



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Π.Ε.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΜΕΣΩ
ΤΟΥ ΔΙΑΔΥΚΤΙΟΥ»
του σπουδαστή Ροβίση Πέτρου ΑΜ: 46145042

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
Δρ. Κ.Α. ΚΑΒΒΑΔΙΑΣ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Π.Ε.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΜΕΣΩ
ΤΟΥ ΔΙΑΔΥΚΤΙΟΥ»

του σπουδαστή Ροβίση Πέτρου ΑΜ: 46145042

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

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η κάτωθι Ροβίσης Πέτρος υπογεγραμμένος/η
.....
του.....Δημητρίου....., με αριθμό
μητρώου.....46145042..... 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

Ροβίσης Πέτρος



ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	3
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	4
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ABSTRACT.....	7
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
2 ΙΣΤΟΡΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	9
3 ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΟ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ.....	14
3.1 ΚΟΣΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΑΪΚΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ 14	
3.2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΑΓΟΡΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΓΙΑ ΤΟ 2019 ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ... 15	
4 ΤΥΠΟΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	18
4.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΥΡΙΤΙΟΥ (Si).....	18
4.2 ΤΥΠΟΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΜΕΓΑΛΟΥ ΠΑΧΟΥΣ . 18	
4.2.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου.....	19
4.2.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου.....	19
4.2.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου.....	20
4.3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΛΕΠΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ.....	21
4.3.1 Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός.....	21
4.3.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου.....	22
4.3.3 Τελουριούχο κάδμιο (CdTe).....	22
4.3.4 Αρσενικούχο γάλλιο (GaAs).....	23
4.4 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΑ.....	24
5 ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	25
5.1 ΑΠΟΔΟΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	27
5.2 ΓΩΝΙΑ ΚΛΙΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	27
6 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	29
7 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 1 - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΕΞΟΔΟΥ.....	32
7.1 ΣΤΟΧΟΣ.....	32

7.2	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	32
7.3	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	33
7.4	ΛΥΣΗ.....	34
7.5	ΣΧΟΛΙΑ.....	36
8	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 2 - ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ I-V.....	37
8.1	ΣΤΟΧΟΣ	37
8.2	ΚΑΜΠΥΛΗ I-V ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ	37
8.3	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	38
8.4	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	38
8.5	ΛΥΣΗ.....	39
8.6	ΣΧΟΛΙΑ.....	41
9	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 3 - ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΥΠΟ ΣΚΙΑΣΗ.....	42
9.1	ΣΤΟΧΟΣ	42
9.2	ΣΚΙΑΣΗ ΚΑΙ ΤΥΠΟΙ ΣΚΙΑΣΗΣ.....	42
9.3	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	43
9.4	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	43
9.5	ΛΥΣΗ.....	44
9.6	ΣΧΟΛΙΑ.....	48
10	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 4 - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΠΟΥ ΣΥΝΔΕΟΝΤΑΙ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ (ΙΔΙΑ ΑΣΚΗΣΗ ΓΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕ ΣΕΙΡΑ)	49
10.1	ΣΤΟΧΟΣ	49
10.2	ΣΥΝΔΕΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΣΕ ΣΕΙΡΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ.....	49
10.3	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	49
10.4	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	49
10.5	ΛΥΣΗ.....	50
10.6	ΣΧΟΛΙΑ.....	53
11	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 5 - ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΛΗΡΩΣΗΣ 54	
11.1	ΣΤΟΧΟΣ	54
11.2	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΛΗΡΟΤΗΤΑΣ (FF).....	54
11.3	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	54
11.4	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	55

11.5	ΛΥΣΗ	56
11.6	ΣΧΟΛΙΑ.....	58
12	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	59
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	61

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1	Δορυφόρος Vanguard I στο διάστημα 1958	10
Σχήμα 2.2	Εγκατάσταση σε φάρο στην Ιαπωνία 1962	11
Σχήμα 2.3	Φωτοβολταϊκά στοιχεία για εφαρμογές σε συγκεντρωτικά συστήματα CPV ...	12
Σχήμα 2.4	Ιστορική αναδρομή φωτοβολταϊκών	13
Σχήμα 3.1	Διάγραμμα μεταβολής κόστους ηλ. ενέργειας από φωτοβολταϊκά στην Ελλάδα κατά το διάστημα 2012-2019.....	15
Σχήμα 3.2	Εγκατεστημένη ισχύς ανά χρόνο στην Ελλάδα	16
Σχήμα 3.3	Συστήματα αυτοπαραγωγής σε πάρκα και στέγες στην Ελλάδα.....	16
Σχήμα 3.4	Θέσεις απασχόλησης φωτοβολταϊκών ανά χρόνο στην Ελλάδα	17
Σχήμα 4.1	Φωτοβολταϊκά συστήματα μεγάλου πάχους	18
Σχήμα 4.2	Φωτοβολταϊκό πλαίσιο και φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου 19	
Σχήμα 4.3	Φωτοβολταϊκό πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου.....	20
Σχήμα 4.4	Φωτοβολταϊκό ταινίας πυριτίου.....	21
Σχήμα 4.5	Φωτοβολταϊκό από δισηληνοϊνδιούχο χαλκό	21
Σχήμα 4.6	Φωτοβολταϊκό άμορφου πυριτίου	22
Σχήμα 4.7	Τελουριούχο κάδμιο (CdTe).....	22
Σχήμα 4.8	Αρσενικούχο γάλλιο (GaAs).....	23
Σχήμα 4.9	Πολυστρωματικό φωτοβολταϊκό	24
Σχήμα 5.1	Σχεδιάγραμμα Αυτόνομου Φωτοβολταϊκού Συστήματος	25
Σχήμα 5.2	Διασυνδεδεμένο σύστημα.....	26
Σχήμα 5.3	Αυτόνομο Σύστημα.....	26
Σχήμα 6.1	Πειραματική εγκατάσταση από την online κάμερα.....	29
Σχήμα 6.2	Συνδεσμολογίες εγκατάστασης μέσω διαδικτύου	31
Σχήμα 7.1	Τάση που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό συναρτήσει της έντασης του ρεύματος που παράγεται	35
Σχήμα 7.2	Παραγόμενη ισχύς από ένα φωτοβολταϊκό συναρτήσει της έντασης του ρεύματος 35	
Σχήμα 8.1	Χαρακτηριστική Καμπύλη I-V	37
Σχήμα 8.2	Πειραματικό διάγραμμα τάσης που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό συναρτήσει της έντασης του ρεύματος που παράγεται	40
Σχήμα 8.3	Θεωρητικό διάγραμμα τάσης που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό συναρτήσει της έντασης του ρεύματος που παράγεται	40
Σχήμα 8.4	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών καμπυλών I-V	41
Σχήμα 9.1	Διάγραμμα ρεύματος τάσης για σκιασμένο φ/β πλαίσιο	45
Σχήμα 9.2	Διάγραμμα ισχύς ρεύματος για σκιασμένο φ/β πλαίσιο	45
Σχήμα 9.3	Διάγραμμα ρεύματος τάσης για μη σκιασμένο φ/β πλαίσιο	46
Σχήμα 9.4	Διάγραμμα ισχύς ρεύματος για μη σκιασμένο φ/β πλαίσιο.....	47
Σχήμα 9.5	Σύγκριση καμπυλών I-V για το ίδιο φ/β πλαίσιο με παρόμοια ηλιακή ακτινοβολία. 47	

Σχήμα 10.1	Διάγραμμα έντασης τάσης για παράλληλη σύνδεση	51
Σχήμα 10.2	Διάγραμμα έντασης τάσης για σύνδεση σε σειρά.....	52
Σχήμα 10.3	Σύγκριση καμπυλών παράλληλης σύνδεσης και σύνδεσης σε σειρά	53
Σχήμα 11.1	Χαρακτηριστική καμπύλη I – V και ΣΜΙ	57

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 5.1	Βέλτιστες κλίσης φ/β πλαισίων ανά μήνα για την Ελλάδα.....	28
Πίνακας 6.1	Προδιαγραφές του φωτοβολταϊκού πλαισίου	29
Πίνακας 7.1	Πειραματικές μετρήσεις εγκατάστασης για απόδοση φωτοβολταϊκού στοιχείου	34
Πίνακας 8.1	Πειραματικές μετρήσεις εγκατάστασης για απόδοση φωτοβολταϊκού στοιχείου	39
Πίνακας 9.1	Πειραματικές μετρήσεις εγκατάστασης για απόδοση φωτοβολταϊκού στοιχείου με σκίαση.....	44
Πίνακας 9.11	Πειραματικές μετρήσεις εγκατάστασης για απόδοση φωτοβολταϊκού στοιχείου χωρίς σκίαση.....	46
Πίνακας 10.1	Πειραματικές μετρήσεις εγκατάστασης για παράλληλη σύνδεση	50
Πίνακας 10.11	Πειραματικές μετρήσεις εγκατάστασης για σύνδεση σε σειρά.....	51
Πίνακας 11.1	Πειραματικές μετρήσεις εγκατάστασης για απόδοση φωτοβολταϊκού στοιχείου	56

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια συγκεντρωτική αναφορά διερεύνησης της ενεργειακής απόδοσης της διάταξης φωτοβολταϊκών πλαισίων με τη διεξαγωγή σειράς πειραματικών μετρήσεων και τη σύνταξη εργαστηριακών ασκήσεων μέσω του διαδικτύου. Σκοπός της είναι κατανόησης της επίδρασης παραμέτρων όπως: σκίαση, ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασία πλαισίου και περιβάλλοντος και συνδεσμολογίας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: φωτοβολταϊκά πλαίσια, ηλιακή ακτινοβολία, σκίαση, θερμοκρασία πλαισίου και περιβάλλοντος, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

EXPERIMENTAL STUDY OF A PHOTOVOLTAIC PANEL VIA INTERNET

ABSTRACT

The present work is a comprehensive report investigating the energy efficiency of a photovoltaic panel device by conducting a series of experimental measurements and creating laboratory exercises via the internet. Its purpose is to understand the effect of parameters such as: shading, intensity of solar radiation, frame and ambient temperature and wiring in electricity generation.

KEYWORDS: photovoltaic panel, solar radiation, shading, frame and ambient temperature, electric power generation

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι φανερό πως εδώ και δύο δεκαετίες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.) και πιο συγκεκριμένα τα φωτοβολταϊκά έχουν μπει στην ζωή μας. Αυτό συνέβη διότι οι ανάγκες για ηλεκτρισμό έχουν αυξηθεί κατακόρυφα και τα αποθέματα φυσικών πόρων μειώνονται συνεχώς, ενώ συγχρόνως είναι επιβλαβή για το περιβάλλον. Επίσης η ηλιοφάνεια στη χώρα μας υπάρχει σχεδόν σε όλους του μήνες κάνοντας τα φωτοβολταϊκά μια πολύ συμφέρουσα λύση ηλεκτρικού ρεύματος.

Η παρούσα διπλωματική αναφέρεται στην ιστορία των φωτοβολταϊκών, στους τύπους φωτοβολταϊκών και σε ότι άλλο χρειάζεται στο τομέα αυτό για την κατανόηση των πέντε εργαστηριακών ασκήσεων που έχουν δημιουργηθεί για την επίλυση από τους φοιτητές

Οι πρώτες δύο εργαστηριακές ασκήσεις αναφέρονται στον υπολογισμό της μέγιστης ισχύος εξόδου και στην δημιουργία της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V του φωτοβολταϊκού. Σκοπός της είναι οι φοιτητές να μάθουν να υπολογίζουν τη μέγιστη ισχύ εξόδου και να δημιουργήσουν την χαρακτηριστική καμπύλη. Εν συνέχεια γίνεται η σύγκριση της θεωρητικής και της πραγματικής χαρακτηριστικής καμπύλης ισχύος και διερευνώνται οι λόγοι των διαφορών τους.

Η τρίτη εργαστηριακή άσκηση χρησιμοποιεί τον υπολογισμό της μέγιστης ισχύος όμως υπό την επίδραση της σκίασης. Με αυτό το τρόπο οι φοιτητές αντιλαμβάνονται την επίδραση της σκίασης στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

Η τέταρτη εργαστηριακή άσκηση μαθαίνει στους φοιτητές την σύνδεση παραπάνω από ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου. Αυτό επιτυγχάνεται με την παράλληλη σύνδεση και την σύνδεση σε σειρά. Επιπλέον και σε αυτή την άσκηση θα υπάρξει σύγκριση μεταξύ των δύο συνδέσεων ώστε να κατανοηθούν τα αποτελέσματα της εφαρμογής της κάθε σύνδεσης.

Η πέμπτη εργαστηριακή άσκηση έχει να κάνει με το συντελεστή πληρότητας. Πρόκειται για έναν συντελεστή που δείχνει στους φοιτητές πόσο καλή λειτουργία έχει η εγκατάσταση, για αυτό το λόγο καλούνται να τον υπολογίσουν.

Μετά από όλες αυτές τις εργαστηριακές ασκήσεις οι φοιτητές θα έχουν κατανοήσει τις βασικές αρχές λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, οπότε θα μπορούν να αξιοποιήσουν και την εγκατάσταση όπου μελέτησαν.

2 ΙΣΤΟΡΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Όλο και περισσότερο στις μέρες μας εισέρχονται οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.) στην καθημερινότητα μας, καθώς η ανάγκη για περισσότερη ενέργεια αλλά και προστασία του περιβάλλοντος από τα περιβαλλοντικά προβλήματα τις καθιερώνουν απαραίτητες. Υπάρχουν πολλές Α.Π.Ε. όμως εμείς θα αναφερθούμε στην ηλιακή και πιο συγκεκριμένα στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Η ιστορία του φαινομένου αυτού ξεκίνησε το 1839 όταν ο Γάλλος φυσικός Edmond Becquerel [4], [7] σε ένα πείραμα που επιχείρησε με μια ηλεκτρολυτική επαφή φτιαγμένη από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια ανακάλυψε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η επόμενη ανακάλυψη ήρθε από τον Adams το 1876 και το φοιτητή του Day [4], [7] όπου παρατήρησαν ότι μια ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος παραγόταν από το σελήνιο (Se) όταν αυτό ήταν εκτεθειμένο στο φως.

Μια σπουδαία ανακάλυψη όπου χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα σε πιο βελτιωμένο στάδιο είναι η μέθοδο παραγωγής ημιαγωγού μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si) όπου ανακάλυψε το 1918 ο Πολωνός Czochralski [4], [7].

Το 1949 οι Matt και ο Schottky [4], [7] αναπτύσσουν την θεωρία της διόδου σταθερής κατάστασης ενώ η κβαντική θεωρία είχε εκτυλιστεί, οπότε είχαν ξεκινήσει και οι πρώτες πρακτικές εφαρμογές του φαινομένου.

Όπου το 1954 οι Chapin, Fuller και Pearson [4], [7] στα εργαστήρια της Bell δημιουργούν το πρώτο ηλιακό κελί με απόδοση μόλις 6% εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

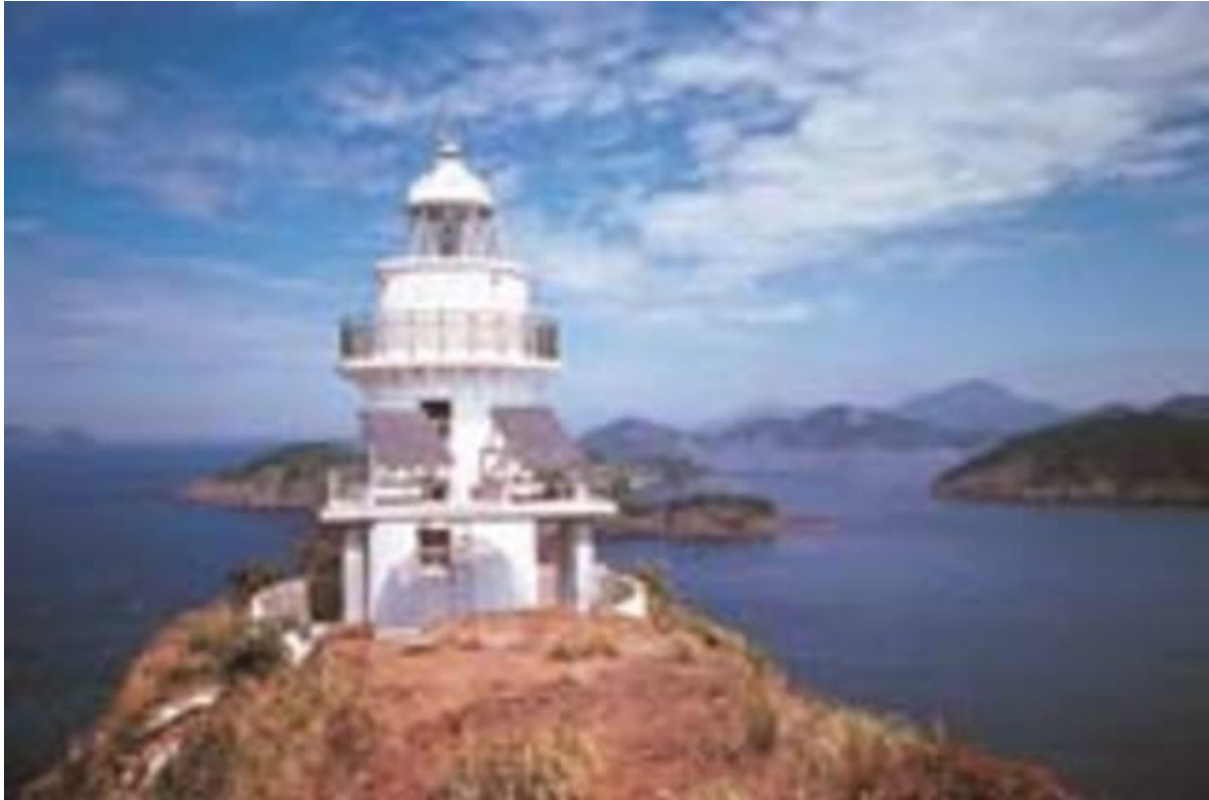
Μια από τις πρώτες εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων εφαρμόστηκαν στην διαστημική τεχνολογία και συγκεκριμένα το 1958 στο δορυφόρο Vanguard I [4], [7], όπου πρόκειται για ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα.



