



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Μεθοδολογία αναλυτικού υπολογισμού της  
επίπτωσης της σκίασης σε φωτοβολταϊκά  
πλαίσια και υπολογισμός της παραγωγής τους  
υπό σκίαση**

**Λαγουδάκης Μάριος**

**A.M :20120030030**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

**Καθηγητής Σταυρακάκης Γεώργιος (Επιβλέπων)**

**Καθηγητής Κατσιγιαννης Γιάννης**

**Καθηγητής Κανέλλος Φώτης**

**Χανιά Σεπτέμβριος 2019**

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας μου, κύριο Σταυρακάκη Γεώργιο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, κατά τη διάρκεια της συγγραφής της. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές Γιάννη Κατσίγιαννη και Φώτη Κανέλλο που δέχτηκαν να είναι μέλη της επιτροπής εξέτασης. Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για την υπομονή και την συμπαράσταση που μου προσέφεραν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους και συμφοιτητές που με στήριξαν με τη βοήθεια τους και έκαναν τις σπουδές μου καλύτερες.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η επίπτωση της σκίασης σε φωτοβολταϊκά πλαίσια και υπολογίζεται η απώλεια ενέργειας των φωτοβολταϊκών όταν βρίσκονται υπό σκίαση.

Στην αρχή της πτυχιακής εργασίας δημιουργείται ο ηλιακός χάρτης για τα Χανιά. Μέσω του ηλιακού χάρτη υπολογίζεται το ποσοστό σκίασης για 12 χαρακτηριστικές ημέρες του έτους (που περιλαμβάνουν εκτός των άλλων τα ηλιοστάσια και τις ισημερίες) για τρία συγκεκριμένα εμπόδια.

Επιπλέον μελετάται η επίδραση της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Για φωτοβολταϊκό πλαίσιο 54 και 36 κελιών δημιουργούνται τα διαγράμματα P-V, I-V για τις εξής περιπτώσεις: 1) στο φωτοβολταϊκό δεν υπάρχει σκίαση, 2) στο φωτοβολταϊκό υπάρχει ολική σκίαση ενός κελιού, 3) στο φωτοβολταϊκό υπάρχει σκίαση ενός κελιού κατά 50% και 4) στο φωτοβολταϊκό υπάρχει ολική σκίαση δύο κελιών. Παρατηρούνται ακόμα διαφορές στη μείωση της ισχύος των φωτοβολταϊκών σε περίπτωση σκίασης ενός κελιού κατά 50% και ενός κελιού κατά 100% με τη χρήση ή χωρίς τη χρήση διόδων παράκαμψης.

Για συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο 36 κελιών έγιναν πειραματικές μετρήσεις και πραγματοποιήθηκαν θεωρητικοί υπολογισμοί του ρεύματος και της τάσης και με βάση αυτές φτιάχτηκαν τα διαγράμματα P-V, I-V. Οι μετρήσεις έγιναν για ασκίαστο φωτοβολταϊκό, για σκίαση στη πρώτη στήλη του φωτοβολταϊκού δηλαδή για σκίαση δώδεκα κατακόρυφων κελιών, για σκίαση στο πιο πάνω κελί του φωτοβολταϊκού και τέλος για σκίαση στις τέσσερις πρώτες σειρές και στις τρεις πιο πάνω στήλες του φωτοβολταϊκού.

Τέλος υπολογίζεται η ετήσια παραγωγή ενέργειας φωτοβολταϊκού όταν το φωτοβολταϊκό είναι ασκίαστο και για τρία διαφορετικά σενάρια σκίασης από άλλο φωτοβολταϊκό. Το πρώτο σενάριο αφορά τη σκίαση φωτοβολταϊκού κατά μήκος των σειρών του, το δεύτερο σενάριο αφορά τη σκίαση φωτοβολταϊκού κατά μήκος των στηλών και το τρίτο σενάριο αφορά τη σκίαση κατά μήκος των σειρών τεσσάρων φωτοβολταϊκών πλαισίων τα οποία τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο.

## **ABSTRACT**

In this thesis the effect of shading of the photovoltaic panels and the calculation of their their energy losses under shading is being studied.

In the beginning of the thesis, solar maps for the city of Chania are being created. Through this solar map, the percentage of shading for 12 characteristic days of the year is being calculated for three specific types of obstacles.

Furthermore, the effect of temperature and radiation on the photovoltaic panel is being studied. For a 54 and 36 cell photovoltaic module P-V and I-V diagrams are being created, for the following cases: 1) no shading on the photovoltaic, 2) on the photovoltaic there is full shading on one cell, 3) on the photovoltaic there is 50% shading on one cell and 4) there is full shading on two cells. The differences of the photovoltaic power decrease are also being observed in the case of one cell shading at 50% and another one with shading at 100% with the use or without of bypass diode.

For a specific 36 cell photovoltaic module, the experimental measurements and the theoretical calculations of current and voltage were conducted and the P-V and I-V diagrams that were based on them were exported. The measurements were taken for an unshaded photovoltaic, for shading in the first row of the photovoltaic that is for twelve vertical cells shading, for shading in the upper cell of the photovoltaic and finally for shading in the first four rows of the photovoltaic and the three upper columns of the photovoltaic.

Finally, the photovoltaic's annual energy production is being calculated in the cases that the photovoltaic is unshaded and in three other shading cases from another photovoltaic. The first case is about the shading of the photovoltaic along the rows, the second case is about the shading along the columns and the third one is about the shading along the rows of four photovoltaic modules which are the one on top of the other .

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	8
1.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ.....	9
1.3 ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	10
1.4 ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	11
2.ΗΛΙΑΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....	12
2.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ.....	13
2.2 ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΗΛΙΟΥ.....	14
2.3 ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ΗΛΙΟΥ.....	15
2.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΓΩΝΙΕΣ ΤΗΣ ΕΚΛΕΙΠΤΙΚΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ.....	16
2.5 ΤΟΠΙΚΗ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΑ.....	21
2.6 ΗΛΙΑΚΟΙ ΧΑΡΤΕΣ.....	21
3.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ.....	25
3.1 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	25
3.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	25
3.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	28
3.4 ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	31
3.5 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗΣ.....	32
3.6 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ.....	32
3.7 ΕΙΔΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	33
3.8 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΟΥ.....	36
3.9 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ $FILL FACTOR$ -ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ.....	38
3.10 ΔΙΟΔΟΣ P-N.....	39
3.11 ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ.....	41

3.12 Η ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΡΕΥΜΑΤΟΣ.....	42
3.13 ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ – ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ.....	43
3.14 ΕΚΤΙΜΗΣΗ $R_s$ ΚΑΙ $R_p$ .....	46
3.15 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΝΤΑΣΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	48
4. ΣΚΙΑΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ.....	52
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΣΚΙΑΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ.....	52
4.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΡΙΩΝ ΔΙΟΔΩΝ ΠΑΡΑΚΑΜΨΗΣ ΓΙΑ ΠΛΑΙΣΙΟ ΜΕ ΤΡΙΑ ΚΕΛΙΑ.....	55
4.3 ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΧΕΙΩΝ ΑΝΑ ΔΙΟΔΟ ΠΑΡΑΚΑΜΨΗΣ.....	61
4.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΚΙΑΣΗΣ ΣΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ.....	63
5. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ I-V ΚΑΙ P-V ΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΚΑΙ ΕΥΡΕΣΗ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΣΚΙΑΣΗΣ ΓΙΑ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΕΣ ΜΕΡΕΣ.....	68
5.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΣΚΙΑΣΗΣ ΓΙΑ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΑ ΕΜΠΟΔΙΑ ΚΑΙ ΜΕΡΕΣ.....	68
5.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ I-V, P-V ΓΙΑ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	74
5.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΚΙΑΣΗΣ ΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ I-V, P-V ΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ 54 ΚΕΛΙΩΝ.....	78
5.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΚΙΑΣΗΣ ΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ I-V, P-V ΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ 36 ΚΕΛΙΩΝ.....	81
5.5 ΧΡΗΣΗ ΔΙΟΔΩΝ ΠΑΡΑΚΑΜΨΗΣ ΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ 54 ΚΕΛΙΩΝ.....	86
5.6 ΧΡΗΣΗ ΔΙΟΔΩΝ ΠΑΡΑΚΑΜΨΗΣ ΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ 36 ΚΕΛΙΩΝ.....	92
6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ 36 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΕΛΙΩΝ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ.....	96
6.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ 36 ΚΕΛΙΩΝ.....	96
6.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ I-V, P-V ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΗ ΣΚΙΑΣΗΣ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ.....	99
6.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ I-V, P-V ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΟΛΙΚΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ 12 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΕΛΙΩΝ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ.....	103
6.4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ I-V, P-V ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΣΚΙΑΣΗΣ ΤΩΝ 4 ΠΡΩΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ 3 ΠΡΩΤΩΝ ΣΤΗΛΩΝ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ -ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ.....	107
6.5 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ I-V, P-V ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΣΚΙΑΣΗΣ ΜΟΝΟ ΕΝΟΣ ΚΕΛΙΟΥ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ.....	112
7. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΣΚΙΑΣΗΣ ΑΠΟ ΑΛΛΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ.....	116

7.1 ΜΕΛΕΤΗ ΠΟΣΟΤΟΥ ΣΚΙΑΣΗΣ ΣΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΑΠΟ ΑΛΛΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ.....	116
7.2 ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ.....	118
7.3 ΣΕΝΑΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΤΗΣΙΑΣ ΚΑΙ ΗΜΕΡΙΣΙΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΣΚΙΑΣΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΩΝ ΣΕΙΡΩΝ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ.....	119
7.4 ΣΕΝΑΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΣΚΙΑΣΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΩΝ ΣΤΗΛΩΝ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ.....	122
7.5 ΣΕΝΑΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΣΚΙΑΣΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΩΝ ΣΕΙΡΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΤΑ ΟΠΟΙΑ ΤΟΠΟΘΕΤΟΥΝΤΑΙ ΤΟ ΕΝΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΑΛΛΟ...	127
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	132
9.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	134

# 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΓΕΝΙΚΑ

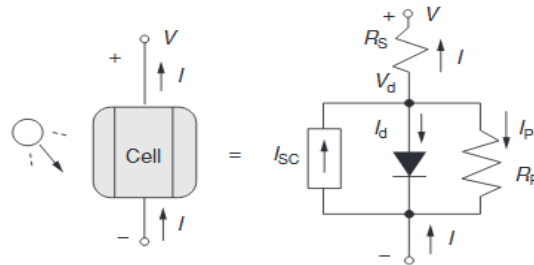
Η ενέργεια είναι από τα θεμελιώδη βήματα που μας έχουν οδηγήσει σε σημαντικά βήματα προόδου. Δεδομένου ότι οι συμβατικές πηγές ενέργειας εξαντλούνται και παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα, αναπτύχθηκαν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.. Μια από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι τα φωτοβολταϊκά. Δύο μεγάλες κατηγορίες τεχνολογιών για φωτοβολταϊκά αναπτύχθηκαν η κρυσταλλική και η τεχνολογία λεπτών υμενίων. Κάθε κατηγορία διαφοροποιείται στο τρόπο κατασκευής στο υλικό κατασκευής και στο βαθμό απόδοσης. Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία για τα φωτοβολταϊκά είναι η κρυσταλλική. Το δομικό υλικό της κρυσταλλικής κυψέλης είναι το πυρίτιο καθώς διαθέτει τις απαραίτητες ιδιότητες του ημιαγωγού και βρίσκεται σε αφθονία στη φύση, ενώ παράλληλα υπάρχει συσσωρευμένη τεχνογνωσία στην επεξεργασία του από τον τομέα της ηλεκτρονικής. Η μικρότερη δομική μονάδα του φωτοβολταϊκού είναι το κελί ( κυψέλη ). Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από πολλά φωτοβολταϊκά κελιά συνδεδεμένα σε σειρά. Μεγαλύτερες δομικές μονάδες που θα αναλυθούν παρακάτω είναι οι φωτοβολταϊκές στοιχειοσειρές( PV cell string ), φωτοβολταϊκές πλαίσιοσειρές( PV string ) και οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες( PV array ). Τα σημαντικά πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών σε σχέση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας είναι η ανεξάντλητη φύση της ηλιακής ενέργειας και η αξιόπιστη λειτουργία τους. Επίσης η μεγάλη διάρκεια ζωής τους και η αντοχή τους σε ακραία καιρικά φαινόμενα καθιστούν τα φωτοβολταϊκά σίγουρη επένδυση. Το κύριο πρόβλημα των φωτοβολταϊκών είναι η συχνή σκίαση τους με επιπτώσεις στην απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος. Ως σκίαση ορίζεται το φαινόμενο όπου μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας παρεμποδίζεται και δεν προσπίπτει στην επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη. Προκαλείται συνήθως από στερεά αντικείμενα και εμπόδια στον ευρύτερο χώρο αλλά κυρίως από από άλλες φωτοβολταϊκές διατάξεις που είναι



τοποθετημένες πλησίον σε μικρή απόσταση (αλληλοσκίαση). Επίσης μπορεί να προξενείται από νέφωση ή ανομοιόμορφη ρύπανση στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η μερική σκίαση του φωτοβολταϊκού προκαλεί διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας στα κελιά και αυτό οδηγεί στη ανάπτυξη αρνητικής τάσης στα σκιασμένα κελιά και στην απορρόφηση ισχύος. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί στη δημιουργία θερμών κηλίδων (hot spot) έως και στη καταστροφή κελιών. Για τη αποφυγή αυτής της κατάστασης τοποθετούνται δίοδοι διαφυγής ανά μονάδες κελιών για να απομονωθούν οι στοιχειοσειρές και να προστατευτούν τα σκιασμένα κελιά. Ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο οι ηλιακές συντεταγμένες έχουν βαρύνουσα σημασία αφού ανάλογα με την κίνηση του ήλιου και τη γεωγραφική θέση κάθε περιοχής μπορεί η στήριξη των φωτοβολταϊκών στοιχείων να αυξήσει ή να μειώσει κατά πολύ την ενεργειακή τους απόδοση .

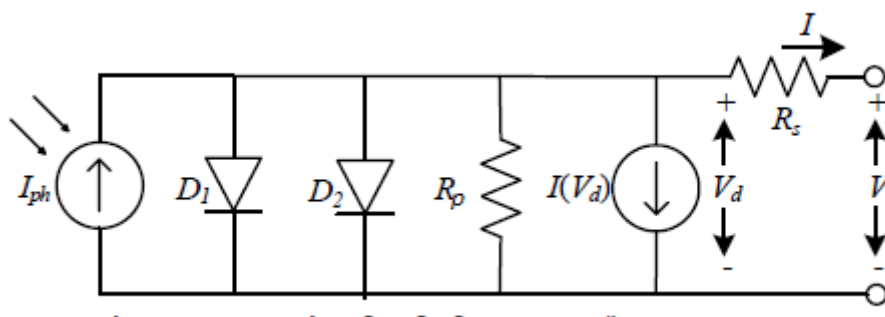
## **1.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ** **ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ**

Η πιο συνήθης μοντελοποίηση φωτοβολταϊκού είναι η χρήση ενός ηλεκτρικού κυκλώματος που αντιστοιχεί σε μια θεμελιώδη δομική μονάδα που μπορεί να είναι ηλιακό κελί , πλαίσιο ή συστοιχία ανάλογα με τη κλίμακα μοντελοποίησης. Το πιο ευρέως διαδεδομένο μοντέλο είναι το μοντέλο μίας διόδου. Στη παρούσα πτυχιακή εργασία το ηλεκτρικό κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση του φωτοβολταϊκού είναι το μοντέλο μίας διόδου και η θεμελιώδη δομική μονάδα είναι ένα ηλιακό κελί. Στη παρούσα πτυχιακή εργασία ακόμα θεωρήθηκε ότι η σειριακή αντίσταση  $R_s$  ίση με μηδέν. Το παραπάνω μοντέλο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 1.1 :** Ισοδύναμο κύκλωμα για το ηλιακό στοιχείο(solar cell) όπου περιέχει και παράλληλες και σε σειρά αντιστάσεις

Ένας άλλος τρόπος μοντελοποίησης του φωτοβολταϊκού είναι ένα αντιπροσωπευτικό κύκλωμα για το φωτοβολταϊκό κελί βασισμένο στο μοντέλο δύο διόδων. Αυτό το μοντέλο αποτελείται από μια πηγή φωτορεύματος  $I_{ph}$ , δύο διόδους  $D1$  και  $D2$  μια σειριακή αντίσταση  $R_s$  και μια εγκάρσια αντίσταση  $R_p$  και ένα όρο  $I(V_d)$  που περιγράφει τη περιοχή κατάρρευσης δύο διόδων. Το παραπάνω μοντέλο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 1.2 :** Ισοδύναμο κύκλωμα μοντέλου δύο διόδων με επαύξηση για αρνητική τάση

Το μοντέλο μίας διόδου προκύπτει από το μοντέλο των δύο διόδων αν αφαιρεθεί η διόδος  $D2$  και ο όρος για τις αρνητικές τάσεις  $I(V_d)$ . Επιπλέον

υπάρχουν διάφορες απλουστευμένες εκδοχές του παραπάνω κυκλώματος όπου αμελείται η σειριακή ή και η εγκάρσια αντίσταση. Αυτή η κατηγορία μεθόδων είναι η ακριβέστερη αλλά και η πιο πολύπλοκη επιτρέποντας τη κατασκευή της χαρακτηριστικής I-V και τη πλήρη μοντελοποίηση της ηλεκτρικής απόκρισης του συστήματος.

Υπάρχουν και άλλες μέθοδοι μοντελοποίησης οι οποίες εστιάζουν σε συγκεκριμένα σημεία λειτουργίας όπως τα τοπικά μέγιστα και το ολικό βέλτιστο MPP (global MPP – GMPP). Συνήθως εφαρμόζουν απλές μαθηματικές σχέσεις οι οποίες παρουσιάζουν μέτρια ακρίβεια αποφεύγοντας τη κατασκευή της χαρακτηριστικής I-V και P-V.

### **1.3 ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο στόχος της παρούσας πτυχιακής είναι η μελέτη των φωτοβολταϊκών και της συνεπαγόμενης μείωσης παραγωγής τους λόγω σκίασης.

Η ηλιακή γεωμετρία περιγράφει τη σχετική κίνηση γης και ήλιου και αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα που υπεισέρχεται στον ενεργειακό ισολογισμό κτηρίων. Βασιζόμενοι σε μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής των Χανίων για το έτος 2009 όπως τη θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία ανά ώρα για κάθε μέρα του έτους προσδιορίζεται η μείωση της ενέργειας του φωτοβολταϊκού αναλόγως του ποσοστού σκίασης από άλλο φωτοβολταϊκό.

Ακόμα γίνεται η μελέτη του ηλιακού χάρτη για τα Χανιά και με βάση αυτόν υπολογίζεται το ποσοστό σκίασης για κάποιες συγκεκριμένες μέρες ανάλογα με το φυσικό ή τεχνητό εμπόδιο το οποίο υπάρχει. Στη παρούσα πτυχιακή εργασία το ηλεκτρικό κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση του φωτοβολταϊκού είναι το μοντέλο μίας διόδου και η θεμελιώδη δομική μονάδα είναι ένα ηλιακό κελί. Επιπλέον υπάρχει αναφορά για την επίδραση της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας στα φωτοβολταϊκά. Μελετάται ακόμα η επίδραση της σκίασης στα φωτοβολταϊκά και συγκρίνονται οι πειραματικές με τις θεωρητικές τιμές τάσεων και ρεύματος φωτοβολταϊκού 36 κελιών.

## **1.4 ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Η δομή της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η ακόλουθη:

Στο **κεφάλαιο 2** αναλύεται η ηλιακή γεωμετρία και η ακτινοβολία. Επιπλέον παρουσιάζονται βασικές σχέσεις προσδιορισμού της θέσης του ήλιου.

Στο **κεφάλαιο 3** περιγράφονται τα δομικά συστατικά ενός φωτοβολταϊκού, τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του, τα διαφορετικά είδη φωτοβολταϊκών και η επίδραση της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας σε ένα φωτοβολταϊκό.

Στο **κεφάλαιο 4** περιγράφεται η επίδραση της σκίασης στα φωτοβολταϊκά και ο ρόλος των διόδων παράκαμψης στη μείωση της απώλειας ενέργειας σε περίπτωση σκίασης.

Στο **κεφάλαιο 5** πραγματοποιείται η δημιουργία διαγραμμάτων I-V, P-V για διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας και ακτινοβολίας. Επιπλέον δημιουργούνται τα διαγράμματα I-V, P-V για διαφορετικές περιπτώσεις σκίασης στο φωτοβολταϊκό. Τα αποτελέσματα της σκίασης υπολογίζονται με τη χρήση διόδων παράκαμψης και με τη μη χρήση διόδων παράκαμψης. Ακόμα περιγράφεται η διαδικασία δημιουργίας του ηλιακού χάρτη για τα Χανιά. Τέλος υπολογίζεται το ποσοστό σκίασης κάποιων μερών για συγκεκριμένα εμπόδια.

Στο **κεφάλαιο 6** πραγματοποιούνται πειραματικές και οι θεωρητικές μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος για δεδομένο τύπο φωτοβολταϊκού πλαισίου.

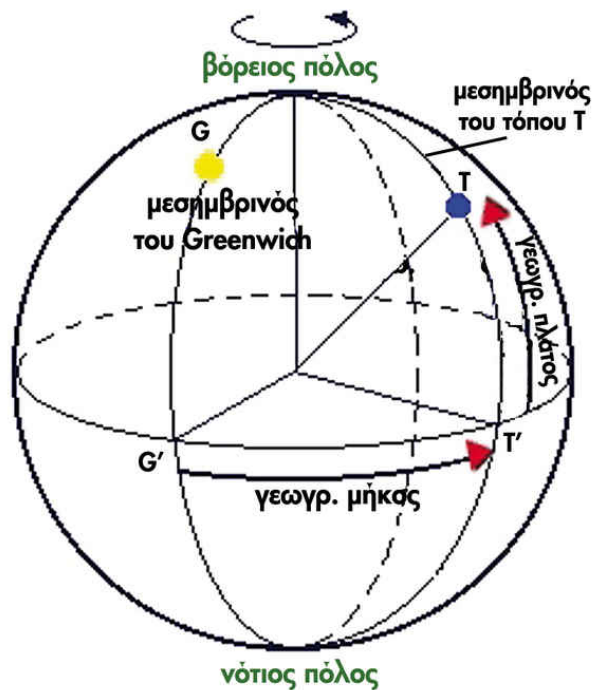
Στο **κεφάλαιο 7** υπολογίζεται η ημερήσια και η ετήσια παραγωγή ενέργειας φωτοβολταϊκού για τρία διαφορετικά σενάρια σκίασης από άλλο φωτοβολταϊκό.

Στο **κεφάλαιο 8** παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας.

## 2.ΗΛΙΑΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

### 2.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ

Οι γεωγραφικές συντεταγμένες είναι το γεωγραφικό μήκος και πλάτος και χρησιμοποιούνται για να γίνει ο εντοπισμός ενός σημείου στη επιφάνεια της γης με μοναδικό τρόπο. Το γεωγραφικό πλάτος( latitude )(φ) είναι η κάθετη ευθεία στην επιφάνεια της γης από το επιφανειακό σημείο προς το επίπεδο του ισημερινού. Σε περιοχές του βόρειου ημισφαιρίου αντιστοιχεί θετική τιμή γεωγραφικού πλάτους ενώ σε νότιες αρνητική τιμή. Το γεωγραφικό πλάτος μετράται σε μοίρες και παίρνει τιμές από 0 ως 90° (για το βόρειο η το νότιο ημισφαίριο). Γεωγραφικό μήκος (longitude) (λ) ενός σημείου στην επιφάνεια της γης είναι η γωνία που σχηματίζεται από το επίπεδο του μεσημβρινού που διέρχεται από το εν λόγω σημείο με το επίπεδο του πρώτου μεσημβρινού(Δηλαδή του μεσημβρινού του Γκρίνουιτς). Το γεωγραφικό μήκος μετριέται σε μοίρες από 0-180° (για ανατολικά και δυτικά του μεσημβρινού του Γκρίνουιτς). Για περιοχές ανατολικά του Γκρίνουιτς το γεωγραφικό μήκος είναι αρνητικό ενώ για περιοχές δυτικά του Γκρίνουιτς το γεωγραφικό μήκος παίρνει θετικές τιμές. Γεωγραφικό στίγμα ( geographical position ) ενός γεωγραφικού σημείου είναι η τομή του αντίστοιχου γεωγραφικού πλάτους (φ) και του γεωγραφικού μήκους (λ) αυτού του σημείου, δηλαδή οι γεωγραφικές συντεταγμένες του σημείου αυτού. Παρακάτω στην εικόνα 2.1 φαίνεται το γεωγραφικό στίγμα ενός σημείου.



**Σχήμα 2.1:** Γεωγραφικό στίγμα ενός σημείου

## 2.2 ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΗΛΙΟΥ

Η ηλιακή απόκλιση  $\delta$  είναι η γωνιακή θέση του ήλιου στο ηλιακό μεσημέρι (κατά το οποίο ο ήλιος βρίσκεται στον τοπικό μεσημβρινό) σε σχέση με την επιφάνεια του ισημερινού. Ο άξονας βορρά νότου της γης αποκλίνει από την κάθετο στο επίπεδο ελλειπτικής τροχιάς κατά μία γωνία η οποία κατά τη διάρκεια του έτους μεταβάλλεται από  $-23,45^\circ$  έως  $23,45^\circ$  περίπου. Αυτή η γωνία είναι η γωνία απόκλισης. Ο τύπος για τη απόκλιση του ήλιου δίνεται από τον τύπο :

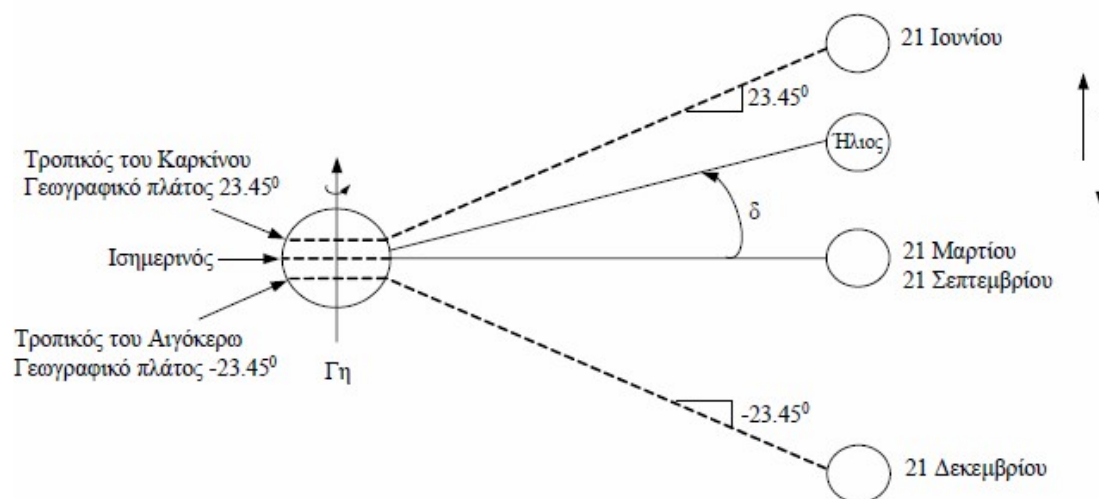
$$\delta = 23,45 * \sin \frac{360(n+284)}{365} \quad (2.1)$$

όπου  $n$  είναι η ημέρα του έτους. Ο παραπάνω τύπος μπορεί να διαμορφωθεί ως εξής :

$$\delta = 23,45 * \sin \frac{360(m+284*24)}{365*24} \quad (2.2)$$

όπου  $m$  ο τρέχων αριθμός ώρας τους έτους ( $m = 1$  για την πρώτη ώρα του έτους).

Η ηλιακή απόκλιση παίρνει τη μέγιστη τιμή της ( $23.45^\circ$ ) κατά το θερινό ηλιοστάσιο (21 Ιουνίου), και την ελάχιστη τιμή της ( $-23.45^\circ$ ) κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο (21 Δεκεμβρίου). Μηδενίζεται δύο φορές το έτος στις 21 Μαρτίου και στις 21 Σεπτεμβρίου. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η αναπαράσταση της ηλιακής απόκλισης ανάλογα με τη ημέρα του έτους.



**Σχήμα 2.2:** Σχηματική αναπαράσταση ηλιακής απόκλισης

## **2.3 ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ΗΛΙΟΥ**

Η γωνία ώρας  $\omega$  ενός σημείου στην επιφάνεια της γης είναι η γωνία κατά την οποία πρέπει να περιστραφεί ο μεσημβρινός του συγκεκριμένου σημείου για να γίνει παράλληλος προς τις ακτίνες του ήλιου. Η ωριαία γωνία παίρνει τιμές από 0 (ηλιακή μεσημβρία) έως  $\pm 180^\circ$  (μεσάνυχτα). Δηλαδή καλύπτει ένα εύρος τιμών  $360^\circ$  σε χρονικό διάστημα 24 ωρών. Άρα

κάθε ώρα η ωριαία γωνία μεταβάλλεται κατά  $15^\circ (360/24)$ . Οι γωνίες που αντιστοιχούν σε απογευματινές ώρες λαμβάνονται ως θετικές ενώ οι πρωινές σαν αρνητικές. Η γωνιά ώρας δίνεται από τον τύπο:

$$\omega = \pm 1/4 \cdot \text{αριθμός λεπτών από το τοπικό ηλιακό μεσημέρι}. (2.3)$$

Η γωνιά ώρας σχετίζεται με τον ηλιακό χρόνο ( $t_s$ ), ο οποίος είναι διαφορετικός από το χρόνο που δείχνει το ρολόι (τοπική ώρα  $t_c$ ). Αποδεικνύεται ότι η ωριαία γωνία ανατολής του ήλιου ( $\omega sr$ ) υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\omega sr = \cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta) (2.4)$$

και η ωριαία γωνία δύσης του ήλιου από τον τύπο:

$$\omega ss = -\cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta) (2.5)$$

οπού  $\phi$  το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής μελέτης και  $\delta$  η απόκλιση του άξονα της γης. Οι ηλιακοί χρόνοι ανατολής και δύσης υπολογίζονται συναρτήσει της ωριαίας γωνίας του ήλιου από τις ακόλουθες σχέσεις :

$$t_a = 12 - \frac{N}{2} (2.6) \text{ και } t_\delta = 12 + \frac{N}{2} (2.7)$$

(ώρα δύσης)οπού  $N$  η διάρκεια της ημέρας (σε ώρες) και για την ανατολή του ήλιου ισχύει ότι:

$$N = \frac{2}{15} \cdot \omega sr (2.8)$$

Για τη δύση του ήλιου ισχύει ότι:

$$N = \frac{2}{15} \cdot \omega ss (2.9) .$$

Μέσω των σχέσεων 2.8 και 2.9 οι σχέσεις 2.6 και 2.7 γίνονται:

$$t_a = 12 - \frac{24}{360} * \omega sr (2.10) \text{ και } t_\delta = 12 - \frac{24}{360} * \omega ss (2.11)$$

Με βάση τις τελευταίες εξισώσεις η ωριαία γωνία και οι χρόνοι ανατολής και δύσης εξαρτώνται αποκλειστικά από το γεωγραφικό πλάτος μιας περιοχής και το τρέχον εικοσιτετράωρο του έτους(λόγω της εξάρτησης από την ηλιακή απόκλιση). Η διακύμανση του χρόνου ανατολής και δύσης εντός του έτους είναι περισσότερο έντονη όσο το γεωγραφικό πλάτος μιας περιοχής αυξάνει. Αυτό σημαίνει ότι όσο κατευθυνόμαστε προς τους πόλους η διακύμανση της διάρκειας της ημέρας ( $N$ ) μέσα στο έτος γίνεται εντονότερη. Στον ισημερινό η διάρκεια της ημέρας είναι σταθερή και ίση με



τη διάρκεια της νύχτας όλο το έτος (ισημερία) ενώ το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει στους πόλους.

## **2.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΓΩΝΙΕΣ ΤΗΣ ΕΚΛΕΙΠΤΙΚΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ**

Η κλίση  $\beta$  μιας επιφάνειας είναι η γωνία που σχηματίζει σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο.

Η γωνία αζιμούθιου του ήλιου  $\gamma_s$  είναι η γωνία που σχηματίζει η προβολή των ηλιακών ακτίνων στο οριζόντιο επίπεδο με τη κατεύθυνση του νότου. Θετικές τιμές του  $\gamma_s$  αναφέρονται σε θέσεις του ήλιου δυτικά της νότιας κατεύθυνσης, και αρνητικές τιμές του  $\gamma_s$  αναφέρονται σε θέσεις του ήλιου ανατολικά της νότιας κατεύθυνσης και για μηδενική τιμή του  $\gamma_s$  αναφέρεται σε νότιο προσανατολισμό. Η γωνία  $\gamma_s$  υπολογίζεται από τη σχέση:

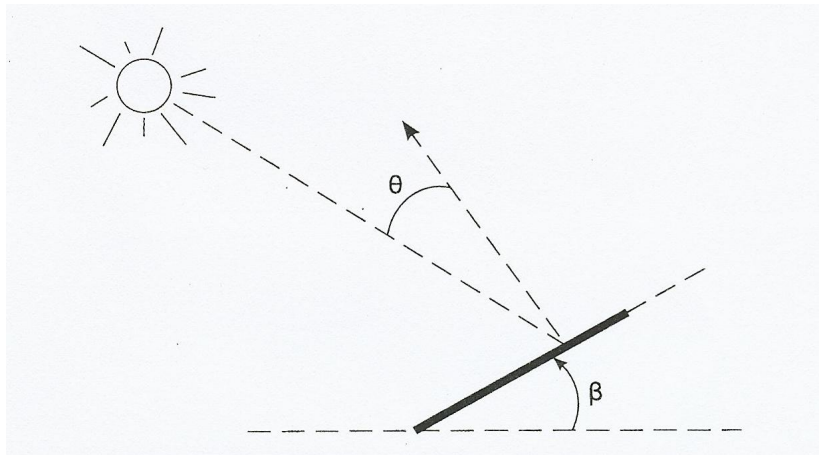
$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \cdot \left| \cos^{-1} \cdot \left( \frac{\cos \theta_z \cdot \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cdot \cos \phi} \right) \right| \quad (2.12)$$

όπου  $\text{sign}(\omega)$  είναι η συνάρτηση πρόσημου της γωνίας ώρας  $\omega$ , που λαμβάνει τιμή +1 εάν  $\omega > 0^\circ$ , τιμή -1 εάν  $\omega < 0^\circ$ , και τιμή 0 εάν  $\omega = 0^\circ$  και  $\theta_z$  η γωνία ζενίθ του ήλιου και  $\phi$  γεωγραφικό πλάτος και  $\delta$  η ηλιακή απόκλιση.

Η γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  μιας επιφάνειας ορίζεται ως η γωνία μεταξύ των ηλιακών ακτίνων και της καθέτου στην επιφάνεια και ισούται με:

$$\cos \theta = \sin \delta \cdot \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad (2.13).$$

Στην περίπτωση που η γωνία αζιμούθιου  $\gamma = 0^\circ$ , η παραπάνω σχέση απλοποιείται ως εξής:  $\cos \theta = \sin \delta \cdot \sin(\phi - \beta) + \cos \delta \cdot \cos(\phi - \beta) \cdot \cos \omega$  (2.14). Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η αναπαράσταση της γωνίας πρόσπτωσης  $\theta$  και της κλίσης  $\beta$ .



**Σχήμα 2.3 :**Αναπαράσταση της γωνίας πρόσπτωσης  $\theta$  και της κλίσης  $\beta$  κεκλιμένης επιφάνειας.

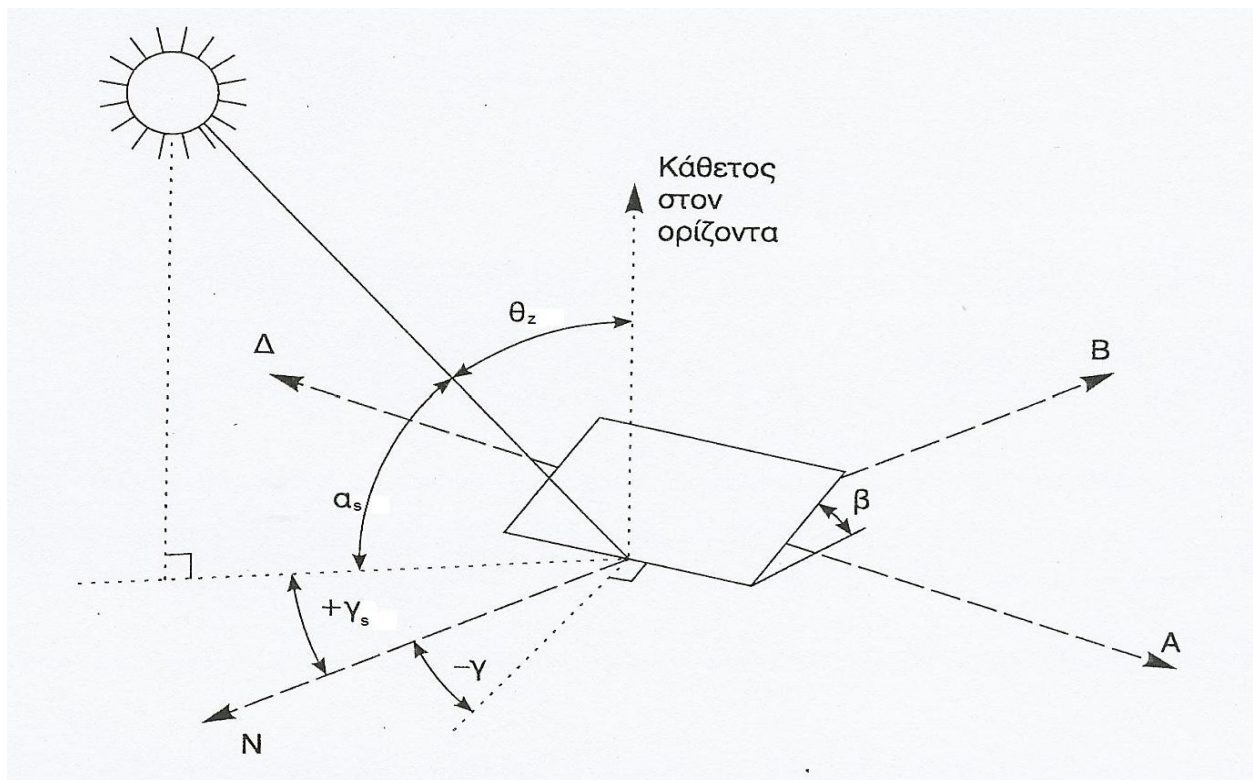
Η γωνία ζενίθ του ήλιου  $\theta_z$  είναι η γωνία μεταξύ των ηλιακών ακτίνων και της κατακόρυφης, ή ισοδύναμα η γωνία πρόσπτωσης μεταξύ των ηλιακών ακτίνων και μιας οριζόντια τοποθετημένης επιφάνειας. Η γωνία ζενίθ θεωρητικά παίρνει τιμές από  $0^\circ$  ως  $90^\circ$ . Ισχύει ότι η γωνία ζενίθ και η γωνία ύψους είναι συμπληρωματικές. Άρα ισχύει ότι  $\theta_z + a_s = 90^\circ$ . Η τιμή της  $\theta_z$  προκύπτει από την εξίσωση υπολογισμού της γωνίας πρόσπτωσης  $\theta$  θέτοντας την κλίση  $\beta$  της επιφάνειας ίση με  $0^\circ$ :

$$\cos \theta_z = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (2.15)$$

Το ηλιακό ύψος  $a_s$  του ήλιου ως προς συγκεκριμένο γεωγραφικό σημείο είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το εν λόγω γεωγραφικό σημείο με τη θέση του ήλιου στον ορίζοντα και στην προβολή της ανωτέρω ευθείας στην επιφάνεια της γης. Το ηλιακό ύψος θεωρητικά παίρνει τιμές από  $0^\circ$  έως  $90^\circ$ . Επειδή το ηλιακό ύψος είναι συμπληρωματικό από τη γωνία ζενίθ ισχύει ότι:

$$\sin \alpha_s = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (2.16).$$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η αναπαράσταση των βασικών γωνιών κεκλιμένης επιφάνειας.



**Σχήμα 2.4 :** Αναπαράσταση βασικών γωνιών κεκλιμένης επιφάνειας. Γωνία ζενίθ του ήλιου  $\theta_z$ , γωνία ύψους του ήλιου  $\alpha_s$ , γωνία αζιμούθιου του ήλιου  $\gamma_s$ , γωνία αζιμούθιου  $\gamma$  και κλίση  $\beta$  για μία κεκλιμένη επιφάνεια.

