοποθεσία με έντονες βροχοπτώσεις. Η μονιμότητα αυτού του «ρύπου» θα είναι μικρότερη ως αποτέλεσμα του «αυτό-καθαρισμού» του συστήματος που προκαλείται από το νερό των βροχοπτώσεων.

Αναφορικά με τη σκίαση ως αποτέλεσμα της θέσης, αυτή συσσωρεύει όλη τη σκίαση που παράγεται από τα γύρω υψηλά αντικείμενα, συμπεριλαμβανομένων των γειτονικών κτηρίων και των δέντρων που μπορούν ενδεχομένως να σκιάσουν το φωτοβολταϊκό σύστημα ή τουλάχιστον να σκοτεινιάσουν τον ορίζοντα. Η ύπαρξη καλωδίων πάνω από το κτήριο μπορεί επίσης να έχει ιδιαίτερα αρνητική επίδραση, προβάλλοντας σκιές που κινούνται συνεχώς.

Επιπρόσθετα, η σκίαση από το ίδιο το κτήριο προέρχεται από καμινάδες, κεραίες, κεραυνούς, δορυφορικές κεραίες και προεξοχές οροφής του κτηρίου. Αυτές οι σκιές είναι σταθερές, επομένως θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη προσεκτικά κατά το σχεδιασμό μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, είτε με προσπάθεια να αποφευχθούν μετακινώντας τη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, είτε μετακινώντας το αντικείμενο που προκαλεί τη σκιά. Εάν καμία από αυτές τις λύσεις δεν είναι δυνατή, η επίδραση της σκίασης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί στη φάση σχεδιασμού του συστήματος, για παράδειγμα μέσω της επιλογής του τρόπου διασύνδεσης των κυψελών και των μονάδων (Τζινευράκης)

Μια άλλη περίπτωση σκίασης είναι κι εκείνη που προκύπτει από την μπροστινή σειρά φωτοβολταϊκών. Το τελευταίο είναι ιδιαίτερα σοβαρό εάν η απόσταση μεταξύ των σειρών είναι μικρή, η θέση του ήλιου είναι χαμηλή και η κλίση είναι τέτοια ώστε ένα μεγάλο ποσοστό της συνολικής ακτινοβολίας να σκιάζεται πιθανώς οδηγώντας σειρές πλαισίων να γίνουν μερικώς ή ακόμη και πλήρως σκιασμένες από τις προηγούμενες σειρές.

Τα παραπάνω παραδείγματα ενισχύουν τη σημασία της λεπτομερούς γνώσης του συστήματος και των απωλειών ενέργειας, προκειμένου να προσδιοριστεί η επίδρασή του στην απόδοση της εγκατάστασης.

Ο Συντελεστής Σκίασης (**Shade Factor-SF**) αναφέρεται στο ποσοστό κατά το οποίο σκιάζεται το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Η αριθμητική εκτίμηση του συντελεστή σκίασης υποδεικνύει το ποσοστό της πιθανής ακτινοβολίας που θα μπορούσε να αποκλειστεί από αντικείμενα στον ορίζοντα σε διαφορετικές ώρες της ημέρας και του έτους, τιμή που είναι δυνατόν να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους.

1.4.1. Υπολογισμοί με βάση την παρατήρηση

Ένα από τα πρωταρχικά στάδια στην εκτίμηση της ακτινοβολίας σε μια σκιασμένη φωτοβολταϊκή γεννήτρια είναι η διεξαγωγή έρευνας για όλα τα εμπόδια που μπορούν να βρεθούν στο περιβάλλον της, όπως για παράδειγμα δέντρα και κτήρια.

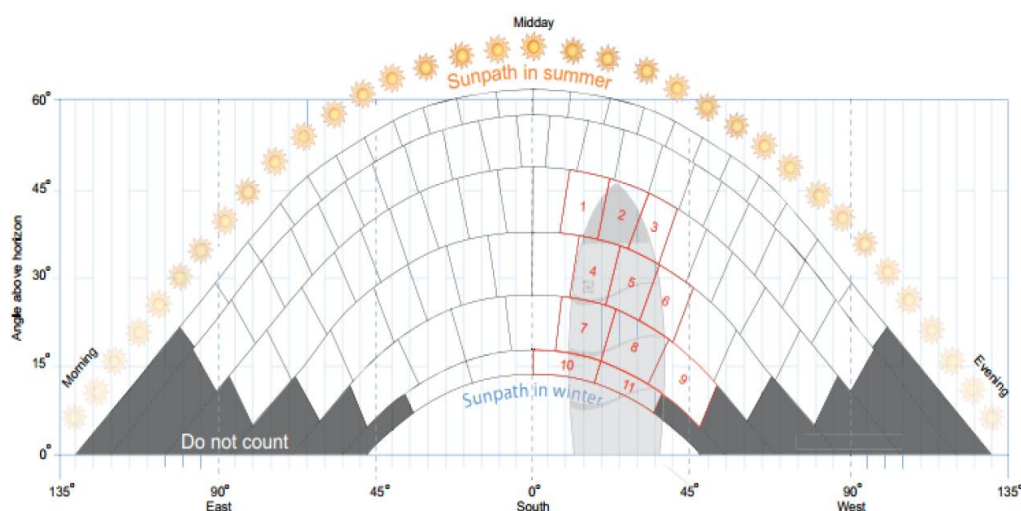
Στον ορίζοντα, εάν δεν υπάρχει καθόλου σκίαση, η αξιολόγηση του συντελεστή σκίασης μπορεί να θεωρηθεί ανύπαρκτη και λαμβάνεται μια τιμή συντελεστή σκίασης ίση με 1 για όλους τους υπολογισμούς. Ωστόσο, όταν υπάρχει πιθανότητα σκίασης, θα πρέπει πάντα να υπολογίζεται ο συντελεστής σκίασης και ο υπολογισμός να διεξάγεται από μια τοποθεσία που αντιπροσωπεύει το τμήμα του πλαισίου που επηρεάζεται πιθανότατα από τη σκιά. Η σκίαση προκαλείται από εμπόδια που βρίσκονται νότια της επιφάνειας του φ/β πλαισίου, για αυτό το λόγο θέλουμε καθαρό Νότο, να μην βρίσκονται σε αυτόν δηλαδή εμπόδια που προκαλούν σκίαση στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

Ένας τρόπος να υπολογιστεί η ακτινοβολία που χάνεται από αντικείμενα που βρίσκονται στον ορίζοντα σε διαφορετικές ώρες της ημέρας και του έτους, είναι να σχεδιαστεί ένα διάγραμμα διαδρομής ήλιου με διαφορετικά τόξα, το καθένα από τα οποία να αναφέρεται στους μήνες του έτους με γραμμές για την ώρα της ημέρας με αποτέλεσμα να υπάρχουν συνολικά 84 τμήματα, το καθένα με αποδιδόμενη τιμή 1%, που χρησιμοποιούνται για να αναλυθεί η σκίαση από οποιοδήποτε αντικείμενο στον ορίζοντα.

Υπάρχουν κι άλλοι τρόποι για να σχεδιαστεί αυτό το διάγραμμα με αποτέλεσμα περισσότερα ή λιγότερα τμήματα, ανάλογα με τον αριθμό των τόξων και γραμμών, το καθένα με μικρότερη ή υψηλότερη τιμή για τις αναλύσεις σκίασης αντίστοιχα. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι όσο υψηλότερος είναι ο αριθμός των τμημάτων, τόσο καλύτερη είναι η ακρίβεια για τον υπολογισμό του συντελεστή σκίασης.

Ο παρατηρητής πρέπει να σταθεί όσο το δυνατόν πλησιέστερα στη βάση και το κέντρο της προτεινόμενης συστοιχίας και να στραφεί προς το Νότο, εκτός εάν υπάρχει σκίαση από αντικείμενα σε απόσταση εντός 10 μέτρων. Μόλις τοποθετηθεί σωστά, ο παρατηρητής θα πρέπει να σχεδιάσει μια γραμμή που δείχνει την άνω άκρη

οποιαδήποτε αντικείμενων που είναι ορατά στον ορίζοντα, είτε κοντά είτε μακριά, στο διάγραμμα της πορείας του ήλιου. Μετά τη σχεδίαση της οριζόντιας γραμμής, καταμετράται ο αριθμός των τμημάτων τα οποία έχει αγγίξει η γραμμή ή που βρίσκονται εντός της γραμμής του ορίζοντα. Στο Σχήμα 1.6. παρουσιάζεται ένα παράδειγμα αυτής της μεθόδου όπου είναι δυνατόν να διαπιστωθεί ότι υπάρχουν 11 τμήματα που καλύπτονται ή αγγίζονται από την οριζόντια γραμμή (Pedro, 2016).



Σχήμα 1.6: Διάγραμμα πορείας ήλιου από αντικείμενα που προκαλούν σκίαση και βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη των 10 μέτρων (Pedro, 2016).

Ο συνολικός αριθμός των τμημάτων πολλαπλασιάζεται με την τιμή του κάθε τμήματος 0,01 (1%) και η συνολική τιμή αφαιρείται από το 1 (100%). Στο παράδειγμά μας, ο Συντελεστής Σκίασης υπολογίζεται ως εξής:

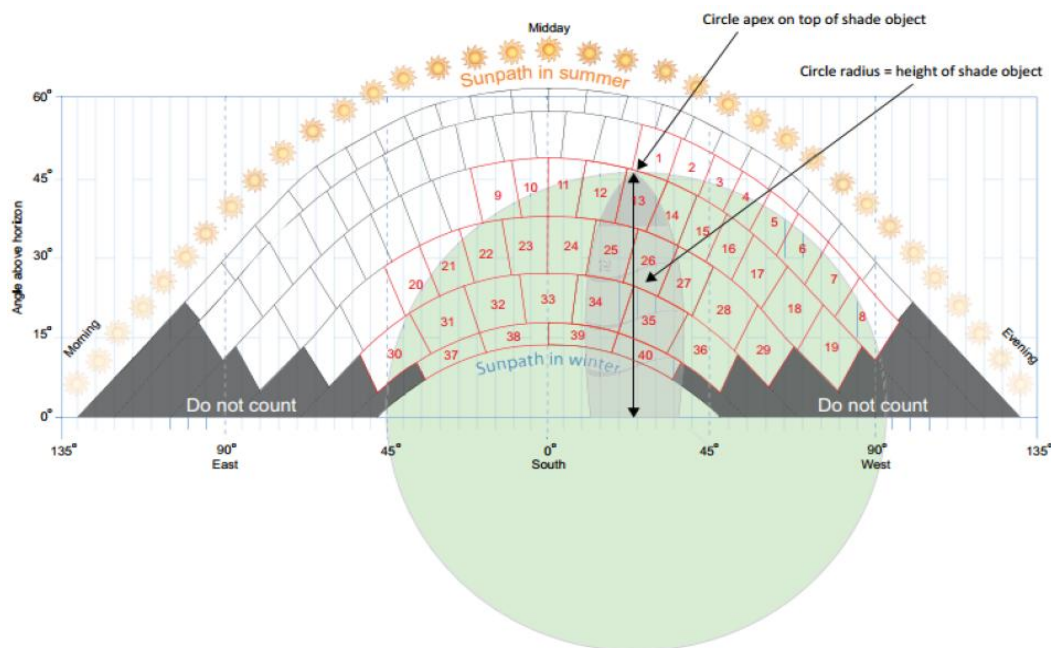
$$1 - (11 \times 0,01) = 1 - 0,11 = 0,89$$

Εκτιμάται ότι αυτή η μέθοδος αξιολόγησης σκιάς θα αποφέρει αποτελέσματα εντός του 10% της πραγματικής ετήσιας απόδοσης ενέργειας για τα περισσότερα συστήματα. Ασυνήθιστα συστήματα ή περιβάλλοντα ενδέχεται να έχουν διαφορετικά αποτελέσματα.

Η διαφορά στην εξέταση της σκιάς αντικείμενων που βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη των 10 μέτρων ή εντός αυτής της απόστασης είναι ότι η επίπτωση στην απόδοση του συστήματος είναι μεγαλύτερη σε αποστάσεις μικρότερες των 10 μέτρων.

Εάν υπάρχουν αντικείμενα που είναι κοντά με τη συστοιχία -σωλήνες εξαερισμού, καμινάδες, δορυφορικά πιάτα- είτε το φωτοβολταϊκό πρέπει να επανατοποθετηθεί έξω από τη ζώνη σκίασης, είτε το αντικείμενο που ρίχνει τη σκιά πρέπει να μετατοπιστεί. Σε περίπτωση που αυτό δεν είναι δυνατό, η αξιολόγηση της σκίασης πρέπει να ληφθεί από μια θέση πιο αντιπροσωπευτική του κέντρου και της βάσης της δυνητικά επηρεασμένης θέσης του φωτοβολταϊκού.

Σύμφωνα με την παραπάνω περιγραφή, σχεδιάζεται μια τυπική γραμμή του ορίζοντα για να αντιπροσωπεύει τη χειρότερη περίπτωση. Αυτό σημαίνει ότι ο παρατηρητής πρέπει να στέκεται στη θέση του φωτοβολταϊκού που επηρεάζεται περισσότερο από τη σκιά. Επιπλέον, αποτυπώνονται τυχόν αντικείμενα στο διάγραμμα του ορίζοντα, τα οποία βρίσκονται σε απόσταση 10 μέτρων ή πιο κοντά σε οποιοδήποτε μέρος της συστοιχίας. Τα αντικείμενα αυτά θα πρέπει να έχουν προστιθέμενο κύκλο σκίασης στο διάγραμμα για να αντικατοπτρίζουν τη σοβαρή επίδραση που ενδέχεται να έχουν αυτά τις κυψέλες στην απόδοση του φωτοβολταϊκού. Όταν υπάρχουν πολλά αντικείμενα εντός 10 μέτρων, τότε θα πρέπει να σχεδιάζονται πολλοί κύκλοι, ένας για κάθε αντικείμενο.



Σχήμα 1.7: Διάγραμμα πορείας ήλιου που δείχνει την σκίαση που προκαλείται από εμπόδια που βρίσκονται σε απόσταση εντός 10 μέτρων (Pedro, 2016).

Ο κύκλος σκίασης πρέπει να έχει ακτίνα ίση με το ύψος του αντικειμένου και πρέπει να βρίσκεται έτσι ώστε η κορυφή του κύκλου να βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο

του αντικειμένου σκίασης. Όλα τα τμήματα που αγγίζονται από ή βρίσκονται μέσα στον κύκλο σκίασης θα πρέπει να υπολογίζονται ως μέρος της συνολικής ανάλυσης σκίασης.

Προσδιορισμός Συντελεστή Σκίασης για το παράδειγμα της παραπάνω εικόνας:

$$1 - (40 \times 0,01) = 1 - 0,4 = 0,6$$

Τα δύο παραπάνω διαγράμματα χρησιμοποιούν τα ίδια αντικείμενα σκίασης, υποθέτοντας ότι στην 2^η περίπτωση το αντικείμενο είναι πιο κοντά στον πίνακα και λαμβάνοντας υπόψη την ίδια τιμή ανά ενότητα, έχει ως αποτέλεσμα έναν συντελεστή σκίασης 0,6, όπως ο υπολογισμός δείχνει, σε σύγκριση με τον συντελεστή 0,89 που προέκυψε στον προηγούμενο υπολογισμό.

1.4.2. Υπολογισμός σκίασης με ημικύκλιο

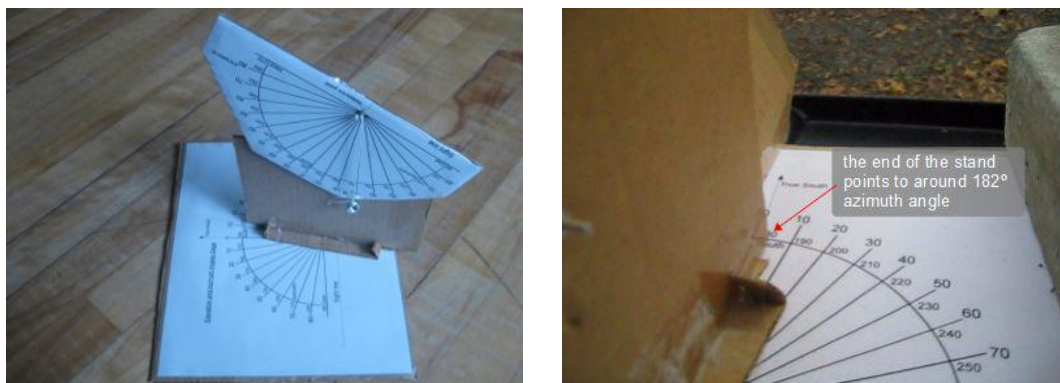
Ένας άλλος τρόπος να υπολογιστεί η σκίαση είναι με **ημικύκλιο**. Το ημικύκλιο κατασκευάστηκε από σκληρό χαρτόνι το οποίο κόψαμε κατά μήκος του ημικυκλίου και έπειτα το τρυπήσαμε στο κέντρο του κύκλου στερεώνοντας μια βίδα και δένοντας σε αυτήν σκληρό σπάγκο. Στον σπάγκο δέσαμε μεταλλικό παξιμάδι (περικόχλιο) ως βαρίδι για τον υπολογισμό της γωνίας. Η όλη κατασκευή στερεώθηκε κάθετα πάνω σε τυπωμένο χαρτί που μας δείχνει τις εσωτερικές τιμές (γωνία αζιμουθίου) και εξωτερικές (ηλιακό υψόμετρο) βλ. σχήμα 1.11. Η διαδικασία είναι η ακόλουθη:

Βήμα 1^ο: Κατεβάζουμε από το διαδίκτυο το κατάλληλο τυπικό διάγραμμα της πορείας του ήλιου (βλ. σχήμα 1.12), αφού πρώτα εισαγάγουμε τις τιμές που αφορούν στη χώρα μας, στην προκειμένη την Ελλάδα και συγκεκριμένα την Αθήνα.

Βήμα 2^ο: Έπειτα διαλέγουμε μια τοποθεσία και επιλέγουμε ένα αντικείμενο- εμπόδιο, τη σκίαση του οποίου επιθυμούμε να υπολογίσουμε. Στην παρούσα μέτρηση επιλέχθηκε ένας φοίνικας.

Βήμα 3^ο: Τοποθετούμε το ημικύκλιό μας (σχήμα 1.10) με κατεύθυνση προς τον Νότο (180°). Πρόκειται στην ουσία για ένα μοιρογνωμόνιο που τοποθετείται κάθετα πάνω σε ένα άλλο απεικονίζοντας τον προσανατολισμό και το υψόμετρο του εμποδίου. Χρειαζόμαστε τρεις τιμές προκειμένου να αποτυπώσουμε στο διάγραμμα τη σκίαση που προκαλεί ο φοίνικας στη θέση που βρισκόμαστε: δυο τιμές για την αζιμούθια γωνία (azimuth angle) (εσωτερικές γωνίες) και μια για το ηλιακό υψόμετρο (εξωτερικές γωνίες) βλ. σχήμα 1.11. Στην περίπτωση μας και οι τρεις τιμές προκύπτουν απευθείας από το ημικύκλιό μας.

Βήμα 4°: Όπως προαναφέρθηκε λοιπόν οι τιμές για τη γωνία του αζιμουθίου είναι δύο, καθώς μετακινώντας το ημικύκλιο δεξιά κι αριστερά καταγράφουμε το πλάτος του αντικειμένου πάνω στις τιμές που μας δίδονται στο μοιρογνωμόνιο του ημικυκλίου.

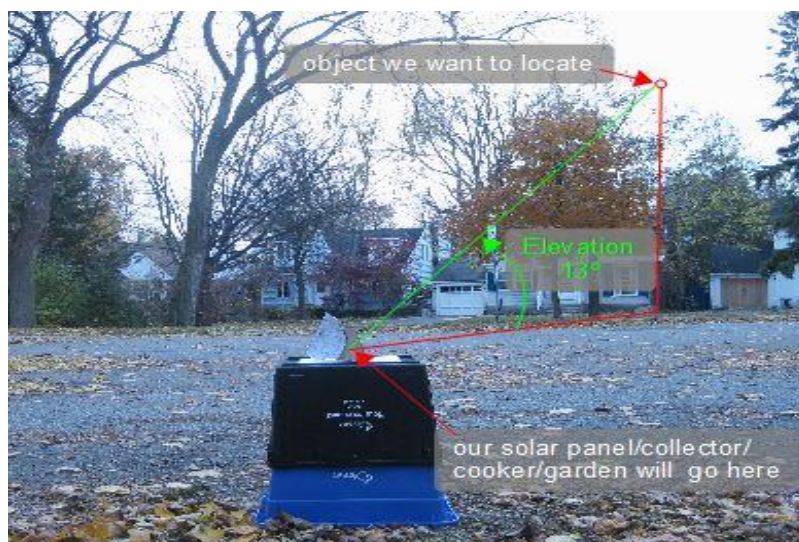


Σχήμα 1.8 : Υπολογισμός γωνίας αζιμουθίου με χρήση ημικυκλίου (Dufresne, 2020).

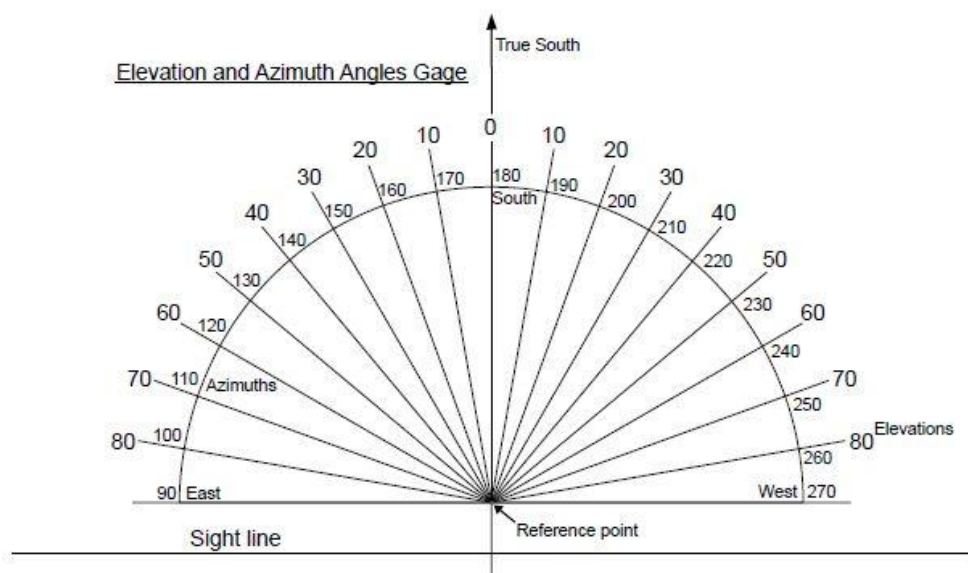
Βήμα 5°: Όσον αφορά το ηλιακό υψόμετρο (altitude angle) τοποθετούμε το εργαλείο σημαδεύοντας την ευθεία της κορυφής του αντικειμένου και καταγράφουμε ποιο ηλιακό υψόμετρο θα μας δείξει το βαρίδιο (βλ. σχήμα 1.10). Οι εσωτερικές τιμές αφορούν την γωνία του αζιμούθιου και οι εξωτερικές το ηλιακό υψόμετρο.



Σχήμα 1.9 : Μέτρηση σκίασης προκαλούμενης από φοίνικα με χρήση ημικυκλίου.



Σχήμα 1.10 : Υπολογισμός ηλιακού υψομέτρου (Dufresne, 2020).

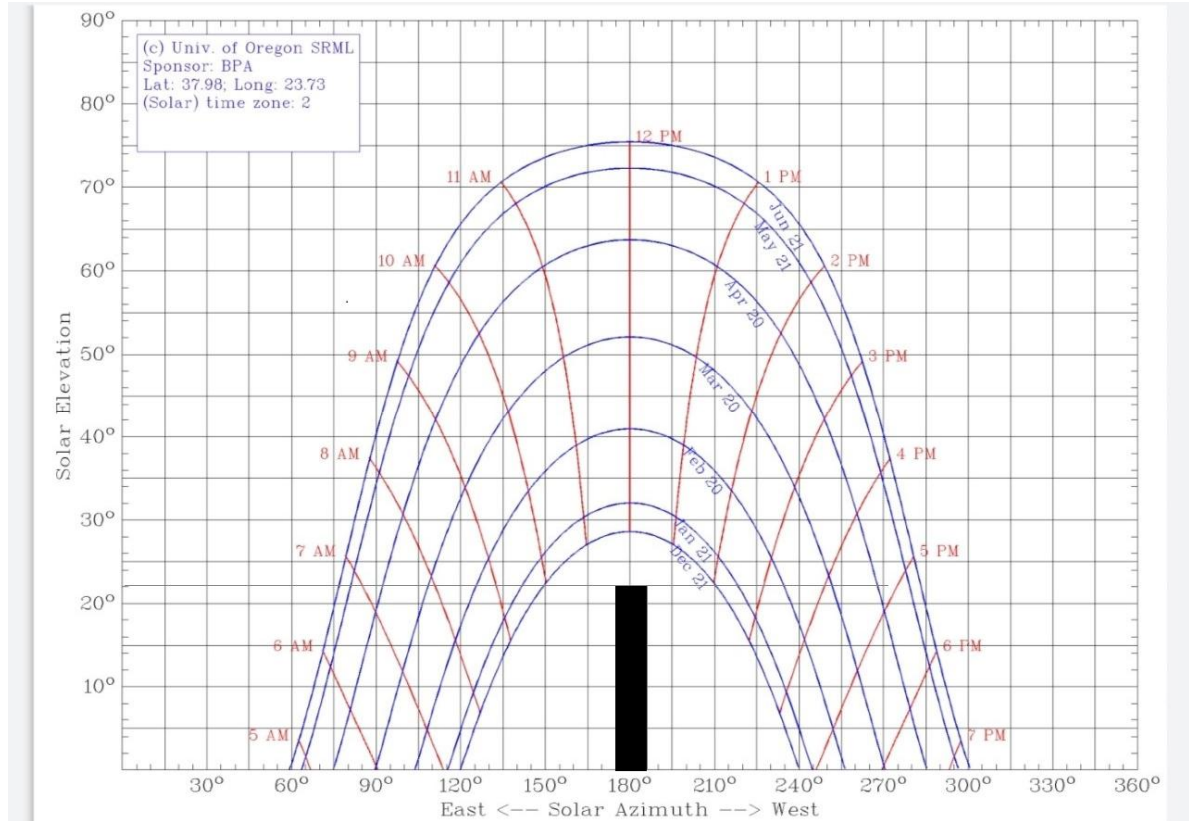


Σχήμα 1.11 : Ημικύκλιο για τη μέτρηση των γωνιών αζιμούθιου και ηλιακού υψομέτρου. (Dufresne, 2020).

Βήμα 6^ο: Στη συνέχεια, έχοντας τις μετρήσεις μας τις τοποθετούμε στο διάγραμμα πορείας του ηλίου για τη χώρα μας. Στον κάθετο άξονα εντοπίζουμε τις τιμές του ηλιακού υψομέτρου και στον οριζόντιο αυτές της γωνίας αζιμούθιου.

Βήμα 7^ο: Σύμφωνα με τις παραπάνω μετρήσεις του ηλιακού υψομέτρου προκύπτει 22° και οι γωνίες αζιμούθιου 172° και 183° . Τοποθετώντας τες στο διάγραμμα πορείας του ηλίου σχηματίζεται ένα κάθετο ορθογώνιο παραλληλόγραμμο. Πρόκειται για την απεικόνιση της σκίασης που προκαλεί ο φοίνικας.

Από το διάγραμμα πορείας του ηλίου μπορεί να διαβάσει κανείς αν θα προκύψει σκίαση και πόσο θα διαρκέσει αυτή. Σύμφωνα με το δικό μας διάγραμμα δεν προκύπτει σκίαση. Με άλλα λόγια, ο φοίνικας δεν θα φτάσει να σκιάσει το μέρος που βρισκόμαστε σε κανέναν μήνα του χρόνου άρα δεν θα υπάρξει απώλεια ηλιακής ενέργειας και κατά συνέπεια το αντικείμενο αυτό δεν θα αποτελέσει εμπόδιο.



