



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Π.Ε.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ ΣΕ
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ

ΤΟΥ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ:
ΓΕΩΡΓΙΟΠΟΥΛΟΥ ΗΛΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
Δρ. Κ.Α. ΚΑΒΒΑΔΙΑΣ

ΑΙΓΑΛΕΩ
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2020



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Π.Ε.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ ΣΕ
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
Δρ. Κ.Α. ΚΑΒΒΑΔΙΑΣ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή 5 Μαρτίου 2021

(Υπογραφή)
Ονοματεπώνυμο
ΚΑΒΒΑΔΙΑΣ ΚΟΣΜΑΣ

(Υπογραφή)
Ονοματεπώνυμο
ΜΟΥΣΤΡΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

(Υπογραφή)
Ονοματεπώνυμο
Ά

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η Γεωργιόπουλος Ηλίας ^{κάτωθι} υπογεγραμμένος/η
 του Δημητρίου ⁴⁶¹⁴⁵¹¹⁸, με αριθμό
 μητρώου 46145118 φοιτητής/τρια του
 Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής
 Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων
 Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Ο/Η Δηλών/ούσα



**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ ΣΕ
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ****ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζονται πέντε εργαστηριακές ασκήσεις που έχουν σχέση με την λειτουργία των φωτοβολταϊκών κυψελών. Ειδικότερα, χρησιμοποιώντας έναν πειραματικό προσομοιωτή οι φοιτητές μπορούν να κάνουν ασκήσεις που αφορούν την εύρεση βασικών χαρακτηριστικών ενός φωτοβολταϊκού πάνελ και να μελετήσουν πως επηρεάζεται η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος από παράγοντες όπως η σκίαση και οι διαφορετικές συνδεσμολογίες. Τέλος, σε κάθε άσκηση υπάρχουν σχόλια και συμπεράσματα για τις συνθήκες που επικρατούσαν κατά την διάρκεια του πειράματος και το πως επηρεάζουν το αποτέλεσμα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: PV πάνελ, σκίαση, παράλληλη σύνδεση, σύνδεση σε σειρά, I-V καμπύλη

ABSTRACT

In this thesis, five laboratory exercises related to the operation of photovoltaic cells are presented. In particular, using an experimental simulator, students can conduct exercises related to calculating the basic characteristics of a photovoltaic panel and study how the performance of a photovoltaic system is affected by factors such as shading and different wiring. Finally, in each exercise there are comments and conclusions about the conditions that prevailed during the experiment and how they affect the result.

KEY WORDS: PV panel, shading, parallel, series, curve

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Δρ. Κ.Α. Καββαδία για την πολύτιμη βοήθεια του και την υπομονή του. Ευχαριστώ τους γονείς μου για την συνεχή υποστήριξη τους και τους φίλους μου που είναι πάντα δίπλα μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	5
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	6
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	8
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	9
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	11
1.2 ΕΠΙΠΡΟΣΘΕΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ	15
1.2.1 Μετατροπέας (Inverter).....	15
1.2.2 Συσσωρευτές.....	16
1.2.3 Ρυθμιστής Φόρτισης (Charge Controller).....	17
2 ΑΣΚΗΣΗ 1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΕΞΟΔΟΥ.....	19
2.1 ΣΤΟΧΟΣ.....	19
2.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΘΕΩΡΙΑ.....	19
2.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	20
2.4 ΛΥΣΗ.....	22
2.5 ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	24
3 ΑΣΚΗΣΗ 2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΜΠΥΛΩΝ I-V ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	25
3.1 ΣΤΟΧΟΣ.....	25
3.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΘΕΩΡΙΑ.....	25
3.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	28
3.4 ΛΥΣΗ.....	29
3.5 ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	32
4 ΑΣΚΗΣΗ 3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΥΠΟ ΣΚΙΑΣΗ	33
4.1 ΣΤΟΧΟΣ.....	33
9.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΘΕΩΡΙΑ.....	33
4.2.1 Προσωρινή σκίαση.....	35
4.2.2 Σκίαση προερχόμενη από την τοποθεσία	36
4.2.3 Σκίαση προερχόμενη από το κτίριο.....	36
4.2.4 Σκίαση προερχόμενη από το ίδιο το σύστημα.....	37

4.2.5 Άμεση σκίαση.....	37
4.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	39
4.4 ΛΥΣΗ.....	40
4.5 ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	43
5 ΑΣΚΗΣΗ 4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΉ ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΠΟΥ ΣΥΝΔΕΟΝΤΑΙ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ (ΙΔΙΑ ΑΣΚΗΣΗ ΓΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕ ΣΕΙΡΑ)	45
5.1 ΣΤΟΧΟΣ.....	45
5.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΘΕΩΡΙΑ.....	45
5.2.1 Σύνδεση σε σειρά.....	45
5.2.2 Παράλληλη σύνδεση.....	45
5.2.3 Χρήση συνδέσεων σε πραγματικές συνθήκες.....	45
5.3 Διαδικασία μετρήσεων	47
5.4 ΛΥΣΗ.....	49
5.5 ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	52
6 ΑΣΚΗΣΗ 5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΛΗΡΩΣΗΣ (FF)	53
6.1 ΣΤΟΧΟΣ.....	53
6.2 Εισαγωγή-θεωρία	53
6.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΪΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	56
6.4 Λύση.....	58
6.5 ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	61
7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΕΠΙΛΟΓΟΣ	62
8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	63

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Η πειραματική εγκατάσταση του προσομοιωτή	11
Σχήμα 1.2: Φωτογραφία των 3 PV πάνελ της εγκατάστασης	13
Σχήμα 1.3: Φωτογραφία της μεταβλητής αντίστασης της εγκατάστασης.....	14
Σχήμα 1.4: Φωτογραφία του ψηφιακού πολύμετρου της εγκατάστασης.....	14
Σχήμα 1.5: Φωτογραφία του inverter της εγκατάστασης	14
Σχήμα 1.6: Φωτογραφία του συσσωρευτή της εγκατάστασης	16
Σχήμα 1.7: Φωτογραφία του Charge Controller της εγκατάστασης	17
Σχήμα 1.8: Τραπέζι εγκατάστασης	18
Σχήμα 2.1: Συνδεσμολογία για μετρήσεις σε ένα PV	20
Σχήμα 2.2: Τάση που παράγεται από ένα PV πάνελ συναρτήσει της έντασης του ρεύματος που παράγεται.....	23
Σχήμα 2.3: Παραγόμενη ισχύς από ένα PV πάνελ συναρτήσει της έντασης του ρεύματος.....	23
Σχήμα 3.1: Τυπική καμπύλη I-V και χαρακτηριστικά μεγέθη PV κυψέλης.....	27
Σχήμα 3.2: Συνδεσμολογία για μετρήσεις σε ένα PV	28
Σχήμα 3.3: Καμπύλες I-V ενός PV πάνελ για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας.....	32
Σχήμα 4.1: Παράδειγμα ροή ρεύματος μέσα από συστοιχία PV πάνελ χωρίς σκίαση.....	34
Σχήμα 4.2: Παράδειγμα ροή ρεύματος μέσα από συστοιχία PV πάνελ με σκίαση ενός πάνελ.....	34
Σχήμα 4.3: Τοποθέτηση PV πάνελ σε περιοχή με χιόνι.....	36
Σχήμα 4.4: Σκίαση PV πάνελ από κοντινό αντικείμενο.....	39
Σχήμα 4.5: Συνδεσμολογία για μετρήσεις σε ένα PV με ολική σκίαση.....	39
Σχήμα 4.6: Καμπύλη I-V για ένα σκιασμένο P-V πάνελ.....	41
Σχήμα 4.7: Καμπύλη P-I για ένα σκιασμένο P-V πάνελ.....	41
Σχήμα 4.8: Καμπύλη I-V για ένα μη σκιασμένο P-V πάνελ.....	42
Σχήμα 4.9: Καμπύλη P-I για ένα μη σκιασμένο P-V πάνελ	43
Σχήμα 5.1: Συνδεση 9 PV πάνελ σε σειρά και σύνδεση 3 σειρών (3 PV πάνελ η κάθε σειρά) παράλληλα	46
Σχήμα 5.2: PV πάνελ με 3 σειρές των 20 κυψελών και ξεχωριστή δίοδο bypass σε κάθε σειρά	47
Σχήμα 5.3: Συνδεσμολογία 3 PV πάνελ παράλληλα	47
Σχήμα 5.4: Συνδεσμολογία 3 PV πάνελ σε σειρά	48
Σχήμα 5.5: Καμπύλη I-V για παράλληλη σύνδεση 3 PV πάνελ με ηλιακή ακτινοβολία 1000W/m ² ...	50
Σχήμα 5.6: Καμπύλη I-V για σύνδεση σε σειρά 3 PV πάνελ με ηλιακή ακτινοβολία 1000W/m ²	51
Σχήμα 5.7: Σύγκριση καμπύλων I-V παράλληλης σύνδεσης και σύνδεσης σε σειρά	51
Σχήμα 5.8: Θεωρητικές καμπύλες I-V για διάφορες συνδέσεις	52
Σχήμα 6.1: PV πάνελ με υψηλό FF	54
Σχήμα 6.2: PV πάνελ με χαμηλό FF	54
Σχήμα 6.3: Συνδεσμολογία για μετρήσεις σε ένα PV πάνελ.....	56
Σχήμα 6.4: Τάση που παράγεται από ένα PV πάνελ συναρτήσει της έντασης του ρεύματος που παράγεται.....	59
Σχήμα 6.5: Παραγόμενη ισχύς από ένα PV πάνελ συναρτήσει της έντασης του ρεύματος.....	59
Σχήμα 6.6: Σημείο μέγιστης ισχύος P_{MP} για προσδιορισμό του FF	60

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.I : Προδιαγραφές των 3 PV πάνελ της εγκατάστασης.....	12
Πίνακας 2. I: Πειραματικές μετρήσεις εγκατάστασης για απόδοση φωτοβολταϊκού στοιχείου.....	22
Πίνακας 3.I: Πειραματικές μετρήσεις προσομοιωτή για ηλιακή ακτινοβολία $G= 1000\text{W}/\text{m}^2$	29
Πίνακας 3.II: Πειραματικές μετρήσεις προσομοιωτή για ηλιακή ακτινοβολία $G= 800\text{W}/\text{m}^2$	30
Πίνακας 3.III: Πειραματικές μετρήσεις προσομοιωτή για ηλιακή ακτινοβολία $G= 600\text{W}/\text{m}^2$	30
Πίνακας 3.IV: Πειραματικές μετρήσεις προσομοιωτή για ηλιακή ακτινοβολία $G= 400\text{W}/\text{m}^2$	31
Πίνακας 3.V: Πειραματικές μετρήσεις προσομοιωτή για ηλιακή ακτινοβολία $G= 200\text{W}/\text{m}^2$	31
Πίνακας 4.I: Μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για ηλιακή ακτινοβολία $600\text{W}/\text{m}^2$	40
Πίνακας 4.II: Μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για ηλιακή ακτινοβολία $1000\text{W}/\text{m}^2$	42
Πίνακας 5.I: Παράλληλη σύνδεση 3 PV πάνελ για ηλιακή ακτινοβολία $1000\text{W}/\text{m}^2$	49
Πίνακας 5.II: Σύνδεση σε σειρά 3 PV πάνελ για ηλιακή ακτινοβολία $1000\text{W}/\text{m}^2$	50
Πίνακας 6.I: Πειραματικές μετρήσεις εγκατάστασης για απόδοση PV πάνελ και υπολογισμός εμβαδού γραφήματος για καθορισμό του FF με ηλιακή ακτινοβολία $1000\text{W}/\text{m}^2$	58

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι η μετατροπή του φωτός σε ηλεκτρισμό χρησιμοποιώντας ημιαγωγούς. Το φαινόμενο αυτό μελετάται από τους κλάδους της φυσικής, της φωτοχημείας και της ηλεκτροχημείας. Η μεγαλύτερη εμπορική χρυσή φωτοβολταϊκών είναι για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από PV πάνελ τα οποία με τη σειρά τους αποτελούνται από PV κυψέλες, οι οποίες παράγουν και την ηλεκτρική ενέργεια. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να τοποθετηθούν στο έδαφος, σε στέγες, σε τοίχους ακόμα και στο διάστημα. Μπορούν να τοποθετηθούν είτε σε σταθερές βάσεις είτε να χρησιμοποιούν ηλιακούς ανιχνευτές για να ακολουθήσουν την πορεία του Ήλιου στον ουρανό.

Η ενέργεια από φωτοβολταϊκά πάνελ έχει γίνει η φθηνότερη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές με υψηλό ηλιακό δυναμικό με τιμές που ξεκινάνε από 0,01567 US\$/kWh σύμφωνα με μία συμφωνία που υπογράφηκε στο Κατάρ από τις εταιρείες KAHRAMAA και Siraj Energy το 2020. Ακόμα οι τιμές των PV πάνελ έχουν μειωθεί περίπου στο ένα δέκατο της τιμής που είχαν μία δεκαετία πριν. Με αυτά τα δεδομένα ανοίγει ο δρόμος για μία παγκόσμια μετάβαση σε βιώσιμη ανανεώσιμη ενέργεια η οποία θα βοηθήσει και στην καταπολέμηση του φαινομένου της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Αυτά τα θετικά σε συνδυασμό με το ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα δεν παράγουν περαιτέρω μόλυνση ούτε αέρια του θερμοκηπίου μετά την εγκατάστασή τους συνυπολογίζοντας και το γεγονός ότι το πυρίτιο που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους είναι ευρέως διαθέσιμο σε όλη τη γη κάνει αυτή την τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μία από τις πιο γοργά εξελισσόμενες στον κόσμο.

Σύμφωνα με στοιχεία του 2019 στην έκθεση "[PHOTOVOLTAICS REPORT](#)" του [Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems](#) η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών ήταν >635 GW καλύπτοντας το 2% των παγκόσμιων αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ενέργεια που παράγεται παγκόσμια από PV πάνελ είναι τρίτη σε εγκατεστημένη ισχύ ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ακριβώς μετά από την υδροηλεκτρική ενέργεια και την αιολική ενέργεια. Το International Energy Agency εκτιμά ότι μέχρι το 2024 η εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών θα αυξηθεί κατά 700-800 GW. Αυτά τα στοιχεία σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα PV πάνελ γίνονται ολοένα και φθηνότερα λόγω της εξελιγμένης τεχνολογίας δείχνουν ότι στο μέλλον ο κλάδος των φωτοβολταϊκών θα γνωρίσει μεγάλη αύξηση.

Με βάση όλα τα παραπάνω είναι λογικό ότι όλα τα τμήματα προπτυχιακών μηχανολόγων μηχανικών ασχολούνται σε βάθος με το αντικείμενο των φωτοβολταϊκών. Εκτός όμως από τη θεωρητική ανάλυση του τρόπου λειτουργίας των φωτοβολταϊκών είναι πολύ σημαντικό οι προπτυχιακοί φοιτητές να εξοικειώνονται και πρακτικά με τον τρόπο λειτουργίας των PV πάνελ μέσω εργαστηριακών ασκήσεων. Για να διεξαχθούν αυτές οι ασκήσεις απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη ενός PV και η χρήση του υπό συνθήκες που ευνοούν την λειτουργία του πάνελ. Επειδή όμως δεν είναι πρακτικό να εκπαιδεύονται οι φοιτητές μόνο όταν υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες (π.χ. ηλιοφάνεια) ή ακόμα και όταν δεν υπάρχει κάποιο PV

πάνελ διαθέσιμο είναι χρήσιμο να διεξάγονται πειραματικές ασκήσεις με την χρήση ενός προσομοιωτή PV πάνελ.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήσαμε έναν πειραματικό προσομοιωτή PV πάνελ εκτελέσουμε μετρήσεις και εν συνεχεία να υπολογίσουμε βασικά χαρακτηριστικά μιας εγκατάστασης που χρησιμοποιεί PV πάνελ. Στην συνέχεια παρουσιάζονται έξι εργαστηριακές ασκήσεις με την χρήση αυτού του πειραματικού προσομοιωτή καθώς και τα αποτελέσματα των υπολογισμών βασικών μεγεθών για διάφορες συνδεσμολογίες υπό διαφορετικές συνθήκες.

1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Η εργαστηριακή εγκατάσταση που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία βρίσκεται στο εργαστήριο των Ήπιων Μορφών Ενέργειας (Η.Μ.Ε.) της Πανεπιστημιούπολης 1 του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Έχει δημιουργηθεί με πρωτοβουλία του Δρ. Πέτρου Αξάδουλου.



Σχήμα 1.1: Η πειραματική εγκατάσταση του προσομοιωτή

Πρόκειται για έναν πειραματικό προσομοιωτή ο οποίος κατασκευάστηκε από την Γερμανική εταιρία Lucas-Nuelle <https://www.lucas-nuelle.us> .

Αποτελείται από τρία PV πάνελ των οποίων οι προδιαγραφές αναφέρονται στον Πίνακα 1.1. Η εγκατάσταση δίνει την δυνατότητα για οποιαδήποτε σύνδεση των τριών αυτών PV πάνελ μέσω κατάλληλων αγωγών. Σε κάθε PV πάνελ μπορεί να ρυθμιστεί ανεξάρτητα ξεχωριστή ηλιακή ακτινοβολία, καθώς υπάρχει περιστροφικός διακόπτης με τον οποίο επιλέγεται η ηλιακή ακτινοβολία που επιθυμεί ο χρήστης για τις ανάγκες κάθε εφαρμογής (200,400,600,800,1000 W/m² αντίστοιχα). Με αυτό τον τρόπο μπορεί να επιτευχθούν συνθήκες: ηλιοφάνειας, σκίασης ή μερικής σκίασης (σκίαση μόνο ενός PV πάνελ ή διαφορετική ηλιακή ακτινοβολία σε κάθε PV πάνελ).

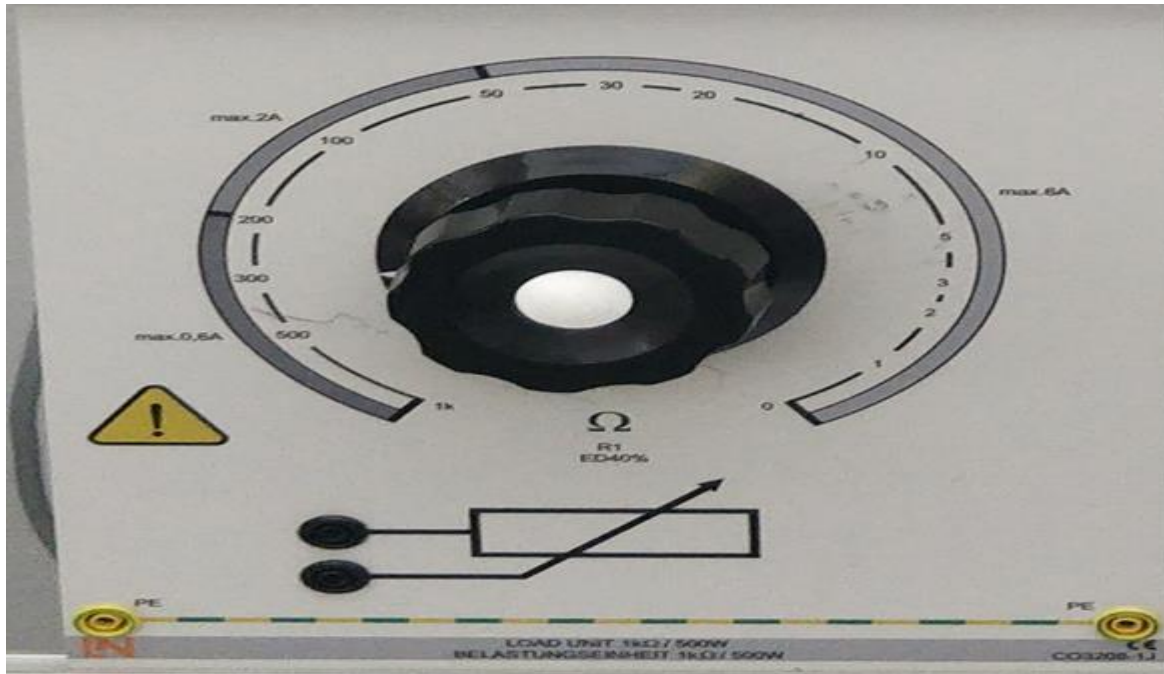
Πίνακας 1.1 : Προδιαγραφές των 3 PV πάνελ της εγκατάστασης

Τάση ανοιχτού κυκλώματος	3 x 23 V
Ρεύμα βραχυκυκλώσεως	3 x 2 A
Ισχύς	3 x 40 VA
Ρυθμιζόμενη ένταση ακτινοβολίας	20%-100%
Βάρος	6,8 kg
Διαστάσεις	297 x 456 x 210 mm (ΥxΠxB)



Σχήμα 1.2: Φωτογραφία των 3 PV πάνελ της εγκατάστασης

Η εγκατάσταση διαθέτει επίσης μεταβλητή ωμική αντίσταση, και δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να την μεταβάλει μέσω κλιμακωτής περιέλιξης από 0-1kΩ.



Σχήμα 1.3: Φωτογραφία της μεταβλητής αντίστασης της εγκατάστασης

Υπάρχει ακόμα η δυνατότητα να παρακολουθούμε τις τιμές της έντασης και της τάσης του ρεύματος καθώς και της αποδιδόμενης ισχύος και άλλων χαρακτηριστικών του ρεύματος μέσω του ψηφιακού πολύμετρου που διαθέτει η εγκατάσταση.



Σχήμα 1.4: Φωτογραφία του ψηφιακού πολύμετρου της εγκατάστασης

1.2 ΕΠΙΠΡΟΣΘΕΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ

Ο πειραματικός προσομοιωτής περιλαμβάνει και κάποια εξαρτήματα τα οποία δεν χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία τα οποία όμως απαντώνται σε όλες της φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις. Κρίνεται αναγκαίο λοιπόν να κάνουμε μια σύντομη αναφορά στον ρόλο του κάθε εξαρτήματος από αυτά.

1.2.1 Μετατροπέας (Inverter)



Σχήμα 1.5: Φωτογραφία του inverter της εγκατάστασης

Ο μετατροπέας (inverter) είναι ο εγκέφαλος ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, καθώς διασφαλίζει την σωστή λειτουργία του.

Πρόκειται για μια συσκευή η οποία μετατρέπει το συνεχές ρεύμα που παράγει η εγκατάσταση σε εναλλασσόμενο ώστε να είναι συμβατό με το δίκτυο. Μπορεί να μετατρέψει το έμπρακτο της ενέργειας που παράγει το πάνελ για αυτόνομο και για διασυνδεδεμένο σύστημα. Περιέχει ηλεκτρονικές και ηλεκτρολογικές διατάξεις στην κατασκευή του.