Σχήμα 2.1 Δορυφόρος Vanguard I στο διάστημα 1958

(πηγή: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=VAGT3>)

Το 1962 δημιουργείται στην Ιαπωνία από την Sharp η μεγαλύτερη εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στον κόσμο και σιγά σιγά έκαναν την εμφάνιση τους, το υψηλό κόστος όμως παραγωγής τους επιβάρυνε την εξάπλωση τους [4].



Σχήμα 2.2 Εγκατάσταση σε φάρο στην Ιαπωνία 1962

(πηγή: <https://gr.pinterest.com/pin/477170523019815712/>)

Το 1980 [4] στην Καλιφόρνια από την Arco Solar κατασκευάζεται η πρώτη εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων όπου η παραγωγή του φτάνει την τάξη του 1 MW (megawatt), ενώ η εγκατάσταση διαθέτει σύστημα παρακολούθησης του ήλιου σε 2 άξονες.

Το 1999 [4] η παραγωγή όλων των φωτοβολταϊκών στοιχείων φτάνει τα 200MW. Την ίδια χρονιά η εταιρία Spectrolab σε συνεργασία με το National Renewable Energy Laboratory ανακαλύπτουν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο για εφαρμογές σε συγκεντρωτικά συστήματα CPV με απόδοση ισχύος το 32,3%.

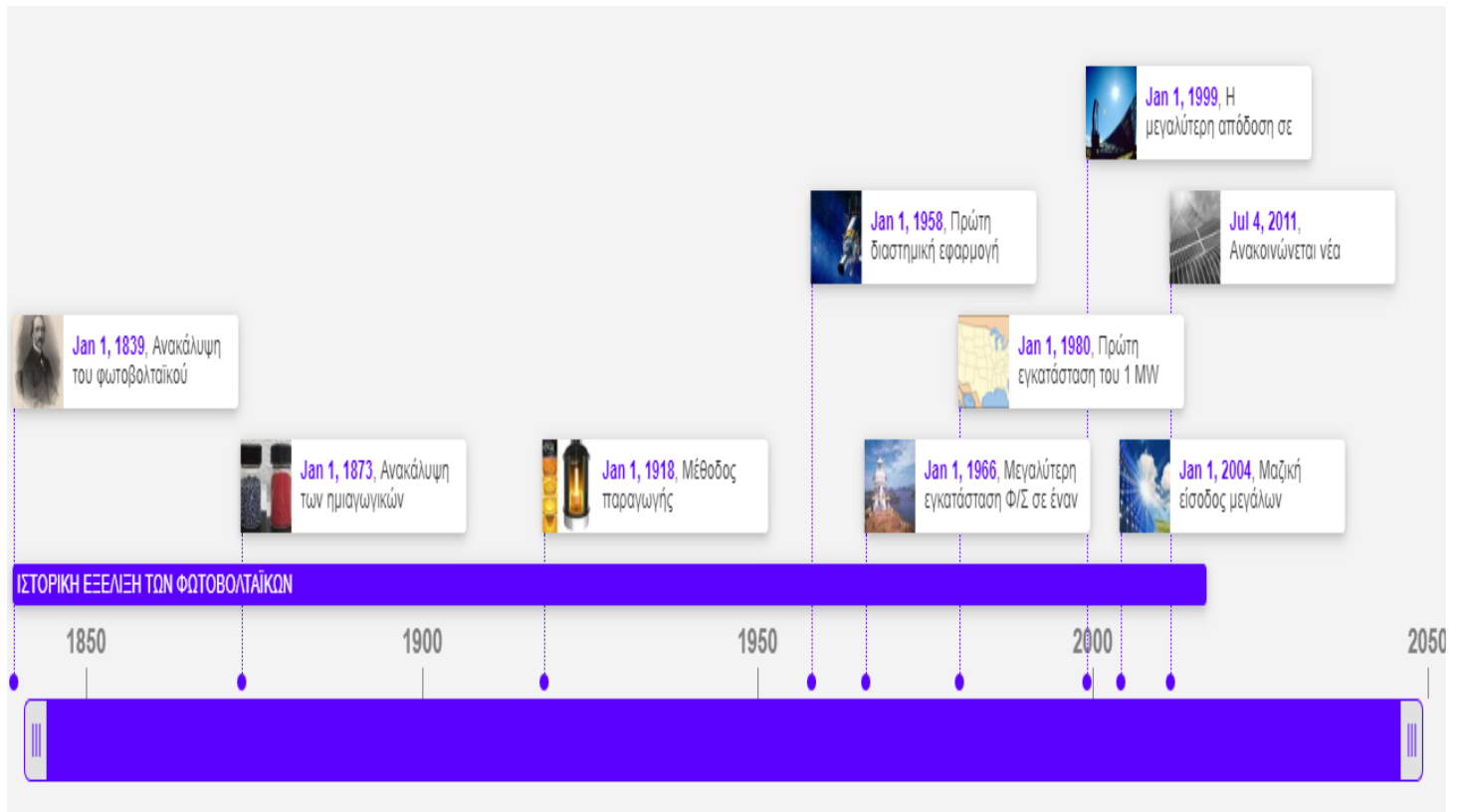


Σχήμα 2.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία για εφαρμογές σε συγκεντρωτικά συστήματα CPV

(πηγή: <https://mercadoelectrico.wordpress.com/2012/09/28/que-es-la-energia-solar-por-concentracion/>)

Το 2004 [4] η παραγωγή των φωτοβολταϊκών στοιχείων αγγίζει τα 1.200MW. Γερμανία και Ιαπωνία πρωτοπορούν στην παραγωγή, όμως και οι υπόλοιπες χώρες εισέρχονται και αυτές με γοργή ανάπτυξη στο χώρο των φωτοβολταϊκών.

Το 2011[4] τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν γίνει τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι χώρες που είχαν επενδύσει στα φωτοβολταϊκά αυξάνουν το συνεχώς την παραγωγή τους. Επίσης με το κόστος εγκατάστασης να έχει μειωθεί εφικτά και τις ανάγκες για ηλεκτρική ενέργεια να αυξάνονται συνεχώς οι εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών.



Σχήμα 2.4 Ιστορική αναδρομή φωτοβολταϊκών

(πηγή: <https://www.timetoast.com/timelines/8dc5db37-3597-4a90-a33e-01e524dd45e9>)

3 ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΟ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ

Η τιμή των φωτοβολταϊκών ανά εγκατεστημένο Watt είναι προφανές ότι θα ήταν πολύ υψηλή αν αναλογιστεί κανένας το τεράστιο κόστος της αγοράς των φωτοβολταϊκών. Οπότε ήταν και ο λόγος όπου δεν υπήρχε και η ανάλογη ζήτηση. Αυτό φυσικά με την πάροδο του χρόνου άλλαξε και με αυτό τον τρόπο τα φωτοβολταϊκά εισέρχονταν στην αγορά.

Συγκεκριμένα το 1956 η τιμή ανά εγκατεστημένο Watt κινούνταν στα 500\$.

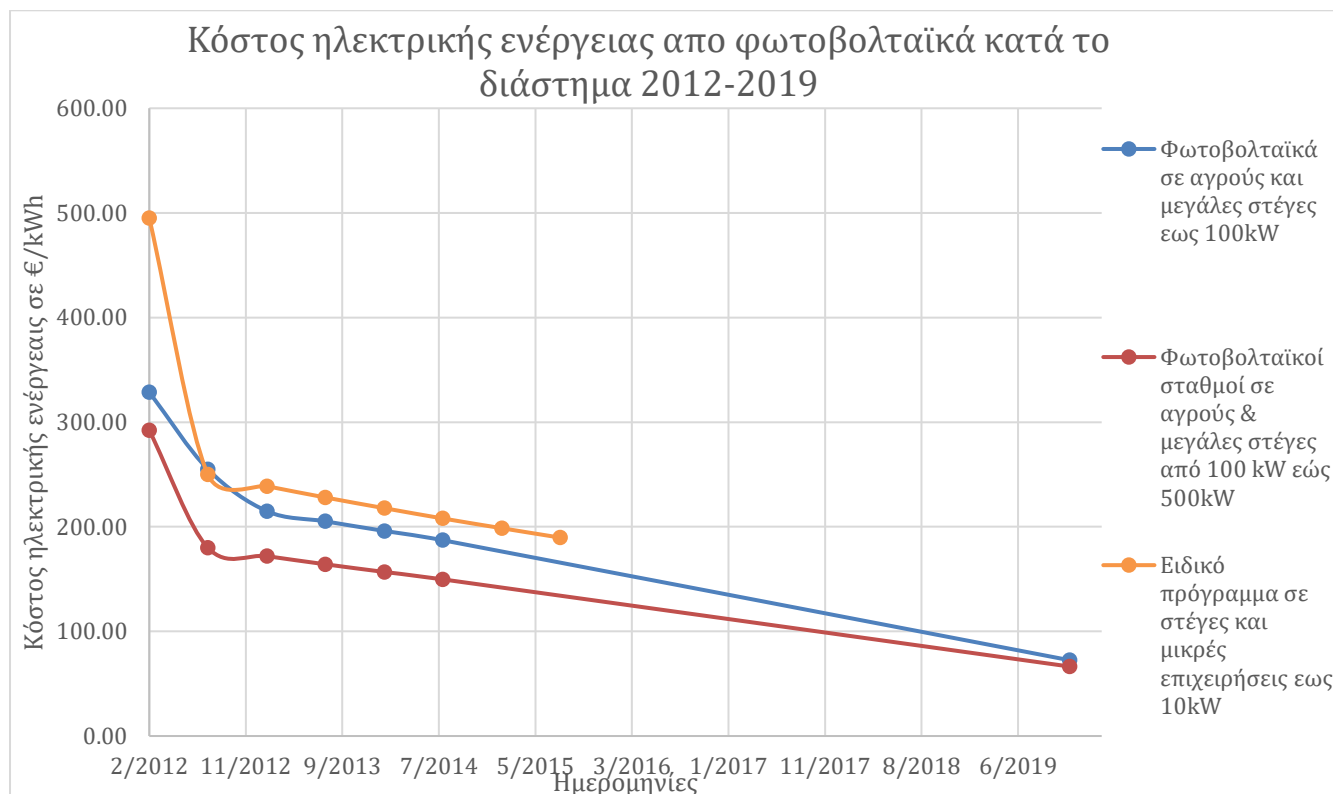
Με την πρόοδο της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών η τιμή ανά εγκατεστημένο Watt άρχισε να μειώνεται και αυτή. Συνεπώς το 1970 οι τιμή ανερχόνταν στα 100\$/Watt και το 1973 στα 50\$/Watt.

Είκοσι χρόνια αργότερα και συγκεκριμένα το 1983 ο τζίρος έχει ανέβει αγγίζοντας τα 250.000.000\$ και η παγκόσμια παραγωγή προσεγγίζει τα 22MW οπότε η τιμή έχει μειωθεί στα 11,5\$/Watt.

Η ζήτηση αυξάνεται συνεχώς και έτσι το 2004 ο τζίρος είναι 6.500.000.000\$ και η παραγωγή στα 1200MW οπότε και η τιμή έχει φτάσει πλέον στα 5,4\$/Watt.

3.1 ΚΟΣΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΑΪΚΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Στην Ελλάδα υπεύθυνη για την αγορά της παραγωγής των φωτοβολταϊκών είναι η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) όπου καθορίζει την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας. Η τιμή εξαρτάται από το μέγεθος του φωτοβολταϊκού σταθμού. Επίσης η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας έχει μεταβληθεί όπως φαίνεται στο παρακάτω πίνακα για την τελευταία δετία (2012-2020)



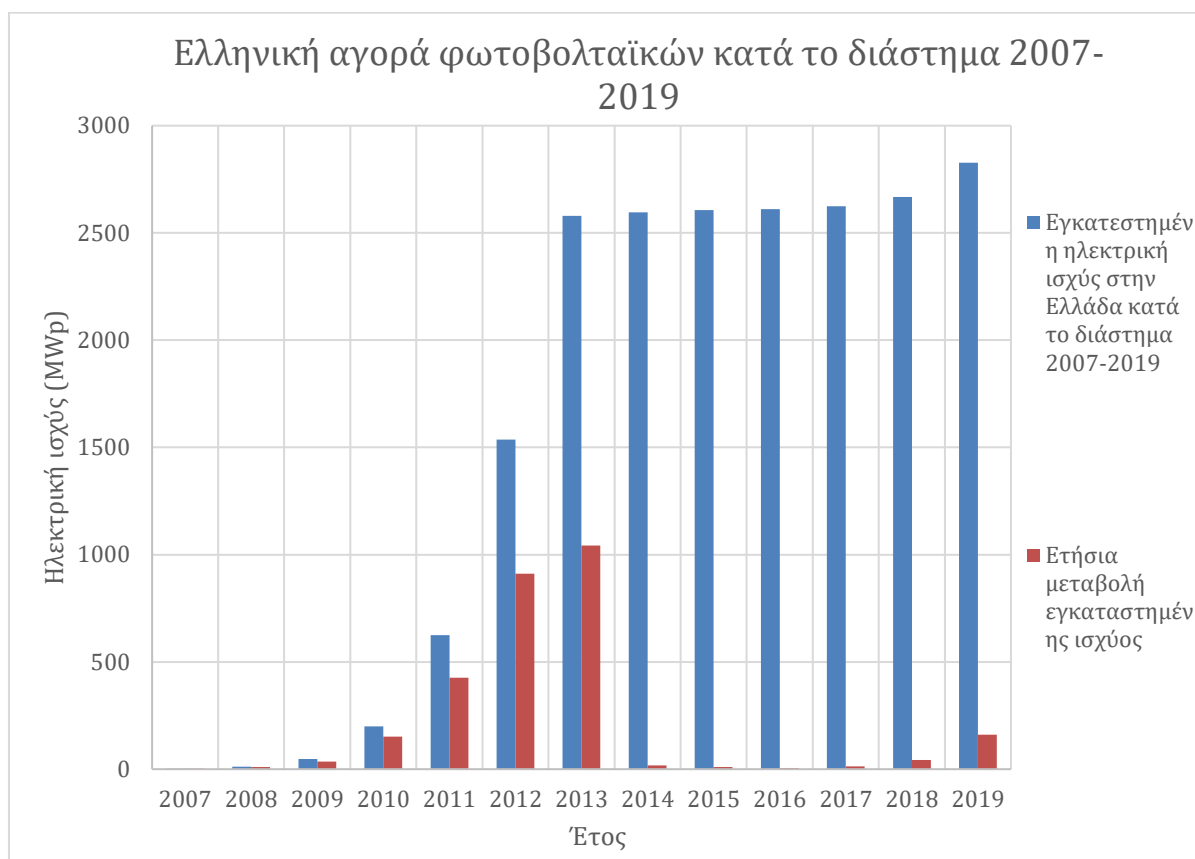
Σχήμα 3.1 Διάγραμμα μεταβολής κόστους ηλ. ενέργειας από φωτοβολταϊκά στην Ελλάδα κατά το διάστημα 2012-2019

(πηγή: <https://selasenergy.gr/entupa-dei.php>)

3.2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΑΓΟΡΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΓΙΑ ΤΟ 2019 ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

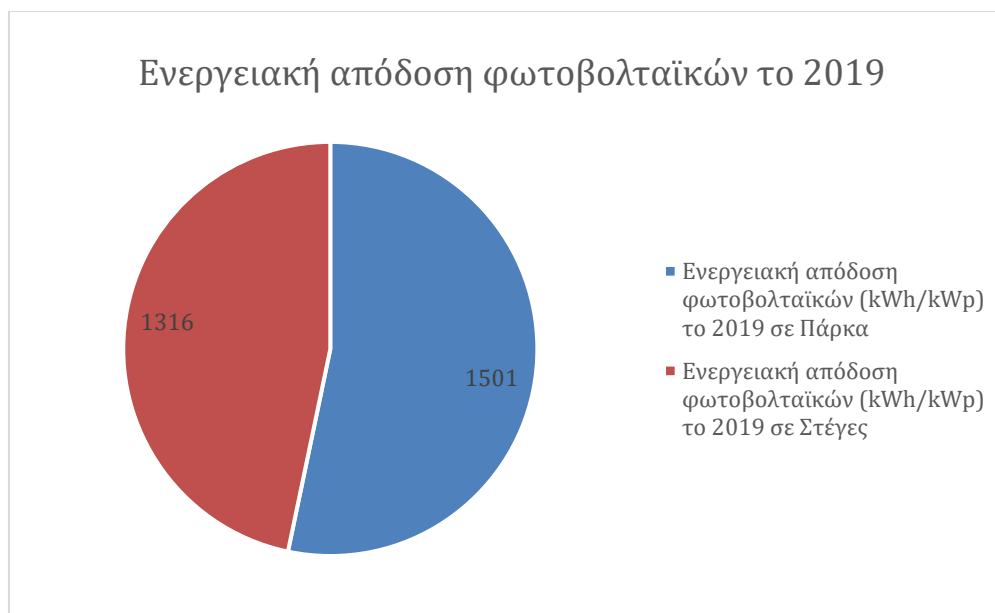
Το 2019 υπήρχε μια αύξηση της τάξεως του 3,1% στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε σχέση με την περσινή χρονιά, κάτι που δείχνει τα πρώτα σημάδια ανάκαμψης ώστε η τάση να βρίσκεται σε επίπεδα εκατοντάδων μεγαβάτ ετησίως.

Η νέα εγκατεστημένη ισχύ διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών της χώρας για το 2019 ήταν 160 MWp και η συνολική εγκατάσταση ως το 2019 έφτασε τα 2.828 MWp, εκ των οποίων τα 2.255 MWp επί εδάφους και τα υπόλοιπα σε στέγες κτιρίων [11].