Σχήμα 1.12.: Διάγραμμα της πορείας του ήλιου για την χώρα Ελλάδα και συγκεκριμένα για την Αθήνα [ΠΗΓΕΣ: (The Solar Planner), (UO SRML), (Gaisma)]

1.4.3. Λογισμικά καταγραφής σκίασης

Τα τελευταία χρόνια, η ανανεώσιμη ενέργεια αποτελεί μία από τις σημαντικότερες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς τη χρήση ορυκτών καυσίμων (φυσικό αέριο, πετρέλαιο, άνθρακας) και μειώνει την περιβαλλοντική ρύπανση, εμποδίζοντας την υπερθέρμανση του πλανήτη. Ως εκ τούτου, υπάρχει ανάγκη να αναπτυχθούν εργαλεία λογισμικού ικανά να προσδιορίσουν τα δυνητικά χαρακτηριστικά ενεργειακής απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Τα εργαλεία λογισμικού που σχετίζονται με τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες εργαλείων, η χρήση των οποίων εξαρτάται από το σκοπό του λογισμικού:

1. εργαλεία προ-μελέτης
2. εργαλεία εκλογής διαστάσεων
3. εργαλεία προσομοίωσης
4. εργαλεία ανοικτής αρχιτεκτονικής

Με την πάροδο του χρόνου, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θα μειωθεί, συνήθως λόγω της υγρασίας, του φαινομένου των θερμών κηλίδων, της υπεριώδους ακτινοβολίας και της διείσδυσης της υγρασίας, όπου αυτά οδηγούν σε καταστροφές του φωτοβολταϊκού πλαισίου, δηλαδή διάβρωση, αποχρωματισμό, αποκόλληση και θραύση των κυψελών.

Εκτός από τους εσωτερικούς παράγοντες, ένας περιβαλλοντικός παράγοντας που μειώνει σημαντικά την ενέργεια που παράγεται προσωρινά από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι η σκόνη, αν και η απόδοση της φωτοβολταϊκής ενέργειας θα μπορούσε να ανακτηθεί σε μεγάλο βαθμό με δραστηριότητες καθαρισμού. Επίσης, μπορεί να προκληθεί θραύση ή σπάσιμο της επιφάνειας του γυαλιού λόγω βανδαλισμού, θερμικής καταπόνησης, χειρισμού, ανέμου ή κατά την εγκατάσταση, τη συντήρηση και τη μεταφορά μονάδων στις θέσεις εγκατάστασης. Η σκόνη που κατακάθεται σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο μειώνει τον φωτισμό της απορροφώντας και διασκορπίζοντας το ηλιακό φως που δέχονται οι ηλιακές κυψέλες εκεί μειώνοντας την απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα λογισμικά προσομοίωσης για την αξιολόγηση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος για την απλοποίηση της διαδικασίας σχεδιασμού και τη μεγιστοποίηση της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

- **System Advisor Model (SAM):** είναι ένα μοντέλο απόδοσης που διατίθεται δωρεάν. Χρησιμοποιεί καιρικές συνθήκες από την Βάση Δεδομένων Ηλιακής Ακτινοβολίας των Η.Π.Α. (National Renewable Energy Laboratory -NREL-, Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής) και κάνει προβλέψεις απόδοσης και κόστους από τις εκτιμήσεις ενέργειας για έργα ηλεκτροπαραγωγής με βάση τα έξοδα εγκατάστασης και λειτουργίας και τις παραμέτρους σχεδιασμού του συστήματος. (NREL)
- **Συστήματα PhotoVoltaic (PVsyst):** είναι ένα –επί πληρωμή- πακέτο λογισμικού για τη μελέτη, τη διαστασιολόγηση και την ανάλυση δεδομένων πλήρων φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ασχολείται με φωτοβολταϊκά συστήματα που συνδέονται με το δίκτυο αυτόνομα και περιλαμβάνει εκτεταμένες βάσεις μετεωρολογικών δεδομένων και φωτοβολταϊκών συστημάτων, καθώς και γενικά εργαλεία ηλιακής ενέργειας. Αυτό το λογισμικό είναι προσαρμοσμένο στις ανάγκες των αρχιτεκτόνων, μηχανικών και ερευνητών. Είναι επίσης πολύ χρήσιμο στην εκπαίδευση (Software Evaluation).
- **PV*SOL premium:** είναι ένα –επί πληρωμή- γερμανικό λογισμικό που αναπτύχθηκε από το Valentine Software, για το πρόγραμμα δυναμικής προσομοίωσης με 3D απεικόνιση και λεπτομερή ανάλυση σκίασης των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αυτό το λογισμικό έχει 3D Design για 3D απεικόνιση κτιρίων και αντικειμένων σκίασης, και περιστρέφει την επιφάνεια του εδάφους, κάνει προσομοίωση της ηλιακής ροής, και την κατανομή συχνότητας σκίασης, και λεπτομερή ανάλυση σκίασης για κάθε μεμονωμένο τμήμα. Ο χρήστης μπορεί επίσης να επιλέξει τον αριθμό των καλυμμένων περιοχών, τον αριθμό του φωτοβολταϊκού πλαισίου, τον αριθμό των μετατροπέων, την έξοδο Φ / B γεννήτριας, τον προσανατολισμό, το αζιμούθιο, την κλίση και τον τύπο εγκατάστασης (PV*SOL premium).

- **Solaris PV:** είναι ένα επαγγελματικό λογισμικό –**επί πληρωμή**- που μπορεί να υπολογίσει τη συνολική απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος (συνολική ετήσια παραγωγή και ωριαίο ρυθμό παραγωγής). Αυτό το λογισμικό επιτρέπει τον έλεγχο των επιπτώσεων της σκίασης που προβάλλεται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια από τα κοντινά εμπόδια όπως οι κεραίες και οι καμινάδες και προβάλλει με κατάλληλα γραφικά τις παρεμβολές σκιάς (Acca Software).
- **HelioScope:** είναι ένα –**επί πληρωμή**- νέο πρόγραμμα που επιτρέπει στον χρήστη να υπολογίσει τις απώλειες λόγω του καιρού και του κλίματος. Μπορεί επίσης να αναλύσει τη σκίαση, την καλωδίωση, την αποτελεσματικότητα των εξαρτημάτων, τις αναντιστοιχίες των πλαισίων και τη γήρανση, προκειμένου να παράσχει συστάσεις για τον εξοπλισμό και τη διάταξη συστοιχιών. Αυτά τα εργαλεία εμφανίζουν την ετήσια παραγωγή, το σύνολο δεδομένων καιρού, τον δείκτη απόδοσης και άλλες παραμέτρους του συστήματος για αποτελέσματα προσομοίωσης. (Folsom Labs, 2011).
- **Solar Pro:** είναι ένα -**δωρεάν**- ισχυρό λογισμικό σχεδιασμού και προσομοίωσης που επιτρέπει στους χρήστες να οπτικοποιήσουν τη σκίαση και να διαμορφώσουν την κάλυψη του πλαισίου εύκολα και με ακρίβεια. Το Solar Pro προβλέπει την ωριαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας επιστημονικά πρότυπα μαθηματικά μοντέλα. Οι υπολογισμοί της καμπύλης I-V πραγματοποιούνται σε επίπεδο κυψέλης και λαμβάνουν υπόψη δεδομένα ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, σκίαση και άλλους λεπτομερείς συντελεστές απώλειας. (Shading Analysis, 2014)
- **SOLARGIS pvPlanner:** είναι ένα -**επί πληρωμή**- online εργαλείο για την αναζήτηση ιστοσελίδων και τη σύγκριση της απόδοσης ενέργειας από διάφορες επιλογές φωτοβολταϊκής τεχνολογίας και συστημάτων τοποθέτησης μέσω απλών και γρήγορων προσομοιώσεων. Στην οθόνη Solargis, ο χρήστης μπορεί να αναζητήσει την επιθυμητή θέση, να επιλέξει τη διαμόρφωση του φωτοβολταϊκού συστήματος, τον τύπο της κυψέλης, τις προδιαγραφές του μετατροπέα, καθώς και τη γωνία αζιμουθίου και κλίσης για να κάνει την προσομοίωση (Solargis, 2010-2019).

- **PV F-Chart:** είναι ένα ολοκληρωμένο, δωρεάν πρόγραμμα ανάλυσης και σχεδιασμού φωτοβολταϊκών συστημάτων. Απαιτεί δεδομένα σχετικά με τις καιρικές συνθήκες, το φορτίο, τον μετατροπέα και τη διαμόρφωση της μονάδας και τις πληροφορίες ολόκληρου γενικά του συστήματος. Το PV F-chart παρουσιάζει την παραγωγή και την εξοικονόμηση ενέργειας, την απόδοση του συστήματος και την οικονομική βιωσιμότητα. (PV F-CHART).
- **Shadow Calculator:** είναι ένα δωρεάν λογισμικό υπολογισμού της θέσης του ηλίου που παρέχεται από την Google Maps. Χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη του μεγέθους της σκίασης σε διαφορετικές ώρες της μέρας και για διαφορετικές τοποθεσίες στους χάρτες της Google. Η ωφέλεια του παραπάνω προγράμματος έγκειται στην δυνατότητα που δίνει στον επισκέπτη να περιηγηθεί στον χώρο, όπου επιθυμεί να χτίσει ένα οίκημα, και να υπολογίσει το μέγεθος της σκίασης στον κήπο του σπιτιού αυτού. Για τον λόγο αυτό, παρέχονται κατάλληλα εργαλεία από την εφαρμογή, για την οριοθέτηση του χώρου που ενδιαφέρει τον εκάστοτε μελετητή, πάνω στο χάρτη, ώστε να προσδιοριστεί η επιλεχθείσα τοποθεσία του σπιτιού. Υπάρχει ακόμα η δυνατότητα προσδιορισμού του ύψους σε μέτρα (Shadow Calculator).

Συνεπώς, το λογισμικό **Shadow Calculator:**

- Οριοθετεί τη σκίαση απευθείας πάνω στον χάρτη.
- Υπολογίζει το μήκος και τη γωνία σκίασης στην επιλεχθείσα περιοχή.
- Προβλέπει το μέγεθος της σκίασης για κάθε συγκεκριμένη χρονική στιγμή κατά το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο.
- Καταγράφει τις ώρες της δύσης και ανατολής του ηλίου στη διάρκεια κάθε ημέρας για συγκεκριμένες τοποθεσίες και ημερομηνίες.
- Αποτυπώνει την θέση του ηλίου, του ηλιακού υψομέτρου και αζιμούθιου.

2. Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια από τις πολλά υποσχόμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για το μέλλον και αφορά το φως και τη θερμότητα που ακτινοβολείται από τον ήλιο, χρησιμοποιώντας εξελισσόμενη τεχνολογία. Είναι μια καθαρή μορφή ενέργειας, προσιτή, αξιόπιστη και ευέλικτη.

Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν την ενέργεια του ήλιου απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια πραγματοποιείται σε μια ημιαγωγική συσκευή που ονομάζεται ηλιακή κυψέλη. Οι ηλιακές κυψέλες συνδεδεμένες μεταξύ τους σχηματίζουν ένα ηλιακό πλαίσιο. Για μεγαλύτερη παραγωγή ηλιακής ηλεκτρικής ενέργειας οι ηλιακοί συλλέκτες (δηλαδή τα φωτοβολταϊκά πλαίσια) σχηματίζουν μια ηλιακή συστοιχία.

Η ηλιακή κυψέλη είναι η βασική μονάδα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Για την κατασκευή μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης χρησιμοποιείται μια πλάκα καθαρού πυριτίου, η επιφάνεια της οποίας είναι πολύ λεπτή και διάχυτη. Στη βάση της συνήθως έχει βόριο. Με αυτό τον τρόπο, δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο που δίνει κίνηση στα ηλεκτρόνια όταν η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από την φωτοβολταϊκή κυψέλη. Τα περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι κατασκευασμένα από κρυσταλλικές κυψέλες ή κυψέλες λεπτής μεμβράνης με βάση μη μαγνητικά αγωγικά μέταλλα (τελλούριο ή πυρίτιο). Ορισμένες κυψέλες είναι στρογγυλές ή τετράγωνες, ενώ τα φωτοβολταϊκά πλαίσια λεπτής μεμβράνης μπορεί να έχουν πολύ στενές κυψέλες.

Το πλαίσιο αποτελείται από μία ομάδα φωτοβολταϊκών κυψελών συνδεδεμένων σε σειρά -ή και παράλληλα- τοποθετημένες σε προστατευτικό φιλμ προς το περιβάλλον. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι η μικρότερη διάταξη που παράγει ωφέλιμη ισχύ. Η διαδικασία που αφορά την κατασκευή αυτών των πλαισίων απαιτεί έλεγχο υψηλής ακρίβειας και ποιότητας, προκειμένου να παραχθεί ένα αξιόπιστο προϊόν. Ο πίνακας είναι μια ομάδα μονάδων που είναι η βασική δομική κυψέλη μιας φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Μια ομάδα πλαισίων που περιλαμβάνει την πλήρη μονάδα παραγωγής φωτοβολταϊκών κυψελών ονομάζεται φωτοβολταϊκή συστοιχία.

2.1. Φωτοβολταϊκή Κυψέλη

Μια κλασική περίπτωση ηλιακής κυψέλης μονοκρυσταλλικού πυριτίου διαθέτει έντονο μπλε χρώμα, ζυγίζει περίπου 10gr και κάτω από πολύ καλές συνθήκες μπορεί να παράγει περίπου 1,5 W στα 0,5 V. Οι κυψέλες ενώνονται ηλεκτρικά μεταξύ τους σε σειρά αλλά και παράλληλα με σκοπό να παραχθεί ισχύς ωφέλιμη, αν και ορισμένες φορές κόβονται σε πιο μικρά τεμάχια.

Οι κυψέλες υπόκεινται σε ηλεκτρική –μεταξύ τους- συνδεσμολογία ή αλλιώς διάταξη. Η σύνδεση πραγματοποιείται με τη μέθοδο της συγκόλλησης που συμβαίνει με εργοστασιακό τρόπο και κατάλληλα μηχανήματα. Προκειμένου να αποφεύγονται οι βλάβες των κυψελών, αυτές πρέπει να τοποθετούνται σε κατάλληλες αποστάσεις και συνδέσεις με αντοχή. Σε περιπτώσεις επαπτόμενων κυψελών, υπάρχει κίνδυνος βραχυκυκλώματος, φθοράς (ραγίσματος) ή σκίασης. Από την άλλη, στην περίπτωση που οι κυψέλες τοποθετούνται σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, μια υπολογίσιμη επιφάνεια καταλήγει να μένει αναξιοποίητη.

2.2. Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο

Οι ηλιακές κυψέλες ενώνονται και δημιουργούν ένα φ/β πλαίσιο. Το τελευταίο αποτελείται από ένα σύνολο κυψελών οι οποίες ενώνονται και αποτελούν το πιο μικρό αυτόνομο πλαίσιο. Ο αριθμός των κυψελών ενός πλαισίου διαμορφώνεται ανάλογα με το μέγεθος της τάσης που καταναλώνεται. Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο για να φορτίσει μια μπαταρία 12 Volt διαθέτει 33 έως 36 κυψέλες.

2.3. Λειτουργία των Φ/Β συστοιχιών

Γενικά, το εξωτερικό περιβάλλον επηρεάζει ένα Φ/Β πλαίσιο ή μια συστοιχία κατά τρόπο ανάλογο με μία Φ/Β κυψέλη. Όσο περισσότερο αυξάνεται η θερμοκρασία τόσο η τάση μειώνεται και όσο μεγαλύτερη είναι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία τόσο αυξάνεται και το ρεύμα.

Κάθε ηλιακή κυψέλη (solar cell) αποτελείται από δύο στρώματα ημιαγωγικού υλικού αποτελούμενα από κρυστάλλους πυριτίου. Το κρυσταλλικό πυρίτιο από μόνο του δεν αποτελεί καλό αγωγό του ηλεκτρισμού, γι' αυτό και υπόκειται σε πρόσμιξη. Στο κάτω στρώμα της ηλιακής κυψέλης προστίθεται συνήθως βόριο. Το τελευταίο δημιουργεί δεσμούς με το πυρίτιο δίνοντας **θετικό φορτίο (p)**. Στο πάνω μέρος της ηλιακής κυψέλης προστίθεται συνήθως φώσφορος που συνάπτει δεσμούς με το πυρίτιο δίνοντας **αρνητικό φορτίο (n)**. Η επιφάνεια μεταξύ των ημιαγωγών τύπου p και τύπου n που δημιουργούνται ονομάζεται **p-n επαφή (P-N junction)**.

Μόλις το ηλιακό φως φτάσει στην κυψέλη, η ενέργεια η προερχόμενη από το φως απελευθερώνει ηλεκτρόνια και στα δύο στρώματα. Τα ελεύθερα αυτά ηλεκτρόνια, ωθούνται από το στρώμα **τύπου-n** στο στρώμα **τύπου-p** – μιας και κάθε στρώμα έχει διαφορετική φόρτιση- αλλά παρεμποδίζονται από το ηλεκτρικό πεδίο στην **επαφή p-n**. Η παρουσία ενός εξωτερικού κυκλώματος ορίζει τη διαδρομή για τη μεταφορά ηλεκτρονίων από το στρώμα **τύπου-n** στο στρώμα **τύπου-p**. Πολύ λεπτά καλώδια κατά μήκος του στρώματος τύπου-n ευνοούν τη διέλευση ηλεκτρονίων.

Έτσι, δημιουργείται με τη διέλευση αυτή το ρεύμα. Ένας αγωγός συνδέει το **πυρίτιο τύπου p** με ένα ηλεκτρικό φορτίο, όπως ένα φως ή μια μπαταρία, και στη συνέχεια πίσω στο πυρίτιο τύπου n, σχηματίζοντας ένα πλήρες κύκλωμα. Εκτός από τα ημι-αγώγιμα υλικά, τις ηλιακές κυψέλες αποτελούνται από ένα μεταλλικό πλέγμα ή άλλη ηλεκτρική επαφή για να συλλέγουν ηλεκτρόνια από τον ημιαγωγό και να τα μεταφέρουν στο εξωτερικό φορτίο και ένα στρώμα οπίσθιας επαφής για την ολοκλήρωση του ηλεκτρικού κυκλώματος.

Οι ηλιακές κυψέλες είναι τετραγωνικού σχήματος με κάθε πλευρά να υπολογίζεται στα 10 εκατοστά. Κάθε ηλιακή κυψέλη είναι μικρή και δεν ξεπερνά τα 2W. Προκειμένου να φτιαχτούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, οι ηλιακές κυψέλες συνδέονται είτε σε σειρά είτε παράλληλα.

Η απόδοση των ηλιακών κυψελών εκφράζεται ως το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Το τελευταίο σχετίζεται με την τεχνολογία των χρησιμοποιούμενων υλικών. Η απόδοση που προαναφέρθηκε μπορεί να φτάσει έως και 40%. Όμως, τα πιο πολλά πλαίσια που κατασκευάζονται και διατίθενται στο εμπόριο έχουν τελικά μία μέγιστη απόδοση της τάξης του 17-19% (Δαμανίδης και συν., 2011).

Η ηλιακή κυψέλη μπορεί τυπικά να διαμορφώνεται από μια πηγή ρεύματος και μια ανεστραμμένη δίοδο και να συνδέεται παράλληλα με αυτήν. Έχει τη δική της συνδεσμολογία και παράλληλες αντιστάσεις. Η αντίσταση στη σειρά οφείλεται στην παρεμπόδιση της διαδρομής της ροής των ηλεκτρονίων από τη διακλάδωση n σε p και η παράλληλη αντίσταση οφείλεται στο ρεύμα διαρροής. Η μοντελοποίηση της φωτοβολταϊκής κυψέλης περιλαμβάνει την εκτίμηση των καμπυλών χαρακτηριστικών $I - V$ και $P - V$ για την προσομοίωση της πραγματικής κυψέλης υπό διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες. Μια ιδανική ηλιακή κυψέλη διαμορφώνεται από μια πηγή ρεύματος παράλληλα με μια δίοδο. Ωστόσο, δεν υπάρχει ιδανική ηλιακή κυψέλη και ως εκ τούτου προστίθενται στο μοντέλο αντιστάσεις και σειρές αντιστάσεων.

2.4. Σύνδεση Φωτοβολταϊκών Κυψελών σε Σειρά και Παράλληλα

Αν συνδεθούν οι φωτοβολταϊκές κυψέλες σε σειρά, τότε αθροίζονται τα Volt (τα + με τα - εναλλάξ). Σε περίπτωση παράλληλης σύνδεσης, όμως, (τα + μεταξύ τους και τα - μεταξύ τους) τότε αθροίζονται τα Ampere των κυψελών που έχουν συνδεθεί με σκοπό να επιτευχθεί ο συνδυασμός Volt και Ampere.

2.4.1. Σύνδεση σε Σειρά

Η εκτίμηση της ισχύος της συνδεσμολογίας που παράγεται γίνεται όταν οι ηλιακές κυψέλες (ή τα πλαίσια) συνδέονται σε σειρά. Χρειάζεται όμως να είναι ίδιες οι συνθήκες λειτουργίας για τις κυψέλες και επίσης οι κυψέλες να έχουν σχετικά όμοια χαρακτηριστικά I-V.

- **Ρεύμα:** όταν οι κυψέλες συνδέονται σε σειρά, το ρεύμα είναι παντού ίδιο και ίσο με εκείνο που παράγεται από μία κυψέλη. Η συνδεσμολογία περιορίζεται στο ρεύμα της κυψέλης χαμηλού ρεύματος στην περίπτωση που μία κυψέλη με χαμηλό ρεύμα συνδεθεί σε μια συνδεσμολογία με κυψέλες που διαπερνιούνται από υψηλότερο ρεύμα. Συγκεκριμένα:

$$I_{\text{σειράς}} = I_{\text{max}}(\text{μιας κυψέλης}) \quad (1)$$

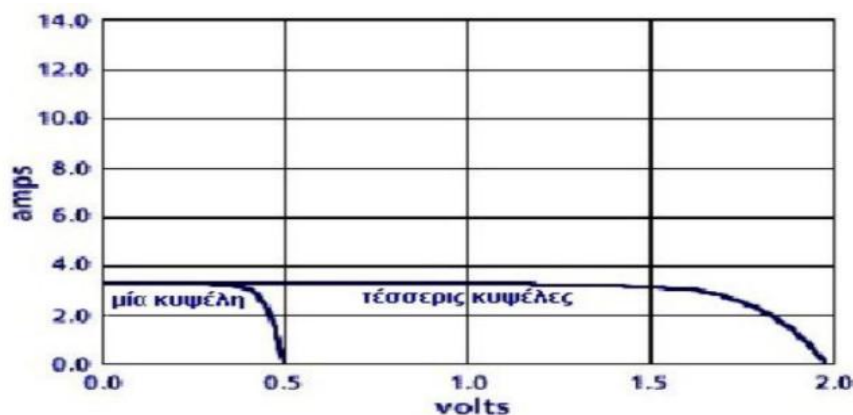
- **Τάση:** ισούται με το άθροισμα των τάσεων κάθε κυψέλης. Στην περίπτωση όμοιων κυψελών τότε η τάση υπολογίζεται ως εξής:

$$V_{\text{σειράς}} = (\text{αριθμός κυψελών}) \cdot V_{\text{max}}(\text{μιας κυψέλης}) \quad (2)$$

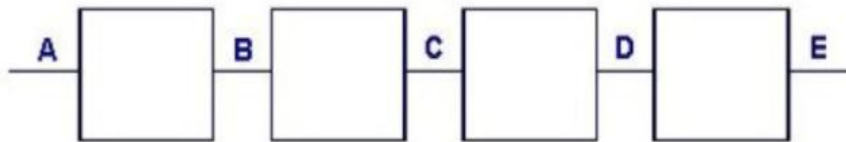
- **Ισχύς:** η ισχύς που παράγεται από μία συνδεσμολογία κυψελών είναι ίση με το ρεύμα της συνδεσμολογίας: σχέση (1) - πολλαπλασιαζόμενη με την τάση της σχέσης (2). Συγκεκριμένα: $P_{\text{σειράς}} = I_{\text{σειράς}} \cdot V_{\text{σειράς}} \Rightarrow$

$$P_{\text{σειράς}} = I_{\text{max}}(\text{μιας κυψέλης}) * (\text{αριθμός κυψελών}) \cdot V_{\text{max}}(\text{μιας κυψέλης})$$

Πρέπει να τονιστεί ότι είναι δυνατό οι μεμονωμένες κυψέλες να λειτουργούν σε διαφορετικές τάσεις, όμως κάθε κυψέλη λειτουργεί με το ίδιο ρεύμα.



Σχήμα 2.1 : Τυπικές καμπύλες I-V για μία και τέσσερις κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά. (gneng)



τάση μεταξύ A και B = 0.5 volts

A και C = 1.0 volts

A και D = 1.5 volts

A και E = 2.0 volts

ρεύμα στο A = B = C = D = E = 3.0 amps

Σχήμα 2.2 : Συνδεσμολογία σε σειρά από τέσσερις κυψέλες και τα χαρακτηριστικά τάσης και ρεύματος αυτών. (gneng)

2.4.2. Σύνδεση σε Παραλληλία

Στην περίπτωση παράλληλης σύνδεσης κυψελών ή πλαισίων μπορεί να εκτιμηθεί το ρεύμα, η ισχύς και η τάση αυτών με τις μεθόδους που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Υποτίθεται ότι οι συνθήκες λειτουργίας είναι ίδιες και οι κυψέλες έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά I-V.

- **Ρεύμα**: το ρεύμα που παράγεται από μια ομάδα κυψελών που έχουν συνδεθεί παράλληλα είναι ίσο με το άθροισμα των μεμονωμένων ρευμάτων κάθε κυψέλης. Συγκεκριμένα το ρεύμα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_{\text{παράλληλα}} = (\text{αριθμός κυψελών}) \cdot I_{\text{max}}(\text{μιας κυψέλης}) \quad (4)$$

- **Τάση**: ανάμεσα σε δύο κόμβους μιας ομάδας κυψελών συνδεδεμένων παράλληλα, η τάση ισούται με την τάση κάθε κυψέλης. Συγκεκριμένα:

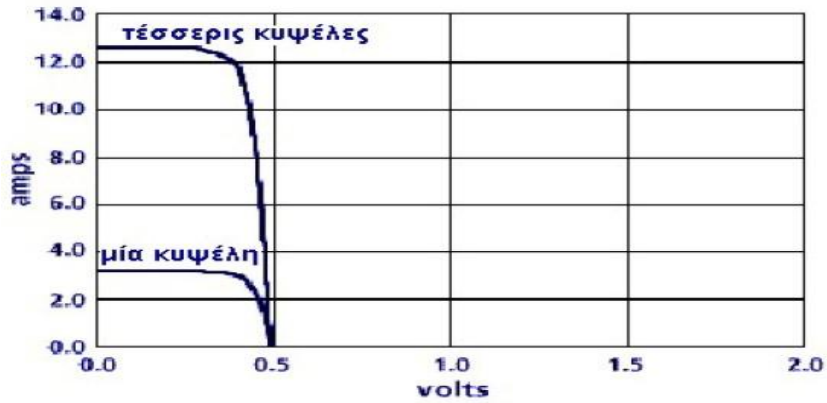
$$V_{\text{παράλληλα}} = V_{\text{max}}(\text{μιας κυψέλης}) \quad (5)$$

- **Ισχύς**: η ισχύς που παράγεται από κυψέλες συνδεδεμένες παράλληλα ισούται με το παράλληλο ρεύμα, εξίσωση (4), πολλαπλασιασμένο με την παράλληλη τάση της εξίσωσης (5). Ειδικότερα:

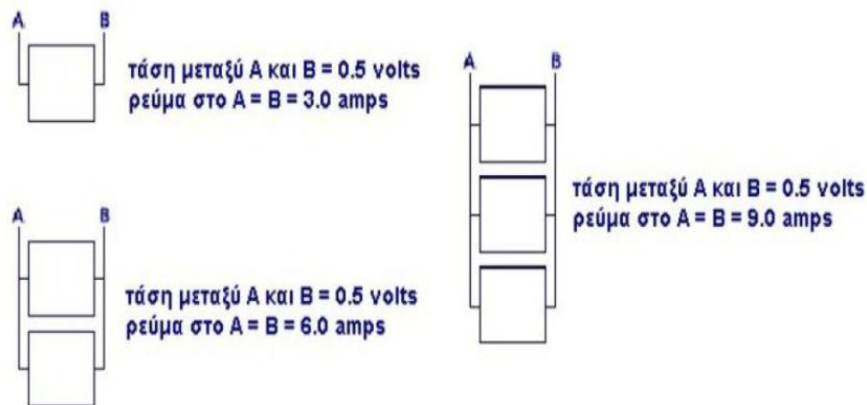
$$P_{\text{παράλληλα}} = I_{\text{παράλληλα}} \cdot V_{\text{παράλληλα}} \quad \Rightarrow$$

$$P_{\text{παράλληλα}} = (\text{αριθμός κυψελών}) \cdot I_{\text{max}}(\text{μιας κυψέλης}) \cdot V_{\text{max}}(\text{μιας κυψέλης})$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μεμονωμένες κυψέλες είναι δυνατό να παράγουν διαφορετικά ρεύματα, όμως κάθε κυψέλη λειτουργεί στην ίδια τάση στην περίπτωση που μια ομάδα κυψελών συνδέεται παράλληλα.