Οποιαδήποτε βλάβη εμφανιστεί στο σύστημα θα εμφανιστεί στο inverter ο οποίος θα ενημερώσει και θα πράξει αναλόγως, καθώς είναι διασυνδεδεμένος με όλο το σύστημα. Σε μια τέτοια περίπτωση εμφανίζεται μήνυμα στην οθόνη του inverter, εκτός αν ο inverter έχει δυνατότητα σύνδεσης με το διαδίκτυο ή GSM modem (τεχνολογία κινητού τηλεφώνου) όπου

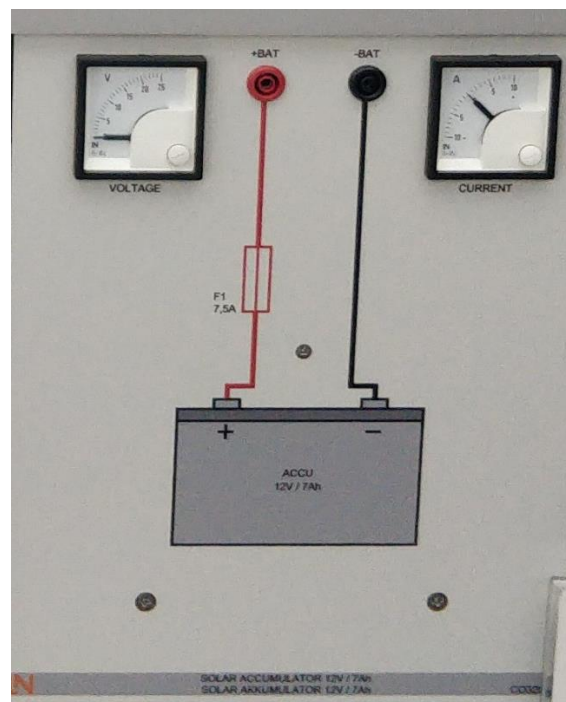
θα μπορεί ο χρήστης να δει τη βλάβη και αν είναι απομακρυσμένος από την εγκατάσταση. Εκτός από τη βλάβη με αυτό το τρόπο μπορεί να καταγραφεί και η απόδοση του συστήματος.

Ο βαθμός απόδοσης του inverter είναι ο λόγος της παραγόμενης ενέργειας προς την ενέργεια που παράγεται από τα πάνελ. Όσο πιο μεγάλο συντελεστή έχουμε τόσο περισσότερο είναι το ρεύμα που θα διοχετευθεί στο δίκτυο από το παραγόμενο ρεύμα των πάνελ. Ο βαθμός απόδοσης ενός inverter μπορεί να φτάσει μέχρι και το 92%-99%.

Οι inverter χωρίζονται σε δύο κατηγορίες του μονοφασικούς και τους τριφασικούς. Αναλόγως την εγκατάσταση επιλέγουμε και τον κατάλληλο. Ο μονοφασικός είναι αυτός που παράγει ρεύμα μιας φάσης ενώ ο τριφασικός ρεύμα τριών φάσεων. Για οικιακές εγκαταστάσεις έως 5KWp απαιτείται από τη Δ.Ε.Η. μονοφασικό ρεύμα οπότε χρησιμοποιούμε μονοφασικό inverter. Για εγκαταστάσεις μεγαλύτερες των 5KWp απαιτείται τριφασικό ρεύμα άρα θέλουμε τριφασικό inverter ή τρεις μονοφασικούς inverter δηλαδή ένα για κάθε φάση.

Η διάρκεια ζωή τους υπολογίζεται κάπου στα 25 χρόνια στο μέγιστο βαθμό απόδοσης και οι εγγυήσεις που δίνονται είναι συνήθως πενταετής με δυνατότητα επέκτασης.

1.2.2 Συσσωρευτές



Σχήμα 1.6: Φωτογραφία του συσσωρευτή της εγκατάστασης

Οι συσσωρευτές αποθηκεύουν ηλιακή ενέργεια σε χημική ενέργεια σε διαλύματα ηλεκτρολύτη μέσω ηλεκτροδίων όταν δεν υπάρχει ζήτηση και την αποδεσμεύουν με τη μορφή ηλεκτρισμού στο σύστημα όταν έχει έλλειψη με τη αντίθετη διαδικασία.

Για τα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιούμε συσσωρευτές βαθιάς εκφόρτωσης και χωρίζονται σε ανοιχτού και κλειστού τύπου και η χωρητικότητα τους μετριέται σε αμπερώρια (Ah).

Η επιλογή συσσωρευτών είναι πολύ σημαντική καθώς η αναβάθμιση τους είναι δύσκολη και πολύ ακριβή.

Ο υπολογισμός του μεγέθους των μπαταριών εξαρτάται από τις κιλοβατώρες που χρειάζονται ημερησίως, τις ώρες ηλιοφάνειας αλλά και τις μέρες χωρίς ηλιοφάνεια.

Οι συσσωρευτές δεν πρέπει να εκφορτίζονται πλήρως διότι ο χρόνος ζωής τους μειώνεται, για αυτό το λόγο θα πρέπει πάντα να υπάρχει το 20% της χωρητικότητας σε ενέργεια, ενώ αν οι συσσωρευτές είναι σε χρήση καθημερινά (φόρτιση-εκφόρτωση) δεν πρέπει να εκφορτίζονται ούτε κάτω από το 60%.

Τέλος, μπορούμε να συνδέσουμε τους συσσωρευτές σε σειρά ή παράλληλα, αρκεί όμως οι συσσωρευτές να είναι στην ίδια κατάσταση, ηλικία και χαρακτηριστικά. Στην σύνδεση σε σειρά η χωρητικότητα σε αμπερώρια παραμένει σταθερή ενώ η τάση του ρεύματος διπλασιάζεται (όταν έχουμε δύο συσσωρευτές), ενώ στην παράλληλη σύνδεση η χωρητικότητα τους θα διπλασιαστεί και η τάση του ρεύματος θα παραμείνει σταθερή.

1.2.3 Ρυθμιστής Φόρτισης (Charge Controller)

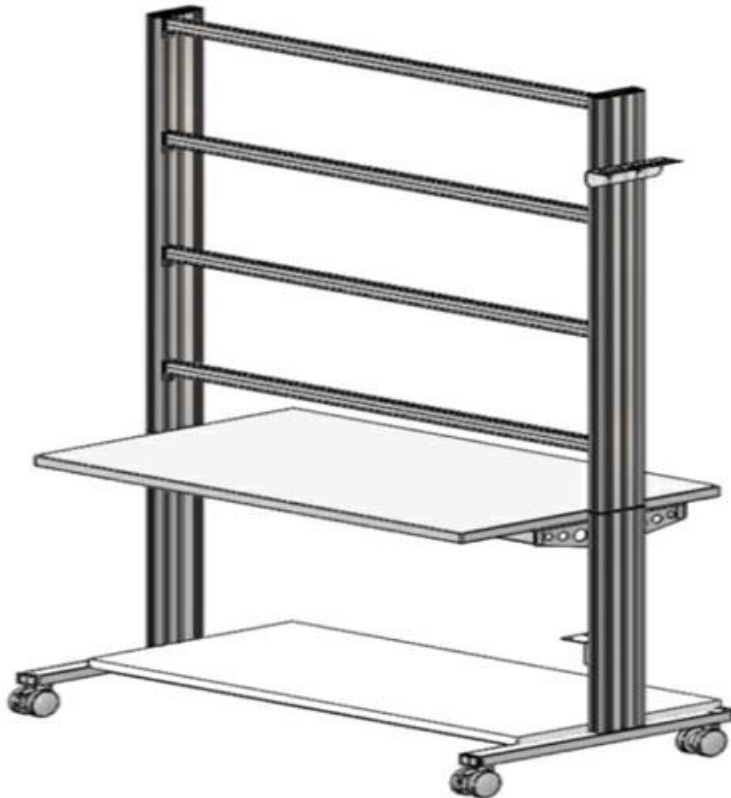


Σχήμα 1.7: Φωτογραφία του Charge Controller της εγκατάστασης

Ο ρυθμιστής φόρτισης είναι το σύστημα που θα καθορίσει τη διάρκεια ζωής των συσσωρευτών. Αποτελεί ίσως το οικονομικότερο μέρος του φωτοβολταϊκού συστήματος, παρόλα αυτά το έργο του είναι πολύ σημαντικό για την εγκατάσταση διότι καθορίζει τη διοχέτευση της προσλαμβόμενης ισχύος στις μπαταρίες. Δηλαδή αν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια παράξουν 70Volts και 9A ο ρυθμιστής φόρτισης θα προσφέρει 26Volts και 24A σε μία 24βολτή συστοιχία. Συνδέονται με τη συστοιχία των συσσωρευτών.

Τέλος χωρίζονται σε δύο κατηγορίες τους PWM και τους MPPT. Το PWM σημαίνει ρύθμιση πλάτος-πλάτος. Λειτουργεί όταν οι συσσωρευτές είναι γεμάτοι και διασφαλίζει ότι η συστοιχία των μπαταριών φορτίζεται, αποτρέποντας τη διαδικασία υπερφόρτισης. Το MPPT σημαίνει μέγιστη ανίχνευση ισχύος. Ρυθμίζει την εισερχόμενη τάση προκειμένου να διατηρηθεί η μέγιστη ισχύς του συστήματος σταθερή.

Όλα τα εξαρτήματα είναι τοποθετημένα σε ένα κινητό τραπέζι αλουμινίου διαστάσεων 1250x700x1995mm (ΥxΠxB).



Σχήμα 1.8: Τραπέζι εγκατάστασης

2 ΑΣΚΗΣΗ 1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΕΞΟΔΟΥ

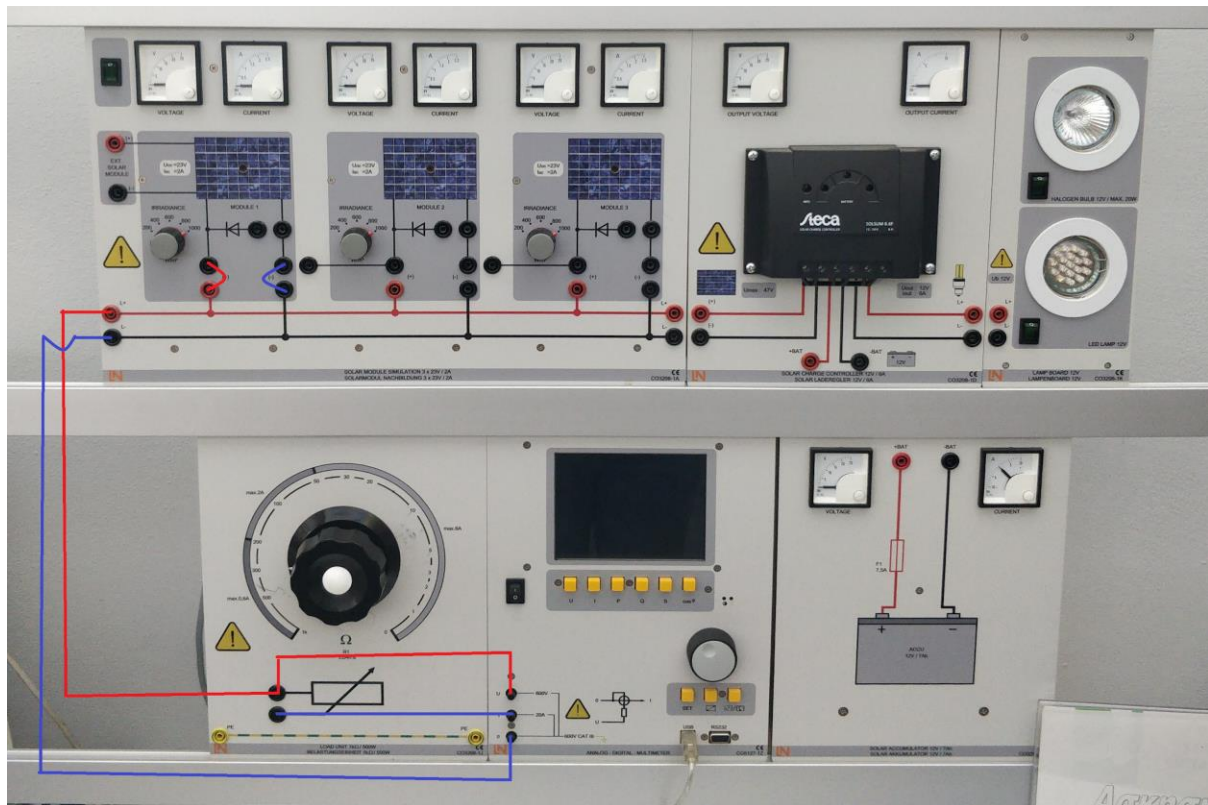
2.1 ΣΤΟΧΟΣ

Ο στόχος αυτής της εφαρμογής είναι να μάθουν οι φοιτητές να υπολογίζουν την πραγματική μέγιστη ισχύ εξόδου ενός πάνελ PV με την βοήθεια ενός προσομοιωτή. Τα ευρήματα αυτής της άσκησης θα χρησιμοποιηθούν ως σημείο αναφοράς που θα βοηθήσει τους φοιτητές να κατανοήσουν πως επηρεάζεται η απόδοση ενός πάνελ PV σε διαφορετικές συνθήκες (σκίαση, διαφορετικές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, διαφορετικές συνδεσμολογίες) που θα χρησιμοποιηθούν στις επόμενες ασκήσεις.

2.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΘΕΩΡΙΑ

Η συντριπτική πλειονότητα των κατασκευαστών PV πάνελ ανακοινώνουν τις χαρακτηριστικές τιμές των προϊόντων τους (π.χ. I_{SC} , V_{OC} , P_{max}) για ιδανικές συνθήκες. Στην πραγματικότητα όμως οι τιμές αυτές επηρεάζονται από έναν μεγάλο αριθμό εξωτερικών παραγόντων μερικοί από τους οποίους είναι: η θερμοκρασία του πάνελ, οι επικαθίσεις σκόνης ή βρωμιάς στο πάνελ, η γήρανση του πάνελ και η συνδεσμολογία που επιλέγεται. Η συγκεκριμένη πειραματική διάταξη δίνει τη δυνατότητα να μελετηθεί η συμπεριφορά των PV πάνελ χρησιμοποιώντας έναν πειραματικό προσομοιωτή με το ισοδύναμο κύκλωμα ενός PV. Έτσι έχουμε το πλεονέκτημα να μελετήσουμε τη συμπεριφορά των PV πάνελ χωρίς την επίδραση εξωτερικών παραγόντων ή ακόμα μπορούμε να προσομοιάσουμε κατά βούληση μερικούς από αυτούς τους εξωτερικούς παράγοντες.

2.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ



Σχήμα 2.1: Συνδεσμολογία για μετρήσεις σε ένα PV

Όταν το σύστημα είναι κλειστό (διακόπτης on/off), γεφυρώνουμε την αρνητική και τη θετική έξοδο του φωτοβολταϊκού αντίστοιχα με τη γραμμή μεταφοράς χρησιμοποιώντας από έναν συνδετήρα για κάθε έξοδο.

Στη συνέχεια συνδέουμε με καλώδιο την θετική επαφή μεταφοράς με την μεταβλητή αντίσταση, με άλλο καλώδιο συνεχίζουμε από τη σύνδεση της επαφής της μεταβλητής αντίστασης με την υποδοχή στο ψηφιακό πολύμετρο στη θέση τάση (U).

Ενώ την δεύτερη επαφή που υπάρχει στην μεταβλητή αντίσταση τη συνδέουμε με τη υποδοχή που υπάρχει στο ψηφιακό πολύμετρο στη θέση του ρεύματος (I).

Τέλος με καλώδιο από την αρνητική επαφή μεταφοράς συνδέουμε με το ψηφιακό πολύμετρο στη θέση (O). Αυτή είναι η συνδεσμολογία του ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.1.

Το σύστημα πλέον είναι σε θέση να εκτελέσει μέτρηση, οι φοιτητές εισάγουν την επιθυμητή ηλιακή ακτινοβολία γυρνώντας τον περιστροφικό διακόπτη στην θέση που αντιστοιχεί στην ηλιακή ακτινοβολία που έχουν επιλέξει για να κάνουν μετρήσεις για την εργαστηριακή άσκηση. Ανοίγουν το διακόπτη τροφοδοσίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου που είναι πάνω από το φωτοβολταϊκό και το διακόπτη τροφοδοσίας του ψηφιακού πολυμέτρου.

Στην συγκεκριμένη εργαστηριακή άσκηση, επιθυμούμε στον προσομοιωτή ηλιακή ακτινοβολία 1000W/m^2 .

Επιλέγουμε στο πολύμετρο τα κουμπιά που αντιστοιχούν σε ρεύμα (I) και τάση (V) και βλέπουμε στην οθόνη μας το ρεύμα και την τάση του συστήματος.

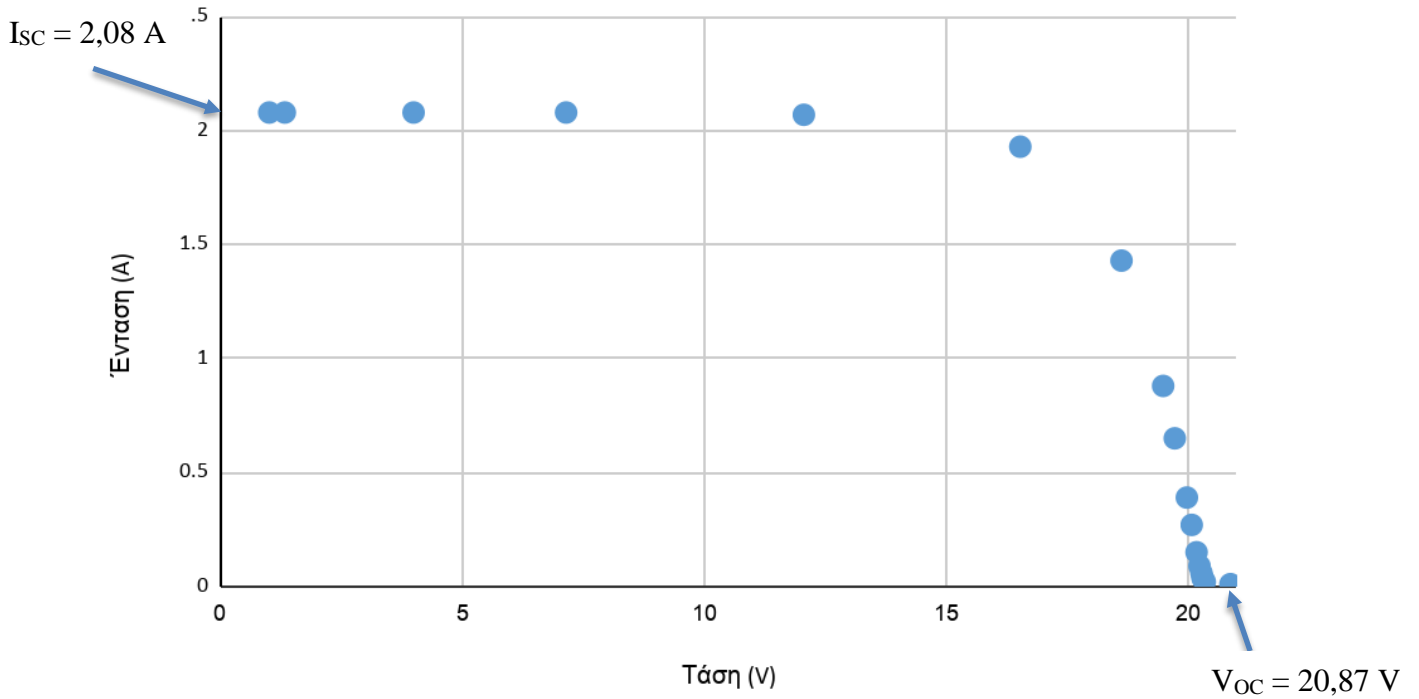
Για την συμπλήρωση του πίνακα μετρήσεων μεταβάλλουμε την ωμική αντίσταση μεταξύ των τιμών $1\text{K}\Omega$ και $0\ \Omega$. Στην προκειμένη περίπτωση προσπαθήσαμε να χωρίσουμε το εύρος της αντίστασης σε 18 ίσα μέρη και κατόπιν πήραμε μετρήσεις για την τάση (V) και την ένταση (A) του ρεύματος που παράγει το PV πάνελ για κάθε τιμή της αντίστασης. Οι μετρήσεις φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

2.4 ΔΥΣΗ

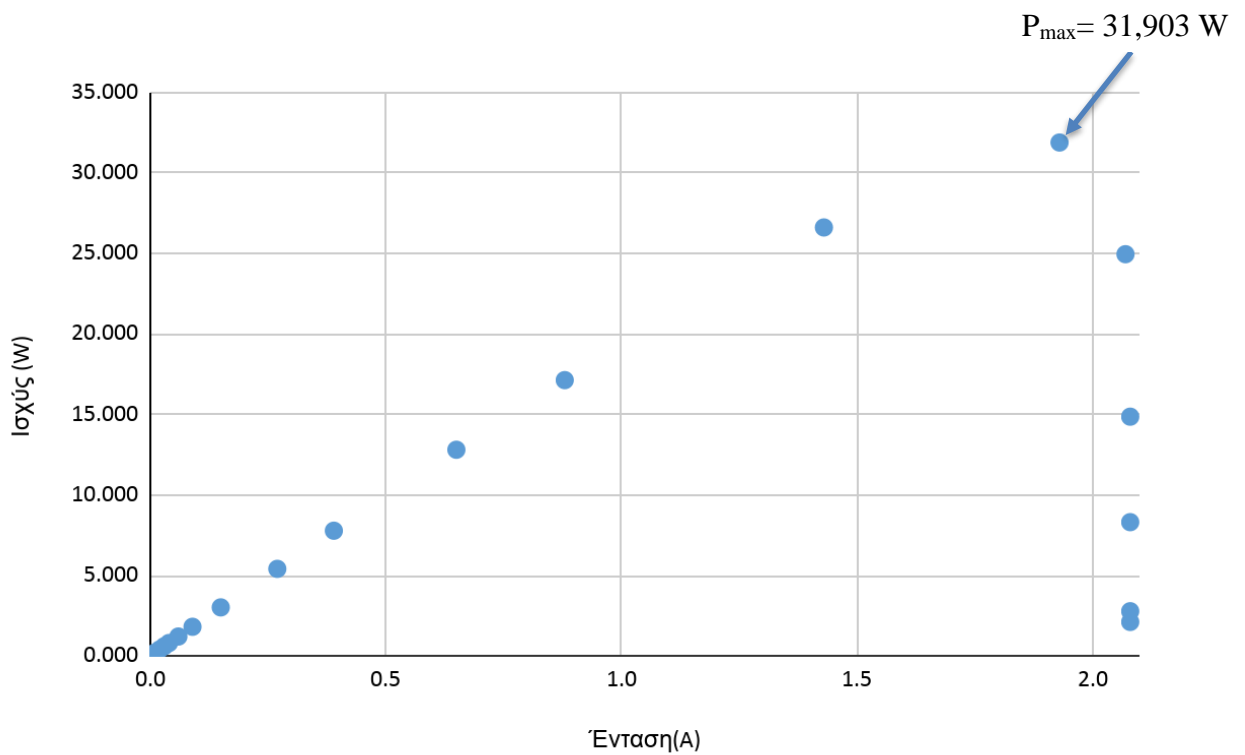
Πίνακας 2. I: Πειραματικές μετρήσεις εγκατάστασης για απόδοση φωτοβολταϊκού στοιχείου για ηλιακή ακτινοβολία ίση με 1000 W/m²:

A/A	V(V)	I(A)	P(W)
1	1.02	2.08	2.122
2	1.34	2.08	2.787
3	4	2.08	8.320
4	7.15	2.08	14.872
5	12.06	2.07	24.964
6	16.53	1.93	31.903
7	18.62	1.43	26.627
8	19.48	0.88	17.142
9	19.72	0.65	12.818
10	19.97	0.39	7.788
11	20.07	0.27	5.419
12	20.17	0.15	3.026
13	20.23	0.09	1.821
14	20.27	0.06	1.216
15	20.29	0.04	0.812
16	20.31	0.03	0.609
17	20.34	0.02	0.407
18	20.87	0.01	0.209

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία χαράσσουμε τις καμπύλες έντασης - τάσης (I-V) και ισχύος - έντασης (W-I) . Τα αποτελέσματα φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 2.2: Τάση που παράγεται από ένα PV πάνελ συναρτήσει της έντασης του ρεύματος που παράγεται



Σχήμα 2.3: Παραγόμενη ισχύς από ένα PV πάνελ συναρτήσει της έντασης του ρεύματος

Από το το συγκεκριμένο σετ μετρήσεων χρησιμοποιώντας την εξίσωση για τον υπολογισμό της ισχύος $P=I \cdot V$ προκύπτει ότι η μέγιστη πειραματική ισχύς εξόδου είναι :

$$P_{\max} = I \cdot V = 1,93 \cdot 16,53 = 31,903 \text{ W}$$

Επίσης από το Σχήμα 7.2 βρίσκουμε ότι $I_{SC} = 2,08 \text{ A}$ και $V_{OC} = 20,87 \text{ V}$.