Στην παραπάνω εικόνα έχουμε αναπαράσταση βασικών γωνιών κεκλιμένης επιφάνειας όπου το  $\theta_z$  είναι η γωνία ζενίθ του ήλιου το  $\alpha_s$  η γωνία ύψους του ήλιου το  $\gamma_s$  η γωνία αζιμούθιου του ήλιου, το  $\gamma$  η γωνία αζιμούθιου, και  $\beta$  η κλίση για μία κεκλιμένη επιφάνεια.

## 2.5 ΤΟΠΙΚΗ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΑ

Για τους υπολογισμούς της ηλιακής γεωμετρίας χρησιμοποιούμε συνήθως το ηλιακό χρόνο. Ο αληθής ηλιακός χρόνος ( $T$ ) μετράται με αρχή το μεσονύκτιο (κάτω μεσουράνηση του Ήλιου) έτσι ώστε ο ημερήσιος κύκλος του ήλιου να αντιστοιχεί σε 24 ίσες μεταξύ τους ηλιακές ώρες. Σε ορισμένες περιπτώσεις όμως χρειαζόμαστε και τη τοπική ώρα. Η επίσημη ώρα διαφέρει από την αληθή ηλιακή ώρα. Για να συνδεθεί η τοπική ώρα με τη ηλιακή πρέπει να γίνουν 2 διευθετήσεις. Πρώτον η διευθέτηση του γεωγραφικού μήκους έχει να κάνει με τον τρόπο με τον οποίο οι περιοχές της γης διαιρούνται σε χρονικές ζώνες. Για όλους τους τόπους στην Ελλάδα η ζώνη ώρας είναι: GMT +02:00. Η δεύτερη διευθέτηση οφείλεται στην ελλειπτική τροχιά της γης η οποία μεταβάλλει το μήκος μίας ηλιακής μέρας (από το ένα ηλιακό μεσημέρι στο επόμενο ηλιακό μεσημέρι) στη διάρκεια του έτους. Η διαφορά (σε λεπτά) μεταξύ του ηλιακού χρόνου  $t_s$  και της τοπικής ώρας  $t_c$  δίνεται από τη σχέση:

$$t_s - t_c = \pm 4 \cdot (L_{st} - L_{loc}) + E \quad (2.17)$$

όπου  $L_{st}$  είναι το γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού που ορίζει τη ζώνη ώρας της περιοχής (μεσημβρινός αναφοράς) και  $L_{loc}$  το γεωγραφικό μήκος της περιοχής. Για την περίπτωση θερινής ώρας, η οποία αλλάζει την τελευταία Κυριακή του Μαρτίου και ισχύει έως την τελευταία Κυριακή του Οκτωβρίου, αφαιρούνται 60 λεπτά (1 ώρα) από την τιμή της τοπικής ώρας  $t_c$ . Η παράμετρος  $E$  περιγράφει τη διαφορά μεταξύ μιας ημέρας 24 ωρών και μιας ηλιακής ημέρας (σε λεπτά):

$$E = 9,87 \cdot \sin 2B - 7,53 \cdot \cos B - 1,5 \cdot \sin B \quad (2.18).$$

Το  $B$  ορίζεται ως

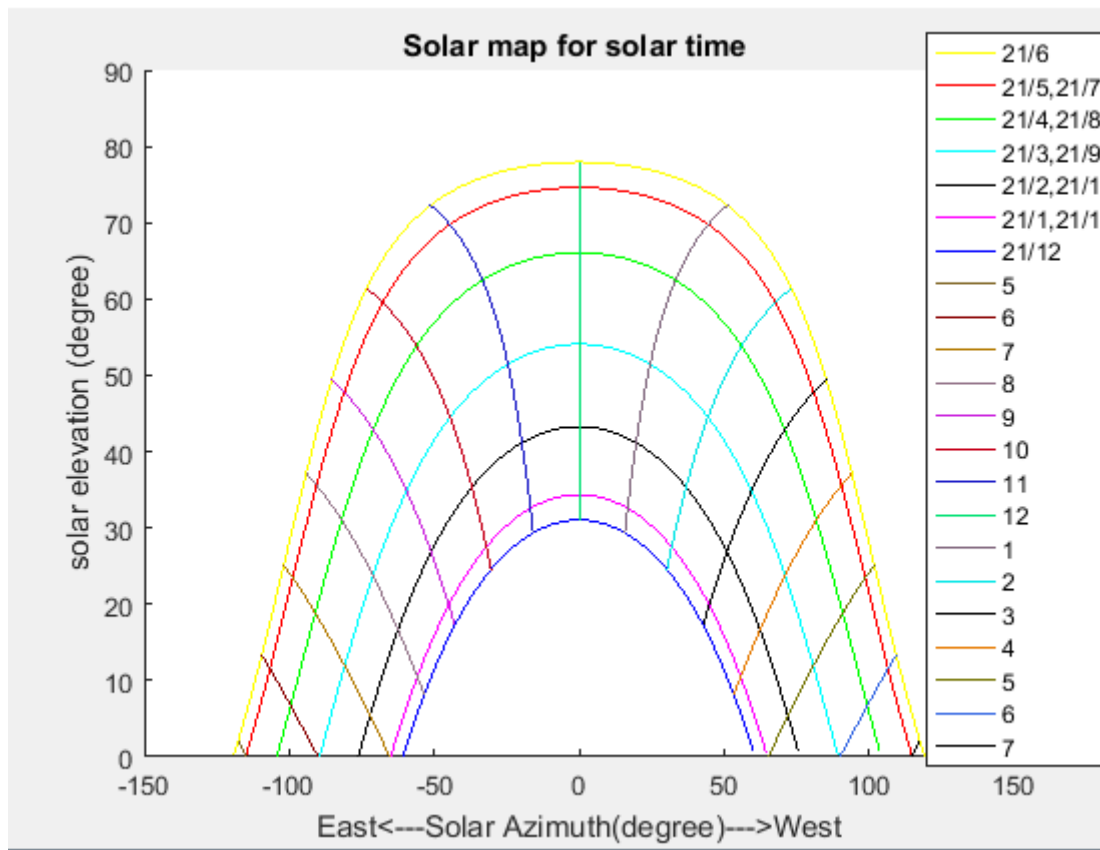
$$B = \frac{360 \cdot (n - 81)}{364} \quad (2.19) \text{ (σε μοίρες) και } n \text{ είναι η ημέρα του έτους.}$$

Η μέγιστη τιμή του  $E$  είναι :

$$E_{\max} = 16.45 \text{ min} \quad (2.20).$$

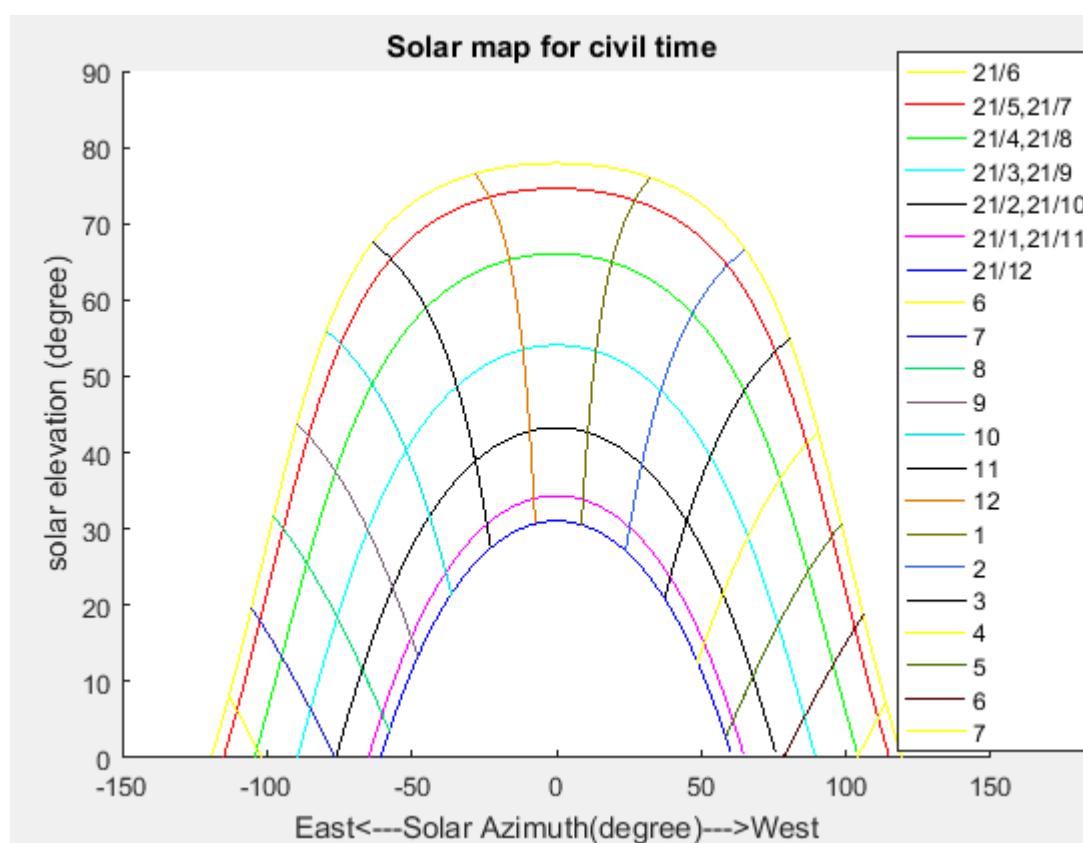
## **2.6 ΗΛΙΑΚΟΙ ΧΑΡΤΕΣ**

Ηλιακοί χάρτες ονομάζονται τα διαγράμματα, τα οποία απεικονίζουν τις φαινόμενες τροχιές του ήλιου στο επίπεδο ορθής προβολής για συγκεκριμένο γεωγραφικό πλάτος. Με τα διαγράμματα αυτά προσδιορίζεται η θέση του ήλιου (ύψος και αζιμούθιο) για κάθε μήνα (συνήθως την 21η του μήνα) για όλες τις ώρες της ημέρας. Έχουν δημιουργηθεί ηλιακοί χάρτες για όλα τα γεωγραφικά πλάτη. Σε κάθε ηλιακό χάρτη απεικονίζονται επτά (7) φαινόμενες τροχιές του ήλιου, από τις οποίες αυτή του Δεκεμβρίου έχει τη χαμηλότερη τροχιά (την 21η Δεκεμβρίου παρατηρείται το χειμερινό ηλιοστάσιο), ενώ του Ιουνίου έχει τη μεγαλύτερη (την 21η Ιουνίου παρατηρείται το θερινό ηλιοστάσιο). Οι υπόλοιπες φαινόμενες τροχιές ανήκουν σε δύο μήνες (Ιανουάριος και Νοέμβριος έχουν την ίδια φαινόμενη τροχιά, αντίστοιχα Φεβρουάριος και Οκτώβριος, Απρίλιος και Αύγουστος, Μάιος και Ιούλιος). Την 21η Μαρτίου και Σεπτεμβρίου παρατηρείται η ισημερία, εαρινή και φθινοπωρινή, αντίστοιχα. Η εκάστοτε θέση του ήλιου ορίζεται από τη γωνία αζιμούθιου και τη γωνία ύψους. Στην κάτω οριζόντια ευθεία του ηλιακού χάρτη καταγράφονται οι γωνίες αζιμούθιου ως προς τον ηλιακό νότο, που βρίσκεται στο κέντρο, με γωνία  $0^\circ$ . Αριστερά του νότου, στη γωνία των  $90^\circ$  ορίζεται η ανατολή και δεξιά, πάλι στη γωνία των  $90^\circ$ , ορίζεται η δύση. Η κάθετη ευθεία (τεταγμένη) προσδιορίζει τις γωνίες ύψους του ήλιου, για όλες τις ώρες της ημέρας και για όλους τους μήνες. Οι διακεκομμένες καμπύλες προσδιορίζουν τις ηλιακές ώρες, από την ανατολή μέχρι τη δύση. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο ηλιακός χάρτης για ηλιακές ώρες για γεωγραφικό πλάτος  $\varphi = 35.51^\circ$  δηλαδή για τα Χανιά.



**Σχήμα 2.5 :**Ηλιακός χάρτης ηλιακών ωρών(solar time) για γεωγραφικό πλάτος Χανίων  $\varphi=35.51^\circ$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο ηλιακός χάρτης για τοπικές ώρες για γεωγραφικό πλάτος  $\varphi=35.51^\circ$  δηλαδή για τα Χανιά.



**Σχήμα 2.6 :** Ηλιακός χάρτης τοπικών ωρών (civil time) για γεωγραφικό πλάτος Χανίων  $\varphi=35.51^\circ$

## **3.ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ**

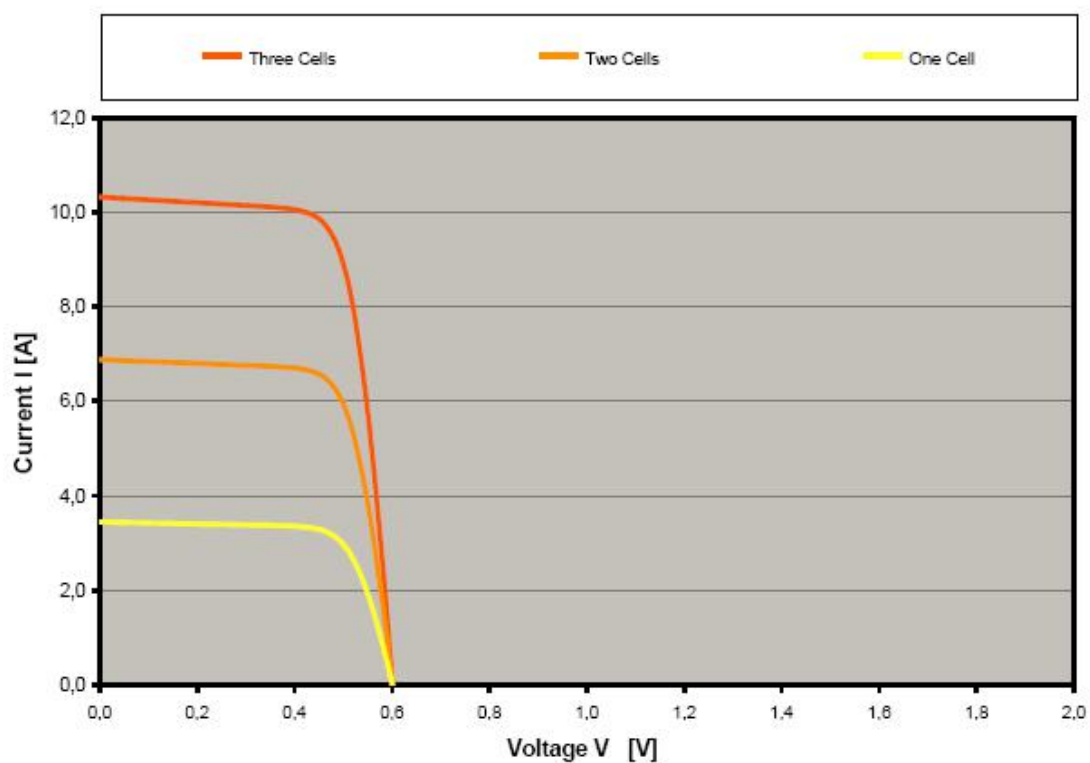
### **3.1 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

Τα φωτοβολταϊκά (ή Φ/Β) συστήματα αποτελούν μια από τις εφαρμογές των Ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με τεράστιο ενδιαφέρον για την Ελλάδα. Εκμεταλλευόμενο το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το φωτοβολταϊκό σύστημα παράγει ηλεκτρική ενέργεια από την ηλιακή ενέργεια. Όταν αυτά τα συστήματα δεν είναι διασυνδεδεμένα με το υπόλοιπο εθνικό δίκτυο ονομάζονται αυτόνομα. Τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα βρίσκουν εφαρμογή σε περιοχές όπου η σύνδεση τους με το ηλεκτρικό δίκτυο αλλά και η μεταφορά του καύσιμου θεωρούνται αντιοικονομικές επιλογές. Έτσι δεν συνδέονται στο δίκτυο της ΔΕΗ και δεν επιβαρύνουν τον ιδιοκτήτη με πάγια κόστη ή πτώσεις τάσεων του παρόχου. Έτσι υπάρχει απευθείας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ακόμη και σε πολύ μικρή κλίμακα, π.χ σε επίπεδο μερικών δεκάδων Watt ή και mWatt. Επιπλέον μπορούν να συνδυαστούν με άλλες πηγές ενέργειας (υβριδικά συστήματα). Έχουν αθόρυβη λειτουργία και μηδενικές εκπομπές ρύπων. Οι απαιτήσεις συντήρησης των φωτοβολταϊκών είναι σχεδόν μηδενικές και επιπλέον τα φωτοβολταϊκά έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και αξιοπιστία. Σε περίπτωση που οι ανάγκες αυξηθούν πολύ εύκολα το σύστημα αναβαθμίζεται για να καλύψει ενεργειακά την νέα ζήτηση οπότε αυτό σημαίνει ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν μεγάλη ευελιξία. Έχουν όμως υψηλό κόστος επένδυσης το οποίο αποτελεί το μεγαλύτερο μειονέκτημα τους. Όμως πρέπει να τονιστεί ότι υπάρχουν σήμερα αρκετοί χρήστες για τους οποίους το Φ/Β σύστημα είναι η πλέον ενδεδειγμένη οικονομική λύση.



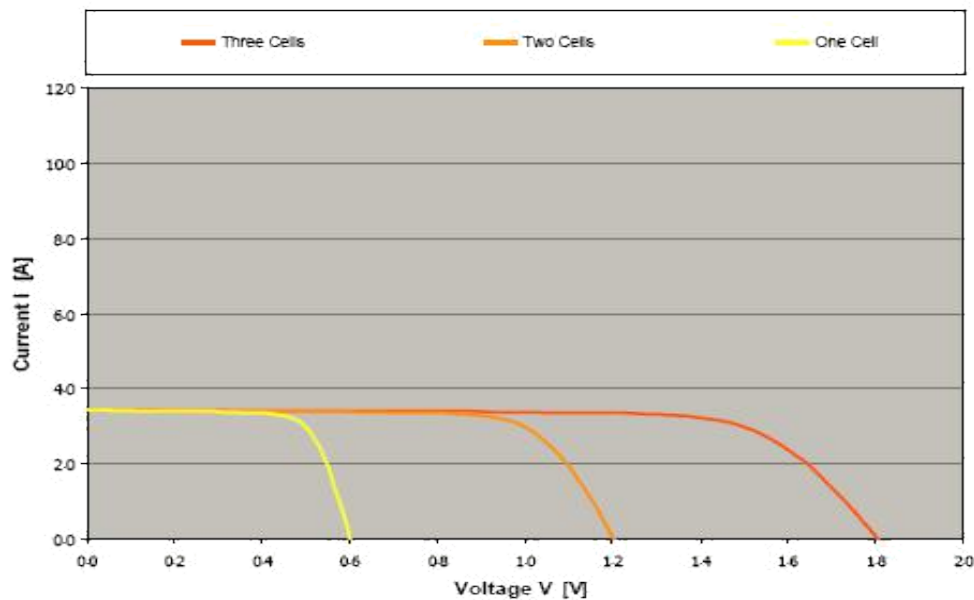
### **3.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ**

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουν ως βασικό μέρος το ηλιακό στοιχείο(solar cell, ηλιακό κελί) που είναι ένας επεξεργασμένος ημιαγωγός μικρού πάχους σε επίπεδη επιφάνεια. Το φωτοβολταϊκό κελί αναπτύσσει διαφορά δυναμικού στη τάξη των 0,5-1V. Τα ηλιακά κελιά (cells) χρησιμοποιούνται σπάνια μόνα τους. Συνήθως, κελιά με τα ίδια χαρακτηριστικά συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους ώστε να προκύψει μεγαλύτερη ισχύς με τη μορφή ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου(panel). Το πλαίσιο προστατεύει τα φωτοβολταϊκά κελιά από το εξωτερικό περιβάλλον ενώ αναπτύσσει τάση στην τάξη των λίγων δεκάδων Volt. Εντός του πλαισίου, ανά κάμποσα κελιά συνδέονται δίοδοι παράλληλα για λόγους προστασίας οι οποίες αποκαλούνται δίοδοι διαφυγής (bypass diodes). Η μονάδα που περιλαμβάνει  $N_s$  σε πλήθος κυψέλες και μία δίοδο διαφυγής αποκαλείται φωτοβολταϊκή στοιχειοσειρά (PV cell string). Έτσι το φωτοβολταϊκό πλαίσιο συνίσταται σε  $N_{cs}$  στοιχειοσειρές συνδεδεμένες σε σειρά κάθε μία από τις οποίες περιλαμβάνει  $N_s$  κελιά. Για ανάπτυξη ακόμα μεγαλύτερης τάσης,  $N_m$  πλαίσια συνδέονται σε σειρά σχηματίζοντας τη φωτοβολταϊκή πλαισιοσειρά (PV string) ενώ  $N_p$  πλαισιοσειρές συνδέονται παράλληλα σχηματίζοντας την φωτοβολταϊκή συστοιχία (PV array). Η σύνδεση μεταξύ των κελιών μπορεί να γίνει είτε σε σειρά είτε παράλληλα. Κατά την παράλληλη σύνδεση των κελιών παρατηρείται ότι η τάση στα άκρα του συνδυασμού παραμένει ίδια με τη τάση του κάθε κελιού ενώ το ρεύμα προκύπτει από το άθροισμα των τιμών του ρεύματος του κάθε κελιού. Το διάγραμμα I-V για παράλληλη σύνδεση φαίνεται παρακάτω.



**Σχήμα 3.1 :** Διάγραμμα I-V για παράλληλη σύνδεση κελιών

Η παράλληλη σύνδεση κελιών δεν χρησιμοποιείται συνήθως καθώς η μεγαλύτερη ένταση ρεύματος απαιτεί και μεγαλύτερες διατομές αγωγών, ενώ και οι απώλειες αυξάνονται με τη μείωση της τάσης. Για αυτό το λόγο η σύνδεση σε σειρά χρησιμοποιείται πιο συχνά. Όταν εφαρμόζεται σε σειρά σύνδεση των κελιών υπάρχει η ίδια ροή ρεύματος ανά κελί ενώ η τάση είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων των κελιών. Το διάγραμμα I-V για τη σε σειρά σύνδεση κελιών φαίνεται παρακάτω.



**Σχήμα 3.2** Διάγραμμα I-V για σε σειρά σύνδεση κελιών

### **3.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

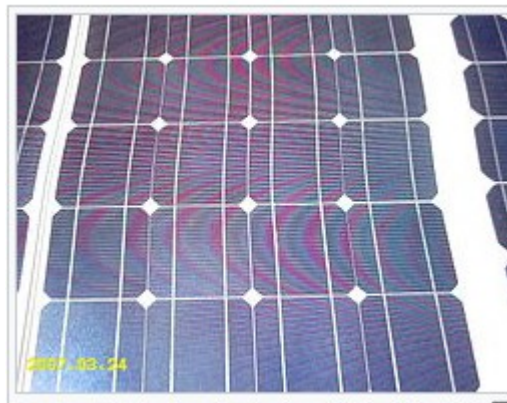
Το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι συνήθως τετράγωνο, με πλευρά 120-160mm. Το πυρίτιο χρησιμοποιείται κατά βάση για τη παραγωγή φωτοβολταϊκών. Η κυριαρχία αυτή οφείλεται στη τεράστια αφθονία του στη γη καθώς και στη τεράστια επιστημονική και τεχνική υποδομή για το υλικό αυτό. Το υλικό που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των Φ/Β πρέπει να έχει υψηλή καθαρότητα και δομική τελειότητα ώστε να αποφευχθεί η επιστροφή των ηλεκτρονίων στις φυσικές τους θέσεις. Δυο τύποι πυριτίου χρησιμοποιούνται για την δημιουργία φωτοβολταϊκών στοιχείων: το άμορφο και το κρυσταλλικό πυρίτιο, ενώ το κρυσταλλικό πυρίτιο διακρίνεται σε μονοκρυσταλλικό ή

πολυκρυσταλλικό. Το άμορφο και το κρυσταλλικό πυρίτιο παρουσιάζουν τόσο πλεονεκτήματα, όσο και μειονεκτήματα, και κατά τη μελέτη του φωτοβολταϊκού συστήματος γίνεται η αξιολόγηση των ειδικών συνθηκών της εφαρμογής ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη τεχνολογία. Στο εμπόριο διατίθενται φωτοβολταϊκά πάνελ επικαλυμμένα με ειδικές μεμβράνες και εγκιβωτισμένα σε γυαλί με πλαίσιο από αλουμίνιο σε διάφορες τιμές ονομαστικής ισχύος, ανάλογα με την τεχνολογία και τον αριθμό των φωτοβολταϊκών κυψελών που τα αποτελούν. Έτσι, ένα πάνελ 36 κυψελών μπορεί να έχει ονομαστική ισχύ 70-85 W, ενώ μεγαλύτερα πάνελ μπορεί να φτάσουν και τα 200 W ή και παραπάνω. Εκτός από το πυρίτιο χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων, όπως το Κάδμιο-Τελλούριο (CdTe) το αρσενιούχο γάλλιο (GaAs), το τελεριούχο κάδμιο (CdTe) και ο δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe<sub>2</sub> ή CIS). Όλα αυτά τα είδη παρέχουν μια μεγάλη γκάμα φωτοβολταϊκών, τα οποία όμως διαφέρουν ως προς τα κόστη και το βαθμό απόδοσης. Τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία, που σχεδιάστηκαν δεν είχαν παρά 1-2% απόδοση. Στην πορεία του χρόνου όλο και αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης. Η αύξηση της απόδοσης, έστω και κατά μια ποσοστιαία μονάδα, θεωρείται επίτευγμα στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών. Στην σημερινή εποχή ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου βρίσκεται στο 13–19%, ο οποίος, συγκρινόμενος με την απόδοση άλλου συστήματος (συμβατικού, αιολικού, υδροηλεκτρικού κλπ.), παραμένει ακόμη αρκετά χαμηλός. Αυτό σημαίνει ότι το φωτοβολταϊκό σύστημα καταλαμβάνει μεγάλη επιφάνεια προκειμένου να αποδώσει την επιθυμητή ηλεκτρική ισχύ. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια Φ/Β συστοιχία είναι συνεχούς ρεύματος (DC), και για το λόγο αυτό οι πρώτες χρήσεις των φωτοβολταϊκών αφορούσαν εφαρμογές DC τάσης. Με την προοδευτική αύξηση όμως του βαθμού απόδοσης, δημιουργήθηκαν οι αναστροφείς (inverters) όπου μετατρέπουν την έξοδο συνεχούς τάσης της Φ/Β συστοιχίας σε εναλλασσόμενη τάση. Με τον τρόπο αυτό, το Φ/Β σύστημα είναι σε θέση να τροφοδοτήσει μια σύγχρονη εγκατάσταση (κατοικία, θερμοκήπιο, μονάδα παραγωγής) που χρησιμοποιεί κατά κανόνα συσκευές εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Τα φωτοβολταϊκά ανάλογα με τα υλικά και το πάχος των υλικών που χρησιμοποιούνται χωρίζονται σε:

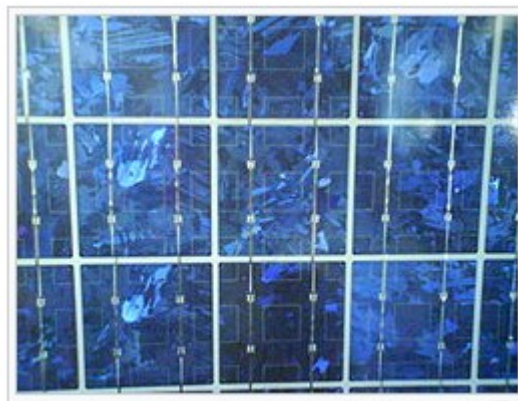
- Φ/Β Ημιαγωγοί Λεπτών Υμενίων (thin films)
- Φ/Β μονο-κρυσταλλικού Πυριτίου (Single-crystal Silicon)
- Φ/Β πολυ-κρυσταλλικού Πυριτίου (Multi-crystalline Silicon)
- Φ/Β άμορφου Πυριτίου (Amorphous or thin Silicon)
- Φ/Β στοιχεία ταινίας (Ribbon Silicon)
- Φ/Β φωτιστικά δομικά στοιχεία (Solar Cap)

Στα σχήμα 3.4 φαίνεται φωτοβολταϊκό φτιαγμένο από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο στο σχήμα 3.5 φαίνεται φωτοβολταϊκό φτιαγμένο από

πολυκρυσταλλικό πυρίτιο και στο σχήμα 3.6 φαίνεται κελί φτιαγμένο από άμορφο πυρίτιο.



**Σχήμα 3.4:** Φωτοβολταϊκό φτιαγμένο από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο



**Σχήμα 3.5** Φωτοβολταϊκό φτιαγμένο από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο



**Σχήμα 3.6** Κύτταρο φτιαγμένο από άμορφο πυρίτιο

### **3.4 ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ**

Ο ρυθμιστής φόρτισης (charge controller) ονομάζεται η ηλεκτρονική διάταξη που έχει ως κύριο στόχο να αποτρέψει την υπερφόρτιση και την εκφόρτιση του συσσωρευτή. Ο ρυθμιστής φόρτισης όταν οι συσσωρευτές του συστήματος φορτιστούν πλήρως διοχετεύει την περίσσεια του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται στην εκάστοτε ενεργειακή πηγή σε κατάλληλες αντιστάσεις ή προς τη γη, προστατεύοντας έτσι του συσσωρευτές από τους κινδύνους της υπερφόρτισης. Ακόμα ο ρυθμιστής φόρτισης απομονώνει τον συσσωρευτή από την κατανάλωση σε περίπτωση υπερκφόρτισης. Το μέγεθος του ρυθμιστή φόρτισης εξαρτάται από το μέγεθος των φωτοβολταϊκών που θα συνδέουμε πάνω του. Πρέπει να υπερκαλύπτει την συνολική ένταση σε Ampere των φωτοβολταϊκών. Εάν για παράδειγμα, η ονομαστική ένταση σε Ampere των φωτοβολταϊκών είναι 10A, τότε πρέπει να επιλέξουμε ένα ρυθμιστή φόρτισης 12A. Επίσης πρέπει να είναι κατάλληλος και για την τάση του φωτοβολταϊκού συστήματος. Εάν τα φωτοβολταϊκά βγάζουν συνολική τάση 12V, επιλέγουμε ρυθμιστή για φωτοβολταϊκά 12V. Τέλος, μια ακόμη διάκριση μεταξύ των ρυθμιστών φόρτισης έχει να κάνει με τον τρόπο λειτουργίας τους. Έτσι λοιπόν υπάρχουν ρυθμιστές φόρτισης τύπου PWM και ρυθμιστές τύπου MPPT. Οι ρυθμιστές MPPT υπερτερούν

αφού εκμεταλλεύονται (υπό συνθήκες) περισσότερη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πάνελ (10-20% περισσότερο από τους PWM).

### **3.5 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗΣ**

Επειδή τα αυτόνομα συστήματα δεν έχουν την δυνατότητα ανταλλαγής ενέργειας με το δίκτυο χρειάζεται να αποθηκεύουν μια ποσότητα από την περίσσεια της ηλεκτρικής τους παραγωγής ώστε να χρησιμοποιηθεί όταν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή. Για αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα όπου οι μεταβολές της ηλιοφάνειας είναι σημαντικές απαιτούνται συσσωρευτές με μεγάλη χωρητικότητα. Οι συσσωρευτές αποτελούνται από πλάκες μολύβδου και για να αντέξουν πολλούς κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης. Οι πλάκες μολύβδου πρέπει να έχουν μεγάλο πάχος. Ο αριθμός των συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα εξαρτάται από τον μέγιστο αριθμό ημερών σε συννεφιά , από το εάν υπάρχουν η όχι βοηθητικές πηγές ενέργειας ,από τις αιχμές της κατανάλωσης και γενικότερα από τις καιρικές συνθήκες της περιοχής.

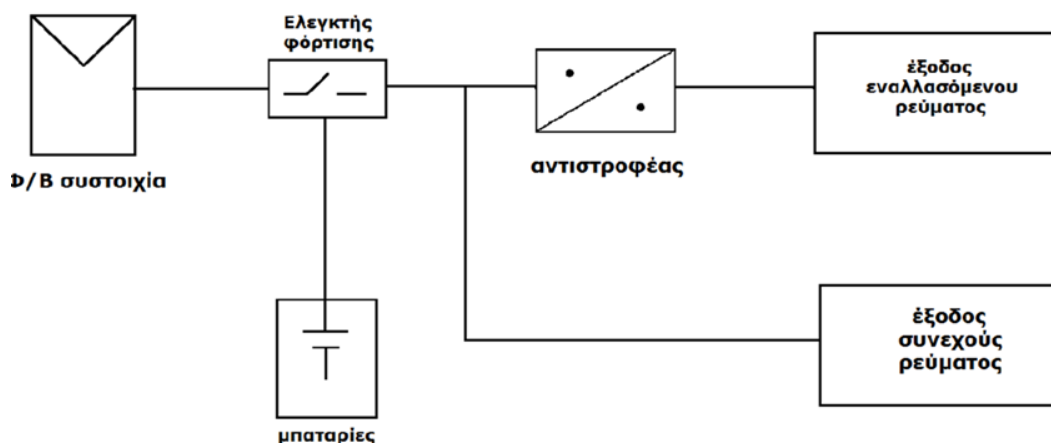
### **3.6 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ**

Ο αντιστροφέας τάσης (Inverter) είναι μια διάταξη ισχύος που χρησιμοποιούμε στα φωτοβολταϊκά συστήματα και μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να τροφοδοτήσουμε από το συσσωρευτή του φωτοβολταϊκού συστήματος, όλες τις ηλεκτρικές συσκευές ενός σπιτιού. Οι βασικές λειτουργικές προδιαγραφές ενός αντιστροφέα τάσης (Inverter) είναι να μετατρέπει εύκολα τη λειτουργία του από μονοφασική σε τριφασική, να είναι απλός ο επαναπρογραμματισμός του χωρίς να είναι απαραίτητη η αποσυναρμολόγηση του, ώστε να εξασφαλιστεί η ανάπτυξη και ο έλεγχος λειτουργίας. Επίσης, πρέπει να έχει τη δυνατότητα, σε περίπτωση

προβλήματος όπως κάποιο βραχυκύκλωμα, ή υπέρταση, να σταματάει τη λειτουργία του κυκλώματος και να υπάρχει μια ένδειξη η οποία να μας προσδιορίζει το πρόβλημα.

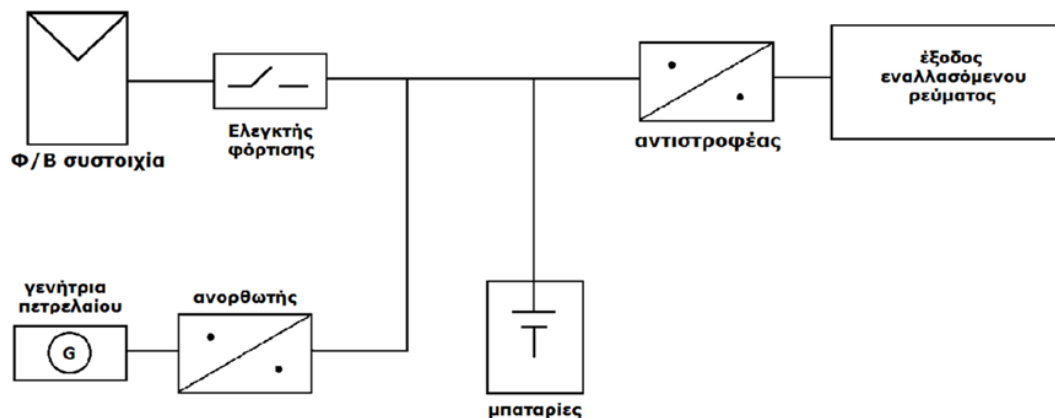
### **3.7 ΕΙΔΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

Ανεξαρτήτως της χρήσης τους, η κύρια διάκριση των φωτοβολταϊκών είναι στα συνδεδεμένα στο δίκτυο παραγωγής ηλεκτρισμού και στα μη συνδεδεμένα. Η επιλογή του καταλληλότερου συστήματος γίνεται με βάση την ανάγκη για πλήρη ή μερική κάλυψη των ενεργειακών αναγκών από το φωτοβολταϊκό σύστημα. Η παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά που δεν είναι συνδεδεμένα στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο διαχωρίζονται σε αυτόνομα στα οποία η φωτοβολταϊκή συστοιχία είναι η μοναδική πηγή ενέργειας και στα υβριδικά τα οποία έχουν και άλλη πηγή ενέργειας (ΑΠΕ ή συμβατική ηλεκτρική πηγή). Στα σχήμα 3.7 φαίνεται αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα και στο σχήμα 3.8 φαίνεται υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα.



**Σχήμα 3.7** Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα



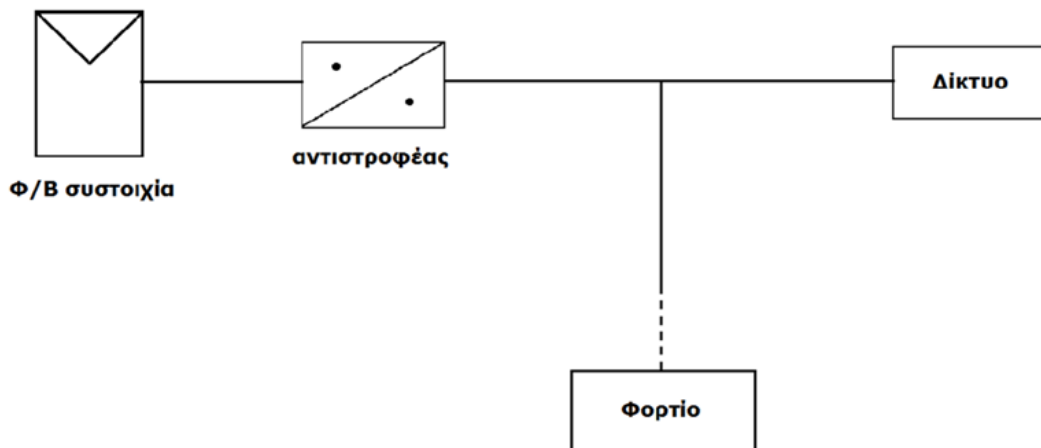


**Σχήμα 3.8** Υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα

Στα διασυνδεδεμένα δίκτυα καταναλώνετε ρεύμα από το δίκτυο όταν το φωτοβολταϊκό σύστημα δεν επαρκεί (π.χ. όταν έχει συννεφιά ή κατά τη διάρκεια της νύχτας) και δίνετε ενέργεια στο δίκτυο όταν η παραγωγή υπερκαλύπτει τις ανάγκες (π.χ. τις ηλιόλουστες ημέρες ή όταν απουσιάζεται ). Τα διασυνδεδεμένα δίκτυα διαχωρίζονται σε :

- Φ/Β συστήματα μεγέθους έως μερικών εκατοντάδων Kwp. Η μονάδα μέτρησης Kwp αναφέρεται στη μέγιστη ισχύ ενός φωτοβολταϊκού συστήματος
- Φ/Β που τροφοδοτούν κατοικίες, συγκροτήματα κατοικιών ή άλλα κτίρια όπου η πλεονάζουσα ενέργεια πωλείται προς το δίκτυο.
- Φ/Β σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπου η παραγόμενη ενέργεια διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο.

Παρακάτω φαίνεται διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα.



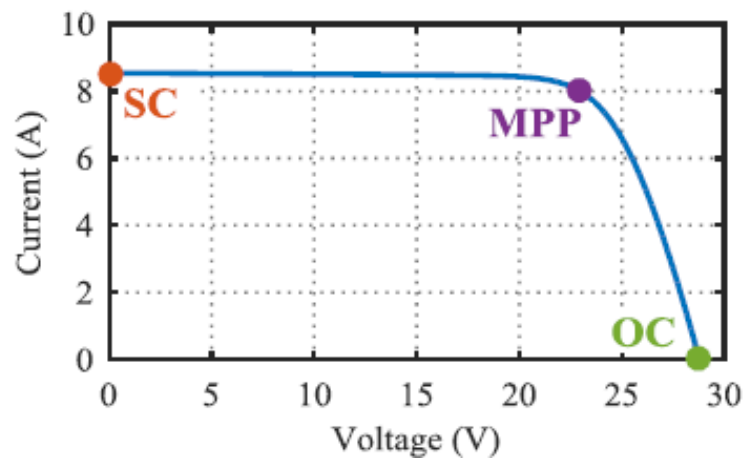
**Σχήμα 3.9** Διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα (grid-connected system)

### **3.8 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΟΥ**

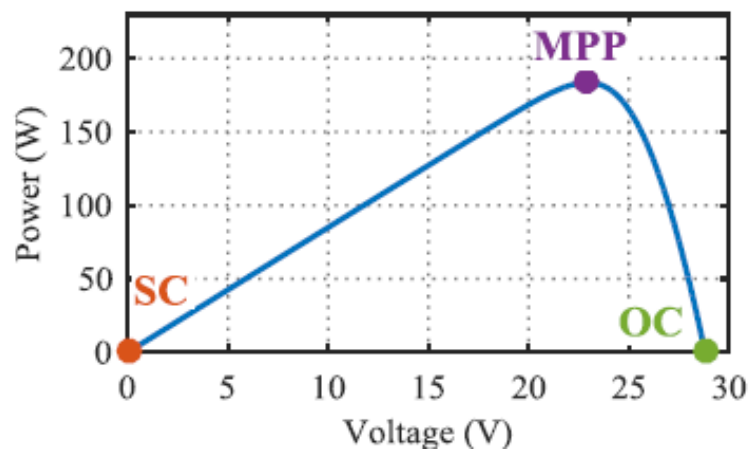
Τα τρία σημεία λειτουργίας Φ/Β πλαισίου που αναγράφονται πάντα πάνω στα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι τα εξής:

- Τάση ανοικτοκύκλωσης (open circuit – OC), όπου οι ακροδέκτες του πλαισίου είναι ανοιχτοκυκλωμένοι και αναπτύσσεται η μέγιστη τάση  $V_{oc0}$ .
- Ρεύμα βραχυκύκλωσης (short circuit – SC), όπου το Φ/Β πλαίσιο είναι βραχυκυκλωμένο και το διαρρέον ρεύμα  $I_{sc0}$  είναι το μέγιστο
- Το σημείο μέγιστης παραγωγής MPP( maximum power point) στο οποίο προσφέρεται η μέγιστη ισχύς  $P_{mpp0}$  και αντιστοιχεί στη τάση  $V_{mpp0}$  Και στο ρεύμα  $I_{mpp0}$ .