Σχήμα 3.2 Εγκατεστημένη ισχύς ανά χρόνο στην Ελλάδα

(πηγή: <https://helapco.gr/statistika-agogas-fwtovoltaiikwn/statistika-ellinikis-agogas-2019-2/>)



Σχήμα 3.3 Συστήματα αυτοπαραγωγής σε πάρκα και στέγες στην Ελλάδα

(πηγή: <https://helapco.gr/statistika-agogas-fwtovoltaiikwn/statistika-ellinikis-agogas-2019-2/>)

Παρόλα αυτά για το δυναμικό της χώρας τα επίπεδα παραμένουν χαμηλά, καθώς τα φωτοβολταϊκά καλύπτουν μόλις το 7% της ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας.

Βέβαια η Ελλάδα με το 7% βρίσκεται στην τέταρτη θέση διεθνώς στην συμβολή των φωτοβολταϊκών στη συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρώτη τριάδα αποτελείται από την Ονδούρα, Ιταλία και Γερμανία [11].

Η αγορά των φωτοβολταϊκών για το 2019 απασχόλησε 9.000 θέσεις πλήρους απασχόλησης.



Σχήμα 3.4 Θέσεις απασχόλησης φωτοβολταϊκών ανά χρόνο στην Ελλάδα

(πηγή: <https://helapco.gr/statistika-agogas-fwtovoltaiakwn/statistika-ellinikis-agogas-2019-2/>)

Τα 2.255MWp που βρίσκονται σε εγκαταστάσεις επί εδάφους καλύπτουν 12.600 στρέμματα γης και με τα διάκενα που υπάρχουν μεταξύ των φωτοβολταϊκών συστοιχιών και την περιμετρική απόσταση ασφαλείας από τα όρια των γηπέδων τα στρέμματα γης φτάνουν τα 40.000. Αριθμός ο οποίος αντιστοιχεί στο 0,03% της έκτασης της χώρας και στο 0,12% της γεωργικής γης της Ελλάδος. Σε σύγκριση με τους λιγνιτικούς σταθμούς και τα λιγνιτωρυχεία όπου καταλαμβάνουν 253.000 στρέμματα είναι 6,3 φορές λιγότερη η έκταση των φωτοβολταϊκών [11].

Όσον αφορά τον καθαρισμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων για κάθε παραγόμενη MWh φωτοβολταϊκών απαιτούνται 0,114 m³ νερού. Το 2019 καταναλώθηκαν συνολικά 451650 m³ νερού για τις περίπου 3,962 TWh που παρήχθησαν από τα εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά. Το νερό αυτό αντιστοιχεί περίπου στην ετήσια κατανάλωση 4.670 νοικοκυριών [11].

Επιπλέον όσον αφορά στην αποσόβηση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για το 2019 η παραγόμενη ενέργεια φωτοβολταϊκών αποσόβησε 3.720.000 τόνους διοξειδίου του άνθρακα [11].

4 ΤΥΠΟΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

4.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΥΡΙΤΙΟΥ (Si)

Το 90% των φωτοβολταϊκών κατασκευάζονται από πυρίτιο καθώς προσφέρει υψηλή απόδοση φωτοβολταϊκών [5].

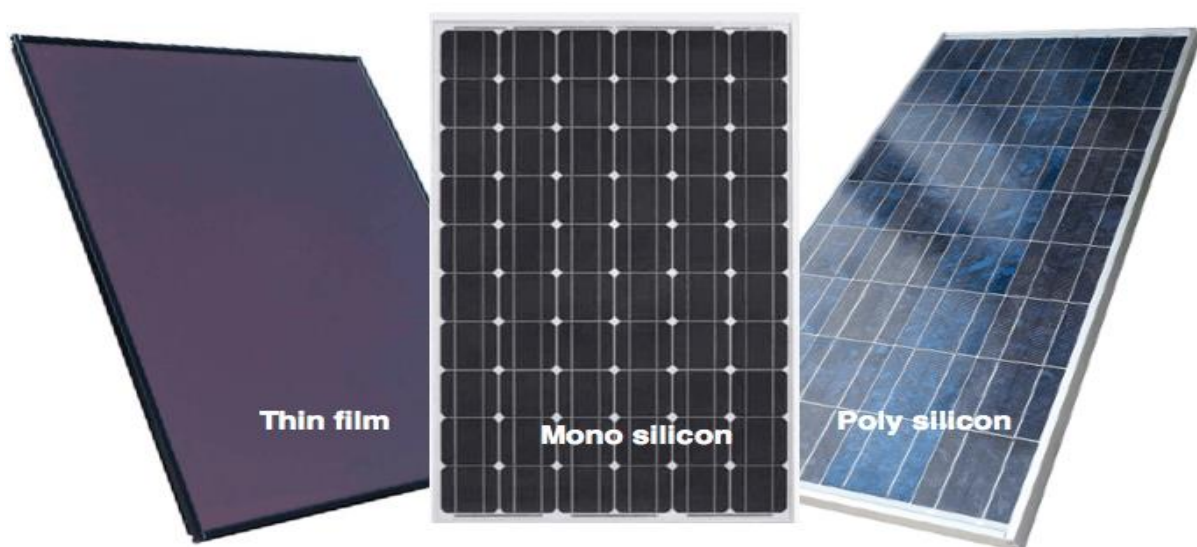
Παράγεται σε μεγάλες ποσότητες ετησίως καθώς βρίσκεται εύκολα στην φύση και είναι φιλικό και ως προς το περιβάλλον. Επίσης είναι εύκολο στην μορφοποίηση του και οι ηλεκτρικές ιδιότητες διατηρούνται μέχρι τους 125°C, οπότε το φάσμα θερμοκρασιών που ανταπεξέρχονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι μεγάλο.

Το 2007 ήταν η πρώτη χρονιά που η ζήτηση κρυσταλλικού πυριτίου σε τόνους ήταν μεγαλύτερη από των ημιαγωγών της ηλεκτρονικής στην αγορά των φωτοβολταϊκών.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το πάχος του σε δύο κατηγορίες:

- σε φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου μεγάλου πάχους
- σε φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου λεπτών υμενίων (thin film)

4.2 ΤΥΠΟΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΜΕΓΑΛΟΥ ΠΑΧΟΥΣ



Σχήμα 4.1 Φωτοβολταϊκά συστήματα μεγάλου πάχους

(πηγή: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/pv-panel-technology>)

4.2.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μονοκρυσταλλικού πυριτίου στην βιομηχανία κυμαίνεται 15-18% στο πλαίσιο ενώ σε εργαστήριο η απόδοση έχει φτάσει έως και 24,7%. Το πάχος τους είναι 0,3 χιλιοστά [5].



Σχήμα 4.2 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο και φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου

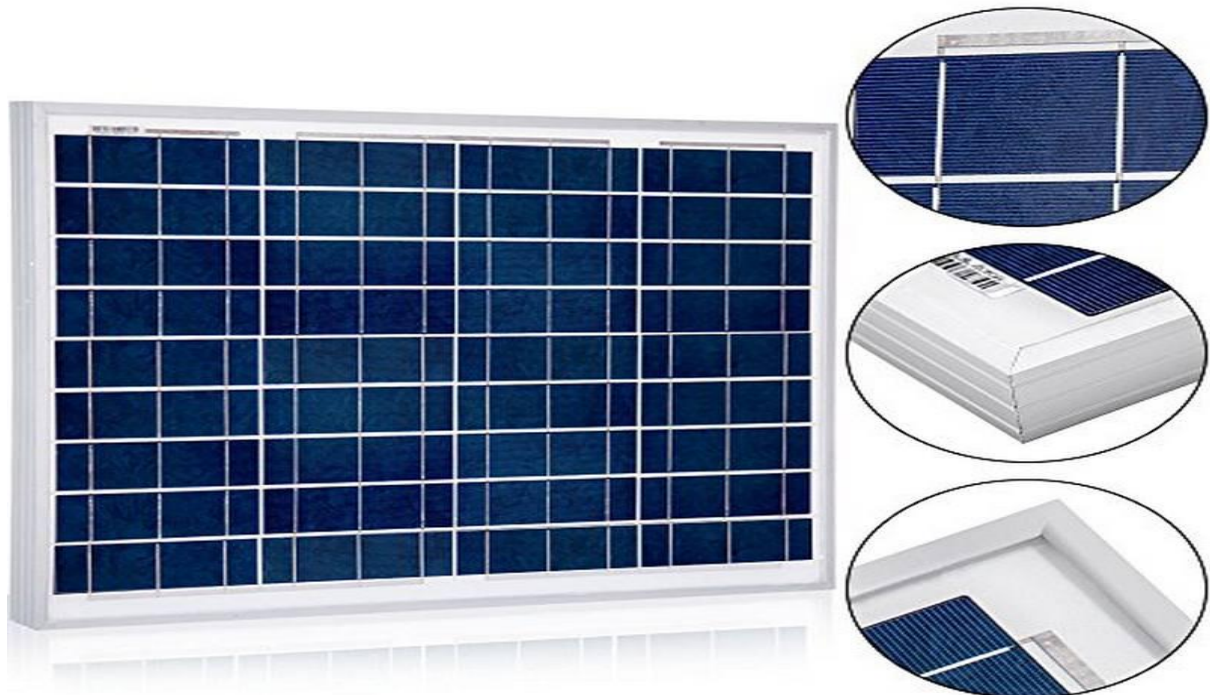
(πηγή: <http://furnitureanddecomy.com/>)

Η μεγαλύτερη απόδοση μονοκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού στο εμπόριο έχει κατασκευαστεί από την SunPower και είναι το μοναδικό που έχει τις μεταλλικές επαφές στο πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού ώστε να έχει μεγαλύτερη επιφάνεια ηλιακής ακτινοβολίας. Ο βαθμός απόδοσης της συγκεκριμένης εγκατάστασης φτάνει το 18,5%.

Η σχέση απόδοσης με την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού είναι υψηλή ενώ έχει υψηλότερο κόστος παραγωγή από τα πολυκρυσταλλικά. Η τεχνολογίες παραγωγής των μονοκρυσταλλικών βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου. Τέτοιοι μέθοδοι είναι η Czochralski (CZ) και η float zone (FZ).

4.2.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων πολυκρυσταλλικού πυριτίου στην βιομηχανία είναι μικρότερη από το μονοκρυσταλλικό και κυμαίνεται 13-15% ενώ σε εργαστήριο η απόδοση έχει φτάσει έως και 20%. Το πάχος τους είναι 0,3 χιλιοστά [5].



Σχήμα 4.3 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου

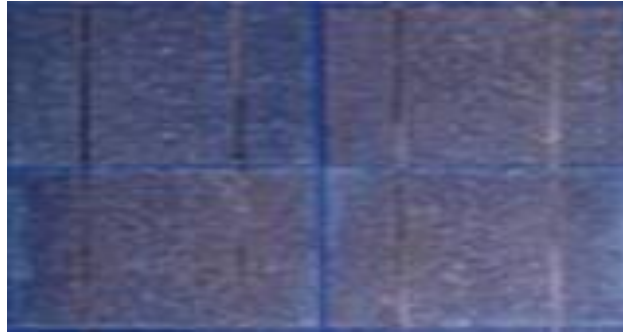
(πηγή: <https://www.newegg.com/acopower-hy050-12p-solar-panels/p/2NZ-0021-00008>)

Όμως η μέθοδος παραγωγής είναι πιο οικονομική με σχέση τα μονοκρυσταλλικά όπως και η τιμή που είναι λίγο φθηνότερη. Οι σημαντικότερες τεχνολογίες παραγωγής των πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι η απευθείας στερεοποίηση *directional solidification* (DS), η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC και η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου

Στα φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου παρατηρούνται οι επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές. Από το μέγεθος των μονοκρυσταλλικών περιοχών εξαρτάται ανάλογα και η απόδοση των πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών.

4.2.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων ταινίας πυριτίου στην βιομηχανία υπολογίζεται 12-13% και εργαστήριο έως και 28%. Το πάχος και αυτών είναι 0,3 χιλιοστά [5].



Σχήμα 4.4 Φωτοβολταϊκό ταινίας πυριτίου

(πηγή: https://selasenergy.gr/fv_systems.php)

Είναι μια τεχνολογία της Evergreen Solar όπου μειώνει στο μισό την χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους που αναφερθήκαμε στα φωτοβολταϊκά συστήματα πυριτίου μεγάλου πάχους.

4.3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΛΕΠΤΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ

4.3.1 Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων με δισεληνοϊνδιούχο χαλκό κυμαίνεται στο 11%, ωστόσο ο δισεληνοϊνδιούχος χαλκός έχει μεγάλη απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως. Σε εργαστηριακό μέρος η απόδοση έχει φτάσει έως 18,8% και είναι η μεγαλύτερη απόδοση σε φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών επιστρώσεων[5].



Σχήμα 4.5 Φωτοβολταϊκό από δισεληνοϊνδιούχο χαλκό

(πηγή: <https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/solarmodule/cigs>)

Η τιμή τους είναι υψηλή όμως με την πάροδο του χρόνου περιμένουμε την μείωση της. Μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη απόδοση με προσθήκη γαλλίου CIGS όμως το ίνδιο είναι περιορισμένο στην φύση.

4.3.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου

Πρόκειται για καινούργια σχετικά τεχνολογία όπου απόδοση της είναι στο 6-8% χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά thin films πυριτίου, εργαστηριακά η απόδοση έχει διπλασιαστεί και φτάνει 14%. Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0,0001 χιλιοστά και το υπόστρωμα 1-3 χιλιοστά [5].



Σχήμα 4.6 Φωτοβολταϊκό άμορφου πυριτίου

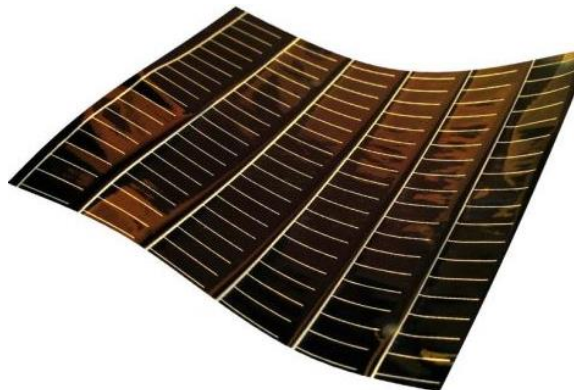
(πηγή: https://selasenergy.gr/fv_systems.php#bookmark7)

Αποτελεί μία οικονομική εγκατάσταση διότι χρησιμοποιείται μικρή ποσότητα πυριτίου και στο υπόστρωμα υποστήριξης όπου τοποθετούν γυαλί ή αλουμίνιο που πρόκειται για οικονομικά υλικά.

Πλεονέκτημα της εγκατάστασης είναι ότι δεν επηρεάζεται από υψηλές εγκαταστάσεις και ότι αποδίδει καλύτερα από κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά σε διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά). Φυσικά μειονεκτεί από τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στην παραγωγή έργου όπου χρειάζεται διπλάσια επιφάνεια για να παράγει ίσο έργο με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά.

4.3.3 Τελουριούχο κάδμιο (CdTe)

Το τελουριούχο κάδμιο κατασκευάζεται κυρίως από τη First Solar και αποδίδει 6-8% ενώ εργαστηριακά έχει αγγίξει το 16% [5].



Σχήμα 4.7 Τελουριούχο κάδμιο (CdTe)

(πηγή: <https://phys.org/news/2011-06-efficiency-flexible-cdte-solar-cell.html>)

Είναι μια τεχνολογία που έχει ενεργειακό διάκενο περίπου 1eV όπου βρίσκεται πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα. Με αυτό το τρόπο εισάγει σχεδόν ολόκληρη την προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Ένας σημαντικός λόγος που αποτρέπει την χρήση τους είναι ότι το κάδμιο έχει ενοχοποιηθεί ως καρκινογόνο, κάτι που έχει κάνει και την Greenpeace να εναντιωθεί [5].

4.3.4 Αρσενικούχο γάλλιο (GaAs)

Το γάλλιο είναι ένα παραπροϊόν της ρευστοποίησης άλλων μετάλλων, όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Είναι πιο σπάνιο ακόμα και από τον χρυσό. Το αρσενικό δεν είναι σπάνιο αλλά έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες. Το αρσενικούχο γάλλιο έχει ενεργειακό διάκενο 1,43 eV που είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η απόδοσή του στη μορφή πολλαπλών ενώσεων (multijunction) είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29%. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αρσενικούχου γαλλίου (GaAs) είναι ακόμα εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες, γεγονός που σχεδόν επιβάλλει τη χρήση τους σε εφαρμογές ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων (solar concentrators). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs έχουν το πλεονέκτημα ότι αντέχουν σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας και σε συνδυασμό με την υψηλή τους απόδοση τα καθιστούν κατάλληλα για διαστημικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος [5].