Σχήμα 2.3 : Καμπύλες I-V για μία και τέσσερις κυψέλες συνδεδεμένες παράλληλα. (gneng)



Σχήμα 2.4 : Ομάδες κυψελών εν παραλλήλω και τα χαρακτηριστικά τάσης και ρεύματος αυτών. (gneng)

2.5. Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών Κυψελών

Τα φ/β πλαίσια διακρίνονται σε δύο ομάδες που εξαρτώνται από το υλικό από το οποίο κατασκευάστηκαν. Τα πλαίσια διακρίνονται σε **τυπικά Φ/Β πλαίσια** και σε **ημιπερατά Φ/Β πλαίσια**. Τα τυπικά Φ/Β πλαίσια συνιστούν τη συνηθέστερη επιλογή σε περιπτώσεις εφαρμογής στην ύπαιθρο ή σε ψηλές στέγες. Φτιάχνονται μέσω της πολυστρωμάτωσης καθώς τα ημιπερατά Φ/Β πλαίσια χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην αρχιτεκτονική ενσωμάτωση εξαιτίας του ότι έχουν ιδιαίτερο σχεδιασμό αλλά και δεδομένου ότι χρησιμοποιούνται ως μονωτικοί υαλοπίνακες.

Επίσης βάσει του υλικού κατασκευής τα φωτοβολταϊκά χωρίζονται σε Φ/Β με τεχνολογία λεπτού υμενίου και σε Φ/Β με τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου. Οι κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι τα δημοφιλέστερα και φτιάχνονται σε κυλίνδρους ανεπτυγμένου πυριτίου. Από την άλλη, οι κυψέλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου φτιάχνονται από χυτό πυρίτιο, με απόδοση 15%. Με την πάροδο του χρόνου, η απόδοση σταδιακά φθίνει αλλά πιο αργά συγκριτικά με τα μονοκρυσταλλικά.

Όσον αφορά τις φωτοβολταϊκές κυψέλες λεπτού υμενίου σημειώνεται ότι συντέθηκαν πάνω σε εύκαμπτα φύλλα πολυμερούς. Οι κυψέλες στηρίζονται σε ημιαγωγικό υλικό κατηγορίας CIGS, και τα μόρια αυτού έχουν γάλλιο, ίνδιο, χαλκό και σελίνιο. Όμως σε αυτή την περίπτωση υπάρχει απόδοση χαμηλότερη κατά 5% - 10%.

Ακόμη, τα φωτοβολταϊκά διακρίνονται σε δυο πρόσθετες ομάδες ανάλογα με τη χρήση τους που χρησιμοποιούνται και συγκεκριμένα στα αυτόνομα και στα συνδεδεμένα με το δίκτυο φωτοβολταϊκά. Στα αυτόνομα, η ενέργεια πρέπει να φυλάσσεται σε μπαταρίες και να εγκαθίσταται ο μετατροπέας του ρεύματος σε εναλλασσόμενο. Χρησιμοποιούνται πολύ στις περιαστικές περιοχές γιατί έχουν απόσταση από το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Για να γίνει εγκατάσταση ενός Φ/Β συστήματος σε ένα σπίτι είναι ανάγκη να ικανοποιεί ορισμένες προϋποθέσεις, όπως: η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η ηλιοφάνεια (Ε.Γ.Κ.Π., 2010).

2.6. Μετατροπείς (inverters)

Οι μετατροπείς τάσης αποτελούν ηλεκτρονικές διατάξεις που ρυθμίζουν την τάση του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην τάση του συστήματος αποθήκευσης με σκοπό να αξιοποιηθεί η παραγόμενη από το Φ/Β σύστημα ενέργεια.

2.6.1. Μετατροπείς συνεχούς τάσης DC/DC

Η τάση που παράγεται από τις Φ/Β κυψέλες εντός του φ/β πλαισίου δεν είναι σταθερή. Αντιθέτως, αλλάζει με βάση μια μέση τιμή. Προκειμένου να σταθεροποιηθεί η τάση εξόδου της Φ/Β γεννήτριας και να γίνει κατάλληλη για την είσοδό της στον αντιστροφέα αξιοποιούνται μετατροπείς συνεχούς ρεύματος.

Μερικές από τις πιο συνηθείς εφαρμογές των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι εκείνες στις οποίες χρησιμοποιούνται οι **τρεις βασικές τοπολογίες των DC - DC μετατροπέων**. Πρόκειται για τους εξής μετατροπείς:

1. ο DC - DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης
2. ο DC – DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης
3. ο μικτός DC – DC μετατροπέας (υποβιβασμού-ανύψωσης).

Το ρεύμα υπολογίζεται από τον ελεγκτή MPPT μετράει το ρεύμα και την τάση της φωτοβολταϊκής κυψέλης, τα οποία αποτελούν και τα σήματα ελέγχου που ανιχνεύουν το σημείο λειτουργίας από τον ελεγκτή. Ο υπολογισμός του μέγιστου σημείου ισχύος του DC – DC μετατροπέα γίνεται με τη σταδιακή μεταβολή της διάρκειας αγωγής του ημιαγώγιμου διακόπτη S της διάταξης, ώστε να επιτευχθεί το μέγιστο σημείο ισχύος.

Η λειτουργία των DC - DC μετατροπέων αφορά κατά κύριο λόγο την ίδια αφού όλοι περιλαμβάνουν τις ίδιες ενεργές και παθητικές κυψέλες. Η διαφορά τους στηρίζεται στη σχέση της τάσης εξόδου με τη σχέση εισόδου. Ειδικότερα, ο DC - DC μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης διαμορφώνει την τάση εξόδου μικρότερη από την τάση εισόδου. Επίσης, ο DC – DC μετατροπέας ανύψωσης της τάσης διαμορφώνει μεγαλύτερη τάση εξόδου, τη στιγμή που ο μικτός DC - DC μετατροπέας διαμορφώνει και μεγαλύτερη και μικρότερη τάση εξόδου συγκριτικά με την τάση

εισόδου. Το επίπεδο της τάσης εξόδου στους DC - DC μετατροπείς καθορίζεται από τη μεταβολή της διάρκειας αγωγής του ημιαγώγιμου διακόπτη.

Άρα προκύπτει ότι είναι πιθανό να προτιμηθεί ένας από αυτούς τους DC - DC μετατροπείς με βάση την εφαρμογή των φωτοβολταϊκών κυψελών. Οπότε στην περίπτωση που η τάση εξόδου των κυψελών είναι ανάμεσα σε 30 μέχρι 150V θα χρησιμοποιηθεί ένας DC - DC μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης. Αν η προσδοκώμενη τάση εξόδου είναι 160V τότε θα χρησιμοποιηθεί DC - DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης. Από την άλλη, στην περίπτωση που η τάση εξόδου είναι 80V τότε θα χρησιμοποιηθεί ο μικτός DC - DC μετατροπέας. Αυτές οι εφαρμογές συνιστούν παραδείγματα εφαρμογής των τριών κυριότερων DC - DC μετατροπέων σε φωτοβολταϊκά συστήματα με έλεγχο MPPT (Πυλαρινός, 2014).

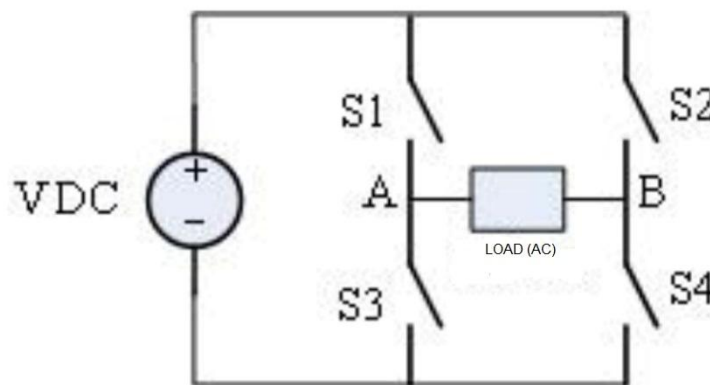
2.6.2. DC-AC Μετατροπέας Τάσης

Τα φωτοβολταϊκά παράγουν συνεχές ρεύμα και γι' αυτό χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία συσκευών συνεχούς ρεύματος ή το συνεχές ρεύμα μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο 230V με σκοπό να γίνει συμβατό με τη λειτουργία των ηλεκτρικών συσκευών. Όταν το ρεύμα μετατρέπεται από συνεχές σε εναλλασσόμενο τότε υπάρχουν αρκετές απώλειες, γεγονός που δεν θα συνέβαινε αν οι ηλεκτρικές συσκευές μπορούσαν να λειτουργήσουν με συνεχές ρεύμα.

Όταν λειτουργεί ο inverter παράγεται μεγάλος αριθμός υψηλών συχνοτήτων και περιορίζεται με ειδικά ηλεκτρονικά φίλτρα. Ο αντιστροφέας μπορεί να υπάρχει σαν αυτόνομη ηλεκτρονική συσκευή ή σαν βαθμίδα κάποιας άλλης ηλεκτρονικής συσκευής. Σε εγκαταστάσεις Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας οι inverters χωρίζονται σε αντιστροφείς αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων και σε αντιστροφείς διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αναφορικά με την τεχνολογία κατασκευής αντιστροφέων αυτόνομων συστημάτων η διάκριση είναι σε αντιστροφείς «καθαρού ημιτόνου» και σε αντιστροφείς «τροποποιημένου ημιτόνου». Επίσης με βάση το είδος της πηγής εισόδου οι αντιστροφείς είναι δυνατό να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

1. Στους αντιστροφεείς που τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς τάσης (Αντιστροφεείς Τάσης – **Voltage Source Inverters** ή **Voltagefed Inverters - VSI**).
2. Στους αντιστροφεείς που τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς ρεύματος (Αντιστροφεείς Ρεύματος – **Current Source Inverters** ή **Currentfed Inverters - CSI**).

Αυτές οι κατηγορίες διακρίνονται επίσης στους μονοφασικούς αντιστροφεείς (σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας και σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας) και στους τριφασικούς αντιστροφεείς (με έξι ελεγχόμενες ημιαγωγικές διακοπτικές κυψέλες). Το φωτοβολταϊκό σύστημα που είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο προκειμένου να μπορεί να διοχετεύει την ισχύ του σε αυτό πρέπει να μπορεί να μετατρέπει την συνεχή τάση εξόδου σε εναλλασσόμενη τάση με χαρακτηριστικά ίδια με αυτά του δικτύου. Η μετατροπή αυτή επιτυγχάνεται μέσω του αντιστροφέα ή DC to AC Converter.



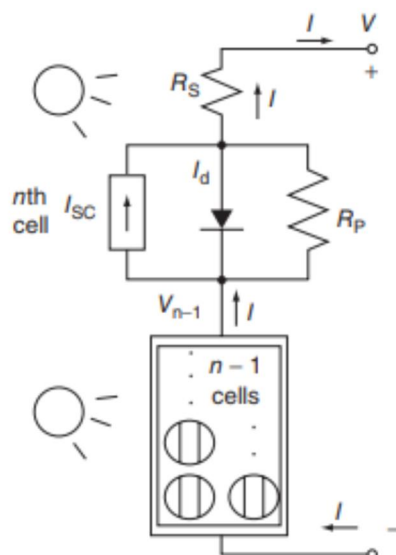
Σχήμα 2.5 : Γενική τοπολογία κυκλώματος αντιστροφέα (Arwindra Rizqiawan, 2008)

Οι ημιαγωγικές κυψέλες μπορούν να άγουν ή όχι με βάση το αν τους έχει δοθεί παλμός έναυσης από ένα ανεξάρτητο λογικό κύκλωμα τη στιγμή που η σβέση τους είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί ή με παλμούς ή και κάτω από ειδικές συνθήκες στις οποίες το ρεύμα που περνάει από τον διακόπτη για κάποιο χρονικό διάστημα μηδενίζεται. Οι κυψέλες αυτές ανοίγουν και κλείνουν ανά ομάδες (1, 2) και (3, 4) σε χρονικό διάστημα μιας ημιπεριόδου και η συχνότητα είναι ίση με την διπλάσια συχνότητα του δικτύου ($f=50\text{Hz}$) ή περίοδο $T=1/2f=0.01\text{ sec}$. Το πηνίο στην είσοδο του αντιστροφέα είναι σημαντικό να υπάρχει για να εξομαλύνει τις αλλαγές στην τάση που δημιουργούνται από τους διακόπτες καθώς στην έξοδο υπάρχει τις πιο πολλές φορές ένας μετασχηματιστής (Πυλαρινός, 2014).

3. Επίδραση Σκίασης στην Ενεργειακή Παραγωγή των Φωτοβολταϊκών Κυψελών

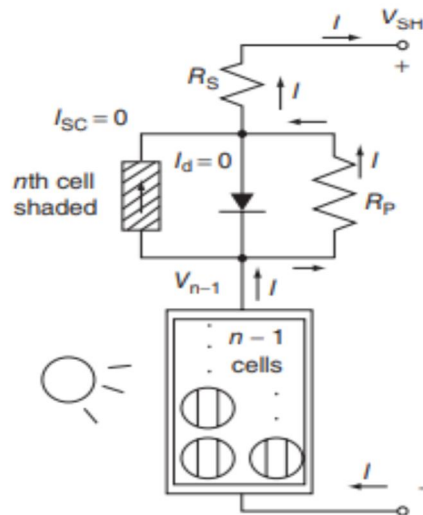
Τα φωτοβολταϊκά συστήματα υπόκεινται συχνά σε συνθήκες σκίασης. Η επίδραση μάλιστα της σκίασης είναι τέτοια ώστε ακόμη και στην περίπτωση κατά την οποία σκιάζεται μία και μόνο κυψέλη, οι ενεργειακές απώλειες να είναι σημαντικές.

Στα παρακάτω παραδείγματα έχουμε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελούμενο από n φωτοβολταϊκές κυψέλες με έξοδο το ρεύμα I , και τη τάση V . Παράλληλα, όλες οι φωτοβολταϊκές κυψέλες είναι εκτεθειμένες στην ηλιακή ακτινοβολία και τα διασχίζουν το ίδιο ρεύμα I καθότι είναι τοποθετημένες σε σειρά.



Σχήμα 3.1 : Φωτοβολταϊκό πλαίσιο με n κυψέλες εκτεθειμένες στην ηλιακή ακτινοβολία και σε σειρά (Baghzouz, 2018).

Στην συνέχεια, οι φωτοβολταϊκές κυψέλες (top cell) είναι σκιασμένες και οι υπόλοιπες $n-1$ κυψέλες είναι τοποθετημένες σε σειρά και χωρίς σκίαση. Το γεγονός ότι η πιο πάνω κυψέλη βρίσκεται υπό σκίαση σημαίνει αυτομάτως ότι το ρεύμα I_{sc} που το διαπερνάει είναι μηδέν.

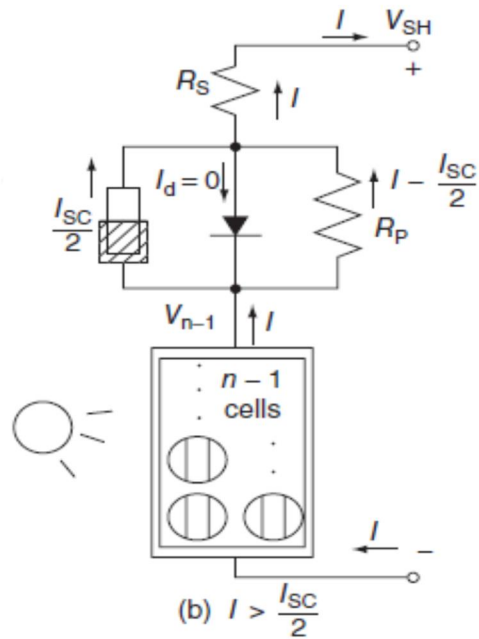


Σχήμα 3.2 : Φωτοβολταϊκό πλαίσιο με n κυψέλες στις οποίες η άνω κυψέλη υπόκειται σε πλήρη σκίαση (Baghzouz, 2018).

Παρατηρούμε, σύμφωνα και με το Σχήμα 3.2, ότι στην αντίσταση R_p η τάση πέφτει και δημιουργείται έτσι ανάστροφη πόλωση στη δίοδο. Αποτέλεσμα αυτού είναι πως το ρεύμα της διόδου (I_d) μηδενίζεται. Αυτό, σύμφωνα με τον νόμο τάσεως του Kirchhoff σημαίνει πως η πιο πάνω κυψέλη αφαιρεί τάση από το κύκλωμα αντί να προσθέτει.

Όταν η πιο πάνω **κυψέλη σκιάζεται κατά το ήμισυ (50%)**, τότε υπάρχουν δύο υποπεριπτώσεις που εξετάζονται:

1^η υποπερίπτωση: Το I να είναι μεγαλύτερο από το $I_{sc}/2$: τότε η δίοδος πολώνεται ανάστροφα με αποτέλεσμα το ρεύμα της διόδου I_d να μηδενίζεται. Η συγκεκριμένη περίπτωση φαίνεται στο Σχήμα 3.3:

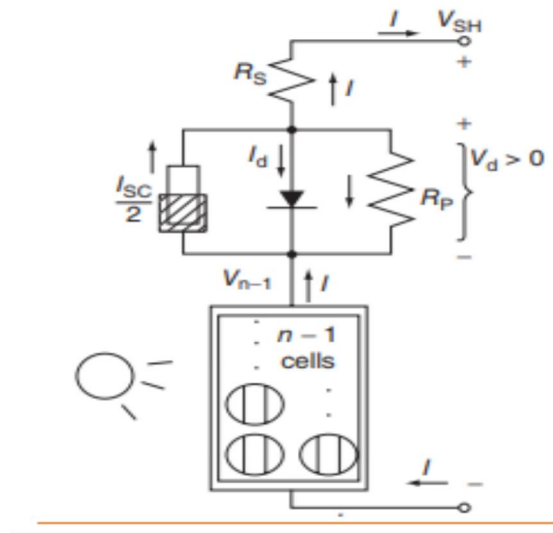


Σχήμα 3.3 : Φωτοβολταϊκό πλαίσιο όπου το πιο πάνω είναι σκιασμένο στην μισή επιφάνειά του, με $I > I_{sc}/2$. (Baghzouz, 2018).

Ο τύπος αυτός προκύπτει και από τον νόμο τάσεων του Kirchhof.

2^η υποπερίπτωση: το I είναι μικρότερο από το $I_{sc}/2$: τότε κάποιο ρεύμα θα συνεχίσει να ρέει μέσω της διόδου και η κυψέλη θα συνεισφέρει ελαφρώς μειωμένη αλλά θετική τάση σε όλο το πλαίσιο. Ισχύει σύμφωνα με το νόμο των τάσεων του Kirchhoff ότι:

$$V_{sh} = V_{n-1} + V_d.$$



Σχήμα 3.4 : Φωτοβολταϊκό πλαίσιο με n κυψέλες στις οποίες η άνω κυψέλη είναι σκιασμένη κατά 50% και $I < I_{sc}/2$. (Baghzouz, 2018).

3.1. Παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από φωτοβολταϊκή κυψέλη χωρίς σκίαση

Ακόμα και στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η σκίαση στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι μηδενική, υπάρχουν ενεργειακές απώλειες που οφείλονται στην ίδια την εγκατάσταση και οι οποίες είναι αναπόφευκτες. Πρώτα απ' όλα, από την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο, μόνο ένα μικρό ποσοστό θα μετασχηματισθεί τελικά σε ηλεκτρική ενέργεια. Το ποσοστό αυτό εξαρτάται κάθε φορά κι από τον τύπο των πλαισίων.

Έτσι, οι τελικές απώλειες στην ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα πλαίσια φθάνουν τελικά ένα ποσοστό 7-8% στις καλωδιώσεις, λόγω του μεγάλου μήκους των καλωδίων που απαιτούνται, καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος των καλωδίων τόσο μικρότερη η αντίστασή τους και τόσο μικρότερες οι απώλειες. Οι ενεργειακές απώλειες για τους αναστροφείς φτάνουν ένα ποσοστό 5-10%. Οι απώλειες μάλιστα που σημειώνονται κάθε χρόνο σε μια καλή εγκατάσταση υπολογίζονται ότι φτάνουν κατά μέσο όρο ένα ποσοστό 15-20%, δηλαδή μια εγκατάσταση ονομαστικής ισχύος 100 kW_p (=80 –85 kW_p πραγματικής ισχύος). Στις πιο πολλές περιοχές της Ελλάδος ισχύει ότι παράγονται 1450 –1650 kWh ανά έτος.

Παρακάτω έχουμε έναν πίνακα όπου υπολογίζεται η ενέργεια σε μια εγκατάσταση 100 kWp, αποτελούμενη από 667 πλαίσια των 150 Wp. Τα πλαίσια είναι τοποθετημένα σε σταθερή γωνία 30° και η επιφάνειά τους είναι 933 m² (Αμανατίδης, 2014).

Μήνας	Ενέργεια σε επιφάνεια κλίσης 30° kWh/m ²	Ολική ενέργεια στην επιφάνεια κάλυψης σε kWh	Εκμεταλλεύσιμη ενέργεια στην επιφάνεια κάλυψης από απόδοση modules (12 %)	Απώλειες σε καλωδιώσεις-inverters (20 %)	Τελική Παραγόμενη ενέργεια (kWh)
Τυπολόγιο	H ₀	H _{tot} = H ₀ • A	H _{mod} = H _{tot} • n	H _{loss} = H _{mod} • losses	H _{grid} = H _{mod} • H _{loss}
1	80	74640	8956.8	1791.36	7165.44
2	92	85836	10300.32	2060.064	8240.256
3	138	128754	15450.48	3090.096	12360.38
4	165	153945	18473.4	3694.68	14778.72
5	200	186600	22392	4478.4	17913.6
6	205	191265	22951.8	4590.36	18361.44
7	221	206193	24743.16	4948.632	19794.53
8	216	201528	24183.36	4836.672	19346.69
9	184	171672	20600.64	4120.128	16480.51
10	134	125022	15002.64	3000.528	12002.11
11	99	92367	11084.04	2216.808	8867.232
12	81	75573	9068.76	1813.752	7255.008
Σύνολο	1815	1693395	203207.4	40641.48	162565.9

Σχήμα 3.5 : Παράδειγμα υπολογισμού ενέργειας, βάσει τυπολογίου. (Αμανατίδης, 2014).

3.2. Επίδραση της μερικής σκίασης των φωτοβολταϊκών κυψελών

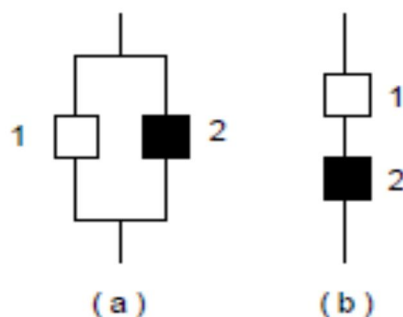
Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται μετρήσεις και γραφικές παραστάσεις I-V από διάφορες πειραματικές διαδικασίες, τα συμπεράσματα των οποίων θα συγκριθούν μεταξύ τους. Στόχος της μελέτης αυτής είναι η παρατήρηση της ενεργειακής συμπεριφοράς και απόδοσης, μελετώντας τις ενεργειακές απώλειες μέσα από την ανάλυση των χαρακτηριστικών καμπυλών I-V του φ/β πλαισίου υπό διαφορετικές περιπτώσεις σκίασης.

Προκειμένου να δημιουργηθούν οι διαφορετικές αυτές συνθήκες σκίασης κάθε φορά το φωτοβολταϊκό πλαίσιο καλύπτεται με διάφορα υλικά όπως ξύλο, νάιλον και ακόμα συχνότερα με μαύρα καλύμματα –συχνά χαρτόνι- σε διάφορα σημεία προκειμένου να εξετασθεί η συμπεριφορά του. Σημαντικό ασφαλώς για τον σκοπό αυτό, είναι να επιλεγθούν ημέρες με σταθερή ένταση της ακτινοβολίας, δηλαδή ουρανό χωρίς σύννεφα προκειμένου η επιφάνεια να εκτίθεται κάτω από σταθερή ένταση της ακτινοβολίας.

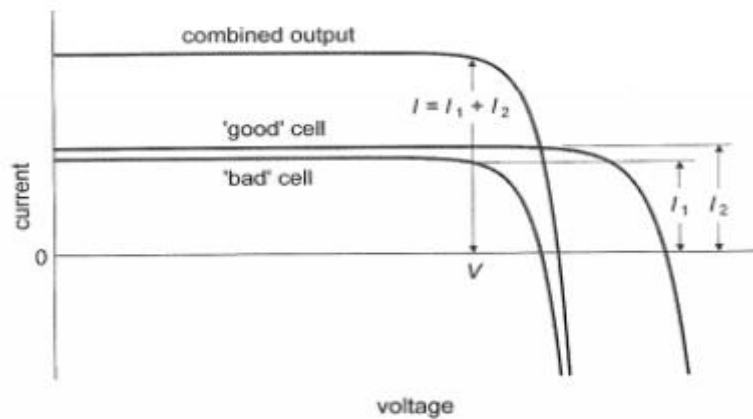
Όπως προαναφέρθηκε στο 2^ο κεφάλαιο, οι πιθανές συνδέσεις των φ/β κυψελών είναι 2 (δύο):

- Σύνδεση σε σειρά
- Παράλληλη σύνδεση

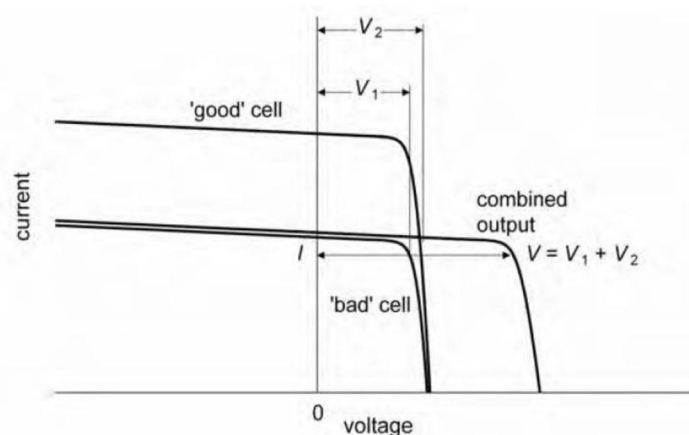
Ανάλογα με το πώς έχει συνδεθεί η σκιασμένη φωτοβολταϊκή κυψέλη με τις υπόλοιπες, δηλαδή σε σειρά ή παράλληλα, καθορίζεται και η χαρακτηριστική εξόδου του κυκλώματος.



Σχήμα 3.6 : (a) Παράλληλη σύνδεση δύο κυψελών με την μία από τις δύο σκιασμένη, (b) Σύνδεση δύο κυψελών σε σειρά με την μία από τις δύο σκιασμένη.



Σχήμα 3.7 : Καμπύλες I-V για παράλληλη σύνδεση δύο κυψελών με τη μία από τις δύο σκιασμένη (Salvadores, C. and Francisco, J., 2015).



Σχήμα 3.8 : Καμπύλες I-V για σύνδεση δύο κυψελών σε σειρά με την μία από τις δύο σκιασμένη (Salvadores, C. and Francisco, J., 2015).

Στο Σχήμα 3.7, όπου η σκιασμένη κυψέλη είναι συνδεδεμένη παράλληλα με τις υπόλοιπες παρατηρούμε πως το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} είναι το άθροισμα των δύο επιμέρους ρευμάτων I_{sc1} και I_{sc2} . Από την άλλη, στο Σχήμα 3.8, όπου η σκιασμένη κυψέλη είναι συνδεδεμένη σε σειρά με τις υπόλοιπες παρατηρούμε πως η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} είναι το άθροισμα των δύο επιμέρους τάσεων V_{oc1} και V_{oc2} .