2.5 ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την εργαστηριακή άσκηση είχαμε το πλεονέκτημα, χρησιμοποιώντας τον πειραματικό προσομοιωτή, να κάνουμε μετρήσεις οι οποίες δεν επηρεάζονται από εξωτερικούς παράγοντες που συνήθως επηρεάζουν τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών πάνελ. Συγκεκριμένα δεν υπήρχαν: μεταβολές στη θερμοκρασία, άνεμος, σκίαση από αντικείμενα ή φυτά, ακαθαρσίες ή σκόνη στην επιφάνεια του πάνελ. Επίσης ο πειραματικός προσομοιωτής δεν έχει ατέλειες που έχει ένα πραγματικό PV πάνελ όπως ατέλειες στην κρυσταλλική δομή του στοιχείου του ούτε εμφανίζει το φαινόμενο της γήρανσης όπως γίνεται στα πραγματικά PV πάνελ. Τέλος, η ηλιακή ακτινοβολία ήταν σταθερή καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος πράγμα που είναι αδύνατον να επιτευχθεί σε εξωτερικό χώρο με πραγματικές συνθήκες. Λόγω των παραπάνω στοιχείων οι μετρήσεις που γίνονται με τον πειραματικό προσομοιωτή μπορούν να επαναληφθούν από οποιονδήποτε φοιτητή με πολύ μεγάλη συνέπεια στα αποτελέσματα.

3 ΆΣΚΗΣΗ 2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΜΠΥΛΩΝ I-V ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ**3.1 ΣΤΟΧΟΣ**

Ο στόχος αυτής ασκήσεως είναι να χαράξουν οι φοιτητές της πραγματικές καμπύλες I-V ενός PV πάνελ και να υπολογίσουν βασικά μεγέθη όπως αυτά που ανακοινώνουν οι κατασκευαστές PV πάνελ (διαφορετικές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας).

3.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΘΕΩΡΙΑ

Για να κατανοήσουμε τι απεικονίζουν οι καμπύλες I-V πρέπει πρώτα να δούμε την θεωρία που διέπει την λειτουργία των φωτοβολταϊκών κυψελών. Κάθε φωτοβολταϊκή κυψέλη στη βάση της είναι μία ηλεκτρική δίοδος και όπως ξέρουμε από το νόμο των ιδανικών διόδων το ρεύμα που της διαπερνά φαίνεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad \text{Εξίσωση (3.1)}$$

όπου:

I = η ένταση του ρεύματος που διαρρέει τη δίοδο

I_0 = "dark saturation current", το ρεύμα "διαρροής" της διόδου απουσία φωτός

V = εφαρμοζόμενη τάση στα άκρα της διόδου

q = απόλυτη τιμή του φορτίου ενός ηλεκτρονίου

k = σταθερά του Boltzmann

T = θερμοκρασία (K).

Το ρεύμα "διαρροής" της διόδου (I_0 "dark saturation current") είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος που διαφοροποιεί κάθε δίοδο. Γενικά το I_0 μεγαλώνει όσο μεγαλώνει η θερμοκρασία και μειώνεται όσο καλύτερη είναι η ποιότητα του υλικού της κυψέλης.

Στην περίπτωση μη ιδανικής διόδου η εξίσωση (8.1) γίνεται:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) \quad \text{Εξίσωση (3.2)}$$

όπου:

n = παράγοντας ιδεατότητας, ένας αριθμός μεταξύ του 1 και του 2 που τυπικά αυξάνεται όσο αυξάνεται η ένταση του ρεύματος.

Η καμπύλη I-V μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης είναι επαλληλία της καμπύλης I-V της διόδου της φωτοβολταϊκής κυψέλης χωρίς την επίδραση του φωτός με το ρεύμα που παράγεται από το φως. Το φως μετακινεί την καμπύλη I-V προς τα κάτω στο τέταρτο τεταρτημόριο όπου μπορεί να με τις πάρουμε ενέργεια από τη δίοδο. Φωτίζοντας μία φωτοβολταϊκή κυψέλη προσθέτουμε στο I_0 της οπότε ο νόμος για τις διόδους γίνεται:

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] - I_L \quad \text{Εξίσωση (3.3)}$$

Όπου I_L = το ρεύμα που παράγεται από το φως

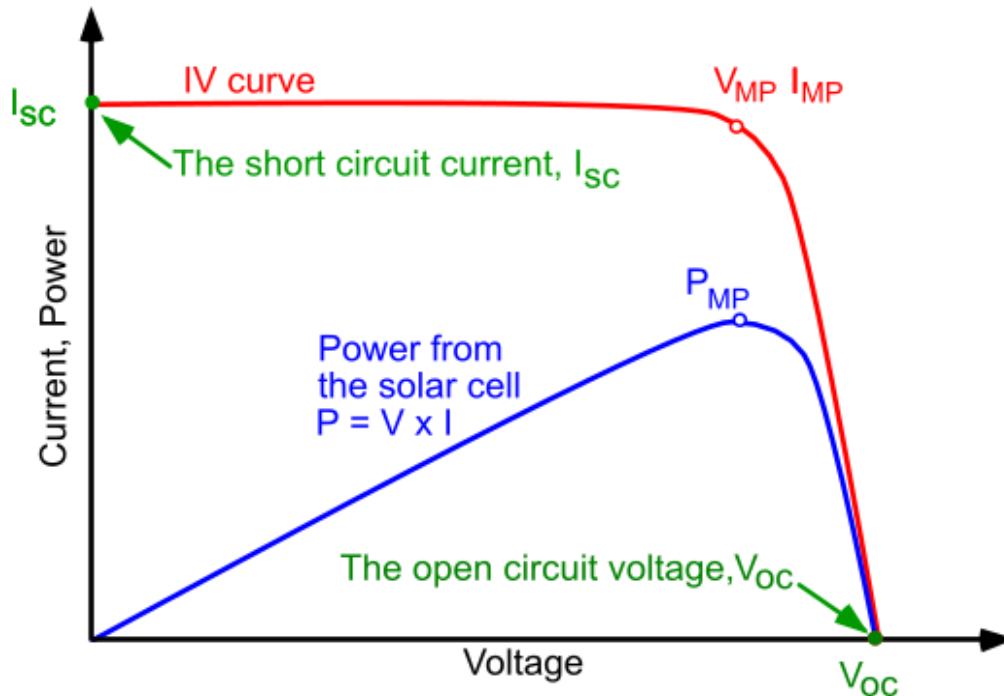
Η εξίσωση για την καμπύλη I-V στο πρώτο τεταρτημόριο είναι:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] \quad \text{Εξίσωση (3.4)}$$

Ο όρος -1 στην παραπάνω εξίσωση μπορεί συνήθως να αγνοηθεί. Ο εκθετικός όρος είναι συνήθως $\gg 1$ με την εξαίρεση των τάσεων μικρότερων των 100 mV. Ακόμα, σε χαμηλές τάσεις, το ρεύμα που παράγεται από το φως I_L είναι κατά πολύ μεγαλύτερος του όρου $I_0(\dots)$ οπότε το -1 δεν χρειάζεται όταν η Κυψέλη δέχεται ηλιακή ακτινοβολία και η εξίσωση (3.4) γίνεται:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) \right] \quad \text{Εξίσωση (3.5)}$$

Όταν σχεδιάζουμε την παραπάνω εξίσωση καταλήγουμε στην καμπύλη I-V που βλέπουμε παρακάτω στην οποία φαίνονται τα σημαντικότερα σημεία που μας ενδιαφέρουν με τα οποία και θα ασχοληθούμε αργότερα. Η καμπύλη ισχύος έχει ένα σημείο που αναφέρεται στο διάγραμμα ως P_{MP} όπου και θα πρέπει να λειτουργεί η φωτοβολταϊκή κυψέλη ώστε να δίνει τη μέγιστη ισχύ εξόδου. Από αυτό το σημείο μέγιστης ισχύος (P_{MP}) προκύπτει επίσης η τάση μέγιστης ισχύος (V_{MP}) και η ένταση μέγιστης ισχύος (I_{MP}).



Σχήμα 3.1: Τυπική καμπύλη I-V και χαρακτηριστικά μεγέθη PV κυψέλης

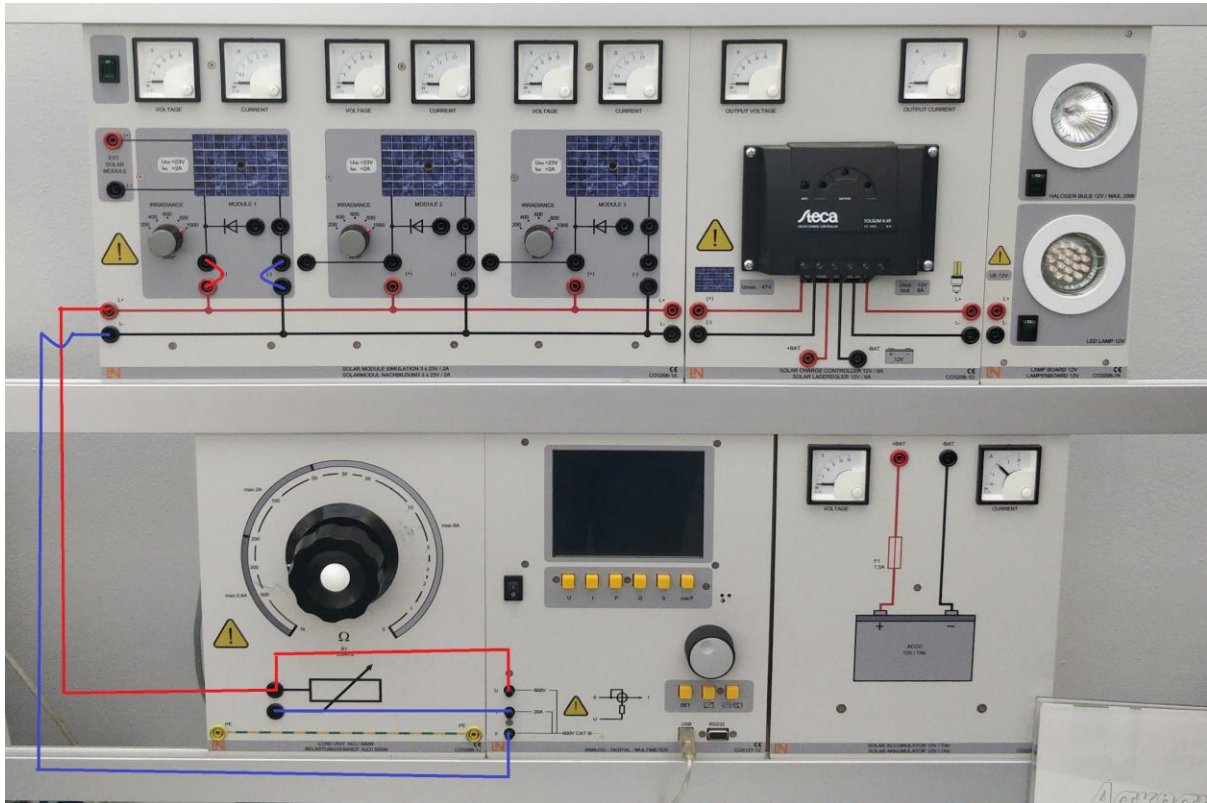
Σε αυτό το διάγραμμα βλέπουμε αρκετές σημαντικές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν τη φωτοβολταϊκή κυψέλη όπως είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}), η τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}) και η μέγιστη ισχύς (P_{MP}) που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του Fill Factor (FF) και της αποδοτικότητας.

Αναφορικά με την εξίσωση (3.5) όταν τη λύσουμε για την τάση έχουμε:

$$V = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_L - I}{I_0}\right) \quad \text{Εξίσωση (3.6)}$$

Από την εξίσωση (3.6) παρατηρούμε όταν $I > I_L$ τότε ο όρος $\ln(\)$ είναι αρνητικός και δεν ορίζεται. Σε αυτή την περίπτωση η φωτοβολταϊκή κυψέλη λειτουργεί μεροληπτικά (ως φορτίο) και η τάση μειώνεται είτε λόγω των εσωτερικών ατελειών της κρυσταλλικής δομής της κυψέλης είτε η εξωτερική πηγή θα μειώσει την τάση. Και στις δύο περιπτώσεις η φωτοβολταϊκή κυψέλη θα καταναλώσει ενέργεια. Εάν δεν υπάρχει όριο στην παροχή ενέργειας τότε μία φωτοβολταϊκή κυψέλη που είναι σχεδόν ιδανική θα καταστραφεί ακαριαία. Άλλες κυψέλες μπορεί να καταστραφούν λόγω υπερθέρμανσης. Το πρόβλημα της κατανάλωσης ισχύος από τις φωτοβολταϊκές κυψέλες μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας διατάξεις bypass διόδων.

3.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ



Σχήμα 3.2: Συνδεσμολογία για μετρήσεις σε ένα PV

Όταν το σύστημα είναι κλειστό (διακόπτης on/off), γεφυρώνουμε την αρνητική και τη θετική έξοδο του φωτοβολταϊκού αντίστοιχα με τη γραμμή μεταφοράς χρησιμοποιώντας από έναν συνδετήρα για κάθε έξοδο.

Στη συνέχεια συνδέουμε με καλώδιο την θετική επαφή μεταφοράς με την μεταβλητή αντίσταση, με άλλο καλώδιο συνεχίζουμε από τη σύνδεση της επαφής της μεταβλητής αντίστασης με την υποδοχή στο ψηφιακό πολύμετρο στη θέση τάση (U).

Ενώ την δεύτερη επαφή που υπάρχει στην μεταβλητή αντίσταση τη συνδέουμε με τη υποδοχή που υπάρχει στο ψηφιακό πολύμετρο στη θέση του ρεύματος (I).

Τέλος με καλώδιο από την αρνητική επαφή μεταφοράς συνδέουμε με το ψηφιακό πολύμετρο στη θέση (O). Αυτή είναι η συνδεσμολογία του ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2.

Το σύστημα πλέον είναι σε θέση να εκτελέσει μέτρηση, οι φοιτητές εισάγουν την επιθυμητή ηλιακή ακτινοβολία γυρνώντας τον περιστροφικό διακόπτη στην θέση που αντιστοιχεί στην ηλιακή ακτινοβολία που έχουν επιλέξει για να κάνουν μετρήσεις για την εργαστηριακή άσκηση. Ανοίγουν το διακόπτη τροφοδοσίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου που είναι πάνω από το φωτοβολταϊκό και το διακόπτη τροφοδοσίας του ψηφιακού πολυμέτρου.

Στην συγκεκριμένη εργαστηριακή άσκηση, επιθυμούμε στον προσομοιωτή ηλιακή ακτινοβολία 1000W/m^2 .

Επιλέγουμε στο πολύμετρο τα κουμπιά που αντιστοιχούν σε ρεύμα (I) και τάση (V) και βλέπουμε στην οθόνη μας το ρεύμα και την τάση του συστήματος.

Για την συμπλήρωση του πίνακα μετρήσεων μεταβάλλουμε την ωμική αντίσταση μεταξύ των τιμών $1\text{K}\Omega$ και $0\ \Omega$. Στην προκειμένη περίπτωση προσπαθήσαμε να χωρίσουμε το εύρος της αντίστασης σε 18 ίσα μέρη και κατόπιν πήραμε μετρήσεις για την τάση (V) και την ένταση (A) του ρεύματος που παράγει το PV πάνελ για κάθε τιμή της αντίστασης. Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία για ηλιακή ακτινοβολία 800W/m^2 , 600W/m^2 , 400W/m^2 και 200W/m^2 . Οι μετρήσεις φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

3.4 ΛΥΣΗ

Πίνακας 8.1: Πειραματικές μετρήσεις προσομοιωτή για ηλιακή ακτινοβολία $G= 1000\text{W/m}^2$

A/A	I (A)	V (V)	P(W)
1	0,01	20,87	0,2087
2	0,02	20,34	0,4068
3	0,03	20,31	0,6093
4	0,04	20,29	0,8116
5	0,06	20,27	1,2162
6	0,09	20,23	1,8207
7	0,15	20,17	3,0255
8	0,27	20,07	5,4189
9	0,39	19,97	7,7883
10	0,65	19,72	12,818
11	0,88	19,48	17,1424
12	1,43	18,62	26,6266
13	1,93	16,53	31,9029
14	2,07	12,06	24,9642
15	2,08	7,15	14,872
16	2,08	4	8,32
17	2,08	1,34	2,7872
18	2,08	1,02	2,1216

Πίνακας 3.Π: Πειραματικές μετρήσεις προσομοιωτή για ηλιακή ακτινοβολία $G= 800\text{W/m}^2$

A/A	I (A)	V (V)	P(W)
1	0,02	19,91	0,3982
2	0,03	19,94	0,5982
3	0,03	19,96	0,5988
4	0,04	19,97	0,7988
5	0,06	19,98	1,1988
6	0,09	19,97	1,7973
7	0,15	19,91	2,9865
8	0,26	19,78	5,1428
9	0,39	19,63	7,6557
10	0,64	19,24	12,3136
11	0,86	18,85	16,211
12	1,37	17,38	23,8106
13	1,65	14,29	23,5785
14	1,67	9,57	15,9819
15	1,68	5,88	9,8784
16	1,68	3,31	5,5608
17	1,68	0,96	1,6128
18	1,68	0,69	1,1592

Πίνακας 3.ΙΙΙ: Πειραματικές μετρήσεις προσομοιωτή για ηλιακή ακτινοβολία $G= 600\text{W/m}^2$

A/A	I (A)	V (V)	P(W)
1	0,02	20,99	0,4198
2	0,02	20,8	0,416
3	0,03	20,71	0,6213
4	0,04	20,64	0,8256
5	0,06	20,56	1,2336
6	0,09	20,48	1,8432
7	0,15	20,35	3,0525
8	0,27	20,13	5,4351
9	0,39	19,9	7,761
10	0,64	19,35	12,384
11	0,85	18,65	15,8525
12	1,21	15,64	18,9244
13	1,26	10,57	13,3182
14	1,26	7,29	9,1854
15	1,26	4,18	5,2668
16	1,26	2,68	3,3768
17	1,26	1,06	1,3356
18	1,26	0,66	0,8316

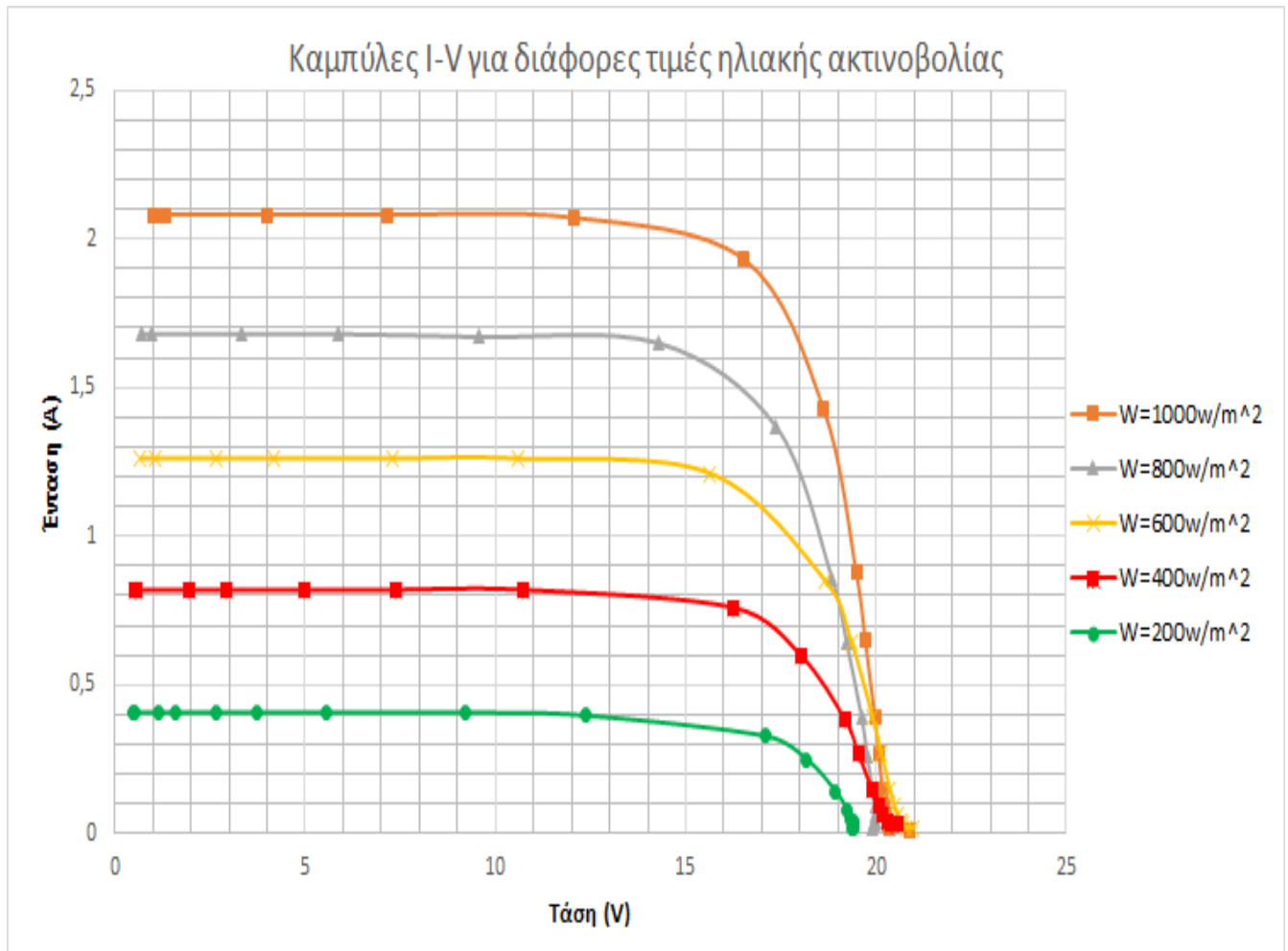
Πίνακας 3.IV: Πειραματικές μετρήσεις προσομοιωτή για ηλιακή ακτινοβολία $G= 400\text{W}/\text{m}^2$