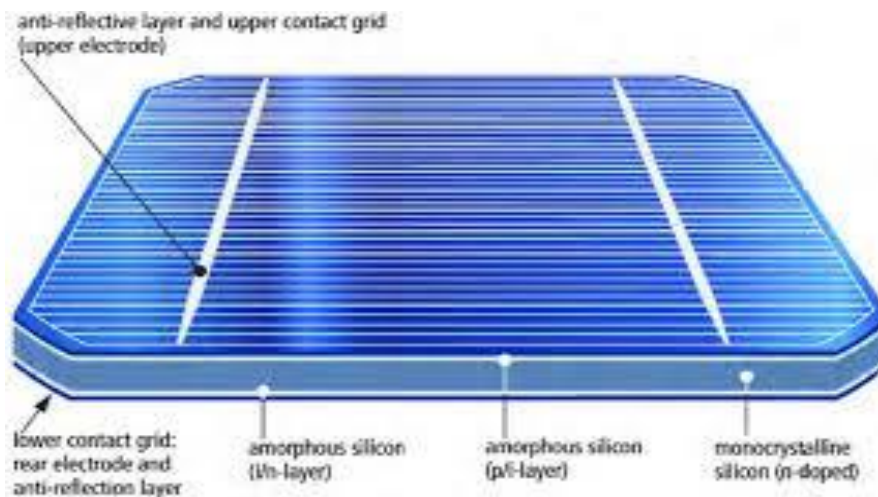


Σχήμα 4.8 Αρσενικούχο γάλλιο (GaAs)

(πηγή: <http://www.energotechniki.gr/site/xpage.asp?sid=96&page=services2>)

4.4 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΑ

Πρόκειται για μια κατηγορία φωτοβολταϊκών στοιχείων HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer). Η απόδοσή τους φτάνει το 17,2% σε εμπορικές εφαρμογές, ενώ χρειάζεται λιγότερη επιφάνεια για να υπάρξει ίδια εγκατεστημένη ισχύ, όμοια φωτοβολταϊκά η απόδοσή τους φτάνει το 19,7% [5].



Σχήμα 4.9 Πολυστρωματικό φωτοβολταϊκό

(πηγή: Λιανός Ι., 2012 “Διαστασιολόγηση Φωτοβολταϊκού Πάρκου Ισχύος 500 kWp με χρήση trackers”)

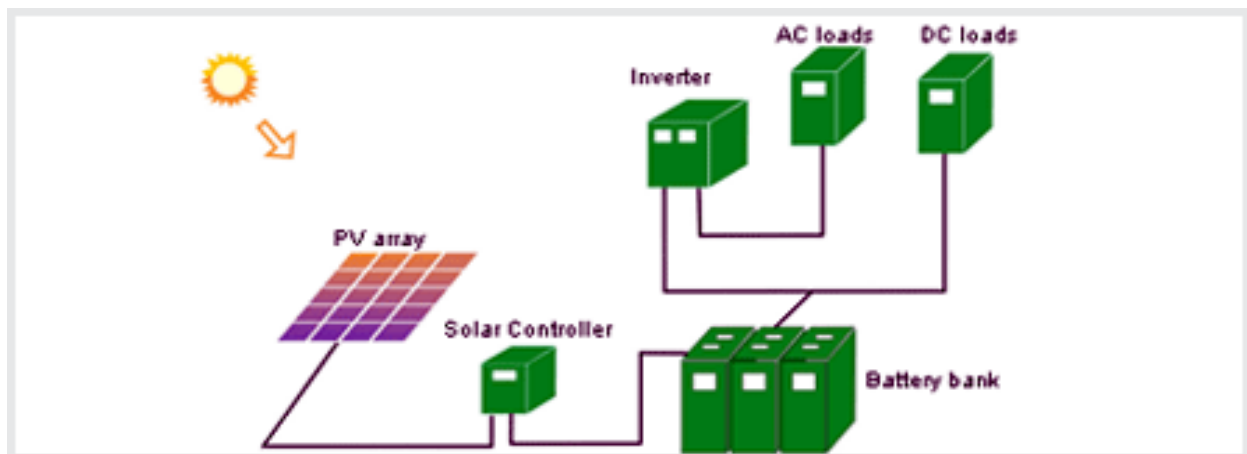
Κατασκευάζονται από την Sanyo Solar και έχουν δύο στρώσεις άμορφο πυριτίου και ανάμεσά τους υπάρχει άλλη μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

Η τιμή του είναι υψηλότερη από τα συμβατικά φωτοβολταϊκά διότι έχει μεγάλη απόδοση στην διαχεόμενη ακτινοβολία και έχουν υψηλή απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες.

5 ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ρεύματος) ονομάζονται εκείνα τα συστήματα ηλεκτροδότησης που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από τον ήλιο (φωτοβολταϊκά πλαίσια) ή τον άνεμο (ανεμογεννήτρια) και την αποθηκεύουν σε συσσωρευτές (μπαταρίες), χωρίς απαραίτητα (μπορούν να παραμείνουν και συνδεδεμένα με το δημόσιο δίκτυο) να συνδέονται με το δημόσιο δίκτυο ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) παρέχοντας ενεργειακή αυτονομία με τη βοήθεια φωτοβολταϊκών [8].

Τα συστήματα αυτόνομης ηλεκτροδότησης μπορούν να είναι και υβριδικά στην περίπτωση που συνεργάζονται και με άλλες πηγές ενέργειας όπως ένα μικρό υδροηλεκτρικό, μια ανεμογεννήτρια ή ακόμη και ένα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος.



Σχήμα 5.1 Σχεδιάγραμμα Αυτόνομου Φωτοβολταϊκού Συστήματος

(πηγή: <https://selasenergy.gr/autonomous.php>)

Τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούνται από:

- φωτοβολταϊκά πλαίσια
- συσσωρευτές
- ρυθμιστής φόρτισης
- αντιστροφέας (dc/ac)
- ασφάλειες
- διακόπτες dc
- όργανα μέτρησης χωρητικότητας συσσωρευτών

Διασυνδεδεμένο σύστημα (ανταλλάσσει ενέργεια με το δίκτυο της ΔΕΗ)

Το διασυνδεδεμένο σύστημα σύστημα πουλάει στην ΔΕΗ την ηλιακή ενέργεια που παράγει σε μια ορισμένη τιμή και για τις ανάγκες του αγοράζει από την ΔΕΗ ρεύμα στην

καθορισμένη τιμή. Για αυτό το λόγο γίνεται καταμέτρηση της εισερχόμενης και της εξερχόμενης ηλιακής ενέργειας με διπλό μετρητή [9].

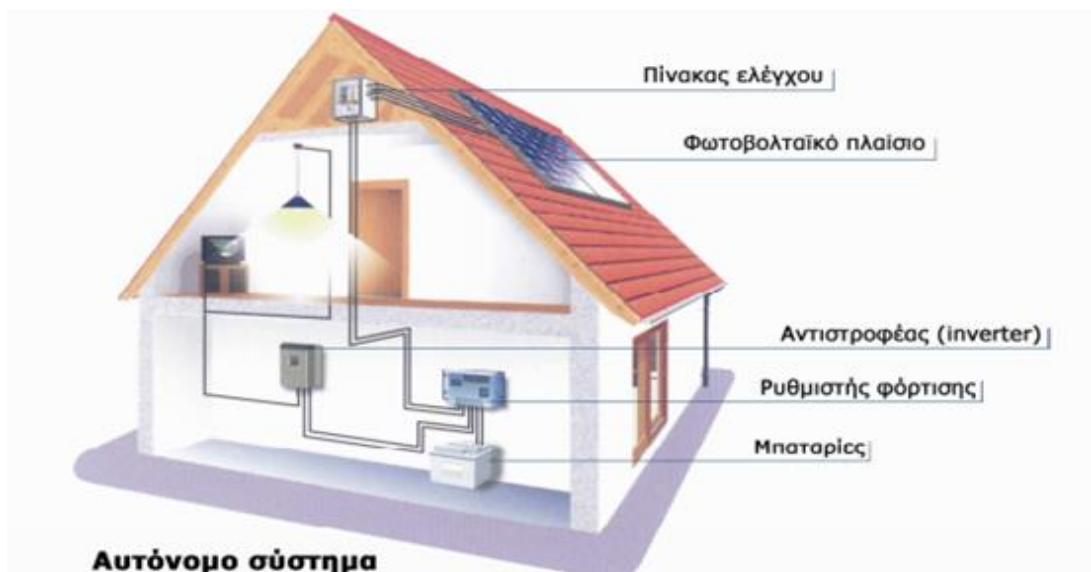


Σχήμα 5.2 Διασυνδεδεμένο σύστημα

(πηγή: <https://www.homesolar.gr/autonoma-fotovoltaika-systimata/>)

Αυτόνομο Σύστημα

Αντιθέτως το αυτόνομο σύστημα ικανοποιεί τις ενεργειακές ανάγκες με το ρεύμα που παράγει η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση. Για αυτό η εγκατάσταση περιλαμβάνει συσσωρευτές ώστε να αποθηκεύεται η περίσσεια ενέργεια για την χρησιμοποίηση της όταν οι ανάγκες για ηλιακή ενέργεια είναι υψηλότερες από την παραγόμενη ηλιακή ενέργεια [9].



Σχήμα 5.3 Αυτόνομο Σύστημα

(πηγή: <https://www.homesolar.gr/autonoma-fotovoltaika-systimata/>)

5.1 ΑΠΟΔΟΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού μόνο τα φωτόνια τα οποία έχουν συγκεκριμένο μήκος κύματος (ή συχνότητα) μπορούν να ενεργοποιήσουν τα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού. Τα φωτόνια με μικρή κινητική ενέργεια δεν συμμετέχουν στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, ενώ τα φωτόνια με μεγάλη κινητική ενέργεια εισέρχονται στον ημιαγωγό με ένα μέρος της ακτινοβολίας να ανακλάται στην επιφάνεια του. Κάθε φωτόνιο μπορεί να ενεργοποιήσει μονάχα ένα ηλεκτρόνιο. Από την άλλη μεριά, η περίσσεια κινητική ενέργεια των φωτονίων μεταφέρεται στα απελευθερωθέντα ηλεκτρόνια και μετατρέπεται σε θερμότητα που αυξάνει τη θερμοκρασία του υλικού.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου έχουν τη μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων. Ο βαθμός αυτός σε ιδανικές συνθήκες προσεγγίζει το 24%, ενώ σε πειραματικές δοκιμές ο βαθμός απόδοσης έχει φτάσει έως και 22%. Στην πραγματικότητα ο βαθμός αυτός μπορεί να κυμανθεί έως και το 15%. Οι βασικοί παράγοντες απωλειών ενέργειας εξαιτίας των οποίων η ηλιακή ακτινοβολία δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό σε ένα φωτοβολταϊκό είναι:

- τα υπερ-ενεργητικά και τα υπό-ενεργητικά φωτόνια,
- οι εσωτερικές απώλειες της κυψέλης
- το σχήμα των κυψελών και οι αντανάκλασεις στην επιφάνεια του.

Όλες αυτές οι απώλειες υπολογίζονται σε ένα ποσοστό της τάξεως του 82%.

5.2 ΓΩΝΙΑ ΚΛΙΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία παράγουν ισχύ χάρις την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού. Η ηλιακή ακτινοβολία, όμως, παράγεται από τον ήλιο ο οποίος μεταβάλλει την θέση του ως την επιφάνεια της γης. Για αυτό το λόγο αυτό, πολλές εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών (όπως και αυτή που θα μελετηθεί στην παρούσα εργασία) δεν είναι σταθερές αλλά με την βοήθεια μιας μεταλλικής βάσης, δίνεται η δυνατότητα μέσω ενός ηλεκτρικού μοτέρ να αλλάζει η κλίση των φ/β πλαισίων ως προς την ζενιθιακή γωνία (θ_z). Συνήθως όμως, οι περισσότερες εγκαταστάσεις λόγω δυσκολιών κατασκευής αλλά και κόστους εγκαθίστανται με σταθερή γωνία κλίσης. Ως εκ τούτου, έχει μελετηθεί ποια είναι η κατάλληλη γωνία ανά μήνα, δηλαδή ποια γωνία επιτυγχάνει όσο το δυνατόν κάθετη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας στο φωτοβολταϊκό ανά μήνα. Για την Ελλάδα οι προτεινόμενες βέλτιστες κλίσεις φ/β πλαισίων ανά μήνα αναφέρονται στον πίνακα 5.1, όπου "φ" γεωγραφικό πλάτος της περιοχής.

Πίνακας 5.1 Βέλτιστες κλίσης φ/β πλαισίων ανά μήνα για την Ελλάδα

Μήνας	Γωνία τοποθέτησης	Μήνας	Γωνία τοποθέτησης
Ιανουάριος	$\varphi+29^{\circ}$	Ιούλιος	$\varphi-24^{\circ}$
Φεβρουάριος	$\varphi+18^{\circ}$	Αύγουστος	$\varphi-10^{\circ}$
Μάρτιος	$\varphi+3^{\circ}$	Σεπτέμβριος	$\varphi-2^{\circ}$
Απρίλιος	$\varphi-10^{\circ}$	Οκτώβριος	$\varphi+10^{\circ}$
Μάιος	$\varphi-22^{\circ}$	Νοέμβριος	$\varphi+23^{\circ}$
Ιούνιος	$\varphi-25^{\circ}$	Δεκέμβριος	$\varphi+30^{\circ}$

Σε περίπτωση που θέλουμε να επιλέξουμε μια σταθερή γωνία για ολόκληρο το έτος, τοποθετούμε την εγκατάσταση σε γωνία κλίσης $\beta \approx \varphi + 15^{\circ}$.

6 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Η εργαστηριακή εγκατάσταση βρίσκεται στην οροφή του εργαστηρίου των Ήπιων Μορφών Ενέργειας (Η.Μ.Ε.) στην Πανεπιστημιούπολη Άλσους Αιγάλεω του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Έχει δημιουργηθεί με πρωτοβουλία του Δρ. Πέτρου Αξαόπουλου.



Σχήμα 6.1 Πειραματική εγκατάσταση από την online κάμερα

Αποτελείται από 4 μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πλαίσια των 20 Watt των οποίων οι προδιαγραφές αναφέρονται στον Πίνακα Ι, και τα απαραίτητα καλώδια σύνδεσης.

Πίνακας 6.Ι Προδιαγραφές του φωτοβολταϊκού πλαισίου

Τάση μέγιστης ισχύος	V_{mp}	17,82 V
Ένταση ρεύματος μέγιστης ισχύος	I_{mp}	1,14 A
Τάση ανοιχτού κυκλώματος	V_{oc}	21,96 V
Ρεύμα βραχυκυκλώσεως	I_{sc}	1,27 A
Εσωτερική αντίσταση φωτοβολταϊκού	R_s	0,359 Ohm
Θερμοκρασιακός συντελεστής της V_{oc}	$\mu_{V_{oc}}$	-0,0736 V/°C
Θερμοκρασιακός συντελεστής μέγιστης ισχύος	μ_{mp}	-0,0042 V/°C
Κανονική θερμοκρασία λειτουργίας στοιχείου	NOCT	44,4±2 °C
Διαστάσεις	$\alpha \times \beta$	662mm x 229 mm

Τα φ/β πλαίσια είναι τοποθετημένα σε μια μεταλλική βάση, που δίνει την δυνατότητα μέσω ενός ηλεκτρικού μοτέρ να αλλάζει η κλίση των φ/β πλαισίων ως προς την ζενιθιακή γωνία (θ_z). Η δυνατότητα κίνησης της εγκατάστασης είναι από $(0 - 90)^\circ$ με βήμα 1° στον άξονα Βορράς-Νότος.


Παρέχεται επίσης η δυνατότητα σκίασης, με ένα σκίαστρο το οποίο λειτουργεί με ένα ηλεκτρικό μοτέρ. Το ηλεκτρικό αυτό μοτέρ απλώνει και μαζεύει, ένα πανί πάνω στην επιφάνεια του φ/β πλαισίου, όποτε ο χρήστης επιθυμεί. Με αυτό τον τρόπο ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί μετρήσεις και σε κατάσταση σκίασης.

Ακόμα η εγκατάσταση διαθέτει 2 αισθητήρες θερμοκρασίας, ο πρώτος στο πίσω μέρος ενός φ/β πλαισίου μετράει την θερμοκρασία φωτοβολταϊκού στοιχείου ενώ ο δεύτερος μετράει την θερμοκρασία περιβάλλοντος.

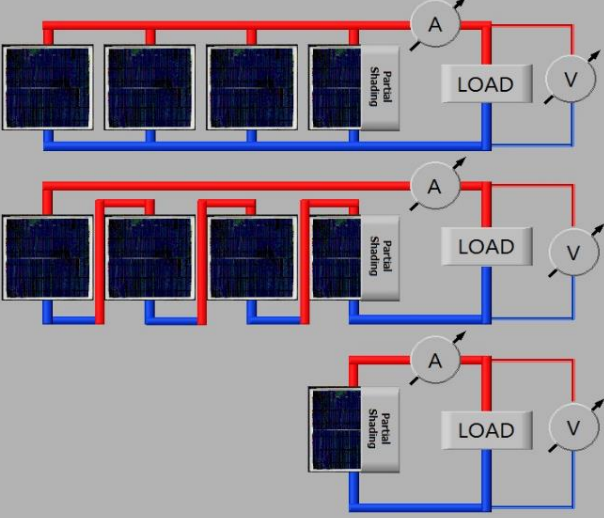
Επιπρόσθετα για τις εργαστηριακές μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας, η εγκατάσταση διαθέτει ένα πυρανόμετρο το οποίο βρίσκεται τοποθετημένο πάνω στη μεταλλική βάση, και σε ίδια κλίση με τα φ/β πλαίσια. Η αρχή λειτουργίας του πυρανόμετρου είναι η παρακάτω: Ένας ψηφιακός μετρητής μετατρέπει τη θερμότητα που αναπτύσσεται πάνω στον αισθητήρα του πυρανόμετρου, σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2).

Η εγκατάσταση διαθέτει απομακρυσμένη πρόσβαση μέσω του διαδικτύου. Στον ιστότοπο <http://alioslab.stef.teiath.gr/WebaliosConfig1.htm> παρέχεται και η δυνατότητα ζωντανής παρακολούθησης της εγκατάστασης μέσω κάμερας που είναι τοποθετημένη απέναντι της (Σχήμα 6.1). Για την διεξαγωγή των εργαστηριακών ασκήσεων η εγκατάσταση μπορεί να συνδεθεί σε σειρά, παράλληλα αλλά και μόνο σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο μέσω του διαδικτύου (Σχήμα 6.2). Οι τρεις συνδεσμολογίες μπορούν να επιλεγτούν από τον χρήστη και υπό σκίαση αναλόγως τις απαιτήσεις της εργαστηριακής άσκησης.