Όταν μια κυψέλη που είναι συνδεδεμένη σε σειρά με τις υπόλοιπες σκιάζεται μερικώς, τότε ολόκληρο το πλαίσιο επηρεάζεται ως προς την ενεργειακή του απόδοση. Στον βαθμό απόδοσης, ασφαλώς, σημαντικό ρόλο παίζουν τόσο το πλήθος των στηλών που βρίσκονται σε σύνδεση σε σειρά, όσο και το ποσοστό της σκίασης. Ειδικότερα, η σκιασμένη κυψέλη μειώνει το ρεύμα που περνά μέσα από τις μη σκιασμένες κυψέλες, με αποτέλεσμα οι κυψέλες αυτές -που λειτουργούν πλήρως- να παράγουν υψηλότερη τάση. Αυτή η υψηλότερη τάση μπορεί να οδηγήσει σε αναστροφή της πόλωσης της σκιασμένης φωτοβολταϊκής κυψέλης, κάτι που επιτρέπει να περνάει πολύ ρεύμα και η ισχύς που παράγεται από τις καλές κυψέλες να καταναλώνεται από την κακή κυψέλη. Το αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η ενέργεια που περνάει από τη σκιασμένη κυψέλη να μετατρέπεται σε θερμότητα με κίνδυνο να λιώσει το φ/β πλαίσιο.

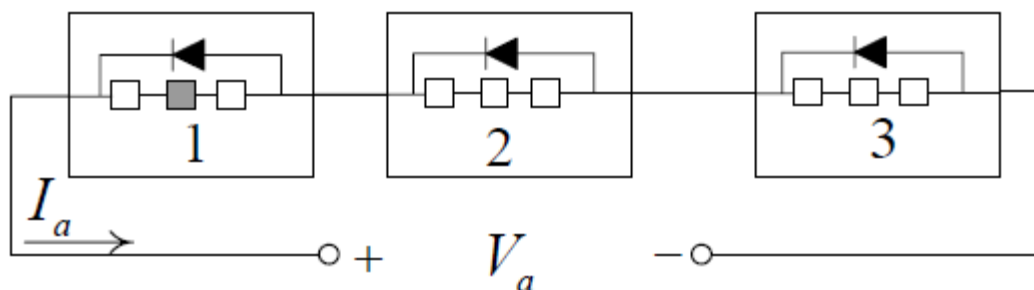
3.2.1. Επίδραση ποσοστού σκίασης

Τα σχήματα 3.9, 3.10, 3.11 και 3.12 που ακολουθούν αποτελούν πειραματική διερεύνηση της επίδρασης της σκίασης στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος σε τεχνολογίες φωτοβολταϊκών.

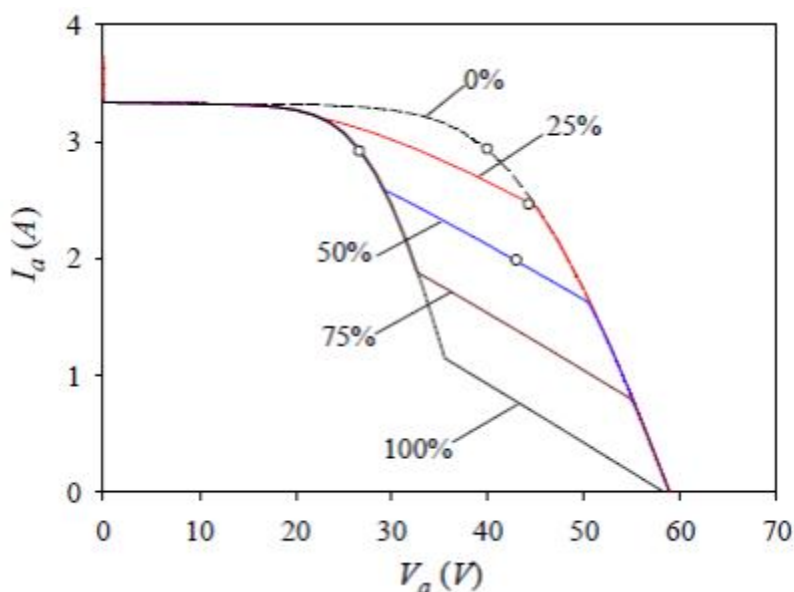
Πιο συγκεκριμένα παρατίθενται:

- ένα κύκλωμα με 3 ομάδες φ/β κυψελών συνδεδεμένες σε σειρά με μία δίοδο παράκαμψης για κάθε ομάδα
- ένα κύκλωμα με 6 ομάδες φ/β κυψελών συνδεδεμένες σε σειρά με μία δίοδο παράκαμψης για κάθε ομάδα
- αντίστοιχες χαρακτηριστικές τους I-V για διαφορετικό ποσοστό μερικής σκίασης

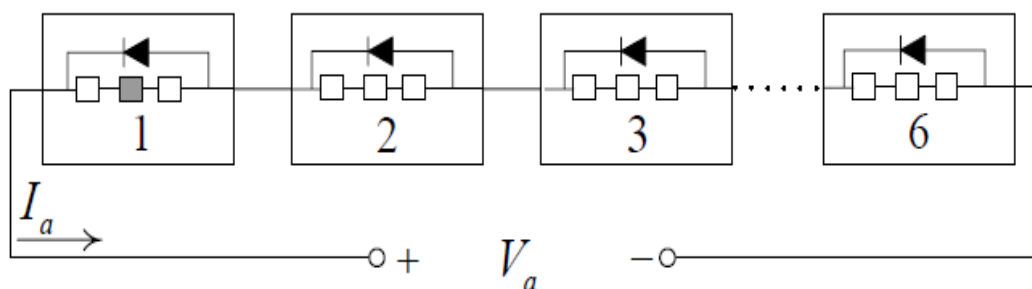
Τέλος τα σημεία μέγιστης ισχύος αποδίδονται στα σχήματα με κύκλους.



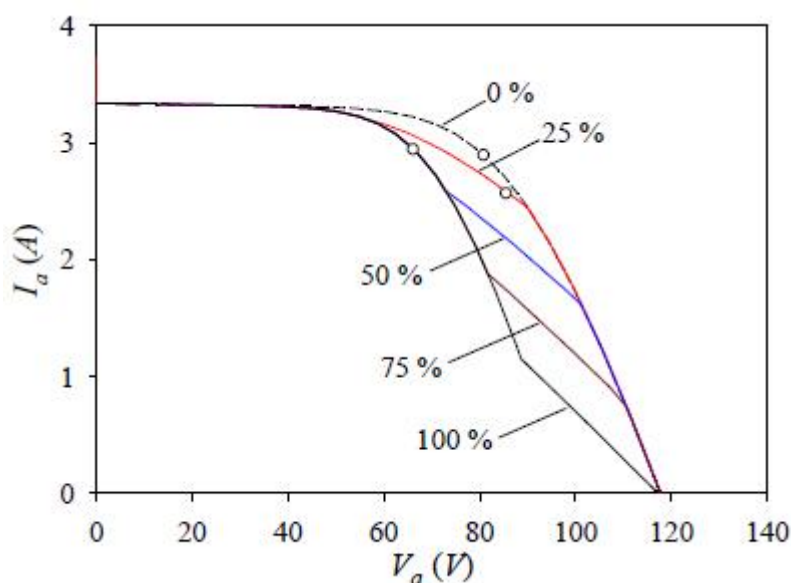
Σχήμα 3.9 : Τρεις ομάδες φ/β κυψελών συνδεδεμένες σε σειρά με μια σκιασμένη κυψέλη στην 1^η ομάδα (Wang, Y.-J. & Po-Chun Hsu, 2009).



Σχήμα 3.10 : Χαρακτηριστική I-V για τρεις ομάδες φ/β κυψελών συνδεδεμένες σε σειρά με μια σκιασμένη κυψέλη στην 1^η ομάδα με διαφορετικά ποσοστά σκίασής της. (Wang, Y.-J. & Po-Chun Hsu, 2009).



Σχήμα 3.11 : Έξι ομάδες φ/β κυψελών συνδεδεμένες σε σειρά με μια σκιασμένη κυψέλη στην 1^η ομάδα (Wang, Y.-J. & Po-Chun Hsu, 2009).



Σχήμα 3.12 : Χαρακτηριστική I-V για έξι ομάδες φ/β κυψελών συνδεδεμένες σε σειρά με μια σκιασμένη κυψέλη στην 1^η ομάδα με διαφορετικά ποσοστά σκίασής της. (Wang, Y.-J. & Po-Chun Hsu, 2009).

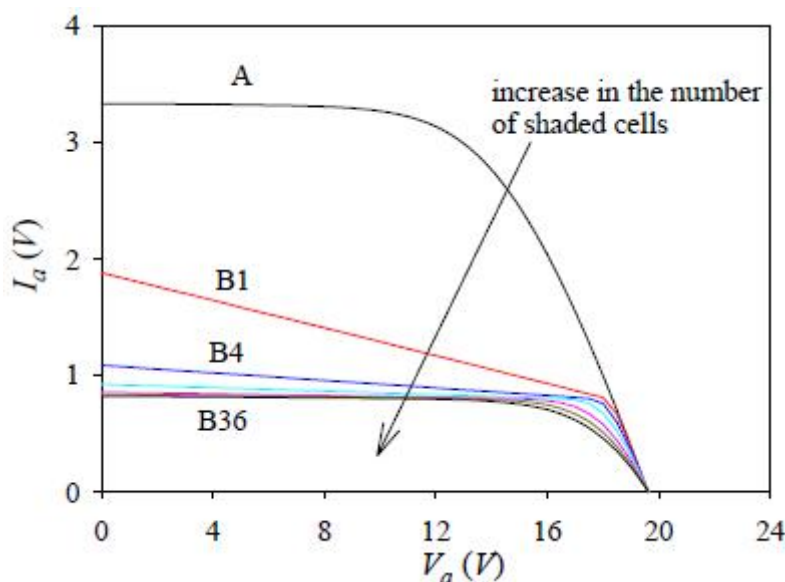
Όταν η σκίαση αυξάνεται από μηδενική τιμή σε ποσοστό 100%, τότε παρατηρούμε πως στην χαρακτηριστική καμπύλη I-V, το σημείο μέγιστης ισχύος μετατοπίζεται. Στην περίπτωση που φτάσει η σκίαση το ποσοστό 50%, σημειώνεται καθοδική μετατόπιση, δηλαδή μείωση του **ρεύματος** βραχυκυκλώματος I_{sc} , ενώ για ποσοστό σκίασης από 50% έως και 100% το σημείο μέγιστης ισχύος μετατοπίζεται προς τα αριστερά, δηλαδή μειώνεται η **τάση** ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} . Και στις δύο περιπτώσεις, η ισχύς του κυκλώματος μειώνεται. Σε περίπτωση που οι ομάδες φ/β κυψελών γίνουν περισσότερες, τότε η τάση μεγαλώνει κι έτσι μεγαλώνει και η ισχύς, με αποτέλεσμα το σημείο μέγιστης λειτουργίας να μετατοπίζεται προς τα δεξιά.

3.2.2. Αριθμός σκιασμένων κυψελών ανά ομάδα

Έστω ότι έχουμε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο που αποτελείται από 36 φωτοβολταϊκές κυψέλες, οι οποίες συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους. Η απόδοση του πλαισίου εξαρτάται από:

- τον αριθμό των σκιασμένων κυψελών
- αν οι σκιασμένες κυψέλες βρίσκονται στην ίδια ή σε διαφορετική ομάδα (Κάθε ομάδα φ/β κυψελών διαθέτει και από μία δίοδο παράκαμψης)
- από τον αριθμό των ομάδων των φ/β κυψελών.

Το παρακάτω διάγραμμα I-V (βλ. σχήμα 3.13) δείχνει την μεταβολή της χαρακτηριστικής I-V σε σχέση με τον αριθμό των φ/β κυψελών που είναι σκιασμένες. Η **καμπύλη Α** αναπαριστά την περίπτωση κατά την οποία οι 36 κυψέλες του φ/β πλαισίου είναι ασκίαστες, ενώ οι **καμπύλες Β** μας δείχνουν τις σκιασμένες φ/β κυψέλες που συνδέονται σε σειρά. Αναλυτικότερα, στην **καμπύλη Β4** οι 4 από τις 36 φ/β κυψέλες είναι σκιασμένες σε σειρά, ενώ στη **Β36** και οι 36 κυψέλες είναι σκιασμένες σε σειρά.



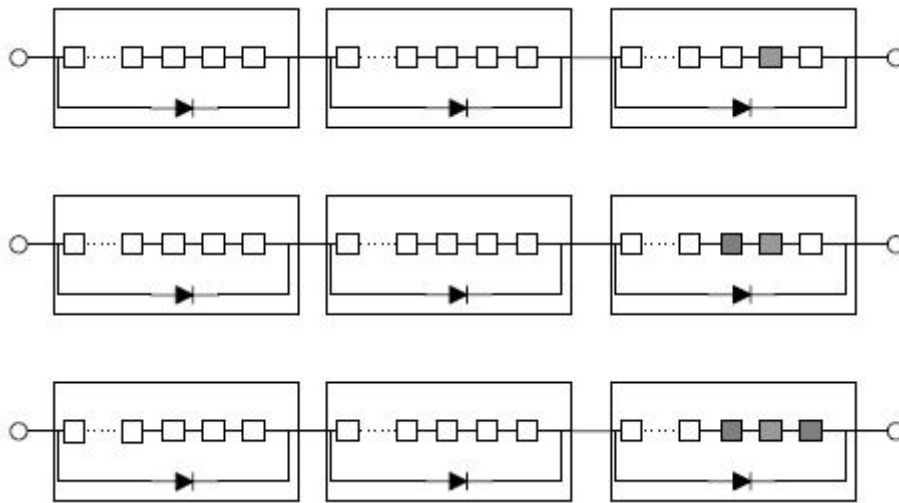
Σχήμα 3.13 : Χαρακτηριστική I-V φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσει των σκιασμένων φωτοβολταϊκών κυψελών (Wang, Y.-J. & Po-Chun Hsu, 2009).

Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι όσο περισσότερες είναι οι σκιασμένες κυψέλες, τόσο μειώνεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} , ενώ η τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} δε μεταβάλλεται.

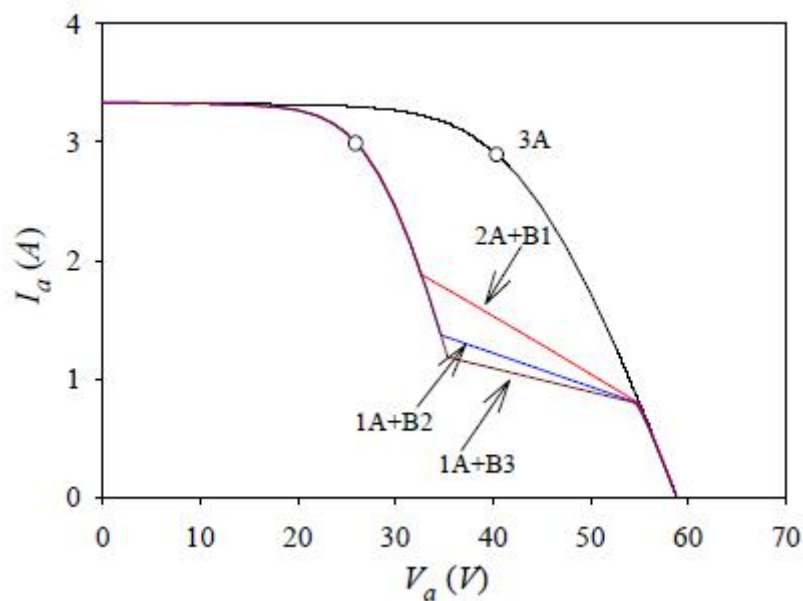
Η χαρακτηριστική I-V διαφοροποιείται ανάλογα με το αν οι σκιασμένες κυψέλες βρίσκονται στην ίδια ή σε διαφορετικές ομάδες. Παρακάτω διακρίνονται τρεις περιπτώσεις που οι σκιασμένες φωτοβολταϊκές κυψέλες είναι στην ίδια ομάδα:

- στο (α) υπάρχει μια σκιασμένη κυψέλη σε μία ομάδα
- στο (β) δύο σκιασμένες κυψέλες
- στο (γ) τρεις σκιασμένες κυψέλες

Όπως θα προσέξουμε στο σχήμα 3.14 στην αντίστοιχη χαρακτηριστική τους I-V το σημείο μέγιστης ισχύος δεν επηρεάζεται.

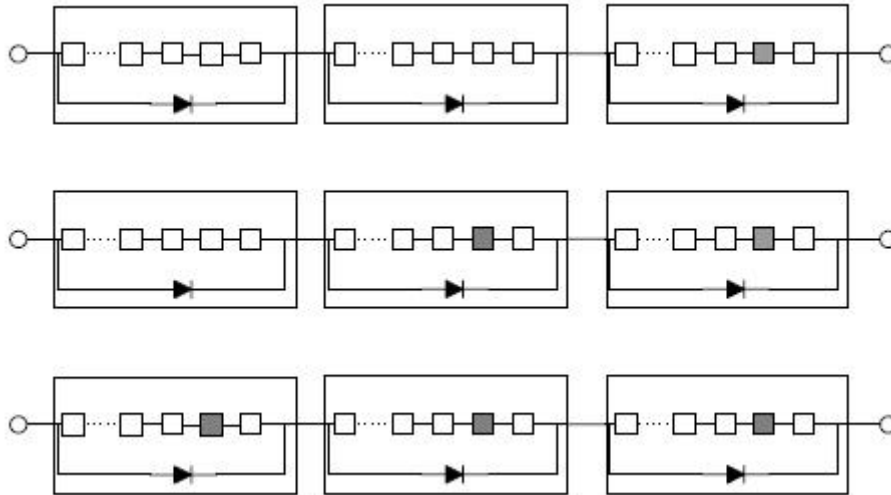


Σχήμα 3.14 : Τρεις ομάδες φ/β κυψελών συνδεδεμένες σε σειρά με μια, δύο και τρεις σκιασμένες κυψέλες σε μία ομάδα (Wang, Y.-J. & Po-Chun Hsu, 2009).

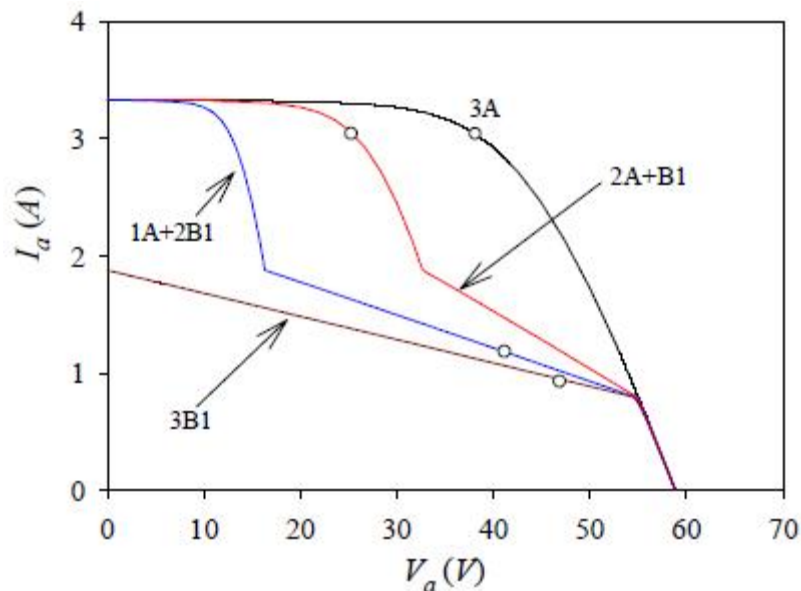


Σχήμα 3.15 : Χαρακτηριστική I-V φωτοβολταϊκού πλαισίου για τρεις ομάδες φ/β κυψελών συνδεδεμένες σε σειρά με μια, δύο και τρεις σκιασμένες κυψέλες σε μία ομάδα. (Wang, Y.-J. & Po-Chun Hsu, 2009).

Στην περίπτωση που οι σκιασμένες κυψέλες βρίσκονται σε διαφορετικές ομάδες -με τουλάχιστον μια σκιασμένη κυψέλη σε κάθε ομάδα- τότε το σημείο μέγιστης ισχύος μετατοπίζεται, και μάλιστα όσο περισσότερες είναι οι ομάδες των φωτοβολταϊκών κυψελών που είναι σκιασμένες, τόσο το σημείο αυτό μετατοπίζεται και χαμηλότερα.



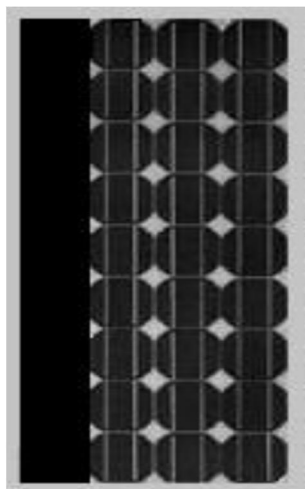
Σχήμα 3.16 : Τρεις ομάδες φ/β κυψελών συνδεδεμένες σε σειρά με μια σκιασμένη φωτοβολταϊκή κυψέλη σε μία ή περισσότερες ομάδες (Wang, Y.-J. & Po-Chun Hsu, 2009).



Σχήμα 3.17 : Χαρακτηριστική I-V φωτοβολταϊκού πλαισίου για τρεις ομάδες φ/β κυψελών συνδεδεμένες σε σειρά με μια σκιασμένη κυψέλη σε διαφορετικές ομάδες (Wang, Y.-J. & Po-Chun Hsu, 2009).

3.2.3. Σκίαση κάθετων σειρών στο κατακόρυφο φ/β πλαίσιο

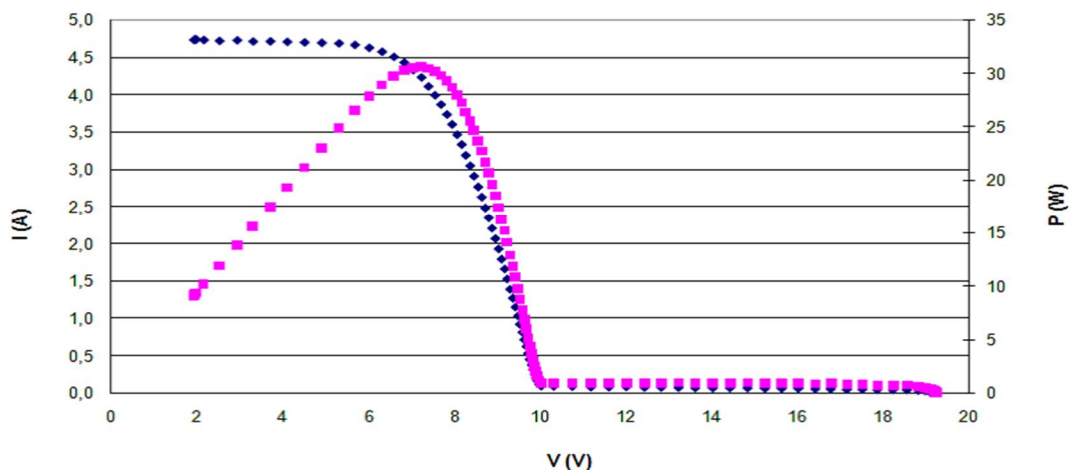
Ο Προδρομίδης (2009) διεξήγαγε την πειραματική μελέτη που ακολουθεί: Χρησιμοποιήθηκε πλαίσιο με 36 φ/β κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά, με τέσσερις κάθετες σειρές και εννιά οριζόντιες σειρές σε κατακόρυφο φ/β πλαίσιο. Η κάθε κάθετη σειρά αποτελείται από εννιά κυψέλες. Κάθε κάθετη σειρά καλύφθηκε με ένα κομμάτι μαύρο χαρτόνι, ξεκινώντας από την πρώτη:



Σχήμα 3.18 : Σκίαση 1^{ης} κάθετης σειράς σε κατακόρυφο φ/β πλαίσιο. (Προδρομίδης, 2009)

Κατ' αυτόν τον τρόπο σκιάζεται κάθε φορά και μια από τις τέσσερις κάθετες σειρές. Έπειτα, από την πειραματική αυτή διαδικασία προκύπτουν οι χαρακτηριστικές καμπύλες I-V (ρεύματος-τάσης) και P-V (ισχύος-τάσης). Σκοπός είναι να αναλυθούν και να συγκριθούν τα τελικά αποτελέσματα προκειμένου να αντληθούν καίρια συμπεράσματα.

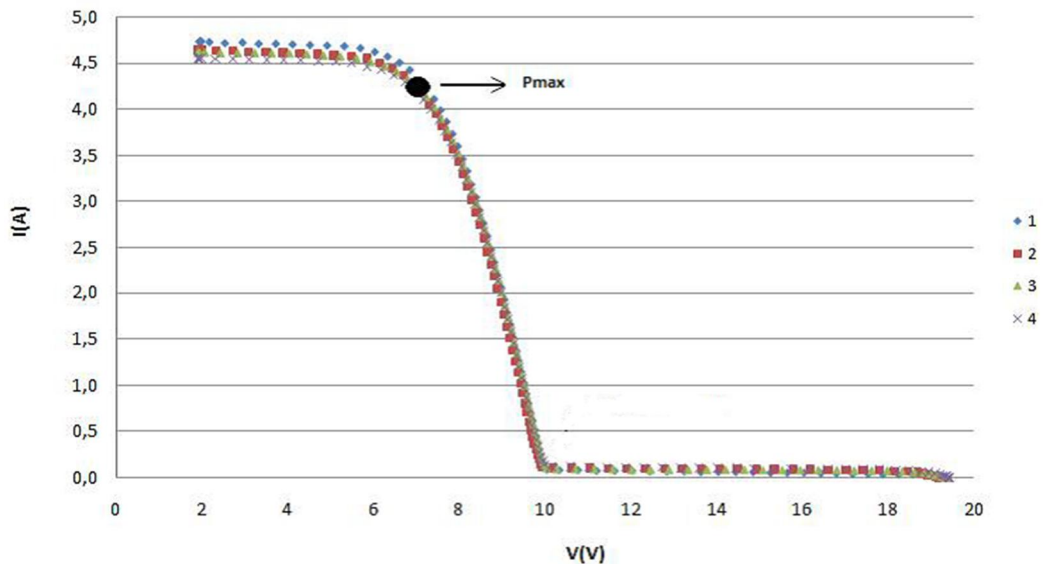
Ξεκινώντας από την πρώτη περίπτωση σκίασης της 1^{ης} κάθετης σειράς, ενδεικτικά η χαρακτηριστική I-V προκύπτει ως εξής (βλ. σχήμα 3.19):



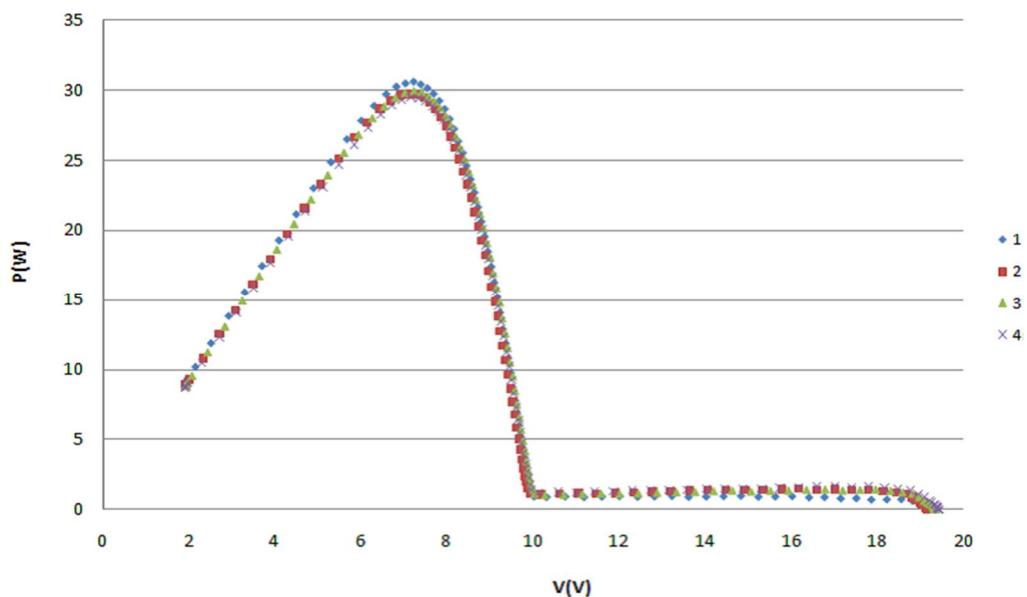
Σχήμα 3.19 : Χαρακτηριστική I-V & P-V για τη σκίαση της 1^{ης} κάθετης σειράς (Προδρομίδης, 2009)

Κατά τον ίδιο τρόπο προκύπτουν οι χαρακτηριστικές και για τις σκιάσεις των υπολοίπων κάθετων σειρών. Στο σχήμα 3.20 και 3.21, παρατίθενται απευθείας οι χαρακτηριστικές για τις συνολικές σκιάσεις και των τεσσάρων περιπτώσεων, ώστε να γίνουν συγκρίσεις.