A/A	I (A)	V (V)	P(W)
1	0,03	20,56	0,6168
2	0,03	20,45	0,6135
3	0,03	20,37	0,6111
4	0,04	20,28	0,8112
5	0,06	20,19	1,2114
6	0,09	20,08	1,8072
7	0,15	19,9	2,985
8	0,27	19,54	5,2758
9	0,38	19,21	7,2998
10	0,6	18,03	10,818
11	0,76	16,27	12,3652
12	0,82	10,73	8,7986
13	0,82	7,38	6,0516
14	0,82	5	4,1
15	0,82	2,92	2,3944
16	0,82	1,96	1,6072
17	0,82	0,57	0,4674
18	0,82	0,52	0,4264

Πίνακας 3.V: Πειραματικές μετρήσεις προσομοιωτή για ηλιακή ακτινοβολία $G= 200\text{W}/\text{m}^2$

A/A	I (A)	V (V)	P(W)
1	0,02	19,37	0,3874
2	0,02	19,4	0,388
3	0,03	19,41	0,5823
4	0,04	19,4	0,776
5	0,05	19,34	0,967
6	0,08	19,22	1,5376
7	0,14	18,93	2,6502
8	0,25	18,17	4,5425
9	0,33	17,09	5,6397
10	0,4	12,36	4,944
11	0,41	9,2	3,772
12	0,41	5,54	2,2714
13	0,41	3,72	1,5252
14	0,41	2,68	1,0988
15	0,41	1,59	0,6519
16	0,41	1,16	0,4756
17	0,41	0,51	0,2091
18	0,41	0,5	0,205

Στην συνέχεια με την βοήθεια κατάλληλου λογισμικού χαράσσουμε τις καμπύλες I-V για τις διάφορες περιπτώσεις ηλιακής ακτινοβολίας και φτιάχνουμε ένα διάγραμμα σαν και αυτό που δίνουν οι κατασκευαστές φωτοβολταϊκών για τα προϊόντα τους.



Σχήμα 3.3: Καμπύλες I-V ενός PV πάνελ για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας

3.5 ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από το παραπάνω σχήμα μπορούμε να βγάλουμε μερικά χρήσιμα συμπεράσματα. Αρχικά βλέπουμε ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}) μειώνεται ευθέως ανάλογα με τη μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας όπως ακριβώς προβλέπει η θεωρία στην εισαγωγή της άσκησης. Επίσης παρατηρούμε όλες οι καμπύλες I-V ανεξαρτήτως της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας συγκλίνουν προς την ίδια τιμή τάσης ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}) $\approx 20V$. Οπότε συμπεραίνουμε ότι η τάση του ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}) είναι ανεξάρτητη της ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης από τους πίνακες παρατηρούμε ότι η μέγιστη ισχύς για κάθε ακτινοβολία μειώνεται αναλογικά με την μείωση της ακτινοβολίας (π.χ. $P_{max1000} = 31,9 W$, $P_{max1000} * 0,4 = 31,9 W * 0,4 = 12,76W \approx P_{max400} = 12,36$). Τέλος από ότι φαίνεται δεν επηρεάζονται από την

ηλιακή ακτινοβολία ούτε ο Fill Factor (FF) ούτε η αποδοτικότητα καθώς είναι μεγέθη χαρακτηριστικά για το κάθε πάνελ.

4 ΑΣΚΗΣΗ 3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΥΠΟ ΣΚΙΑΣΗ

4.1 ΣΤΟΧΟΣ

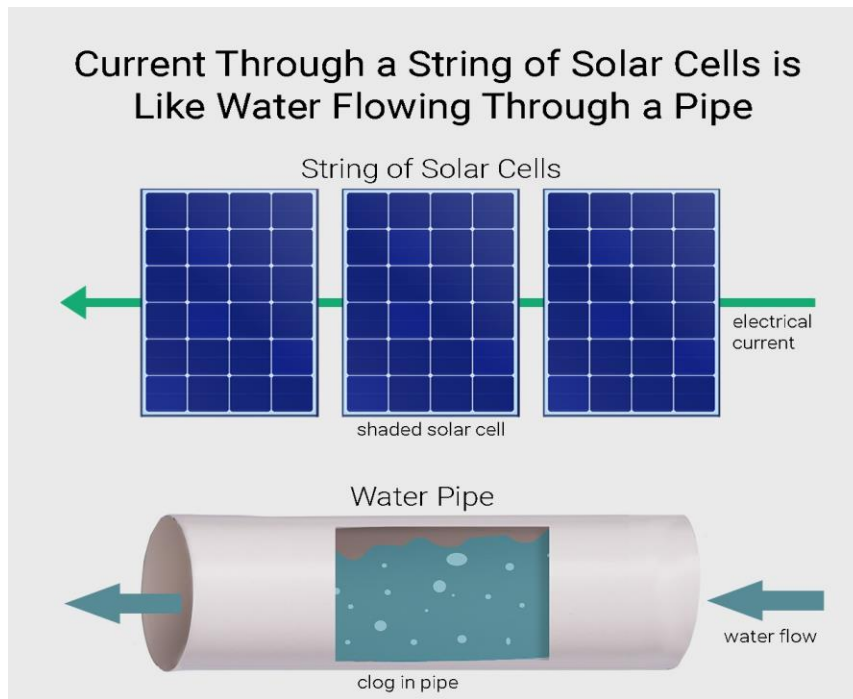
Ο στόχος αυτής της εφαρμογής είναι οι σπουδαστές να κατανοήσουν την επίδραση της σκίασης στην λειτουργία του PV πάνελ, υπολογίζοντας την μέγιστη ισχύ εξόδου ενός σκιασμένου PV πάνελ και κατόπιν συγκρίνοντας το αποτέλεσμα με την πραγματική ισχύ που έχει ένα μη σκιασμένο PV πάνελ.

9.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΘΕΩΡΙΑ

Ως γνωστόν τα PV πάνελ παράγουν ηλεκτρική ενέργεια που εξαρτάται άμεσα από το πόση ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνειά τους, οπότε είναι λογικό η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια να μειώνεται όταν ένα μέρος του πάνελ ή ολόκληρο το πάνελ σκιάζεται. Όμως, η μείωση της ισχύος του πάνελ μπορεί να είναι χειρότεροι από ότι φαίνεται αρχικά.

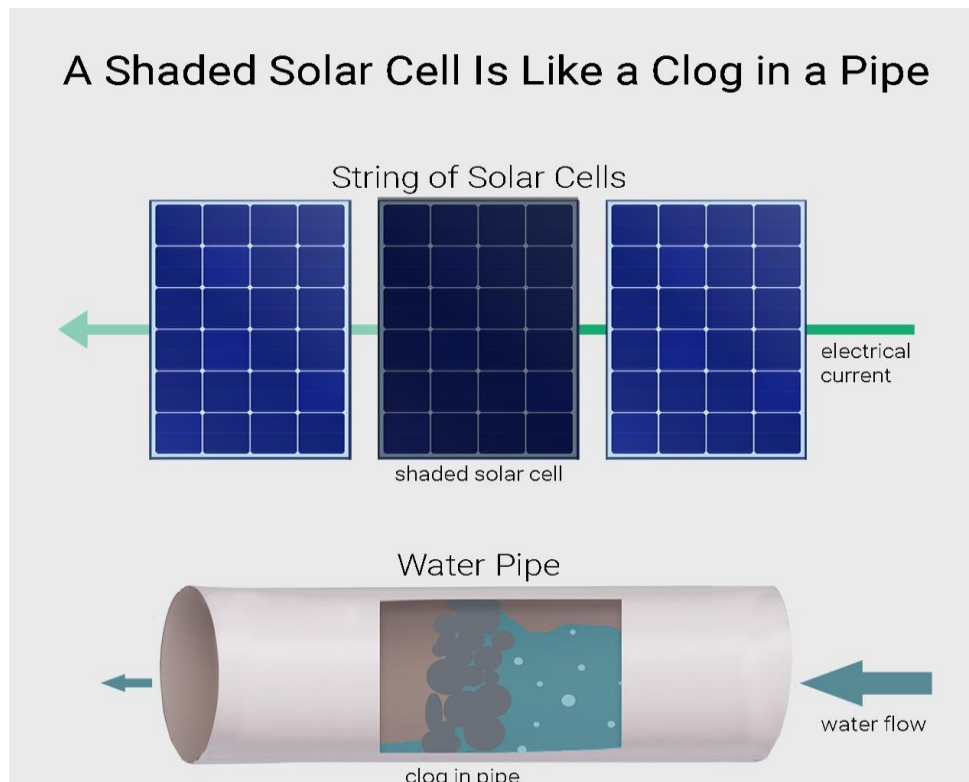
Διασθητικά θα περιμέναμε η μείωση της ισχύος του πάνελ να είναι ευθέως ανάλογη του ποσοστού της επιφάνειας που σκιάζεται. Όμως δεν συμβαίνει αυτό. Στο βιβλίο του “*Renewable Energy and Efficient Electric Power Systems*” ο καθηγητής Gil Masters του πανεπιστημίου Stanford αποδεικνύει πως σκιάζοντας μόνο μία από τις 36 κυψέλες ενός μικρού PV πάνελ μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της ισχύος εξόδου πάνω από 75%.

Για να καταλάβουμε καλύτερα γιατί η σκίαση οδηγεί σε τόσο σοβαρές απώλειες είναι υποβοηθητικό να χρησιμοποιήσουμε ένα παράδειγμα με νερό το οποίο ρέει μέσα σε σωλήνες. Η ροή του νερού μέσα σε μία σωλήνα είναι σταθερή, ακριβώς όπως και το ρεύμα που διαρρέει μία σειρά PV κυψελών για μία δεδομένη ηλιακή ακτινοβολία. (Σχήμα 4.1)



Σχήμα 4.1: Παράδειγμα ροή ρεύματος μέσα από συστοιχία PV πάνελ χωρίς σκίαση

Η σκίαση μιας PV κυψέλης μοιάζει με έναν θρόμβο στη σωλήνα. Ο θρόμβος μειώνει τη ροή του νερού σε ολόκληρη τη σωλήνα, παρόμοια όταν μία κυψέλη σκιάζεται το ρεύμα όλων των κυψελών που είναι συνδεδεμένες σε σειρά με αυτή μειώνεται. (Σχήμα 4.2)



Σχήμα 4.2: Παράδειγμα ροή ρεύματος μέσα από συστοιχία PV πάνελ με σκίαση ενός πάνελ

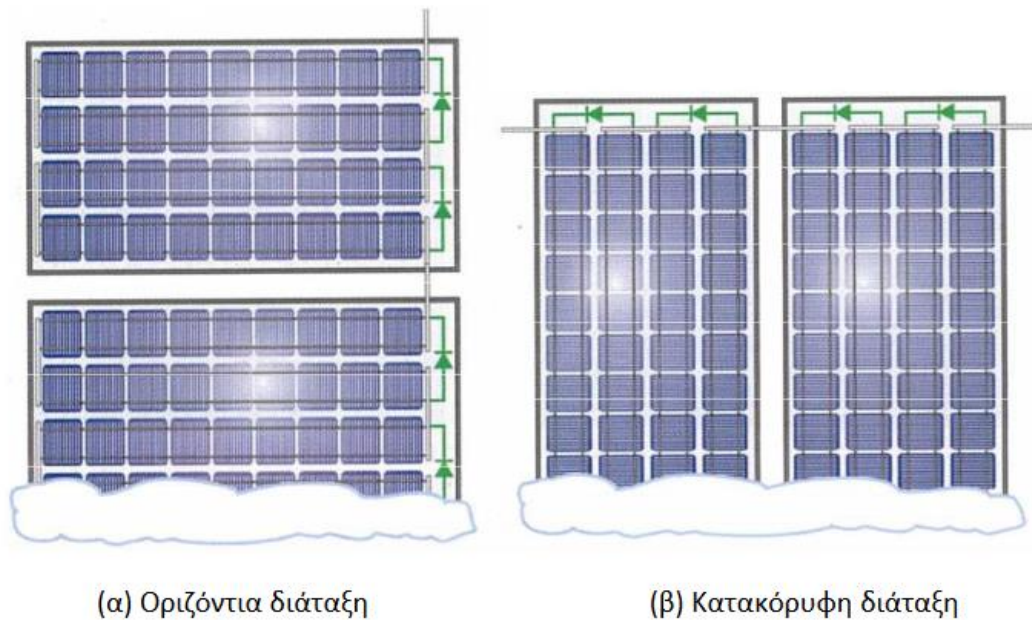
Η μείωση είναι σημαντική γιατί κάθε κυψέλη στη σειρά πρέπει να λειτουργήσει με το ρεύμα που επιβάλλει η σκιασμένη κυψέλη. Αυτό εμποδίζει τις μη σκιασμένες κυψέλες από το να λειτουργήσουν στο σημείο της μέγιστης ισχύος τους. Οπότε μόνο μία μικρή περιοχή σκίασης μπορεί να έχει δραματική επίπτωση στην ισχύ εξόδου ολοκλήρου του PV πάνελ.

Οι ίδιες αρχές εφαρμόζονται και σε επίπεδο συστοιχιών PV πάνελ. Το ρεύμα που διαρρέει μία ολόκληρη σειρά πάνελ μπορεί να μειωθεί πολύ σημαντικά αν ακόμα και ένα μόνο πάνελ σκιάζεται, οδηγώντας έτσι σε σημαντική απώλεια ισχύος εξόδου του συστήματος.

Στην ιδανική περίπτωση όλα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια εγκαθίστανται σε θέσεις με μηδενική σκίαση. Ωστόσο, τα φωτοβολταϊκά συστήματα που είναι διασυνδεδεμένα με το δίκτυο της ΔΕΗ συνήθως σκιάζονται σε κάποιο βαθμό λόγω του ότι συνήθως αυτά τοποθετούνται σε αστικό περιβάλλον και δεν υπάρχει πάντα διαθέσιμος χώρος που να μη σκιάζεται όλες τις ώρες της ημέρας. Στην περίπτωση των αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων τα πράγματα είναι λίγο καλύτερα γιατί αυτά συνήθως βρίσκονται σε αγροτικές περιοχές που υπάρχει πολύς διαθέσιμος χώρος ώστε να αποφύγουμε τη σκίαση. Έχοντας δει λοιπόν πόσο σημαντική είναι η επίδραση της σκίασης στα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι χρήσιμο να αναλύσουμε τους τύπους σκίασης που επηρεάζουν τα πάνελ σε μία εγκατάσταση, απλά όταν καταχωρίστηκε σκίαση διακρίνεται σε προσωρινή, σκίαση προερχόμενη από την τοποθεσία, σκίαση προερχόμενη από κτίριο και σκίαση προερχόμενη από το ίδιο το σύστημα (αυτο-σκίαση).

4.2.1 Προσωρινή σκίαση

Οφείλεται κυρίως σε παράγοντες όπως η σκόνη, το χιόνι, φύλλα δέντρων, περιττώματα πουλιών και άλλα είδη ακαθαρσίας. Είναι αυτονόητο ότι σε ορεινές περιοχές ο σημαντικότερος παράγοντας είναι το χιόνι ενώ σε βιομηχανικές περιοχές οι σημαντικότεροι παράγοντες είναι η σκόνη και η ακαθαρσία λόγω αιθάλης ενώ σε περιοχές κοντά σε δάση ο συχνότερος λόγος σκίασης είναι τα φύλλα. Μπορούμε να μειώσουμε την επίδραση της σκίασης λόγω χιονιού, βρωμιάς από αιθάλη και φύλλα δέντρων χρησιμοποιώντας γωνία τοποθέτησης των πάνελ 12 μοιρών ή και μεγαλύτερη η οποία είναι αρκετή για να επιτυγχάνεται ο αυτοκαθαρισμός τους, όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία κλίσης τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα ροής του νερού της βροχής και έτσι μεγαλώνει η επίδραση του αυτοκαθαρισμού. Σε περιοχές που είναι χιονισμένες μεγάλο μέρος του χρόνου προτιμάται η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πάνελ σε οριζόντια θέση διάταξη (α) σχήμα 4.3. Με αυτό τον τρόπο μειώνονται κατά το ήμισυ οι απώλειες που προκαλούνται από το χιόνι, καθώς επηρεάζονται μόνο δύο και όχι τέσσερις σειρές κυψελών σε κάθε PV πάνελ που θα επηρεάζονταν στην περίπτωση της κατακόρυφης τοποθέτησης διάταξη (β) σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Τοποθέτηση PV πάνελ σε περιοχή με χιόνι

Σε ένα σύστημα με κατάλληλη κλίση οι απώλειες λόγω σκίασης από φύλλα, περιπτώματα πουλιών, ατμοσφαιρική ρύπανση και άλλους ρύπους είναι συνήθως της τάξης 2 έως 5% που θεωρείται και γενικά αποδεκτή. Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος αυξάνεται σημαντικά όταν τα πλαίσια που αποτελούν το σύστημα καθαρίζονται τακτικά. Οι περισσότεροι κατασκευαστές PV πάνελ συστήνουν να χρησιμοποιείται ένα απαλό μέσο καθαρισμού (π.χ. σφουγγάρι) μαζί με νερό χωρίς χρήση απορρυπαντικού για τον καθαρισμό του πάνελ.

4.2.2 Σκίαση προερχόμενη από την τοποθεσία

Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται όλες οι σκιάσεις που δημιουργούνται λόγω του περιβάλλοντος του φωτοβολταϊκού συστήματος. Ένα σύστημα μπορεί να σκιάζεται από γειτονικά κτίρια, δέντρα ή ακόμα και πολύ ψηλά κτίρια σε μεγάλη απόσταση. Κάποιες φορές ακόμα και οι εναέριοι αγωγοί και οι πυλώνες του δικτύου μεταφοράς και διανομής ενέργειας μπορεί να προκαλούν μία μικρή σκίαση στο σύστημα.

4.2.3 Σκίαση προερχόμενη από το κτίριο

Στην περίπτωση που το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι τοποθετημένο πάνω σε κάποιο κτίριο υπάρχει περίπτωση ένα μέρος του να σκιάζεται άμεσα από κεραίες, καμινάδες, δορυφορικά πιάτα, αλεξικέρανα, προεξοχές στην πρόσοψη και πέργκολες. Μπορούμε να αποφύγουμε ένα μέρος αυτής της σκίασης μετακινώντας τα αντικείμενα από την προκαλούν (π.χ. δορυφορικά πιάτα). Όταν δεν είναι δυνατόν να μετακινηθούν κάποια αντικείμενα που προκαλούν σκίαση

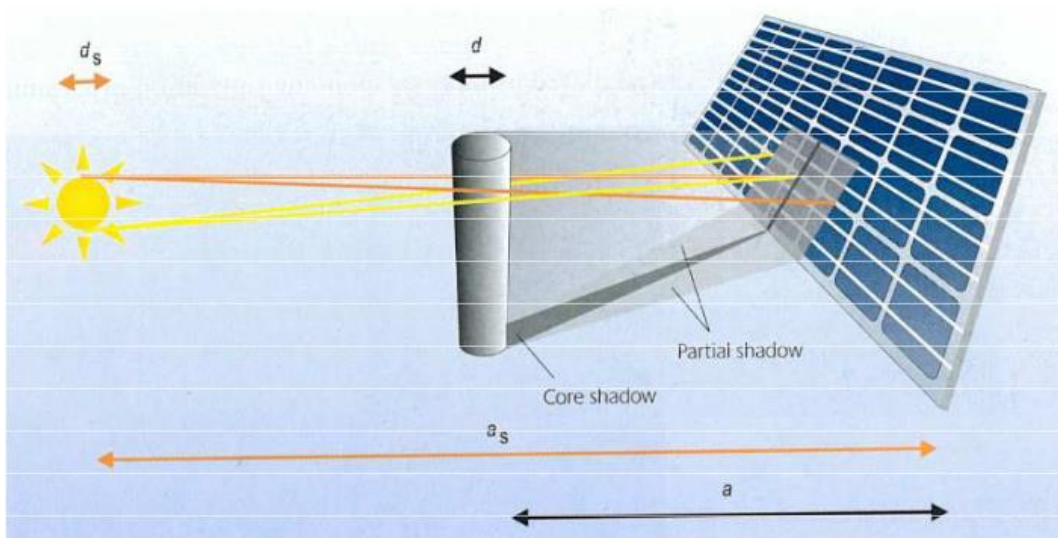
τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την επίδραση της λαμβάνοντας υπόψη τα μέρη που σκιάζονται και προσαρμόζοντας ανάλογα την ηλεκτρική συνδεσμολογία του συστήματος.

4.2.4 Σκίαση προερχόμενη από το ίδιο το σύστημα

Σε εγκαταστάσεις που δεν υπάρχει πολύς διαθέσιμος χώρος μπορεί μπροστινές σειρές PV πάνελ να σκιάζουν τις από πίσω τους. Γενικά οι απώλειες λόγω αυτο-σκίασης μπορούν να ελαχιστοποιηθούν χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες γωνίες κλίσης και αποστάσεις μεταξύ των σειρών των πάνελ. Αντίθετα σε περίπτωση κακής σχεδίασης ή κακής εγκαταστάσης μπορούν να δημιουργηθούν σκιάσεις που θα αποφεύγονταν με σωστή μελέτη.