The Alios Lab Project

 [Click here for a camera view of the solar panels on the rooftop of our lab!](#)

Choose between the three connection arrangements and shading option:



- Parallel
- Parallel Partly Shaded
- Series
- Series Partly Shaded
- Single
- Single Partly Shaded

[Return back](#)

Σχήμα 6.2 Συνδεσμολογίες εγκατάστασης μέσω διαδικτύου

(πηγή: <http://alioslab.stef.teiath.gr/WebaliosConfig1.htm>)

Τέλος να αναφέρουμε πως η συγκεκριμένη εγκατάσταση χρησιμοποιείται από ξένα πανεπιστήμια λόγω της απομακρυσμένης δυνατότητας μετρήσεων που δίνει μέσω του διαδικτύου, καθώς η χώρας μας φημίζεται για την υψηλή ηλιακή ακτινοβολία.

7 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 1 - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΕΞΟΔΟΥ

7.1 ΣΤΟΧΟΣ

Ο στόχος αυτής της εφαρμογής είναι να μάθουν οι φοιτητές να υπολογίζουν την πραγματική μέγιστη ισχύ εξόδου ενός φ/β πλαισίου PV και να συγκρίνει το αποτέλεσμα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Με αυτόν τον τρόπο οι φοιτητές θα είναι σε θέση να κατανοήσουν τον αντίκτυπο παραγόντων που επηρεάζουν την πραγματική απόδοση του PV φ/β πλαισίου ακόμα και υπό συνθήκες υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας.

7.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γνωστό ότι οι προδιαγραφές του κατασκευαστή για τα PV φ/β πλαίσια δίνονται υπό ιδανικές εργαστηριακές συνθήκες και η πραγματική μέγιστη ισχύς εξόδου επηρεάζεται από έναν μεγάλο αριθμό παραγόντων. Κάποιοι από αυτούς τους παράγοντες είναι: οι βρομιές, το νερό και/ή το χιόνι, η θερμοκρασία, η αναντιστοιχία των φ/β πλαισίων και/ή γήρανση του φ/β πλαισίου. Συγκεκριμένα η γήρανση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι ένα αναπόφευκτο πρόβλημα των σημερινών PV φ/β πλαισίων. Η απομακρυσμένη πειραματική εγκατάσταση προσφέρει στους φοιτητές την δυνατότητα να αναγνωρίσουν τις αιτίες της μείωσης απόδοσης, π.χ. λόγω της γήρανσης του φ/β πλαισίου, ωμικές αντιστάσεις και/ή δυσχερείς κλιματικές συνθήκες (π.χ. βροχή).

Η τάση στο σημείο της μέγιστης ισχύος είναι γνωστή, κατα συνέπεια, η ισχύς στο σημείο της μέγιστης ισχύος P_{mp} επηρεάζεται από την θερμοκρασία λειτουργίας T_c και μπορεί να θεωρηθεί ότι αλλάζει γραμμικά με τον θερμοκρασιακό συντελεστή της ισχύος στο σημείο μέγιστης ισχύος μ_{mp} .

$$P_{mp} = P_{mp,r} \frac{G_T}{G_{T,r}} [1 - \mu_{mp} * (T_c - T_{c,r})] \quad (7.2.1)$$

Όπου

- $P_{mp,r}$: η ισχύς στο σημείο μέγιστης ισχύος
- $G_{T,r}$: η ηλιακή ακτινοβολία
- $T_{c,r}$: η θερμοκρασία λειτουργίας στις συνθήκες αναφοράς αντίστοιχα
- G : η ακτινοβολία στο σημείο μέγιστης ισχύος.

Οι συνθήκες αναφοράς (STC) ορίζονται ως: ηλιακή ακτινοβολία ίση με $1 \frac{kW}{m^2}$, θερμοκρασία στοιχείου ίση με $25 \text{ }^\circ\text{C}$ και φασματική κατανομή που αντιστοιχεί σε μάζα αέρα ίση με 1,5. Οι προδιαγραφές του εργαστηριακού φ/β πλαισίου φαίνονται στον [Πίνακα 6.1](#).

Παρά τον μεγάλο αριθμό εξισώσεων στην βιβλιογραφία που εκφράζουν την εξάρτηση της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου ενός φ/β πλαισίου από την θερμοκρασία, η εξίσωση (7.2.1) έχει αναγνωριστεί από πολλούς ερευνητές λόγω της ακρίβειας της και της καλής προσέγγισης με τα πειραματικά δεδομένα και ιδιαίτερα λόγω της απλότητας της. Για αυτό, η παραπάνω εξίσωση ενδείκνυται για εκπαιδευτικές εφαρμογές.

7.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Όταν το σύστημα είναι σε θέση να εκτελέσει μέτρηση, οι φοιτητές εισάγουν την επιθυμητή γωνία κλίσης στο πλαίσιο εισόδου λογισμικού και το σύστημα ρυθμίζει αυτόματα την κλίση της φωτοβολταϊκής μονάδας στην επιθυμητή γωνία. Αυτή την διαδικασία μπορεί να την παρακολουθούν ζωντανά από την απευθείας σύνδεση που έχει ο ιστότοπος με την κάμερα που βρίσκεται στην εγκατάσταση. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία εμφανίζεται στην οθόνη η πειραματική χαρακτηριστική καμπύλη P-I και ένα αρχείο σε μορφή txt όπου περιέχει τις μετρήσεις. Οι μετρήσεις αυτές θα πρέπει να επεξεργαστούν από τους φοιτητές σύμφωνα με τις απαιτήσεις της άσκησης.

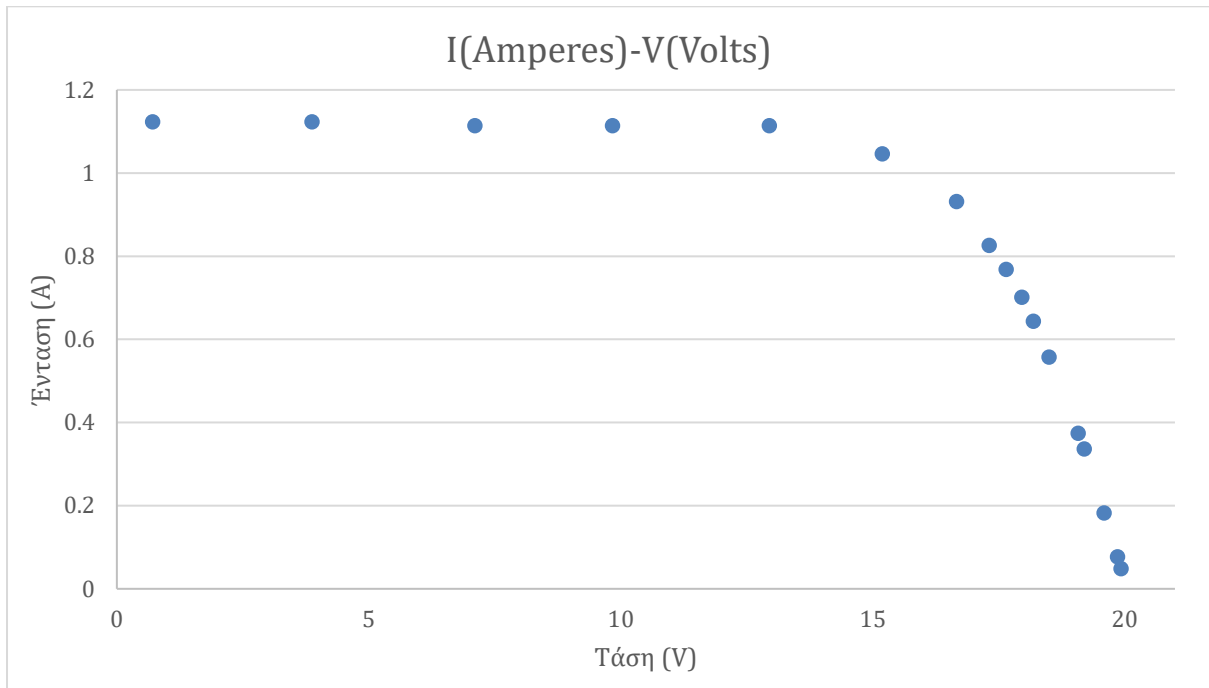
Οι φοιτητές αναμένεται να υπολογίσουν τη μέγιστη ισχύ εξόδου της εγκατάστασης σύμφωνα με τις μετρήσεις που πήραν και να την συγκρίνουν με την θεωρητική μέγιστη ισχύ εξόδου της μονάδας υπό τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας, σύμφωνα με την εξίσωση (7.2.1). Αναμένεται ότι η πραγματική ισχύ εξόδου της εγκατάστασης θα είναι χαμηλότερη από την πειραματική, η διαφορά αυτή οφείλεται στην γήρανση της φωτοβολταϊκής μονάδας σε συνθήκες καθαρού ουρανού.

7.4 ΛΥΣΗ

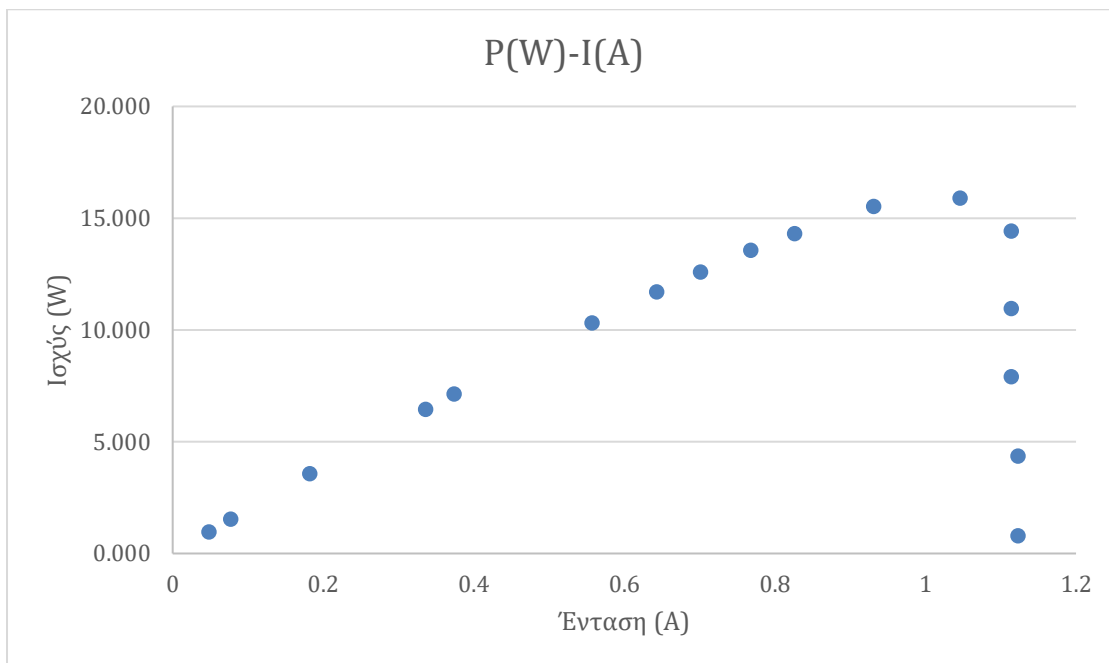
Οι Μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν βρίσκονται στον παρακάτω σύνδεσμο: [d05-m06-y2018_h12m13s13.txt](#) 05-Jun-2018 12:13 1Κ

Πίνακας 7.1 Πειραματικές μετρήσεις εγκατάστασης για απόδοση φωτοβολταϊκού στοιχείου

α/α	V(V)	I(A)	Ηλιακή Ακτινοβολία (W/m ²)
1	0,708	1,123	872,236
2	3,876	1,123	872,236
3	7,104	1,114	872,236
4	9,84	1,114	872,236
5	12,948	1,114	872,236
6	15,192	1,046	872,236
7	16,668	0,931	872,236
8	17,316	0,826	872,236
9	17,652	0,768	872,236
10	17,964	0,701	872,236
11	18,192	0,643	872,236
12	18,504	0,557	872,236
13	19,2	0,336	872,236
14	19,596	0,182	872,236
15	19,86	0,077	872,236
16	19,08	0,374	872,236
17	19,932	0,048	871,468



Σχήμα 7.1 Τάση που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό συναρτήσει της έντασης του ρεύματος που παράγεται



Σχήμα 7.2 Παραγόμενη ισχύς από ένα φωτοβολταϊκό συναρτήσει της έντασης του ρεύματος

Μέγιστη ισχύς εξόδου πειραματική = 15,891 W

Υπολογισμός θεωρητικής μέγιστης ισχύος εξόδου σύμφωνα με την εξίσωση (7.2.1)

$$P_{mp} = P_{mp,r} \frac{G_T}{G_{T,r}} [1 - \mu_{mp} * (T_c - T_{c,r})] \Rightarrow P_{mp} = 20,315 \frac{872,236}{1000} [1 + 0,0042 * (54,4 - 25)] \Rightarrow P_{mp} = 19,907 \text{ W} \quad (7.4.1)$$

$$\text{Διαφορά μέγιστης θεωρητικής με την μέγιστη πειραματική ισχύ εξόδου} = 19,907 \text{ W} - 15,891 \text{ W} = 4,016 \text{ W} \quad \text{ή} \quad \frac{4,016}{19,907} \cdot 100 = 20,17 \% \quad (7.4.2)$$

Μείωση της μέγιστης πειραματικής ισχύος σε σχέση με τη μέγιστη θεωρητική.

7.5 ΣΧΟΛΙΑ

Η διαφορά που παρατηρείται μεταξύ της πειραματικής μέγιστης ισχύος εξόδου και της θεωρητικής μέγιστης ισχύος εξόδου, όπως αυτή υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση (7.2.1) οφείλεται κυρίως στην γήρανση του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Καταλήγουμε σε αυτό το συμπέρασμα γιατί προσπαθήσαμε να εξαλείψουμε στο μέτρο του δυνατού παράγοντες όπως η σκόνη στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού που θα μπορούσε να μειώσει την απόδοση του και επιλέξαμε μια χρονική στιγμή που είχαμε σχετικά σταθερή ηλιακή ακτινοβολία. Η διαφορά που παρατηρήθηκε είναι της τάξεως του 20 %, μέγεθος που είναι σημαντικά μεγάλο δεδομένου ότι αναφέρεται μόνο σε απώλειες λόγω γήρανσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Η γήρανση των φωτοβολταϊκών στοιχείων οφείλεται κυρίως σε δύο παράγοντες:

- τις φυσικές καιρικές συνθήκες
- την γήρανση λόγω εξωτερικών παραγόντων.

Το φαινόμενο της γήρανσης ακολουθεί τα παρακάτω στάδια: τον αρχικό εκφυλισμό, στη συνέχεια ακολουθούν τα πρώτα σημάδια γήρανσης και ακολούθως το φαινόμενο κλιμακώνεται με την σταδιακά επιταχυνόμενη γήρανση με αριθμητική ή γεωμετρική πρόοδο. Οι εξωτερικοί παράγοντες που επηρεάζουν το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι η μερική σκίαση (λόγω της προσκείμενης βλάστησης ή άλλων αντικειμένων που βρίσκονται κοντά, η βρομιά ή η σκόνη και οι ακαθαρσίες των πτηνών), οι καιρικές συνθήκες (υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος, υψηλή ηλιακή ακτινοβολία και μικρά μήκη κύματος UV ακτινοβολίας, η βροχή και ο άνεμος). Οι εξωτερικοί παράγοντες αυτοί οδηγούν σε αποχρωματισμό και εισχώρηση υγρασίας στο φωτοβολταϊκό. Επίσης εσωτερικοί παράγοντες όπως ελαττώματα ή ακαθαρσίες στην κρυσταλλική δομή καθώς και οι μικρορωγμές και οι μικροατέλειες που εμφανίζονται κατά την διαδικασία της κατασκευής δημιουργούν παρα διακλαδώσεις στη ροή του ρεύματος. Ένας συνδυασμός των παραπάνω παραγόντων προκαλούν το φαινόμενο της γήρανσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

8 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 2 - ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ I-V

8.1 ΣΤΟΧΟΣ

Ο στόχος αυτής της εφαρμογής είναι να μάθουν οι φοιτητές να εξάγουν τις πραγματικές καμπύλες I-V ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου και να τις συγκρίνουν με αυτές που δίνει ο κατασκευαστής.

8.2 ΚΑΜΠΥΛΗ I-V ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Για το σχηματισμό της καμπύλης I-V χρειάζεται να υπάρχει σταθερή ηλιακή ακτινοβολία και θερμοκρασία και μεταβαλλόμενη αντίσταση κυκλώματος ώστε να παρθεί ένα σετ μετρήσεων τάσης ρεύματος. Όταν το κύκλωμα είναι ανοιχτό το ρεύμα μηδενίζεται και η τάση παίρνει τη μέγιστη τιμή V_{OC} ενώ όταν το κύκλωμα είναι βραχυκυκλωμένο έχουμε την μέγιστη ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος I_{sc} γνωστή ως ρεύμα βραχυκυκλώσεως.

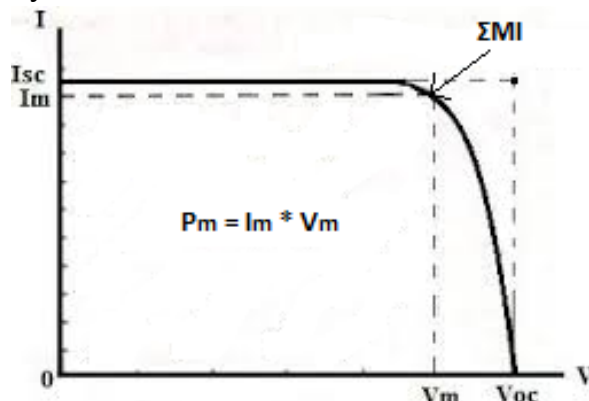
Η τάση και το ρεύμα μεταβάλλεται με την μεταβολή της αντίστασης του κυκλώματος και οι μεταβολές αυτές αποτυπώνονται στην καμπύλη I-V του σχήματος [8.1](#). Η ισχύς του κυκλώματος ορίζεται ως P και υπολογίζεται από τη σχέση

$$P = I * V \quad (8.2.1)$$

Με:

- I ένταση ρεύματος με μονάδα μέτρησης Ampere (A)
- V τάση με μονάδα μέτρησης Volt (V).