Τα τελικά αποτελέσματα σκίασης και των τεσσάρων κάθετων σειρών φαίνονται στην παρακάτω χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσεως I-V (βλ. σχήμα 3.20):



Σχήμα 3.20 : Χαρακτηριστική I-V συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων σκίασης και των 4^{ων} κάθετων σειρών. (Προδρομίδης, 2009)



Σχήμα 3.21 : Χαρακτηριστική P-V συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων σκίασης και των 4^{ων} κάθετων σειρών. (Προδρομίδης, 2009).

Παρατηρώντας τις δύο χαρακτηριστικές καμπύλες I-V και P-V, καταλαβαίνουμε πως όποια κάθετη σειρά και αν σκιάστηκε από τις τέσσερις, το αποτέλεσμα θα είναι να χαθεί ίδιο ποσό ενέργειας από το φ/β πλαίσιο. Στο μέγεθος της ενεργειακής απώλειας, βασικό ρόλο παίζει και ο τρόπος που τοποθετούνται οι δίοδοι που προστατεύουν το πλαίσιο από την θερμότητα και το φαινόμενο των θερμών κηλίδων. Στην καμπύλη I-V αποτυπώνεται πάνω στην καμπύλη και το **σημείο μέγιστης ισχύος**. (Προδρομίδης, 2009)

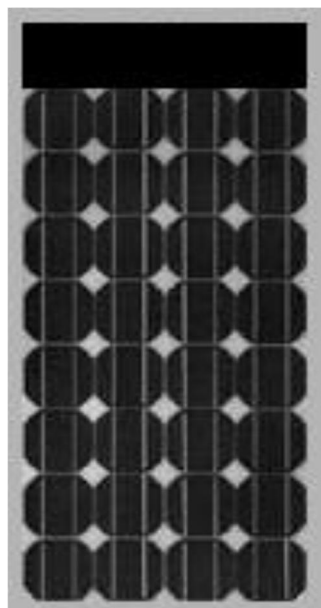
Σταθερές συνθήκες πειραματικών μετρήσεων:

- Ημέρα με ουρανό χωρίς σύννεφα → με σχεδόν σταθερή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας μεταξύ 977W/m^2 - 927W/m^2 , η οποία προσπίπτει στην επιφάνεια του φ/β πλαισίου.
- Σταθερή θερμοκρασία πλαισίου → $T \approx 50^\circ\text{C}$

Η τελική πτώση της απόδοσης του πλαισίου φτάνει επομένως στο 60 % συγκριτικά με το ποσοστό απόδοσης 15,6% υπό κανονικές συνθήκες.

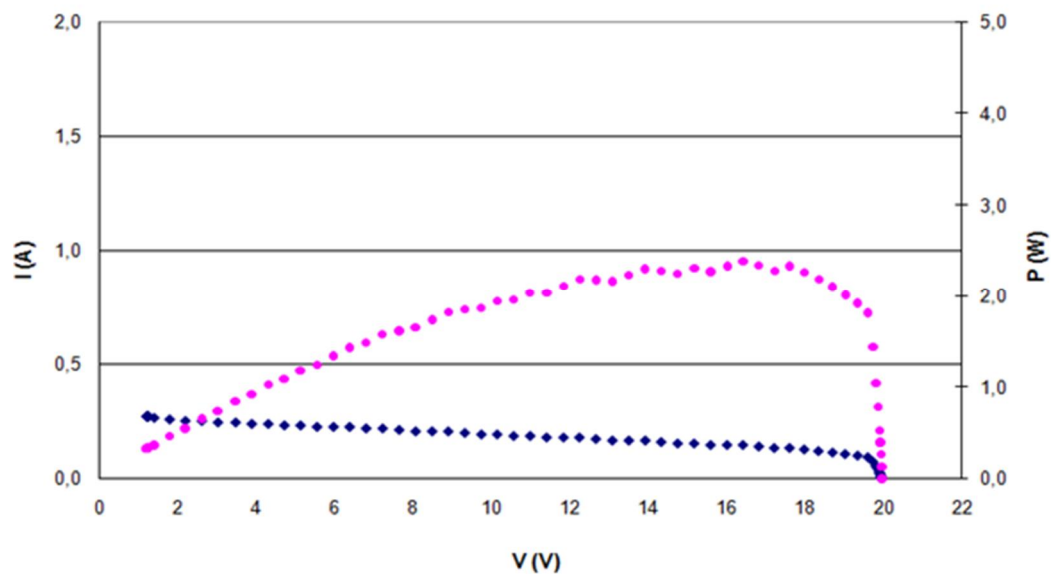
3.2.4. Σκίαση οριζόντιων σειρών στο κατακόρυφο φ/β πλαίσιο

Ο Προδρομίδης (2009) διεξήγαγε την πειραματική μελέτη που ακολουθεί: Χρησιμοποιήθηκε φωτοβολταϊκό πλαίσιο με 36 κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά. Δοκιμάζουμε να σκιαστεί κάθε φορά κι από μια οριζόντια σειρά σε κατακόρυφο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Κάθε οριζόντια σειρά από της εννέα αποτελείται από τέσσερις κυψέλες. Η σκίαση επιτυγχάνεται με μαύρο κομμένο χαρτόνι (όπως έγινε και κατά τη σκίαση των κάθετων σειρών), ενώ η ένταση της ακτινοβολίας διατηρείται σχεδόν σταθερή γύρω στο 930W/m^2 .



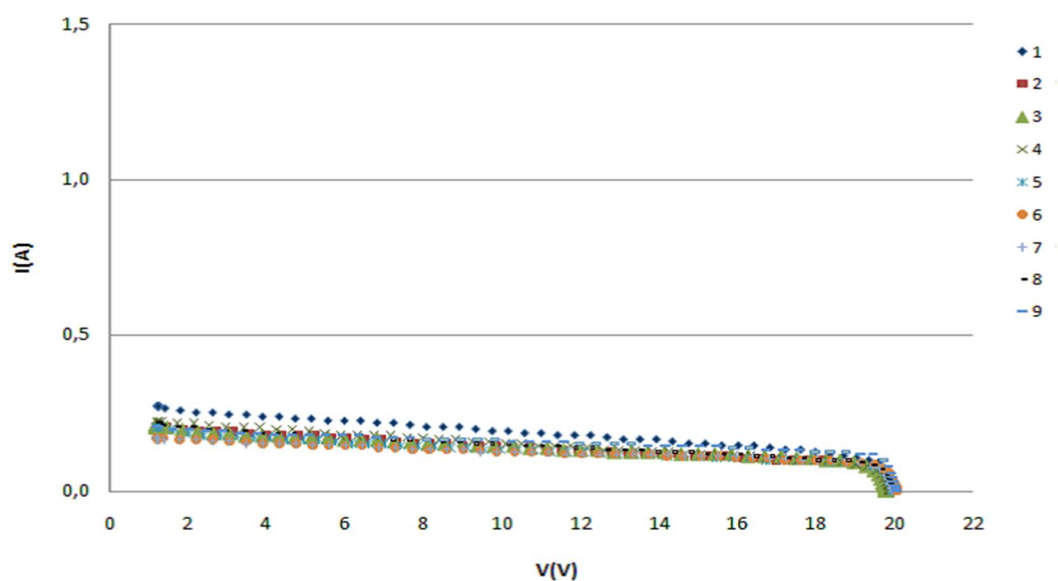
Σχήμα 3.22.: Σκίαση 1^{ης} οριζόντιας σειράς σε κατακόρυφο φ/β πλαίσιο. (Προδρομίδης, 2009).

Σκιαζεται αρχικά η πρώτη οριζόντια σειρά για την οποία παρατίθεται στην συνέχεια η χαρακτηριστική καμπύλη I-V (βλ. σχήμα 3.23):

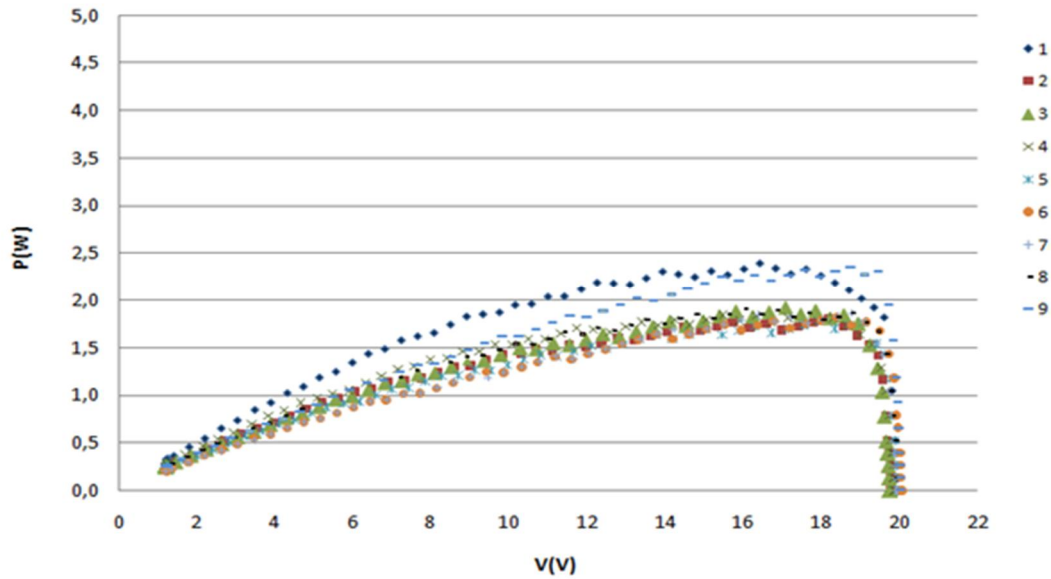


Σχήμα 3.23 : Χαρακτηριστική I-V & P-V για τη σκίαση της 1^{ης} οριζόντιας σειράς. (Προδρομίδης, 2009)

Κατά τον ίδιο τρόπο σκιαζονται και οι υπόλοιπες οριζόντιες σειρές σχεδιάζοντας τις χαρακτηριστικές I-V για κάθε μια από αυτές. Στα σχήματα 3.24 και 3.25 ακολουθούν οι συγκεντρωτικές χαρακτηριστικές I-V και P-V και για τις εννέα οριζόντιες σειρές, από τα αποτελέσματα των οποίων θα εξαχθούν τα τελικά συμπεράσματα.



Σχήμα 3.24.: Χαρακτηριστική I-V συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων σκίασης και των 9 οριζόντιων σειρών. (Προδρομίδης, 2009)



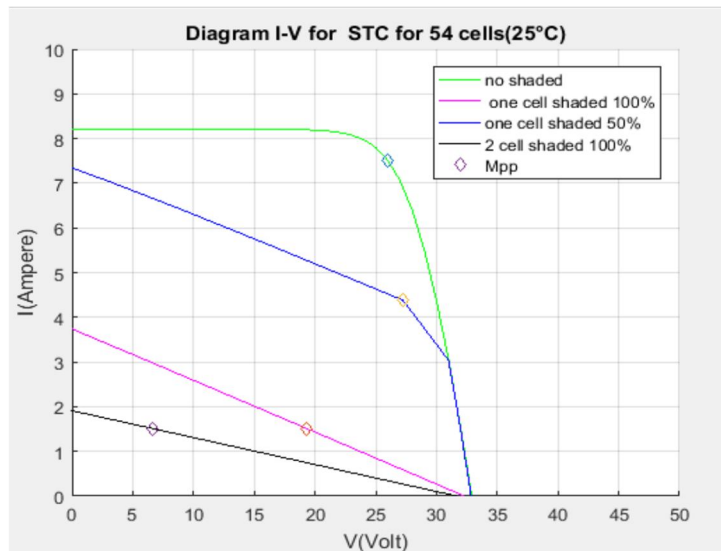
Σχήμα 3.25.: Χαρακτηριστική P-V συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων σκίασης και των **9** οριζόντιων σειρών. (Προδρομίδης, 2009)

Όπως προκύπτει από τις καμπύλες ρεύματος και τάσης, το μέγιστο ρεύμα είναι λιγότερο από 0,5 A. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των σκιάσεων κάθε κάθετης και κάθε οριζόντιας σειράς, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η σκίαση μιας οριζόντιας σειράς έχει μεγαλύτερη επίδραση στην απόδοση του πλαισίου απ' ό τι η σκίαση μιας κάθετης σειράς. Η διαπίστωση αυτή παρουσιάζει κάποιο ενδιαφέρον αν σκεφτούμε πως η οριζόντια σειρά αποτελείται από λιγότερες κυψέλες (4) συγκριτικά με τη κάθετη σειρά που αποτελείται από 9 κυψέλες.

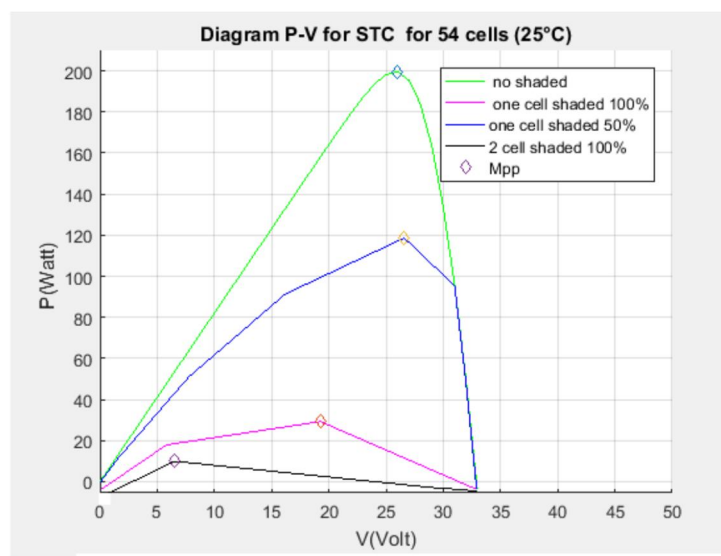
Η τελική πτώση της απόδοσης του πλαισίου φτάνει επομένως στο 97 % συγκριτικά με το ποσοστό απόδοσης 15,6% υπό κανονικές συνθήκες. (Προδρομίδης, 2009).

3.2.5. Επίδραση της μερικής σκίασης στην απόδοση του Φ/Β ανάλογα με τον αριθμό των κυψελών στο πλαίσιο

Στα σχήματα 3.26, 3.27, 3.28, 3.29 φαίνεται η επίδραση της μερικής σκίασης στην απόδοση του φ/β.



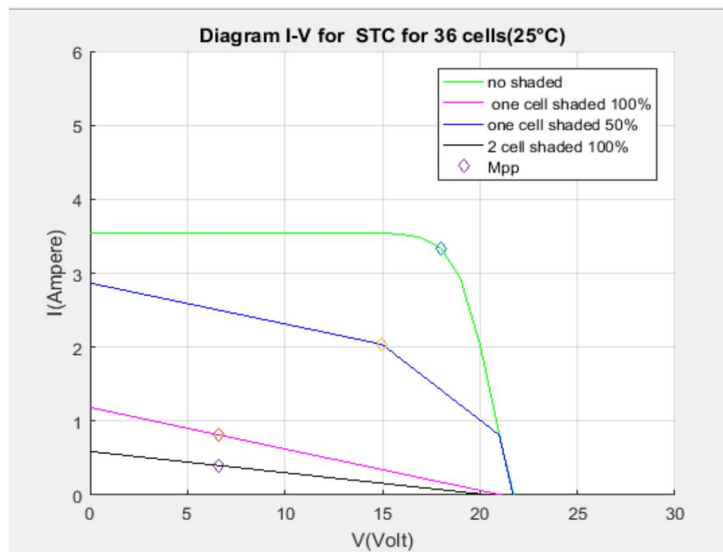
Σχήμα 3.26 : Διάγραμμα I-V για φωτοβολταϊκό 54 κυψελών και για όλες τις περιπτώσεις σκίασης.



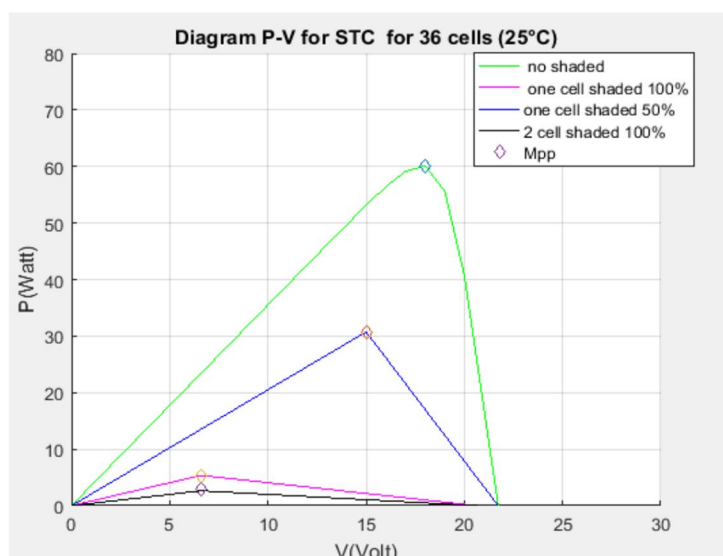
Σχήμα 3.27 : Διάγραμμα P-V για φωτοβολταϊκό 54 κυψελών και για όλες τις περιπτώσεις σκίασης.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα I-V και P-V, καταλαβαίνουμε ότι όταν δεν υπάρχει σκίαση στο φωτοβολταϊκό τότε η μέγιστη ισχύς είναι 195,3W. Όταν η σκίαση φτάνει σε ποσοστό 50% σε μια κυψέλη η μέγιστη ισχύς μειώνεται σε 119,3W. Στην περίπτωση που η σκίαση φτάνει σε ποσοστό 100% μιας κυψέλης η μέγιστη ισχύς είναι 29,1W. Για ολική σκίαση δύο κυψελών, η μέγιστη ισχύς φτάνει 10W. Όταν σκιάζεται μια κυψέλη του φωτοβολταϊκού τότε η τάση μειώνεται σε σχέση με την περίπτωση που το πλαίσιο είναι εντελώς ασκίαστο. Όσο μεγαλύτερη είναι η

σκίαση (άρα και ο αριθμός των κυψελών που σκιάζονται), τόσο μεγαλύτερη είναι η πτώση της τάσης. Επιπλέον μέσω του διαγράμματος I-V (βλ. σχήμα 3.28) γίνονται γνωστά τα σημεία που αντιστοιχούν στη μέγιστη ισχύ.



Σχήμα 3.28 : Διάγραμμα **I-V** για φωτοβολταϊκό 36 κυψελών και για όλες τις περιπτώσεις σκίασης.



Σχήμα 3.29 : Διάγραμμα **P-V** για φ/β 36 κυψελών και για όλες τις περιπτώσεις σκίασης.

Συμπεραίνουμε ότι οι τιμές της μέγιστης ισχύος για το πλαίσιο των 54 κυψελών είναι αρκετά μεγαλύτερες από αυτές του πλαισίου των 36 κυψελών. Αυτό συμβαίνει καθώς το πλαίσιο των 54 κυψελών έχει περισσότερες κυψέλες τοποθετημένες σε σειρά, επομένως μεγαλύτερη τάση ανοιχτοκύκλωσης, μεγαλύτερο ρεύμα βραχυκύκλωσης άρα και μεγαλύτερες τιμές μέγιστης ισχύος σε κάθε περίπτωση σκίασης. Επίσης, όσο μεγαλύτερη είναι η σκίαση, τόσο μειώνεται η ισχύς. Η μέγιστη ισχύς για το πλαίσιο των 54 κυψελών -για καθεμιά από τις παραπάνω περιπτώσεις- είναι μεγαλύτερη από το πλαίσιο των 36 κυψελών.

3.2.6. Υπολογισμός ενεργειακής απώλειας λόγω μερικής σκίασης σε επίπεδο φωτοβολταϊκής κυψέλης

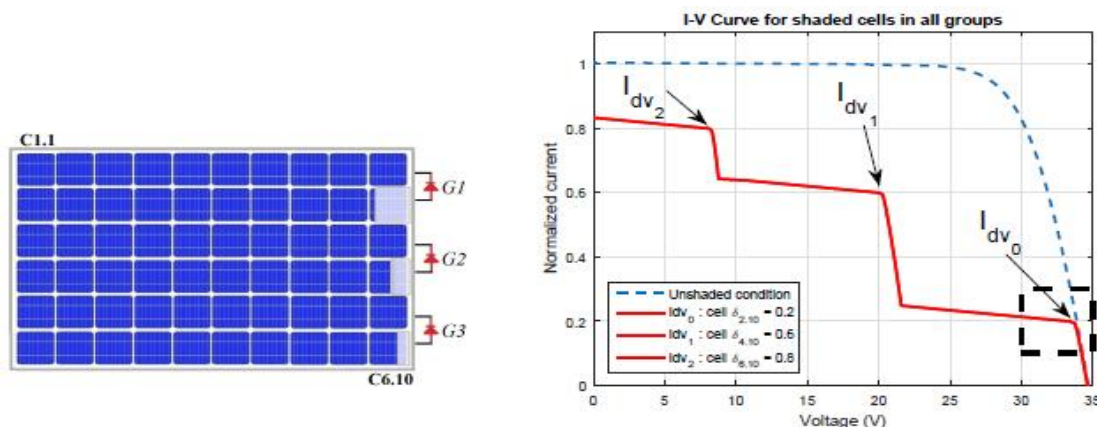
Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο που υπόκειται σε συνθήκες μερικής σκίασης παρουσιάζει υψηλό κίνδυνο βλάβης και απώλειας παραγωγής ενέργειας, ενώ συχνά οδηγεί και σε προβλήματα υπερθέρμανσης και hotspot.

Οι παρακάτω πειραματικές μετρήσεις έγιναν από την Bishop (Καλιφόρνια) και πραγματοποιήθηκαν στις 14 Φεβρουαρίου 2017 σε συνθήκες ηλιοφάνειας. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 15 °C και η παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο ήταν 910Watt / m² στη 1:00 μ.μ. Η μερική σκίαση παράγει μέγιστο σημείο ισχύος (MPP).

Αρχικά, δυο περιπτώσεις περιγράφουν την επίδραση των μονών σκιασμένων κυψελών που είναι διάσπαρτες σε διάφορες ομάδες και την επίδραση των σκιασμένων κυψελών που ομαδοποιούνται σε μια μόνο ομάδα. Έπειτα, δυο περιπτώσεις προορίζονται να δείξουν την επίδραση της σκιάδους κίνησης. Η τελική προσομοίωση στοχεύει σε μια σκιασμένη φωτοβολταϊκή αλυσίδα-σειρά. (Gutiérrez Galeano A. et al., 2018).

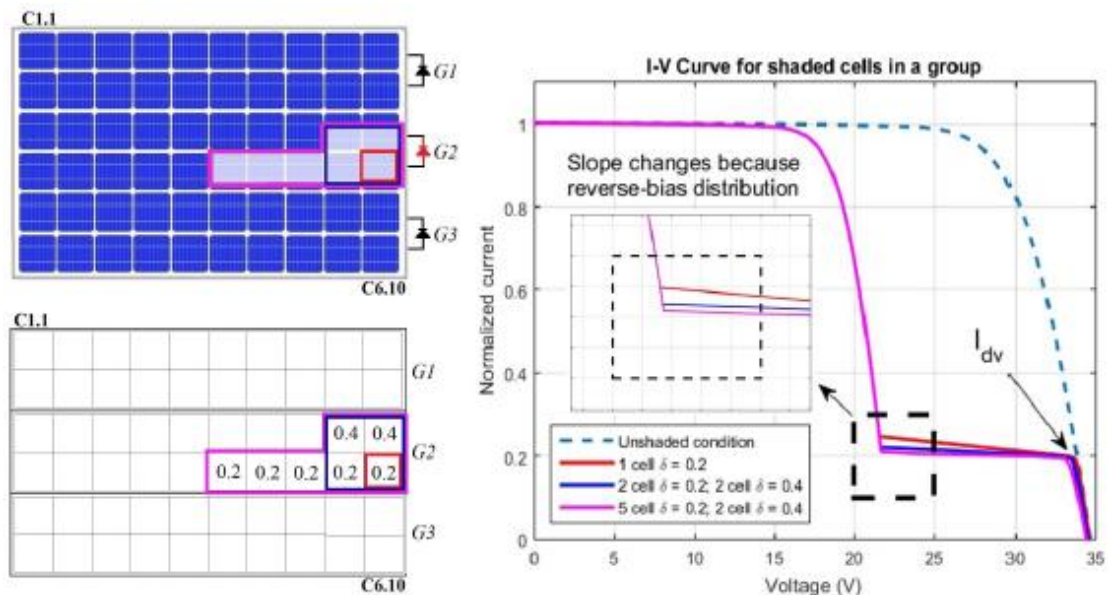
Η πρώτη περίπτωση που απεικονίζεται στο **Σχήμα 3.30**, δείχνει την περίπτωση σκίασης μιας κυψέλης εσωτερικά κάθε φορά σε συνθήκες φυσιολογικής συμπεριφοράς ρεύματος-τάσης. Αυτή η περίπτωση προσομοίωσης δείχνει ότι το χαμηλότερο ρεύμα απόκλισης I_{dv} είναι ανάλογο με αυτό των σκιασμένων κυψελών με τη χαμηλότερη τιμή δ . Στο σχήμα 3.30 διακρίνουμε τρεις ομάδες (G1, G2, G3) καθεμία εκ των οποίων αποτελείται από δυο σειρές κυψελών. Σε κάθε δεύτερη σειρά σκιάστηκε η τελευταία κυψέλη με διαφορετικό ποσοστό μερικής σκίασης για να δούμε πώς μεταβάλλεται το ρεύμα απόκλισης I_{dv} .

Στην πρώτη ομάδα G1 παρατηρούμε ότι I_{dv0} : cell $\delta_{2,10}$ όπου 2: 2η σειρά, 10: 10^ο κυψέλη = 0,2. Στην δεύτερη ομάδα G2 παρατηρούμε ότι I_{dv1} : cell $\delta_{4,10} = 0,6$. Στην τρίτη ομάδα G3 παρατηρούμε ότι I_{dv2} : cell $\delta_{6,10} = 0,8$. Παρατηρούμε λοιπόν πως όσο μεγαλύτερη είναι η σκιασμένη επιφάνεια της κυψέλης τόσο μικρότερο είναι το αποκλίνον ρεύμα (divergence current) I_{dv} , άρα και η απόδοση.