4.2.5 Άμεση σκίαση

Μεγάλες απώλειες ενέργειας μπορεί να προκληθούν λόγω άμεσης σκίασης. Όσο πιο κοντά βρίσκεται ένα αντικείμενο στο PV πάνελ τόσο πιο σκοτεινή είναι και η σκιά του. Ο πυρήνας της σκίασης όταν το αντικείμενο βρίσκεται κοντά στο πάνελ μπορεί να μειώσει την προσπίπτουσα ενέργεια επί της φωτοβολταϊκής κυψέλης περίπου 60 έως 80% ενώ η μερική σκίαση μειώνει την προσπίπτουσα ενέργεια περίπου 30 έως 40%. Αντίστοιχα όταν η απόσταση του αντικειμένου που δημιουργεί σκιά είναι πιο μακριά από το πάνελ τότε η σκιά που δημιουργεί είναι πιο φωτεινή και οι απώλειες λόγω σκίασης είναι μικρότερες.



Σχήμα 4.4: Σκίαση PV πάνελ από κοντινό αντικείμενο

Η βέλτιστη απόσταση ενός αντικειμένου από το πάνελ δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$a_{opti} = \frac{(a_s + a_{opti}) \times d}{d_s} \quad \text{Εξίσωση (4.1)}$$

Όπου:

- a_{opti} η βέλτιστη απόσταση από τα PV πλαίσια
- a_s η απόσταση της γης από τον ήλιο ≈ 150 εκατομμύρια km
- d το πάχος του αντικειμένου που προκαλεί τη σκίαση
- d_s η διάμετρος του ήλιου $\approx 1,39$ εκατομμύρια km

Και επειδή $a_{opti} \ll a_s$ η εξίσωση (9.1) γίνεται:

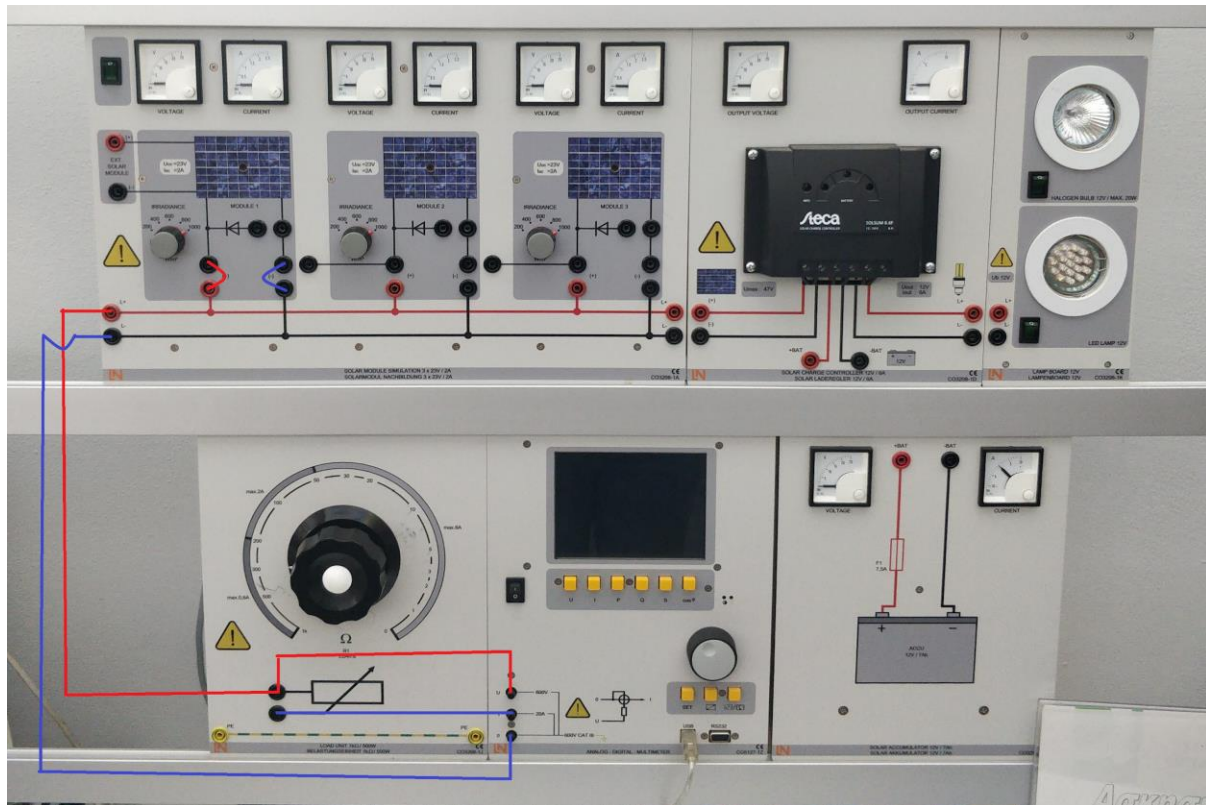
$$a_{opti} \approx \frac{a_s \times d}{d_s} = 108 \times d \quad \text{Εξίσωση (4.2)}$$

Πριν από την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος γίνεται ανάλυση σκίασης για να εκτιμηθεί η σκίαση που θα προκύψει στην εκάστοτε τοποθεσία. Για να γίνει αυτό αποτυπώνουμε σε ένα σημείο του συστήματος, συνήθως το κεντρικό σημείο της εγκατάστασης, το περίγραμμα σκίασης του περιβάλλοντα χώρου. Για μεγαλύτερα συστήματα ή για καλύτερη ακρίβεια η ανάλυση σκίασης μπορεί να γίνει και σε περισσότερα από ένα σημεία της εγκατάστασης. Το περίγραμμα σκίασης του περιβάλλοντα χώρου βρίσκεται με τη χρήση:

- Τοπογραφικού σχεδίου
- Διαγράμματος της πορείας του ήλιου
- Αναλυτή σκίασης (με ψηφιακή κάμερα και λογισμικό ή το Solar Pathfinder)

Ένας τρόπος για να αποφεύγουμε τις αρνητικές επιπτώσεις της σκίασης είναι να χρησιμοποιούμε κατάλληλη συνδεσμολογία ώστε να αποφεύγουμε να επηρεάζονται και τα πάνελ που δεν σκιάζονται στην εγκατάσταση. Επίσης όπως είναι γνωστό οι κατασκευαστές των φωτοβολταϊκών πάνελ χρησιμοποιούν διόδους bypass ώστε να ελαχιστοποιήσουν τις επιπτώσεις της μερικής σκίασης του πάνελ.

4.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ



Σχήμα 4.5: Συνδεσμολογία για μετρήσεις σε ένα PV με ολική σκίαση

Όταν το σύστημα είναι κλειστό (διακόπτης on/off), γεφυρώνουμε την αρνητική και τη θετική έξοδο του φωτοβολταϊκού αντίστοιχα με τη γραμμή μεταφοράς χρησιμοποιώντας από έναν συνδετήρα για κάθε έξοδο.

Στη συνέχεια συνδέουμε με καλώδιο την θετική επαφή μεταφοράς με την μεταβλητή αντίσταση, με άλλο καλώδιο συνεχίζουμε από τη σύνδεση της επαφής της μεταβλητής αντίστασης με την υποδοχή στο ψηφιακό πολύμετρο στη θέση τάση (U).

Ενώ την δεύτερη επαφή που υπάρχει στην μεταβλητή αντίσταση τη συνδέουμε με τη υποδοχή που υπάρχει στο ψηφιακό πολύμετρο στη θέση του ρεύματος (I).

Τέλος με καλώδιο από την αρνητική επαφή μεταφοράς συνδέουμε με το ψηφιακό πολύμετρο στη θέση (O). Αυτή είναι η συνδεσμολογία του ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.5.

Το σύστημα πλέον είναι σε θέση να εκτελέσει μέτρηση, οι φοιτητές εισάγουν την ηλιακή ακτινοβολία που επιθυμούν για την εργαστηριακή άσκηση. Ανοίγουν το διακόπτη τροφοδοσίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου που είναι πάνω από το φωτοβολταϊκό και το διακόπτη τροφοδοσίας του ψηφιακού πολυμέτρου.

Στην συγκεκριμένη εργαστηριακή άσκηση, επιθυμούμε στον προσομοιωτή σκίαση και μη σκίαση οπότε έχουμε ηλιακή ακτινοβολία 600W/m^2 και 1000W/m^2 αντίστοιχα.

Επιλέγουμε στο πολύμετρο τα κουμπιά που αντιστοιχούν σε ρεύμα (I) και τάση (V) και βλέπουμε στην οθόνη μας το ρεύμα και την τάση του συστήματος.

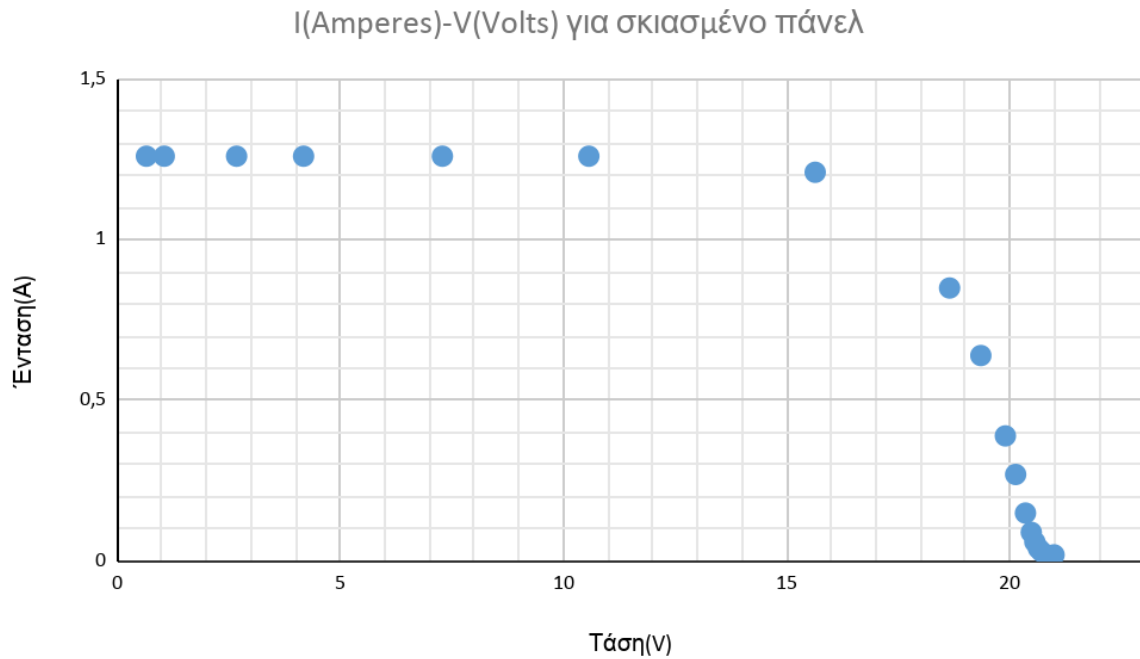
Για την συμπλήρωση του πίνακα μετρήσεων μεταβάλλουμε το φορτίο από την αρχική του θέση $1\text{k}\Omega$ για ένα σετ 18 μετρήσεων με απαλή περιστροφή του επιλογέα μέχρι τη θέση 0 του φορτιού, που σημαίνει ότι δεν υπάρχει αντίσταση.

Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τις δύο ηλιακές ακτινοβολίες (με σκίαση, χωρίς σκίαση).

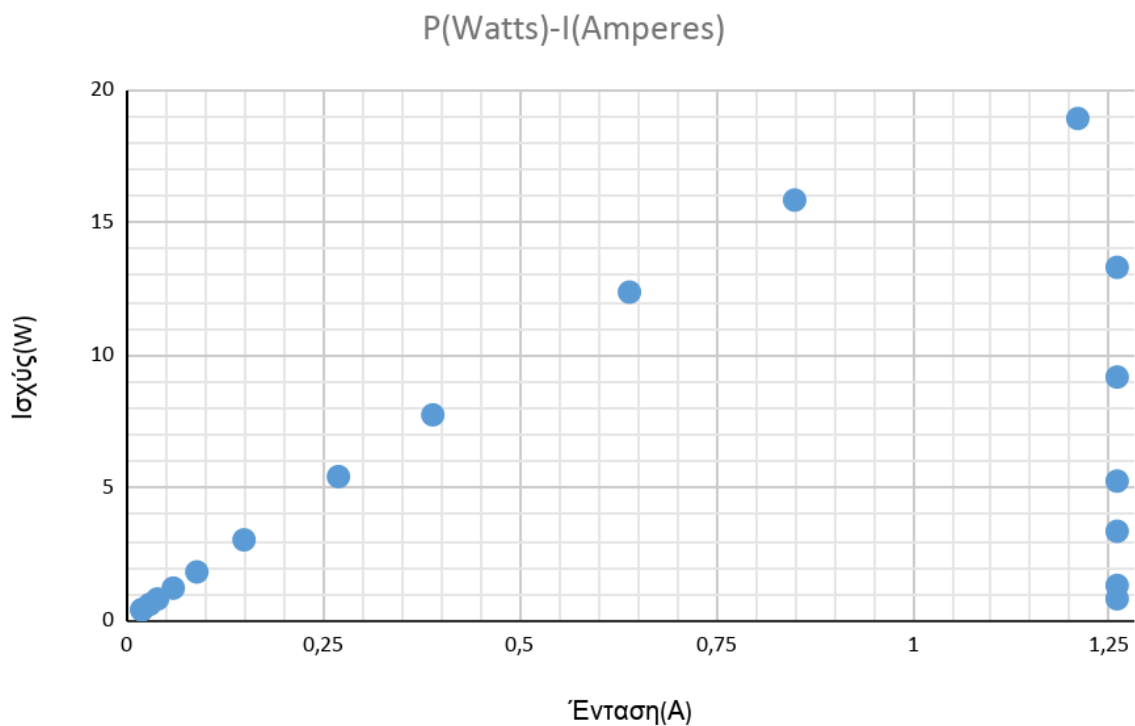
4.4 ΛΥΣΗ

Πίνακας 4.1: Μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για ηλιακή ακτινοβολία 600W/m^2

A/A	V(Volts)	I(Amperes)
1	0,66	1,26
2	1,06	1,26
3	2,68	1,26
4	4,18	1,26
5	7,29	1,26
6	10,57	1,26
7	15,64	1,21
8	18,65	0,85
9	19,35	0,64
10	19,9	0,39
11	20,13	0,27
12	20,35	0,15
13	20,48	0,09
14	20,56	0,06
1	20,64	0,04
16	20,71	0,03
17	20,8	0,02
18	20,99	0,02



Σχήμα 4.6: Καμπύλη I-V για ένα σκιασμένο P-V πάνελ



Σχήμα 4.7: Καμπύλη P-I για ένα σκιασμένο P-V πάνελ

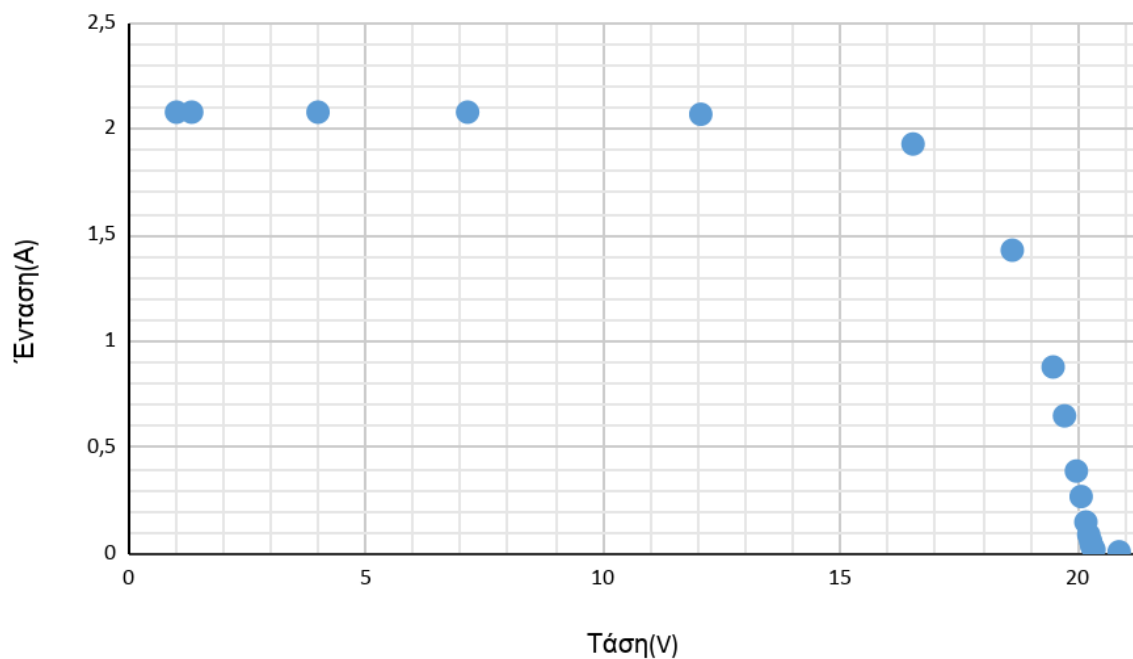
Μέγιστη ισχύς εξόδου πειραματική $P_{600} = V_{MP} \cdot I_{MP} = 15,64 \cdot 1,21 = 18,924 \text{ W}$

Για λόγους σύγκρισης επαναλάβαμε το πείραμα με ίδια περίπου ηλιακή ακτινοβολία και τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

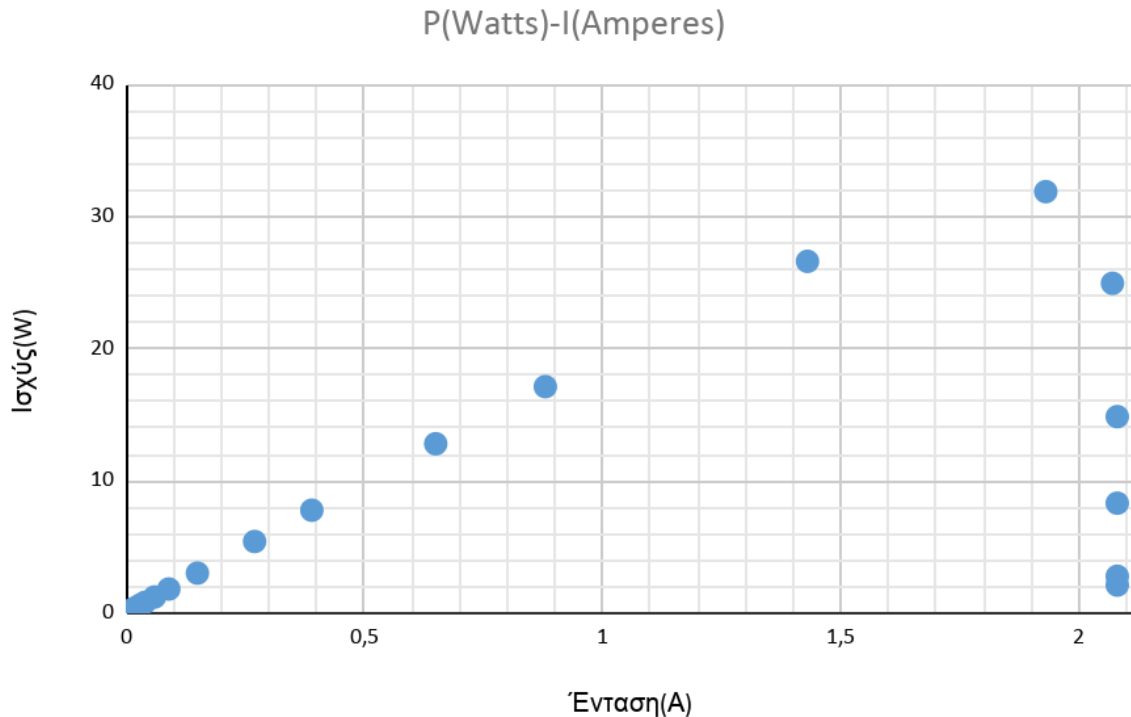
Πίνακας 4.Π: Μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για ηλιακή ακτινοβολία 1000W/m²

A/A	V(V)	I(A)
1	1.02	2.08
2	1.34	2.08
3	4	2.08
4	7.15	2.08
5	12.06	2.07
6	16.53	1.93
7	18.62	1.43
8	19.48	0.88
9	19.72	0.65
10	19.97	0.39
11	20.07	0.27
12	20.17	0.15
13	20.23	0.09
14	20.27	0.06
1	20.29	0.04
16	20.31	0.03
17	20.34	0.02
18	20.87	0.01

I(Amperes)-V(Volts) για μη σκιασμένο πάνελ



Σχήμα 4.8: Καμπύλη I-V για ένα μη σκιασμένο P-V πάνελ



Σχήμα 4.9: Καμπύλη P-I για ένα μη σκιασμένο P-V πάνελ

Μέγιστη ισχύς εξόδου πειραματική $P_{1000} = V_{MP} \cdot I_{MP} = 16,53 \cdot 1,93 = 31,903 \text{ W}$

4.5 ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συγκρίνοντας τα σχήματα 4.6 και 4.8 αρχικά παρατηρούμε ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} στην περίπτωση του σκιασμένου πάνελ (σχήμα 4.6) είναι μειωμένο σε σχέση με το μη σκιασμένο πάνελ (σχήμα 4.8) κατά ποσοστό ανάλογο του ποσοστού ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνει το κάθε πάνελ. Συγκεκριμένα η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης για σκιασμένο πάνελ είναι:

$$I_{sc600} = 1,26 \text{ A} \approx I_{sc1000} = 2,08 \text{ A} \cdot 0,6 = 1,248 \text{ A}.$$

Παρόλη τη μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{sc} η τάση ανοιχτοκύκλωσης του πάνελ V_{oc} παραμένει σταθερή και στις δύο περιπτώσεις. Συνεπώς η ισχύς εξόδου του πάνελ μειώνεται κατά ίδιο ποσοστό με την μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Συγκεκριμένα:

$$W_{600} = 18,924 \text{ W} \approx W_{1000} = 31,903 \text{ W} \cdot 0,6 = 19,142 \text{ W}.$$

Αυτή η συμπεριφορά εξηγείται λόγω του ότι έχουμε ομοιόμορφη σκίαση σε όλες τις ηλιακές κυψέλες και τελικά όλες λαμβάνουν την ίδια ηλιακή ακτινοβολία. Οπότε καμία Κυψέλη δεν δέχεται λιγότερη ηλιακή ακτινοβολία από τις άλλες ώστε να αρχίσει να λειτουργεί μεροληπτικά (σαν αντίσταση) καταναλώνοντας έτσι ενέργεια από αυτήν που παράγουν οι άλλες. Συμπεραίνουμε έτσι ότι με την όμορφη σκίαση σε όλο το πάνελ δεν επηρεάζεται ο βαθμός απόδοσης ούτε ο Fill Factor του PV πάνελ παρά μόνο η μέγιστη ισχύς εξόδου του.