Το μέγιστο παραλληλόγραμμο που εμφανίζεται μέσα από την καμπύλη I-V και έχει πλευρές I_m , V_m είναι το σημείο που ονομάζεται σημείο μέγιστης ισχύος (ΣΜΙ). Το εμβαδόν του ισούται με τη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ P_m . Ενώ το εξωτερικό παραλληλόγραμμο με πλευρές I_{sc} και V_{sc} περιγράφει την ιδανική συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού στοιχείου ως πηγή σταθερού ρεύματος.



Σχήμα 8.1 Χαρακτηριστική Καμπύλη I-V

8.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρόλο που οι κατασκευαστές παρέχουν μαζί με τα φ/β πλαίσια τους τις καμπύλες I-V για διάφορες εργαστηριακές συνθήκες, έχει αποδειχθεί ότι δεν αντιπροσωπεύουν την απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε πραγματικές συνθήκες. Μέσα από αυτή την εφαρμογή, οι φοιτητές θα μάθουν να εξάγουν την πραγματική καμπύλη I-V ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες λειτουργίας και να την συγκρίνουν με αυτήν που βρίσκουν στις τεχνικές προδιαγραφές του κατασκευαστή. Επίσης, μέσα από την προαναφερόμενη σύγκριση μεταξύ της πειραματικής καμπύλης I-V και της θεωρητικής καμπύλης I-V, οι φοιτητές θα μάθουν πως άλλοι παράγοντες επηρεάζουν την πραγματική απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Για αυτόν τον σκοπό, οι φοιτητές μπορούν να χρησιμοποιήσουν σχεδόν οποιοδήποτε λογισμικό σχεδιασμένο για επαγγελματίες που είναι ικανό να σχηματίσει την θεωρητική καμπύλη I-V χρησιμοποιώντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κατασκευαστή, ή λογισμικό παροδικής προσομοίωσης.

8.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Όταν το σύστημα είναι έτοιμο να εκτελέσει μέτρηση και ο φοιτητής εισάγει την επιθυμητή γωνία κλίσης στο κατάλληλο πλαίσιο λογισμικού, το σύστημα θα ρυθμίσει αυτόματα την κλίση της φωτοβολταϊκής μονάδας στην επιθυμητή γωνία. Αυτή η διαδικασία μπορεί να παρακολουθείτε ζωντανά από την κάμερα που υπάρχει στην εγκατάσταση μέσω της ιστοσελίδας της μονάδας. Αφού ολοκληρωθεί η δοκιμή, η πειραματική χαρακτηριστική καμπύλη P-I μαζί με ένα εξωτερικό αρχείο όπου περιέχει τις μετρήσεις εμφανίζεται στην οθόνη του υπολογιστή. Ο φοιτητής έχει την δυνατότητα να επεξεργαστεί τις μετρήσεις σύμφωνα με τις απαιτήσεις της ασκήσεις.

Αφού ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία, ο φοιτητής μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιοδήποτε λογισμικό πάνω σε φωτοβολταϊκά που είναι ικανό για να αναπτύξει τη θεωρητική καμπύλη I-V, χρησιμοποιώντας τις ίδιες συνθήκες.

Είναι προφανές πως η πειραματική καμπύλη I-V που κατασκευάστηκε από τις μετρήσεις θα είναι χαμηλότερη από την θεωρητική καμπύλη. Ο φοιτητής θα εξετάσει πως άλλοι παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν την πραγματική απόδοση μιας φωτοβολταϊκής μονάδας. Μερικοί από αυτούς τους παράγοντες είναι:

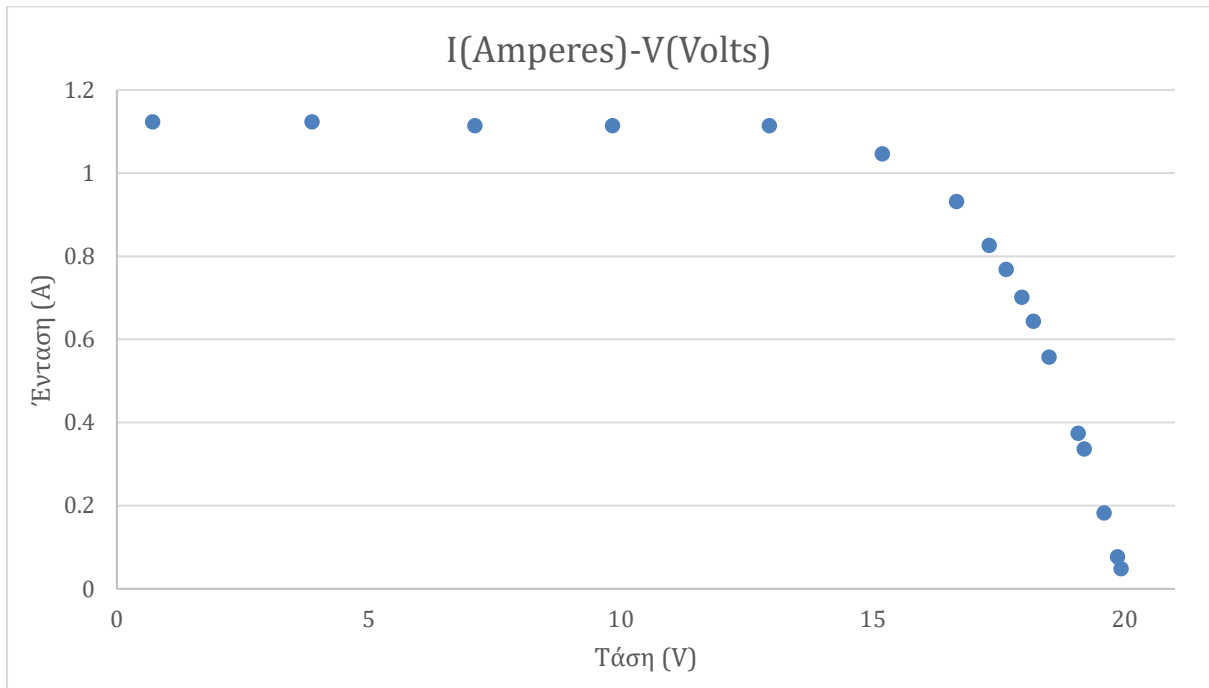
- Γήρανση φωτοβολταϊκών κελιών
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος και άνεμος
- Σκόνη και λ
- Ασυμφωνία κυττάρων
- Απώλειες καλωδίων

8.5 ΛΥΣΗ

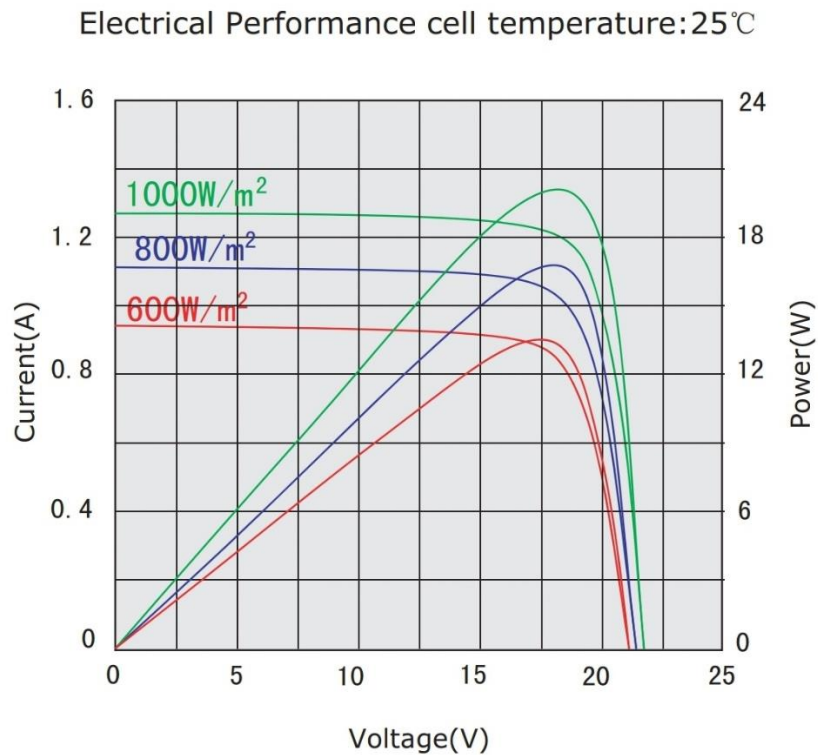
Οι Μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν βρίσκονται στον παρακάτω σύνδεσμο: [d05-m06-y2018_h12m13s13.txt](#) 05-Jun-2018 12:13 1K

Πίνακας 8.1 Πειραματικές μετρήσεις εγκατάστασης για απόδοση φωτοβολταϊκού στοιχείου

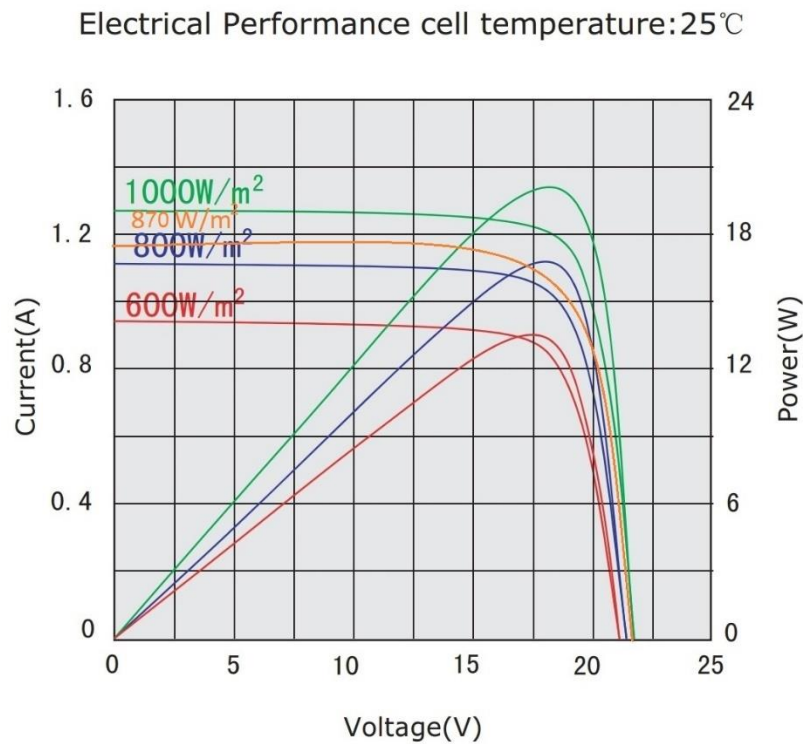
α/α	V(V)	I(A)	Ηλιακή Ακτινοβολία (W/m ²)
1	0,708	1,123	872,236
2	3,876	1,123	872,236
3	7,104	1,114	872,236
4	9,84	1,114	872,236
5	12,948	1,114	872,236
6	15,192	1,046	872,236
7	16,668	0,931	872,236
8	17,316	0,826	872,236
9	17,652	0,768	872,236
10	17,964	0,701	872,236
11	18,192	0,643	872,236
12	18,504	0,557	872,236
13	19,2	0,336	872,236
14	19,596	0,182	872,236
15	19,86	0,077	872,236
16	19,08	0,374	872,236
17	19,932	0,048	871,468



Σχήμα 8.2 Πειραματικό διάγραμμα τάσης που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό συναρτήσε της έντασης του ρεύματος που παράγεται



Σχήμα 8.3 Θεωρητικό διάγραμμα τάσης που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό συναρτήσε της έντασης του ρεύματος που παράγεται



Σχήμα 8.4 Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών καμπυλών I-V

8.6 ΣΧΟΛΙΑ

Από το [Σχήμα 8.4](#) του κατασκευαστή και το πειραματικό διάγραμμα βλέπουμε ότι για την ίδια τιμή τάσης η πειραματική ένταση είναι περίπου 8,5% μικρότερη από την θεωρητική ένταση. Κατά συνέπεια η μέγιστη ισχύς που αποδίδει πραγματικά το φωτοβολταϊκό είναι 15,891 W και όχι 17 W που προβλέπει ο κατασκευαστής ότι θα αποδώσει με ηλιακή ακτινοβολία 870 W/m².

9 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 3 - ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΥΠΟ ΣΚΙΑΣΗ

9.1 ΣΤΟΧΟΣ

Ο στόχος αυτής της εφαρμογής είναι οι φοιτητές να κατανοήσουν την επίδραση της σκίασης στην έξοδο της φωτοβολταϊκής ενέργειας, υπολογίζοντας την μέγιστη ισχύ εξόδου ενός σκιασμένου φ/β πλαισίου PV και να συγκριθεί το αποτέλεσμα με την θεωρητική ισχύ που έχει μη σκιασμένο φ/β πλαίσιο PV.

9.2 ΣΚΙΑΣΗ ΚΑΙ ΤΥΠΟΙ ΣΚΙΑΣΗΣ

Γνωρίζουμε ότι όταν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα σκιάζεται η απόδοση του πέφτει κατακόρυφα, όπως θα δούμε και στην εργαστηριακή άσκηση. Για αυτό το λόγο ιδανικό θα ήταν η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση να τοποθετείται σε μέρη με μηδενική σκίαση όσο αυτό είναι δυνατόν. Τέτοιου είδους μέρη βρίσκουμε σε αγροτικές περιοχές ώστε να υπάρχει αρκετός χώρος διαθέσιμος για την εγκατάσταση ώστε να αποφεύγεται η σκίαση.

Αντίθετα στις εγκαταστάσεις που βρίσκονται στα αστικά κέντρα υπάρχει σκίαση. Πιο συγκεκριμένα σε αυτές τις περιοχές συνήθως τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι τοποθετημένα σε στέγες όπου μερικές φορές η σκίαση είναι αναπόφευκτη.

Η σκίαση μπορεί να προέρχεται από διάφορους τύπους όπως την προσωρινή σκίαση, την προερχόμενη από την τοποθεσία ή από το κτήριο ακόμα και από το ίδιο το σύστημα.

Η προσωρινή σκίαση οφείλεται σε πολλούς παράγοντες όπως είναι η σκόνη, το χιόνι, φύλλα δέντρων, περιττώματα πουλιών και άλλοι παράγοντες. Τρόπος αποφυγής της συγκεκριμένης σκίασης είναι ο καθαρισμός του συστήματος όσο το δυνατόν συχνότερα.

Η σκίαση προερχόμενη από την τοποθεσία περιλαμβάνει το περιβάλλον και είναι αναπόφευκτη. Σημαντικό είναι ότι μπορεί να εμφανιστεί με την πάροδο των χρόνων λόγω της χλωρίδας της περιοχής (ανάπτυξη δέντρων και θάμνων). Ενώ η σκίαση προερχόμενη από το κτήριο οφείλεται στο ίδιο το κτήριο ή σε τοποθετημένα αντικείμενα στο κτήριο όπως κεραίες, καμινάδες, δορυφορικά πιάτα και άλλα. Μπορεί να αποφυγή κάποιου είδους τέτοια σκίαση με την μετακίνηση του συστήματος ή του αντικειμένου αν αυτό είναι δυνατό.

Η σκίαση προερχόμενη από το ίδιο το σύστημα οφείλεται σε μπροστινά τοποθετημένα πλαίσια, τέτοιου είδους σκίαση μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με αλλαγή της γωνίας κλίσης των πλαισίων.

9.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επίδραση σκίασης στα συστήματα PV είναι πολύ σημαντικό ζήτημα, οδηγώντας όχι μόνο σε μειωμένη ισχύ αλλά μέχρι και σε καταστροφικές επιπτώσεις, όπως πυρόλυση κυψελών και υποβάθμιση ηλιακού στοιχείου. Αυτή είναι μια κοινή κατάσταση που οφείλεται σε παρουσία βρωμιάς ή φύλλων σε ένα ηλιακό σύστημα ή σκιάς λόγω αντικειμένων όπως δέντρα, καμινάδες, τηλέφωνο ή άλλους πόρους χρησιμότητας, κεραίες, ακαθαρσίες πουλιών, αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά ή άλλα εμπόδια που μπορεί να υπάρχουν στην οροφή οποιουδήποτε κτιρίου ή και στο περιβάλλον.

Στην περίπτωση που ένα κύτταρο ηλιακού στοιχείου είναι σκιασμένο, το μέγιστο διαθέσιμο ρεύμα καθορίζεται από το σημείο που είναι λιγότερο φωτισμένο. Οπότε το σκιασμένο κύτταρο όχι μόνο παράγει λιγότερο ρεύμα από το ρεύμα που θα παράξει η μονάδα σε σειρά αλλά γίνεται αντίστροφα μεροληπτικό και διαχέει την ισχύ με τη μορφή της θερμότητας.

Μια κοινή τεχνική που χρησιμοποιείται για την εξάλειψη αυτού του αποτελέσματος είναι η χρήση διόδων bypass, τα οποία είναι συνδεδεμένα σε ένα μπλοκ από πολλά κελιά σε μια συμβολοσειρά. Στην πράξη, οι διόδοι παράκαμψης συνδέονται από κατασκευαστές μονάδων σε 16 έως 24 ηλιακά στοιχεία, προκειμένου να περιοριστεί η επίδραση της σκίασης στην ηλιακή μονάδα. Αυτό το φαινόμενο μπορεί εύκολα να παρουσιαστεί με τη χρήση του προτεινόμενου απομακρυσμένου εργαστήριου.