Σχήμα 3.30 : Μελέτη περίπτωσης σκιαγραφικού μοτίβου για μονές σκιασμένες κυψέλες σε κάθε μια από τις τρεις ομάδες (G1, G2, G3). (Gutiérrez Galeano A. et al., 2018)

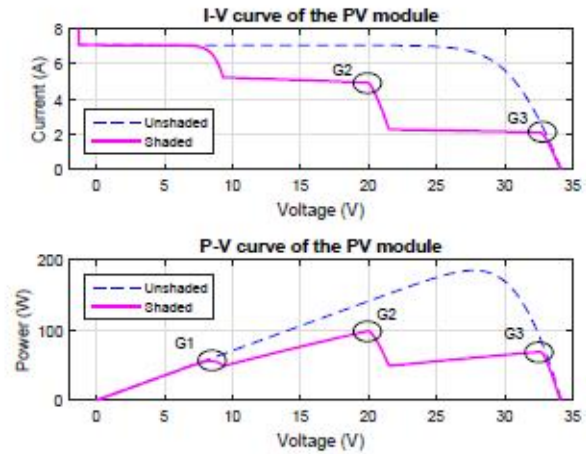
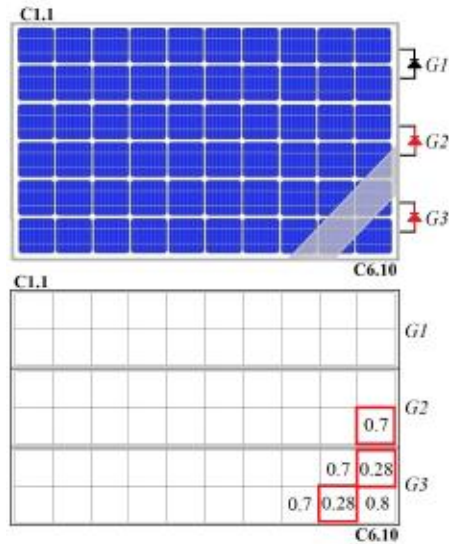
Στο **Σχήμα 3.31**, παρουσιάζονται τρεις υπο-περιπτώσεις σκιασμένων κυψελών σε μία μόνο ομάδα (G2). Η πρώτη υπό-περίπτωση έχει μια σκιασμένη κυψέλη με $\delta = 0,2$. Η δεύτερη υπό-περίπτωση έχει δύο σκιασμένες κυψέλες με $\delta = 0,2$ και τα άλλα δύο κυψέλες με $\delta = 0,4$. Η τρίτη υπό-περίπτωση έχει πέντε κυψέλες με $\delta = 0,2$ και τα άλλα δύο κυψέλες με $\delta = 0,4$. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι η χαμηλότερη τιμή του δ σε μια ομάδα με πολλές σκιασμένες κυψέλες προκαλεί την απόκλιση ρεύματος I_{dv} . Επίσης, παρατηρούμε ότι ένας μεγαλύτερος αριθμός σκιασμένων κυψελών σε μια ομάδα προκαλεί μείωση της κλίσης της καμπύλης I-V. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στη συμπεριφορά των σκιασμένων κυψελών όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο παράδειγμα (βλ. σχήμα 3.30). Ως αποτέλεσμα, μία μόνο σκιασμένη κυψέλη σε μια ομάδα έχει υψηλότερη κλίση I-V καμπύλης και μεγαλύτερο κίνδυνο θερμών κηλίδων, από μια ομάδα με πολλές σκιασμένες κυψέλες, εξαιτίας της τάσης αντίστροφης πόλωσης και της κατανομής απορρόφησης ισχύος.



Σχήμα 3.31 : Αναπαράσταση τριών υποθέσεων σκιασμένων φωτοβολταϊκών κυψελών της ίδιας ομάδας G2. Υποπεριοχή 1: κόκκινου χρώματος, Υποπεριοχή 2: μπλε χρώματος, Υποπεριοχή 3: μωβ χρώματος. (Gutiérrez Galeano A. et al., 2018).

Τα **Σχήματα 3.30** και **3.31** προσφέρονται για την ανάλυση μεμονωμένων σκιασμένων φωτοβολταϊκών κυψελών και ομάδων. Ωστόσο, η μετατόπιση της σκιάς σε καθημερινές συνθήκες μπορεί να δημιουργήσει πολλά ακανόνιστα σχέδια λόγω της σκίασης. Για να περιγράψουμε αυτήν την πιο ρεαλιστική πτυχή, τα **Σχήματα 3.32** και **3.33** απεικονίζουν δύο ακανόνιστα μοτίβα που προκαλούνται από τη σκίαση ράβδου, κεραίας ή καμινάδας.

Το **Σχήμα 3.32α** δείχνει ένα διαγώνιο σχέδιο σκιάς και τις σχετικές αναλογίες σκίασης. Σε αυτήν την περίπτωση, το **Σχήμα 3.32β** δείχνει ότι η ομάδα G3 με $\delta_{6,9} = \delta_{5,10} = 0,28$ παράγει το χαμηλότερο ρεύμα απόκλισης $I_{dv3} = 0,28 I_{scTi} \approx 2A$, και η ομάδα G2 με $\delta_{4,10} = 0,7$ παράγει το ρεύμα απόκλισης $I_{dv2} = 0,7 I_{scTi} \approx 5A$. Στην περίπτωση της ομάδας G1 = 1,0 όπου δεν υπάρχει σκίαση, το $I_{dv1} = 1,0 I_{scTi} \approx 7A$.

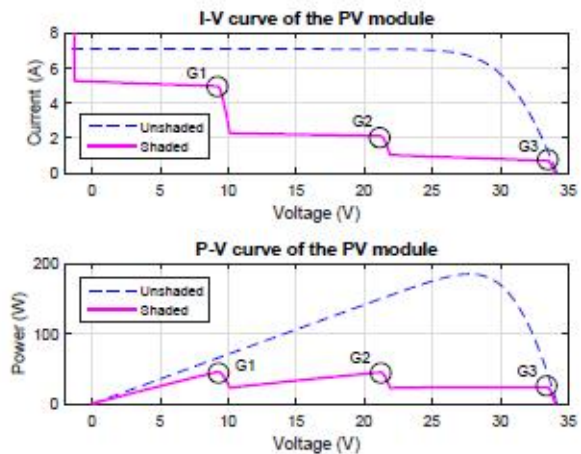
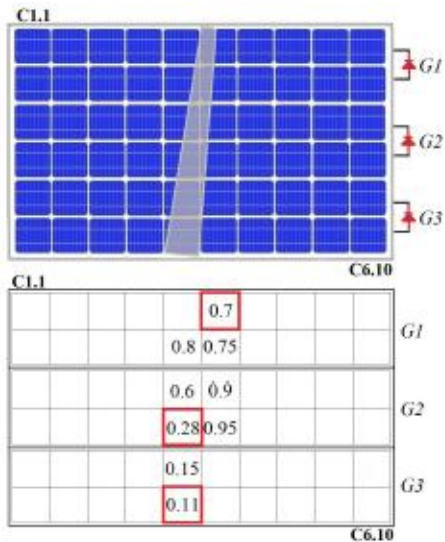


(α) διαγώνιο μοτίβο σκίασης σε δύο ομάδες φωτοβολταϊκού πλαισίου.

(β) Καμπύλες I-V και P-V και σχέση με τις ομάδες.

Σχήμα 3.32 : Συμπεριφορά I-V και P-V για διαγώνιο μοτίβο σκίασης σε φωτοβολταϊκό πλαίσιο. (Gutiérrez Galeano A. et al., 2018).

Το **Σχήμα 3.33α** περιγράφει ένα μοτίβο σκίασης κάθετης προς το οριζόντιο έδαφος που ισχύει σε όλες τις κάθετες ομάδες. Αυτό το σχήμα δείχνει ότι η επίδραση της σκίασης και οι σχετικές αποκλίσεις εξαρτώνται από το χαμηλότερο δ σε κάθε ομάδα. Επιπλέον, οι γειτονικές σκιασμένες κυψέλες της ίδιας ομάδας επηρεάζουν την κλίση της καμπύλης I-V χωρίς να έχουμε σχετική επίπτωση στο I_{dv} .



(α) Κάθετο μοτίβο σκιάς και παράγοντες σκίασης.

(β) Καμπύλες I-V και P-V και σχέση με τις ομάδες.

Σχήμα 3.33 : Συμπεριφορά I-V και P-V για κάθετο μοτίβο σκίασης σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. (Gutiérrez Galeano A. et al., 2018).

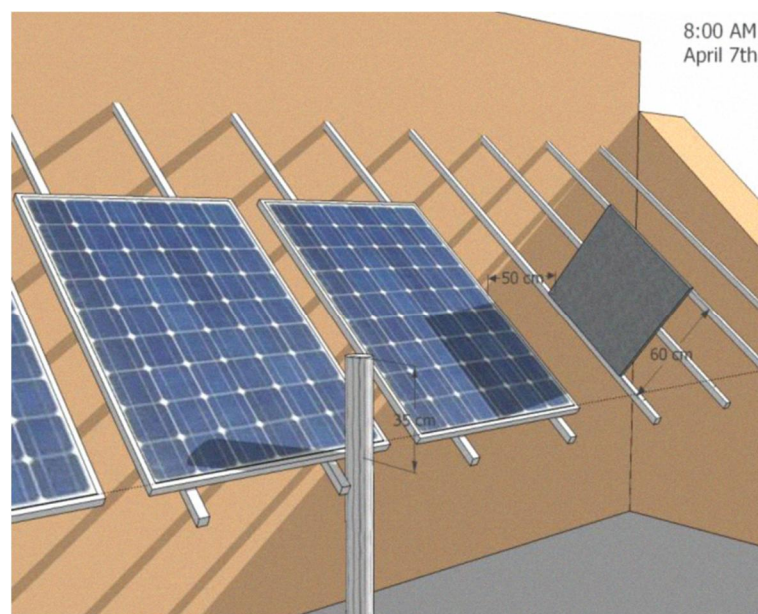
Σύμφωνα, λοιπόν, με τους Gutiérrez Galeano και συν. (2018) τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τη συσχέτιση μεταξύ του λόγου σκίασης και της καμπύλης I – V. Από τα παραπάνω παραδείγματα συμπεραίνουμε ότι:

- Τα πρώτα σημεία απόκλισης στις καμπύλες I-V σε ομάδες, προκαλούνται από τις χαμηλότερες αναλογίες σκίασης των φωτοβολταϊκών κυψελών.
- Οι μικρότερες περιοχές με σκιασμένες κυψέλες σε σύγκριση με τις μεγαλύτερες περιοχές με σκιασμένες κυψέλες στην ίδια ομάδα παρέχουν ελάχιστη συμβολή στην καμπύλη I-V
- Οι σκιασμένες κυψέλες με την υψηλότερη σκιασμένη περιοχή σε κάθε ομάδα προκαλούν τα ρεύματα απόκλισης.
- Αρκετά σκιασμένες κυψέλες σε μία μόνο φωτοβολταϊκή ομάδα τροποποιούν αμελητέα το σημείο λειτουργίας που επιβάλλεται από τη φωτοβολταϊκή κυψέλη με την υψηλότερη σκιασμένη περιοχή.
- Η μερική σκίαση σε μία μεμονωμένη κυψέλη σε μια ομάδα είναι πιο επιβλαβής απ' ό,τι αν είναι σε περισσότερες, επειδή μπορεί να προκληθεί υπερθέρμανση.
- Οι ομοιόμορφες σκιές σε πολλές κυψέλες της ίδιας ομάδας προκαλούν λιγότερους δομικούς κινδύνους.

3.2.7. Σκίαση από διαφορετικά εμπόδια

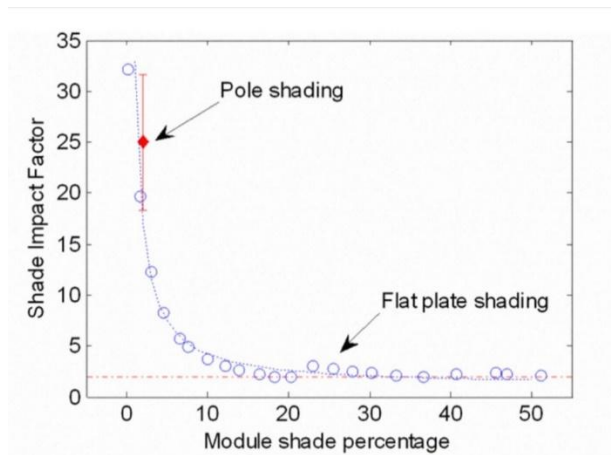
Μερική σκίαση πλαισίου από κοντινά εμπόδια

Το πείραμα στο Σχήμα 3.34 και 3.35 πραγματοποιήθηκε από την National Renewable Energy Laboratory (NREL, 2009). Δίπλα στα φ/β πλαίσια τοποθετήθηκαν δύο διαφορετικά αντικείμενα με σκοπό να προκαλέσουν σκίαση σε διαφορετικές ώρες της μέρας. Μια επίπεδη πλάκα διαστάσεων 60 cm x 60 cm τοποθετήθηκε 50 cm στα ανατολικά του τελευταίου φ/β πλαισίου. Το δεύτερο εμπόδιο σκίασης είναι ένα σωλήνας διαμέτρου 4" που τοποθετήθηκε μπροστά από την κάτω δεξιά γωνία ενός άλλου φ/β πλαισίου. Ο κύλινδρος εκτείνεται κατά 35 εκατοστά από το κατώτατο σημείο της επιφάνειας του πλαισίου. Η διάταξη των εμποδίων σκίασης φαίνεται στο σχήμα 3.34.



Σχήμα 3.34 : Δοκός και επίπεδη πινάκιδα ως εμπόδια σκίασης για δύο διαφορετικά φ/β πλαίσια την 7^η Απριλίου στις 8.00 π.μ. (Deline, 2009).

Το εμπόδιο της επίπεδης πλάκας ρίχνει σκιά ορθογώνιου σχήματος η οποία εκτείνεται σε όλο το μήκος του πλαισίου στη μέγιστη έκτασή του. Ο κυλινδρικός στύλος ρίχνει μια μακριά λεπτή σκιά που διασχίζει την επιφάνεια του πλαισίου κατά τη διάρκεια της μέρας. Παρακολουθώντας το φ/β πλαίσιο και καταγράφοντας την έκταση των σκιών, μπορεί να προσδιοριστεί μια εκτίμηση της απώλειας ισχύος λόγω σκίασης και, ως εκ τούτου, ο συντελεστής επίδρασης σκίασης. Στο σχήμα 3.35 φαίνονται τα αποτελέσματα τόσο για την σκίαση απ' τον κύλινδρο, όσο και για τη σκίαση από την επίπεδη πλάκα για περίοδο 2 ωρών που ξεκινά στις 7:30 π.μ.



Σχήμα 3.35 : Συντελεστής Επίδρασης Σκίασης (Shade Impact Factor) για σκίαση από ράβδο (♦) ή από επίπεδη πλάκα (○) που προσπίπτει κάθε φορά σε ένα μεμονωμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. (---): Ο λόγος Συντελεστή Επίδρασης Σκίασης (SIF) είναι σταθερός και ίσος με 2. (Deline, 2009).

Από την παραπάνω καμπύλη φαίνεται ότι μια μικρή σκιά (2-3 μερικώς σκιασμένες κυψέλες) οδηγεί σε δυσανάλογη απώλεια ισχύος. Καθώς η σκιά είτε του κυλίνδρου είτε της επίπεδης πλάκας καλύπτει ένα μεγαλύτερο μέρος ενός πλαισίου, ο παράγοντας επίδρασης σκιάς μειώνεται. Για ένα πλαίσιο που καλύπτεται από σκιά πάνω από το 15-50% της περιοχής της, ο παράγοντας επίδρασης πλησιάζει το 2. Μια σκιά που καλύπτει το σύνολο ενός πλαισίου θα έχει την τιμή 1.

Η μερική σκίαση των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων έχει δυσανάλογο αντίκτυπο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για φωτοβολταϊκό σύστημα μονής διάταξης (single-string grid tied PV System), η σκιά μπορεί να αντιπροσωπεύει μείωση της ισχύος πάνω από 30 φορές του φυσικού της μέγεθος. Προκειμένου να προβλεφθεί με ακρίβεια η απώλεια ισχύος λόγω σκίασης, είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί η θέση της διόδου παράκαμψης στα φωτοβολταϊκά πλαίσια, καθώς οι διόδοι παράκαμψης ρυθμίζουν την επίδραση της σκίασης σε ένα συγκεκριμένο πλαίσιο ή ομάδα κυψελών. Πέρα όμως από την ακριβή περιγραφή της διάταξης του φωτοβολταϊκού πλαισίου, απαραίτητη είναι και η έρευνα της τοποθεσίας, η οποία μπορεί να παρέχει εκτιμήσεις για τις συνθήκες σκίασης σε μία θέση και οι γεωμετρικοί μετασχηματισμοί μπορούν να μεταφράσουν αυτήν την περιγραφή σκιάς σε οποιοδήποτε σημείο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Αυτό συνιστά την αρχή μιας ακριβούς προσομοίωσης μείωσης ισχύος σε ένα μερικώς σκιασμένο φωτοβολταϊκό σύστημα (Deline, 2009).

Η παρακάτω πειραματική μελέτη είναι των Μπαμπούκη & Τσούκα (2015), κατά την οποία χρησιμοποιήθηκε φ/β πλαίσιο που σκιάστηκε κατακόρυφα στις δυο πρώτες κάθετες σειρές του αλλά και σε ολόκληρη την επιφάνειά του με νάιλον. Έπειτα το ίδιο πλαίσιο σκιάστηκε οριζόντια με την χρήση μιας ξύλινης ράβδου.

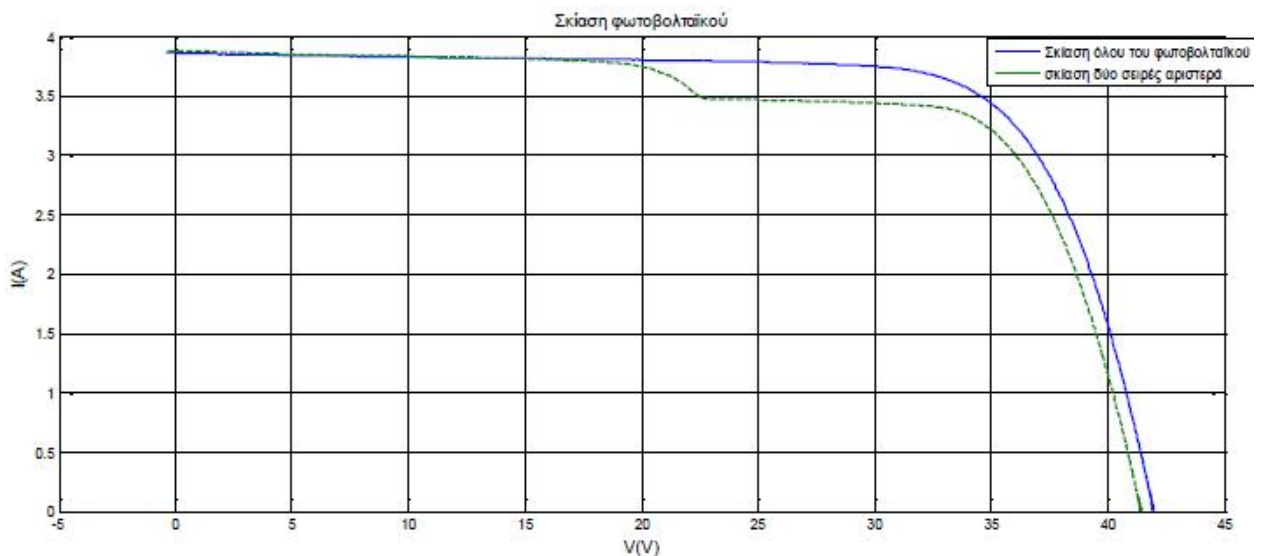


α) Σκίαση των 2 πρώτων κάθετων σειρών από ημιδιάφανο νάιλον σε κατακόρυφο πλαίσιο.



β) Σκίαση ολόκληρου φωτοβολταϊκού πλαισίου από ημιδιάφανο νάιλον.

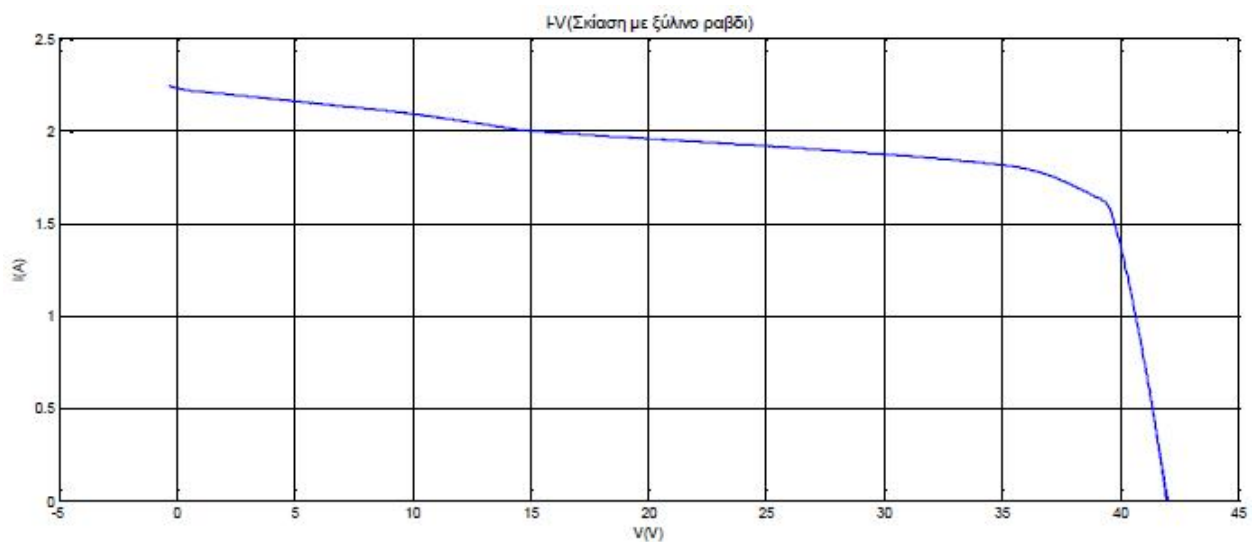
Σχήμα 3.36: Περιπτώσεις σκίασης από ημιδιάφανο νάιλον (Μπαμπούκης & Τσούκας, 2015).



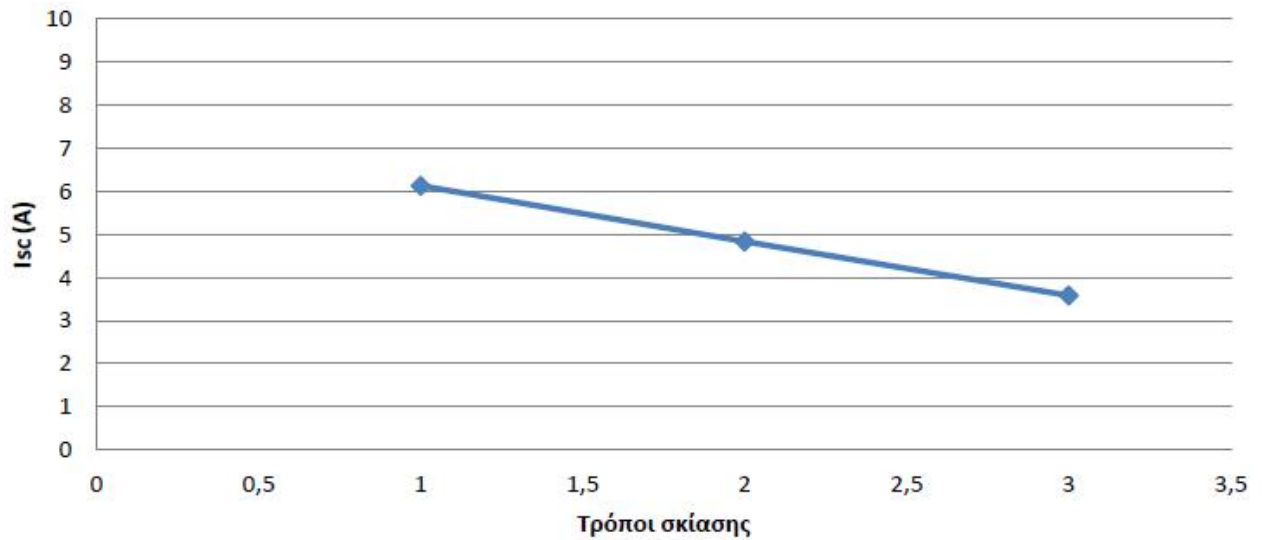
Σχήμα 3.37 : Η καμπύλη I - V στην περίπτωση σκίασης από ημιδιάφανο νάιλον (Μπαμπούκης & Τσούκας, 2015).



Σχήμα 3.38 : Σκιασμένο φ/β πλαίσιο οριζόντια με την χρήση μιας ξύλινης ράβδου.
(Μπαμπούκης & Τσούκας, 2015).



Σχήμα 3.39 : Η καμπύλη I-V στην περίπτωση σκίασης οριζόντια από ξύλινη ράβδο.
(Μπαμπούκης & Τσούκας, 2015).



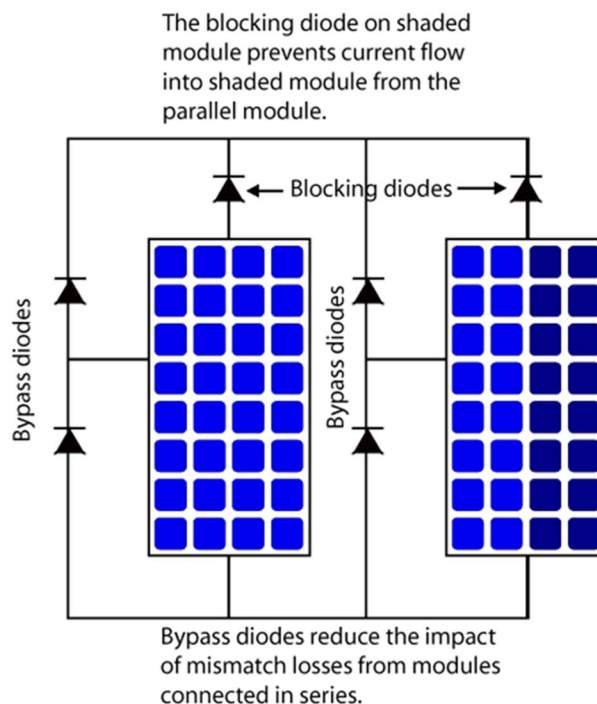
Σχήμα 3.40.: Διάγραμμα μεταβολής I_{sc} για σκίαση από διαφορετικά εμπόδια.
(Μπαμπούκης & Τσούκας, 2015).

Βλέπουμε, λοιπόν, πως η τιμή του ρεύματος I_{sc} μειώνεται όταν σκιαστεί το πλαίσιο κατά δύο κάθετες σειρές με το νάιλον, ενώ όταν σκιαστεί ολόκληρο η τιμή του μένει σταθερή. Στην περίπτωση της σκίασης με νάιλον ωστόσο όπως και σε άλλες περιπτώσεις απαλής σκίασης (θόλωσης ή σκόνης) η σκίαση είναι πολύ χειρότερη ενεργειακά και αποδοτικά σε σχέση με κανονικές περιπτώσεις σκίασης, καθώς έχουμε διπλή λειτουργία του πλαισίου ως παραγωγού και καταναλωτή.

4. Δίοδοι – Τρόποι Αντιμετώπισης

4.1. Δίοδοι κυκλωμάτων

Δίοδος, στην ηλεκτρονική, ονομάζεται η κυψέλη που περιορίζει την κατευθυντήρια ροή των φορέων αγωγιμότητας, αφήνοντας το ηλεκτρικό ρεύμα να περάσει από τη μια διεύθυνση και εμποδίζοντας, ταυτόχρονα, την κίνηση από την αντίθετη διεύθυνση. Τα κυκλώματα περιλαμβάνουν μία ή περισσότερες διόδους στη σχεδίαση του κυκλώματος. Ειδικότερα, διακρίνονται δύο είδη διόδων, τις **blocking-αντεπιστροφής** και τις **bypass-παράκαμψης**, η χρήση των οποίων στοχεύει στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης σε περίπτωση βλάβης και την μείωση ενεργειακών απωλειών.