Οι παράμετροι  $P_{mpp0}$ ,  $I_{mpp0}$ ,  $V_{oc0}$  και  $I_{sc0}$  και γενικά σε όποια παράμετρος υπάρχει το 0 σημαίνει ότι οι τιμές αντιστοιχούν σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (Standard Test Conditions – STC), στις οποίες η ακτινοβολία είναι  $1000 \text{ W/m}^2$ , η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού  $25^\circ\text{C}$  ( $T=298,15 \text{ Kelvin}$ ) και η αέριος μάζα A.M ίση με 1,5. Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα I-V και P-V:



**Σχήμα 3.10** Διάγραμμα I-V με τα χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου



**Σχήμα 3.11** Διάγραμμα P-V με τα χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου

Παρατηρείται ότι  $I_{mp0}$  είναι περίπου ίσο με το  $I_{sc0}$  ενώ το  $V_{mp0}$  περίπου το 80% της  $V_{oc0}$ . Βέβαια, στην πράξη το φωτοβολταϊκό πλαίσιο λειτουργεί σε αυθαίρετες συνθήκες ακτινοβολίας  $G$  και θερμοκρασίας  $T$ , διαφορετικές από τις STC .

### **3.9 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ FILL FACTOR- ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ**

Ένας καθοριστικός παράγοντας στη συνολική συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού είναι ο συντελεστής πλήρωσης (fill factor) ο οποίος αναφέρεται και ως FF. Το FF ορίζεται ως τη μέγιστη ισχύ διαιρούμενο με τη τάση ανοικτοκύκλωσης  $V_{oc}$  και το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ . Ο συντελεστής πλήρωσης fill factor ορίζεται ως:

$$FF = \frac{I_{sc} * V_{oc}}{I_{max} * V_{max}} \quad (3.1)$$

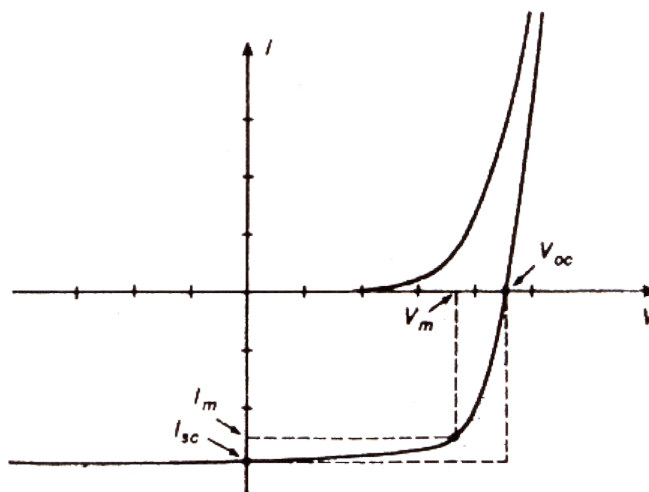
οπού  $I_{sc}$  είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης το  $V_{oc}$  η τάση ανοικτοκύκλωσης . Το  $P_{mpp}$  είναι η μέγιστη ισχύς η οποία ορίζεται ως  $P_{mpp} = I_{mpp} * V_{mpp}$ . Έτσι η εξίσωση για το fill factor γίνεται:

$$FF = \frac{I_{sc} * V_{oc}}{P_{mpp}} \quad (3.2).$$

Για αποτελεσματική ηλιακή ενέργεια στοιχείου η τιμή του  $FF$  πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 0,7. Οι τρεις παραπάνω παράμετροι, δηλαδή ο  $FF$ ,  $I_{sc}$ , και η  $V_{oc}$  είναι τα κυριότερα μεγέθη για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς και της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων και καθορίζουν την απόδοσή τους. Για τον συντελεστή απόδοσης στοιχείων ( $\eta$ ) ισχύει :

$$\eta = \frac{P_{max}}{HA} = \frac{I_{max} V_{max}}{HA} = \frac{FF \cdot I_{sc} V_{oc}}{HA} \quad (3.3)$$

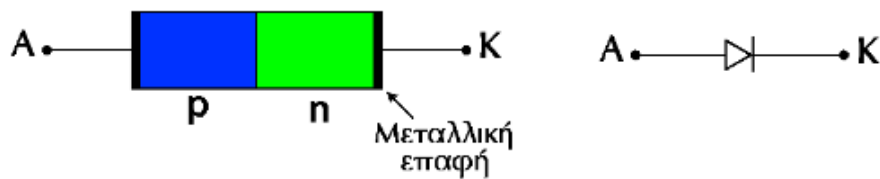
όπου  $H$  είναι η ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται η επιφάνεια του Φ/Β στοιχείου, εμβαδού  $A$ . Όπως βλέπουμε, για την πραγματοποίηση αυξημένων αποδόσεων, επιδιώκεται οι τιμές των  $FF$ ,  $I_{sc}$  και  $V_{oc}$  να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερες. Στο διάγραμμα του Σχήματος 3.5, ο  $FF$  δίνεται από το λόγο του εμβαδού του ορθογώνιου που ορίζεται από τις τιμές  $I_{sc}$  και  $V_{oc}$  του στοιχείου προς το εμβαδόν που ορίζεται από τις τιμές  $V_{mpp}$  και  $I_{mpp}$ .



**Σχήμα 3.12:** Η χαρακτηριστική καμπύλη ενός Φ/Β στοιχείου στο σκοτάδι και στο φως. Διακρίνονται τα δύο ορθογώνια που ο λόγος των εμβαδών τους καθορίζει την τιμή του συντελεστή πλήρωσης  $FF$

### 3.10 ΔΙΟΔΟΣ P-N

Η διόδος p-n υλοποιείται με σύνδεση των άκρων των δύο ημιαγωγικών τμημάτων p και n με μεταλλικές επαφές. Έτσι, προκύπτουν η άνοδος A και η κάθοδος K της διόδου, η οποία στα ηλεκτρικά κυκλώματα συμβολίζεται ως εξής :



**Σχήμα 3.13:**Υλοποίηση και συμβολισμός διόδου p-n.

Ανάλογα με την σύνδεση εξωτερικής πηγής με τα άκρα της διόδου p-n διακρίνουμε δύο είδη πόλωσης την: Ορθή πόλωση (forward bias), όταν ο θετικός πόλος της εξωτερικής πηγής συνδέεται με το τμήμα p της διόδου Ανάστροφη πόλωση(reverse bias), όταν ο θετικός πόλος της εξωτερικής πηγής συνδέεται με το τμήμα n της διόδου. Ως ρεύμα διάχυσης ( $I_f$ ) ορίζεται το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα και σημειώνεται με φορά αντίθετη προς τη φορά κίνησης ηλεκτρονίων.

Αντίστροφο ρεύμα κορεσμού ( $I_o$ ):Είναι το ρεύμα που οφείλεται σε θερμική διέγερση του ημιαγωγού και λαμβάνει πολλή χαμηλή τιμή(της τάξης των  $\mu A$ ) .Το ρεύμα εξωτερικού κυκλώματος διόδου δίνεται από τον τύπο:

$$I_d = I_f - I_o \quad (3.4)$$

Η χαρακτηριστική εξίσωση για τη δίοδο Shockley είναι η εξής:

$$I_d = I_o (e^{qV_d / A * kT} - 1) \quad (3.5).$$

Οπού το k είναι η σταθερά του Boltzmann

$k = 1,3806503 * 10^{-23} J/K$  , q είναι το στοιχειώδες φορτίο του ηλεκτρονίου  $q = 1,60217646 * 10^{-19} Cb$ , T η θερμοκρασία σε Kelvin και  $V_d$  είναι η τάση ανάμεσα στους ακροδέκτες p και n της διόδου και A ο παράγοντας εκπομπής ή ιδεατός παράγοντας(ideality factor). Ο παράγοντας εκπομπής A διαφέρει από 1 μέχρι 2 ανάλογα με τη διαδικασία κατασκευής και το υλικό του ημιαγωγού και σε πολλές περιπτώσεις θεωρείται ότι είναι ίσο περίπου 1 (οπότε παραλείπεται). Αντικαθιστώντας στην παραπάνω εξίσωση για θερμοκρασία  $T = 25 + 273 = 298 K$  και  $A = 1$  η εξίσωση (3.5) γίνεται:

$$I_d = I_o (e^{38,9 V_d} - 1) \quad (3.6).$$

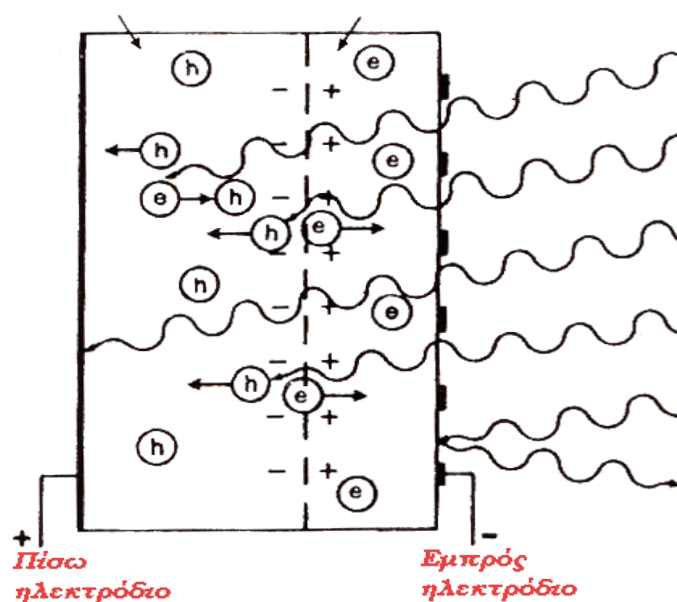
Αν ο παράγοντας εκπομπής είναι ίσος με ένα η εξίσωση 3.5 μετασχηματίζεται ως εξής :

$$I_d = I_o (e^{qV_d/kT} - 1) \quad (3.7)$$

### **3.11 ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ**

Εάν έρθουν σε επαφή δύο κομμάτια πυριτίου τύπου n και τύπου p , το ένα απέναντι από το άλλο , δημιουργείται μια δίοδος ή αλλιώς ένα ηλεκτρικό πεδίο στην επαφή των δύο υλικών το οποίο επιτρέπει την κίνηση ηλεκτρονίων προς μια κατεύθυνση μόνο. Επιπλέον τα ηλεκτρόνια της επαφής n έλκονται από τις οπές τις επαφής p. Αυτό το ζευγάρι των δύο υλικών είναι το δομικό στοιχείο του φωτοβολταϊκού κελιού και η βάση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μία περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές) πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντιθέτου πρόσημου), μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου. Όταν το ηλιακό φως εισέρχεται στο κελί η ενέργεια του ελευθερώνει ηλεκτρόνια και στα δύο στρώματα. Τα ηλεκτρόνια αυτά, γνωστά και ως ελεύθερα ηλεκτρόνια προσπαθούν λόγω των διαφορετικών φορτίσεων των δύο στρωμάτων, να μετακινηθούν από το στρώμα τύπου-n στο στρώμα τύπου-p, αλλά εμποδίζονται από το ηλεκτρικό πεδίο στην επαφή p-n. Ωστόσο, η παρουσία ενός εξωτερικού κυκλώματος δημιουργεί την απαραίτητη διαδρομή για τη μεταφορά ηλεκτρονίων από το στρώμα τύπου-n στο στρώμα τύπου-p. Η ενέργεια των φωτονίων διεγείρει τα ηλεκτρόνια σε μια υψηλότερη ενεργειακή στάθμη , οπότε αυτά κινούνται αφήνοντας πίσω τους μία οπή. Έτσι λοιπόν, από την μία πλευρά θα ελευθερωθούν ηλεκτρόνια, τα πλεονάζοντα, τα οποία με άλματα θα κινηθούν προς την άλλη πλευρά , για να καταλάβουν τα ηλεκτρονικά κενά, δηλαδή τις οπές. Με αυτόν τον τρόπο θα διαπιστώσουμε στην μία περιοχή της διόδου συσσώρευση ηλεκτρονίων δηλαδή αρνητικών φορτίων και στην άλλη περιοχή της διόδου συσσώρευση οπών δηλαδή θετικών φορτίων. Έτσι δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που

διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου. Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Παρακάτω φαίνεται σχηματικά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.



**Σχήμα 3.14:** Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

### **3.12 Η ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΡΕΥΜΑΤΟΣ**

Όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται μια κατάλληλη ακτινοβολία, διεγείρεται ηλεκτρικό ρεύμα, το φωτόρευμα  $I_L$ , που η τιμή του θα είναι ανάλογη προς τα φωτόνια που απορροφά το στοιχείο. Για τη εξασφάλιση για ένα καλό φωτοβολταϊκό στοιχείο απαιτείται η ένωση p-n να βρίσκεται σε κατάλληλη απόσταση από την όψη του στοιχείου και η μέση διάρκεια ζωής των φορέων μειονότητας στον ημιαγωγό από τον οποίο είναι κατασκευασμένο το στοιχείο να είναι αρκετά μεγάλη. Τότε, για την πυκνότητα του φωτορεύματος, ισχύει ικανοποιητικά η σχέση:

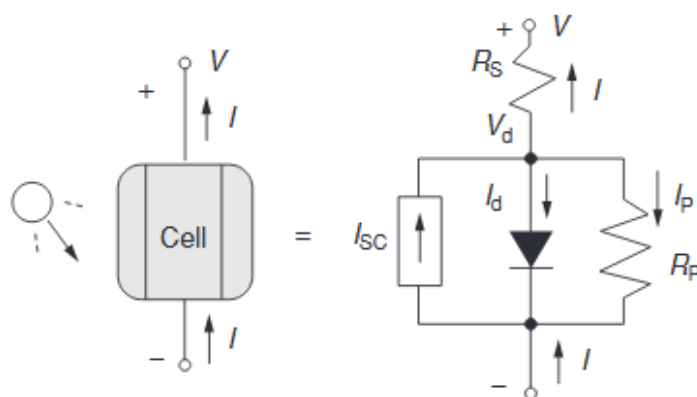


$$I_L = e \cdot g (L_n + L_p) \quad (3.8)$$

όπου  $e$  είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο,  $g$  είναι ο ρυθμός δημιουργίας ζευγών φορέων από τα φωτόνια της ακτινοβολίας (πλήθος ζευγών ηλεκτρονίων-οπών ανά μονάδα χρόνου και μονάδα όγκου του ημιαγωγού), και  $L_n$ ,  $L_p$  είναι τα μέσα μήκη διάχυσης των ηλεκτρονίων και των οπών, αντίστοιχα.

### **3.13 ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ – ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ**

Για να προχωρήσουμε σε μια πρώτη εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου προχωράμε σε μια προσέγγιση όπου περιγράφεται από το απλοποιημένο διάγραμμα του παρακάτω σχήματος:



**Σχήμα 3.15** Ισοδύναμο κύκλωμα για το ηλιακό στοιχείο(solar cell) όπου περιέχει και παράλληλες και σε σειρά αντιστάσεις

Το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 3.15 περιέχει και τις αναπόφευκτες αντιστάσεις  $R_s$  (series resistance) που παρεμβάλλονται στην κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό (κυρίως στο εμπρός επιφανειακό στρώμα του) και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια. Ακόμα, επειδή η αντίσταση διαμέσου της διόδου δεν έχει άπειρη τιμή, λόγω επίσης αναπόφευκτων κατασκευαστικών

ελαττωμάτων γίνονται διαρροές ρεύματος, το ισοδύναμο κύκλωμα περιέχει και την παράλληλη αντίσταση  $R_p$ . Συνήθως, στα φωτοβολταϊκά στοιχεία του εμπορίου η  $R_s$  είναι μικρότερη από 5Ω και η  $R_p$  είναι μεγαλύτερη από 500 Ω. Εκτός από τις αντιστάσεις  $R_s$  και  $R_p$ , ένας άλλος παράγοντας που επιδρά αρνητικά στην απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι η θερμοκρασία τους. Συγκεκριμένα, η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αντίστοιχη αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωσης των φορέων του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται περισσότερες επανασυνδέσεις φορέων. Έτσι, εκδηλώνεται ισχυρό ρεύμα διαρροής διαμέσου της διόδου, που συνεπάγεται με μείωση της  $V_{oc}$  και του  $FF$ . Παράλληλα μειώνεται και η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Σε ένα ιδανικό ηλιακό στοιχείο θεωρείται  $R_s=0$  και  $R_p$  ίσο με άπειρο. Το ρεύμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι η διαφορά μεταξύ του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  και του ρεύματος κορεσμού της διόδου  $I_o$ . Ο τύπος για το ρεύμα  $I$  (σε Ampere) του στοιχείου το οποίο περιέχει και σε σειρά και παράλληλη αντίσταση όπως φαίνεται στη εικόνα 3.15 είναι ο:

$$I = I_{sc} - I_o \left( e^{q(V + IR_s)/kT} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (3.9)$$

Το  $I, V$  είναι το ρεύμα και η τάση της εξόδου αντίστοιχα. Για το ρεύμα  $I_{sc}$  από κανόνα ρεύματος Kirchhoff σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα ισούται με  $I_{sc} = I + I_d + I_p$  (3.10). Το  $R_s$  (series resistance of cell) δίνεται από τον τύπο :

$$R_s = \frac{-dV}{dI} \frac{1}{V_{oc}} - \frac{1}{X_v} \quad \text{Ohm} \quad (3.11) \text{ οπού}$$

$$X_v = I_{oT1} \frac{q}{AkT1} e^{qV_{ocT1}/kT1} \text{Ohm}^{-1} \quad (3.12)$$

οπού  $V_{ocT1}$  είναι η τάση ανοικτοκύκλωσης ανά φωτοβολταϊκό στοιχείο για μία συγκεκριμένη θερμοκρασία  $T1$ .

Ο παράγοντας εκπομπής μπορεί να πάρει τιμή  $A=2$  για κρύσταλλο και τιμή  $A<2$  για άμορφο πυρίτιο. Για ιδανικές διόδους ο παράγοντας εκπομπής παίρνει τιμή ίση με ένα. Ισχύει ότι η θερμική τάση  $V_t$  ορίζεται ως:

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad (3.13) .$$

Σύμφωνα με τον τύπο της θερμικής τάσης η εξίσωση 3.12 μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$X_v = \frac{I_{oT1}}{AV_t} e^{V_{ocT1}/AV_t} \quad (3.14).$$

Το  $R_s$  είναι η σε σειρά αντιστάσεις μέσω των οποίων υπολογίζεται η πτώση τάσης στους ακροδέκτες του κυκλώματος. Το  $R_p$  είναι η παράλληλη αντίσταση που εξηγεί το ρεύμα διαρροής κατά μήκος των πλευρικών

επιφανειών των κυψελών. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση  $V_T = \frac{kT}{q}$  η

εξίσωση 3.9 για το ρεύμα μπορεί να γραφεί και ως εξής:

$$I = I_{sc} - I_0 \left( e^{(V + IR_s)/AV_T} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (3.15).$$

Η τάση για ένα κελί υπολογίζεται από τον τύπο :  $V = V_d - IR_s$ . Άρα  $V_d = V + IR_s$ .

Ισχύει ότι το ρεύμα  $I = I_{sc} - I_d - I_p$  και ισχύει ακόμα ο τύπος:

$$I_d = I_0 (e^{38,9 V_d} - 1) \quad (3.16)$$

οπού αναφέρεται σε θερμοκρασία  $T = 25^\circ\text{C}$  και παράγοντα εκπομπής. Σύμφωνα με το τύπο για το ρεύμα  $I$ , τον τύπο για το  $I_d$  (3.16) και τον τύπο για το  $V_d$  η εξίσωση 3.15 μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$I = I_{sc} - I_0 (e^{38,9 V_d} - 1) - \frac{V_d}{R_p} \quad (3.17).$$

Η τάση του πλαισίου το οποίο αποτελείται από  $N_s$  κελιά τα οποία βρίσκονται σε σειρά είναι ίση με :

$$V_{module} = N_s (V_d - IR_s) \quad (3.18)$$

Το ρεύμα κορεσμού της διόδου δίνεται από τον τύπο :

$$I_0 = I_{oT1} \left( \frac{T}{T1} \right)^{3/A} e^{q * V_g / A k (1/T - 1/T1)} \quad (3.19)$$

Για το  $b$  (σε Kelvin) ισχύει ότι:

$$b = \frac{V_g}{A k} \quad (3.20)$$

Άρα η εξίσωση για το  $I_0$  μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$I_0 = I_{oT1} \left( \frac{T}{T1} \right)^{3/A} e^{-b(1/T - 1/T1)} \quad (3.21) .$$

Το  $I_{oT1}$  δίνεται από τον εξής τύπο:

$$I_{oT1} = \frac{I_{sc} T1}{e^{\frac{V_{oc} T1}{AV_T}} - 1} \quad (3.22).$$

Ισχύει ότι  $V_T = \frac{kT}{q}$  επομένως η εξίσωση (3.19) μπορεί να γραφτεί και ως εξής

$$I_{oT1} = \frac{I_{sc} T1}{e^{\frac{V_{oc} T1 * q}{A k T}} - 1} \quad (3.23)$$

Το  $I_{sc} T1$  είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης για μία συγκεκριμένη θερμοκρασία.

### 3.14 ΕΚΤΙΜΗΣΗ Rs ΚΑΙ Rp

Πολλές είναι οι μέθοδοι που έχουν προταθεί για τον υπολογισμό των  $R_p$  και  $R_s$ . Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία περιγράφεται παρακάτω. Για το υπολογισμό του  $R_p$  θεωρήθηκε η αντίσταση  $R_s$  ίση με 0. Για το  $R_{mpp}$  ισχύει ότι:

$$R_{p_{mpp}} = \frac{V_{mpp}}{I_{sc} - I_{mpp} - I_o * (e^{\frac{V_{mpp}}{N_s * A * V_T}} - 1)} \quad (3.24)$$

Η τιμή του  $R_p$  μειώνεται έως ότου γίνει ίση με τη τιμή της  $R_{p_{mpp}}$  στο . Αυτή η παρατήρηση οδηγεί σε μια μαθηματική λειτουργία που απαιτεί το συνδυασμό των τύπων  $R_{p_{Est}}$  και  $R_{p_{mpp}}$  για το δυναμικό υπολογισμό του  $R_p$ . Για τον δυναμικό υπολογισμό του  $R_{p_{mpp}}$  χρησιμοποιούμε τον τύπο:

$$R_{p_{model}} = \frac{R_{p_{Est}} * (V_{mpp} - V) + R_{p_{mpp}} * V_{mpp}}{(V_{mpp} - V) + V_{mpp}} \quad (3.25)$$

Χρησιμοποιώντας τον παραπάνω τύπο και αντικαθιστώντας το  $R_{p_{mpp}}$  με τη εξίσωση 3.25 και χρησιμοποιώντας τη εξίσωση  $R_{p_{Est}} = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} * 100$  προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$R_{p_{model}} = - \left[ \left( \frac{V_{oc}}{I_{sc}} * 100 \right) * (V_{mpp} - V) + \frac{V_{mpp}}{I_{sc} - I_{mpp} - I_o * e^{\frac{V_{mpp}}{N_s * A * V_T}} - 1} * V_{mpp} \right] / [(V_{mpp} - V) + V_{mpp}] \quad (3.26)$$

Για να υπολογίσουμε την τιμή της  $R_s$  θεωρείται ότι η αντίσταση  $R_p$  έχει άπειρη τιμή. Η εξίσωση για τη τιμή της  $R_s$  είναι η εξής

$$R_s = \frac{N_s * A * V_T \ln \left( \frac{I_{sc} - I}{I_o} + 1 \right) - V}{I} \quad (3.27)$$

Η παραπάνω εξίσωση 3.27 μπορεί να μετασχηματιστεί στη εξίσωση 3.28 προκειμένου να υπολογιστεί η τιμή  $R_s$  στο σημείο μέγιστης λειτουργίας  $Mpp$ .

$$R_{s_{mpp}} = \frac{N_s * A * V_t \ln\left(\frac{I_{sc} - I_{mpp}}{I_o} + 1\right) - V_{mpp}}{I_{mpp}} \quad (3.28)$$

Κατά τη μετάβαση της  $R_s$  από το  $MPP$  στο  $V_{oc}$ , η τιμή της θα πρέπει να μειωθεί και τελικά να γίνει μηδέν στο σημείο  $V_{oc}$ . Λόγω του ότι το  $R_s$  είναι μηδέν στο σημείο ανοικτοκύκλωσης  $V_{oc}$ , η τιμή  $R_s$  πρέπει να γίνει δυναμική από σταθερή. Έτσι η εξίσωση 3.28 χρησιμοποιώντας τον παράγοντα  $V_{mpp} / V$  γίνεται ως εξής:

$$R_{s_{model}} = \frac{N_s * A * V_t \ln\left(\frac{I_{sc} - I_{mpp}}{I_o} + 1\right) - V_{mpp}}{I_{mpp}} * \frac{V_{mpp}}{V} \quad (3.29).$$

Όταν  $V = V_{mpp}$  τότε η 3.29 γίνεται ίδια με τη 3.28.

Οι πληροφορίες που δίνονται στο φύλλο δεδομένων (datasheet) κάθε φωτοβολταϊκού είναι οι ακόλουθες:

- Πρότυπες συνθήκες λειτουργίας (Standard Operating Conditions):  
με  $T_n = 25^\circ\text{C}$  καθώς και  $G_n = 1000 \text{ W/m}^2$
- $I_{sc}$  ρεύμα βραχυκύκλωσης στις πρότυπες συνθήκες λειτουργίας
- $V_{oc}$  τάση ανοικτοκύκλωσης στις πρότυπες συνθήκες λειτουργίας
- $I_{mpp}$ : ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος, στις πρότυπες συνθήκες λειτουργίας
- $V_{mpp}$ : τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος, στις πρότυπες συνθήκες λειτουργίας
- $K_V$ : θερμοκρασιακός συντελεστής τάσης ανοιχτοκύκλωσης (temperature coefficient of  $V_{oc}$ )
- $K_I$ : θερμοκρασιακός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης (temperature coefficient of  $I_{sc}$ )
- $P_{mpp}$ : η πειραματικά μετρημένη μέγιστη τιμή της ισχύος στις πρότυπες συνθήκες λειτουργίας
- $V_T$  θερμική τάση
- $I_o$  ρεύμα κορεσμού
- $I, V$  είναι το ρεύμα και η τάση της εξόδου αντίστοιχα.

Η αντίσταση  $R_s$  ενός κελιού προκειμένου να έχει απώλειες κάτω από 1% πρέπει να ισχύει :

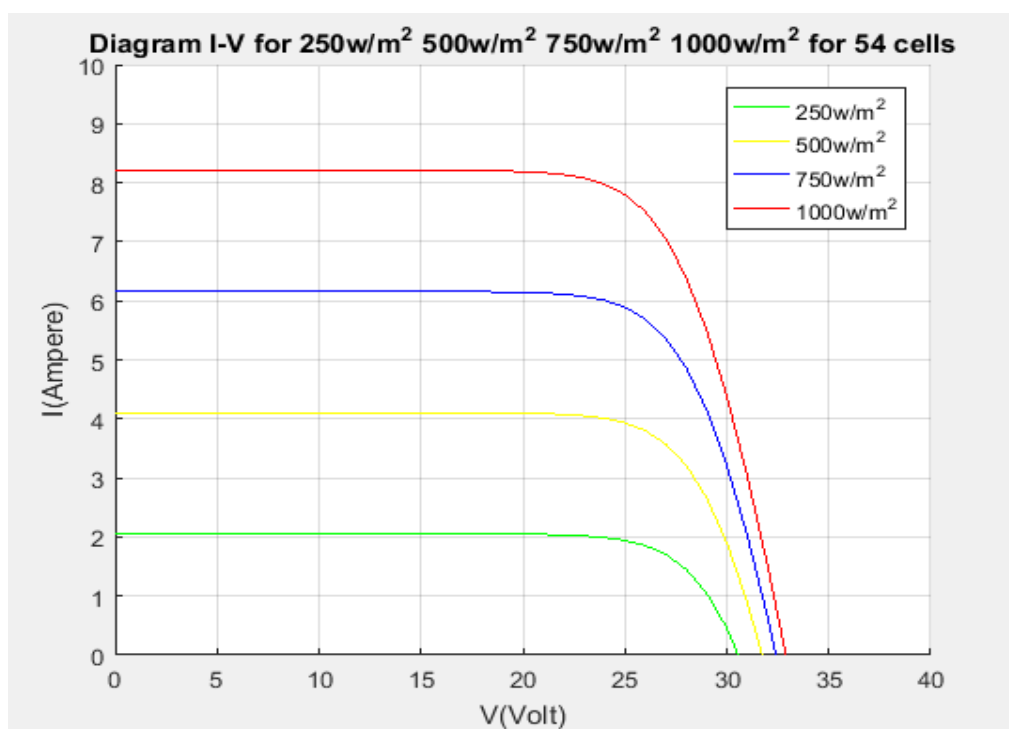
$$R_s < \frac{0,01 V_{oc}}{I_{sc}} \quad (3.30)$$

Και για την αντίσταση  $R_p$  ενός κελιού προκειμένου να έχει απώλειες κάτω από 1% πρέπει να ισχύει :

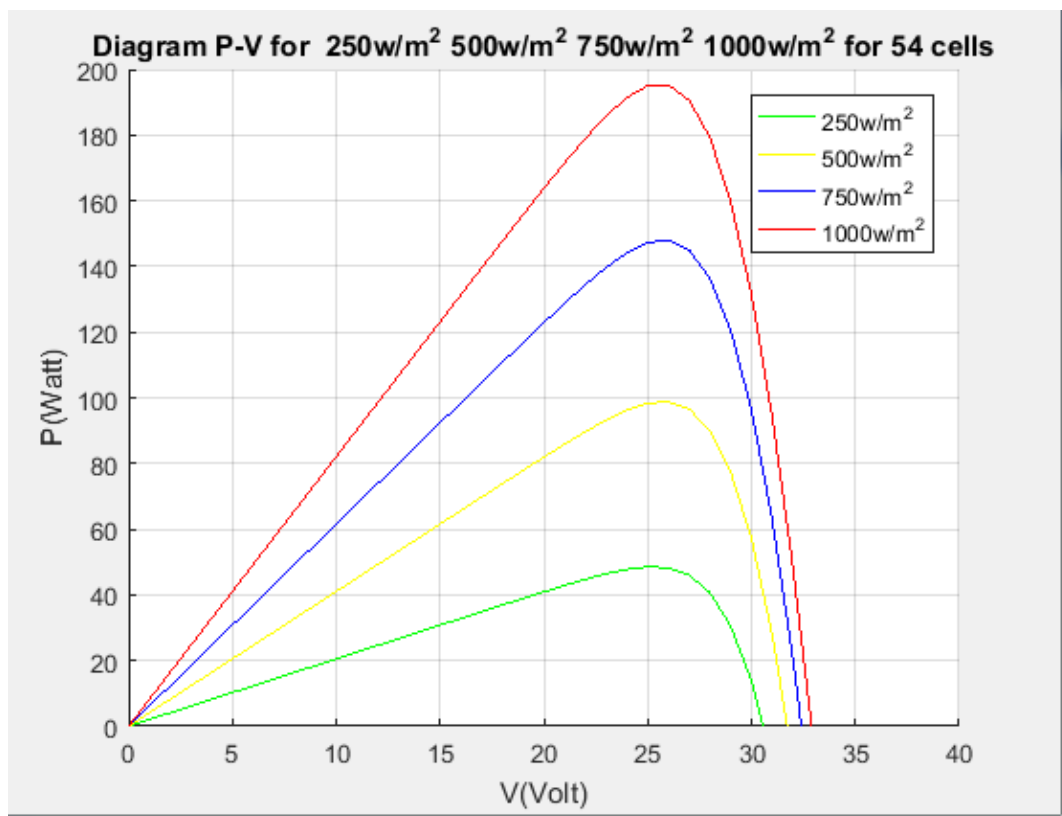
$$R_p > \frac{100 V_{oc}}{I_{sc}} \quad (3.31)$$

### **3.15 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΝΤΑΣΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Οι δύο βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή ενέργειας από ένα ηλιακό κελί είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η θερμοκρασία. Με την αύξηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας παρατηρείται σχεδόν ανάλογη αύξηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης του κελιού ενώ η τάση ανοικτού κυκλώματος αυξάνει λίγο. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η σχεδόν αναλογική σχέση ανάμεσα στην ισχύ του κελιού και στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, για σταθερές θερμοκρασίες κελιού. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα I-V, P-V για διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας.

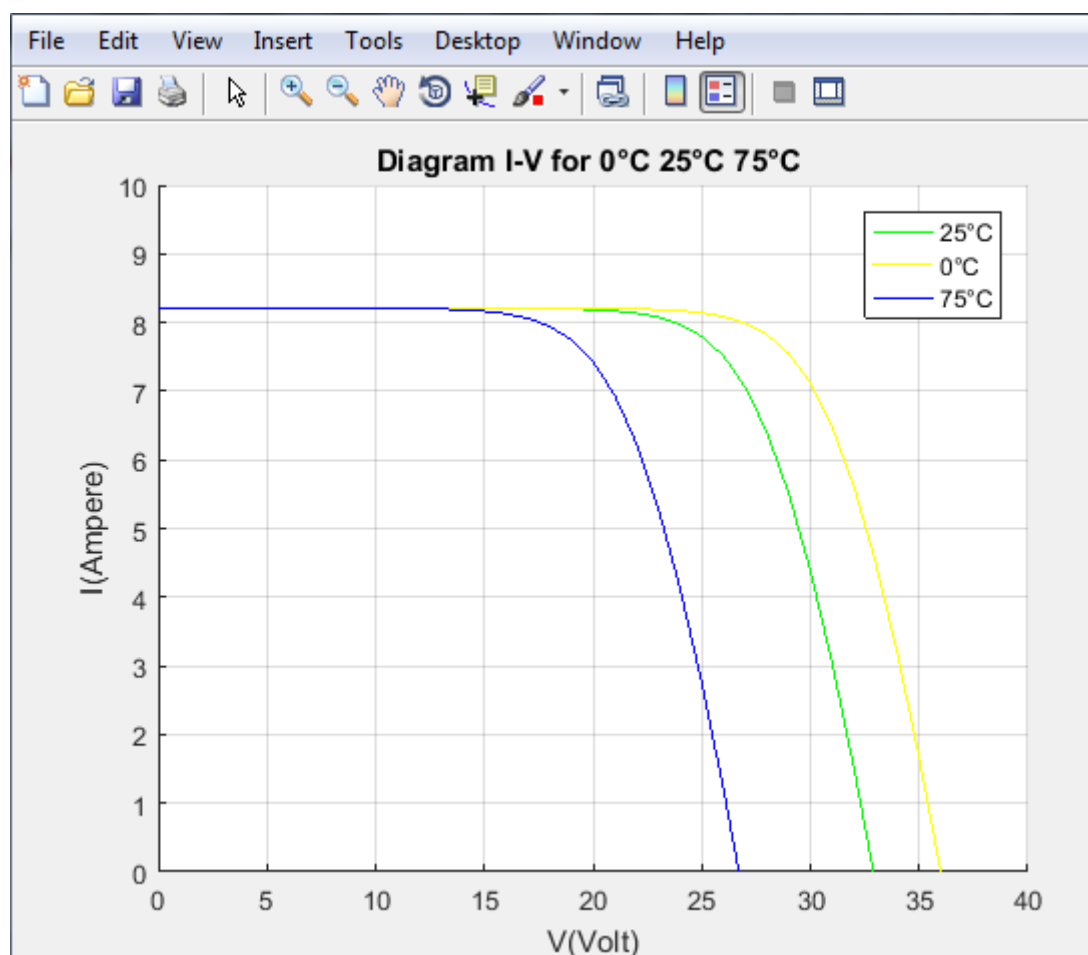


**Σχήμα 3.16** Διάγραμμα I-V για διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας και σταθερή θερμοκρασία για φωτοβολταϊκό πλαίσιο 54 φωτοβολταϊκών στοιχείων



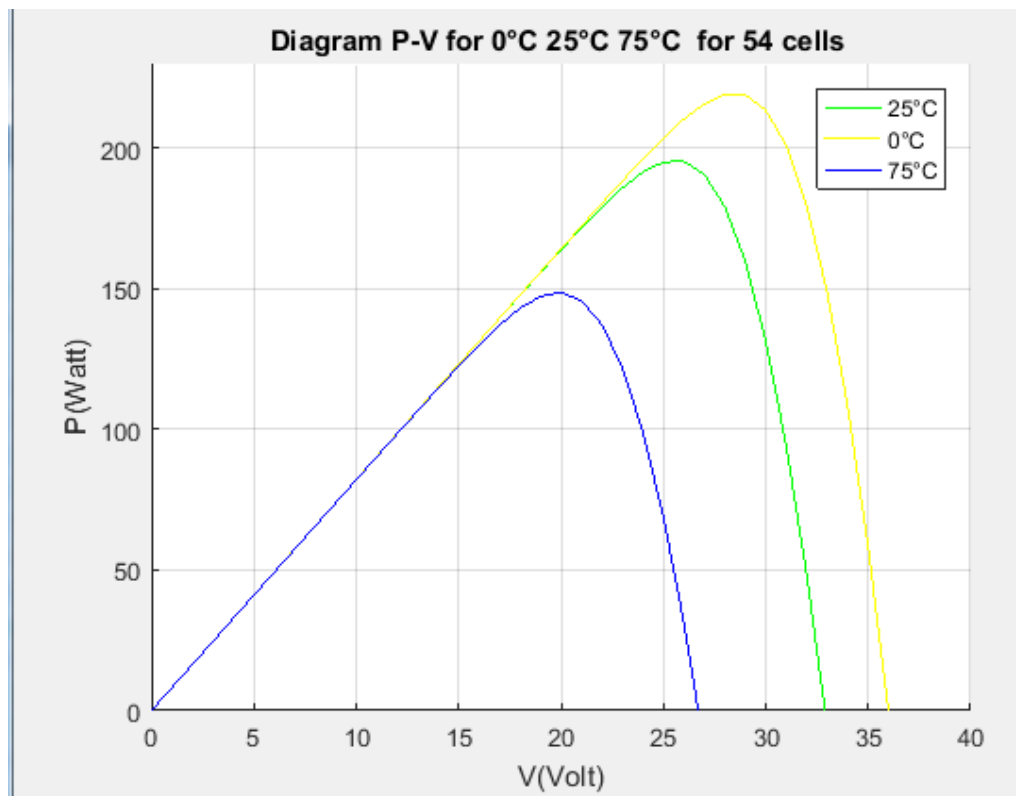
**Σχήμα 3.17** Διάγραμμα P-V για διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας και σταθερή θερμοκρασία για φωτοβολταϊκό πλαίσιο 54 φωτοβολταϊκών στοιχείων

Η αύξηση της θερμοκρασίας επιδρά κυρίως στη τάση του ηλιακού κελιού. Η τάση ανοικτού κυκλώματος αυξάνεται σημαντικά με τη μείωση της θερμοκρασίας ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης μειώνεται ελαφρά. Συνεπώς η ισχύς του ηλιακού κελιού αυξάνεται με την μείωση της θερμοκρασίας. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα P-V, I-V για διαφορετικές θερμοκρασίες και σταθερής έντασης ακτινοβολίας ίσης με  $1000\text{W/m}^2$  (1 Sun) και με δεδομένο ότι το φωτοβολταϊκό πλαίσιο έχει 54 φωτοβολταϊκά στοιχεία.