9.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Προκειμένου να εκτελεστεί αυτό το πείραμα, οι φοιτητές θα πρέπει να ενημερωθούν για τον τρόπο σκίασης της εγκατάστασης. Το σύστημα μπορεί να εκτελέσει σκίαση σε ένα φ/β πλαίσιο, χρησιμοποιώντας έναν αυτοματοποιημένο μηχανισμό. Η φωτοβολταϊκή μονάδα αποτελείται από ηλιακά κύτταρα (36 μονοκρυσταλλικό πυρίτιο) με δύο διόδους bypass. Ένα φ/β πλαίσιο της μονάδας είναι πλήρως σκιασμένο.

Όταν το σύστημα είναι σε θέση να εκτελέσει την διαδικασία του πειράματος, ο φοιτητής εισάγει την επιθυμητή γωνία κλίσης στο κατάλληλο πλαίσιο εισόδου λογισμικού και το σύστημα θα ρυθμίσει αυτόματα την κλίση της φωτοβολταϊκής μονάδας στην επιθυμητή γωνία. Αυτή η διαδικασία μπορεί να την παρακολουθήσει ζωντανά από τον ιστό με την χρήση της κάμερας.

Αφού ολοκληρωθεί η δοκιμή, το σύστημα θα εμφανίσει την πειραματική χαρακτηριστική καμπύλη P-I στην οθόνη και ένα εξωτερικό αρχείο με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν. Ο φοιτητής θα επεξεργαστεί τα δεδομένα από το αρχείο με τις μετρήσεις

θα υπολογίσει τη μέγιστη ισχύ για τις δεδομένες συνθήκες λειτουργίας χρησιμοποιώντας την εξίσωση (7.2.1)

9.5 ΛΥΣΗ

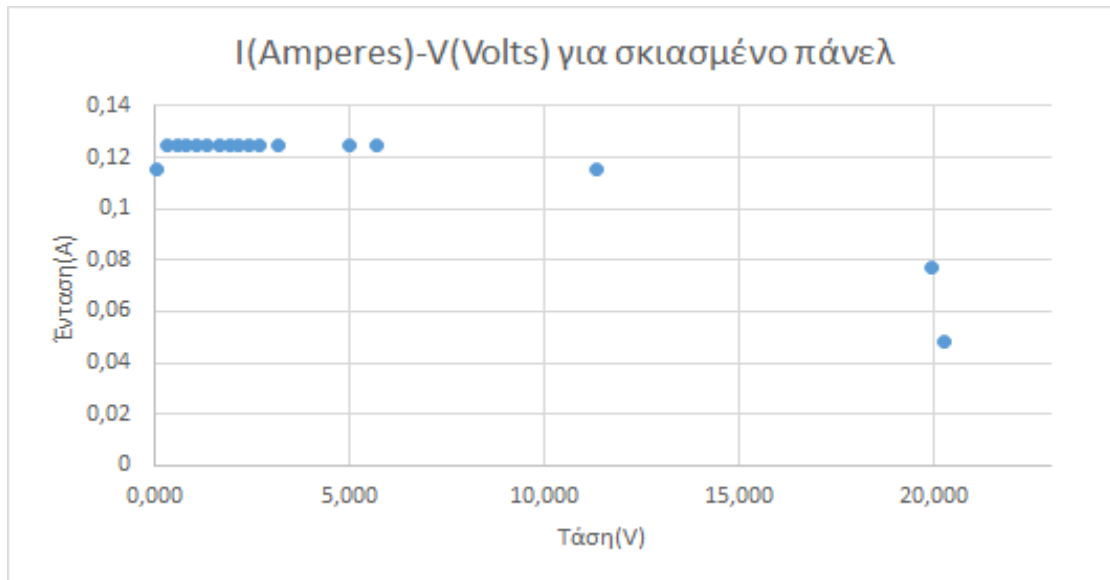
Οι Μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν βρίσκονται στους παρακάτω συνδέσμους:
[d29-m09-y2020_h11m28s16.txt](#) Με σκίαση.

[d05-m06-y2018_h12m13s13.txt](#) Χωρίς σκίαση για σύγκριση.

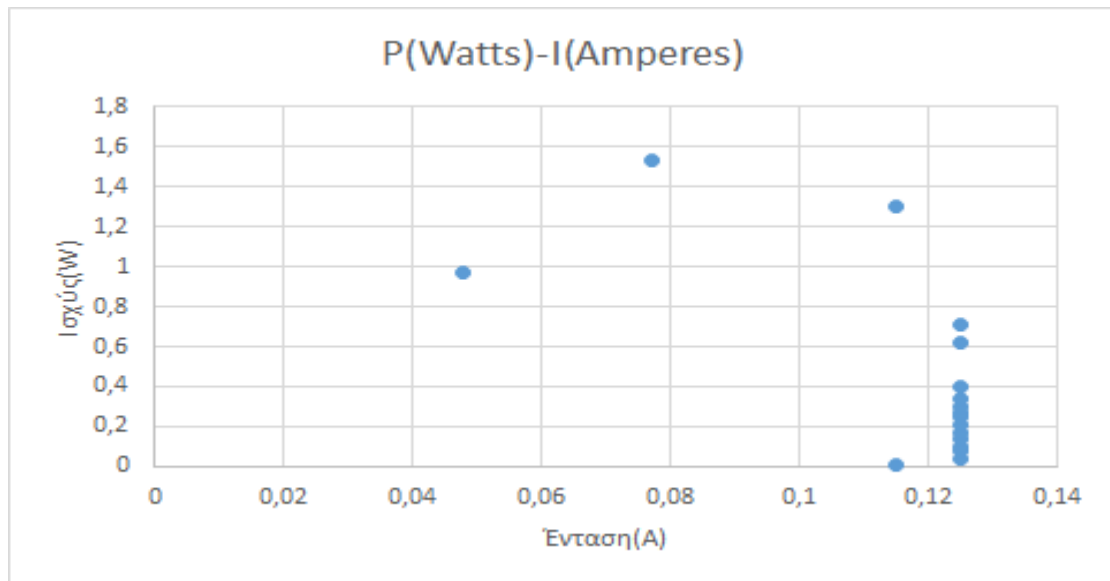
Για το σκιασμένο φ/β πλαίσιο έχουμε:

Πίνακας 9.1 Πειραματικές μετρήσεις εγκατάστασης για απόδοση φωτοβολταϊκού στοιχείου με σκίαση

α/α	V(V)	I(A)	Ηλιακή Ακτινοβολία (W/m ²)
1	0,060	0,115	873,773
2	0,324	0,125	873,773
3	0,588	0,125	873,773
4	0,816	0,125	873,773
5	1,080	0,125	873,773
6	1,344	0,125	873,773
7	1,668	0,125	873,773
8	1,956	0,125	873,773
9	2,160	0,125	873,773
10	2,424	0,125	873,773
11	2,700	0,125	873,773
12	3,180	0,125	873,773
13	5,700	0,125	873,773
14	11,328	0,115	873,773
15	19,944	0,077	874,542
16	4,980	0,125	874,542
17	20,280	0,048	874,542



Σχήμα 9.1 Διάγραμμα ρεύματος τάσης για σκιασμένο φ/β πλαίσιο



Σχήμα 9.2 Διάγραμμα ισχύς ρεύματος για σκιασμένο φ/β πλαίσιο

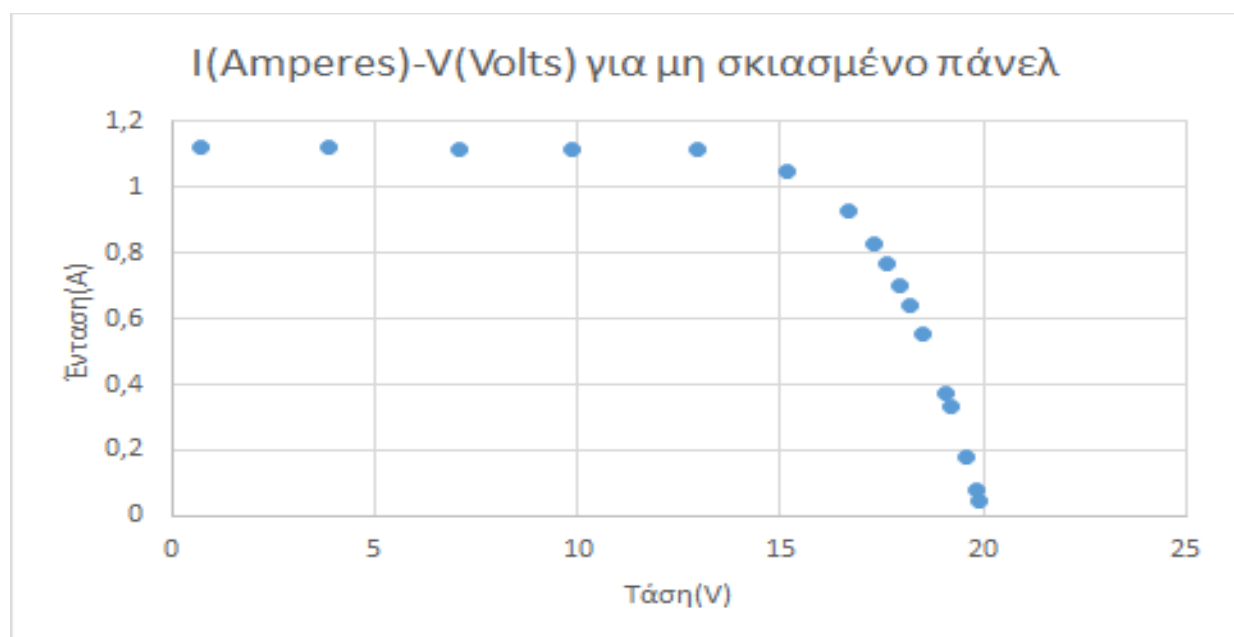
Μέγιστη ισχύς εξόδου πειραματική = 1,535688 W

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

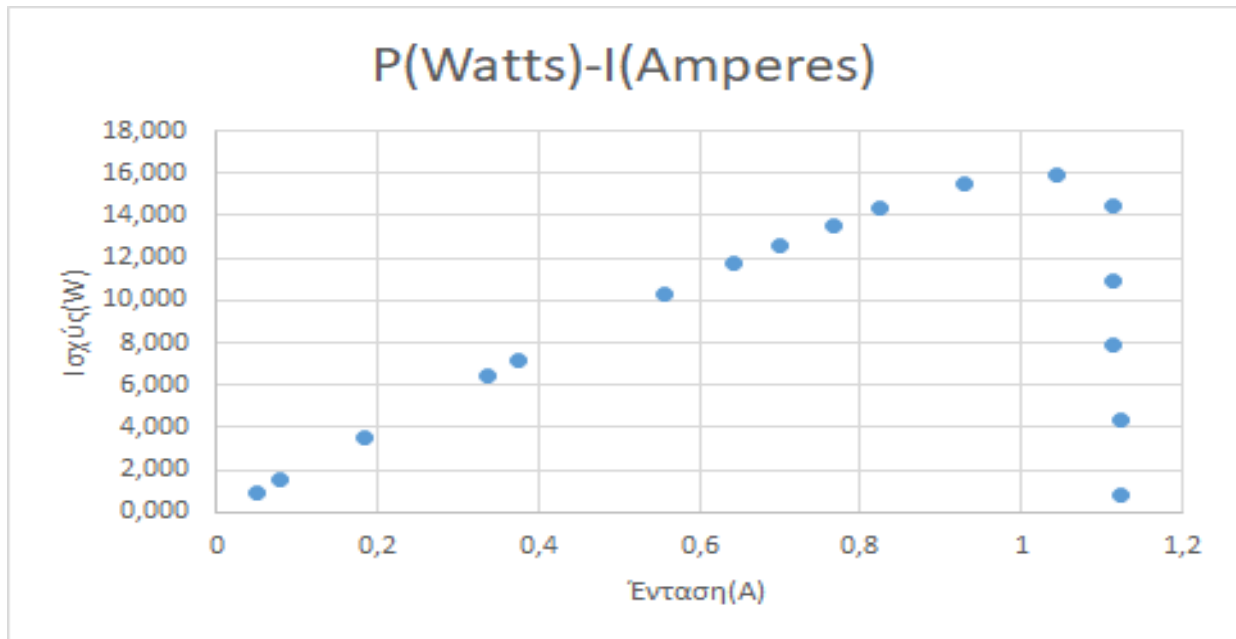
Για το μη σκιασμένο φ/β πλαίσιο:

Πίνακας 9.Π Πειραματικές μετρήσεις εγκατάστασης για απόδοση φωτοβολταϊκού στοιχείου χωρίς σκίαση

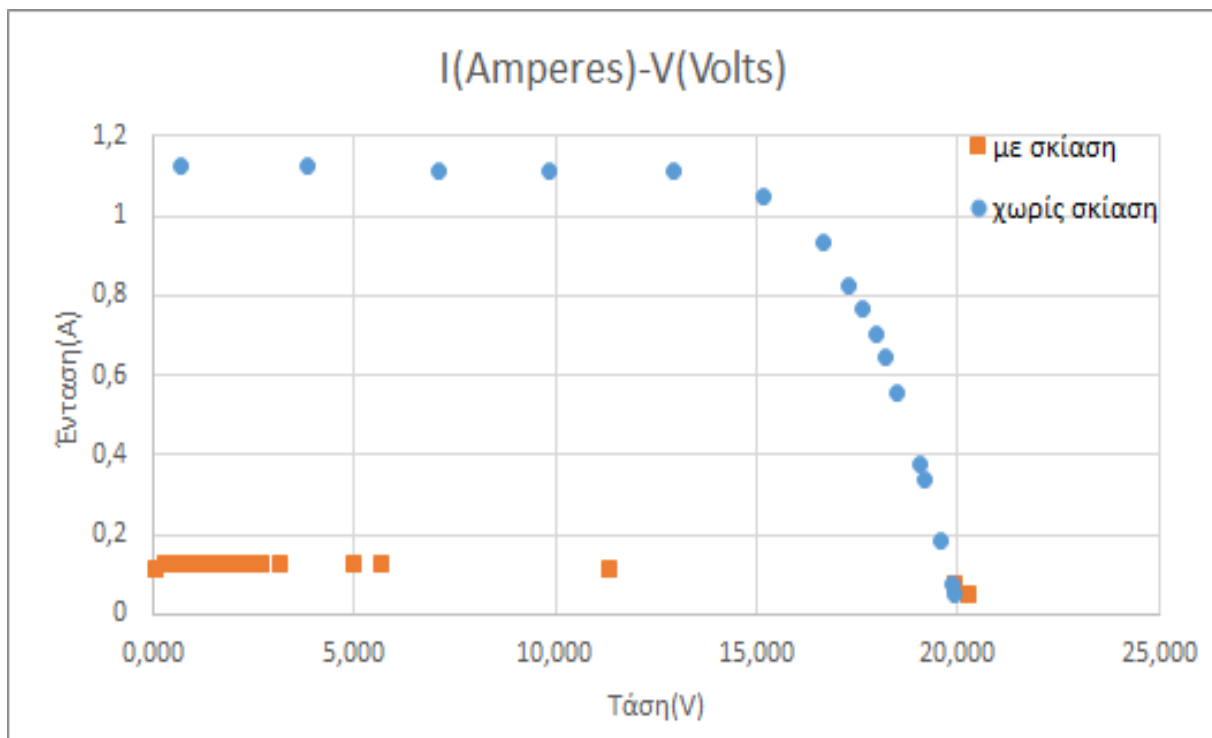
α/α	V(V)	I(A)	Ηλιακή Ακτινοβολία (W/m ²)
1	0,708	1,123	872,236
2	3,876	1,123	872,236
3	7,104	1,114	872,236
4	9,84	1,114	872,236
5	12,948	1,114	872,236
6	15,192	1,046	872,236
7	16,668	0,931	872,236
8	17,316	0,826	872,236
9	17,652	0,768	872,236
10	17,964	0,701	872,236
11	18,192	0,643	872,236
12	18,504	0,557	872,236
13	19,2	0,336	872,236
14	19,596	0,182	872,236
15	19,86	0,077	872,236
16	19,08	0,374	872,236
17	19,932	0,048	871,468



Σχήμα 9.3 Διάγραμμα ρεύματος τάσης για μη σκιασμένο φ/β πλαίσιο



Σχήμα 9.4 Διάγραμμα ισχύς ρεύματος για μη σκιασμένο φ/β πλαίσιο



Σχήμα 9.5 Σύγκριση καμπυλών I-V για το ίδιο φ/β πλαίσιο με παρόμοια ηλιακή ακτινοβολία.

9.6 ΣΧΟΛΙΑ

Από τη σύγκριση των καμπυλών έντασης - τάσης για το ίδιο φ/β πλαίσιο με σκίαση και χωρίς παρατηρούμε ότι η τάση του ρεύματος που αποδίδει το φωτοβολταϊκό είναι η ίδια είτε σκιάζεται κάποιο μέρος του είτε όχι. Όσον αφορά όμως την ένταση του ρεύματος που αποδίδει το φωτοβολταϊκό εκεί παρατηρείται σημαντική μείωση της τιμής της έντασης του ρεύματος στην περίπτωση του σκιασμένου φ/β πλαισίου.

Αυτή η μείωση της έντασης του ρεύματος μπορεί να εξηγηθεί αν λάβουμε υπόψη ότι τα σκιασμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία αρχίζουν να δρουν μεροληπτικά, δηλαδή σαν αντιστάσεις, και με αυτό τον τρόπο καταναλώνουν μέρος της ενέργειας που παράγουν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία τα οποία δεν είναι σκιασμένα. Έχοντας υπόψη λοιπόν αυτό το φαινόμενο μπορούμε να καταλάβουμε γιατί η ένταση του ρεύματος που παράγει ένα φωτοβολταϊκό είναι σημαντικά μικρότερη όταν υπάρχει σκίαση ενώ η τάση φαίνεται να μην επηρεάζεται.