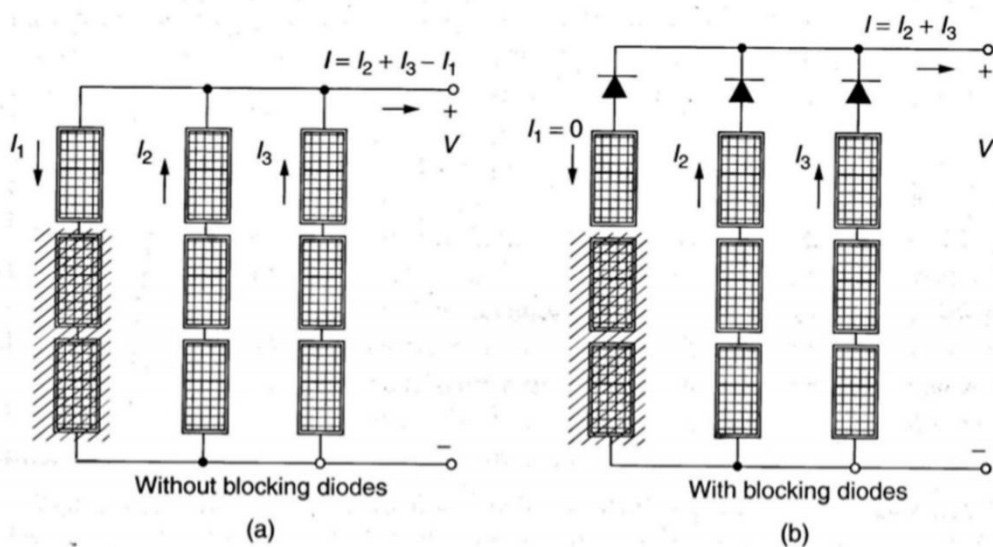
Σχήμα 4.1: Επίδραση διόδων αντεπιστροφής (blocking) σε παράλληλα συνδεδεμένες συστοιχίες. (Arefin et al., 2014)

Οι διόδους αντεπιστροφής-**blocking** τοποθετούνται σε σειρά με το κύκλωμα. Σκοπός τους είναι να εμποδίσουν τη ροή ρεύματος από τη μπαταρία προς τις κυψέλες κι έτσι αποφεύγονται βλάβες και ενεργειακές απώλειες του συστήματος σε περιπτώσεις μηδενικής απόδοσης κατά τις νυχτερινές ώρες. Αν συνδέσουμε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο με μια μπαταρία που στα άκρα της έχει τάση 12,7Volt, τότε το πλαίσιο παράγει τάση μεγαλύτερη από την τάση της μπαταρίας (η φορά του ρεύματος στα άκρα της διόδου είναι από το θετικό προς το αρνητικό) οπότε η διόδος επιτρέπει τη φόρτιση της μπαταρίας. Καθώς νυχτώνει, η τάση που παράγει το φωτοβολταϊκό όλο και θα μικραίνει ώσπου κάποια στιγμή θα εξισωθεί με την τάση της μπαταρίας.

Αν από την άλλη η μπαταρία έχει φόρτιση 13,7V, τότε κατά τη διάρκεια της νύχτας, το φωτοβολταϊκό θα παράγει ενέργεια με τάση μικρότερη των 13,7V. Αφού θα έχουμε την τάση της μπαταρίας να είναι μεγαλύτερη, το ρεύμα θα προσπαθήσει να αντιστρέψει τη φορά του, μάταια όμως γιατί η δίοδος αντεπιστροφής (blocking) που θα έχουμε τοποθετήσει δε θα επιτρέψει τη φορά αυτή του ρεύματος. Εάν δεν υπήρχε η δίοδος το ρεύμα θα αντιστρεφόταν και θα γινόταν κατανάλωση για την μπαταρία και στο τέλος αποφόρτισή της.

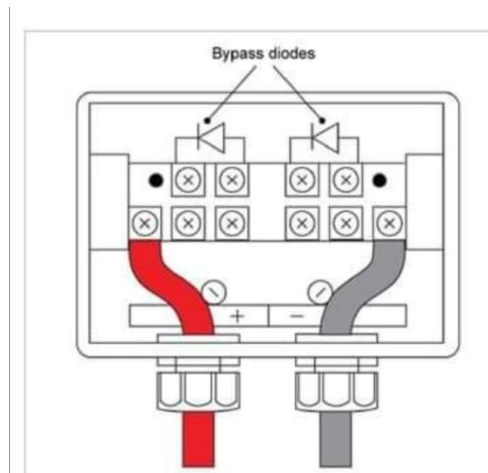
Τα φωτοβολταϊκά, όταν δεν παράγουν ρεύμα, γίνονται αντιστάσεις. Αυτό συμβαίνει γιατί για να περάσει το ρεύμα μέσα από τις φωτοβολταϊκές κυψέλες πρέπει να δοθεί ενέργεια στα ηλεκτρόνια της μιας πλάκας να μεταπηδήσουν στην άλλη και να συνεχιστεί η ροή του (Horizon, 2011).

Πλέον οι περισσότεροι ρυθμιστές φόρτισης, έχουν ενσωματωμένο ειδικό κύκλωμα για τα επιστρεφόμενα ρεύματα.

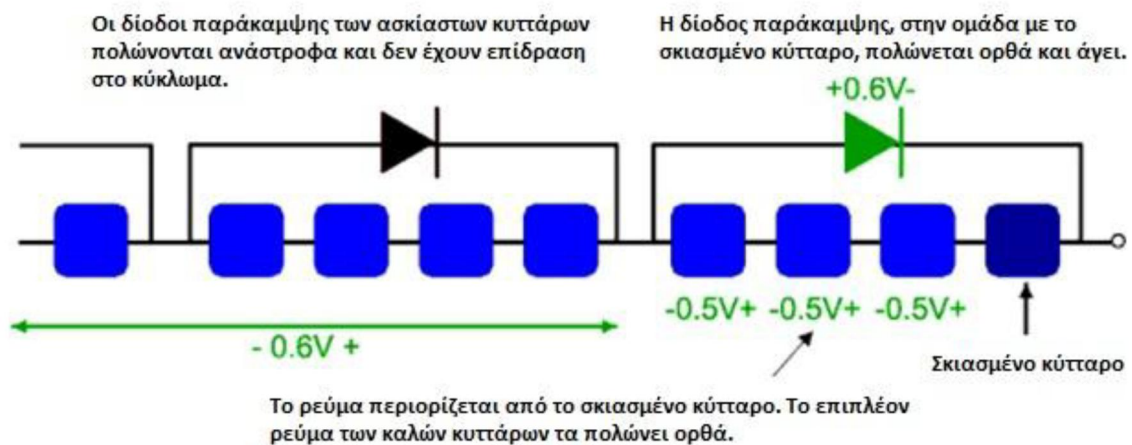


Σχήμα 4.2.: Οι δίοδοι αντεπιστροφής (blocking diodes) αποτρέπουν φαινόμενα δυσλειτουργίας και σκίασης. (Baghzouz, 2018).

Οι δίοδοι παράκαμψης-**bypass** τοποθετούνται παράλληλα και αποτελούν τυπική προσθήκη σε κάθε κρυσταλλική συστοιχία φωτοβολταϊκών κυψελών (panel). Τα περισσότερα φ/β πλαίσια διαθέτουν στο κουτί διασύνδεσης που βρίσκεται στην πλάτη τους μια, δυο ή και τρεις τέτοιες δίοδους. Η λειτουργία των δίοδων bypass έγκειται στο ότι βοηθούν κυκλώματα με βλάβη να προσπεράσουν την ελαττωματική κυψέλη και τελικά να αποφευχθούν με αυτόν τον τρόπο οι ζημιές. Πιο συγκεκριμένα, οδηγούν στην εξάλειψη των φαινομένων hotspot που αποτελούν συνήθη βλάβη στις εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων.

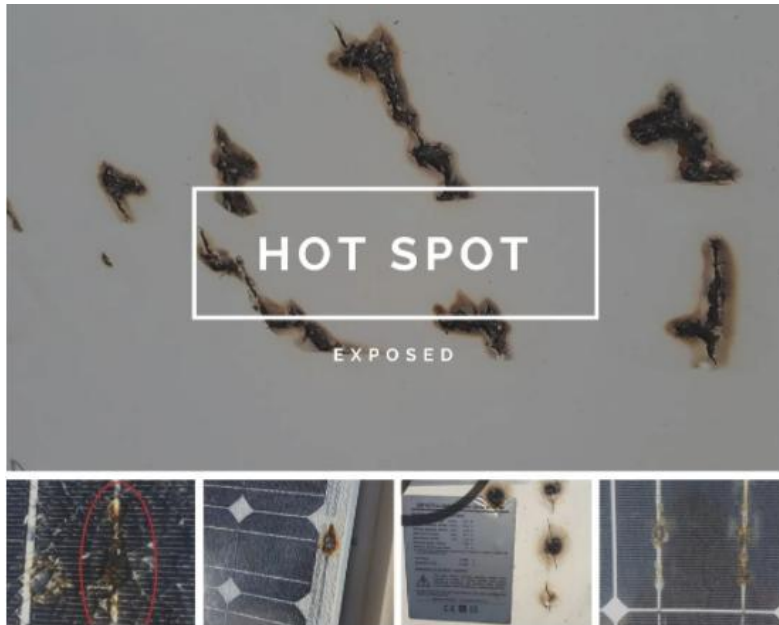


Σχήμα 4.3 : Συνδεσμολογία διόδων παράκαμψης στο κουτί διακλάδωσης που βρίσκεται στο πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού πλαισίου (Photovoltaic systems, n.d.)

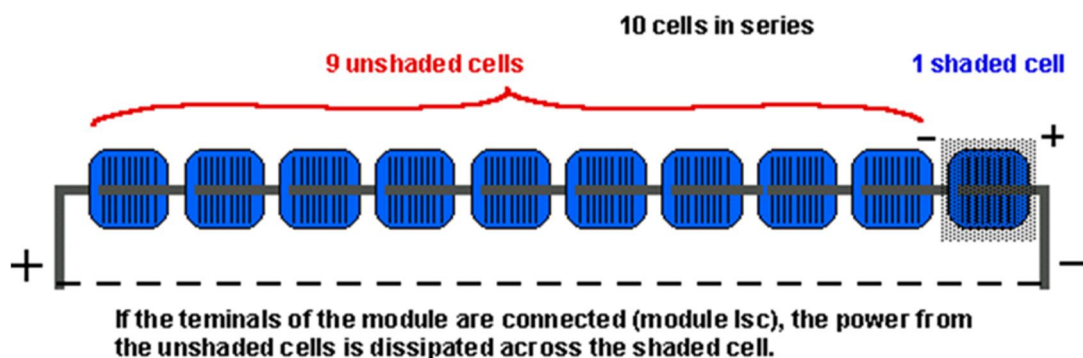


Σχήμα 4.4 : Δίοδοι παράκαμψης σε ομάδες ηλιακών κυψελών. Η τάση στις ασκίαστες ηλιακές κυψέλες εξαρτάται από το βαθμό σκίασης της προβληματικής κυψέλης. Στο σχήμα, το 0.5V είναι αυθαίρετο (Maghami et al., 2016)

Η βλάβη αυτή (hotspot) είναι γνωστή ως το **φαινόμενο των θερμών κηλίδων** και μπορεί να προκύψει εξαιτίας αστοχίας υλικού ενός εκ των φωτοβολταϊκών κυψελών που απαρτίζουν μια φ/β γεννήτρια, από μερική σκίαση είτε από λάθος σύνδεση πολικότητας των κυψελών. Ως εκ τούτου παράγεται χαμηλότερο ρεύμα συγκριτικά με τις υπόλοιπες – συνδεδεμένες σε σειρά- κυψέλες. Τα φαινόμενα hotspot μπορούν να βλάψουν τις φωτοβολταϊκές κυψέλες και σε περίπτωση που το φως του ηλίου φτάσει στην επιφάνειά τους μπορεί να προκαλέσει ακόμα και φωτιά σε ένα σύστημα που δεν είναι προστατευμένο.



Σχήμα 4.5 : Φαινόμενο θερμών κηλίδων (hotspot). (Edison)



Σχήμα 4.6 : Διάταξη φ/β στοιχείων σε σειρά με μία σκιασμένη κυψέλη. (Προδρομίδης, 2009)

Οι δίοδοι παράκαμψης (bypass) συνήθως τοποθετούνται στις φωτοβολταϊκές συστοιχίες ως εξής : 1 δίοδος για κάθε 20 φ/β κυψέλες, συνδυασμός που εμποδίζει τη δημιουργία θερμών κηλίδων και ευνοεί την αξιοπιστία του φ/β συστήματος στον χρόνο. Συμπληρωματικά, οι δίοδοι παράκαμψης μειώνουν την ενεργειακή απώλεια που προκύπτει εξαιτίας της σκίασης. Συνοπτικά, λοιπόν, οι βασικές λειτουργίες των διόδων παράκαμψης είναι:

- **Η ενίσχυση της ασφάλειας:** οι δίοδοι παράκαμψης αποτρέπουν την πρόκληση θερμών κηλίδων ρυθμίζοντας την τάση του ρεύματος από το ηλιακό φως.
- **Η αύξηση της παραγωγής ενέργειας:** μια δίοδος παράκαμψης συνδυαζόμενη με έναν MPPT ρυθμιστή φόρτισης μπορεί να αυξήσει την παραγωγή ενέργειας κάτω από συνθήκες σκίασης υπό ορισμένες συνθήκες.

Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο 60 κυψελών κατασκευάζεται συνήθως από 3 ομάδες φωτοβολταϊκών κυψελών, κάθε μία προστατευμένη από δίοδο παράκαμψης. Οι 3 αυτές ομάδες συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους για να σχηματίσουν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Εφόσον το φως που χτυπά την επιφάνεια των φωτοβολταϊκών κυψελών είναι ομοιόμορφο, κάθε κυψέλη θα παράγει περίπου 0,5V. Η τάση κάθε μιας από της 3 ομάδες θα είναι + 10V. Κάθε δίοδος παράκαμψης θα έχει -10V στην είσοδό της και δεν θα έχει ρεύμα.

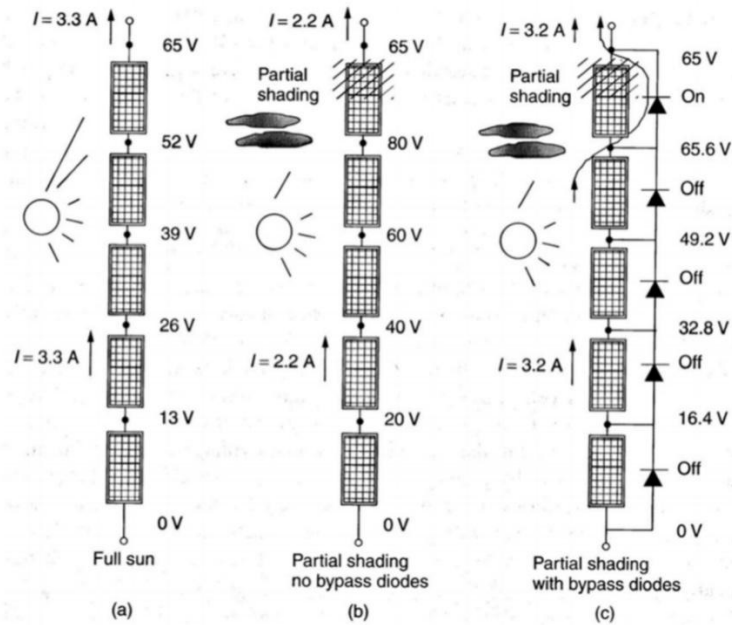
Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες είναι στην πραγματικότητα φωτοδίοδοι. Μετατρέπουν άμεσα το φως που χτυπά την επιφάνειά τους σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι σκιασμένες κυψέλες δεν μπορούν να παράγουν την ίδια ισχύ με τις μη σκιασμένες κυψέλες. Επειδή όλες οι κυψέλες σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι συνδεδεμένες σε σειρά, οι διαφορές στην ισχύ προκαλούν διαφορές στην τάση.

Στο σχήμα 4.6 παρατηρούμε μια σκιασμένη κυψέλη σε μια σειρά που μειώνει το ρεύμα μέσω των μη σκιασμένων (αποδοτικών) κυψελών, ωθώντας τα να παράγουν υψηλότερες τάσεις που συχνά μπορούν να αναστρέψουν την τάση της σκιασμένης (ανενεργής) κυψέλης. (Arefin et al., 2014).

Η κυψέλη καταναλώνει ενέργεια αντί να παράγει ενέργεια. Η ισχύς που καταναλώνεται από την κυψέλη αναγκάζει την κυψέλη να θερμανθεί και τελικά να καεί. Σε αυτές τις περιπτώσεις η τάση της ομάδας γίνεται αρνητική και το ρεύμα διέρχεται από τη δίοδο παράκαμψης αντί να ρέει μέσω της σκιασμένης φωτοβολταϊκής κυψέλης.

Το ακριβές σημείο στο οποίο η φωτοβολταϊκή κυψέλη γίνεται καταναλωτής ισχύος αντί του παραγωγού αλλάζει μεταξύ διαφορετικών τύπων κυψελών και δίοδων, αλλά συνήθως μια διαφορά 20% μεταξύ του φωτός που χτυπά τις επιφάνειες διαφορετικών κυψελών σε μία ομάδα φ/β κυψελών είναι αρκετή για να ενεργοποιήσει τη δίοδο παράκαμψης της ομάδας αυτής.

Υπό συνθήκες σκίασης, η διάταξη ενός πλαισίου καταλήγει να είναι περίπλοκη. Προκειμένου να αποκομίσουμε τη μέγιστη δυνατή ισχύ από το σύστημα, σκόπιμο είναι – ειδικά για τις περιπτώσεις μερικής σκίασης- να διερευνηθεί η επίδραση διαφορετικής κάθε φορά σκίασης σε διαφορετικές κυκλωματικές διαμορφώσεις. Οι τελευταίες επηρεάζουν σημαντικά τη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ στις περιπτώσεις μερικής σκίασης.

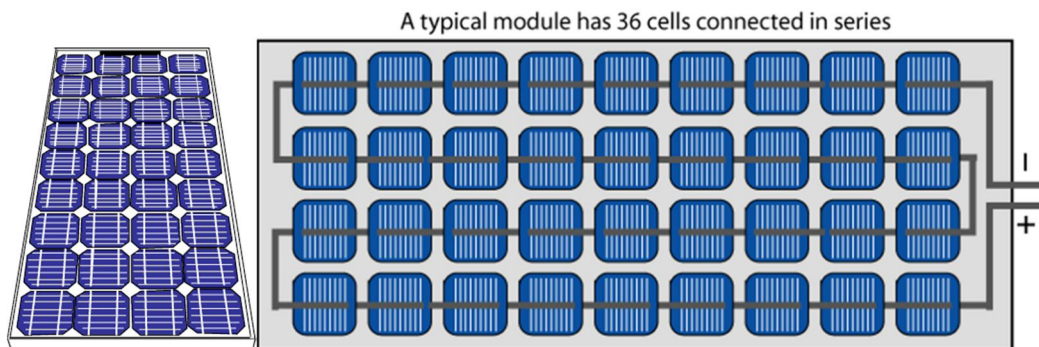


Σχήμα 4.7: Δίοδοι παράκαμψης-bypass και μερική σκίαση (Joshi, 2020).

Η διάδος παράκαμψης-bypass πρέπει να ενεργοποιείται ακόμα και όταν μία μόνο κυψέλη είναι σκιασμένη. Ιδανικά, η διάδος πρέπει να έχει τάση προς τα εμπρός και όσο το δυνατόν χαμηλότερη. Ως εκ τούτου, η πιο διαδεδομένη διάδος είναι η **διάδος Schottky** λόγω της χαμηλής τάσης προώθησης.

Η διάδος Schottky βρίσκει σημαντική εφαρμογή στους ψηφιακούς υπολογιστές. Στη μια πλευρά της επαφής χρησιμοποιεί μέταλλο, ενώ στην άλλη εμπλουτισμένο πυρίτιο. Η ταχύτητα των υπολογιστών εξαρτάται από το πόσο γρήγορα μεταβαίνουν οι διάδοί τους από την κατάσταση αγωγιμότητας σε κατάσταση αποκοπής.

4.2. Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου



Σχήμα 4.8 : Τυπικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο πυριτίου που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές απομακρυσμένης εξωτερικής ισχύος. Σε ένα τυπικό φ/β πλαίσιο, 36 κυψέλες συνδέονται σε σειρά για να παράγουν επαρκή τάση για τη φόρτιση μιας μπαταρίας 12V (Arefin et al., 2014).

Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από έναν αριθμό συνδεδεμένων ηλιακών κυψελών, εγκλεισμένων σε ένα ενιαίο, σταθερό φ/β πλαίσιο μεγάλης διάρκειας. Ο βασικός σκοπός της θωράκισης ενός συνόλου ηλεκτρικά συνδεδεμένων ηλιακών κυψελών είναι η προστασία αυτών και των διασυνδεδεμένων καλωδίων τους από το συνήθως σκληρό περιβάλλον στο οποίο χρησιμοποιούνται. Για παράδειγμα, οι ηλιακές κυψέλες, δεδομένου ότι είναι σχετικά λεπτές, είναι επιρρεπείς σε μηχανικές ζημιές όταν είναι απροστάτευτες. Επιπλέον, το μεταλλικό πλέγμα στην πάνω επιφάνεια της ηλιακής κυψέλης και τα καλώδια που διασυνδέουν τις μεμονωμένες ηλιακές κυψέλες μπορεί να διαβρωθούν από νερό ή υδρατμούς.

Οι δύο βασικές λειτουργίες της ενθυλάκωσης-θωράκισης είναι να αποτρέψει: α) τις μηχανικές βλάβες στις ηλιακές κυψέλες και β) τη διάβρωση των ηλεκτρικών επαφών από το νερό ή τους υδρατμούς. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι φωτοβολταϊκών πλαισίων και η κατασκευή του πλαισίου είναι συχνά διαφορετική για διαφορετικούς τύπους ηλιακών κυψελών ή για διαφορετικές εφαρμογές. Για παράδειγμα, οι ηλιακές κυψέλες άμορφου πυριτίου οργανώνονται συχνά σε μια εύκαμπτη συστοιχία, ενώ οι ηλιακές κυψέλες όγκου πυριτίου για εφαρμογές απομακρυσμένης ισχύος είναι συνήθως άκαμπτες με γυάλινες μπροστινές επιφάνειες.

Η τάση από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο καθορίζεται από τον αριθμό των ηλιακών κυψελών και το ρεύμα από το πλαίσιο εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος των ηλιακών κυψελών. Τα πιο κοινά πλαίσια έχουν είτε 60 κυψέλες είτε 72 κυψέλες με τρεις διόδους παράκαμψης. 60 κυψέλες φ/β πλαισίων είχαν αρχικά σχεδιαστεί για ευκολία χειρισμού σε οικιακές εφαρμογές και βαρύτερα πλαίσια 72 κυψελών για μεγάλες εγκαταστάσεις κοινής ωφέλειας όπου υπάρχουν γερανοί και υδραυλικοί ανελκυστήρες. Ωστόσο, είναι πολύ πιθανό να χρησιμοποιηθούν 72 κυψέλες φ/β πλαισίων σε οικιακές εγκαταστάσεις, αρκεί το υπόλοιπο σύστημα να έχει σχεδιαστεί για να χειρίζεται μεγαλύτερο μέγεθος. Η διάρκεια ζωής και η αποτελεσματικότητα των φωτοβολταϊκών πλαισίων πυριτίου είναι πάνω από 20 χρόνια, υποδεικνύοντας την ανθεκτικότητα ενός ενθυλακωμένου φωτοβολταϊκού πλαισίου (Bowden et al., 2019).

Η μπροστινή επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου πρέπει να έχει υψηλή μετάδοση στα μήκη κύματος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις ηλιακές κυψέλες στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Για ηλιακές κυψέλες πυριτίου, η άνω επιφάνεια πρέπει να έχει υψηλή μετάδοση φωτός στην περιοχή μήκους κύματος από 350 nm έως 1200 nm. Επιπλέον, η αντανάκλαση από την μπροστινή επιφάνεια πρέπει να είναι χαμηλή. Ενώ θεωρητικά αυτή η αντανάκλαση θα μπορούσε να μειωθεί εφαρμόζοντας μια επικάλυψη κατά της ανάκλασης στην άνω επιφάνεια, στην πράξη αυτές οι επικαλύψεις δεν είναι αρκετά ανθεκτικές ώστε να αντέχουν στις συνθήκες στις οποίες χρησιμοποιούνται τα περισσότερα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Εκτός από τις ιδιότητες ανάκλασης και μετάδοσης, το υλικό της κορυφαίας επιφάνειας θα πρέπει να είναι αδιαπέραστο από το νερό, να έχει καλή αντοχή στην κρούση, να είναι σταθερό υπό παρατεταμένη έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία και να έχει χαμηλή θερμική αντίσταση. Η είσοδος υδρατμών σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο θα διαβρώσει τις μεταλλικές επαφές και τις διασυνδέσεις και κατά συνέπεια θα μειώσει δραματικά τη διάρκεια ζωής του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Στα περισσότερα πλαίσια η μπροστινή επιφάνεια χρησιμοποιείται για να παρέχει τη μηχανική αντοχή και ακαμψία, επομένως είτε η άνω επιφάνεια είτε η πίσω επιφάνεια πρέπει να είναι μηχανικά άκαμπτες για να υποστηρίξουν τις ηλιακές κυψέλες και την καλωδίωση.

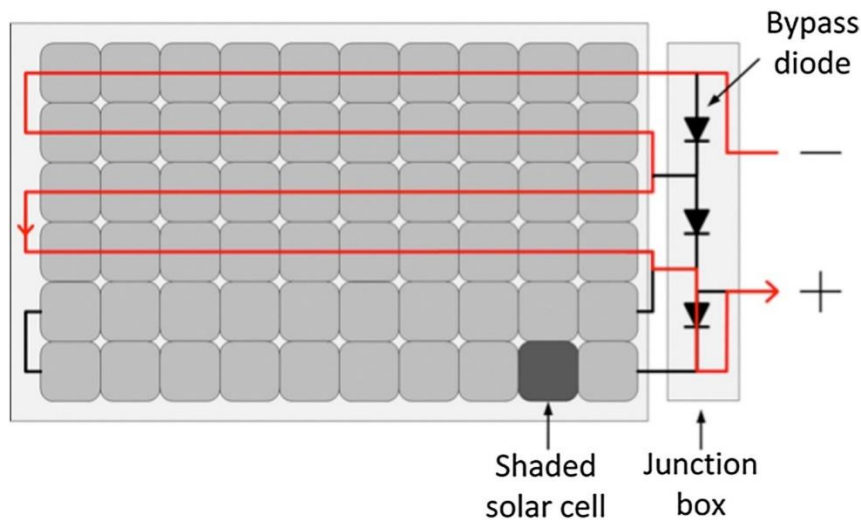
Τέλος, υπάρχουν πολλές επιλογές για ένα υλικό κορυφαίας επιφάνειας, όπως: ακρυλικό, πολυμερές και γυαλί. Το γυαλί χαμηλής περιεκτικότητας σε σίδηρο χρησιμοποιείται πιο συχνά καθώς είναι χαμηλού κόστους, ισχυρό, σταθερό, πολύ διαφανές, αδιαπέραστο από νερό και αέρια και έχει καλές ιδιότητες αυτοκαθαρισμού.

4.3. Ο ρόλος των διόδων παράκαμψης (bypass)

Η σκίαση μιας ηλιακής κυψέλης μειώνει κυρίως το ρεύμα αυτής, καθώς το ρεύμα της είναι άμεσα ανάλογο με την ακτινοβολία. Μόλις σκιαστεί μια κυψέλη, αναγκάζεται να λειτουργεί με αναστροφή κλίση από τις άλλες κυψέλες της σειράς για να είναι σε θέση να γίνει αγωγός υψηλότερων επιπέδων ρεύματος. Στη χειρότερη περίπτωση, η κυψέλη μπορεί να υποστεί μη αναστρέψιμη βλάβη, η οποία γενικά αναφέρεται ως δυσλειτουργία θερμών κηλίδων. Η μέγιστη αντίστροφη τάση V_{rev} και συνεπώς η μέγιστη απόρριψη ισχύος σε μια μονό σκιασμένη κυψέλη καθορίζονται από τον αριθμό των κυψελών στη σειρά, την V_{oc} τους (συνήθως ~ 0,6 V) και την τάση προς τα εμπρός (V_F) της διόδου παράκαμψης:

$$|V_{rev}|_{\max} \leq \left(\sum_{i=1}^{\text{cells/string}-1} V_{cell,i} + V_F \right) \quad (\text{Pannebakker et al., 2017})$$

Οι σειρές επομένως γενικά δεν είναι μεγαλύτερες από 24 κυψέλες, διότι η προσθήκη περισσότερων θα αύξανε την πιθανότητα επίτευξης τάσης διακλάδωσης, η οποία είναι γενικά της τάξης των -15 V για κρυσταλλικές κυψέλες πυριτίου. Μια δίοδος παράκαμψης μάλιστα δεν εμποδίζει μία κυψέλη να διαχέει την ισχύ, επειδή πρέπει να λειτουργεί με αντίστροφη μετατόπιση για να ξεπεράσει τη θετική κλίση στη σειρά και να ενεργοποιήσει τη δίοδο παράκαμψης. Στην τελευταία περίπτωση παρέχεται μια εναλλακτική διαδρομή για το πλεόνασμα ρεύματος των άλλων σειρών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9. Αυτό ωστόσο σημαίνει ότι μια σκιασμένη κυψέλη μπορεί να μειώσει την (αποδιδόμενη μάλλον) ισχύ ενός συμβατικού πλαισίου κατά το 1/3. Ελλείψει δίοδου παράκαμψης, η απώλεια ισχύος θα μπορούσε να είναι ακόμη μεγαλύτερη.