**Σχήμα 3.18** Διάγραμμα I-V για διαφορετικές θερμοκρασίες και σταθερή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας για φωτοβολταϊκό πλαίσιο 54 φωτοβολταϊκών στοιχείων



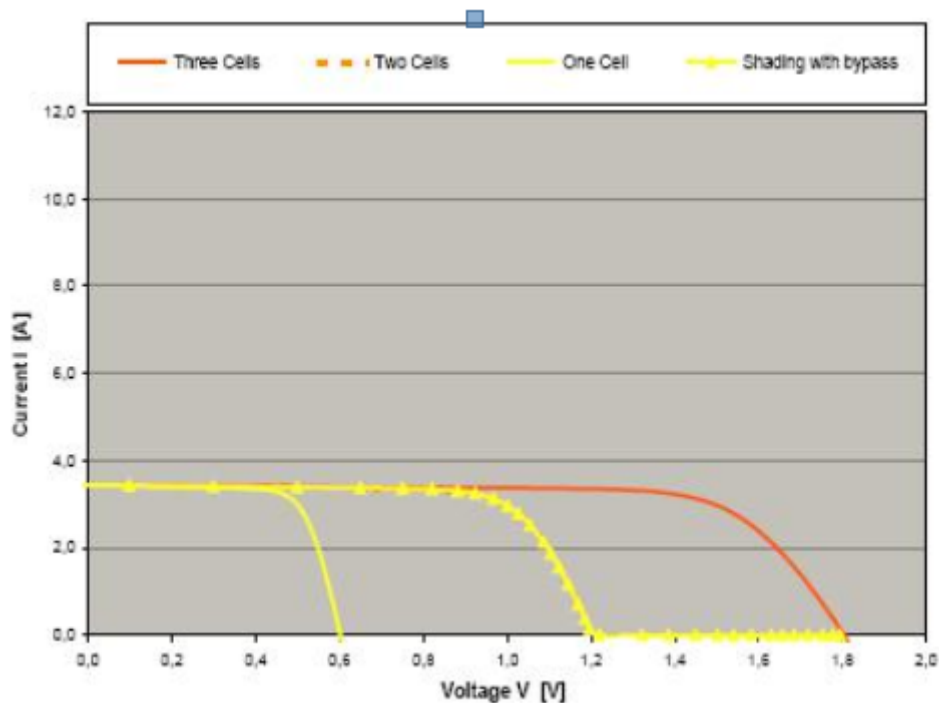


**Σχήμα 3.19** Διάγραμμα P-V για διαφορετικές θερμοκρασίες και σταθερή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας για φωτοβολταϊκό πλαίσιο 54 φωτοβολταϊκών στοιχείων

## 4.ΣΚΙΑΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΣΚΙΑΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

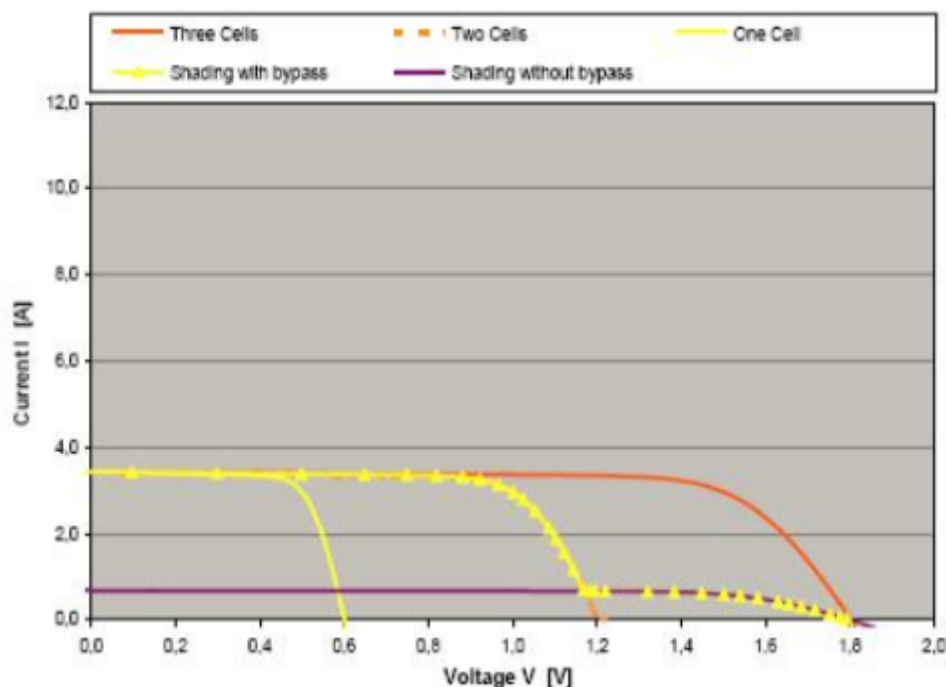
Στην ιδανική περίπτωση, οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες πρέπει να εγκαθίστανται σε μια θέση χωρίς σκίαση. Ωστόσο κάποιες φορές η σκίαση είναι αναπόφευκτη. Η σκίαση μπορεί να μειώσει σημαντικά την έξοδο μιας φωτοβολταϊκής γεννήτριας και κατά προτίμηση πρέπει να αποφευχθεί. Η σκίαση προκύπτει λόγω της έλλειψης ηλιακού φωτός και ανάγεται σε μερική ή ολική σκίαση ανάλογα με τη μερική ή ολική απώλεια δημιουργίας φωτορεύματος. Εάν υπάρχει ολική σκίαση ενός κελιού και υποθέσουμε ότι έχουμε σύνδεση 3 κελιών σε σειρά τότε η παραγωγή ρεύματος από το κελί θα είναι μηδενική και θα συμπεριφέρεται σαν ανοιχτό κύκλωμα. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα να μηδενιστεί η συνολική παραγωγή ηλιακής ενέργειας. Για να αποφευχθεί αυτό χρησιμοποιούνται δίοδοι παράκαμψης που συνδέονται αντιπαράλληλα προς τα ηλιακά κελιά(δηλαδή το τερματικό ανόδου της διόδου συνδέεται με την θετική πλευρά του στοιχείου ενώ το τερματικό της καθόδου συνδέεται με τη αρνητική πλευρά της διόδου). Σε κανονικές συνθήκες οι δίοδοι αυτοί είναι πολωμένες ανάστροφα και δεν επιδρούν στην παραγωγή ενέργειας. Ωστόσο, όταν ένα κελί σκιαστεί πλήρως, τότε το ρεύμα των υπόλοιπων ηλιακών κελιών ρέει διαμέσου της διόδου αυτής, η οποία πολώνεται ορθά, διατηρώντας έτσι τη ροή ενέργειας. Σε αντίθεση αν δε χρησιμοποιηθεί δίοδος παράκαμψης σε περίπτωση πλήρους σκίασης ενός κελιού θα έχω μηδενική παραγωγή ρεύματος και έτσι θα έχουμε και μηδενική παραγωγή ηλιακής ενέργειας στο κύκλωμα. Το διάγραμμα I-V στη περίπτωση σε σειρά 3 κελιών με ένα πλήρως σκιασμένο κελί εμφανίζεται παρακάτω.



**Σχήμα 4.1** Το διάγραμμα τριών κελιών σε σειρά με ένα κελί πλήρως σκιασμένο

Σε περίπτωση μερικής σκίασης κελιού τότε υπάρχει μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας περίπου 20% σε σχέση με τα υπόλοιπα κελιά. Άρα το συγκεκριμένο κελί θα παράγει το 20% του ρεύματος ενώ τα άλλα κελιά το 100%. Λόγω της σύνδεσης σε σειρά στο κύκλωμα θα ρέει το ρεύμα του μερικώς σκιασμένου κελιού. Στο μερικώς σκιασμένο κελί υφίσταται απώλεια ενέργειας καθώς η διόδος του θα είναι ανάστροφα πολωμένη σε σχέση με την τάση που παράγεται στα άλλα κελιά. Αυτό δημιουργεί θερμά σημεία (hot spots) τα οποία προκαλούν γρηγορότερη γήρανση του πάνελ. Αυτό αποφεύγεται με διόδους παράκαμψης. Αναφορικά με τα κελιά που δεν σκιάζονται το υπόλοιπο ρεύμα τους (δηλαδή το υπόλοιπο 80%) θα ρέει εσωτερικά σε αυτά, στις ενδογενείς διόδους τους. Στην περίπτωση αυτή, η διαφορά των ρευμάτων μεταξύ των κελιών που δεν σκιάζονται και του

μερικώς σκιασμένο κελιού ρέει διαμέσου της διόδου παράκαμψης. Δηλαδή στη περίπτωση μερικής σκίασης διαπερνά το 20% του ρεύματος από τη δίοδο παράκαμψης του μερικώς σκιασμένου κελιού και το 80% του ρεύματος διαπερνά από τις ενδογενείς διόδους των κελιών που δε σκιάζονται. Το διάγραμμα I-V για σε σειρά 3 κελιών με ένα κελί μερικώς σκιασμένο δίνεται στο παρακάτω σχήμα:

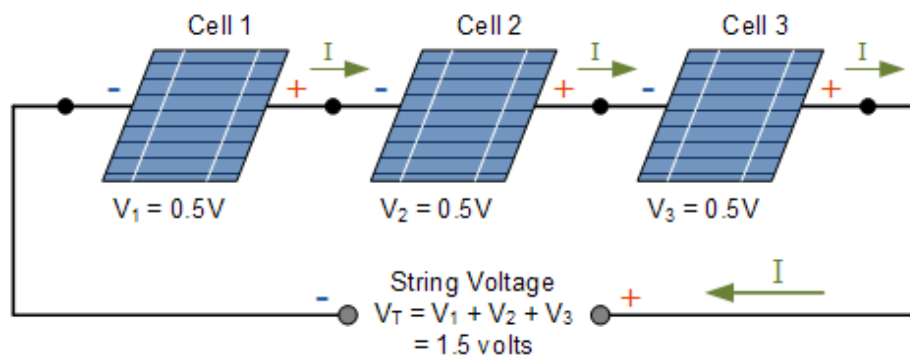


**Σχήμα 4.2** Το διάγραμμα I-V για σε σειρά 3 κελιών με ένα κελί μερικώς σκιασμένο

Άρα το πλεονέκτημα της χρήσης διόδων παράκαμψης τόσο σε πλήρεις σκιασμένα κελιά όσο και σε μερικώς σκιασμένα κελιά είναι ότι επιτρέπουν τη ροή ρεύματος από ένα φωτοβολταϊκό πάνελ. Σε περίπτωση μη χρήσης τους υπάρχει μειωμένη συνολική παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον οι διόδους παράκαμψης δεν προκαλούν απώλειες σε κανονικές συνθήκες όταν δεν διαρρέονται από ρεύμα. Το μειονέκτημα της χρήσης των διόδων παράκαμψης είναι το μεγάλο κόστος και για αυτό χρησιμοποιείται συνήθως μία δίοδος ανά δέκα κελιά.

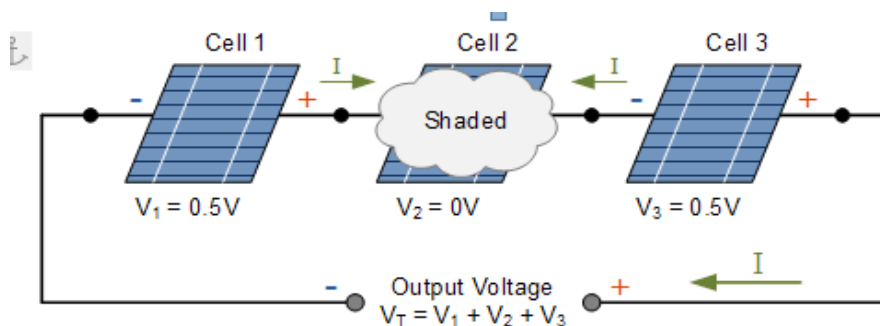
## 4.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΡΙΩΝ ΔΙΟΔΩΝ ΠΑΡΑΚΑΜΨΗΣ ΓΙΑ ΠΛΑΙΣΙΟ ΜΕ ΤΡΙΑ ΚΕΛΙΑ

Στο παράδειγμα μας έχουμε ένα ηλιακό πλαίσιο 3 στοιχείων των 0,5 Volt το καθένα και ηλιακής ακτινοβολίας  $1\text{ kW} / \text{m}^2$  όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



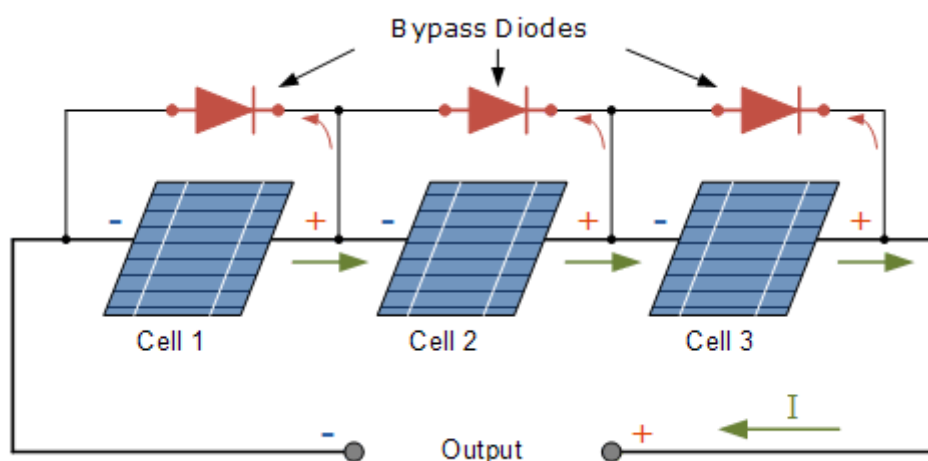
**Σχήμα 4.3** Φωτοβολταϊκό πάνελ τριών στοιχείων

Έστω ότι το ρεύμα που διαπερνά από το κάθε κελί είναι  $I=4\text{ A}$ . Τότε η συνολική ισχύς του πλαισίου είναι ίση με  $(0,5\text{ V}+0,5\text{ V}+0,5\text{ V}=1,5\text{ V}$   $1,5\text{ V} \cdot 4\text{ A}=6\text{ W}$ ) όπου 0,5V είναι η τάση κάθε φωτοβολταϊκού στοιχείου. Παρακάτω φαίνεται φωτοβολταϊκό πάνελ τριών στοιχείων το οποίο το δεύτερο βρίσκεται σε σκίαση.



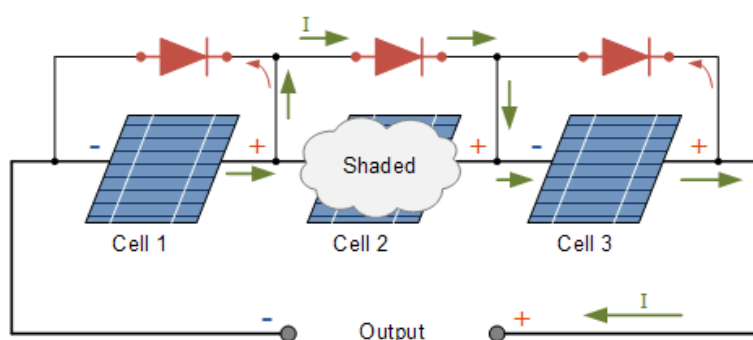
**Σχήμα 4.4** :Φωτοβολταϊκό πάνελ τριών στοιχείων με το δεύτερο στοιχείο σε σκίαση

Αυτό που συμβαίνει στο παραπάνω σχήμα είναι ότι το σκιασμένο κύτταρο σταματά να παράγει ηλεκτρική ενέργεια και συμπεριφέρεται περισσότερο σαν μια ημιαγωγική αντίσταση. Επομένως, ένα πλήρως σκιασμένο κύτταρο θα παρουσιάσει αντίστροφη πτώση τάσης υπό οποιεσδήποτε τρέχουσες συνθήκες και επομένως ή θα καταστρέφει φωτοβολταϊκά στοιχεία ή θα καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια αντί να την παράγει. Ένας τρόπος για να προστατέψουμε τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι να συνδέσουμε αντιπαραλλήλα( δηλαδή το τερματικό ανόδου της διόδου συνδέεται με την θετική πλευρά του στοιχείου ενώ το τερματικό της καθόδου συνδέεται με τη αρνητική πλευρά της διόδου) κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο με μία δίοδο παράκαμψης. Η παραπάνω υλοποίηση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 4.5** Φωτοβολταϊκό πάνελ τριών στοιχείων με διόδους παράκαμψης σε περίπτωση μη σκίασης

Σε περίπτωση που και τα τρία κελιά δεν είναι σκιασμένα καθώς και κάθε μια από τους διόδους παράκαμψης είναι ανάστροφα πολωμένες το ανάστροφο ρεύμα που προσπαθεί να ρέει διαμέσου των διόδων αποκλείεται. Έτσι οι διόδους παράκαμψης είναι σαν να μη υπάρχουν και τα τρία ηλιακά στοιχεία λειτουργούν όπως αναμένεται. Στη περίπτωση μερικής ή ολικής σκίασης του δεύτερου κατά σειρά στοιχείου η αντίστοιχη δίοδος παράκαμψης του αναλαμβάνει δράση. Το κύτταρο 2 σταματά να παράγει ηλεκτρική ενέργεια και συμπεριφέρεται σαν ημιαγωγική αντίσταση. Λόγω της ανάστροφης ισχύος η δεύτερη δίοδος παράκαμψης πολώνεται θετικά(λειτουργία on) και η ροή του ρεύματος εκτρέπεται όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα με το πράσινο χρώμα.



**Σχήμα 4.6** Φωτοβολταϊκό πάνελ τριών στοιχείων με διόδους παράκαμψης σε περίπτωση σκίασης του δεύτερου φωτοβολταϊκού στοιχείου

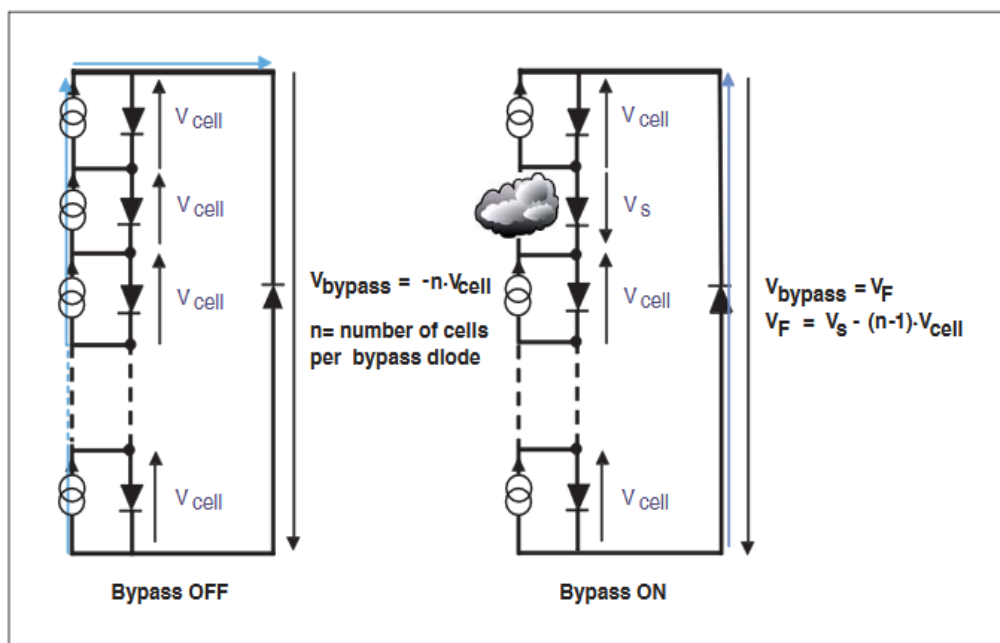
Στη συνέχεια τα στοιχεία ένα και τρία συνεχίζουν να παράγουν ενέργεια αλλά με μειωμένη ισχύ. Η παραγόμενη ισχύς αμελώντας τις απώλειες της διόδου παράκαμψης θα είναι ίση με  $1\text{ V} * 4\text{ A} = 4\text{ W}$ . (Από  $6\text{ W}$  όταν δε είχα σκίαση).

Η ενσωμάτωση μιας διόδου παράκαμψης σε κάθε ξεχωριστό κελί θα ήταν πολύ δαπανηρή και όχι τόσο εύκολη στην εγκατάσταση. Α Έτσι για παράδειγμα, δύο διόδους παράκαμψης θα ήταν επαρκείς για ένα ηλιακό πάνελ με ονομαστική ισχύ περίπου  $50\text{ Watt}$  που περιέχει μεταξύ 36 και 40 μεμονωμένων κυψελών. Ο πιο συνηθισμένος τύπος διόδου παράκαμψης που χρησιμοποιείται είναι η διάδος Schottky με ονομαστικό ρεύμα που κυμαίνεται από 1 έως 60 Ampere και τάση μέχρι 45 Volts, η οποία είναι αρκετή για ένα ηλιακό πάνελ που φορτίζεται από μπαταρία 12V ή 24V.

Μια συνηθισμένη διάδος παράκαμψης, όταν την διαπερνά ρεύμα έχει πτώση τάσης  $0.6\text{ V}$ . Οι ειδικές διόδους Schottky έχουν πτώση τάσης μόνο μερικά δέκατα του Volt.

#### 4.3 ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΧΕΙΩΝ ΑΝΑ ΔΙΟΔΟ ΠΑΡΑΚΑΜΨΗΣ

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η τιμή της τάσης στα άκρα της διόδου παράκαμψης για περίπτωση σκίασης και μη σκίασης.



**Σχήμα 4.7** Τάση διόδου παράκαμψης για περίπτωση μη σκίασης και σκίασης

Το  $n$  είναι ο αριθμός των κελιών ανά δίοδο παράκαμψης. Ο μέγιστος αριθμός φωτοβολταϊκών κελιών ανά δίοδο παράκαμψης εξαρτάται άμεσα από τη τάση διάσπασης  $V_c$ . Το εύρος τάσης διάσπασης για πολυ-πυριτικά κελιά κυμαίνεται από 12V έως 20V. Για κελιά μονοπυριτίου η τάση διάσπασης κυμαίνεται μέχρι 30V. Για αποδοτική λειτουργία της διόδου παράκαμψης πρέπει να τηρούνται οι εξής δύο προϋποθέσεις: Η δίοδος παράκαμψης πρέπει να εφαρμόζεται όταν σκιάζεται ένα στοιχείο. Η τάση  $V_s$  του σκιασμένου στοιχείου πρέπει να είναι κάτω από την τάση διάσπασης  $V_c$ . Ο μέγιστος αριθμός φωτοβολταϊκών στοιχείων ανά δίοδο παράκαμψης υπολογίζεται σύμφωνα με τον εξής τύπο:

$$V_{bypass} = V_s - (n - 1) \cdot V_{cell} \quad (4.1).$$



Πρέπει όμως η τάση  $V_s$  να είναι μικρότερη από τη τάση του κελιού  $V_{cell}$  δηλαδή πρέπει να ισχύει:

$$V_s < V_{cell} (4.2)$$

και έστω η τάση κελιού

$$V_{cell} = 0,5 (4.3) \text{ και}$$

$$V_{bypass} = V_f (4.4).$$

Η εξίσωση 4.1 χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 4.2, 4.3, 4.4 γίνεται ως εξής:

$$V_f < V_c - (n_{max} - 1) * 0,5 (4.5).$$

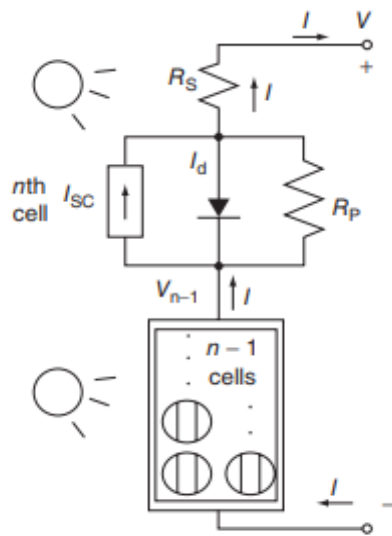
Άρα σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει ότι:

$$n_{max} < \frac{V_c - V_f}{0,5} + 1 (4.6).$$

Για πολυ-πυριτικά στοιχεία με τάση διάσπασης  $V_c = 12V$  και για  $V_f = 0,5V$  τότε ο μέγιστος αριθμός κελιών ανά δίοδο παράκαμψης είναι  $n_{max} = 24$

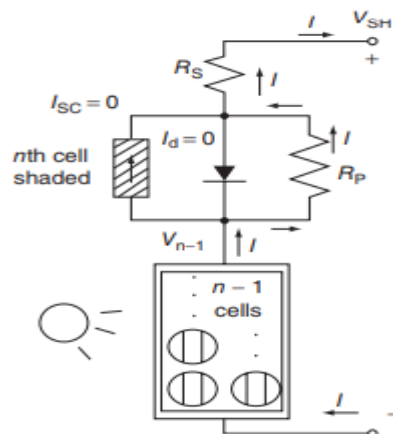
## **4.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΚΙΑΣΗΣ ΣΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ**

Τα ηλιακά θερμικά συστήματα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε σκιάσεις. Ακόμα και μόλις ένα σκιασμένο κελί μπορεί να μειώσει δραματικά την έξοδο όλου του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Έστω ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο το οποίο αποτελείται από  $n$  φωτοβολταϊκά στοιχεία με έξοδο το ρεύμα  $I$ , και τη τάση  $V$ . Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται όλα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία να είναι στο ήλιο και επειδή είναι σε σειρά τα διασχίζει το ίδιο ρεύμα  $I$ .



**Σχήμα 4.8** Φωτοβολταϊκό πλαίσιο με  $n$  στοιχεία σε ήλιο και σε σειρά

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το πιο πάνω φωτοβολταϊκό στοιχείο (top cell) να είναι σκιασμένο και τα υπόλοιπα  $n-1$  στοιχεία να είναι σε σειρά και χωρίς σκίαση. (Μπορεί οποιοδήποτε στοιχείο να είναι σκιασμένο αλλά στο σχήμα φαίνεται να είναι το πιο πάνω σκιασμένο). Επειδή το πιο πάνω στοιχείο είναι σκιασμένο το ρεύμα  $I_{sc}$  που το διαπερνάει είναι μηδέν.



**Σχήμα 4.9** Φωτοβολταϊκό πλαίσιο με  $n$  στοιχεία στα οποία το πιο πάνω είναι πλήρως σκιασμένο.

Η πτώση τάσης στη αντίσταση  $R_p$  προκαλεί ανάστροφη πόλωση στη δίοδο και έτσι το ρεύμα της διόδου ( $I_d$ ) γίνεται 0. Αυτό συνεπάγεται ότι το πιο πάνω στοιχείο αντί να προσθέτει τάση στο κύκλωμα τη μειώνει. Η τάση  $V_{sh}$  για το πρώτο σχήμα(4.9) σύμφωνα με το νόμο τάσεων του Kirchhoff ισούται με:

$$V_{sh} = V_{n-1} - I(R_p + R_s) \quad (4.7).$$

Εφόσον όλα τα στοιχεία είναι σε ήλιο και το ρεύμα είναι  $I$  τότε η τάση των  $n-1$  κελιών ισούται με

$$V_{n-1} = \left(\frac{n-1}{n}\right) * V \quad (4.8).$$

Με βάση την εξίσωση 4.7 και 4.8 προκύπτει ότι :

$$V_{sh} = \left(\frac{n-1}{n}\right) * V - I * (R_p + R_s) \quad (4.9).$$

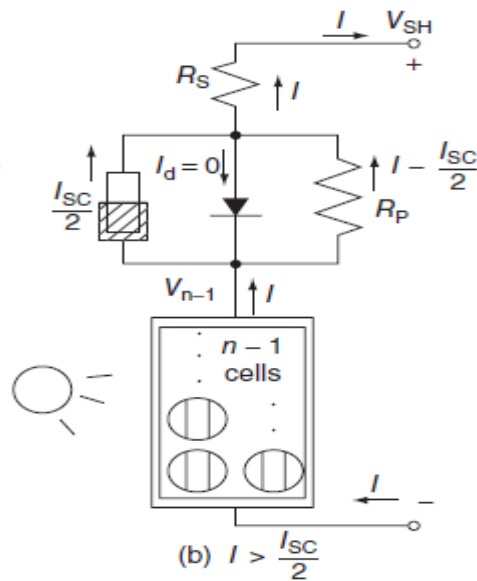
Η πτώση τάσης  $\Delta V$  που προκαλείται από κάθε σκιασμένο κελί είναι:

$$\Delta V = V - V_{sh} = V - \left(1 - \frac{1}{n}\right) V + I(R_p + R_s) \quad (4.10).$$

Επειδή όμως το  $R_p$  είναι αρκετά μεγαλύτερης τάξης μεγέθους από την αντίσταση  $R_s$  η  $R_s$  θεωρείται αμελητέα. Έτσι ο τύπος 4.10 μετασχηματίζεται ως :

$$\Delta V = V - V_{sh} = V - \left(1 - \frac{1}{n}\right) V + IR_p = \frac{V}{n} + IR_p \quad (4.11).$$

Σε περίπτωση σκίασης 50% στο πιο πάνω κελί διακρίνουμε δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Εάν το  $I$  είναι μεγαλύτερο από το  $I_{sc}/2$  τότε η δίοδος πολώνεται ανάστροφα με αποτέλεσμα το ρεύμα της διόδου  $I_d$  να γίνεται 0. Η παραπάνω περίπτωση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 4.10** Φωτοβολταϊκό πλαίσιο με  $n$  στοιχεία στο οποίο το πιο πάνω είναι σκιασμένο κατά 50% και  $I > I_{sc}/2$ .

Εάν το  $I$  είναι μεγαλύτερο από το  $I_{sc}/2$  τότε ισχύει ότι:

$$\Delta V = \frac{V}{n} + \left(I - \frac{I_{sc}}{2}\right) R_p \quad (4.12).$$

Η τάση  $V_{sh}$  ισούται με:

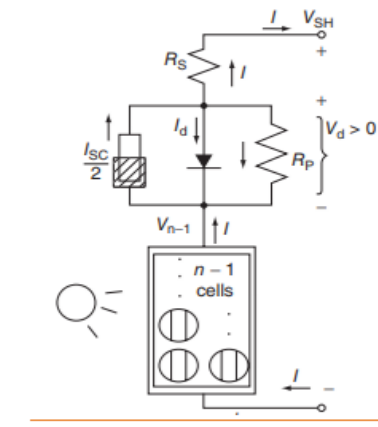
$$\begin{aligned} V_{sh} &= V - \Delta V = V - \left(\frac{V}{n} + \left(I - \frac{I_{sc}}{2}\right) R_p\right) = \frac{Vn - V}{n} - \left(I - \frac{I_{sc}}{2}\right) R_p = V \frac{n-1}{n} - \left(I - \frac{I_{sc}}{2}\right) R_p = \\ &= V_{n-1} - \left(I - \frac{I_{sc}}{2}\right) R_p \quad (4.13). \end{aligned}$$

Ο παραπάνω τύπος προκύπτει και από τον νόμο τάσεων του Kirchhoff σύμφωνα με το σχήμα 4.10. Στη περίπτωση που το  $I < I_{sc}/2$  τότε κάποιο

ρεύμα θα συνεχίσει να ρέει μέσω της διόδου και το κελί θα συνεισφέρει ελαφρώς μειωμένη αλλά θετική τάση σε όλο το πλαίσιο. Ισχύει σύμφωνα με το νόμο των τάσεων του Kirchhoff ότι

$$V_{sh} = V_{n-1} + V_d(4.14).$$

Η περίπτωση όπου  $I < I_{sc}/2$  φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 4.11** Φωτοβολταϊκό πλαίσιο με  $n$  στοιχεία στο οποίο το πιο πάνω είναι σκιασμένο κατά 50% και  $I < I_{sc}/2$ .

Στη περίπτωση όπου τα 2 πιο πάνω κελιά είναι σκιασμένα ισχύει ότι η τάση για τα  $n-2$  κελιά ισούται με:

$$V_{n-2} = \left(\frac{n-2}{n}\right) V(4.15).$$

Ισχύει τότε ότι

$$V_{sh} = V_{n-2} - 2I(R_p + R_s)(4.16).$$

Επειδή η αντίσταση  $R_s$  πολύ μικρότερη από την  $R_p$  τότε η εξίσωση 4.16 γίνεται:

$$V_{sh} = V_{n-2} - 2IR_p(4.17).$$

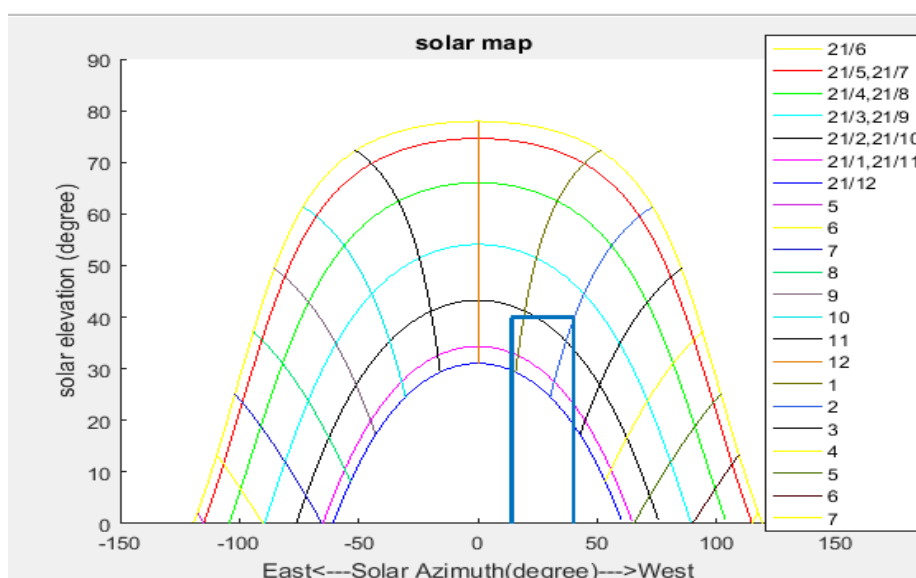
Άρα για το  $\Delta V$  ισχύει ότι:

$$\Delta V = V - V_{sh} = V - \left(\frac{n-2}{n}\right) V + 2IR_p = \frac{2V}{n} + 2IR_p(4.18)$$

## 5. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ I-V ΚΑΙ P-V ΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΚΑΙ ΕΥΡΕΣΗ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΣΚΙΑΣΗΣ ΓΙΑ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΕΣ ΜΕΡΕΣ

### 5.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΣΚΙΑΣΗΣ ΓΙΑ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΑ ΕΜΠΟΔΙΑ ΚΑΙ ΜΕΡΕΣ

Τα εμπόδια για τα οποία υπολογίζεται η σκίαση είναι για τη περίπτωση ορθογωνίου εμποδίου, ενός εμποδίου με μορφή τριγώνου και ενός εμποδίου το οποίο μοιάζει με δέντρο. Συγκεκριμένα παρακάτω υπολογίζεται για ποία μέρα του έτους έχω σκίαση για καθένα από τα εμπόδια. Το ορθογώνιο εμπόδιο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 5.1:** Ηλιακός χάρτης Χανίων με ορθογώνιο εμπόδιο

Για τον υπολογισμό των ποσοστών σκίασης των δώδεκα μερών που αναγράφονται στο παραπάνω σχήμα χρησιμοποιήθηκαν οι πίνακες  $gs$  και  $a$ . Η γωνία ώρα δύσης  $\omega_s$  κάθε μέρας εξαρτάται άμεσα από τη ηλιακή απόκλιση κάθε μέρας. Η γωνία ώρας ενός σημείου  $\omega$  παίρνει τιμές από  $-\omega_s$  έως  $\omega_s$ . Οι πίνακες  $gs$  και  $a$  παίρνουν ως τιμές τις γωνίες αζιμούθιου και γωνίες ύψους του ήλιου για κάθε μέρα του έτους και για όλες τις γωνίες ώρας ανεξαρτήτως εάν υπάρχει σκίαση ή όχι. Για να υπάρξει σκίαση για συγκεκριμένο εμπόδιο πρέπει να ισχύουν για τη γωνία αζιμούθιου οι εξής ανισότητες :

$$gs \geq 14(5.1) \text{ και}$$

$$gs \leq 40(5.2)$$

και για τη γωνία ύψους η εξής ανισότητα:

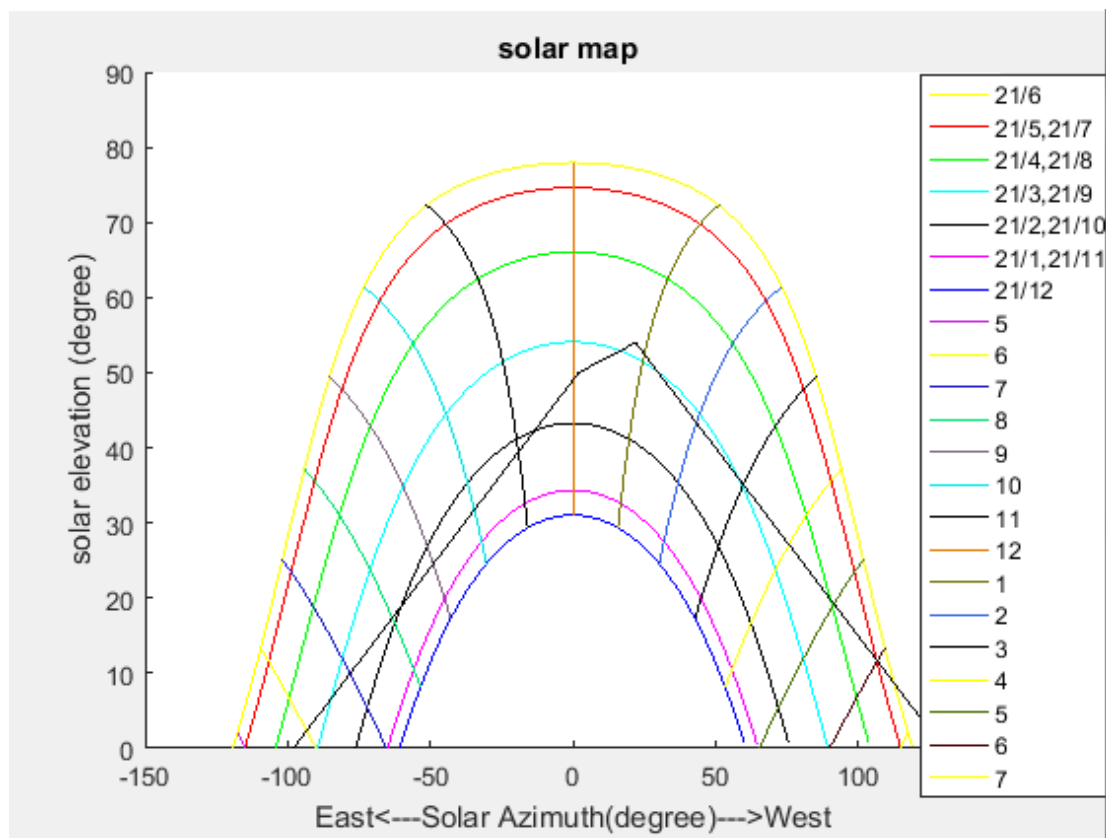
$$a \leq 40(5.3)$$

Με βάση τις παραπάνω ανισότητες γίνεται γνωστό για ποιες τιμές της γωνίας ώρας  $\omega$  κάθε μέρας υπάρχει σκίαση. Για το συγκεκριμένο εμπόδιο υπάρχει σκίαση από τη πρώτη μέρα ως τη 67<sup>η</sup> μέρα του έτους και από τη 278<sup>η</sup> ως το τέλος του έτους. Για την 21<sup>η</sup> μέρα δηλαδή για τη 21/1 ισχύει ότι  $\omega_s = 74,8313^\circ$ . Άρα εφόσον η γωνία ώρας  $\omega$  παίρνει τιμές από  $-\omega_s$  έως  $\omega_s$  ο πίνακας  $gs$  για τη συγκεκριμένη μέρα θα έχει 150 στήλες και 365 γραμμές. Παρακάτω παρατίθενται τα ποσοστά σκίασης για κάποιες συγκεκριμένες μέρες του έτους .

- Για την 21/1 και την 21/11 ισχύει ότι υπάρχει σκίαση για τις 28 τιμές της γωνίας ώρας από τις 150. Άρα η 21/1 και 21/11 είναι σκιασμένες σε ποσοστό  $\frac{28}{150} = 18\%$ .
- Για την 21/2 και την 21/10 ισχύει ότι υπάρχει σκίαση σε 14 τιμές της γωνίας ώρας  $\omega$  από τις 164. Άρα η 21/2 και η 21/10 είναι σκιασμένες σε ποσοστό  $\frac{14}{164} = 8\%$ .
- Για την 21/3, 21/9, 21/4, 21/8, 21/5, 21/7 και για την 21/6 δε έχω καθόλου σκίαση.