Στην συγκεκριμένη διάταξη δεν δίνεται η δυνατότητα να σκίσουμε μερικές μόνο κυψέλες του PV πάνελ. Σε αυτήν την περίπτωση ξέρουμε από τη βιβλιογραφία ότι η επίδραση της μερικής σκίασης θα ήταν πολύ μεγαλύτερη και το πάνελ θα έχανε σημαντικά μεγαλύτερο μέρος της απόδοσης του. Οπότε η μερική σκίαση πρέπει να αποφεύγεται στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό.

5 ΑΣΚΗΣΗ 4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΠΟΥ ΣΥΝΔΕΟΝΤΑΙ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ (ΪΔΙΑ ΑΣΚΗΣΗ ΓΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕ ΣΕΙΡΑ)

5.1 ΣΤΟΧΟΣ

Στόχος αυτής της άσκησης είναι να χρησιμοποιηθεί ο πειραματικός προσομοιωτής για να χαρακτηθούν οι καμπύλες I-V των φωτοβολταϊκών πλαισίων, όταν τα πλαίσια συνδέονται παράλληλα στη συνέχεια ακολουθείται η διαδικασία για σύνδεση των πλαισίων σε σειρά και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά ενός PV πάνελ.

5.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΘΕΩΡΙΑ

Τις περισσότερες φορές η ισχύς ενός μόνο PV πάνελ δεν επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες μιας εφαρμογής. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούμε συνδεσμολογίες ώστε να αυξήσουμε την παραγόμενη ισχύ του συστήματος συνδέοντας πολλαπλά πάνελ σε σειρά και στη συνέχεια συνδέοντας αυτές τις σειρές παράλληλα μέχρι να φτάσουμε τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του ρεύματος που θέλουμε (τάση V, ένταση I, ισχύς P).

5.2.1 Σύνδεση σε σειρά

Για σύνδεση σε σειρά συνδέουμε το θετικό ακροδέκτη του ενός PV πλαισίου με τον αρνητικό ακροδέκτη του επόμενου και συνεχίζουμε με αυτό τον τρόπο για όσα πλαίσια θέλουμε να είναι σε μία σειρά. Σε αυτή τη σύνδεση η ένταση του ρεύματος (I) που διαρρέει τα πάνελ είναι ίδια ενώ η τάση (V) πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό των πάνελ που είναι στη σειρά.

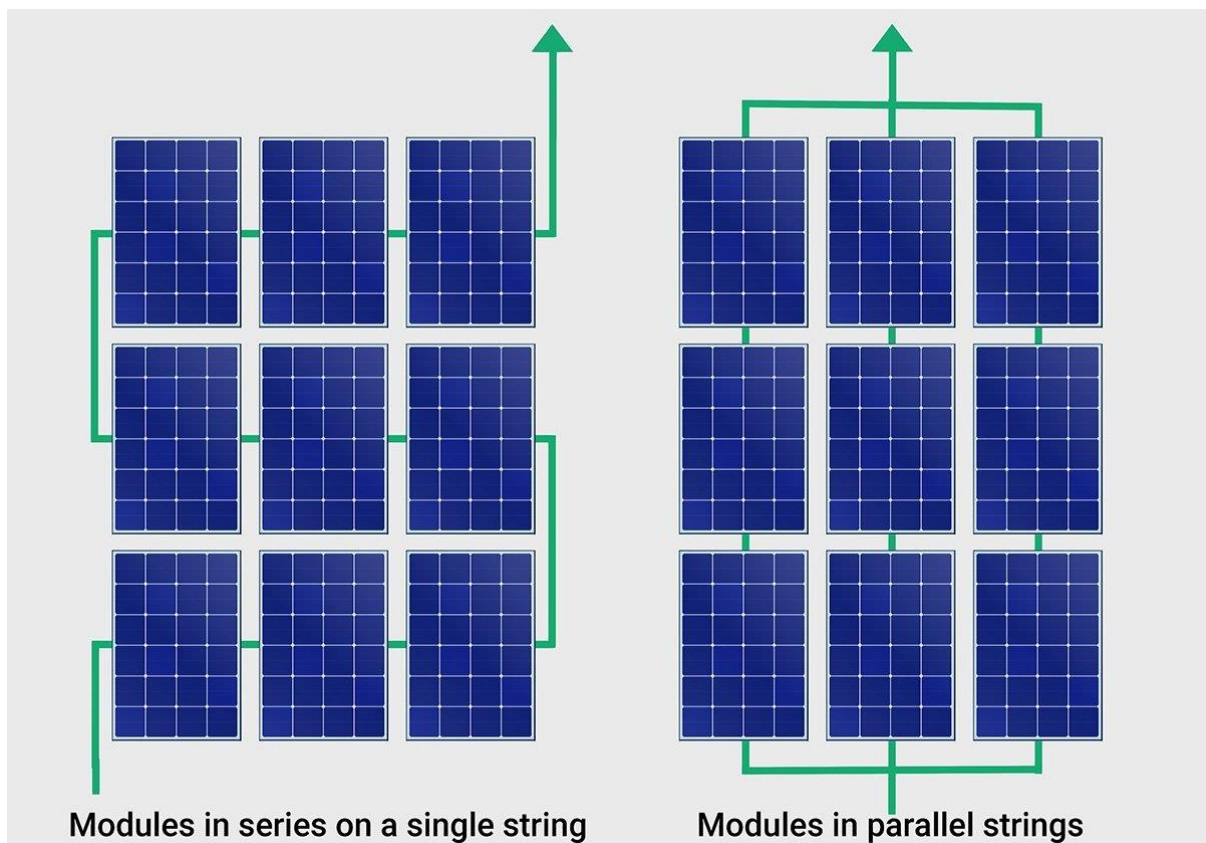
5.2.2 Παράλληλη σύνδεση

Στην παράλληλη σύνδεση συνδέουμε το θετικό ακροδέκτη ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου με τον θετικό ακροδέκτη του επόμενου και τον αρνητικό ακροδέκτη με τον αντίστοιχο αρνητικό ακροδέκτη. Σε αυτή τη σύνδεση η τάση που διαρρέει τα πάνελ (V) είναι ίδια ενώ η ένταση του ρεύματος (I) πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό των πάνελ που είναι συνδεδεμένα παράλληλα.

5.2.3 Χρήση συνδέσεων σε πραγματικές συνθήκες

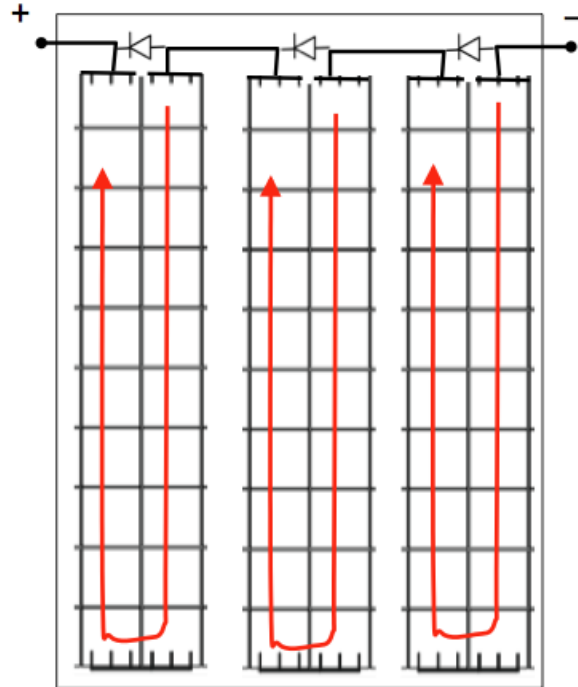
Για μεγάλες εγκαταστάσεις αρχικά συνδέουμε πάνελ σε σειρά για να φτάσουμε την επιθυμητή τάση (V). Στη συνέχεια συνδέουμε αυτές τις σειρές παράλληλα σε έναν inverter. Η ένταση του ρεύματος (I) διαρρέει τα πάνελ πρέπει να είναι η ίδια και η τάση (V) των σειρών που συνδέουμε παράλληλα πρέπει να είναι ίδια. Όπως είδαμε στην Άσκηση 4 η σκίαση ενός PV πάνελ σε μία σειρά πάνελ μπορεί να μείωση σημαντικά την ισχύ εξόδου αυτής της σειράς. Όμως ξέρουμε ότι η σκίαση ενός PV πάνελ σε μία σειρά δεν μπορεί να επηρεάσει την ισχύ εξόδου μιας άλλης

σειράς PV πάνελ που είναι συνδεδεμένη παράλληλα. Για αυτό το λόγο ομαδοποιούμε τα πάνελ που δέχονται σκίαση σε ξεχωριστές σειρές ώστε να μεγιστοποιήσουμε την ισχύ εξόδου όλης της εγκατάστασης. Για παράδειγμα σε μία οικιακή εφαρμογή όπου υπάρχουν τοίχοι παραπλεύρως των PV πάνελ είναι ωφέλιμο να ομαδοποιούνται τα PV πάνελ που σκιάζονται από τους τοίχους σε σειρές και να κρατάμε τα PV πάνελ που δε σκιάζονται σε ξεχωριστές παράλληλες σειρές. Με αυτό τον τρόπο οι μη σκισμένες σειρές μπορούν να διατηρούν μεγαλύτερη ένταση ρεύματος (I) και συνεπώς μεγαλύτερη ισχύ εξόδου.



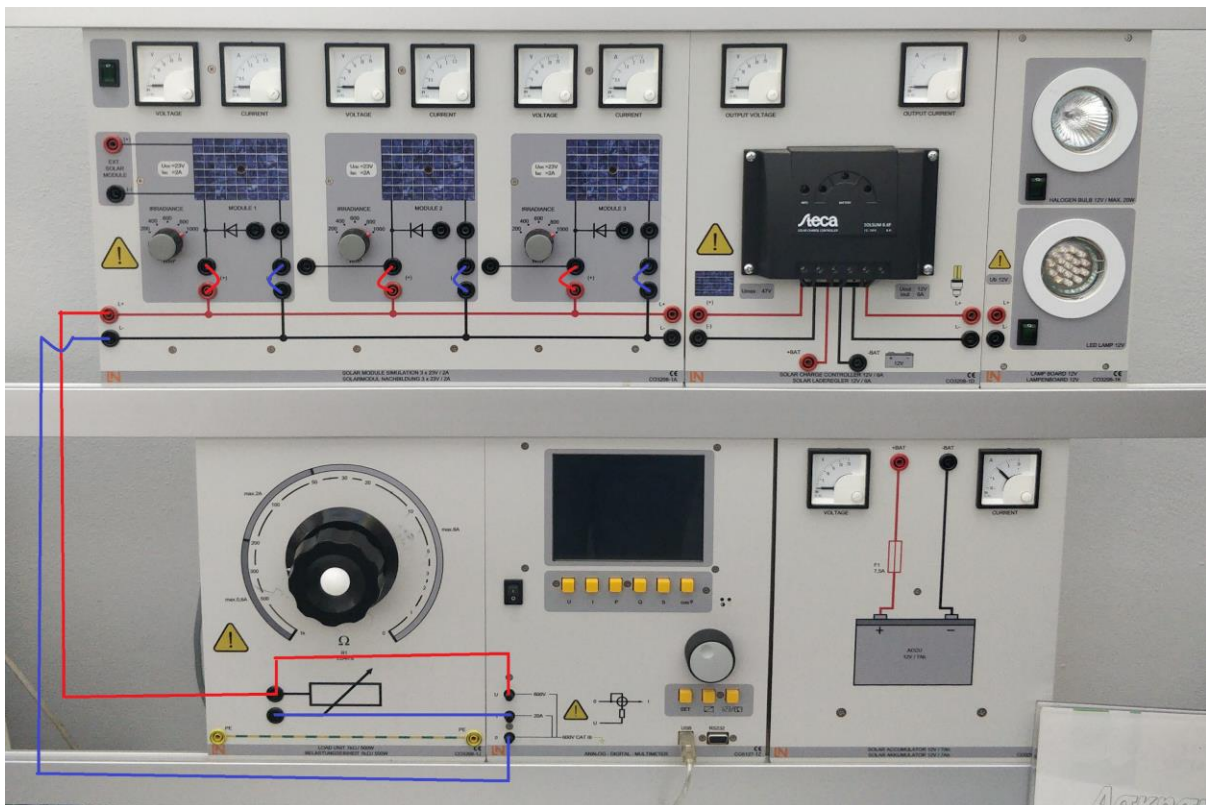
Σχήμα 5.1: Συνδεση 9 PV πάνελ σε σειρά και σύνδεση 3 σειρών (3 PV πάνελ η κάθε σειρά) παράλληλα

Για την μεγαλύτερη απόδοση ενός PV πάνελ χρησιμοποιούνται διόδους bypass. Αυτές είναι συσκευές που μπορούν να παρακάμψουν κομμάτια του πάνελ τα οποία σκιάζονται. Χρησιμοποιώντας διόδους bypass το μεγαλύτερο ρεύμα κυψελών σε σειρά που δεν σκιάζονται μπορεί να παρακάμψει μία σειρά κυψελών η οποία σκιάζεται. Αυτή η παράκαμψη όμως έχει ως αποτέλεσμα να χάνουμε την έξοδο ισχύος από τις κυψέλες που παρακάμπτονται. Παρόλο που θεωρητικά θα ήταν ιδανικό να έχουμε μια δίοδο bypass για κάθε PV κυψέλη, για λόγους κόστους ένα τυπικό PV πάνελ έχει τρεις διόδους bypass ομαδοποιώντας ουσιαστικά τις κυψέλες του σε τρεις σειρές παράλληλα συνδεδεμένες με μία δίοδο για την καθεμία. Για παράδειγμα ένα PV πάνελ με 60 κυψέλες θα έχει μία δίοδο bypass για κάθε 20 κυψέλες (βλέπε σχήμα 5.2).

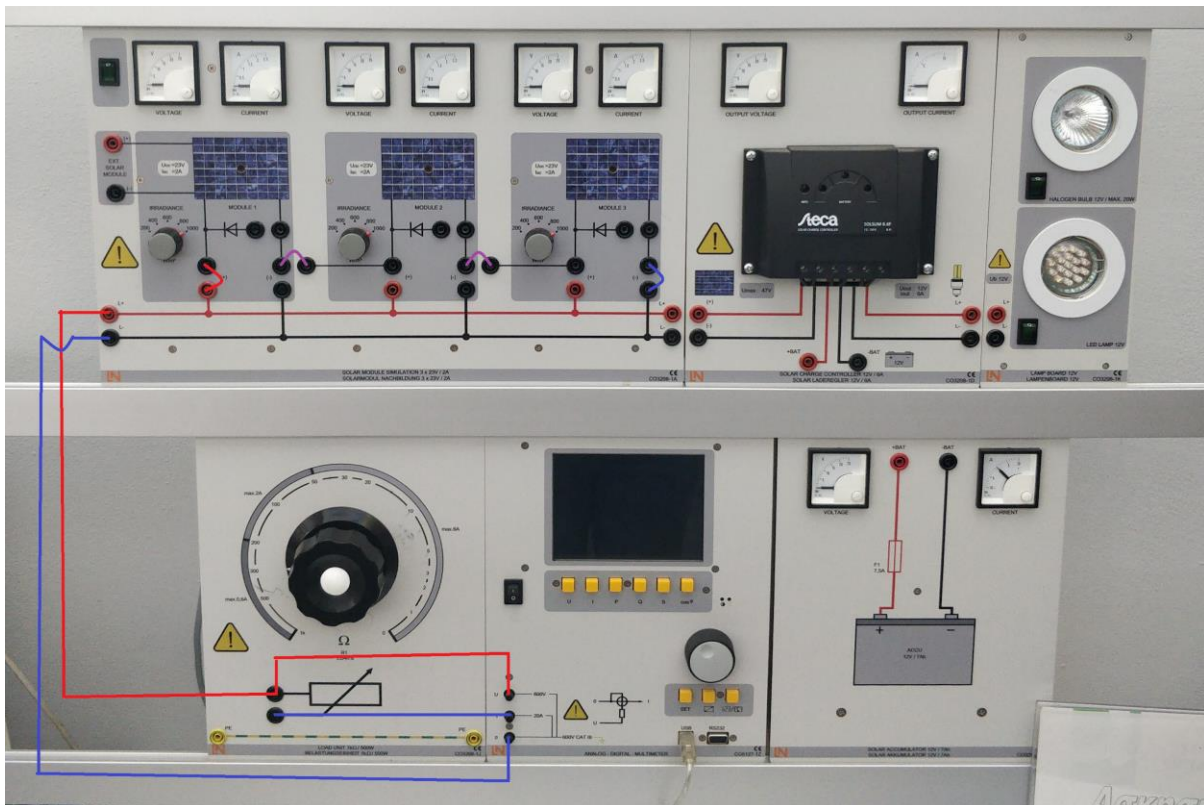


Σχήμα 5.2: PV πάνελ με 3 σειρές των 20 κυψελών και ξεχωριστή δίοδο bypass σε κάθε σειρά

5.3 Διαδικασία μετρήσεων



Σχήμα 5.3: Συνδεσμολογία 3 PV πάνελ παράλληλα



Σχήμα 5.4: Συνδεσμολογία 3 PV πάνελ σε σειρά

Για την παράλληλη σύνδεση με το σύστημα να είναι κλειστό (διακόπτης on/off), γεφυρώνουμε την αρνητική και τη θετική έξοδο για κάθε ένα από τρία φωτοβολταϊκά αντίστοιχα με τη γραμμή μεταφοράς χρησιμοποιώντας συνδετήρες για κάθε έξοδο.

Ενώ για την σύνδεση σε σειρά γεφυρώνουμε την θετική έξοδο του πρώτου φωτοβολταϊκού και την αρνητική έξοδο του τρίτου φωτοβολταϊκού με τη γραμμή μεταφοράς χρησιμοποιώντας από έναν συνδετήρα για κάθε έξοδο. Στην συνέχεια γεφυρώνουμε την αρνητική έξοδο του πρώτου φωτοβολταϊκού με την θετική έξοδο του δεύτερου φωτοβολταϊκού, αντίστοιχα ακολουθούμε την ίδια διαδικασία μεταξύ του δεύτερου και τρίτου φωτοβολταϊκού όπως βλέπουμε και στα σχήματα 5.3 και 5.4.

Στη συνέχεια η διαδικασία είναι κοινή και για τις δύο συνδέσεις (παράλληλα, σειρά) συνδέουμε με καλώδιο την θετική επαφή μεταφοράς με την μεταβλητή αντίσταση και με άλλο καλώδιο συνεχίζουμε από τη σύνδεση της επαφής της μεταβλητής αντίστασης με την υποδοχή στο ψηφιακό πολύμετρο στη θέση τάση (U).

Ενώ την δεύτερη επαφή που υπάρχει στην μεταβλητή αντίσταση τη συνδέουμε με τη υποδοχή που υπάρχει στο ψηφιακό πολύμετρο στη θέση του ρεύματος (I).

Τέλος με καλώδιο από την αρνητική επαφή μεταφοράς συνδέουμε με το ψηφιακό πολύμετρο στη θέση (Ο). Αυτή είναι η συνδεσμολογία του ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου όπως φαίνεται και στα σχήματα 5.3 και 5.4.

Το σύστημα πλέον είναι σε θέση να εκτελέσει μέτρηση, οι φοιτητές εισάγουν την ηλιακή ακτινοβολία που επιθυμούν για την εργαστηριακή άσκηση. Ανοίγουν το διακόπτη τροφοδοσίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου που είναι πάνω από το πρώτο φωτοβολταϊκό και το διακόπτη τροφοδοσίας του ψηφιακού πολυμέτρου.

Στην συγκεκριμένη εργαστηριακή άσκηση, επιθυμούμε και για τις δύο συνδέσεις ηλιακή ακτινοβολία 1000W/m^2 και στα τρία φωτοβολταϊκά πλαίσια.

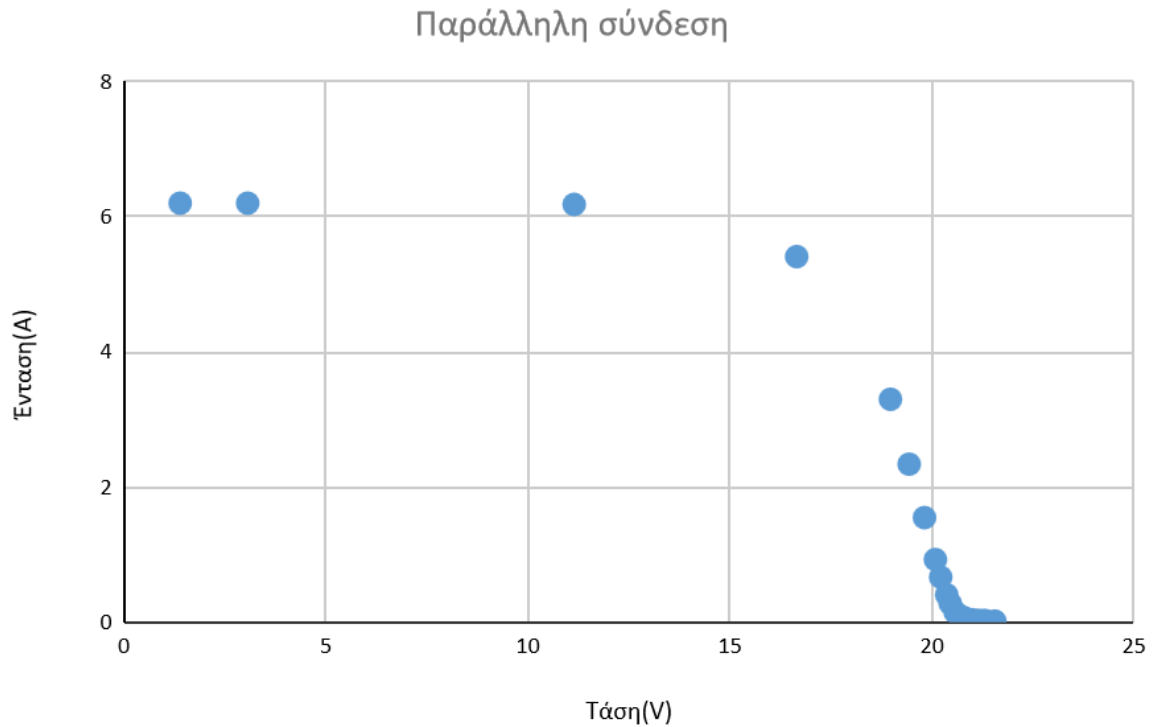
Επιλέγουμε στο πολύμετρο τα κουμπιά που αντιστοιχούν σε ρεύμα (I) και τάση (V) και βλέπουμε στην οθόνη μας το ρεύμα και την τάση του συστήματος.