Σχήμα 4.9.: Φωτοβολταϊκό σύστημα με μία σκιασμένη κυψέλη που καταλήγει σε παράκαμψη σειράς 20 ηλιακών κυψελών (Pannebakker et al., 2017).

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η επίδραση της σκίασης, σκόπιμη θα ήταν η ενσωμάτωση περισσότερων δίοδων bypass, επειδή οι μικρότερες σειρές θα παρακαμφθούν στην περίπτωση μερικής σκίασης. Τα ρεύματα που διαπερνούν τις κυψέλες κυμαίνονται από 6 – 9A. Για τις συμβατικές δίοδους παράκαμψης Schottky, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της V_F (έως ~ 0,45 V αντί για ~ 0,35 V) και την απόσβεση ισχύος ~ 4 W. Κατά συνέπεια, οι θερμοκρασίες στις διακλαδώσεις που φτάνουν τους 150 °C δεν είναι ασυνήθιστες. Οι κατασκευαστές επομένως εγκαθιστούν θερμοσίφωνες σε κουτιά διακλάδωσης και περιορίζουν το ποσό των δίοδων παράκαμψης, καθώς η αύξηση του αριθμού τους αυξάνει επίσης την πιθανότητα αποτυχίας ενός εξ αυτών. Δυστυχώς, οι πληροφορίες σχετικά με τα αποτυχημένα ποσοστά δίοδων παράκαμψης δεν είναι ευρέως διαθέσιμες, μόνο μία μη αντιπροσωπευτική μελέτη για τις ελαττωματικές δίοδους παράκαμψης είναι διαθέσιμη, η οποία δείχνει μεγάλο αριθμό δυσλειτουργιών. Η προηγούμενη υποστηρίζει τη χρήση διαφορετικών δομών, πιο ανθεκτικών στη σκίαση.

4.4. Συντελεστής επίδρασης σκίασης (SIF)

Η απώλεια ισχύος λόγω αναντιστοιχιών εξαρτάται από διάφορες μεταβλητές, συμπεριλαμβανομένων των διασυνδέσεων των κυψελών, της διαμόρφωσης του φωτοβολταϊκού συστήματος (σε παράλληλα αντί σε σειρά), του τύπου μετατροπέα (κεντρικός, μικρο-μετατροπέας ή βελτιστοποιητής ισχύος) και το σχέδιο σκίασης που καθιστά δύσκολη την ποσοτικοποίηση. Πάραυτα, από τις αρχές της δεκαετίας του 1990, αρκετές μελέτες απόδοσης μεγάλης κλίμακας παρέχουν εκτιμήσεις σχετικά με την απώλεια απόδοσης, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών σκίασης. Ωστόσο, οι μέθοδοι για τον προσδιορισμό της απώλειας διαφέρουν, πράγμα που αντικατοπτρίζεται επίσης στο εύρος των εκτιμήσεων της απώλειας σκίασης (~ 2-10%). Το κύριο πρόβλημα είναι ότι απαιτούνται δεδομένα ακτινοβολίας με υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση για να προσδιοριστεί με ακρίβεια η απώλεια σκίασης. Μια πρόσφατη μελέτη απόδοσης φωτοβολταϊκών μεταξύ 5000 ερευνητικών οικιστικών φωτοβολταϊκών συστημάτων σε όλη την Ολλανδία δείχνει ότι περίπου το 10% αυτών επηρεάζεται από κάποια μορφή σκίασης, με αποτέλεσμα απώλεια ~ 5%.

Επιπλέον, μέρος της απώλειας ισχύος λόγω σκίασης αποδίδεται στη μείωση της ακτινοβολίας, ενώ η εναπομείνασα απώλεια ισχύος οφείλεται στην αδυναμία των συστημάτων να αντιμετωπίσουν τις αναντιστοιχίες. Ο συντελεστής επίδρασης σκίασης (SIF) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της ανακτήσιμης ποσότητας ισχύος:

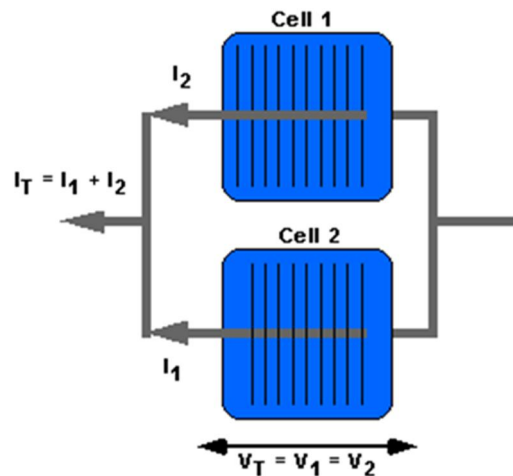
$$SIF = \left[1 - \frac{P_{shade}}{P_{sys}} \right] \frac{A_{sys}}{A_{shade}}$$

οπού το P_{shade} είναι η ισχύς που παράγεται υπό σκιασμένες συνθήκες, το P_{sys} είναι η ονομαστική ισχύς του συστήματος, το A_{sys} είναι η περιοχή συστήματος και το A_{shade} είναι η σκιασμένη περιοχή. Η σκίαση μισής κυψέλης μπορεί να επηρεάσει τον παράγοντα επίδρασης σκίασης των 40 (για 1 δίοδο παράκαμψης ανά 20 κυψέλες), πράγμα που σημαίνει ότι η μείωση της ισχύος είναι 40 φορές μεγαλύτερη από την σκιασμένη περιοχή (Pannebakker et al., 2017).

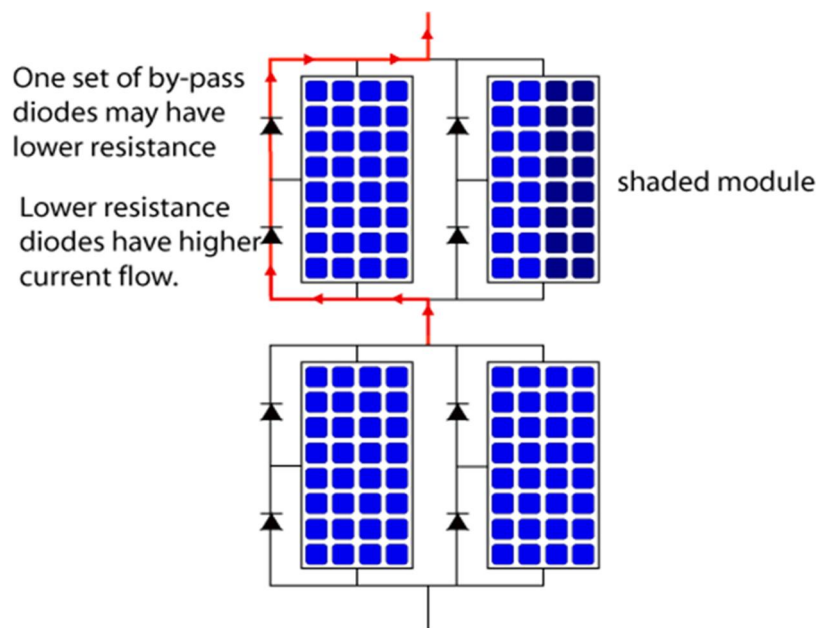
4.4.1. Περίπτωση κυψελών σε παράλληλη σύνδεση

Στα μικρά φ/β πλαίσια, οι κυψέλες είναι τοποθετημένες σε σειρά και επομένως το φαινόμενο παράλληλης τοποθέτησης δεν αποτελεί σοβαρό θέμα. Τα ίδια τα πλαίσια, όμως, συνδέονται παράλληλα στις μεγάλες συστοιχίες. Η χειρότερη περίπτωση είναι όταν ο εν παράλληλω συνδυασμός είναι ανοιχτού κυκλώματος. Τότε, η αλυσίδα που έχει χαμηλή τάση, θα δέχεται ρεύμα (ανάποδο ρεύμα) από τις άλλες αλυσίδες, οι οποίες θα είναι πηγές και θα στέλνουν ενέργεια στην προβληματική αλυσίδα-καταναλωτή. Η αλυσίδα αυτή θα γίνει ο μόνος καταναλωτής και το φορτίο όλων των υπολοίπων. Έτσι, θα αρχίσει να υπερθερμαίνεται, γεγονός που μπορεί να την καταστρέψει.

Η αντιμετώπιση γίνεται με τη χρήση διόδου που συνδέεται σε σειρά, μέσα στην ίδια την αλυσίδα. Αυτή αποτρέπει την ανάπτυξη των αντιστρόφων ρευμάτων αντίθετης κατεύθυνσης (δίοδος αντεπιστροφής), διότι η δίοδος επιβάλλει μια συγκεκριμένη μόνο δυνατή πορεία του ρεύματος.



Σχήμα 4.10 : Κυψέλες που συνδέονται παράλληλα. Η τάση στο συνδυασμό κυψελών είναι πάντα η ίδια και το συνολικό ρεύμα του συνδυασμού είναι το άθροισμα των ρευμάτων στις μεμονωμένες κυψέλες (Chander et al., 2015).



Σχήμα 4.11 : Δίοδοι παράκαμψης σε παράλληλες συστοιχίες. Τυπικά, για κάθε 36 κυψέλες υπάρχουν 2 δίοδοι bypass (Bowden et al., 2019).

Για παράδειγμα, έστω ότι έχουμε φωτοβολταϊκό πλαίσιο 36 κυψελών με παράλληλη αντίσταση ανά κυψέλη $R_p=6.6 \Omega$ και αντίσταση σειράς $R=0.005 \Omega$. Σε συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας και κάτω από κάποιο φορτίο, το ρεύμα I είναι 2.14 A και η τάση εξόδου V είναι 19.41 V. Αν μια κυψέλη είναι πλήρως σκιασμένη, τότε η νέα τάση εξόδου πέφτει κατά 14.66 V, η νέα τάση είναι 4.75V και η νέα ισχύς 10.1 (Joshi, 2020).

Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής ήταν η μελέτη της μερικής σκίασης. Γι' αυτό πρώτα παρατέθηκαν κάποια εισαγωγικά στοιχεία σχετικά με την ηλιακή ακτινοβολία και γεωμετρία και τα προγράμματα σκίασης, αλλά και σε σχέση με τους τρόπους σύνδεσης των κυκλωμάτων. Ιδιαίτερη όμως σημασία έχει η αναλυτική εξέταση των πειραματικών πορισμάτων σχετικά με τις επιπτώσεις της σκίασης στην ενεργειακή απόδοση του πλαισίου. Τα συμπεράσματα των δεδομένων που αντλήθηκαν από τις σχετικές έρευνες είναι τα παρακάτω:

- Οι τελικές απώλειες στην ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα πλαίσια φθάνουν τελικά ένα ποσοστό 7-10 % στις καλωδιώσεις και 5-10 % στους αναστροφείς. Οι απώλειες μάλιστα που σημειώνονται κάθε χρόνο σε μια καλή εγκατάσταση υπολογίζονται ότι φθάνουν κατά μέσο όρο ένα ποσοστό 15-20%.
- Όταν η σκίαση αυξάνεται από 0% σε 100%, τότε παρατηρούμε πως στην χαρακτηριστική καμπύλη I-V, το σημείο μέγιστης ισχύος μετατοπίζεται. Στην περίπτωση που φτάσει η σκίαση το ποσοστό 50%, σημειώνεται καθοδική μετατόπιση, δηλαδή μείωση του ρεύματος βραχυκυκλώματος I_{sc} , ενώ για ποσοστό σκίασης από 50% έως και 100% το σημείο μέγιστης ισχύος μετατοπίζεται προς τα αριστερά, δηλαδή μειώνεται η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} . Και στις δύο περιπτώσεις, η ισχύς του κυκλώματος μειώνεται. Σε περίπτωση που οι ομάδες γίνουν περισσότερες, τότε η τάση μεγαλώνει κι έτσι μεγαλώνει και η ισχύς, με αποτέλεσμα το σημείο μέγιστης λειτουργίας να μετατοπίζεται προς τα δεξιά.
- Η σκίαση μιας οριζόντιας σειράς έχει μεγαλύτερη επίδραση στην απόδοση του απ' ότι η σκίαση μιας κάθετης σειράς στο κατακόρυφο πλαίσιο.
- Στην περίπτωση που οι σκιασμένες κυψέλες βρίσκονται σε διαφορετικές ομάδες -με τουλάχιστον μια σκιασμένη κυψέλη σε κάθε ομάδα- τότε το σημείο μέγιστης ισχύος μετατοπίζεται, και μάλιστα όσο περισσότερες είναι οι ομάδες των φωτοβολταϊκών κυψελών που είναι σκιασμένες, τόσο το σημείο αυτό μετατοπίζεται και χαμηλότερα.
- Όποια κάθετη σειρά και να σκιάστηκε, το αποτέλεσμα θα είναι να χαθεί ίδιο ποσό ενέργειας από το φ/β πλαίσιο. Το ίδιο συνέβη και για όποια οριζόντια σειρά και αν σκιάστηκε. Στο μέγεθος της ενεργειακής απώλειας, βασικό ρόλο παίζει και ο τρόπος που τοποθετούνται οι δίοδοι που προστατεύουν το πλαίσιο.
- Οι μικρότερες περιοχές με σκιασμένες κυψέλες σε σύγκριση με τις μεγαλύτερες περιοχές με σκιασμένες κυψέλες στην ίδια ομάδα παρέχουν ελάχιστη συμβολή στην καμπύλη I-V
- Οι σκιασμένες κυψέλες με την υψηλότερη σε ποσοστό σκιασμένη κυψέλη σε κάθε ομάδα προκαλούν τα ρεύματα απόκλισης.
- Η μερική σκίαση σε μία μεμονωμένη κυψέλη σε μια ομάδα είναι πιο επιβλαβής απ' ότι αν είναι σε περισσότερες, επειδή μπορεί να προκληθεί υπερθέρμανση. Διαφορετικά, οι ομοιόμορφες σκιές σε πολλές κυψέλες της ίδιας ομάδας προκαλούν λιγότερους δομικούς κινδύνους.
- Στην μερική σκίαση, η φ/β κυψέλη, καταναλώνει και παράγει ρεύμα ταυτόχρονα. Έτσι, οι συνέπειες είναι πιο σύντομες σε σχέση με την ολική σκίαση.

- Η σκίαση με νάιλον, η απαλή σκίαση, η θόλωση, ή η σκόνη και οτιδήποτε προκαλεί μερική σκίαση σε μια φ/β κυψέλη, ενεργειακά και αποδοτικά είναι πολύ χειρότερη από την κανονική σκίαση.
- Όσες περισσότερες διόδους έχει ένα φ/β πλαίσιο τόσο μικρότερες ενεργειακές απώλειες έχει, άρα και μεγαλύτερη απόδοση.

Τέλος, δόθηκαν αναλυτικές πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία και τη χρησιμότητα των διόδων στην προστασία του φ/β πλαισίου. Συγκεκριμένα, είδαμε πως η διάδος αντεπιστροφής (blocking) εμποδίζει την αντιστροφή της ροής του ρεύματος, η οποία είναι καταστροφική για τις κυψέλες του. Στην περίπτωση, δηλαδή, κατά την οποία η τάση της μπαταρίας θα είναι μεγαλύτερη, το ρεύμα θα προσπαθήσει να αντιστρέψει τη φορά του, μάταια όμως, γιατί η διάδος αντεπιστροφής που τοποθετείται δεν θα επιτρέψει αυτή τη φορά του ρεύματος. Οι διόδοι παράκαμψης από την άλλη, μειώνουν την ενεργειακή απώλεια που προκύπτει εξαιτίας της σκίασης και προστατεύουν τη φωτοβολταϊκή κυψέλη από αστοχία λόγω θερμών κηλίδων. Επιπλέον, η διάδος Schottky αποτελεί την πιο διαδεδομένη διάοδο παράκαμψης όταν η τάση πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη. Αντιμετωπίζει την μερική σκίαση του φ/β με επαρκή αποτελεσματικότητα και ταυτόχρονα επιβραδύνει την φθορά των κυψελών του φ/β.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξερόγλωσση

ACCA Software, (no date). *Solar Design Software: Solarius PV*, Italy. Available at:

https://www.accasoftware.com/en/solar-design-software?fbclid=IwAR094hGrpzwm9yJqq8faRplVUIRU2oCrrWbLjCj_rt0zj3UMa-rVTb6FSfU (Accessed: 24 April 2021).

A Arefin, U., Ahsan, I. and Hossan, M. A., (2014) *Solar Power as Renewable Energy for Home Systems in Bangladesh*. Available at:

<https://www.researchgate.net/publication/271647041> (Accessed: 24 April 2021).

Arwindra Rizqiawan, (2008). *ITB Conversion*. ITB Electrical Energy Conversion Research Laboratory, Indonesia. Available at:

<https://konversi.wordpress.com/2008/11/05/penyejuk-udara-berteknologi-inverter/> (Accessed: 24 April 2021).

Baghzouz, Y., (no date) 'EE 446/646 Photovoltaic Devices III', p. 51. Available at:

<http://www.egr.unlv.edu/~eebag/Photovoltaic%20Devices%20III.pdf> (Accessed: 24 April 2021).

Bowden, S. & Honsberg, C. (PVEducation), (2019). *Modules and Arrays*. Arizona.

Available at: <https://www.pveducation.org> (Accessed: 24 April 2021).

Chander, S. & Purohit, A. & Sharma, A. & Nehra, S. P. & Dhaka, M. S., (2015). 'Impact of temperature on performance of series and parallel connected mono-crystalline silicon solar cells', *Energy Reports*, 1, Elsevier, 175-180. Available at:

<https://doi.org/10.1016/j.egy.2015.09.001> (Accessed: 24 April 2021).

Deline, C., (2009) 'Partially shaded operation of a grid-tied PV system', in. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 001268–001273. Available at:

https://www.researchgate.net/publication/224113548_Partially_shaded_operation_of_a_grid-tied_PV_system (Accessed: 24 April 2021).

- Dufresne, S., (2020). *DIY Elevation/azimuth shade finder tool for solar site surveys*. Available at: https://rimstar.org/renewnrg/elevation_azimuth_shadow_site_survey_tool.htm?fbclid=IwAR2XhCrImmsNcgoIq6hhzfZT6SAO-YM88nVh4BGxwDg9SIYEad1vtOf-9Q (Accessed: 24 April 2021).
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A., (2013). *Solar engineering of thermal processes*. [https://www.sku.ac.ir/Datafiles/BookLibrary/45/John%20A.%20Duffie,%20William%20A.%20Beckman\(auth.\)-Solar%20Engineering%20of%20Thermal%20Processes,%20Fourth%20Edition%20\(2013\).pdf](https://www.sku.ac.ir/Datafiles/BookLibrary/45/John%20A.%20Duffie,%20William%20A.%20Beckman(auth.)-Solar%20Engineering%20of%20Thermal%20Processes,%20Fourth%20Edition%20(2013).pdf) (Accessed: 24 April 2021).
- Edison, T. (no date) ‘Bloomberg Tier-1 Solar Panels List: 8 Points of critical failure.’ Available at: <https://review.solar/tier-1-solar-panels/> (Accessed: 24 April 2021).
- Folsom Labs, (no date). Available at: <https://www.folsomlabs.com/> (Accessed: 24 April 2021).
- Gaisma, (no date) Athens, Greece - Sunrise, sunset, dawn and dusk times for the whole year. Available at: <https://www.gaisma.com/en/location/athens.html> (Accessed: 24 April 2021).
- Gutiérrez Galeano, A., & Bressan, M. & Vargas, F.J. & Alonso, C., (2018) ‘Shading Ratio Impact on Photovoltaic Modules and Correlation with Shading Patterns’, *Energies*, 11(4), p. 852. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/4/852> (Accessed: 24 April 2021).
- Horizon, G., (2011) ‘Green Horizon: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας’, *Green Horizon*. Available at: <http://gr-horizon.blogspot.com/2011/04/blog-post.html> (Accessed: 24 April 2021).
- Joshi, S., (2020) Solar PV shading with concept of blocking and bypass diodes. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=at7u61fbQ-4> (Accessed: 24 April 2021).
- Kiehl, J. T. & Trenberth, K. E., (1997) ‘Earth’s Annual Global Mean Energy Budget’, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(2), pp. 197–208. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078%3C0197:EAGMEB%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078%3C0197:EAGMEB%3E2.0.CO;2) (Accessed: 24 April 2021).

- Maghami, M. R. & Hizam, H. & Gomes, C. & Radzi, M. R. & Rezadad, M. I. & Hajighorbani, S., (2016). 'Power loss due to soiling on solar panel: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, pp 1307-1316. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.044> (Accessed: 24 April 2021).
- NREL, (no date) *System Advisor Model (SAM)*. National Renewable Energy Laboratory. US Available at: <https://sam.nrel.gov/> (Accessed: 24 April 2021).
- Pannebakker, B. B., Waal, A. C. de and Sark, W. G. J. H. M. van, (2017) 'Photovoltaics in the shade: one bypass diode per solar cell revisited', *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 25(10), pp. 836–849. doi: <https://doi.org/10.1002/pip.2898> (Accessed: 24 April 2021).
- Pedro, M. C., (2016). *Modelling of Shading Effects in Photovoltaic Optimization*. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Modelling-of-shading-effects-in-photovoltaic-Pedro/72e33533c25d1af44f2c1392bbf01e1206feb57a> (Accessed: 24 April 2021).
- Photovoltaic systems | YourHome (no date). Available at: <https://www.yourhome.gov.au/energy/photovoltaic-systems?fbclid=IwAR1jY10Do4o2iyvIvCIxyHQRx8q-WrlmbVBs7LaubdZUILDtatzJWamwF3M> (Accessed: 26 June 2021).
- PV F-CHART: Photovoltaic Systems Analysis | F-Chart Software: Engineering Software (no date). Available at: <http://www.fchartsoftware.com/pvfchart/> (Accessed: 24 April 2021).
- Senpinar, A., (2018) 'Chapter 2.16 - Optimization of Slope Angles of Photovoltaic Arrays for Different Seasons', in Dincer, I., Colpan, C. O., and Kizilkan, O. (eds) *Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions*. Academic Press, pp. 507–521. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813734-5.00028-7> (Accessed: 24 April 2021).
- Shading Analysis, (2014) Laplace Systems. Available at: <http://www.laplacesolar.com> (Accessed: 24 April 2021).
- Shadow Calculator, (no date). *Sun position calculator on google maps*. Available at: <http://shadowcalculator.eu> (Accessed: 24 April 2021).

- Software Evaluation, (no date) *PVsystem*. Available at: <https://www.pvsyst.com/software-evaluation/> (Accessed: 24 April 2021).
- Solargis, (2010-2019). *pvPlanner*. Available at: <https://solargis.info> (Accessed: 24 April 2021).
- Szokolay, S. V., (2007). *Solar Geometry*. PLEA: Passive and Low Energy Architecture International in association with Department of Architecture, The University of Queensland. Available at: <http://www.plea-arch.org/wp-content/uploads/PLEA-NOTE-1-SOLAR-GEOMETRY.pdf> (Accessed: 24 April 2021).
- The Solar Planner: Calculating the Sun's Path and Solar Array Orientation - Page 3, (no date). Available at: https://www.thesolarplanner.com/array_placement3.html?fbclid=IwAR2xH94g1HUhLO45Sq8he1bWSGonowdYWoIgioFpqEouSZG1KuAIf_wTDgU (Accessed: 24 April 2021).
- UO SRML: Sun chart program, (no date). Available at: <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html> (Accessed: 26 June 2021).
- PV*SOL premium – Valentin Software GmbH, (no date). Available at: <https://valentin-software.com/en/products/pvsol-premium/> (Accessed: 24 April 2021).
- Wald, L., (2019). *Basics in Solar Radiation at Earth Surface-Revised version #3*. Πρακτικά συνεδρίου από το 3^ο Paris Tech που διεξήχθη στο Παρίσι 2019-07-12. MINES Paris Tech. France: Εκδότης. Available at: https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-02164311/file/2019_basics_solaire_wald_v1.pdf (Accessed: 24 April 2021).
- Wang, Y.-J. & Hsu, P.-C., (2009) 'Analysis of Partially Shaded PV Modules Using Piecewise Linear Parallel Branches Model', *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 3(12), pp. 2354–2360. Available at: <https://publications.waset.org/11643/analysis-of-partially-shaded-pv-modules-using-piecewise-linear-parallel-branches-model> (Accessed: 24 April 2021).

Salvadores, C. & Francisco, J., (2015) Shadowing Effect On The Performance In Solar Pv-Cells. Master Programme in Energy Systems. University Nova of Gavle. Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:823921/FULLTEXT01.pdf> (Accessed: 24 April 2021).

Ελληνόγλωσση

Αμανατίδης, Ε., (2014). *Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας*. [Πανεπιστημιακές Σημειώσεις]. Πανεπιστήμιο Πατρών. Πολυτεχνική Σχολή. Τμήμα Χημικών Μηχανικών. *Φωτοβολταϊκά Πάρκα* [Πρόσβαση στις 26/4/21].

Ανδρουτσόπουλος, Α., & Αραβαντινός, Δ., & Αξαρή, Κ., & Θεοδοσίου, Θ., & Τσικαλουδάκη, Κ., (2011). *Κλίμα και εσωτερικό περιβάλλον. Βιοκλιματικός σχεδιασμός κτηρίων*. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας. Διαθέσιμο στο: <http://portal.tee.gr/portal/page/portal/tptee/dg2013/ktirio/DE3-Bioklimatika-final.pdf> [Πρόσβαση στις 26/4/21]

Ενεργειακό Γραφείο Κυπρίων Πολιτών, (2010). *Φωτοβολταϊκά Συστήματα· Εφαρμογές στον οικιακό τομέα*. Διαθέσιμο στο: <https://www.cea.org.cy/TOPICS/Renewable%20Energy/PV%20for%20households.pdf> [Πρόσβαση στις 26/4/21].

Καραϊσας, Π., (2014). *Φωτοβολταϊκά συστήματα και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας*. Αθήνα: Εκδόσεις ΙΜΕ ΓΣΕΒΕΕ [Πρόσβαση στις 26/4/21].

Κατσαπρακάκης, Δ. & Μονιάκης, Μ., (2015). *Θέρμανση Ψύξη Κλιματισμός*. Εκδόσεις Κάλλιπος. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/6167> [Πρόσβαση στις 26/4/21].

- Δαμιανίδης, Δ., & Κατσαρός, Γ., & Τόλης, Μ., & Στεργιόπουλος, Φ., (2011). *Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων*. Θεσσαλονίκη: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας. Διαθέσιμο στο: http://tkm.tee.gr/wp-content/uploads/2018/02/fwtovoltaika_ergwn.pdf [Πρόσβαση στις 26/4/21].
- Μπαμπούκης, Γ., & Τσούκας, Γ., (2015). *Θεωρητική και πειραματική μελέτη επίδρασης της σκίασης στην ενεργειακή συμπεριφορά ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου*. Πτυχιακή εργασία. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών [Πρόσβαση στις 26/4/21].
- Προδρομίδης, Γ., (2009). *Απόδοση φωτοβολταϊκών στοιχείων και φωτοβολταϊκών συστημάτων υπό συνθήκες σκίασης και χαμηλής έντασης ακτινοβολίας*. Διδακτορική Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Πυλαρινός, Δ., (2014). *Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά Ισχύος*. Πρόγραμμα Επικαιροποίησης Γνώσεων Αποφοίτων «Φωτοβολταϊκά Ενεργειακά Συστήματα» Κρήτη: Πανεπιστήμιο Κρήτης. Διαθέσιμο στο: https://talos-ts.com/files/PEGA_PYLARINOS.pdf [Πρόσβαση στις 26/4/21].
- Τζινευράκης, Α. *Εξέταση χώρου εγκατάστασης και ανάλυσης σκίασης*. σ. 4-6. ΤΕΕ ΤΔΚ Κρήτη. Διαθέσιμο στο: https://www.labri.fr/perso/billaud/travaux/Helios/Helios2/resources/gr12/Chapter_12_GR.pdf [Πρόσβαση στις 26/4/21]
- Φωτιάδη, Α., (2015). *Φυσική περιβάλλοντος: Ενέργεια, Ακτινοβολία, ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη*. Αγρίνιο: Πανεπιστήμιο Πατρών. [Πρόσβαση στις 26/4/21]
- gneng: Ηλιακή Ενέργεια, (no date) gneng. Available at: http://gneng.blogspot.com/p/blog-page_19.html [Πρόσβαση στις 26/4/21].