- Για την 21/12 δηλαδή για τη 355<sup>η</sup> μέρα ισχύει ότι υπάρχει σκίαση σε 28 τιμές της γωνίας ώρας  $\omega$  από τις 144. Άρα η 21/2 είναι σκιασμένη σε ποσοστό  $\frac{28}{144} = 19\%$ .

Τα αποτελέσματα είναι λογικά γιατί όπως φαίνονται και από το παραπάνω σχήμα για την 21/12 έχω τη μεγαλύτερη σκίαση. Για τη περίπτωση του εμποδίου με μορφή τριγώνου ακολουθείται η ίδια μεθοδολογία με πριν. Η μόνη διαφορά σε σχέση με το προηγούμενο εμπόδιο είναι ότι ισχύουν διαφορετικές ανισότητες για να εξεταστεί εάν υπάρχει σκίαση ή όχι. Το εμπόδιο του τριγώνου φαίνεται στο εξής σχήμα:



**Σχήμα 5.2:** Ηλιακός χάρτης Χανίων με εμπόδιο τριγώνου

Οι αντίστοιχες τιμές του αζιμούθιου και της γωνίας ύψους του ήλιου για το συγκεκριμένο εμπόδιο για τη πρώτη τεθλασμένη από αριστερά είναι



$gs = [-98 \ -78 \ -58 \ -38 \ -18 \ 2]$  και  $a = [0 \ 10 \ 20 \ 30 \ 40 \ 50]$ . Γνωρίζοντας τουλάχιστον 2 σημεία της ευθείας μπορεί να βρεθεί η εξίσωση της ευθείας. Ο συντελεστής διεύθυνσης της ευθείας είναι

$$\lambda = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} = \frac{10}{20} = \frac{1}{2}. \text{ Άρα η εξίσωση της ευθείας δίνεται από τον τύπο:}$$

$y - y_1 = \lambda(x - x_1)$  όπου  $\lambda$  ο συντελεστής διεύθυνσης και  $x_1, y_1$  οι συντεταγμένες οποιουδήποτε γνωστού σημείου της ευθείας. Λύνοντας τον παραπάνω τύπο για σημείο  $(-98, 0)$  προκύπτει:

$$y = \frac{1}{2}x + \frac{1}{2}98. \text{ Άρα Η εξίσωση της πρώτης ευθείας είναι:}$$

$$a = \frac{1}{2}gs + 49(5.3)$$

Για τη πιο δεξιά ευθεία του σχήματος ισχύει ότι  $a = [54 \ 44 \ 34 \ 24 \ 14 \ 0]$  και  $gs = [22 \ 42 \ 62 \ 82 \ 102 \ 122]$ . Άρα ο συντελεστής διεύθυνσης της ευθείας σύμφωνα με τα παραπάνω είναι:

$$\lambda = \frac{-10}{20} = -\frac{1}{2}. \text{ Άρα η εξίσωση της ευθείας είναι η εξής:}$$

$$a = -\frac{1}{2}gs + 65(5.4)$$

και για την τρίτη ευθεία η οποία είναι η ενδιάμεση ευθεία των 2 διαγώνιων ευθειών ισχύει ότι  $gs = [2 \ 22]$  και  $a = [50 \ 54]$ . Άρα το  $\lambda$  ισούται με:  $\lambda = \frac{4}{20} = \frac{1}{5}$ .

Οπότε η εξίσωση της τρίτης ευθείας είναι η:

$$a = \frac{1}{5}gs + \frac{248}{5}(5.5).$$

Άρα για να υπάρχει σκίαση θα πρέπει να ισχύουν οι εξής ανισότητες:

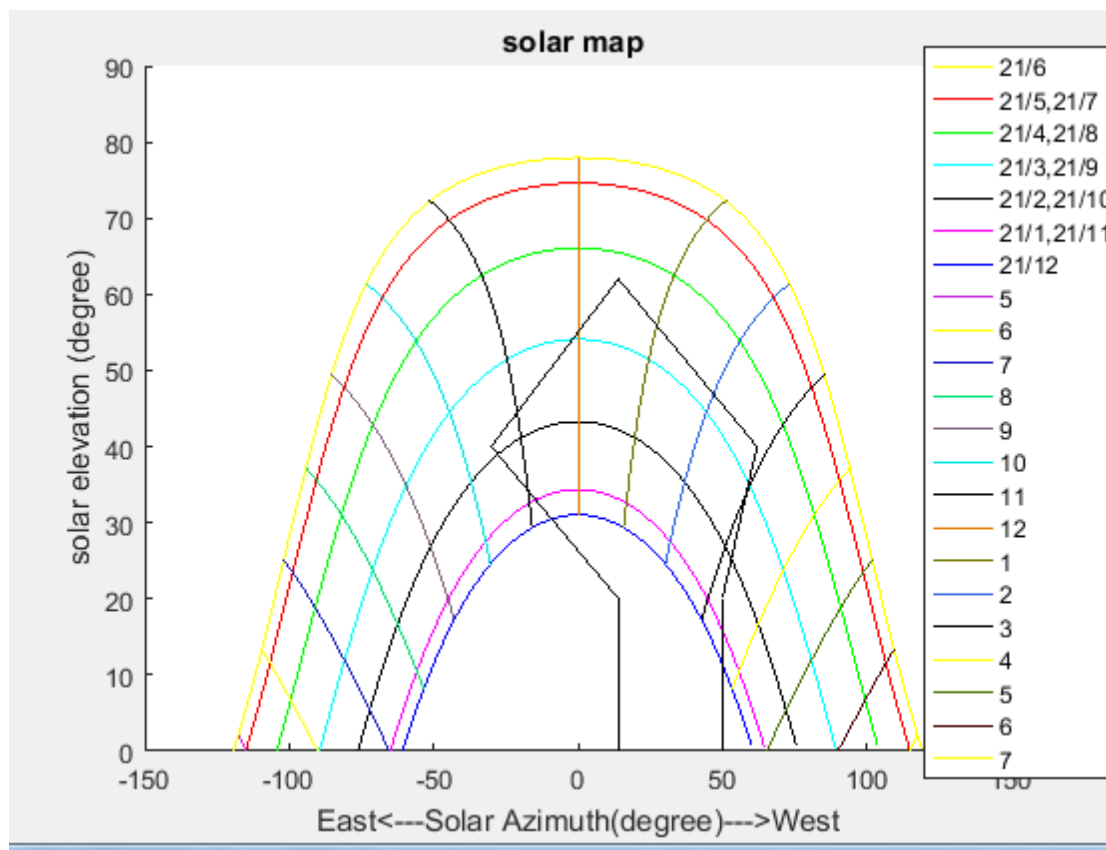
$$a - \frac{1}{2}gs - 49 \leq 0(5.6) \text{ και } a + \frac{1}{5}gs - 65 \leq 0(5.7) \text{ και } a - \frac{1}{5}gs - \frac{248}{5} \leq 0(5.8)$$

Στη συγκεκριμένη περίπτωση ισχύει ότι υπάρχει σκίαση για όλες τις μέρες του έτους όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα. Παρακάτω παρατίθενται τα ποσοστά σκίασης για κάποιες συγκεκριμένες μέρες του έτους.

- Για την 21/1, 21/11 και για την 21/12 ισχύει ότι έχω 100% σκίαση.
- Για την 21/2 και την 21/10 δηλαδή για τη 52<sup>η</sup> μέρα και την 21/10 ισχύει ότι υπάρχει σκίαση σε 91 τιμές της γωνίας ώρας  $\omega$  από τις 164. Άρα η 21/2 και η 21/10 είναι σκιασμένες σε ποσοστό  $\frac{91}{164} = 55\%$ .

- Για την 21/3 και την 21/9 ισχύει ότι υπάρχει σκίαση σε 55 τιμές της γωνίας ώρας  $\omega$  από τις 180. Άρα η 21/3 και η 21/9 είναι σκιασμένες σε ποσοστό  $\frac{55}{180}=30\%$ .
- Για την 21/4 και την 21/8 ισχύει ότι υπάρχει σκίαση σε 24 τιμές της γωνίας ώρας  $\omega$  από τις 197. Άρα η 21/4 και η 21/8 είναι σκιασμένες σε ποσοστό  $\frac{24}{197}=12\%$ .
- Για την 21/5 και την 21/7 ισχύει ότι υπάρχει σκίαση σε 16 τιμές της γωνίας ώρας  $\omega$  από τις 211. Άρα η 21/5 και η 21/7 είναι σκιασμένες σε ποσοστό  $\frac{16}{211}=7\%$ .
- Για την 21/6 ισχύει ότι υπάρχει σκίαση σε 12 τιμές της γωνίας ώρας  $\omega$  από τις 217. Άρα η 21/6 είναι σκιασμένη σε ποσοστό  $\frac{12}{217}=5\%$

Τέλος το εμπόδιο του δέντρου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 5.3:** Ηλιακός χάρτης Χανίων με εμπόδιο δέντρου

Για να υπάρχει σκίαση πρέπει να ισχύουν οι εξής ανισότητες:

$$a - \frac{1}{2}gs - 55 \leq 0 \quad (5.9) \text{ και } a + \frac{22}{48}gs - 68,44 \leq 0 \quad (5.10),$$

$$a \geq 20 \quad (5.11) \text{ και } a + 0,45gs - 26,3 \geq 0 \quad (5.12) \text{ και}$$

$a - 1,67gs + 63,54 \geq 0 \quad (5.13)$  ή οι εξής ανισότητες:  $gs \geq 14 \quad (5.14)$  και  $a \leq 20 \quad (5.13)$  και  $gs \leq 50 \quad (5.15)$ . Η πρώτη ευθεία περνά από τα σημεία  $gs=[14,-30]$ ,  $as=[20,40]$  δηλαδή τα σημεία με συντεταγμένες  $(14,20), (-30,40)$ . Σύμφωνα με αυτό η ευθεία που περνά από αυτά τα 2 σημεία είναι η ευθεία:

$$a + 0,45gs - 26,3 = 0 \quad (5.16).$$

Η ευθεία που περνά από τα σημεία  $gs=[-30,14]$   $as=[40,62]$  είναι η ευθεία

$$a - \frac{1}{2}gs - 55 = 0 \quad (5.17).$$

Η ευθεία που περνά από τα σημεία  $gs=[14,62]$   $as=[62,40]$  είναι η ευθεία

$$a + \frac{22}{48}gs - 68,44 = 0 \quad (5.18).$$

Τέλος η ευθεία που περνά από τα σημεία  $gs=[62,50]$   $as=[40,20]$  είναι η ευθεία:

$$a - 1,67gs + 63,54 = 0 \quad (5.19).$$

Για το συγκεκριμένο εμπόδιο υπάρχει σκίαση από τη πρώτη μέρα ως τη 99<sup>η</sup> μέρα και από τη 251<sup>η</sup> ως τη τελευταία μέρα του έτους. Παρατηρείται ότι για αυτό το εμπόδιο υπάρχει σκίαση για περισσότερες μέρες σε σχέση με το ορθογώνιο εμπόδιο και λιγότερες από το τυχαίο εμπόδιο. Παρακάτω παρατίθενται τα ποσοστά σκίασης για κάποιες συγκεκριμένες μέρες του έτους

- Για την 21/1 και την 21/11 ισχύει ότι υπάρχει σκίαση σε 65 τιμές της γωνίας ώρας  $\omega$  από τις 150. Άρα η 21/1 και η 21/11 είναι σκιασμένες σε ποσοστό  $\frac{65}{150} = 43\%$ .
- Για την 21/2 και την 21/10 ισχύει ότι υπάρχει σκίαση σε 69 τιμές της γωνίας ώρας  $\omega$  από τις 164. Άρα η 21/2 και η 21/10 είναι σκιασμένες σε ποσοστό  $\frac{69}{164} = 42\%$ .
- Για την 21/3 και την 21/9 ισχύει ότι υπάρχει σκίαση σε 46 τιμές της γωνίας ώρας  $\omega$  από τις 180. Άρα η 21/3 και η 21/9 είναι σκιασμένες σε ποσοστό  $\frac{46}{180} = 25\%$ .
- Για την 21/12 ισχύει ότι υπάρχει σκίαση σε 63 τιμές της γωνίας ώρας  $\omega$  από τις 144. Άρα η 21/12 είναι σκιασμένη σε ποσοστό  $\frac{63}{144} = 43,7\%$ .
- Για την 21/4, 21/8, 21/5, 21/7 και για την 21/6 δεν υπάρχει καθόλου σκίαση.

## **5.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ** **I-V, P-V ΓΙΑ ΣΥΓΓΕΚΡΙΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ** **ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ**

Παρακάτω περιγράφεται η μεθοδολογία η οποία έγινε προκειμένου να δημιουργηθούν τα διαγράμματα I-V και P-V για φωτοβολταϊκό 54 κελιών.

Το φωτοβολταϊκό έχει τα εξής χαρακτηριστικά : τάση ανοικτοκύκλωσης  $V_{oc}=32,9\text{ Volt}$  και ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}=8,21\text{ A}$ . Οι μετρήσεις έγιναν για θερμοκρασία  $25^{\circ}\text{C}$  και έντασης ακτινοβολίας  $G=1000\text{ W/m}^2$  δηλαδή για STC συνθήκες. Ορίζεται ως παράγοντα εκπομπής  $A=2$  και εύρος τάσης ζώνης (band gap voltage)  $V_g=1,12\text{ eV}$

Μελετήθηκαν δύο περιπτώσεις προκειμένου να προσδιοριστεί η επίδραση της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας στο φωτοβολταϊκό. Στη πρώτη περίπτωση θεωρήθηκε ότι υπάρχει σταθερή ένταση ακτινοβολίας και μεταβλητές τιμές θερμοκρασίας. Στη δεύτερη περίπτωση θεωρήθηκε ότι υπάρχει σταθερή θερμοκρασία και μεταβλητές τιμές ακτινοβολίας. Για τη πρώτη περίπτωση ισχύει ότι  $G=1000\text{ W/m}^2$   $T_1=75^{\circ}\text{C}$ ,  $T_2=25^{\circ}\text{C}$ ,  $T_3=0^{\circ}\text{C}$  και στη δεύτερη περίπτωση ισχύει ότι  $T=25^{\circ}\text{C}$  και  $G_1=250\text{ W/m}^2$ ,  $G_2=500\text{ W/m}^2$ ,  $G_3=750\text{ W/m}^2$  και  $G_4=1000\text{ W/m}^2$ . Ο υπολογισμός της τάσης, ρεύματος και ισχύος του φωτοβολταϊκού περιγράφεται παρακάτω. Για θερμοκρασία  $25^{\circ}\text{C}$  ισχύει ότι  $T_2=25+273=298\text{ K}$ . Η τάση ανοικτοκύκλωσης κάθε κελιού για θερμοκρασία  $25^{\circ}\text{C}$  ισούται με

$V_{oc_{cell}} = \frac{32,9}{N_s} = 0,6093\text{ Volt}$ . Η τάση ανοικτοκύκλωσης διαιρείται με τον αριθμό

των φωτοβολταϊκών στοιχείων προκειμένου να βρεθεί η τάση για κάθε κελί ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι το ίδιο για όλα τα κελιά. Αυτό συμβαίνει γιατί τα κελιά βρίσκονται σε σειρά. Ο συντελεστής θερμοκρασίας για τη τάση ανοικτοκύκλωσης  $V_{oc}$  είναι  $KV = -1,23 \times 10^{-1}\text{ V/^{\circ}C}$ . Για τον υπολογισμό της τάσης ανοικτοκύκλωσης για κάθε κελί για θερμοκρασία διαφορετική από  $25^{\circ}\text{C}$  χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

$$V_{ocT2} = \frac{V_{oc} - 0,123 \cdot (T_2 - 25)}{N_s} \quad (5.20)$$

οπού  $T_2$  είναι η νέα θερμοκρασία μετρημένη σε  $^{\circ}\text{C}$ . Για παράδειγμα για τον υπολογισμό της τάση ανοικτοκύκλωσης  $V_{ocT3}$  για θερμοκρασία  $T_3=0^{\circ}\text{C}$ ,  $T_3=273+0=273\text{ K}$  χρησιμοποιείται ο εξής τύπος :

$$V_{ocT3} = \frac{32,9 - 0,123 \cdot (0 - 25)}{N_s} = 0,6662\text{ V} \quad (5.21).$$

Με τον ίδιο τρόπο προκύπτει και το ρεύμα βραχυκύκλωσης για διαφορετική θερμοκρασία των  $25^{\circ}\text{C}$  μόνο που σε αυτήν τη περίπτωση ο συντελεστής θερμοκρασίας είναι ίσος με

$KI=3,18 \times 10^{-3} \text{ A}/^{\circ}\text{C}$ . Ο τύπος για το υπολογισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης για θερμοκρασία  $T2$  είναι ο εξής:

$$I_{scT2} = I_{sc} + 3,18 * 0,001 (T2 - 25) \quad (5.22)$$

Άρα ο τύπος για το ρεύμα βραχυκύκλωσης για  $T3=0^{\circ}\text{C}$  είναι ο εξής:

$$I_{scT3} = 8,21 + 3,18 * 0,001 (0 - 25) = 8,1305 \text{ A} \quad (5.23).$$

Ισχύει ότι ο συντελεστής για τα ρεύματα ανοικτοκύκλωσης είναι θετικός άρα με τη μείωση της θερμοκρασίας κάτω από τα  $25^{\circ}\text{C}$  έχουμε μείωση του ρεύματος. Για θερμοκρασία  $0^{\circ}\text{C}$  ισχύει ότι  $I_{scT3}=8,1305 \text{ A}$  ενώ για θερμοκρασία  $T2=25^{\circ}\text{C}$  ισχύει ότι  $I_{scT2}=8,21 \text{ A}$ . Ο συντελεστής για τις τάσεις βραχυκύκλωσης είναι αρνητικός άρα με την μείωση της θερμοκρασίας κάτω από τα  $25^{\circ}\text{C}$  παρατηρούμε αύξηση της τάσης. Για θερμοκρασία  $0^{\circ}\text{C}$  ισχύει ότι  $V_{ocT3}=0,6662 \text{ Volt}$  ενώ για θερμοκρασία  $25^{\circ}\text{C}$  ισχύει ότι  $V_{ocT2}=0,6093 \text{ Volt}$ . Στη συνέχεια υπολογίζεται η τάση ανοικτοκύκλωσης  $V_{ocT1}$  και το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{scT1}$  για θερμοκρασία  $75^{\circ}\text{C}$ . Για τη τάση ανοικτοκύκλωσης  $V_{ocT1}$  ισχύει ότι:

$$V_{ocT1} = \frac{32,9 - 0,123 * (75 - 25)}{N_s} = 0,4954 \text{ V} \quad (5.24)$$

Για το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{scT1}$  ισχύει:

$$I_{scT1} = 8,21 + 3,18 * 0,001 * (75 - 25) = 8,3690 \text{ A} \quad (5.25)$$

Σε αυτήν τη περίπτωση επειδή η θερμοκρασία είναι πάνω από  $25^{\circ}\text{C}$  παρατηρείται ότι η τάση για θερμοκρασία  $75^{\circ}\text{C}$   $V_{ocT1}=0,4954 \text{ V}$  μειώνεται σε σχέση με την τάση για θερμοκρασία  $25^{\circ}\text{C}$   $V_{ocT2}=0,6093 \text{ Volt}$ . Αντίθετα το ρεύμα βραχυκύκλωσης για θερμοκρασία  $75^{\circ}\text{C}$   $I_{scT1}=8,3690 \text{ A}$  αυξάνεται σε σχέση με το ρεύμα για θερμοκρασία  $25^{\circ}\text{C}$  όπου είναι  $I_{scT2}=8,21 \text{ A}$ . Η ένταση ηλιακής ακτινοβολίας είναι  $1 \text{ sun} = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$ . Ύστερα υπολογίζεται το φωτόρρευμα για θερμοκρασία  $25^{\circ}\text{C}$ .

$$I_{ph_{T2}} = I_{scT2} * \text{Suns} = 8,2100 \text{ A} * \text{Sun} = 8,2100 \text{ A} * \text{Sun} \quad (5.26) .$$

Προκειμένου να υπολογιστεί το ρεύμα για θερμοκρασία  $25^{\circ}\text{C}$  για τη σταθερά  $a$  ισχύει ο εξής τύπος:

$$a = \left( \frac{I_{scT1} - I_{scT2}}{I_{scT2}} \right) * \left( \frac{1}{T1 - T2} \right) \quad (5.27).$$

Το φωτόρρευμα εξαρτάται και από τη θερμοκρασία  $T2=25^{\circ}\text{C}$  και την θερμοκρασία  $T1=75^{\circ}\text{C}$

Με βάση τους τύπους (5.26) και (5.27) υπολογίζεται το φωτόρρευμα:

$$I_{ph1} = I_{ph_{T2}} * (1 + a * (T_{ak} - T1)) \quad (5.28)$$

οπού  $T_{ak} = 273 + 25 = 298 \text{ Kelvin}$

Ύστερα γνωρίζοντας τη θερμική τάση :

$$V_{T2} = \frac{k * T2}{q} \quad (J/Cb = \text{Volt}) \quad \text{υπολογίζονται τα ρεύματα για κάθε διαφορετική}$$

θερμοκρασία  $I_{rT1}, I_{rT2}, I_{rT3}$  σύμφωνα με τον τύπο (3.22)

$$I_{OT1} = \frac{I_{sc} T_1}{e^{\frac{V_{oc} T_1}{AV_t}} - 1}$$

$$I_{rT1} = \frac{I_{sc} T_1}{e^{\frac{V_{oc} T_1}{AV_t}} - 1} = 8,8605 * 10^{-7} \text{ A} \quad (5.29)$$

$$I_{rT2} = \frac{I_{sc} T_2}{e^{\frac{V_{oc} T_2}{AV_t}} - 1} = 2,1651 * 10^{-8} \text{ A} \quad (5.30)$$

$$I_{rT3} = \frac{I_{sc} T_3}{e^{\frac{V_{oc} T_3}{AV_t}} - 1} = 3,384 * 10^{-9} \text{ A} \quad (5.31)$$

Έπειτα υπολογίζεται η παράμετρος

$$b = \frac{Vg * q}{A * k} = 1,0821 * 10^4 \text{ K}.$$

Γνωρίζοντας τη παράμετρο b και τα  $I_{rT1}$ ,  $I_{rT2}$ ,  $I_{rT3}$  μπορούν να υπολογιστούν τα ρεύματα κορεσμού για θερμοκρασίες  $25^\circ\text{C}$ ,  $0^\circ\text{C}$ ,  $75^\circ\text{C}$  χρησιμοποιώντας τις εξής εξισώσεις :

$$I_{r1} = I_{rT1} * \left(\frac{Tak}{T_1}\right)^{3/A} * e^{-b * (1./Tak - 1/T_1)} = 8,8605 * 10^{-7} \text{ A} \quad (5.32)$$

$$I_{r2} = I_{rT2} * \left(\frac{Tak}{T_1}\right)^{3/A} * e^{-b * (1./Tak - 1/T_1)} = 2,1651 * 10^{-8} \text{ A} \quad (5.33)$$

$$I_{r3} = I_{rT3} * \left(\frac{Tak}{T_1}\right)^{3/A} * e^{-b * (1./Tak - 1/T_1)} = 3,3840 * 10^{-9} \text{ A} \quad (5.34)$$

Οι εξισώσεις για τα ρεύματα κορεσμού προκύπτουν από την εξίσωση :

$$I_o = I_{oT1} \left(\frac{T}{T_1}\right)^{3/A} e^{-b(1/T - 1/T_1)}. \text{ Στη εξίσωση του } I_o \text{ το } T \text{ αντιστοιχεί με το}$$

$Tak = 273 + 25 = 298 \text{ Kelvin}$  και το  $I_{oT1}$  με τα αντίστοιχα  $I_{rT1}$ ,  $I_{rT2}$  και  $I_{rT3}$ .

Ο τύπος για τις επαγωγικές αντιδράσεις για κάθε θερμοκρασία είναι οι εξής:

$$X_{2v1} = \frac{I_{rT1}}{A * V_t T_1} * e^{V_{oc} T_1 / (A * V_t T_1)} = 271,3420 \text{ (A/V = } Ohm^{-1} \text{)} \quad (5.35)$$

$$X_{2v2} = \frac{I_{rT2}}{A * V_t T_1} * e^{V_{oc} T_2 / (A * V_t T_1)} = 266,1868 \text{ (A/V = } Ohm^{-1} \text{)} \quad (5.36)$$

$$X_{2v3} = \frac{I_{rT3}}{A * V_t T_1} * e^{V_{oc} T_3 / (A * V_t T_1)} = 263,6092 \text{ (A/V = } Ohm^{-1} \text{)} \quad (5.37)$$

και οι εξισώσεις προκύπτουν από τον τύπο (3.14)  $X_v = \frac{I_{oT1}}{AV_t} e^{V_{oc} T_1 / AV_t}$

Με βάση ότι είναι γνωστές οι αντιδράσεις  $X_{2v1}$ ,  $X_{2v2}$ ,  $X_{2v3}$  μπορεί να γίνει και ο υπολογισμός των αντιστάσεων σε σειρά ανά φωτοβολταϊκό στοιχείο:

$$R_{sT1} = \frac{-dV}{dI_{Voc}} - \frac{1}{X_{2v1}} Ohm \quad (5.38)$$

$$R_{s_{T_2}} = \frac{-dV}{dI_{Voc}} - \frac{1}{X_{2v2}} \text{ Ohm} (5.39)$$

$$R_{s_{T_3}} = \frac{-dV}{dI_{Voc}} - \frac{1}{X_{2v3}} \text{ Ohm} (5.40)$$

Οι 3 παραπάνω εξισώσεις προκύπτουν από τον τύπο 3.11

$$R_s = \frac{-dV}{dI_{Voc}} - \frac{1}{X_v} \text{ Ohm}$$

$$\text{Έπειτα υπολογίζεται το } V_{t_{Ta}} = \frac{A * k * T_a K}{1,60 * 10^{-19}} = 0,0308 \text{ V} (5.41).$$

Για κάθε διαφορετική τιμή του  $V_a$  που παίρνει τιμές από 0 έως 36 υπολογίζεται το  $V_c = \frac{V_a}{N_s}$ . Η μέγιστη τιμή που παίρνει το  $V_a$  είναι 36V

επειδή η μέγιστη τάση ανοικτοκύκλωσης ισούται με:

$$V_{oc3} = 32,9 - (0,123 * (0 - 25)) = 35,975 \text{ V} (5.42)$$

και αναφέρεται σε θερμοκρασία  $T_3 = 273 \text{ K}$ .

Στη συνέχεια φαίνεται ο τύπος για τον υπολογισμό του ρεύματος για θερμοκρασία  $25^\circ\text{C}$  ο οποίος είναι γραμμένος στη matlab (χρησιμοποιήθηκαν οι τελεστές  $.*$ ,  $./$  προκειμένου να γίνουν οι πράξεις στοιχείο προς στοιχείο μεταξύ του  $V_{c2}$  και  $I_{a2}$ )

$$I_{a2} = I_{a2} - (I_{ph1} - I_{a2} - I_{r2} * (\exp((V_{c2} + I_{a2} * R_{s_{T_2}}) / V_{t_{Ta}}) - 1)) ./ (-1 - (I_{r2} * (\exp((V_{c2} + I_{a2} * R_{s_{T_2}}) / V_{t_{Ta}}) - 1)) * R_{s_{T_2}} / V_{t_{Ta}}) (5.43)$$

Ομοίως υπολογίζονται και τα ρεύματα  $I_a$  και  $I_{a3}$  για θερμοκρασία  $75^\circ\text{C}$  και  $0^\circ\text{C}$  αντίστοιχα.

Ισχύει ότι  $V_c = V_{c2} = V_{c3} = \frac{V_a}{N_s}$  και  $I_a, I_{a2}, I_{a3}$  είναι τα ρεύματα για θερμοκρασία

$75^\circ\text{C}, 25^\circ\text{C}$  και  $0^\circ\text{C}$ . Ο υπολογισμός των ισχύων γίνεται με τους εξής τύπους:

$$P_{T1} = V_a * I_a, P_{T2} = V_{a2} * I_{a2}, P_{T3} = V_{a3} * I_{a3} (5.44)$$

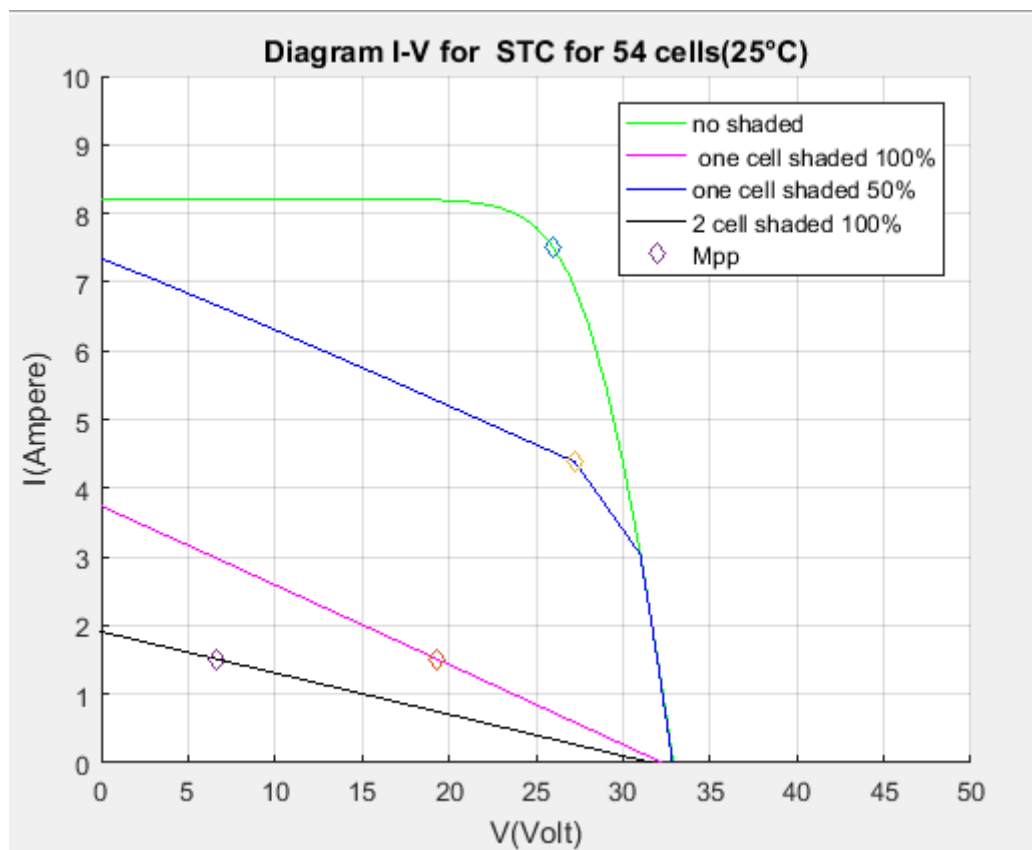
και γνωρίζοντας τις τιμές των  $V_a, V_{a2}, V_{a3}$  και  $I_a, I_{a2}, I_{a3}$ ,  $P_{T1}$ ,  $P_{T2}$ ,  $P_{T3}$  μπορούν να δημιουργηθούν τα διαγράμματα P-V και I-V για κάθε διαφορετική θερμοκρασία. Στην δεύτερη περίπτωση εξαιτίας της σταθερής θερμοκρασίας  $25^\circ\text{C}$  το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{scT1}$  και η τάση ανοικτοκύκλωσης  $V_{ocT1}$  είναι σταθερές για όλες τις διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας. Επιπλέον σταθερά παραμένουν τα ρεύματα κορεσμού και οι αντιστάσεις ανά σειρά για κάθε ακτινοβολία. Υπάρχουν όμως τέσσερις διαφορετικές τιμές για το φωτόρρευμα  $I_{ph}$  μια για κάθε ακτινοβολία. Άρα τελικά υπολογίζονται τέσσερις διαφορετικές τιμές ρεύματος, τάσεων και ισχύων.

### **5.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΚΙΑΣΗΣ ΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ I-V,P-V ΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ 54 ΚΕΛΙΩΝ**

Παρακάτω εμφανίζεται το διάγραμμα I-V για ηλιακό πλαίσιο  $N_s=54$  ηλιακών κελιών σε σειρά με  $V_g=1,12V$  και  $A=2$ . Τα φωτοβολταϊκό είναι σε συνθήκες STC(  $25^\circ C, 1000 W/m^2=1 sun$ ). Ακόμα ισχύει ότι:

$$V_{oc} = \frac{32,9}{N_s} = 0,609V \text{ και } I_{sc} = 8,21A. \text{ Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται οι}$$

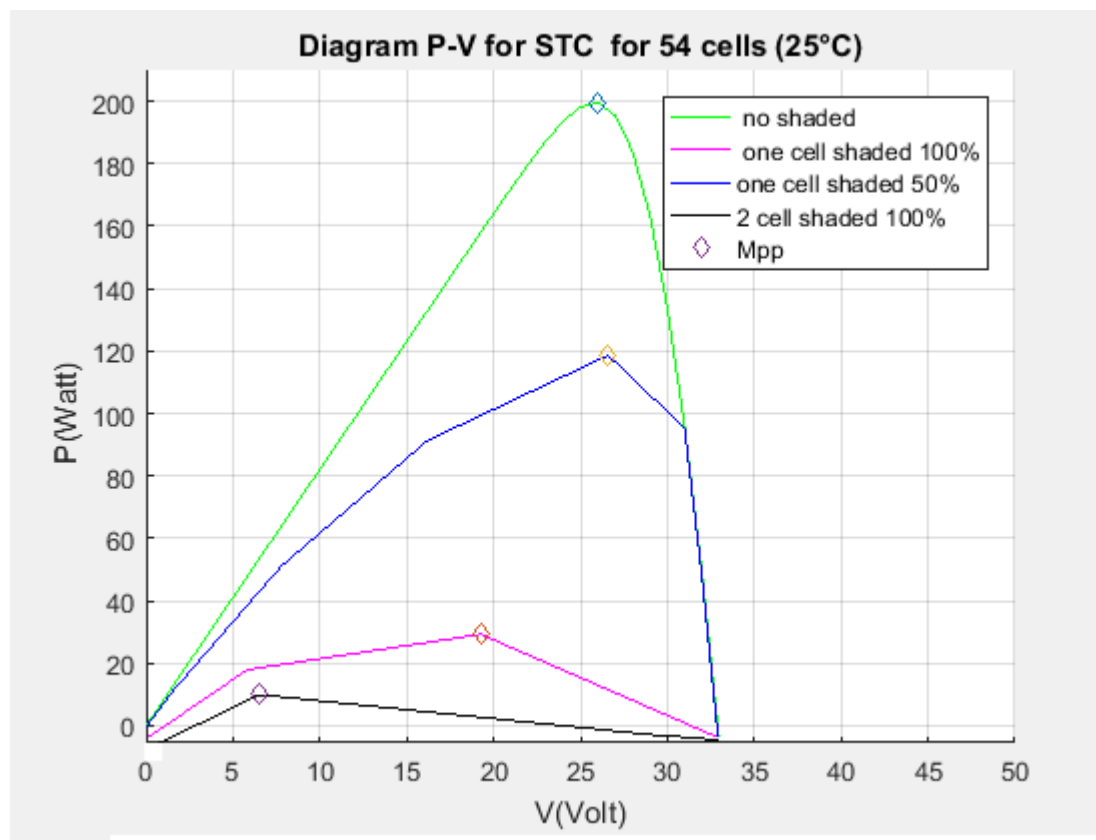
γραφικές I-V, P-V για τις εξής περιπτώσεις: στο φωτοβολταϊκό να μην υπάρχει καθόλου σκίαση, το πιο πάνω στοιχείο του φωτοβολταϊκού είναι πλήρως σκιασμένο και τα υπόλοιπα  $N_s-1$  στοιχεία είναι σε ηλιοφάνεια, το πιο πάνω φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι σκιασμένο κατά 50% και τα υπόλοιπα  $N_s-1$  είναι σε ηλιοφάνεια και τέλος τα δύο πιο πάνω κελιά είναι πλήρως σκιασμένα και τα υπόλοιπα  $N_s-2$  είναι σε ηλιοφάνεια. Το διάγραμμα I-V για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις φαίνεται πιο κάτω:



**Σχήμα 5.4:** Διάγραμμα I-V για φωτοβολταϊκό 54 κελιών και για όλες τις περιπτώσεις σκίασης



Το αντίστοιχο διάγραμμα P-V για όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις εμφανίζεται παρακάτω:



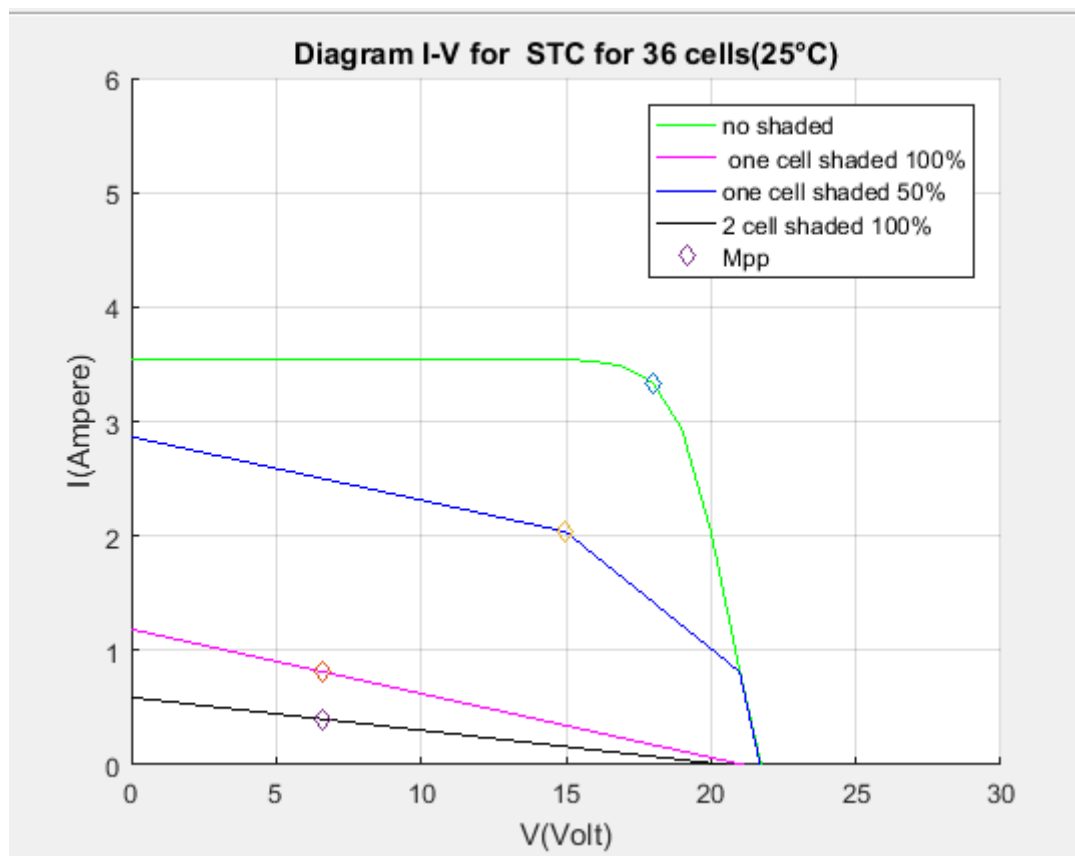
**Σχήμα 5.5:** Διάγραμμα P-V για φωτοβολταϊκό 54 κελιών και για όλες τις περιπτώσεις σκίασης

Από τα διαγράμματα I-V και P-V παρατηρείται ότι όταν δε υπάρχει σκίαση στο φωτοβολταϊκό τότε η μέγιστη ισχύς είναι 195,3W. Για σκίαση 50% σε ένα κελί η μέγιστη ισχύς πέφτει σε 119,3W. Για σκίαση 100% ενός κελιού η μέγιστη ισχύς είναι 29,1W και για τη πλήρως σκίαση δύο κελιών η μέγιστη