Για την συμπλήρωση του πίνακα μετρήσεων μεταβάλλουμε το φορτίο από την αρχική του θέση $1\text{k}\Omega$ για ένα σετ 18 μετρήσεων με απαλή περιστροφή του επιλογέα μέχρι τη θέση 0 του φορτιού, που σημαίνει ότι δεν υπάρχει αντίσταση.

5.4 ΛΥΣΗ

Πίνακας 5.1: Παράλληλη σύνδεση 3 PV πάνελ για ηλιακή ακτινοβολία 1000W/m^2

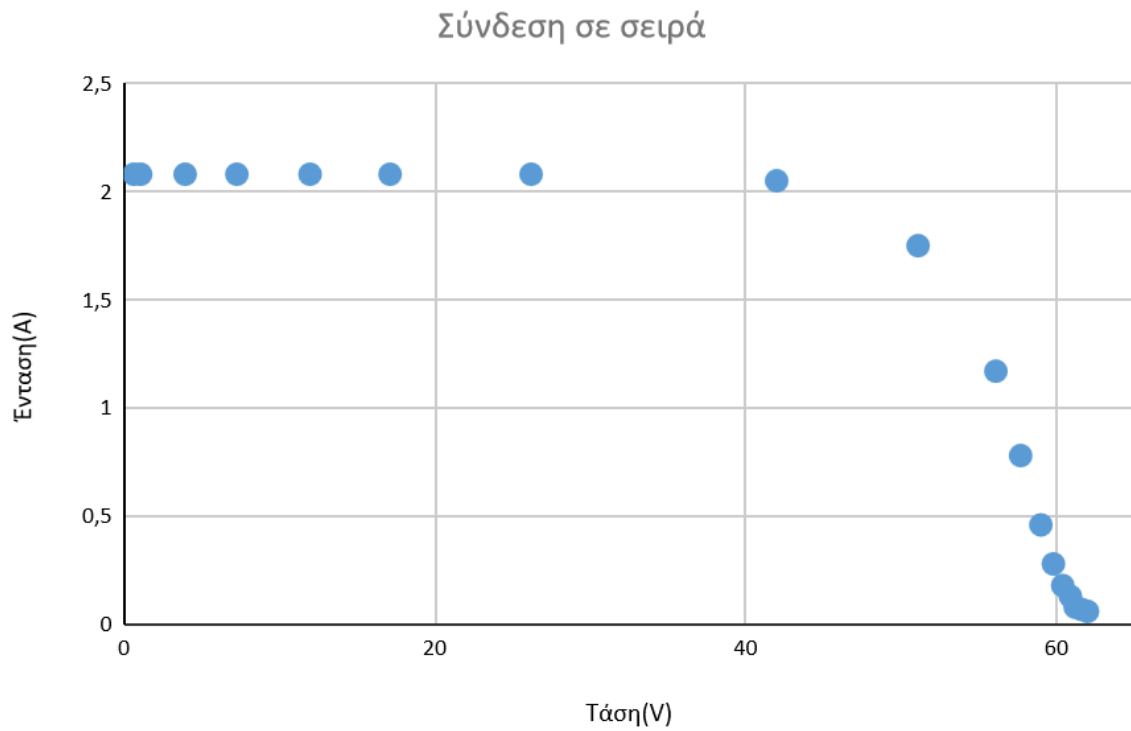
A/A	V(Volts)	I(Amperes)	P(W)
1	1,39	6,2	8,618
2	3,06	6,2	18,972
3	11,14	6,18	68,8452
4	16,65	5,41	90,0765
5	18,97	3,3	62,601
6	19,43	2,34	45,4662
7	19,81	1,55	30,7055
8	20,08	0,93	18,6744
9	20,21	0,67	13,5407
10	20,36	0,41	8,3476
11	20,45	0,28	5,726
12	20,57	0,15	3,0855
13	20,71	0,09	1,8639
14	20,82	0,06	1,2492
15	21	0,04	0,84
16	21,16	0,03	0,6348
17	21,3	0,03	0,639
18	21,55	0,02	0,431



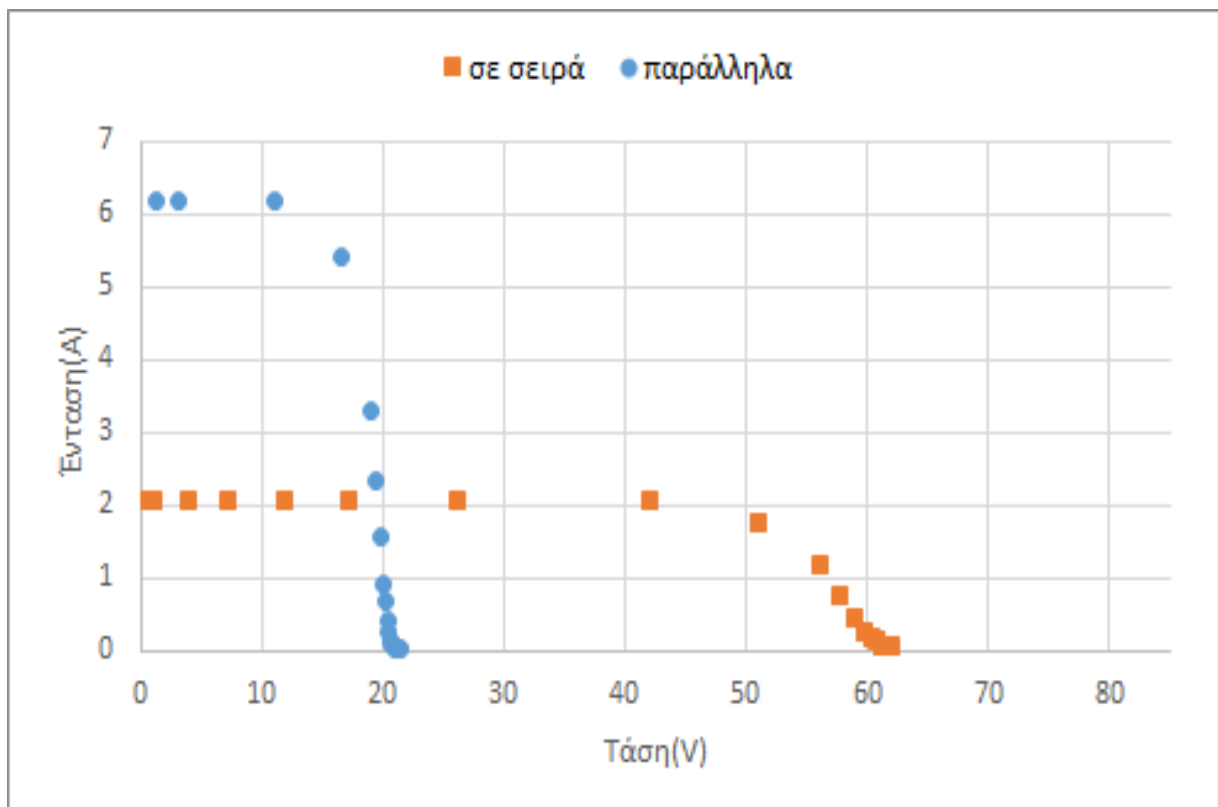
Σχήμα 5.5: Καμπύλη I-V για παράλληλη σύνδεση 3 PV πάνελ με ηλιακή ακτινοβολία 1000W/m^2 :

Πίνακας 5.Π: Σύνδεση σε σειρά 3 PV πάνελ για ηλιακή ακτινοβολία 1000W/m^2

A/A	V(Volts)	I(Amperes)	P(W)
1	0,63	2,08	1,3104
2	1,07	2,08	2,2256
3	3,94	2,08	8,1952
4	7,26	2,08	15,1008
5	11,97	2,08	24,8976
6	17,12	2,08	35,6096
7	26,2	2,08	54,496
8	42	2,05	86,1
9	51,1	1,75	89,425
10	56,1	1,17	65,637
11	57,7	0,78	45,006
12	59	0,46	27,14
13	59,8	0,28	16,744
14	60,4	0,18	10,872
15	60,9	0,13	7,917
16	61,2	0,08	4,896
17	61,6	0,07	4,312
18	62	0,06	3,72



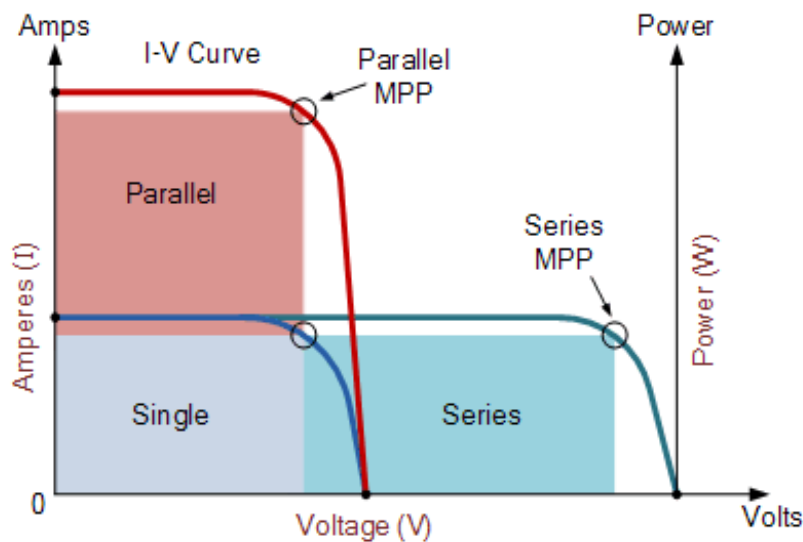
Σχήμα 5.6: Καμπύλη I-V για σύνδεση σε σειρά 3 PV πάνελ με ηλιακή ακτινοβολία 1000W/m²:



Σχήμα 5.7: Σύγκριση καμπύλων I-V παράλληλης σύνδεσης και σύνδεσης σε σειρά

5.5 ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από το παραπάνω σχήμα (σχήμα 5.7) παρατηρούμε ότι στην παράλληλη σύνδεση έχουμε την μεγαλύτερη δυνατή ένταση ρεύματος που είναι η ίση με την τριπλάσια ένταση του ρεύματος ενός PV πάνελ ($I_{3PV} = 6,2 \text{ A} \approx 3 \cdot I_{1PV} = 3 \cdot 2,08 \text{ A} = 6,24 \text{ A}$). Η τάση του ρεύματος που παράγεται όμως είναι σχετικά μικρή και συγκεκριμένα ίση με την τάση εξόδου ενός PV πάνελ ($V = 21,55 \text{ V}$). Επίσης παρατηρούμε ότι στη σύνδεση σε σειρά έχουμε την μέγιστη τιμή τάσης που μπορούμε να πάρουμε από αυτή τη διάταξη με τα τρία PV πάνελ δηλαδή τρεις φορές την τάση του ενός PV πάνελ ($V_{3PV} = 62 \text{ V} \approx 3 \cdot V_{1PV} = 3 \cdot 20,87 \text{ V} = 62,61 \text{ V}$). Σε αυτή την περίπτωση όμως έχουμε ένταση ρεύματος ίση με την ένταση του ρεύματος που αποδίδει ένα PV πάνελ ($I = 2,08 \text{ A}$). Το παρακάτω σχήμα 10.8 δείχνει παραστατικά πώς επηρεάζεται θεωρητικά η καμπύλη I-V για κάθε συνδεσμολογία. Συγκρίνοντας το σχήμα 5.8 με το δικό μας σχήμα 5.7 που δημιουργήθηκε από πειραματικά δεδομένα βλέπουμε ακριβώς την ίδια συμπεριφορά στα χαρακτηριστικά του ρεύματος.



Σχήμα 5.8: Θεωρητικές καμπύλες I-V για διάφορες συνδέσεις

Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι τα πάνελ που χρησιμοποιούμε είναι ίδια δηλαδή έχουν την ίδια τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}) και ρεύμα βραχυκυκλώσεως (I_{sc}). Σε περίπτωση που υπάρχει αναντιστοιχία στα PV πάνελ (διαφορετικά πάνελ) αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε μειωμένη απόδοση της εγκατάστασης ή ακόμα και σε καταστροφή μέρους ή όλων των PV πάνελ.

6 ΑΣΚΗΣΗ 5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΛΗΡΩΣΗΣ (FF)**6.1 ΣΤΟΧΟΣ**

Ο στόχος αυτής της άσκησης είναι να προσδιορίσουν οι φοιτητές τον συντελεστή πλήρωσης και την αποδοτικότητα ενός PV πάνελ χρησιμοποιώντας τον πειραματικό προσομοιωτή.

6.2 Εισαγωγή-θεωρία***Συντελεστής πλήρωσης (FF)***

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{SC}) και η τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{OC}) είναι το μέγιστο ρεύμα και η μέγιστη τάση αντίστοιχα που μπορεί να δώσει ένα PV πάνελ. Όμως και στα δύο αυτά σημεία λειτουργίας η ισχύς που παράγει το πάνελ είναι μηδενική. Ο συντελεστής πλήρωσης πιο ευρέως γνωστός ως Fill Factor (FF) είναι μία παράμετρος η οποία σε συνδυασμό με το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{SC}) και την τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{OC}) προσδιορίζει τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να δώσει ένα PV πάνελ. Συντελεστής πλήρωσης (FF) ορίζεται ως η αναλογία της μέγιστης ισχύος (P_{MP}) από το PV πάνελ ως προς το γινόμενο $V_{OC} \cdot I_{SC}$. Οπότε έχουμε:

$$FF = \frac{P_{MP}}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad \text{Εξίσωση (6.1)}$$

ή

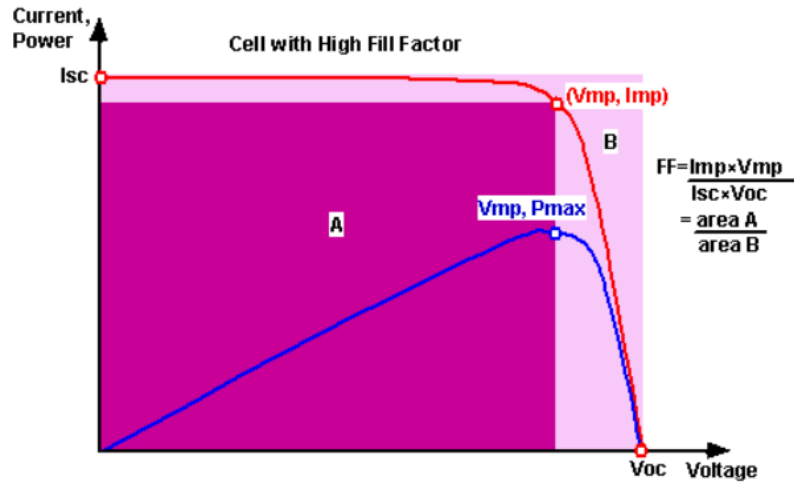
$$FF = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{OC} I_{SC}} \quad \text{Εξίσωση (6.2)}$$

όπου:

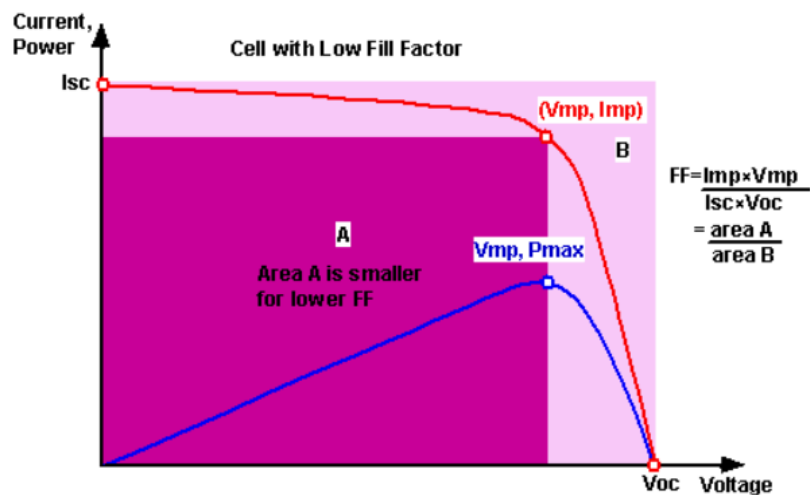
V_{MP} : η τάση του ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος

I_{MP} : η ένταση του ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος

Γραφικά ο συντελεστής πληρότητας (FF) ενός PV πάνελ είναι ο λόγος του εμβαδού του μεγαλύτερου ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου που μπορεί να χωρέσει μέσα στην καμπύλη I-V προς το εμβαδόν που ορίζεται από την καμπύλη και τους κάθετους άξονες. Αυτό γίνεται πιο κατανοητό βλέποντας τα παρακάτω σχήματα 6.1 και 6.2.



Σχήμα 6.1: PV πάνελ με υψηλό FF



Σχήμα 6.2: PV πάνελ με χαμηλό FF

Όσο πιο "τετράγωνη" είναι η καμπύλη I-V ενός PV πάνελ τόσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής πληρότητας (FF). Από τα παραπάνω σχήματα (σχήμα 6.1 και σχήμα 6.2) παρατηρούμε ότι ένα PV πάνελ με μεγαλύτερη τάση (V) έχει μεγαλύτερο συντελεστή πληρότητας (FF) αφού το "στρογγυλεμένο" μέρος της καμπύλης καταλαμβάνει μικρότερο εμβαδόν. Ο μέγιστος θεωρητικός συντελεστής πληρότητας (FF) μπορεί να προσδιοριστεί βρίσκοντας πού μηδενίζεται η μερική παραγωγός της ισχύος ως προς την τάση. Δηλαδή:

$$\frac{d(IV)}{dV} = 0 \quad \text{Εξίσωση (6.3)}$$

που μας δίνει:

$$V_{MP} = V_{OC} - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{qV_{MP}}{nkT} + 1\right) \quad \text{Εξίσωση (6.4)}$$

Όπου:

I = η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το PV πάνελ

V = τάση στους ακροδέκτες του PV πάνελ

V_{MP} = τάση στο σημείο της μέγιστης ισχύος

V_{OC} = τάση ανοιχτού κυκλώματος

q = απόλυτη τιμή του φορτίου ενός ηλεκτρονίου

k = σταθερά του Boltzmann

T = θερμοκρασία (K).

n = παράγοντας ιδεατότητας, ένας αριθμός μεταξύ του 1 και του 2 που τυπικά αυξάνεται όσο αυξάνεται η ένταση του ρεύματος.

Η εξίσωση 5.χ λύνεται με τη χρυσή εξίσωση Lambert και είναι αρκετά δύσκολη στην επίλυση καθώς εξαρτάται από το V_{OC} και το V_{MP} και χρειάζονται επιπλέον εξισώσεις για να υπολογιστεί το I_{MP} (ή χρήση επαναληπτικών διαδικασιών υπολογισμών) για να πολλαπλασιαστεί με το V_{MP} για να αντικατασταθούν στην εξίσωση 6.2 και να υπολογιστεί τελικά ο συντελεστής πλήρωσης (FF). Ένας πολύ διαδεδομένος εμπειρικός τύπος για τον προσδιορισμό του συντελεστή πλήρωσης (FF) είναι ο παρακάτω:

$$FF = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{v_{oc} + 1} \quad \text{Εξίσωση (6.5)}$$

όπου:

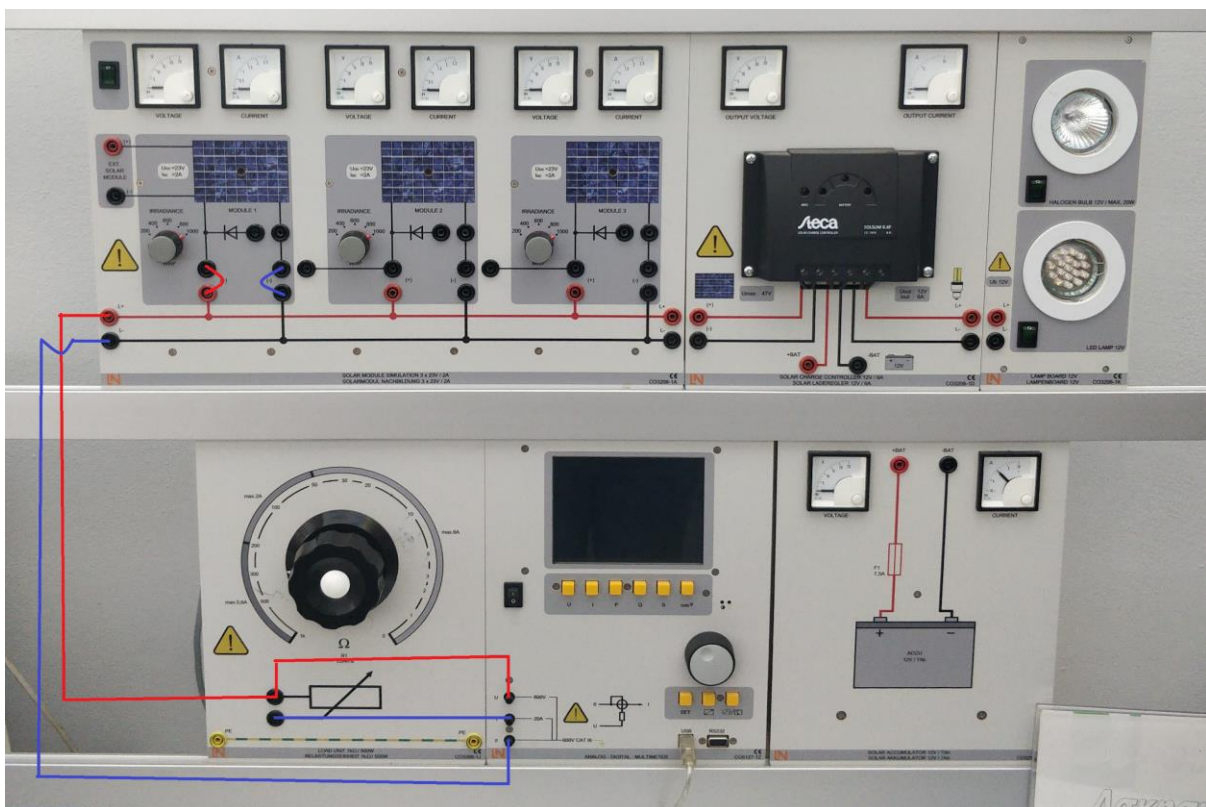
$$v_{oc} = \frac{q}{nkT} V_{oc} \quad \text{Εξίσωση (6.6)}$$

Από τις εξισώσεις (6.5) και (6.6) βλέπουμε ότι για υψηλότερη τάση ανοιχτού κυκλώματος έχουμε μεγαλύτερο συντελεστή πλήρωσης (FF). Για PV κυψέλες με συγκεκριμένο υλικό κατασκευής δεν παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις στην τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{OC} . Για παράδειγμα, σε συνθήκες ακτινοβολίας ενός ηλίου η διαφορά στην τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{OC}) μεταξύ μιας εργαστηριακής PV κυψέλης από πυρίτιο (Si) και μιας τυπικής εμπορικής κυψέλης από το ίδιο υλικό είναι περίπου 120 mV, και η μέγιστοι συντελεστές πλήρωσης (FF) είναι 0,85 και 0,83 αντίστοιχα. Όμως η διαφορά στον μέγιστο συντελεστή πλήρωσης (FF) μπορεί να είναι σημαντικοί εάν οι PV κυψέλες είναι φτιαγμένες από διαφορετικά υλικά. Για παράδειγμα μία κυψέλη φτιαγμένη από γάλλιο-αρσενικό (GaAs) μπορεί να έχει συντελεστή πλήρωσης (FF) που πλησιάζει το 0,89.