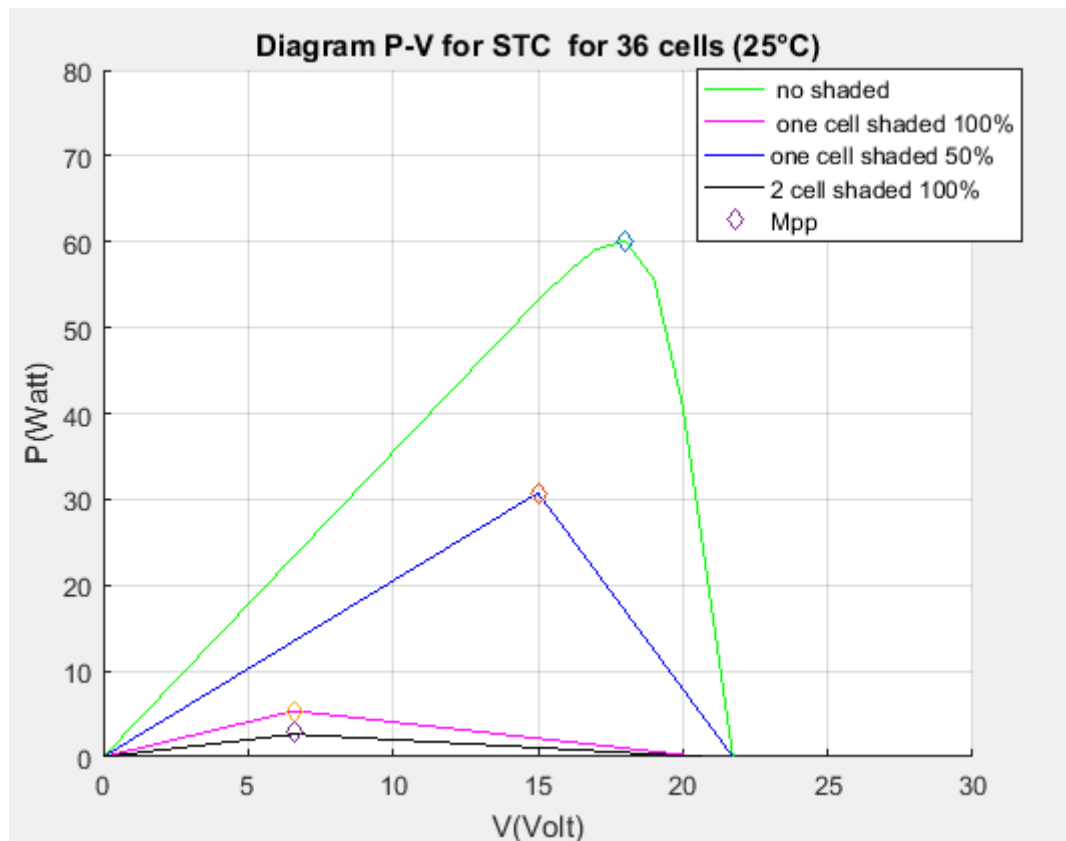
ισχύς γίνεται ίση με 10W. Επιπλέον παρατηρείται όταν υπάρχει σκίαση σε ένα κελί του φωτοβολταϊκού τότε η τάση μειώνεται σε σχέση με τη περίπτωση που το φωτοβολταϊκό είναι ασκίαστο. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό σκίασης άρα και ο αριθμός των κελιών που σκιάζονται τόσο μεγαλύτερη είναι η πτώση της τάσης. Επιπλέον μέσω του διαγράμματος I-V γίνονται γνωστά τα σημεία  $V_{mpp}$  και  $I_{mpp}$  δηλαδή οι τιμές I,V οι οποίες αντιστοιχούν σε μέγιστη ισχύ. Για τη περίπτωση μη σκίασης ισχύει :  $V_{mpp}=26V$  και  $I_{mpp}=7,5A$ . Για τη περίπτωση σκίασης ενός κελιού κατά 100% ισχύει :  $V_{mpp}=19,3V$  και  $I_{mpp}=1,5A$ . Για τη περίπτωση σκίασης ενός κελιού κατά 50% ισχύει:  $V_{mpp}=27,2V$  και  $I_{mpp}=4,4A$ . Για τη περίπτωση σκίασης δύο κελιών κατά 100% ισχύει  $V_{mpp}=6,6V$  και  $I_{mpp}=1,5A$ . Στο διάγραμμα I-V για σκίαση 50% και για  $I < I_{sc}/2$  (δηλαδή για  $I < 4,105A$ ) παρατηρείται ότι η καμπύλη πλησιάζει κατά πολύ τη καμπύλη της περίπτωσης μη σκίασης με λίγο όμως μικρότερες τιμές τάσης. Αυτό συμβαίνει γιατί όταν  $I < I_{sc}/2$  ισχύει ο τύπος :  $V_{sh} = V_{n-1} + V_d$

## **5.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΚΙΑΣΗΣ ΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ I-V,P-V ΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ 36 ΚΕΛΙΩΝ**

Εξετάζεται φωτοβολταϊκό με 36 φωτοβολταϊκά κελιά το οποίο αποτελείται από 3 σειρές των 12 φωτοβολταϊκών κελιών. Για το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό ισχύει ότι ο παράγοντας εκπομπής A είναι ίσος με 2 και το εύρος τάσης ζώνης  $V_g$  είναι ίσο με 1,12V. Ισχύει ακόμα  $V_{oc}=21,7V$ ,  $I_{sc}=3,55A$  για STC συνθήκες. Τα αντίστοιχα διαγράμματα I-V, P-V είναι τα εξής:



**Σχήμα 5.6:** Διάγραμμα I-V για φωτοβολταϊκό 36 κελιών και για όλες τις περιπτώσεις σκίασης



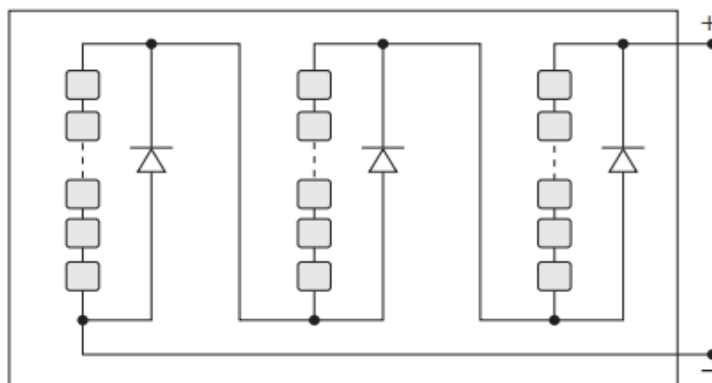
**Σχήμα 5.7:** Διάγραμμα P-V για φωτοβολταϊκό 36 κελιών και για όλες τις περιπτώσεις σκίασης

Η μέγιστη ισχύς για ασκίαστο φωτοβολταϊκό 36 κελιών ισούται με  $P_{mpp}=60,1058\text{ W}$ . Η μέγιστη ισχύς σε περίπτωση πλήρους σκίασης του πιο πάνω κελιού είναι  $P_{mpp}=5,362\text{ W}$ , για σκίαση 50% του πιο πάνω κελιού  $P_{mpp}=30,25\text{ W}$  και για σκίαση δύο κελιών 100% ισχύ  $P_{mpp}=2,6374\text{ W}$ . Παρατηρείται ότι οι μέγιστες ισχύες για το φωτοβολταϊκό των 54 στοιχείων είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις μέγιστες ισχύς από του φωτοβολταϊκό των 36 στοιχείων. Αυτό συμβαίνει επειδή το φωτοβολταϊκό των 54 στοιχείων έχει περισσότερα κελιά σε σειρά άρα μεγαλύτερη τάση ανοικτού κύκλου, μεγαλύτερο ρεύμα βραχυκύκλωσης άρα και μεγαλύτερες ισχύες σε κάθε περίπτωση σκίασης.

## **5.5 ΧΡΗΣΗ ΔΙΟΔΩΝ ΠΑΡΑΚΑΜΨΗΣ ΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ 54 ΚΕΛΙΩΝ**

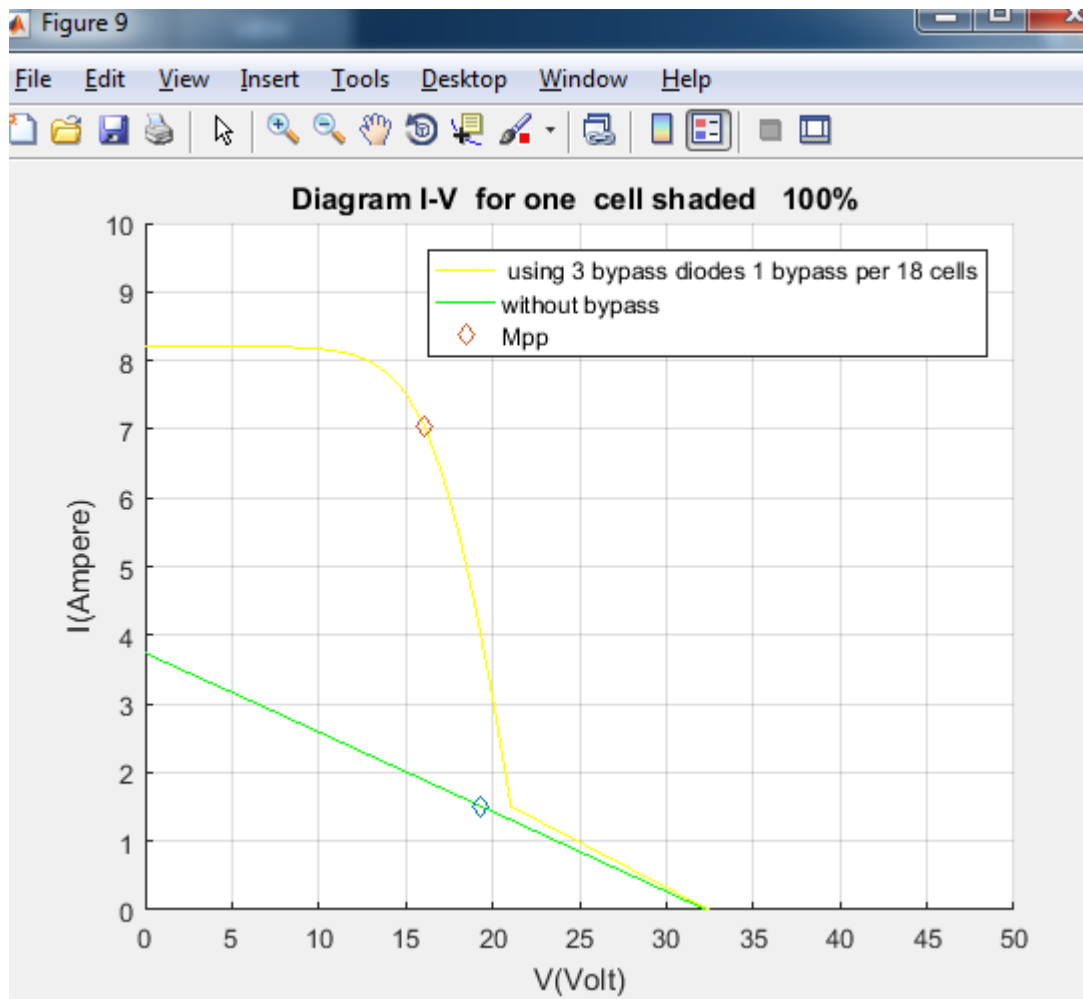
Σε αυτή τη ενότητα μελετάται το φωτοβολταϊκό με τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτό της ενότητας 5.3. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν τρεις δίοδοι παράκαμψης (bypass diode) μία για κάθε 18 κελιά. Η υλοποίηση με διόδους

παράκαμψης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η υλοποίηση με τρεις διόδους παράκαμψης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

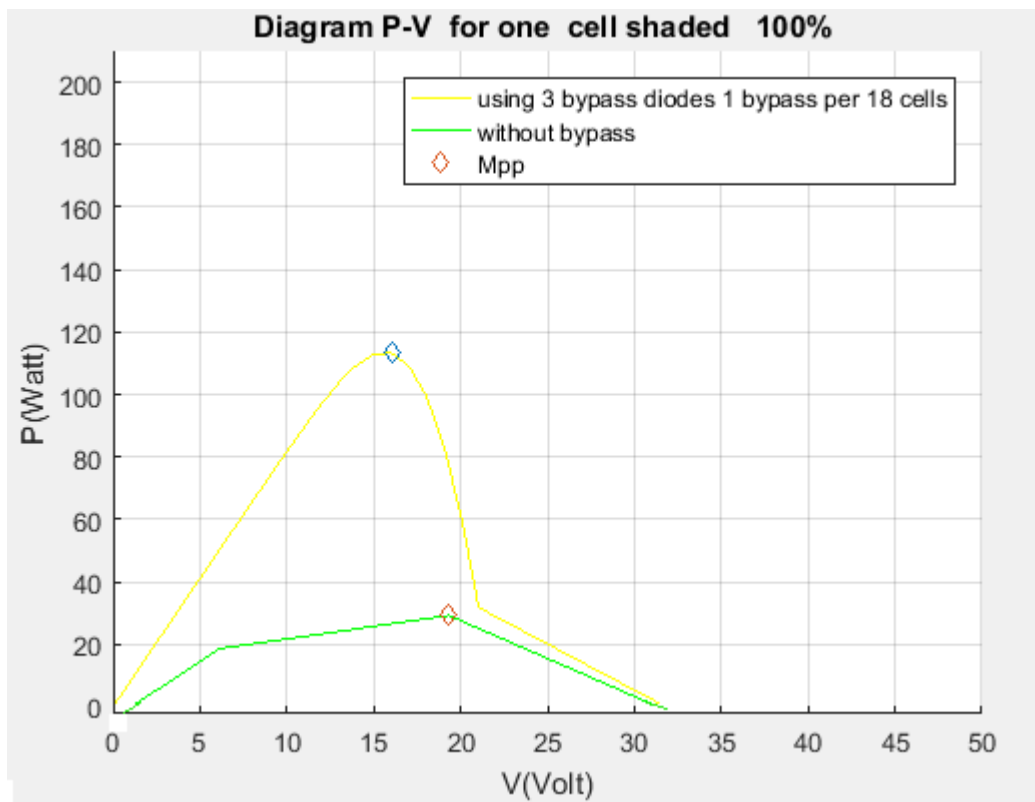


**Σχήμα 5.8:** Φωτοβολταϊκό πλαίσιο κελιών με τρεις διόδους παράκαμψης

Έστω ότι οι διόδους παράκαμψης είναι διόδους Schottky. Η πτώση τάσης της διόδου παράκαμψης θεωρείται αμελητέα. Στην περίπτωση σκίασης του πιο πάνω κελιού λόγω της ανάστροφης τάσης η τελευταία διόδος παράκαμψης πολώνεται θετικά(λειτουργία on) και αρχίζει να τη διαπερνά ρεύμα. Η πτώση τάσης είναι  $18 \left( \frac{54}{3} = 18 \text{ κελιά} \right) \cdot 0,6093 \text{ V}$  (τάση κάθε κελιού) =  $10,96 \text{ V}$ . Άρα η καινούρια τάση ισούται με  $V = V_a - 10,96 \text{ V}$  όπου το  $V_a$  είναι η τάση του φωτοβολταϊκού χωρίς σκίαση. Μελετήθηκαν δύο περιπτώσεις σκίασης η πρώτη για τη πλήρως σκίαση ενός κελιού και η δεύτερη για σκίαση 50% ενός κελιού. Και στις δύο περιπτώσεις ισχύει ο ίδιος τύπος για τη τάση  $V$  μόνο που σε κάθε περίπτωση εξετάστηκε εάν η νέα τάση  $V$  παίρνει μικρότερες τιμές από τις αντίστοιχες τιμές της τάσης χωρίς τη χρήση της διόδου παράκαμψης. Εάν οι τιμές της τάσης  $V$  είναι μικρότερες από τις τιμές της τάσης χωρίς τη χρήση της διόδου παράκαμψης τότε η τάση  $V$  γίνεται ίση με τη αντίστοιχη τιμή της τάσης χωρίς την χρήση των διόδων παράκαμψης. Τα αντίστοιχα διαγράμματα P-V, I-V για το φωτοβολταϊκό με 54 κελιά και  $V_g = 1,12 \text{ V}$  και  $A = 2$  για την περίπτωση σκίασης ενός κελιού κατά 100% φαίνεται παρακάτω:

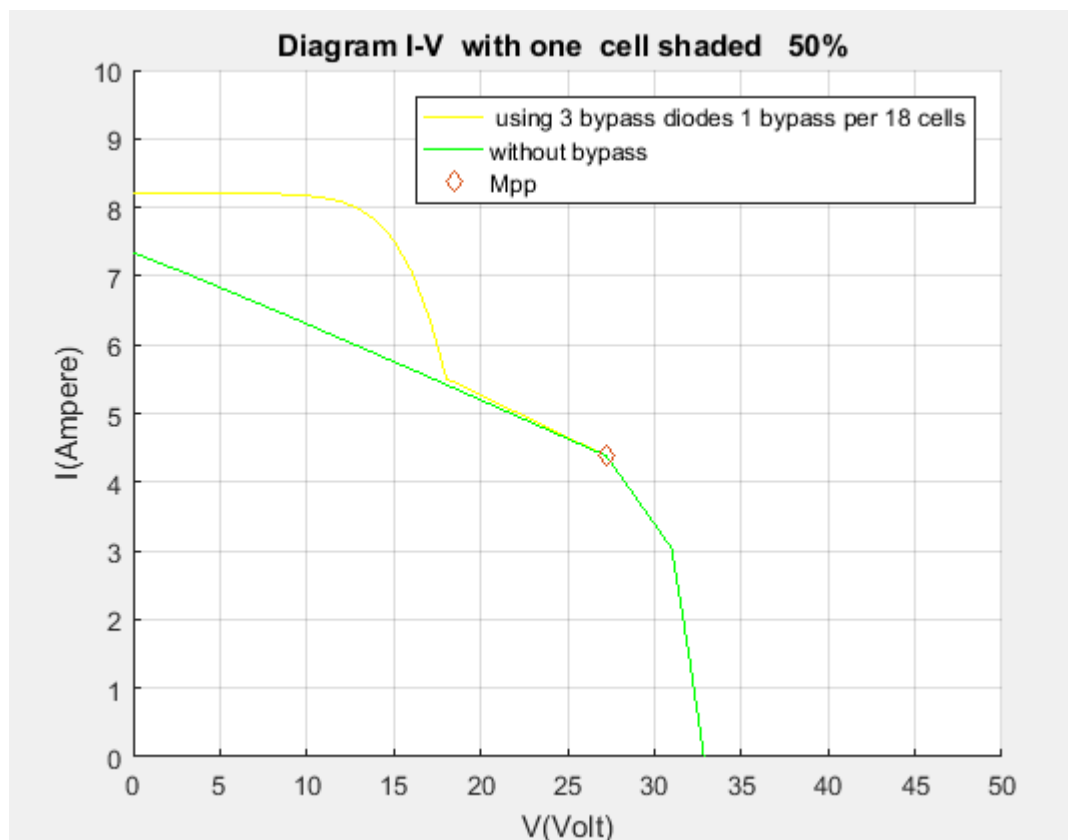


**Σχήμα 5.9:** Διάγραμμα I-V για φωτοβολταϊκό 54 κελιών με τη χρήση και χωρίς τη χρήση διόδων παράκαμψης για 100% σκίαση κελιού



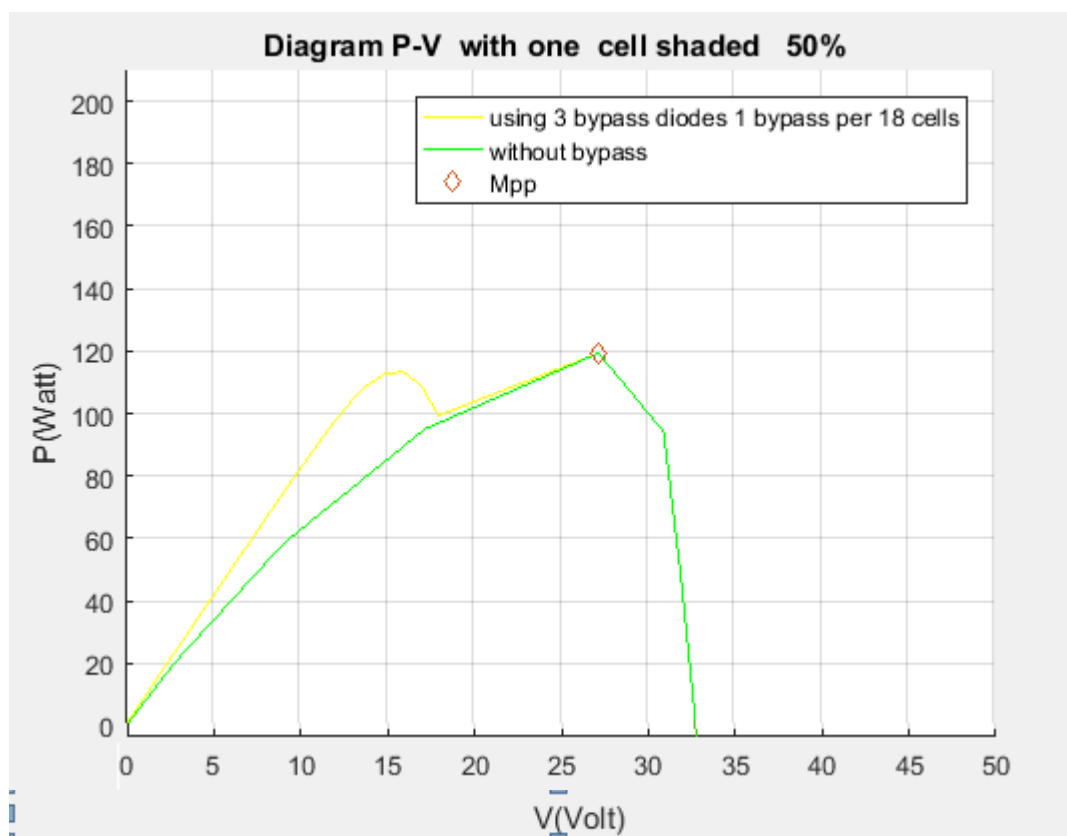
**Σχήμα 5.10:** Διάγραμμα P-V για φωτοβολταϊκό 54 κελιών με τη χρήση και χωρίς τη χρήση διόδων παράκαμψης για 100% σκίαση κελιού

Η μέγιστη ισχύς όταν δεν υπάρχει σκίαση στο φωτοβολταϊκό είναι 195,3W. Όταν υπάρχει σκίαση ενός κελιού κατά 100% χωρίς τη χρήση διόδων παράκαμψης τότε η μέγιστη ισχύς είναι 29,1W και όταν χρησιμοποιούνται δίοδοι παράκαμψης τότε η μέγιστη ισχύς ισούται με 113,2W. Παρατηρείται ότι όταν χρησιμοποιούνται δίοδοι παράκαμψης διατηρούνται περίπου τα δύο τρίτα της συνολικής ισχύος εξόδου. Εάν δε χρησιμοποιούνται δίοδοι παράκαμψης τότε η ισχύς εξόδου μειώνεται περίπου κατά τρία τέταρτα της αρχικής ισχύος. Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα I-V, P-V για τη περίπτωση σκίασης ενός κελιού κατά 50%:



**Σχήμα 5.11:** Διάγραμμα I-V για φωτοβολταϊκό 54 κελιών με τη χρήση και χωρίς τη χρήση διόδων παράκαμψης για 50% σκίαση κελιού



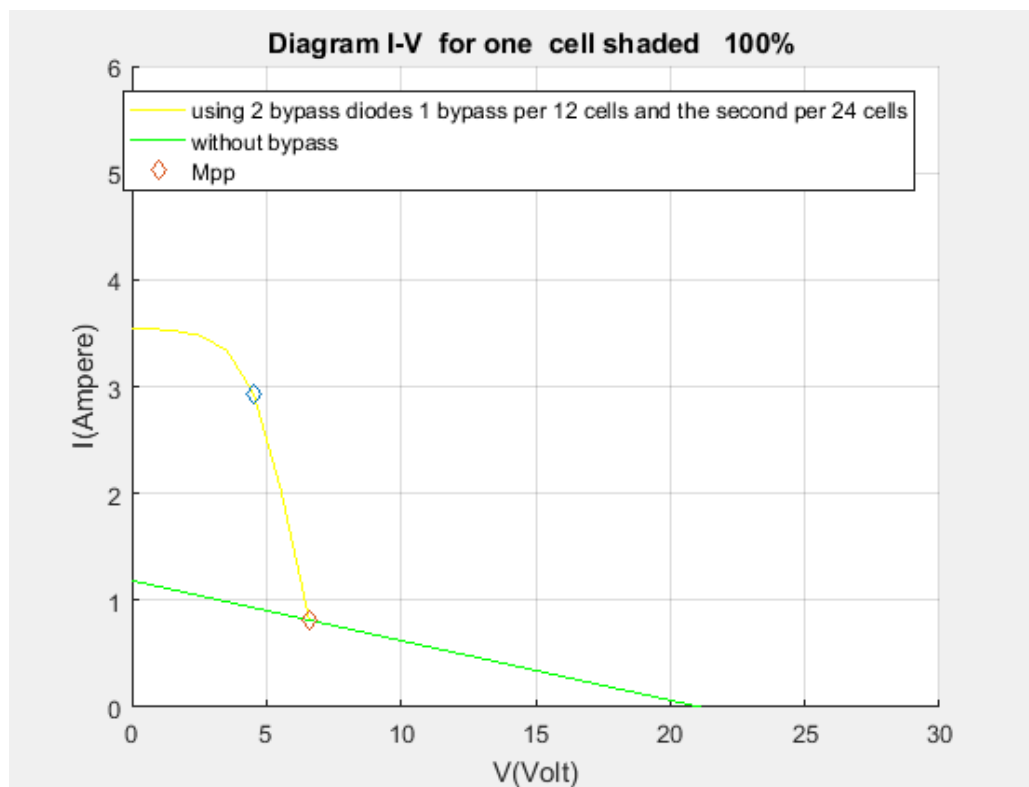


**Σχήμα 5.12:** Διάγραμμα P-V για φωτοβολταϊκό 54 κελιών με τη χρήση και χωρίς τη χρήση διόδων παράκαμψης για 50% σκίαση κελιού

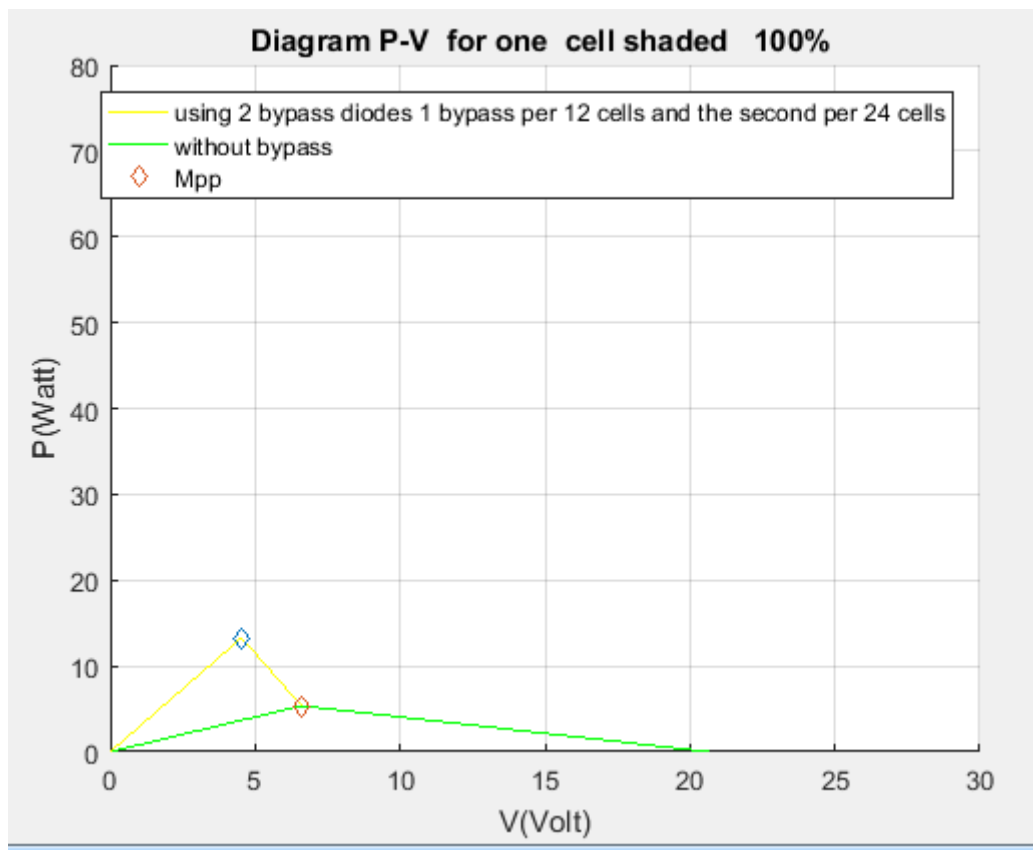
Η μέγιστη ισχύς χωρίς τη χρήση διόδων παράκαμψης είναι 119,3W ίση δηλαδή και με τη χρήση διόδων παράκαμψης. Αυτό συμβαίνει γιατί η τάση  $V$  με τη χρήση των διόδων παράκαμψης γίνεται μικρότερη από τη τάση χωρίς τη χρήση της διόδου παράκαμψης πριν η τιμή της τάσης χωρίς τη χρήση της διόδου παράκαμψης γίνει ίση με τη  $V_{mpp}$  (Η τιμή της τάσης που αντιστοιχεί σε μέγιστη ισχύ). Επομένως τελικά η τάση  $V$  γίνεται ίση με τη τάση χωρίς τη χρήση της διόδου παράκαμψης πριν τη τιμή της τάσης που αντιστοιχεί σε σημείο μέγιστης ισχύος. Άρα η μέγιστη ισχύς με την χρήση διόδου παράκαμψης παίρνει την ίδια τιμή με τη τιμή της μέγιστης ισχύος χωρίς την χρήση της διόδου παράκαμψης.

## **5.6 ΧΡΗΣΗ ΔΙΟΔΩΝ ΠΑΡΑΚΑΜΨΗΣ ΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ 36 ΚΕΛΙΩΝ**

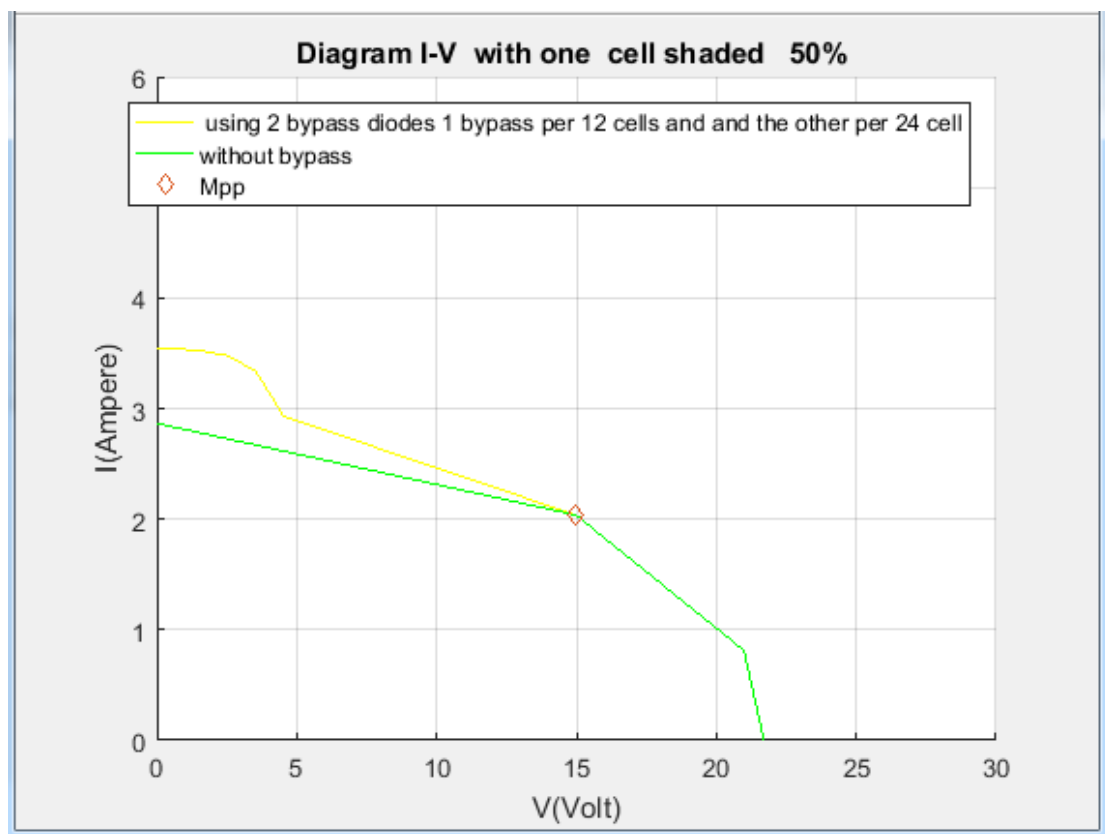
Μελετήθηκε φωτοβολταϊκό με 36 φωτοβολταϊκά κελιά το οποίο αποτελείται από 3 σειρές των 12 φωτοβολταϊκών κελιών. Το φωτοβολταϊκό που μελετήθηκε έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτό που αναφέρεται στη ενότητα 5.4. Η πτώση τάσης της διόδου παράκαμψης Schottky θεωρείται αμελητέα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν δύο διόδοι παράκαμψης για τα 36 κελιά δηλαδή μία διόδος παράκαμψης ανά 12 κελιά και μία δεύτερη για τα υπόλοιπα 24 κελιά. Άρα η πτώση τάσης της δεύτερης διόδου είναι  $24 \times 0,6028 \text{ V} = 14,4672 \text{ V}$ . Άρα η καινούρια τάση ισούται με  $V = V_a - 14,4672 \text{ V}$ . Μελετήθηκαν και οι δύο περιπτώσεις σκίασης η πρώτη για σκίαση 100% ενός κελιού και η δεύτερη για σκίαση ενός κελιού κατά 50%. Τα αντίστοιχα διαγράμματα P-V, I-V για το φωτοβολταϊκό φαίνονται παρακάτω:



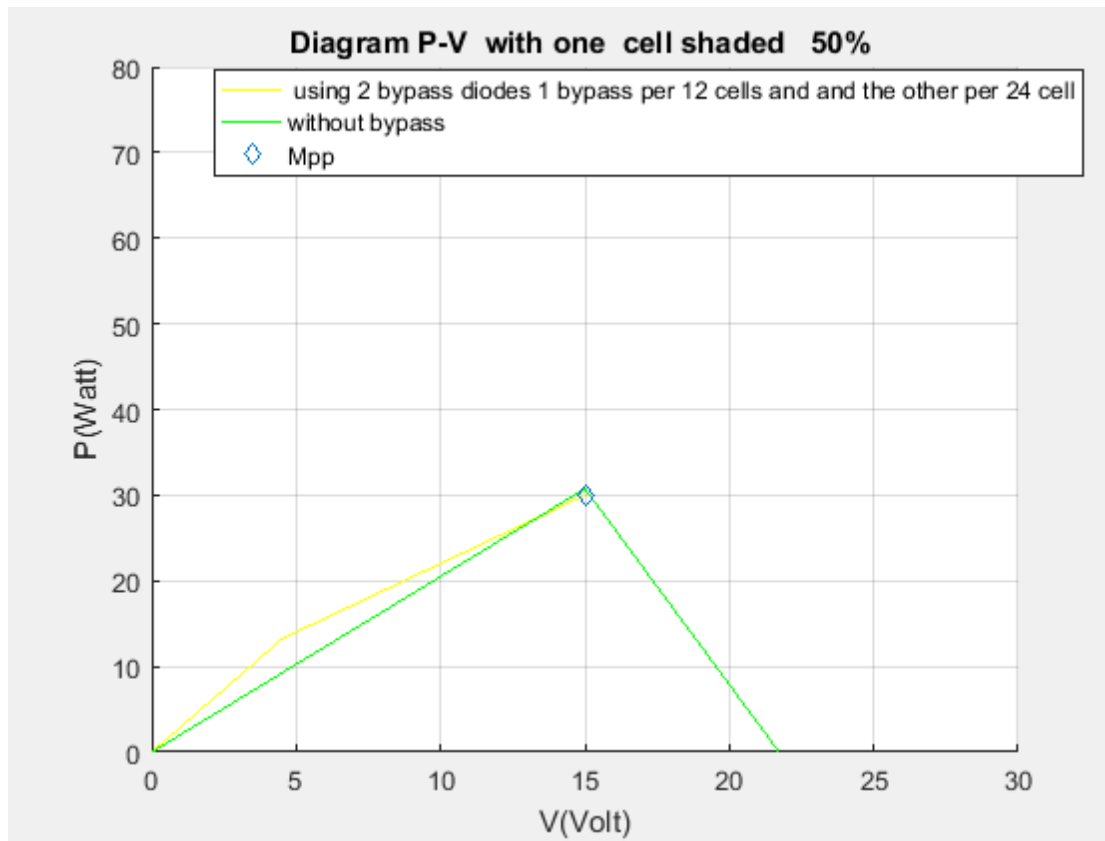
**Σχήμα 5.13:** Διάγραμμα I-V για φωτοβολταϊκό 36 κελιών με τη χρήση και χωρίς τη χρήση διόδων παράκαμψης για 100% σκίαση κελιού



**Σχήμα 5.14:** Διάγραμμα P-V για φωτοβολταϊκό 36 κελιών με τη χρήση και χωρίς τη χρήση διόδων παράκαμψης για 100% σκίαση κελιού



**Σχήμα 5.15:** Διάγραμμα I-V για φωτοβολταϊκό 36 κελιών με τη χρήση και χωρίς τη χρήση διόδων παράκαμψης για 50% σκίαση κελιού



**Σχήμα 5.16:** Διάγραμμα P-V για φωτοβολταϊκό 36 κελιών με τη χρήση και χωρίς τη χρήση διόδων παράκαμψης για 50% σκίαση κελιού

Η μέγιστη ισχύς για το φωτοβολταϊκό όταν δεν σκιάζεται είναι  $P_{mpp}=60,1058\text{ W}$ . Όταν υπάρχει σκίαση 100% σε ένα κελί χωρίς τη χρήση διόδου παράκαμψης η μέγιστη ισχύς ισούται με  $P_{mpp}=5,3621\text{ W}$  ενώ με τη χρήση διόδου παράκαμψης η μέγιστη ισχύς ισούται με  $P_{mpp}=13,2814\text{ W}$ . Παρατηρείται όταν χρησιμοποιούνται διόδοι παράκαμψης για τη περίπτωση της σκίασης 100% ενός κελιού διατηρείται περίπου το ένα πέμπτο της συνολικής ισχύος εξόδου. Εάν δε χρησιμοποιούνται διόδοι παράκαμψης τότε η ισχύς διατηρεί περίπου το ένα δέκατο της αρχικής ισχύος. Για σκίαση 50% ενός κελιού η μέγιστη ισχύς τόσο με τη χρήση διόδων παράκαμψης όσο και με τη μη χρήση τους είναι  $P_{mpp}=30,2255\text{ W}$ . Αυτό όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω συμβαίνει γιατί η τάση  $V$  με τη χρήση των διόδων παράκαμψης γίνεται μικρότερη από τη τάση χωρίς τη χρήση της διόδου παράκαμψης πριν η τιμή της τάσης χωρίς τη χρήση της διόδου παράκαμψης γίνει ίση με  $V_{mpp}$  (Η τιμή της τάσης που αντιστοιχεί σε μέγιστη ισχύ) .