Η εξίσωση (6.6) μας δείχνει τη σημαντικότητα του παράγοντα ιδεατότητας (n). Αυτός ο παράγοντας εξαρτάται από την ποιότητα και τον τύπο της PV κυψέλης και στις περισσότερες εφαρμογές έχει την τιμή 1. Σε περιπτώσεις που έχουμε μεγαλύτερη τιμή όπως 2 όχι μόνο έχουμε μικρότερο συντελεστή πλήρωσης (FF) αλλά έχουμε και μικρότερη τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} .

Ένα βασικό ελάττωμα των εξισώσεων εξίσωση (6.5) και (6.6) είναι ότι δίνουν τον μέγιστο δυνατό συντελεστή πλήρωσης (FF) παρόλο που στην πράξη αυτός θα είναι μικρότερος λόγω των παρασιτικών απωλειών είτε του ίδιου του πάνελ είτε του ηλεκτρικού κυκλώματος που συνδέει τα πάνελ και τα επιμέρους ηλεκτρονικά εξαρτήματα σε μία εγκατάσταση. Για αυτό το λόγο ο πιο κοινός τρόπος για να προσδιορίσουμε το συντελεστή πλήρωσης (FF) είναι με μέσω της καμπύλης IV και προσδιορισμού του μέγιστου σημείου ισχύος της. Στη συνέχεια χρησιμοποιούμε τις εξισώσεις (6.1) ή (6.2).

6.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ



Σχήμα 6.3: Συνδεσμολογία για μετρήσεις σε ένα PV πάνελ

Όταν το σύστημα είναι κλειστό (διακόπτης on/off), γεφυρώνουμε την αρνητική και τη θετική έξοδο του φωτοβολταϊκού αντίστοιχα με τη γραμμή μεταφοράς χρησιμοποιώντας από έναν συνδετήρα για κάθε έξοδο.

Στη συνέχεια συνδέουμε με καλώδιο την θετική επαφή μεταφοράς με την μεταβλητή αντίσταση, με άλλο καλώδιο συνεχίζουμε από τη σύνδεση της επαφής της μεταβλητής αντίστασης με την υποδοχή στο ψηφιακό πολύμετρο στη θέση τάση (U).

Ενώ την δεύτερη επαφή που υπάρχει στην μεταβλητή αντίσταση τη συνδέουμε με τη υποδοχή που υπάρχει στο ψηφιακό πολύμετρο στη θέση του ρεύματος (I).

Τέλος με καλώδιο από την αρνητική επαφή μεταφοράς συνδέουμε με το ψηφιακό πολύμετρο στη θέση (O). Αυτή είναι η συνδεσμολογία του ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.3.

Το σύστημα πλέον είναι σε θέση να εκτελέσει μέτρηση, οι φοιτητές εισάγουν την επιθυμητή ηλιακή ακτινοβολία γυρνώντας τον περιστροφικό διακόπτη στην θέση που αντιστοιχεί στην ηλιακή ακτινοβολία που έχουν επιλέξει για να κάνουν μετρήσεις για την εργαστηριακή άσκηση. Ανοίγουν το διακόπτη τροφοδοσίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου που είναι πάνω από το φωτοβολταϊκό και το διακόπτη τροφοδοσίας του ψηφιακού πολυμέτρου.

Στην συγκεκριμένη εργαστηριακή άσκηση, επιθυμούμε στον προσομοιωτή ηλιακή ακτινοβολία 1000W/m^2 .

Επιλέγουμε στο πολύμετρο τα κουμπιά που αντιστοιχούν σε ρεύμα (I) και τάση (V) και βλέπουμε στην οθόνη μας το ρεύμα και την τάση του συστήματος.

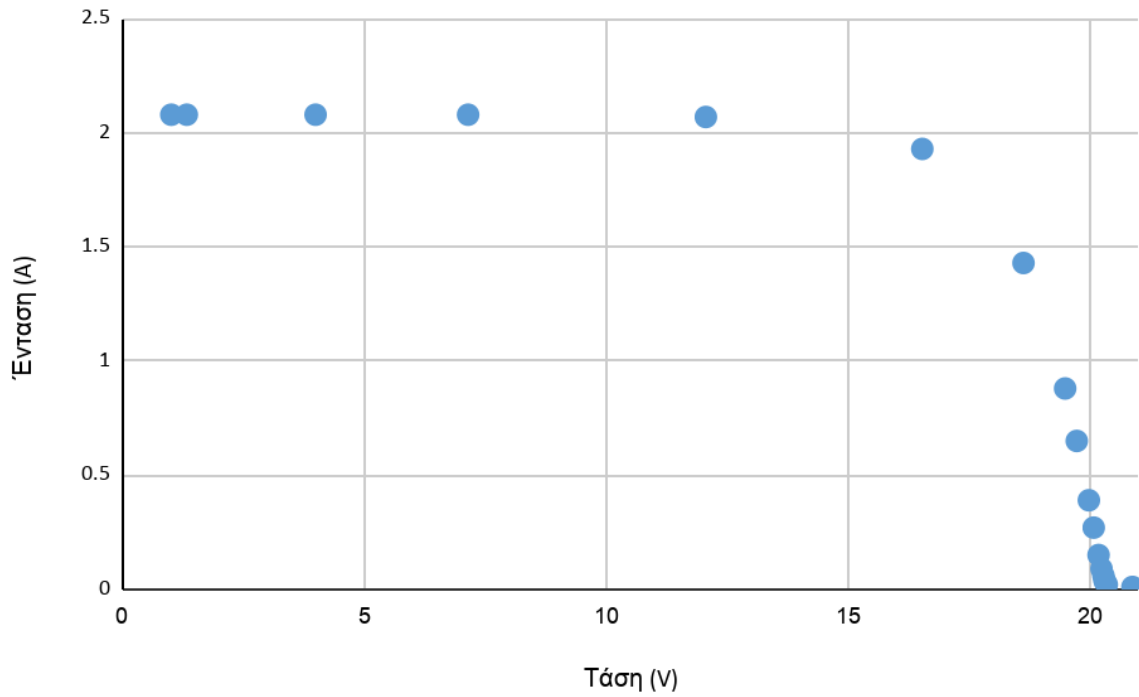
Για την συμπλήρωση του πίνακα μετρήσεων μεταβάλλουμε την ωμική αντίσταση μεταξύ των τιμών $1\text{K}\Omega$ και $0\ \Omega$. Στην προκειμένη περίπτωση προσπαθήσαμε να χωρίσουμε το εύρος της αντίστασης σε 18 ίσα μέρη και κατόπιν πήραμε μετρήσεις για την τάση (V) και την ένταση (A) του ρεύματος που παράγει το PV πάνελ για κάθε τιμή της αντίστασης. Οι μετρήσεις φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

6.4 Λύση

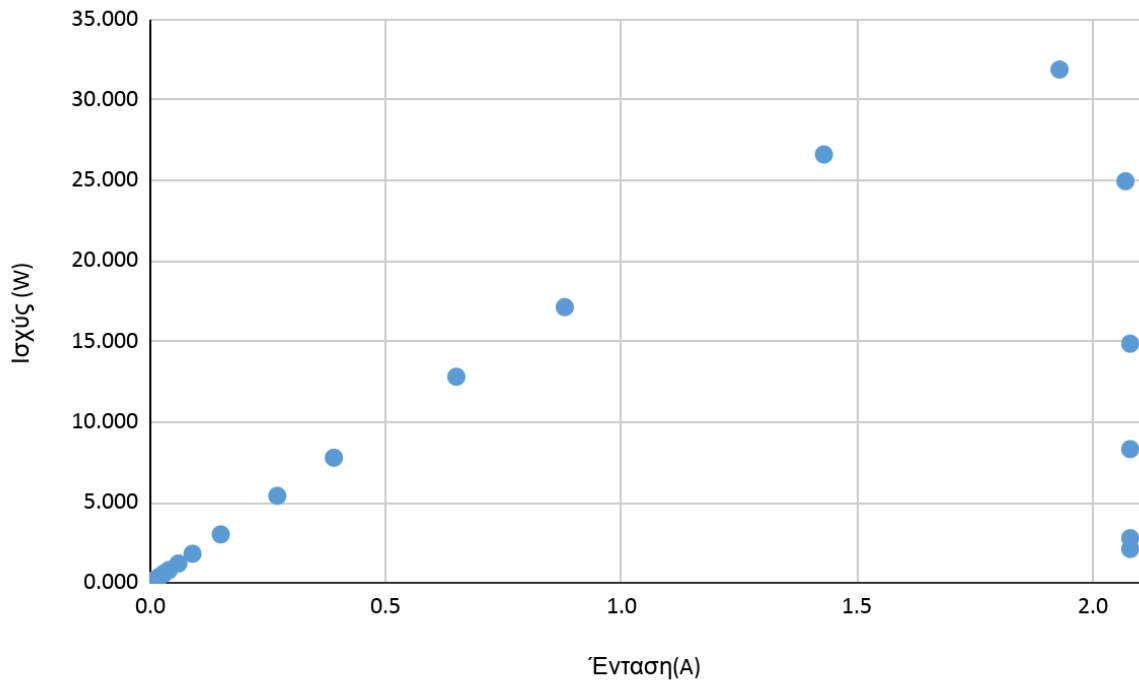
Πίνακας 6.I: Πειραματικές μετρήσεις εγκατάστασης για απόδοση PV πάνελ και υπολογισμός εμβαδού γραφήματος για καθορισμό του FF με ηλιακή ακτινοβολία 1000W/m^2

A/A	V(V)	I(A)	P(W)	Εμβαδόν
1	1.02	2.08	2.122	
2	1.34	2.08	2.787	2.7872
3	4	2.08	8.320	5.5328
4	7.15	2.08	14.872	6.552
5	12.06	2.07	24.964	10.18825
6	16.53	1.93	31.903	8.94
7	18.62	1.43	26.627	3.5112
8	19.48	0.88	17.142	0.9933
9	19.72	0.65	12.818	0.1836
10	19.97	0.39	7.788	0.13
11	20.07	0.27	5.419	0.033
12	20.17	0.15	3.026	0.021
13	20.23	0.09	1.821	0.0072
14	20.27	0.06	1.216	0.003
1	20.29	0.04	0.812	0.001
16	20.31	0.03	0.609	0.0007
17	20.34	0.02	0.407	0.00075
18	20.87	0.01	0.209	0.00795
			Σύνολο	38.89295

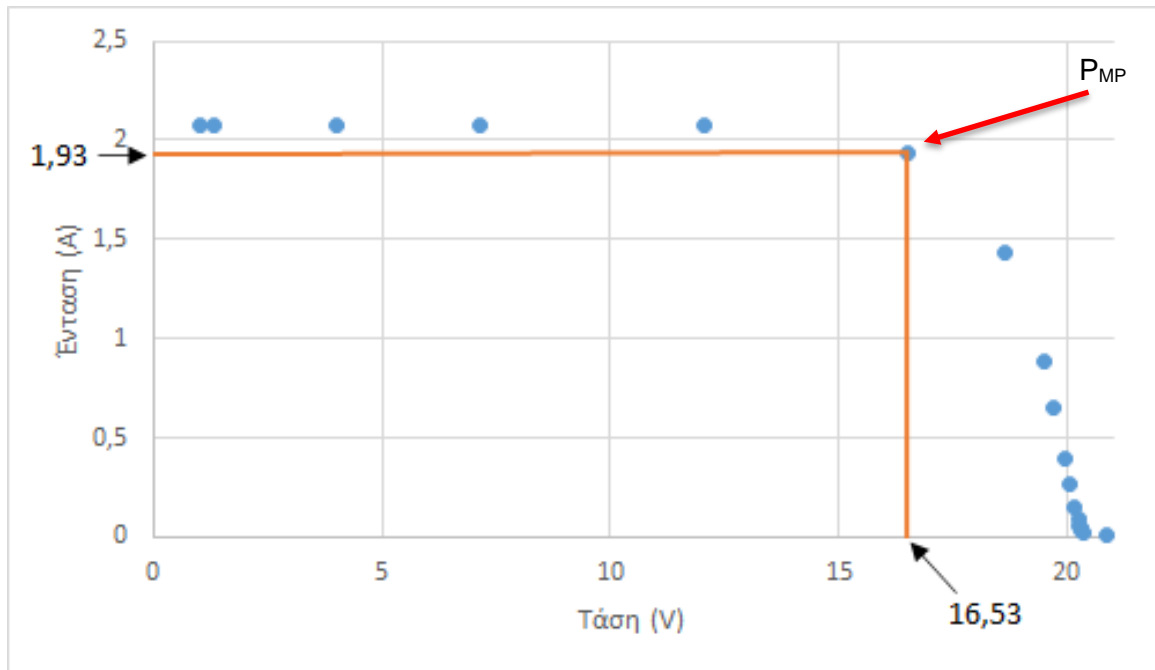
Με βάση τον παραπάνω πίνακα και με την βοήθεια κατάλληλου λογισμικού χαράσσουμε τις καμπύλες I-V και P-V.



Σχήμα 6.4: Τάση που παράγεται από ένα PV πάνελ συναρτήσσει της έντασης του ρεύματος που παράγεται



Σχήμα 11.5: Παραγόμενη ισχύς από ένα PV πάνελ συναρτήσσει της έντασης του ρεύματος



Σχήμα 6.6: Σημείο μέγιστης ισχύος P_{MP} για προσδιορισμό του FF

Μέγιστη ισχύς εξόδου πειραματική $P_{MP} = I_{MP} \cdot V_{MP} = 1,93A \cdot 16,53V = 31,903 W$
Από το σχήμα 6.6 έχουμε $V_{OC} = 20,87 V$ και $I_{SC} = 2,08 A$

Υπολογισμός FF με την εξίσωση (6.1):

$$FF = \frac{P_{MP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} = \frac{31,903 W}{20,87 V \cdot 2,08 A} = 0,7349 \text{ ή } 73,49\%$$

Υπολογισμός FF με την θεωρητική εξίσωση (6.5):

$$FF = \frac{v_{OC} - \ln(v_{OC} + 0,72)}{v_{OC} + 1}$$

χρησιμοποιούμε την εξίσωση (6.6) για να υπολογίσουμε το v_{OC} :

$$v_{OC} = \frac{q}{nkT} V_{OC} = \frac{1,602176634 \times 10^{-19} C}{1 \cdot 1,38064852 \times 10^{-23} \frac{J}{K} \cdot 300K} \cdot 20,87V = 807,29$$

με αντικατάσταση του v_{oc} στην εξίσωση (6.5) έχουμε:

$$FF = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0,72)}{v_{oc} + 1} = \frac{807,29 - \ln(807,29 + 0,72)}{807,29 + 1} = 0,9904 \text{ ή } 99,04\%$$

6.5 ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το αποτέλεσμα του συντελεστή πληρότητας FF που μας δίνει η εξίσωση (11.1) είναι 73% το οποίο είναι αρκετά μικρότερο από το περίπου 80% που έχουν τα τυπικά εμπορικά PV πάνελ. Στην περίπτωση του υπολογισμού χρησιμοποιώντας την εξίσωση (11.5) παρατηρούμε ότι έχουμε συντελεστή πληρότητας (FF) 99% το οποίο είναι πολύ μεγαλύτερο από τις τιμές συντελεστή πληρότητας (FF) σε πραγματικές συνθήκες. Όπως εξηγήσαμε όμως τη θεωρία η εξίσωση (11.5) δίνει τον μέγιστο δυνατό συντελεστή πληρότητας (FF) για το συγκεκριμένο πάνελ οπότε εξηγείται αυτή η μεγάλη διαφορά προς τα πάνω.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία είναι ωφέλιμο να συγκεντρώσουμε κάποια συμπεράσματα τόσο γενικά για την πειραματική εγκατάσταση όσο και για κάθε άσκηση ξεχωριστά. Αρχικά ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα αυτής της εγκατάστασης είναι ότι δεν επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες όπως η ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία περιβάλλοντος και η ταχύτητα του ανέμου. Αυτό δίνει την δυνατότητα οποιοσδήποτε φοιτητής να μπορεί να κάνει μετρήσεις με μοναδικές μεταβλητές την συνδεσμολογία, την ηλιακή ακτινοβολία και την αντίσταση. Έτσι καταλήγουμε σε μετρήσεις που παρουσιάζουν μεγάλη ομοιομορφία και επαναληψιμότητα. Άλλο ένα πλεονέκτημα που προκύπτει από τα παραπάνω είναι ότι μπορούμε να διεξάγουμε τα πειράματα ακόμα και μέρες που δεν έχουμε ηλιοφάνεια ή ακόμα και βραδινές ώρες.

Συγκεκριμένα από κάθε άσκηση μαθαίνουμε:

- Άσκηση 1: Πώς μετράμε την μέγιστη ισχύ σε ιδανικές συνθήκες.
- Άσκηση 2: Ότι η καμπύλη I-V είναι ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία για την αξιολόγηση της λειτουργίας ενός PV πάνελ καθώς πολύ εύκολα βρίσκουμε τα μεγέθη του ρεύματος βραχυκυκλώσεως I_{SC} και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος V_{OC} . Ότι μειώνοντας την ηλιακή ακτινοβολία ευθέως ανάλογα μειώνεται και το I_{SC} ενώ το V_{OC} παραμένει σταθερό. Συνεπώς ευθέως ανάλογα της μείωσης της ηλιακής ακτινοβολίας μειώνεται και η μέγιστη ισχύς P_{MAX} ενώ ο συντελεστής πληρότητας FF και η αποδοτικότητα του PV πάνελ παραμένουν σταθερά.
- Άσκηση 3: Παρατηρούμε ότι η ομοιόμορφη σκίαση (σε όλη την επιφάνεια του PV πάνελ) μειώνει την μέγιστη ισχύ που αποδίδει με τρόπο ανάλογο της άσκησης 2. Στην περίπτωση όμως που η σκίαση είναι σε μερικές μόνο από τις κυψέλες του πάνελ τότε αυτές δρουν σαν αντιστάσεις και μειώνουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την απόδοση του πάνελ. Για την μείωση της επίδρασης αυτού του φαινομένου χρησιμοποιούμε διόδους bypass που παρακάμπτουν την σειρά των κυψελών που σκιάζονται.
- Άσκηση 4: Βρήκαμε ότι στην παράλληλη σύνδεση τριών ίδιων PV πάνελ τριπλασιάζεται η ένταση του παραγόμενου ρεύματος ενώ η τάση μένει σταθερή. Στη σύνδεση των ίδιων αυτών πάνελ σε σειρά τριπλασιάζεται η τάση του παραγόμενου ρεύματος ενώ η ένταση μένει σταθερή. Επίσης καταλαβαίνουμε τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται τα πάνελ για να δημιουργηθούν ηλιακά πάρκα.
- Άσκηση 5: Υπολογίσαμε τον βαθμό πλήρωσης ενός PV πάνελ με πειραματικό και θεωρητικό τρόπο και βλέπουμε τα οφέλη ενός μεγάλου συντελεστή πλήρωσης καθώς αυτό σημαίνει πάνελ με μεγαλύτερη αποδοτικότητα.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. 2001, **Καλδέλλης Ι., Καββαδίας Κ.**, “Εργαστηριακές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας”, Εκδ. ΑΘ. ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ, Αθήνα.
2. 1979, **F. A. Lindholm, Fossum J. G., Burgess E. L.**, “Application of the superposition principle to solar-cell analysis”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 26, pp. 165–171.
3. 2017, **A. Augusto, Herasimenka S. Y., King R. R., Bowden S. G., Honsberg C.**, “Analysis of the recombination mechanisms of a silicon solar cell with low bandgap-voltage offset”, *Journal of Applied Physics*, vol. 121, no. 20, p. 205704.
4. 1996, **R. A. Sinton, Cuevas A.**, “Contactless determination of current–voltage characteristics and minority-carrier lifetimes in semiconductors from quasi-steady-state photoconductance data”, *Applied Physics Letters*, vol. 69, pp. 2510-2512.
5. 1995, **P. Baruch, De Vos A., Landsberg P. T., Parrott J. E.**, “On some thermodynamic aspects of photovoltaic solar energy conversion”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 36, pp. 201-222.
6. 2006, **M. Y. Levy, Honsberg C. B.**, “Rapid and precise calculations of energy and particle flux for detailed-balance photovoltaic applications”, *Solid-State Electronics*, vol. 50, pp. 1400-1405.
7. 1981, **M. A. Green**, “Solar cell fill factors: General graph and empirical expressions”, *Solid-State Electronics*, vol. 24, pp. 788 - 789,.
8. 2004, **A. Jain**, “Exact analytical solutions of the parameters of real solar cells using Lambert W-function”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 81, no. 2, pp. 269 - 277.
9. Site: <https://www.batteryclub.gr/blog-news/bataries-gia-aftonoma-fotovoltaika-sistimata>
10. Site: <http://gr.solar-led-lights.com/info/solar-charge-controller-pwm-vs-mppt-23930123.html>
11. Site: <https://www.greenenergyparts.com/sales/charge-controllers.html>
12. Site: <http://gr.solar-led-lights.com/info/solar-charge-controller-pwm-vs-mppt-23930123.html>
13. Site:
https://www.labri.fr/perso/billaud/travaux/Helios/Helios2/resources/gr12/Chapter_12_GR.pdf
14. Site: <http://article.sapub.org/10.5923.c.ep.201501.01.html>
15. Site: <https://www.pveducation.org/>
16. Site: <https://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-power/pv-panel.html>
17. Site: <https://blog.aurorasolar.com/shading-losses-for-pv-systems-and-techniques-to-mitigate-them/>
18. Site: <https://www.altestore.com/howto/solar-panels-pv-and-voltages-a98/>

19. Site: <https://circuitglobe.com/difference-between-forward-and-reverse-biasing.html>
20. Site: <https://www.hindawi.com/journals/ijp/2017/8479487/>
21. Site: <https://www.4green.gr/news/data/fwtoboltaika/96880.asp>
22. Site: <https://www.mp-energy.gr/%CE%B1%CF%85%CF%84%CE%BF%CE%BD%CE%BF%CE%BC%CE%B1-%CF%83%CF%85%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B1/%CE%B1%CF%81%CF%87%CE%B7-%CE%BB%CE%B5%CE%B9%CF%84%CE%BF%CF%85%CF%81%CE%B3%CE%B9%CE%B1%CF%83.html>