## **6.ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ 36 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΕΛΙΩΝ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ**

### **6.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ 36 ΚΕΛΙΩΝ**

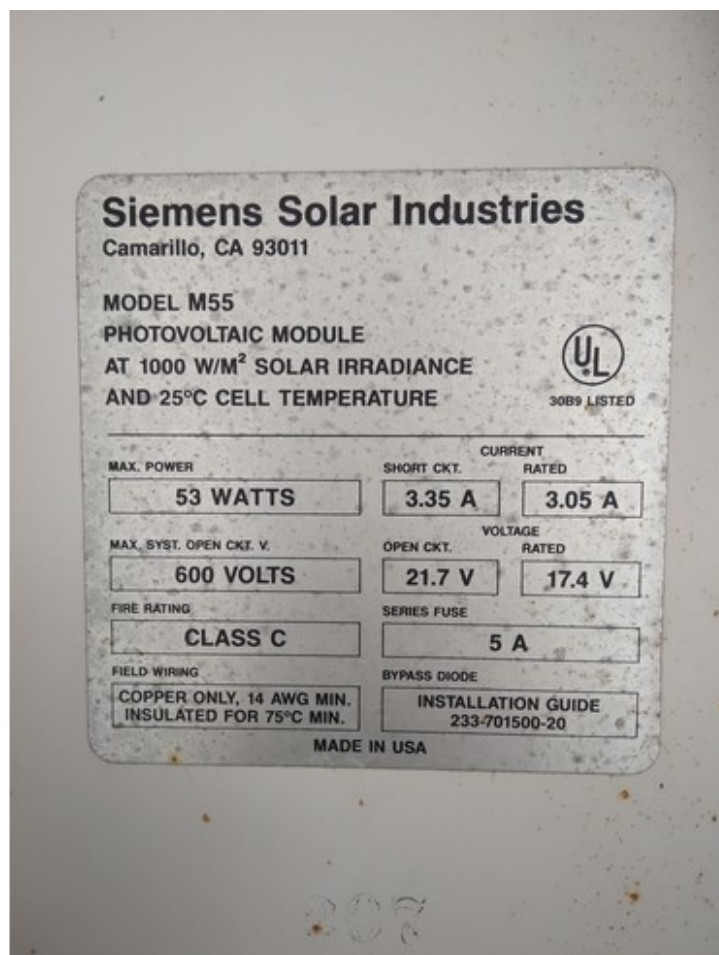
Για τις πειραματικές μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος του φωτοβολταϊκού χρησιμοποιήθηκε ένα ποτενσιόμετρο και ένα αμπερόμετρο για να υπολογιστούν οι τιμές της τάσης και του ρεύματος για συγκεκριμένες τιμές αντιστάσεων. Το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό αποτελείται από τρεις σειρές των δώδεκα φωτοβολταϊκών κελιών η κάθε μία. Η μπροστινή όψη του φωτοβολταϊκού όπου για το οποίο έγιναν οι πειραματικές μετρήσεις φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 6.1:** Μπροστινή όψη φωτοβολταϊκού 36 φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό για STC συνθήκες έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

$V_{oc}=21,7\text{ V}$  ,  $I_{sc}=3,55\text{ A}$  ,  $P_{mpp}=53\text{ W}$  ,  $I_{mpp}=3,05\text{ A}$  ,  $V_{mpp}=17,4\text{ V}$  τα οποία αναγράφονται και στη πίσω όψη του φωτοβολταϊκού. Η πίσω όψη του φωτοβολταϊκού φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 6.2:** Πίσω όψη του φωτοβολταϊκού 36 φωτοβολταϊκών στοιχείων

Για τις πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ένα θερμόμετρο για να διευκρινιστεί η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού και ένα φωτόμετρο προκειμένου να διευκρινιστεί η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας. Το

φωτόμετρο μετράει τη φωτεινή ισχύ σε lux. Το lux (σύμβολο: lx) είναι η μονάδα SI του φωτισμού που μετράει την φωτεινή ισχύ ανά περιοχή. Τα παρακάτω όργανα φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:



**Σχήμα 6.3:** Lightmeter LX-1102 για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας.





**Σχήμα 6.4:** Θερμόμετρο για τη μέτρηση θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού.

## **6.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ I-V, P-V ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΗ ΣΚΙΑΣΗΣ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ**

Η συγκεκριμένη μέτρηση έγινε για ηλιακή ακτινοβολία  $G=643 \text{ W/m}^2$  και για θερμοκρασία λειτουργίας της κυψελίδας  $T_{pv}=51,5^\circ\text{C}$

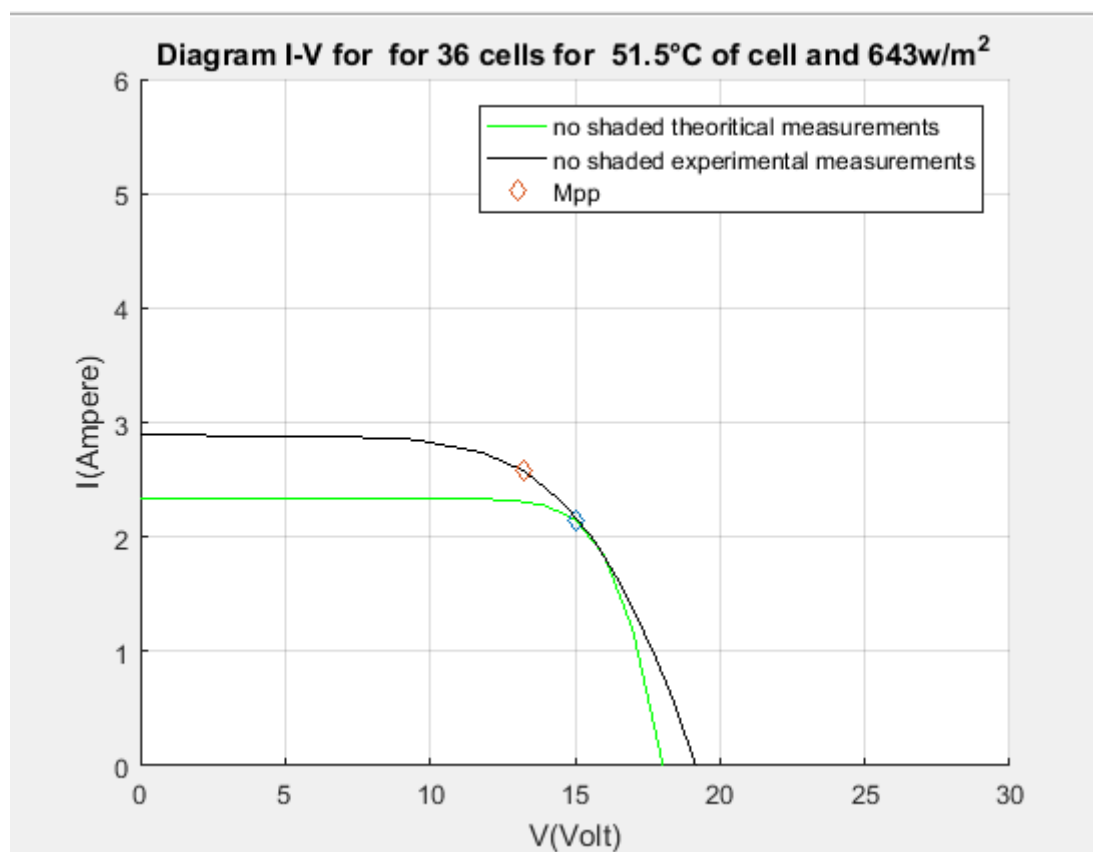
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος του φωτοβολταϊκού. Ακόμα μέσω αυτών των τιμών υπολογίζεται και η ισχύς του φωτοβολταϊκού.

**Πίνακας 6.1:** Πειραματικές μετρήσεις τάσης ρεύματος ισχύος για φωτοβολταϊκό χωρίς σκίαση.

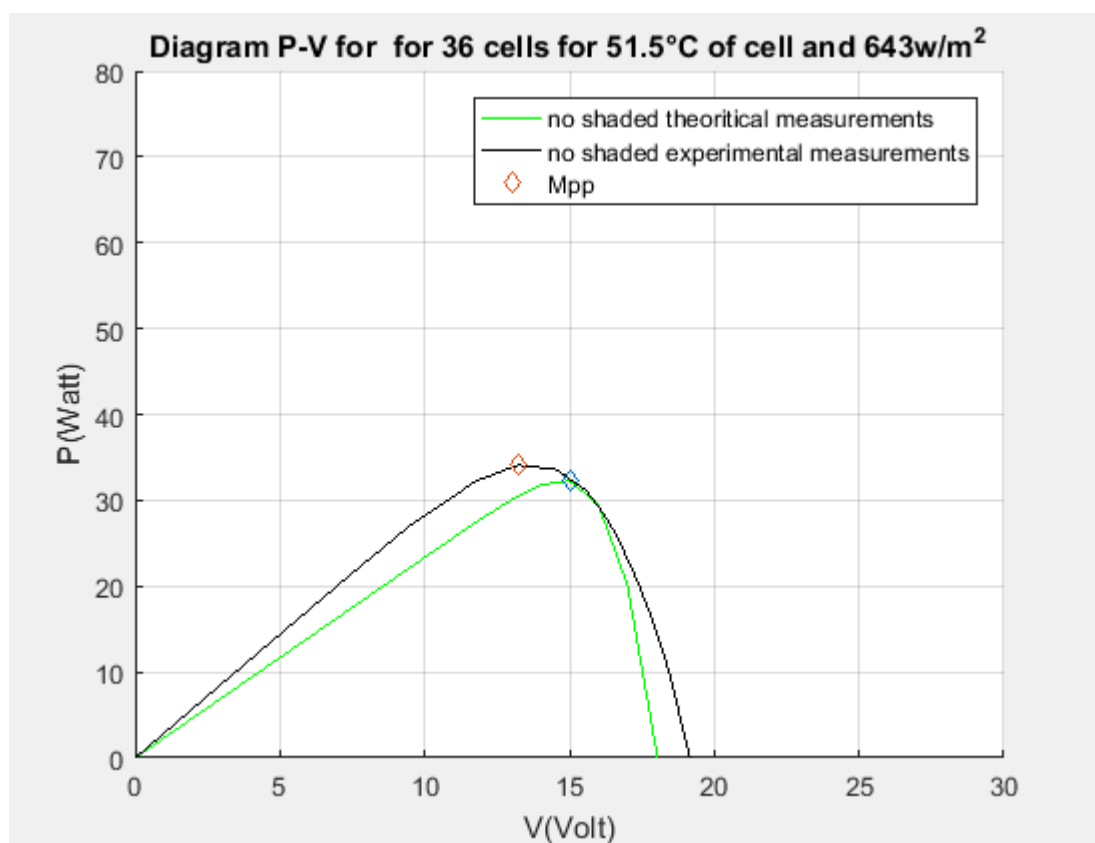
V(V)	I(A)	P(W)
0	2,89	0
1,26	2,89	3,6414
4,1	2,88	11,808
7,53	2,87	21,6111
9,48	2,85	27,018
11,76	2,74	32,2224
13,22	2,58	34,1076
14,54	2,31	33,5874
15,57	2	31,14
16,03	1,82	29,1746
16,4	1,66	27,224
16,72	1,51	25,2472
17,22	1,25	21,525
17,41	1,15	20,0215
17,61	1,04	18,3144
17,79	0,94	16,7226
18,07	0,77	13,9139
18,27	0,65	11,8755
18,45	0,53	9,7785
18,57	0,44	8,1708
19,17	0	0

Στο παραπάνω πίνακα η τρίτη στήλη προκύπτει πολλαπλασιάζοντας τις αντίστοιχες τιμές των τάσεων και των ρευμάτων.

Σύμφωνα με τις πειραματικές και τις θεωρητικές τιμές προκύπτουν τα εξής διαγράμματα P-V, I-V.



**Σχήμα 6.5:** Διάγραμμα I-V για φωτοβολταϊκό χωρίς σκίαση, σύγκριση θεωρητικές με πειραματικές τιμές



**Σχήμα 6.6:** Διάγραμμα P-V για φωτοβολταϊκό χωρίς σκίαση ,σύγκριση θεωρητικές με πειραματικές τιμές

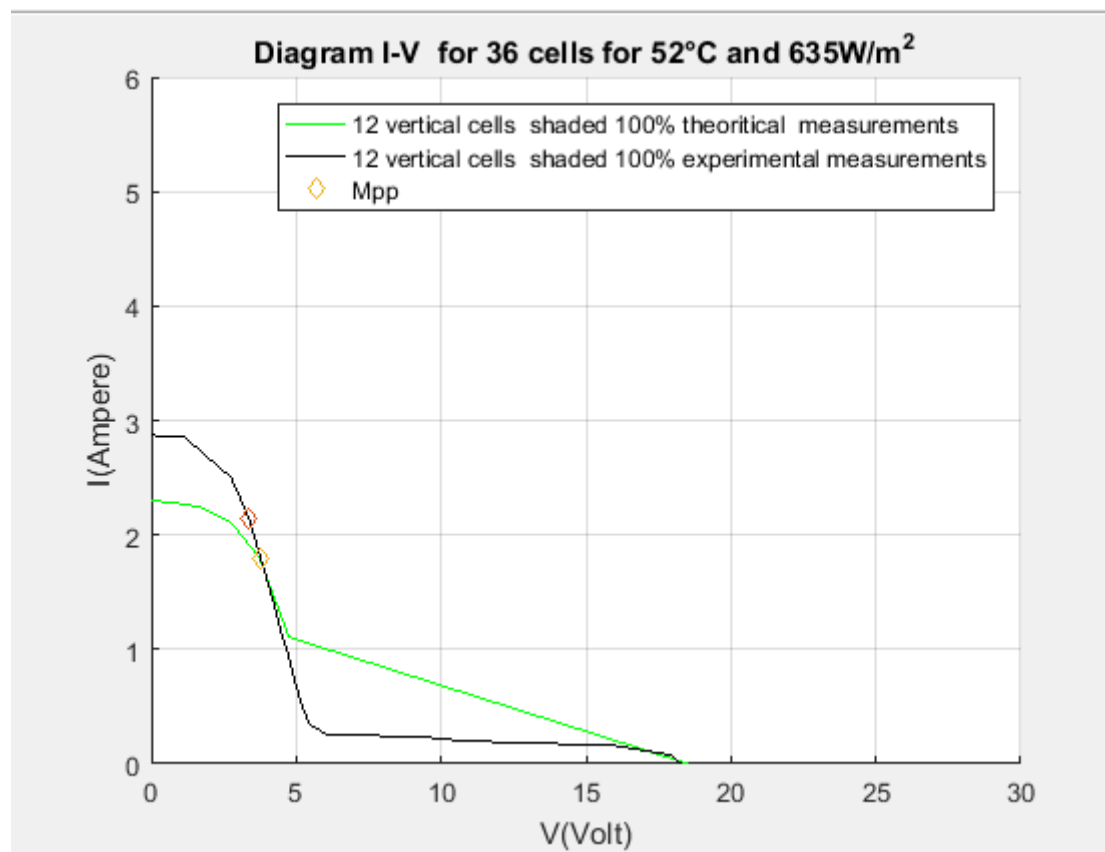
### **6.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ I-V, P-V ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΟΛΙΚΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ 12 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΕΛΙΩΝ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ**

Σε περίπτωση σκίασης των 12 κατακόρυφων φωτοβολταϊκών κελιών δηλαδή μιας στήλης του φωτοβολταϊκού για ηλιακή ακτινοβολία  $G=635 \text{ W/m}^2$  και θερμοκρασία κυψελίδας  $T_{pv}=52,0^\circ \text{C}$  οι αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις του I και V φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

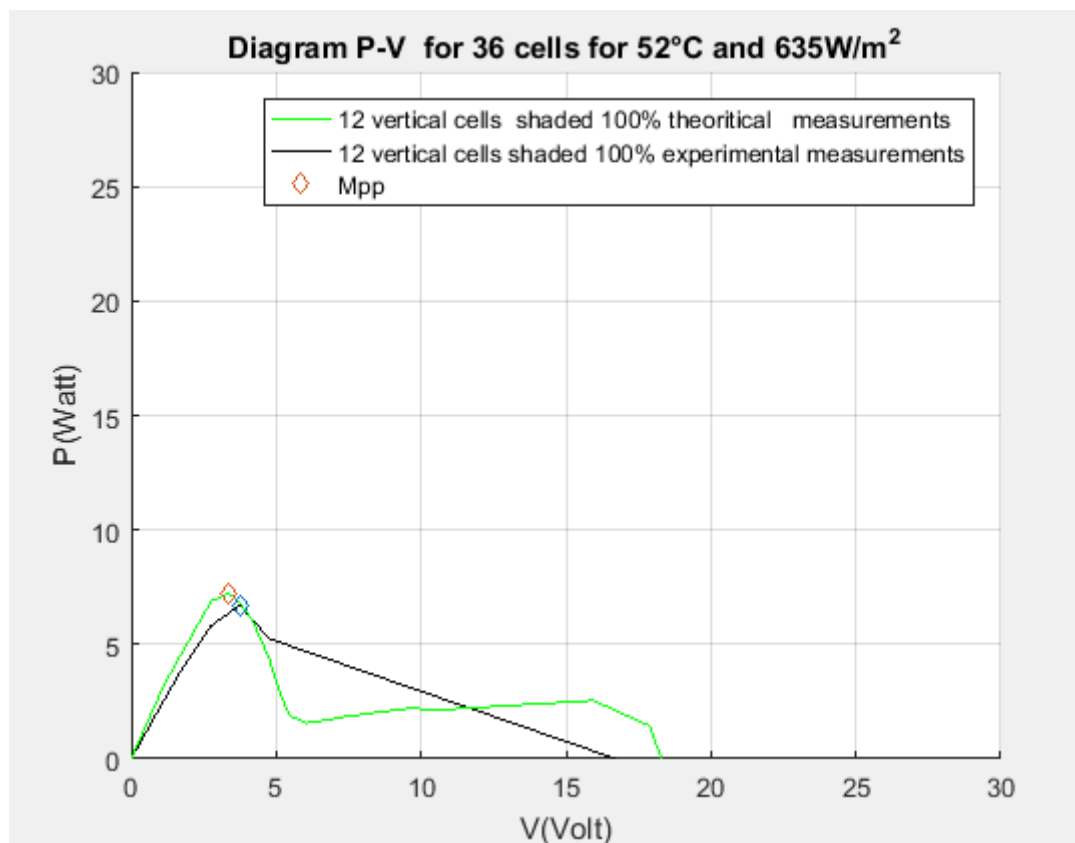
**Πίνακας 6.2:** Πειραματικές μετρήσεις τάσης ρεύματος ισχύος για φωτοβολταϊκό με σκίαση 12 κατακόρυφων κελιών

V(V)	I(A)	P(W)
0	2,87	0
1,12	2,86	3,2032
2,76	2,5	6,9
3,36	2,15	7,224
3,69	1,87	6,9003
4,18	1,45	6,061
4,47	1,16	5,1852
4,72	0,96	4,5312
4,94	0,74	3,6556
5,12	0,58	2,9696
5,25	0,48	2,52
5,41	0,37	2,0017
5,55	0,33	1,8315
6,04	0,26	1,5704
6,93	0,25	1,7325
7,36	0,25	1,84
8,35	0,24	2,004
9,58	0,23	2,2034
10,75	0,2	2,15
15,94	0,16	2,5504
17,9	0,08	1,432
18,08	0,04	0,7232
18,3	0	0

Σύμφωνα με το παραπάνω πίνακα και τις θεωρητικές μετρήσεις προκύπτουν τα εξής P-V, I-V διαγράμματα:



**Σχήμα 6.7:** Διάγραμμα I-V για φωτοβολταϊκό με σκίαση δώδεκα κατακόρυφων κελιών, σύγκριση θεωρητικές με πειραματικές τιμές



**Σχήμα 6.8:** Διάγραμμα P-V για φωτοβολταϊκό με σκίαση δώδεκα κατακόρυφων κελιών, σύγκριση θεωρητικές με πειραματικές τιμές



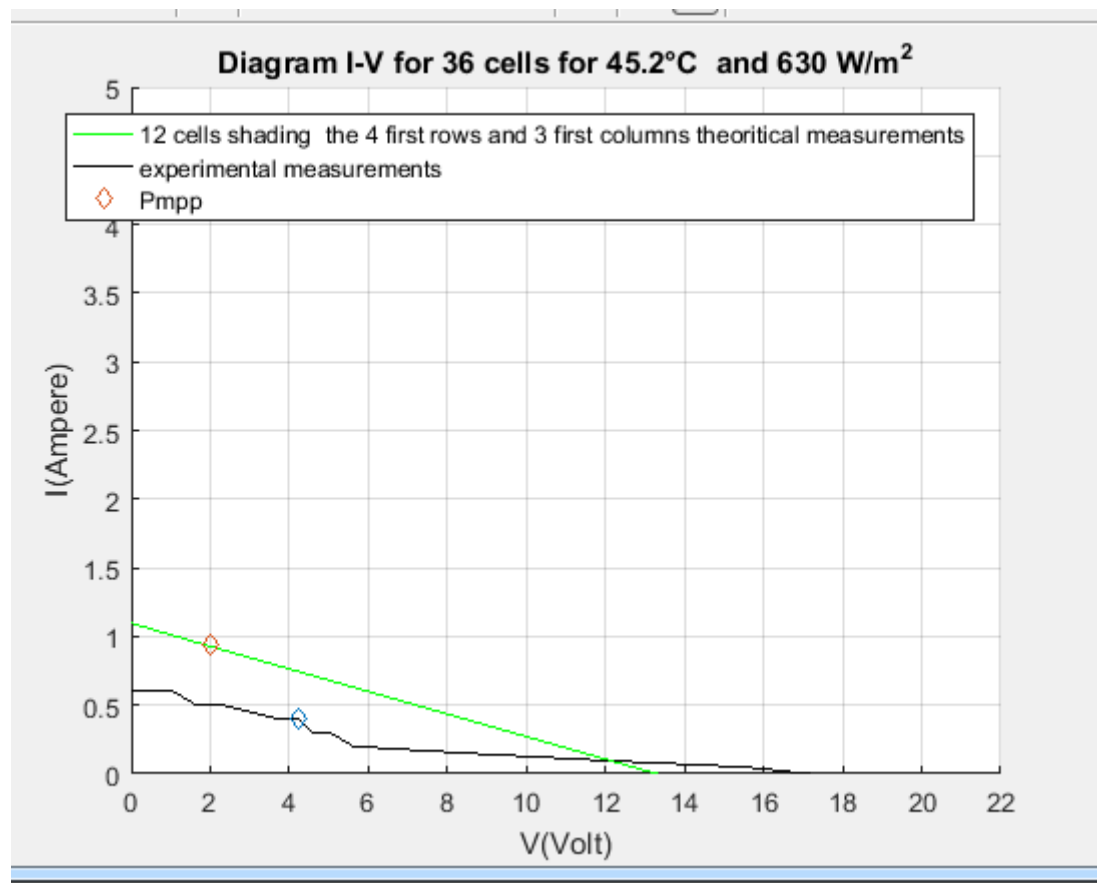
#### **6.4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ I-V, P-V ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΣΚΙΑΣΗΣ ΤΩΝ 4 ΠΡΩΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ 3 ΠΡΩΤΩΝ ΣΤΗΛΩΝ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ - ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ**

Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε σκίαση 12 φωτοβολταϊκών κελιών των πρώτων 4 γραμμών και των πρώτων 3 στηλών από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η ηλιακή ακτινοβολία είναι  $G=630 \text{ W/m}^2$  και η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού είναι  $T_{pv}=45,2^\circ \text{C}$ . Οι πειραματικές μετρήσεις του I και V καταγράφονται στο παρακάτω πίνακα:

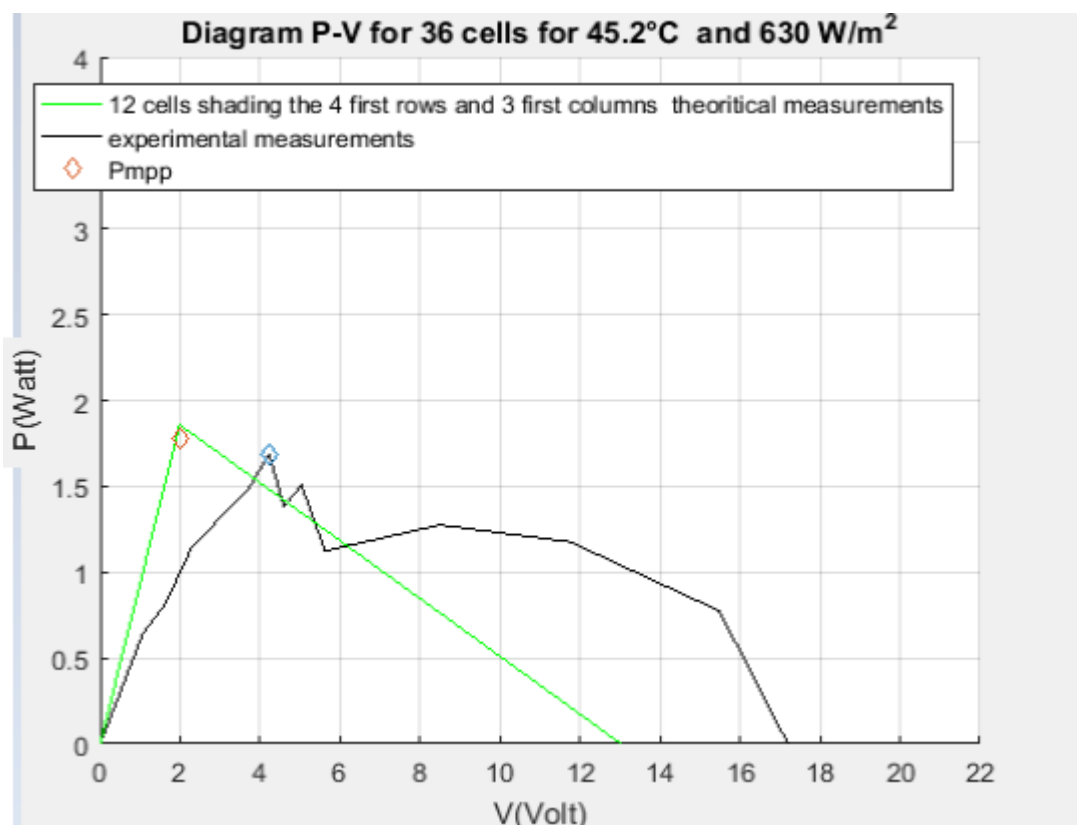
**Πίνακας 6.3:** Πειραματικές μετρήσεις τάσης ρεύματος ισχύος για φωτοβολταϊκό με σκίαση των τεσσάρων πρώτων γραμμών και τριών πρώτων στηλών

V(V)	I(A)	P(W)
0	0,6	0
0,13	0,6	0,078
0,36	0,6	0,216
0,78	0,6	0,468
1,07	0,6	0,642
1,64	0,5	0,82
2,3	0,5	1,15
3,7	0,4	1,48
4,22	0,4	1,688
4,6	0,3	1,38
5,03	0,3	1,509
5,62	0,2	1,124
8,5	0,15	1,275
11,76	0,1	1,176
15,48	0,05	0,774
17,2	0	0

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα προκύπτουν τα εξής P-V, I-V διαγράμματα:



**Σχήμα 6.9:** Διάγραμμα I-V για φωτοβολταϊκό με σκίαση των τεσσάρων πρώτων γραμμών και τριών πρώτων στηλών, σύγκριση θεωρητικές με πειραματικές τιμές.



**Σχήμα 6.10:** Διάγραμμα P-V για φωτοβολταϊκό με σκίαση των τεσσάρων πρώτων γραμμών και τριών πρώτων στηλών, σύγκριση θεωρητικές με πειραματικές τιμές.

Παρατηρείται ότι για σκίαση των πρώτων τεσσάρων γραμμών και των τριών πρώτων στηλών του φωτοβολταϊκού τα αποτελέσματα της σκίασης είναι αρκετά χειρότερα από τη σκίαση δώδεκα κατακόρυφων κελιών. Η μέγιστη ισχύς σύμφωνα με τις πειραματικές μετρήσεις για σκίαση δώδεκα

κατακόρυφων κελιών είναι  $P_{mpp}=7,224\text{ W}$  ενώ για σκίαση των τριών πρώτων γραμμών και τεσσάρων πρώτων στηλών του φωτοβολταϊκού είναι  $P_{mpp}=1,688\text{ W}$ .

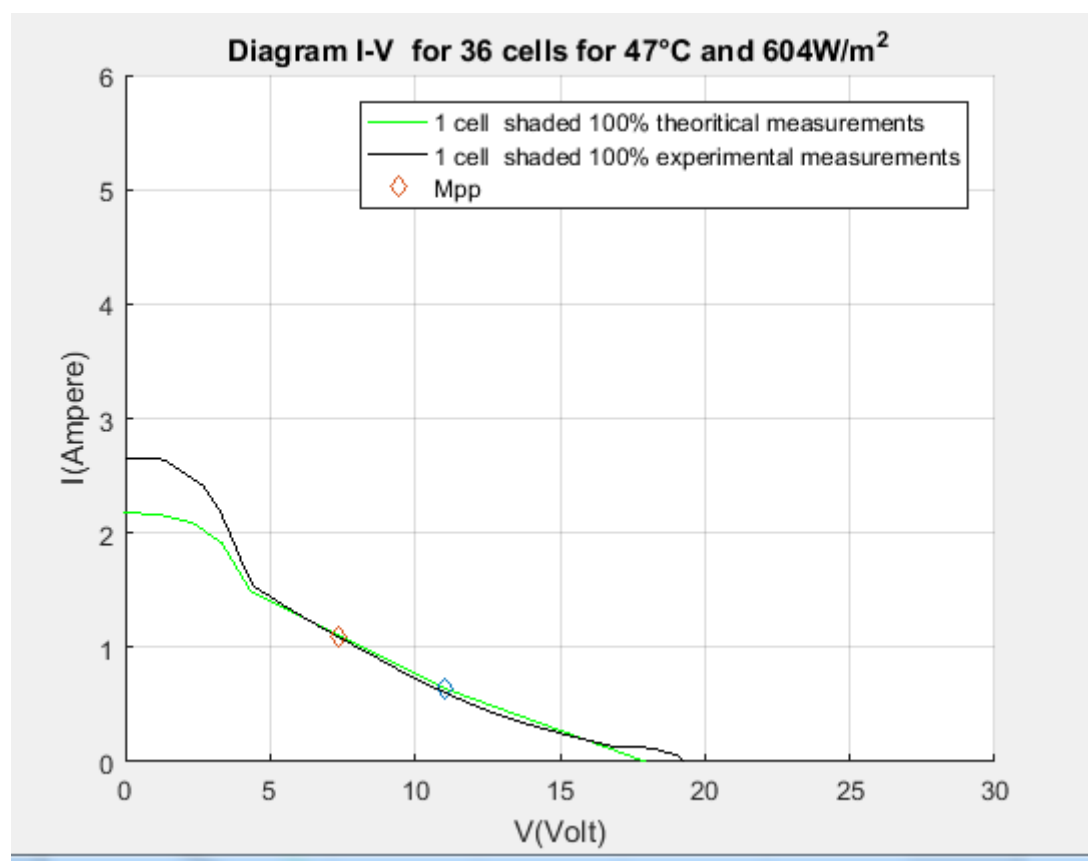
### **6.5 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ I-V, P-V ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΣΚΙΑΣΗΣ ΜΟΝΟ ΕΝΟΣ ΚΕΛΙΟΥ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ**

Στη συγκεκριμένη περίπτωση υφίσταται σκίαση ενός μόνο κελιού. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι  $G=604\text{ W/m}^2$  και η θερμοκρασία φωτοβολταϊκού είναι  $T_{pv}=47^\circ\text{C}$ . Ο πίνακας τιμών φαίνεται παρακάτω:

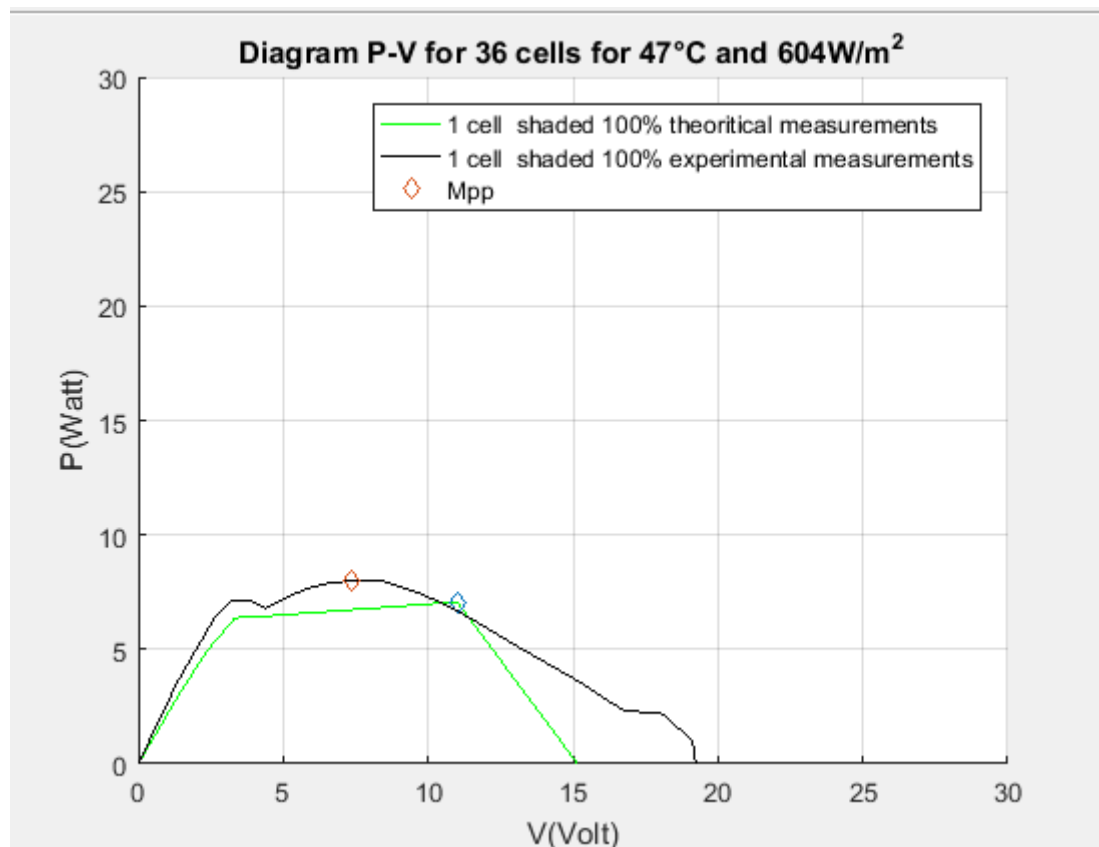
**Πίνακας 6.4:** Πειραματικές μετρήσεις τάσης ρεύματος ισχύος για φωτοβολταϊκό με σκίαση ενός κελιού

V(V)	I(A)	P(W)
0	2,65	0
1,09	2,65	2,8885
1,41	2,63	3,7083
2,66	2,42	6,4372
3,25	2,2	7,15
3,81	1,88	7,1628
4,01	1,75	7,0175
4,41	1,54	6,7914
5,32	1,39	7,3948
5,84	1,31	7,6504
6,45	1,22	7,869
7,35	1,09	8,0115
8,47	0,94	7,9618
9,46	0,8	7,568
10,15	0,71	7,2065
10,9	0,62	6,758
11,78	0,52	6,1256
12,88	0,41	5,2808
13,85	0,33	4,5705
15,31	0,23	3,5213
16,72	0,14	2,3408
18,14	0,12	2,1768
19,13	0,05	0,9565
19,18	0,02	0,3836
19,25	0	0

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα και τις θεωρητικές μετρήσεις προκύπτουν τα εξής P-V, I-V διαγράμματα:



**Σχήμα 6.11:** Διάγραμμα I-V για φωτοβολταϊκό με σκίαση ενός κελιού, σύγκριση θεωρητικές με πειραματικές τιμές.



**Σχήμα 6.12:** Διάγραμμα P-V για φωτοβολταϊκό με σκίαση ενός κελιού, σύγκριση θεωρητικές με πειραματικές τιμές.

Τα αντίστοιχα διαγράμματα P-V, I-V τόσο για τις πειραματικές μετρήσεις όσο και για τις θεωρητικές μετρήσεις μοιάζουν κατά πολύ μεταξύ τους όμως δεν είναι ίδια. Οι μικρές διαφορές τους ίσως οφείλονται στο γεγονός της αστοχίας των οργάνων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν. Ακόμα μια ακόμα αιτία στη διαφοροποίηση των θεωρητικών από των πειραματικών διαγραμμάτων οφείλεται στη έντονη σκόνη και υγρασία στην ατμόσφαιρα την ημέρα την οποία γίνανε οι μετρήσεις. Επιπλέον το φωτοβολταϊκό το οποίο μελετήθηκε ήταν μεγάλης ηλικίας και αυτό επηρέασε επίσης τη διαφοροποίηση των θεωρητικών από τα πειραματικά διαγράμματα.

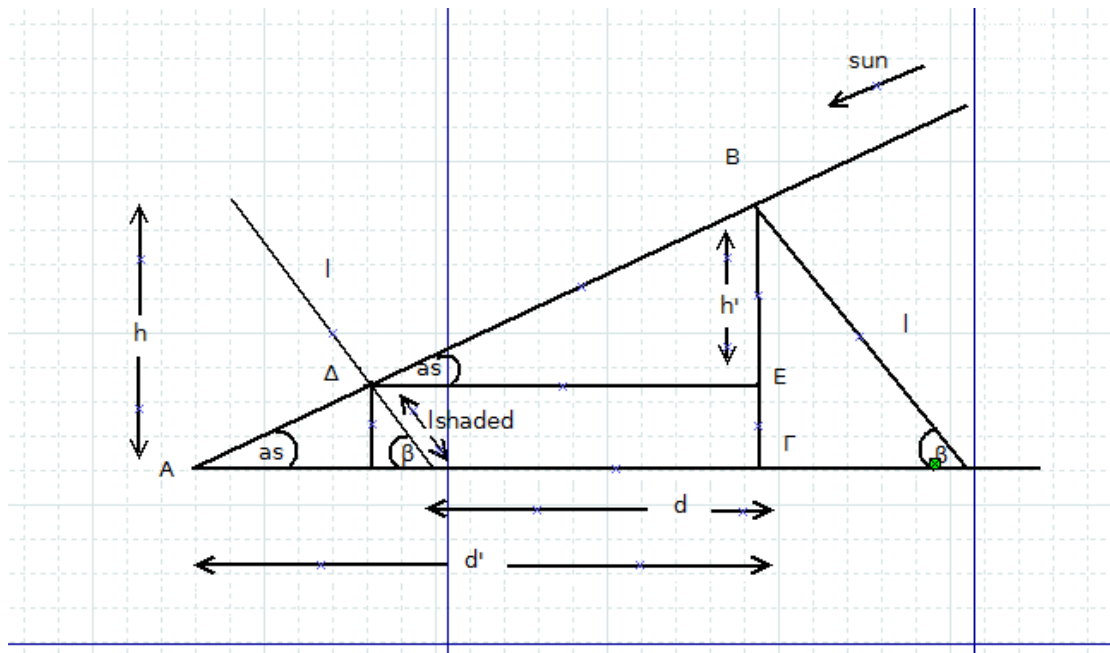


## 7.ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΣΚΙΑΣΗΣ ΑΠΟ ΑΛΛΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ

### 7.1 ΜΕΛΕΤΗ ΠΟΣΟΤΟΥ ΣΚΙΑΣΗΣ ΣΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΑΠΟ ΑΛΛΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ

Έστω φωτοβολταϊκό πλαίσιο το οποίο έχει μήκος  $l$ . Το φωτοβολταϊκό βρίσκεται σε κλίση  $\beta$  από το έδαφος. Στη περίπτωση που υπάρχει σε απόσταση  $d$  από το φωτοβολταϊκό άλλο φωτοβολταϊκό θα εξεταστεί πότε υπάρχει σκίαση στο πρώτο φωτοβολταϊκό και σε τι ποσοστό. Οι διαστάσεις του συγκεκριμένου φωτοβολταϊκού για το οποίο έγινε η μελέτη είναι  $33\text{cm} \times 129,5\text{cm}$  η κλίση του από το έδαφος  $\beta = 30^\circ$  και η μέγιστη απόσταση του από το έδαφος ορίζεται ως  $h$ . Επιπλέον το φωτοβολταϊκό έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

$V_{oc} = 21,7\text{ V}$ ,  $I_{sc} = 3,55\text{ A}$ ,  $P_{mpp} = 53\text{ W}$ ,  $I_{mpp} = 3,05\text{ A}$ ,  $V_{mpp} = 17,4\text{ V}$  για STC συνθήκες. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το μήκος του φωτοβολταϊκού  $l$  και οι αποστάσεις  $d, d', h, h', l_{shaded}$  οι γωνίες κλίσης  $\beta$  και οι γωνίες ύψους του ήλιου  $\alpha$  για τα δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια.



**Σχήμα 7.1:** Γεωμετρία των φωτοβολταϊκών στο χώρο

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα για να μη σκιάζεται το ένα φωτοβολταϊκό από το άλλο πρέπει να ισχύει:  $as > \arctan \frac{h}{d}$ . Άρα για να σκιάζεται το ένα φωτοβολταϊκό από το άλλο πρέπει να ισχύει :

$$as \leq \arctan \frac{h}{d} \quad (7.1).$$

Για να υπολογιστεί το ποσοστό σκίασης του φωτοβολταϊκού αρκεί να υπολογιστεί το μήκος  $l_{shaded}$  το οποίο είναι το μήκος του φωτοβολταϊκού το οποίο σκιάζεται. Ισχύει ότι  $h = l \cdot \sin \beta$ . Η εφαπτομένη της γωνίας ύψους του ήλιου  $as$  από το τρίγωνο  $AB\Gamma$  ισούται με  $\tan as = \frac{h}{d'}$ . Άρα  $d' = \frac{h}{\tan as}$ . Επειδή υπάρχει σκίαση προφανώς ισχύει ότι  $d' > d$ . Επειδή τα τρίγωνα  $AB\Gamma$  και  $\Delta BE$  είναι όμοια ισχύει ότι  $\frac{h'}{h} = \frac{d}{d'} \Rightarrow h' = \frac{hd}{d'}$ . Για το  $h'$  ισχύει ακόμα ότι:

$$h' = h - l_{shaded} \cdot \sin \beta \Rightarrow l_{shaded} = \frac{h - h'}{\sin \beta} \quad (7.2)$$

Στη εξίσωση του  $l_{shaded}$  είναι όλα γνωστά και έτσι μπορεί να υπολογιστεί το  $l_{shaded}$  δηλαδή το μήκος του φωτοβολταϊκού το οποίο είναι σκιασμένο. Μέσω του λόγου

$$\lambda = \frac{l_{shaded}}{l} \quad (7.3)$$

μπορεί να υπολογιστεί το ποσοστό σκίασης του φωτοβολταϊκού από το άλλο φωτοβολταϊκό.

## **7.2 ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ**

Για το υπολογισμό της ενέργειας του φωτοβολταϊκού για μία συγκεκριμένη μέρα απαιτείται η γνώση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και της ακτινοβολίας για κάθε χρονικό διάστημα για παράδειγμα μιας ώρας. Όλα αυτά τα δεδομένα μετρήθηκαν από το μετεωρολογικό γραφείο στο ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ και αφορούν το έτος 2009. Τα δεδομένα αυτά αφορούν τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τη οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία για κάθε ώρα κάθε μέρας για όλες τις μέρες του έτους. Επειδή όμως για το υπολογισμό της ενέργειας του φωτοβολταϊκού χρειάζεται η γνώση της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού απαιτείται η μετατροπή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος σε θερμοκρασία φωτοβολταϊκού. Αυτή η μετατροπή έγινε με τη εξίσωση:

$$T_c = T_a + (NOCT - 20) * G (W/m^2) / 800 W/m^2 (7.4)$$

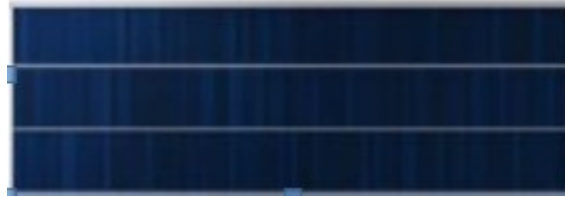
οπού  $T_a$  είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος  $T_c$  η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού και  $G$  η οριζόντια ακτινοβολία. Η θερμοκρασία NOCT για φωτοβολταϊκά πλαίσια έχει ένα μικρό εύρος τιμών και στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται  $NOCT = 48^\circ C$ . Οι συνθήκες στη NOCT (Θερμοκρασία Ονομαστικής Λειτουργικής Κυψέλης) είναι οι εξής:

- Η ακτινοβολία είναι  $800 W/m^2$  η οποία λαμβάνει υπόψη το γεγονός ότι οι φωτοβολταϊκές μονάδες δεν προσανατολίζονται πάντα στον ήλιο. Θεωρεί επίσης ότι οι ατμοσφαιρικές ή γεωγραφικές συνθήκες θα μπορούσαν να μειώσουν την ηλιοφάνεια.
- Οι ηλιακοί συλλέκτες θερμαίνονται σημαντικά κατά τη λειτουργία, οπότε η εξεταζόμενη θερμοκρασία είναι  $45 (+/- 3)^\circ C$ .
- Το φάσμα φωτός είναι το ίδιο με το STC.
- Μελετάται ταχύτητα ανέμου  $1 m/s$ , με αέρα στους  $20^\circ C$

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα όπου η μελέτη αφορά φωτοβολταϊκό με κλίση  $30^\circ$  χρειάζεται ο υπολογισμός της ακτινοβολίας για κλίση  $30^\circ$ . Ο υπολογισμός της ακτινοβολίας για κλίση  $30^\circ$  υπολογίζεται μέσω του προγράμματος Homer. Επιπλέον οι μετρήσεις θερμοκρασίας και ακτινοβολίας οι οποίες έγιναν στο ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ και αφορούν κάθε ώρα των ημερών ενός έτους. Αυτά τα δεδομένα δε είναι αρκετά για το σαφή υπολογισμό της ενέργειας του φωτοβολταϊκού. Για τον πιο σαφή υπολογισμό η μελέτη γίνεται για κάθε δεκάλεπτο του έτους δηλαδή για έξι δεκάλεπτα την ώρα. Το έτος έχει 8760 ώρες δηλαδή  $8760 * 6 = 52650$  δεκάλεπτα. Αυτό το πρόβλημα λύνεται με τη χρήση της γραμμικής παρεμβολής και συγκεκριμένα με τη χρήση της εντολής `interp1` στη `matlab`. Η χρήση της εντολής `interp1` γίνεται τόσο για τη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού όσο και για την ακτινοβολία με κλίση  $30^\circ$ . Με τη χρήση της εντολής `interp1` επιτυγχάνεται για κάθε δεκάλεπτο για το οποίο δε είναι γνωστή η θερμοκρασία και η ακτινοβολία υπό κλίση  $30^\circ$  να υπολογίζεται μια προσεγγιστική κοντινή τιμή ανάμεσα στη τιμή της προηγούμενης και της επόμενης ώρας. Έτσι με τις τιμές θερμοκρασίας και ακτινοβολίας για κάθε δεκάλεπτο της ώρας μπορεί να γίνει ο υπολογισμός της ενέργειας του φωτοβολταϊκού για συγκεκριμένες μέρες. Ο υπολογισμός της ενέργειας του φωτοβολταϊκού έγινε για τρία διαφορετικά σενάρια τα οποία θα αναλυθούν στις επόμενες ενότητες.

### **7.3 ΣΕΝΑΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΤΗΣΙΑΣ ΚΑΙ ΗΜΕΡΙΣΙΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΣΚΙΑΣΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΩΝ ΣΕΙΡΩΝ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ**

Στο συγκεκριμένο σενάριο το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι τοποθετημένο έτσι ώστε να σκιάζεται κατά μήκος των σειρών του από το άλλο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Αυτό σημαίνει ότι ως μήκος  $l$  του φωτοβολταϊκού πλαισίου θεωρείται η μικρή διάσταση του φωτοβολταϊκού δηλαδή  $l = 33\text{ cm}$ . Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι δηλαδή τοποθετημένο με τη μεγάλη πλευρά προς τα κάτω όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 7.2:** Τοποθέτηση φωτοβολταϊκού πλαισίου με τη μεγάλη διάσταση προς τα κάτω.

Οι αποστάσεις μεταξύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων για τις οποίες υπολογίστηκαν τα ποσοστά σκίασης είναι για  $d=2*h$ ,  $d=h$  και  $d=1,5*h$ . Σύμφωνα με τη μεθοδολογία όπου αναλύθηκε στη ενότητα 7.1 είναι γνωστό το μήκος  $l_{shaded}$ . Άρα είναι γνωστός και ο λόγος  $\lambda = \frac{l_{shaded}}{l}$ .

- Εάν ο λόγος είναι μικρότερος από το  $\frac{1}{3}$  τότε αυτό σημαίνει ότι η πρώτη σειρά του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό:

$$\chi = 3 * \lambda * 100 \% . \quad (7.5)$$

- Εάν ο λόγος  $\lambda$  είναι μεγαλύτερος από  $\frac{1}{3}$  και μικρότερος ή ίσος από  $\frac{2}{3}$  τότε η πρώτη σειρά του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται 100% και η δεύτερη σειρά σκιάζεται σε ποσοστό :

$$\chi = 3 * (\lambda - \frac{1}{3}) * 100 \% . \quad (7.6)$$

- Τέλος εάν ο λόγος  $\lambda$  είναι μεγαλύτερος από  $\frac{2}{3}$  και μικρότερος ή ίσος με τη μονάδα τότε οι δύο πρώτες σειρές του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζονται κατά 100% και η τρίτη σκιάζεται σε ποσοστό:

$$\chi = 3 * (\lambda - \frac{2}{3}) * 100 \% . \quad (7.7)$$

Με βάση τον υπολογισμό του ποσοστού σκίασης ανά σειρά του φωτοβολταϊκού πλαισίου για κάθε μία από τις διαφορετικές αποστάσεις μπορεί να υπολογιστεί η νέα τάση άρα και η ισχύς του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Γνωρίζοντας τις τιμές που παίρνει η ισχύς για κάθε μία από τις τρεις αποστάσεις επιτρέπεται να υπολογιστεί η μέγιστη ισχύς άρα και η μέγιστη ενέργεια για κάθε δεκάλεπτο της μέρας. Η μέγιστη ενέργεια για κάθε δεκάλεπτο μίας μέρας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$E = P_{mmpor} * 1/6 \quad (7.8)$$

λόγω του ότι το δεκάλεπτο είναι το 1/6 της ώρας. Εάν αθροιστούν όλες οι ενέργειες του κάθε δεκαλέπτου της μέρας τελικά υπολογίζεται η ημερήσια ενέργεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε Wh. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν για τις εξής μέρες:

21/12/2009, 21/06/2009, 21/05/2009, 21/04/2009, 21/03/2009, 21/02/2009, 21/01/2009. Οι υπολογισμοί της ενέργειας (Wh) οι οποίοι έγιναν αφορούν τη περίπτωση που το φωτοβολταϊκό πλαίσιο δε σκιάζεται καθόλου και τη περίπτωση όπου το φωτοβολταϊκό πλαίσιο σκιάζεται διαφορετικά για κάθε μία από τις τρεις αποστάσεις μεταξύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων ( $d=2*h$ ,  $d=h$  και  $d=1,5*h$ ). Οι υπολογισμοί αυτοί παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 7.1:** Υπολογισμός ημερήσιας ενέργειας φωτοβολταϊκού πλαισίου με  $l=33cm$  σε περίπτωση μη σκίασης και για αποστάσεις  $d=2*h$ ,  $d=1,5*h$ ,  $d=h$  μεταξύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η ενέργεια μετράται σε Wh.

	21/12/09	21/06/09	21/05/09	21/04/09	21/03/09	21/02/09	21/01/09
<b>ασκίαστο</b>	212,19	319,41	311,57	309,71	308,43	279,30	257,05
<b>d=2*h</b>	207,97	305,12	299,42	286,96	268,56	238,17	222,97
<b>d=1,5*h</b>	184,80	282,99	280,87	273,26	267,36	197,30	196,34
<b>d=h</b>	119,81	239,46	237,69	225,63	173,81	152,38	151,56

Επιπλέον υπολογίζεται η ετήσια παραγωγή ενέργειας(kWh) του φωτοβολταϊκού για κάθε διαφορετική απόσταση  $d$  η οποία παρουσιάζεται στο παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 7.2:** Υπολογισμός ετήσιας ενέργειας φωτοβολταϊκού πλαισίου με  $l=33cm$  σε περίπτωση μη σκίασης και για αποστάσεις  $d=2*h, d=1,5*h, d=h$  μεταξύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων .

	Ετήσια ενέργεια πλαισίου(kWh)	Μέση ημερήσια ενέργεια έτους (Wh)
ασκίαστο	105,34	288,60
$d=2*h$	95,68	262,13
$d=1,5*h$	88,16	241,54
$d=h$	68,23	186,92

Η στήλη δύο προκύπτει από τη στήλη τρία πολλαπλασιάζοντας την με 0,365. Παρατηρείται ότι όσο μικραίνει η απόσταση  $d$  τόσο μεγαλώνει το ποσοστό της σκίασης άρα τόσο περισσότερο μειώνεται και η ενέργεια. Οι μεγαλύτερες τιμές ενέργειας παρατηρούνται για την 21/06/09 και οι μικρότερες τιμές για την 21/12/09. Παρατηρείται ακόμα ότι όσο οι μέρες πλησιάζουν το καλοκαίρι μεγαλώνει η ενέργεια του φωτοβολταϊκού για κάθε τιμή του  $d$ .

#### **7.4 ΣΕΝΑΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΣΚΙΑΣΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΩΝ ΣΤΗΛΩΝ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ**

Στο συγκεκριμένο σενάριο το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι έτσι τοποθετημένα έτσι ώστε να σκιάζεται κατά μήκος των στηλών του από το άλλο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Δηλαδή ισχύει ότι το μήκος ισούται με  $l=129,5cm$ . Άρα το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι τοποθετημένο με τη μικρή του πλευρά προς τα κάτω όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 7.3:** Φωτοβολταϊκό πλαίσιο τοποθετημένο με τη μικρή πλευρά προς τα κάτω.

Επειδή το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από τρεις σειρές των δώδεκα κελιών διακρίνονται δώδεκα διαφορετικές περιπτώσεις για το υπολογισμό του ποσοστού σκίασης. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία όπου αναλύθηκε στη ενότητα 7.1 είναι γνωστό το μήκος  $l_{shaded}$ . Άρα είναι γνωστός ο λόγος  $\lambda = \frac{l_{shaded}}{l}$ .

- Εάν ο λόγος είναι μικρότερος από το  $\frac{1}{12}$  τότε αυτό σημαίνει ότι η πρώτη στήλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό:  
 $\chi = 12 * \lambda * 100\%.$  (7.9)
- Εάν ο λόγος  $\lambda$  είναι μεγαλύτερος από  $\frac{1}{12}$  και μικρότερος από  $\frac{2}{12}$  τότε η πρώτη στήλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται 100% και η δεύτερη στήλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό :

$$\chi = 12 * \left( \lambda - \frac{1}{12} \right) * 100\%.$$
 (7.10)



- Εάν  $\frac{3}{12} \geq \lambda > \frac{2}{12}$  τότε η πρώτη και η δεύτερη στήλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται 100% και η τρίτη στήλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό:  $\chi = 12 * (\lambda - \frac{2}{12}) * 100 \% (7.11)$

- Εάν  $\frac{4}{12} \geq \lambda > \frac{3}{12}$  τότε η πρώτη η δεύτερη και η τρίτη στήλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται 100% και η τέταρτη στήλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό:

$$\chi = 12 * (\lambda - \frac{3}{12}) * 100 \% (7.12)$$

- Εάν  $\frac{5}{12} \geq \lambda > \frac{4}{12}$  τότε η πρώτη η δεύτερη η τρίτη και η τέταρτη στήλη του του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται 100% και η πέμπτη στήλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό:

$$\chi = 12 * (\lambda - \frac{4}{12}) * 100 \% (7.13)$$

- Εάν  $\frac{6}{12} \geq \lambda > \frac{5}{12}$  τότε η πρώτη η δεύτερη, η τρίτη, η τέταρτη και η πέμπτη στήλη του του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται 100% και η έκτη στήλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό:

$$\chi = 12 * (\lambda - \frac{5}{12}) * 100 \% (7.14)$$

- Εάν  $\frac{7}{12} \geq \lambda > \frac{6}{12}$  τότε η πρώτη, η δεύτερη, η τρίτη η τέταρτη η πέμπτη και η έκτη στήλη του του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται 100% και η έβδομη στήλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό:

$$\chi = 12 * (\lambda - \frac{6}{12}) * 100 \% (7.15)$$

- Εάν  $\frac{8}{12} \geq \lambda > \frac{7}{12}$  τότε η πρώτη, η δεύτερη η τρίτη η τέταρτη η πέμπτη η έκτη στήλη και η έβδομη στήλη του του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται 100% και η όγδοη στήλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό:  $\chi = 12 * (\lambda - \frac{7}{12}) * 100 \% (7.16)$

- Εάν  $\frac{9}{12} \geq \lambda > \frac{8}{12}$  τότε η πρώτη η δεύτερη η τρίτη η τέταρτη η πέμπτη , η έκτη η έβδομη και η όγδοη στήλη του του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται 100% και η ένατη στήλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό:  $\chi = 12 * (\lambda - \frac{8}{12}) * 100 \% .(7.17)$

- Εάν  $\frac{10}{12} \geq \lambda > \frac{9}{12}$  τότε η πρώτη, η δεύτερη η τρίτη , η τέταρτη η πέμπτη , η έκτη η έβδομη η όγδοη στήλη και η ένατη στήλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται 100% και η δέκατη στήλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό:

$$\chi = 12 * (\lambda - \frac{9}{12}) * 100 \% (7.18)$$

- Εάν  $\frac{11}{12} \geq \lambda > \frac{10}{12}$  τότε η πρώτη , η δεύτερη, η τρίτη ,η τέταρτη , η πέμπτη , η έκτη , η έβδομη ,η όγδοη η ένατη και η δέκατη στήλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται 100% και η ενδέκατη στήλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό:

$$\chi = 12 * (\lambda - \frac{10}{12}) * 100 \% (7.19)$$

- Εάν  $\frac{12}{12} \geq \lambda > \frac{11}{12}$  τότε η πρώτη, η δεύτερη, η τρίτη , η τέταρτη η πέμπτη , η έκτη η έβδομη η όγδοη η ένατη στήλη η δέκατη και η ενδέκατη στήλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται 100% και η δωδέκατη στήλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό:

$$\chi = 12 * (\lambda - \frac{11}{12}) * 100 \% .(7.20)$$

Σύμφωνα με τον υπολογισμό του ποσοστού σκίασης τα αποτελέσματα των ενεργειών τόσο για ασκίαστο φωτοβολταϊκό πλαίσιο όσο και για φωτοβολταϊκό πλαίσιο που σκιάζεται από άλλο φωτοβολταϊκό πλαίσιο για μεταξύ τους αποστάσεις  $d=2*h, d=h$  και  $d=1,5*h$  φαίνονται στο παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 7.3:** Υπολογισμός ημερήσιας ενέργειας φωτοβολταϊκού πλαισίου με  $l=129,5cm$  σε περίπτωση μη σκίασης και για αποστάσεις  $d=2*h, d=1,5*h, d=h$  μεταξύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η ενέργεια μετράται σε Wh.

	21/12/09	21/06/09	21/05/09	21/04/09	21/03/09	21/02/09	21/01/09
<b>ασκίαστο</b>	212,20	319,41	311,57	309,71	308,43	279,30	257,05
<b>d=2*h</b>	165,41	255,76	255,03	254,69	246,41	226,53	220,62
<b>d=1,5*h</b>	136,95	233,39	230,56	224,51	217,33	174,24	176,37
<b>d=h</b>	88,83	166,05	162,93	144,84	146,10	128,23	135,26

Επιπλέον υπολογίζεται η ετήσια παραγωγή ενέργειας(kWh) του φωτοβολταϊκού πλαισίου για κάθε διαφορετική απόσταση  $d$  η οποία παρουσιάζεται στο παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 7.4:** Υπολογισμός ετήσιας ενέργειας φωτοβολταϊκού πλαισίου με  $l=129,5cm$  σε περίπτωση μη σκίασης και για αποστάσεις  $d=2*h, d=1,5*h, d=h$  μεταξύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

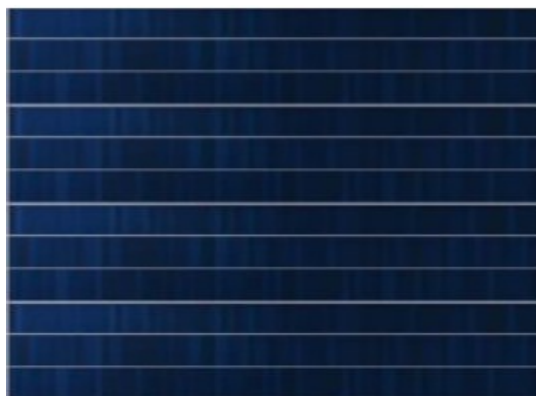
	<b>Ετήσια ενέργεια πλαισίου(kWh)</b>	<b>Μέση ημερήσια ενέργεια έτους (Wh)</b>
<b>ασκίαστο</b>	105,34	288,60
<b>d=2*h</b>	86,01	235,64
<b>d=1,5*h</b>	73,51	201,39
<b>d=h</b>	51,40	140,82

Τα συμπεράσματα είναι τα ίδια με τα συμπεράσματα που παρατηρήθηκαν στη ενότητα 7.3. Στη περίπτωση αυτή που υπάρχει σκίαση των στηλών του φωτοβολταϊκού πλαισίου παρατηρείται ότι η παραγωγή ενέργειας από το

φωτοβολταϊκό για όλες τις αποστάσεις είναι σημαντικά μειωμένη σε σχέση με τη σκίαση κατά μήκος των σειρών του φωτοβολταϊκού πλαισίου του προηγούμενου σεναρίου. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα πειραματικά αποτελέσματα της ισχύος για τη περίπτωση της σκίασης των τεσσάρων πρώτων σειρών και τριών στηλών του φωτοβολταϊκού της ενότητας 6.4 που είναι αρκετά μικρότερα σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα της ισχύος του φωτοβολταϊκού για σκίαση της πρώτης στήλης του φωτοβολταϊκού της ενότητας 6.3.

### **7.5 ΣΕΝΑΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΣΚΙΑΣΗ** **ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΩΝ ΣΕΙΡΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ** **ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΤΑ ΟΠΟΙΑ** **ΤΟΠΟΘΕΤΟΥΝΤΑΙ ΤΟ ΕΝΑ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΑΛΛΟ**

Στο πρώτο σενάριο το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είχε μήκος  $l=33\text{cm}$ . Επειδή όμως αυτό το σενάριο δε είναι ρεαλιστικό λόγω του πολύ μικρού μήκους στο συγκεκριμένο σενάριο θεωρήθηκε ότι υπάρχουν τέσσερα ίδια φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετημένα το ένα πάνω από το άλλο με τις μεγάλες διαστάσεις τους να είναι τοποθετημένες προς τα κάτω. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 7.4:** Τέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο και με τη μεγάλη πλευρά προς τα κάτω.

Άρα σε αυτή τη περίπτωση το μήκος του φωτοβολταϊκού είναι  $l = 4 * 33 = 132 \text{ cm}$ . Εάν για το λόγο  $\lambda = \frac{l_{shaded}}{l}$  ισχύει ότι:

- Εάν  $\lambda \leq \frac{1}{4}$  τότε σκιάζεται το πρώτο φωτοβολταϊκό πλαίσιο
- Εάν  $\frac{1}{4} < \lambda \leq \frac{2}{4}$  σκιάζονται τα πρώτα δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια (το δεύτερο μπορεί να μη σκιάζεται πλήρως σε αντίθεση με τα πρώτα)
- Εάν  $\frac{2}{4} < \lambda \leq \frac{3}{4}$  σκιάζονται τα τρία πρώτα φωτοβολταϊκά πλαίσια (το τρίτο μπορεί να μη σκιάζεται πλήρως σε αντίθεση με τα δύο πρώτα)
- Εάν  $\frac{3}{4} < \lambda \leq \frac{4}{4}$  σκιάζονται και τα τέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια (το τέταρτο μπορεί να μη σκιάζεται πλήρως σε αντίθεση με τα τρία πρώτα).

Συγκεκριμένα ισχύει ότι :

- Εάν  $\lambda \leq \frac{1}{12}$  τότε σκιάζεται η πρώτη σειρά του πρώτου φωτοβολταϊκού πλαισίου σε ποσοστό:

$$\chi = 12 * \lambda * 100 \%$$

- Εάν  $\frac{1}{12} < \lambda \leq \frac{2}{12}$  τότε σκιάζεται η πρώτη σειρά του πρώτου φωτοβολταϊκού πλαισίου 100% και η δεύτερη σειρά του πρώτου φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό:

$$\chi = 12 * \left( \lambda - \frac{1}{12} \right) * 100 \%. (7.21)$$

- Εάν  $\frac{2}{12} < \lambda \leq \frac{3}{12}$  τότε σκιάζεται η πρώτη και η δεύτερη σειρά του πρώτου φωτοβολταϊκού πλαισίου 100% και η τρίτη σειρά του πρώτου φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό:  $\chi = 12 * \left( \lambda - \frac{2}{12} \right) * 100 \%. (7.22)$

- Εάν  $\frac{4}{12} \geq \lambda > \frac{3}{12}$  τότε το πρώτο φωτοβολταϊκό πλαίσιο σκιάζεται 100% και η πρώτη σειρά του δεύτερου φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό:  $\chi = 12 * (\lambda - \frac{3}{12}) * 100 \%$  (7.23)
- Εάν  $\frac{5}{12} \geq \lambda > \frac{4}{12}$  τότε το πρώτο φωτοβολταϊκό πλαίσιο και η πρώτη σειρά του δεύτερου φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται 100% και η δεύτερη σειρά του δεύτερου φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό:  

$$\chi = 12 * (\lambda - \frac{4}{12}) * 100 \%$$
 (7.24)
- Εάν  $\frac{6}{12} \geq \lambda > \frac{5}{12}$  τότε το πρώτο φωτοβολταϊκό πλαίσιο και οι πρώτες δύο σειρές του δεύτερου φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζονται 100% και η τρίτη σειρά του δεύτερου φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό:  $\chi = 12 * (\lambda - \frac{5}{12}) * 100 \%$ . (7.25)
- Εάν  $\frac{7}{12} \geq \lambda > \frac{6}{12}$  τότε τα δύο πρώτα φωτοβολταϊκά πλαίσια σκιάζονται 100% και η πρώτη σειρά του τρίτου φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό:  $\chi = 12 * (\lambda - \frac{6}{12}) * 100 \%$  (7.26)
- Εάν  $\frac{8}{12} \geq \lambda > \frac{7}{12}$  τότε τα δύο πρώτα φωτοβολταϊκά πλαίσια και η πρώτη σειρά του τρίτου φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζονται 100% και η δεύτερη σειρά του τρίτου φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό:  $\chi = 12 * (\lambda - \frac{7}{12}) * 100 \%$  (7.27)
- Εάν  $\frac{9}{12} \geq \lambda > \frac{8}{12}$  τότε τα δύο πρώτα φωτοβολταϊκά πλαίσια και οι δύο πρώτες σειρές του τρίτου φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζονται 100% και η τρίτη σειρά του τρίτου φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό:  $\chi = 12 * (\lambda - \frac{8}{12}) * 100 \%$  (7.28)

- Εάν  $\frac{10}{12} \geq \lambda > \frac{9}{12}$  τότε τα τρία πρώτα φωτοβολταϊκά πλαίσια σκιάζονται 100% και η πρώτη σειρά του τέταρτου φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό:

$$\chi = 12 * \left( \lambda - \frac{9}{12} \right) * 100 \% . \quad (7.29)$$

- Εάν  $\frac{11}{12} \geq \lambda > \frac{10}{12}$  τότε τα τρία πρώτα φωτοβολταϊκά πλαίσια και η πρώτη σειρά του τέταρτου φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζονται 100% και η δεύτερη σειρά του τέταρτου φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό:  $\chi = 12 * \left( \lambda - \frac{10}{12} \right) * 100 \% . \quad (7.30)$

- Εάν  $\frac{12}{12} \geq \lambda > \frac{11}{12}$  τότε τα τρία πρώτα φωτοβολταϊκά πλαίσια και οι πρώτες δύο σειρές του τέταρτου φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζονται 100% και η τρίτη σειρά του τέταρτου φωτοβολταϊκού πλαισίου σκιάζεται σε ποσοστό:  $\chi = 12 * \left( \lambda - \frac{11}{12} \right) * 100 \% . \quad (7.31)$

Σύμφωνα με τον υπολογισμό του ποσοστού σκίασης τα αποτελέσματα των ενεργειών τόσο για ασκίαστο φωτοβολταϊκό όσο και για φωτοβολταϊκό με αποστάσεις  $d=2*h$ ,  $d=h$  και  $d=1,5*h$  φαίνονται στο παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 7.5:** Υπολογισμός ημερήσιας ενέργειας φωτοβολταϊκού με  $l=132cm$  σε περίπτωση μη σκίασης και για αποστάσεις  $d=2*h$ ,  $d=1,5*h$ ,  $d=h$  μεταξύ των φωτοβολταϊκών. Η ενέργεια μετράται σε Wh.

	21/12/09	21/06/09	21/05/09	21/04/09	21/03/09	21/02/09	21/01/09
<b>ασκίαστο</b>	212,20	319,41	311,57	309,71	308,42	279,30	257,05
<b>d=2*h</b>	168,90	269,41	267,85	262,16	262,00	228,05	238,00
<b>d=1,5*h</b>	144,47	265,36	262,97	249,96	223,50	180,13	180,12
<b>d=h</b>	96,28	244,01	217,07	217,05	149,48	139,00	136,95

Επιπλέον υπολογίζεται η ετήσια παραγωγή ενέργειας(kWh) του φωτοβολταϊκού για κάθε διαφορετική απόσταση  $d$  μεταξύ των φωτοβολταϊκών η οποία παρουσιάζεται στο παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 7.6:** Υπολογισμός ετήσιας ενέργειας φωτοβολταϊκού με  $l=132cm$  σε περίπτωση μη σκίασης και για αποστάσεις  $d=2*h, d=1,5*h, d=h$  μεταξύ των φωτοβολταϊκών .

	Ετήσια ενέργεια πλασιού(kWh)	Μέση ημερήσια ενέργεια έτους (Wh)
ασκίαστο	105,34	288,60
$d=2*h$	89,87	246,22
$d=1,5*h$	79,21	217,01
$d=h$	62,70	171,78

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα για την ενέργεια του φωτοβολταϊκού είναι αρκετά μεγαλύτερα σε σχέση με τα αποτελέσματα των ενεργειών για το σενάριο της κατά πλάτος σκίασης του φωτοβολταϊκού δηλαδή του δεύτερου σεναρίου που αναφέρεται στη ενότητα 7.4. Η διαφορά των ενεργειών της ενέργειας που μελετάται σε αυτό το σενάριο από τη ενέργεια που υπολογίστηκε στο δεύτερο σενάριο για αποστάσεις μεταξύ των φωτοβολταϊκών  $d=1,5*h, d=h$  είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη ίδια διαφορά για απόσταση  $d=2*h$  . Άρα αυτό το σενάριο βελτιώνει τα αποτελέσματα της ενέργειας του δεύτερου σεναρίου σε μεγαλύτερο βαθμό για μικρές αποστάσεις μεταξύ των φωτοβολταϊκών. Οπότε εάν τα φωτοβολταϊκά βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους τότε θα ήταν κατάλληλο αυτό το σενάριο. Τα αποτελέσματα της ετήσιας παραγωγής ενέργειας για αυτό το σενάριο είναι μικρότερα από τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου.



## 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα πτυχιακή εργασία δημιουργήθηκε ο ηλιακός χάρτης για τα Χανιά. Έπειτα με τη χρήση του ηλιακού χάρτη μελετήθηκε η περίπτωση τριών εμποδίων και το ποσοστό σκίασης που προκαλούσαν τα συγκεκριμένα εμπόδια για κάποιες συγκεκριμένες μέρες.

Ακόμα εξετάστηκε η επίδραση της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας σε φωτοβολταϊκό. Με την αύξηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας παρατηρείται σχεδόν ανάλογη αύξηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης του κελιού ενώ η τάση ανοικτού κυκλώματος αυξάνει λίγο. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η αύξηση της ισχύος του φωτοβολταϊκού σχεδόν αναλογικά με τη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η τάση ανοικτού κυκλώματος αυξάνεται σημαντικά με τη μείωση της θερμοκρασίας ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης μειώνεται ελαφρά. Συνεπώς η ισχύς του ηλιακού κελιού αυξάνεται με την μείωση της θερμοκρασίας.

Επιπλέον μελετήθηκαν τα διαγράμματα P-V, I-V για δύο φωτοβολταϊκά με αριθμό φωτοβολταϊκών κελιών 54 και 36. Τα διαγράμματα που δημιουργήθηκαν αφορούν τις εξής περιπτώσεις: Στο φωτοβολταϊκό δεν υπάρχει σκίαση, στο φωτοβολταϊκό το κελί που βρίσκεται πιο πάνω του είναι πλήρως σκιασμένο, στο φωτοβολταϊκό το κελί που βρίσκεται πιο πάνω είναι σκιασμένο κατά 50% και τέλος στο φωτοβολταϊκό τα δύο κελιά που βρίσκονται πιο πάνω είναι πλήρως σκιασμένα. Παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό σκίασης τόσο μειώνεται η ισχύς. Η μέγιστη ισχύς για το φωτοβολταϊκό των 54 κελιών για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις είναι μεγαλύτερη από το φωτοβολταϊκό των 36 κελιών. Έστερα τα δύο αυτά φωτοβολταϊκά θεωρήθηκε ότι έχουν διόδους παράκαμψης. Μελετήθηκε η λειτουργία των δύο φωτοβολταϊκών για σκίαση του πιο πάνω κελιού κατά 100% και 50% με τη χρήση διόδων παράκαμψης. Προέκυψε ότι η

πτώση της ισχύος με τη χρήση των διόδων παράκαμψης είναι μικρότερη σε σχέση με τη πτώση της ισχύος χωρίς τη χρήση των διόδων παράκαμψης.

Για φωτοβολταϊκό 36 κελιών έγιναν οι πειραματικές μετρήσεις και οι θεωρητικοί υπολογισμοί του ρεύματος και της τάσης για τη περίπτωση μη σκίασης και για διαφορετικές περιπτώσεις σκίασης. Οι περιπτώσεις σκίασης ήταν: πλήρης σκίαση ενός κελιού, πλήρης σκίαση των πρώτων δώδεκα κελιών του φωτοβολταϊκού και πλήρη σκίαση των τεσσάρων πρώτων γραμμών και τριών πρώτων στηλών του φωτοβολταϊκού. Για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις διαπιστώθηκε ότι τα διαγράμματα P-V, I-V για τις πειραματικές και για τις θεωρητικές μετρήσεις έχουν καλή προσέγγιση και οι διαφορές μεταξύ τους κατά κύριο λόγο οφείλονται σε σφάλματα των μετρήσεων, στις ατμοσφαιρικές συνθήκες την ημέρα των μετρήσεων, καθώς και στην κατάσταση του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Επιπλέον η ισχύς του φωτοβολταϊκού είναι μικρότερη για σκίαση των τεσσάρων γραμμών και τριών στηλών του σε σχέση με τη ισχύ για σκίαση δώδεκα κελιών τα οποία βρίσκονται σε σειρά.

Τέλος μελετήθηκε η ημερήσια και η ετήσια παραγωγή ενέργειας του φωτοβολταϊκού πλαισίου για 12 χαρακτηριστικές ημέρες του έτους, που περιλαμβάνουν εκτός των άλλων τα ηλιοστάσια και τις ισημερίες. Η μελέτη έγινε για τρία διαφορετικά σενάρια και συγκρίθηκε και με τη παραγωγή ενέργειας φωτοβολταϊκού που δε σκιάζεται. Το πρώτο σενάριο ήταν η σκίαση κατά μήκος των σειρών φωτοβολταϊκού με μήκος  $l=33\text{cm}$ . Το δεύτερο σενάριο ήταν η σκίαση κατά μήκος των στηλών του φωτοβολταϊκού με μήκος  $l=129,5\text{cm}$  και το τρίτο σενάριο ήταν η σκίαση κατά μήκος των σειρών τεσσάρων φωτοβολταϊκών πλαισίων τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο με συνολικό μήκος  $l=132\text{cm}$ . Από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι η παραγωγή ενέργειας του φωτοβολταϊκού μειώνεται για μέρες που είναι κοντά στο χειμώνα και για μικρές αποστάσεις μεταξύ των φωτοβολταϊκών. Ακόμα η παραγωγή ενέργειας που προκύπτει από το δεύτερο σενάριο είναι αρκετά μικρότερη από την παραγωγή ενέργειας του πρώτου και του τρίτου σενάριο. Η παραγωγή ενέργειας για το τρίτο σενάριο είναι μικρότερη από τη παραγωγή ενέργειας του πρώτου σεναρίου αλλά μεγαλύτερη από αυτή του δεύτερου σεναρίου, με το οποίο είναι και άμεσα συγκρίσιμο, καθώς στα δύο αυτά σενάρια το μέγιστο ύψος των φωτοβολταϊκών σε σχέση με το έδαφος είναι αντίστοιχο. Το τρίτο σενάριο είναι κατάλληλο για μικρές αποστάσεις μεταξύ των φωτοβολταϊκών όπου εκεί η παραγωγή ενέργειας είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με τη παραγωγή ενέργειας που προκύπτει από το δεύτερο σενάριο.

Στη παρούσα πτυχιακή εργασία ο υπολογισμός της απώλειας της ενέργειας θα μπορούσε να γίνει και για διαφορετικού τύπου εμπόδια όπως δέντρα ή και κτήρια. Επιπλέον με βάση τη παρούσα πτυχιακή εργασία υπάρχει η δυνατότητα να μελετηθούν φωτοβολταϊκά διαφορετικής τεχνολογίας από της κρυσταλλικής όπως της τεχνολογίας των λεπτών υμενίων (thin-films). Ο προσανατολισμός των φωτοβολταϊκών στη παρούσα πτυχιακή εργασία είναι νότιος. Σαν συνέχεια της εργασίας θα μπορούσε να μελετηθεί η απώλεια της ενέργειας φωτοβολταϊκού για διαφορετικούς προσανατολισμούς. Τέλος η μοντελοποίηση σκίασης φωτοβολταϊκού μπορεί να γίνει και με ιχνηλάτες ήλιου (solar trackers). Οι ιχνηλάτες του ηλίου ακολουθούν τη τροχιά του ήλιου και μπορούν να εκμεταλλευτούν μέγιστα τη ηλεκτρική ενέργεια. Συγκριτικά με τα σταθερά συστήματα τα συστήματα ιχνηλάτησης παρουσιάζουν μέχρι και 40% μεγαλύτερη απόδοση κάτι το οποίο καθιστά πλεονεκτική μία τέτοια επένδυση.

## 9.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### 1.ΒΙΒΛΙΑ-ΑΡΘΡΑ -ΔΙΑΤΡΙΒΕΣ

- **Gilbert M. Masters** : “Renewable and Efficient Electric Power System”, John Willey & Sons , 2013
- **Κιτσάκης Δημήτριος** : “Ανάπτυξη ηλεκτρονικού συστήματος διαχείρισης ενέργειας διαφανών φωτοβολταϊκών πλαισίων”, Διπλωματική Εργασία , Πολυτεχνείο Κρήτης ,Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών , 2017
- **Murtaza, Ali, et al.:** "Variable Parameters for a Single Exponential Model of Photovoltaic Modules in Crystalline-Silicon." *Energies* 11.8 (2018): 2138.
- **Tamer Khatib, Wilfried Elmenreich** : “Modeling of Photovoltaic Systems Using MATLAB Simplified Green Codes”, John Willey & Sons , 2016
- **John A.Duffie , Willian A.Beckman** : “Solar Engineering of Thermal Processes 4th edition”, University of Wisconsin-Madison, John Willey & Sons , 2013
- **Κατσιγιαννης Γιάννης.** : Ηλιακή Γεωμετρία , 2016
- **Νικολούδης Σταύρος** : “Προσομοίωση και βελτιστοποίηση συστήματος ηλιακής αντλίας μεταβλητής ταχύτητας σε εφαρμογή άρδευσης για διαφορετικές τεχνολογίες άρδευσης “ , Διπλωματική Εργασία , Πολυτεχνείο Κρήτης , Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών , 2019
- **Λέκκας Χρήστος** :”Ολοκληρωμένη μελέτη και σχεδίαση ηλεκτρικής εγκατάστασης αυτόνομης ηλεκτροδότησης οικίας με χρήση ΑΠΕ”,

Διπλωματική Εργασία , Πολυτεχνείο Κρήτης , Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών , 2018

- **Μπατζέλης Ευστράτιος Ι.**, “Μοντελοποίηση και Έλεγχος Φωτοβολταϊκών Συστημάτων σε Συνθήκες Σκίασης”, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 2016.
- **Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας:** “Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων “ , Θεσσαλονίκη , 2011
- **Τζινευράκης Αντώνης:** “Site survey and shading analysis” , TDK CRETE GR
- **Κυρανάκη Νικολέττα :** “Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στα φωτοβολταϊκά” , Διπλωματική Εργασία , Πανεπιστήμιο Πατρών , Σχολή Θετικών επιστημών ,Τμήμα φυσικής , 2017
- **Παπαγγέλου Αικατερίνη :**”Κατασκευή εργαστηριακού μοντέλου φωτοβολταϊκού συστήματος” , Διπλωματική Εργασία , Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης , Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών , 2014
- **Καλαϊντζάκης Κώστας, Σταυρακάκης Γιώργος:** “Size optimization of a photovoltaic-pv-system installed close to sun obstacles “, Πολυτεχνείο Κρήτης , Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών , 1996
- **Ekpenyong E.E and Anyasi, F.I:** “Effect of Shading on Photovoltaic Cell”, department of Electrical/Electronic Engineering , Cross River University of Technology , 2013

## 2.ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ

- Alternative Energy Tutorials, “Bypass Diode for Solar Panel Protection”. Πρόσβαση: 20/9/2019. Διαθέσιμο στο: <http://www.alternative-energy-tutorials.com/energy-articles/bypass-diode.html>
- “Επαφή / Δίοδος p-n” Πρόσβαση: 20/9/2019. Διαθέσιμο στο:

[http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/D2\\_Hmiagogoi\\_2.pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/D2_Hmiagogoi_2.pdf)

- Power from sunlight , "Solar Bypass Diode Guide: This Is What You Should Know About Solar Bypass Diodes". Πρόσβαση: 20/09/2019. Διαθέσιμο στο: <https://www.powerfromsunlight.com/solar-bypass-diode-guide-this-is-what-you-should-know-about-solar-bypass-diodes/>
- "Diode modelling " . Πρόσβαση: 20/09/2019. Διαθέσιμο στο: [https://en.wikipedia.org/wiki/Diode\\_modelling](https://en.wikipedia.org/wiki/Diode_modelling)
- Αναλυτικός οδηγός για τα προϊόντα , "Green energy". Πρόσβαση: 20/09/2019. Διαθέσιμο στο: [https://www.greenenergyparts.com/PDFManuals/solar\\_panel.pdf](https://www.greenenergyparts.com/PDFManuals/solar_panel.pdf)