10 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 4 - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΠΟΥ ΣΥΝΔΕΟΝΤΑΙ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ (ΙΔΙΑ ΑΣΚΗΣΗ ΓΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕ ΣΕΙΡΑ)

10.1 ΣΤΟΧΟΣ

Στόχος αυτής της εφαρμογής είναι να χρησιμοποιήσει το απομακρυσμένο σύστημα πειραματισμού από τους φοιτητές για την κατασκευή της καμπύλης I-V των φωτοβολταϊκών πλαισίων, συνδέεται παράλληλα και συγκρίνεται με αυτό μιας φωτοβολταϊκής μονάδας.

10.2 ΣΥΝΔΕΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΣΕ ΣΕΙΡΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ

Η σε σειρά σύνδεση αυξάνει την ολική τάση του συστήματος ενώ το ρεύμα παραμένει ως έχει ενώ αντίθετα η παράλληλη σύνδεση διατηρεί σταθερή την τάση και αυξάνει το ολικό ρεύμα του συστήματος. Αναλόγως το επιδιωκόμενο στόχο συνδέουμε και με την ανάλογη σύνδεση. Φυσικά μπορούμε να συνδυάσουμε τις συνδέσεις επιτυγχάνοντας μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με το όσο δυνατόν γίνεται μικρότερες απώλειες στη γραμμή μεταφοράς.

10.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Επειδή το ρεύμα που παραδίδει μια μεμονωμένη μονάδα είναι χαμηλό για πολλές εφαρμογές, υπάρχει η παράλληλη σύνδεση μονάδων ώστε να αποκτήσουν το επιθυμητό ρεύμα. Με αυτή τη σύνδεση, προστίθενται τα μεμονωμένα ρεύματα, ώστε να παράγουν ένα υψηλότερο συνολικό ρεύμα.

10.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Όταν το σύστημα είναι σε θέση να εκτελέσει μέτρηση, οι φοιτητές εισάγουν την επιθυμητή γωνία κλίσης στο πλαίσιο εισόδου λογισμικού και το σύστημα ρυθμίζει αυτόματα την κλίση της φωτοβολταϊκής μονάδας στην επιθυμητή γωνία.

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία εμφανίζεται στην οθόνη η πειραματική χαρακτηριστική καμπύλη P-I και ένα αρχείο σε μορφή txt όπου περιέχει τις μετρήσεις. Οι μετρήσεις αυτές θα πρέπει να επεξεργαστούν από τους φοιτητές σύμφωνα με τις απαιτήσεις της άσκησης.

Αρχικά οι φοιτητές θα σχεδιάσουν την πραγματική χαρακτηριστική καμπύλη I-V για τις τέσσερις φωτοβολταϊκές μονάδες που είναι συνδεδεμένες παράλληλα και στη συνέχεια θα επαναλάβουν την ίδια διαδικασία για μία φωτοβολταϊκή μονάδα.

Όταν ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία, οι φοιτητές θα σχεδιάσουν τις δύο χαρακτηριστικές καμπύλες I-V στο ίδιο διάγραμμα για να τις συγκρίνουν. Από αυτό το διάγραμμα, θα φανούν οι εντάσεις των μεμονωμένων ηλιακών μονάδων που προστέθηκαν.

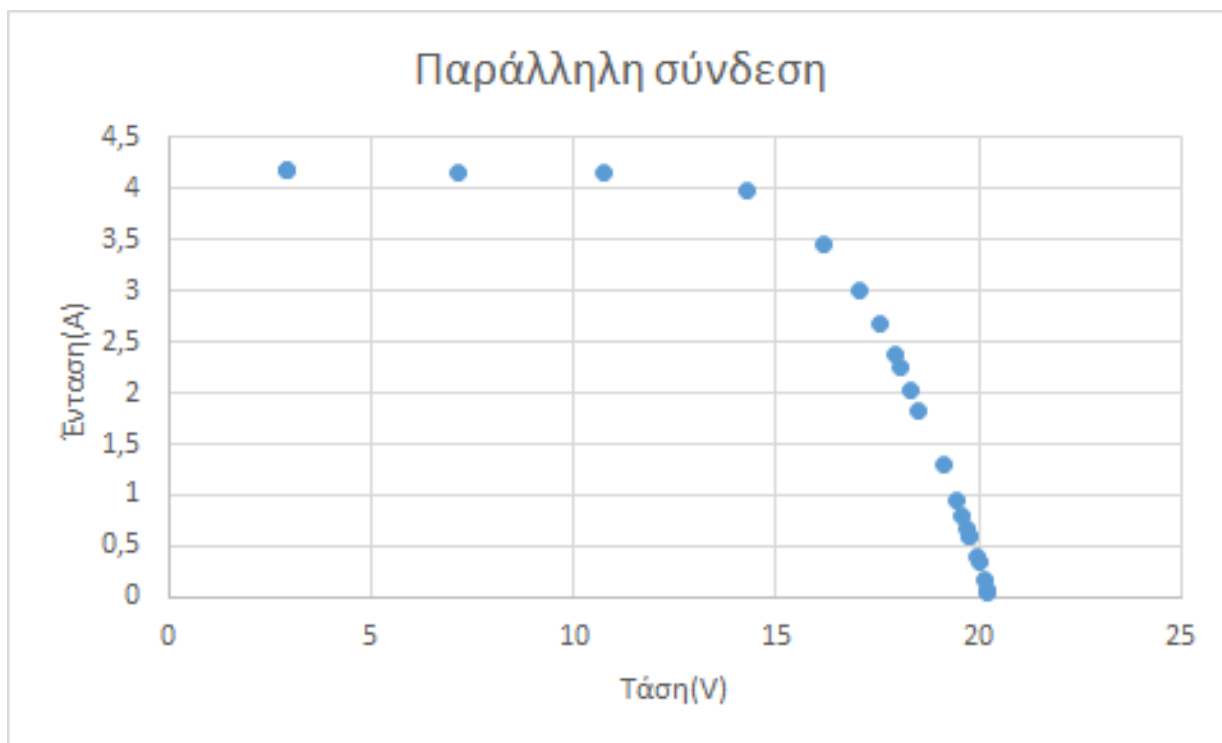
10.5 ΛΥΣΗ

Οι Μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν βρίσκονται στους παρακάτω συνδέσμους:
[d01-m05-y2018_h14m36s31.txt](#) Παράλληλη σύνδεση
[d01-m05-y2018_h14m32s13.txt](#) Σύνδεση σε σειρά

Παράλληλη σύνδεση:

Πίνακας 10.I Πειραματικές μετρήσεις εγκατάστασης για παράλληλη σύνδεση

α/α	V(V)	I(A)	Ηλιακή Ακτινοβολία (W/m ²)
1	2,952	4,176	876,847
2	7,152	4,166	876,847
3	10,764	4,157	876,847
4	14,292	3,974	876,847
5	16,176	3,466	876,847
6	17,076	3,014	876,847
7	17,556	2,688	876,847
8	17,952	2,381	876,847
9	18,096	2,256	876,847
10	18,348	2,035	876,847
11	18,528	1,824	876,847
12	19,116	1,296	876,847
13	19,44	0,96	876,847
14	19,584	0,806	876,847
15	19,692	0,682	876,847
16	2,916	4,176	876,847
17	19,776	0,605	876,847
18	19,8	0,586	876,847
19	20,004	0,346	876,847
20	20,136	0,182	876,847
21	20,22	0,077	876,847
22	19,956	0,394	876,847
23	20,244	0,048	876,847



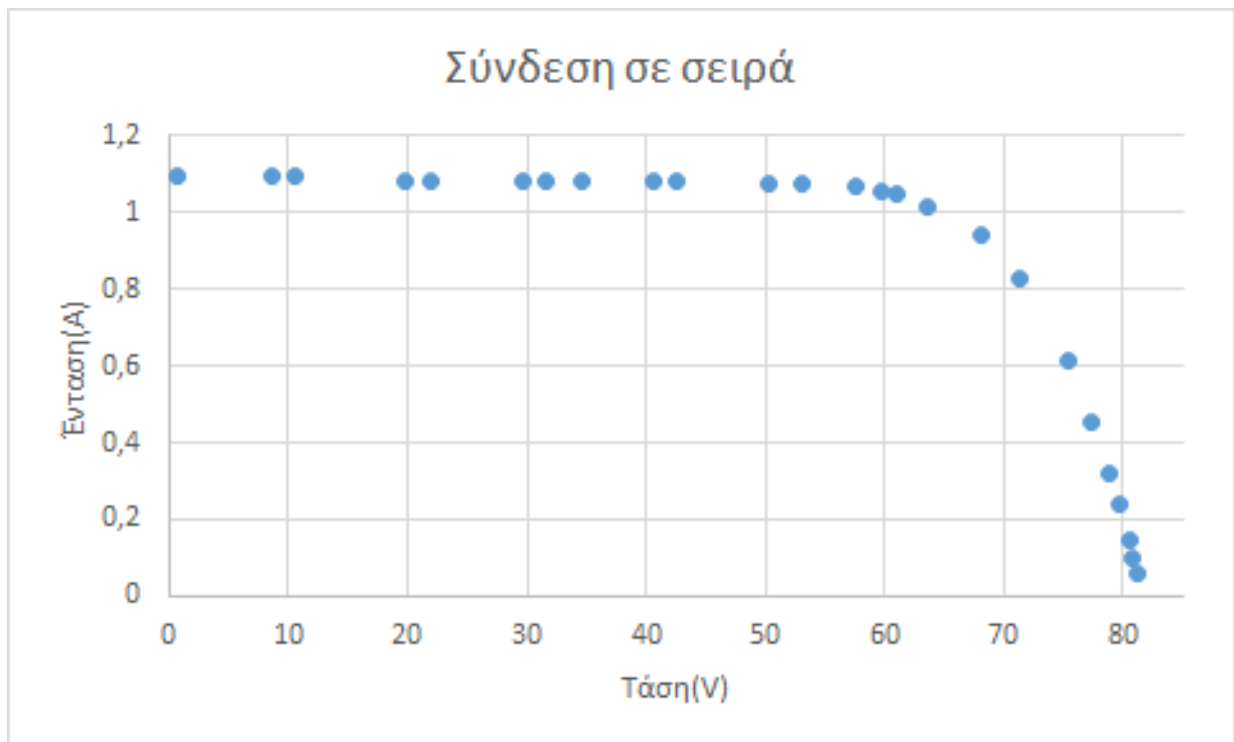
Σχήμα 10.1 Διάγραμμα έντασης τάσης για παράλληλη σύνδεση

Σύνδεση σε σειρά:

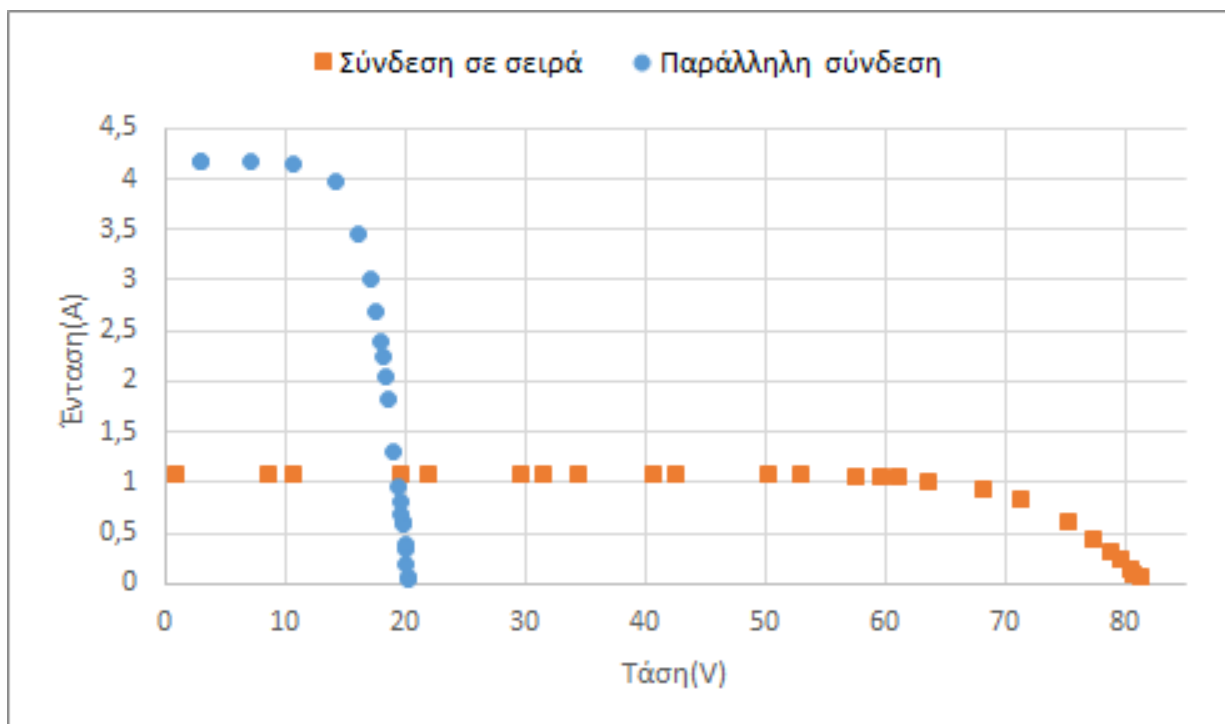
Πίνακας 10.Π Πειραματικές μετρήσεις εγκατάστασης για σύνδεση σε σειρά

α/α	V(V)	I(A)	Ηλιακή Ακτινοβολία (W/m ²)
1	0,792	1,094	886,837
2	10,596	1,094	886,837
3	21,9	1,085	886,837
4	31,572	1,085	886,837
5	8,616	1,094	886,837
6	19,74	1,085	887,606
7	29,616	1,085	887,606
8	42,54	1,085	887,606
9	52,992	1,075	887,606
10	61,008	1,046	887,606
11	40,62	1,085	887,606
12	50,232	1,075	887,606
13	59,64	1,056	887,606
14	63,516	1,018	887,606
15	57,528	1,066	887,606
16	71,364	0,826	886,837
17	68,1	0,941	886,837

18	75,312	0,614	886,837
19	34,512	1,085	886,837
20	77,352	0,451	886,837
21	78,888	0,317	886,069
22	79,584	0,24	886,069
23	80,532	0,144	886,069
24	80,724	0,096	886,069
25	81,24	0,058	886,069



Σχήμα 10.2 Διάγραμμα έντασης τάσης για σύνδεση σε σειρά



Σχήμα 10.3 Σύγκριση καμπυλών παράλληλης σύνδεσης και σύνδεσης σε σειρά

10.6 ΣΧΟΛΙΑ

Σε αυτήν την εργαστηριακή άσκηση παρατηρήσαμε ότι όταν συνδέουμε τα τέσσερα φ/β πλαίσια της εγκατάστασης σε σειρά τότε τετραπλασιάζεται η τάση του ρεύματος που παράγει η εγκατάσταση (προστίθεται δηλαδή η τάση του κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου) ενώ η ένταση παραμένει χαμηλή και ίση με την ένταση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου. Στην περίπτωση που τα φ/β πλαίσια συνδέονται παράλληλα τότε τετραπλασιάζεται η ένταση του ρεύματος που παράγει η εγκατάσταση (προστίθεται δηλαδή η ένταση του κάθε φ/β πλαισίου) ενώ η τάση παραμένει χαμηλή και ίση με την τάση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Σε μεγαλύτερες κλίμακες η συνδεσμολογία παίζει καθοριστικό ρόλο στην απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πάρκου. Για αυτό τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέονται σε συστοιχίες που αφού αρχικά συνδεθούν κάποια φ/β πλαίσια σε σειρά ώστε να έχουμε την απαιτούμενη τάση στη συνέχεια συνδέουμε αυτές τις συστοιχίες παράλληλα και με αυτό τον τρόπο ανεβάζουμε την ένταση του ρεύματος. Συνήθως προσπαθούμε να κρατήσουμε χαμηλή την τάση του ρεύματος γιατί αυτό θα βοηθήσει στη μακροζωία των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

11 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 5 - ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΛΗΡΩΣΗΣ

11.1 ΣΤΟΧΟΣ

Ο στόχος αυτής της εφαρμογής είναι να χρησιμοποιηθεί το σύστημα απομακρυσμένου πειραματισμού για να προσδιοριστεί ο συντελεστής πλήρωσης μιας φωτοβολταϊκής μονάδας.

11.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΛΗΡΟΤΗΤΑΣ (FF)

Ο συντελεστής πληρότητας (FF) περιγράφει την ιδανική συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού στοιχείου ως πηγή σταθερού ρεύματος, και οι τιμές του καθορίζονται από το υλικό του φωτοβολταϊκού στοιχείου και τις συνθήκες. Η εξίσωση εύρεσης του συντελεστή πληρότητας είναι ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος προς το γινόμενο της βραχυκυκλωμένης έντασης και της ανοικτό κυκλωμένης τάσης V_{oc} ενός φωτοβολταϊκού και δίνεται από την σχέση:

$$FF = \frac{I_m * V_m}{I_{SC} * V_{OC}} \quad (11.2.1)$$

Όπου:

- I_m είναι η ένταση του ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος με μονάδα μέτρησης το Ampere (A)
- V_m είναι η τάση του ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος με μονάδα μέτρησης το Volt (V)
- I_{SC} είναι η ένταση του ρεύματος βραχυκυκλώσεως
- V_{OC} είναι η τάση του ανοιχτού κυκλώματος

Η τιμή του κυμαίνεται από 0-1, όσο μεγαλύτερη η τιμή τόσο πιο ιδανική η λειτουργία του φωτοβολταϊκού και πολύ καλή ενεργειακή απόδοση.

11.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο συντελεστής πληρότητας (FF) είναι μια σημαντική παράμετρος που καθορίζει τη μετατροπή ισχύος απόδοσης ενός ηλιακού στοιχείου. Υπολογίζεται με τη σύγκριση της μέγιστης ισχύος (P_{MPP}) με τη θεωρητική μέγιστη ισχύ που προκύπτει ως προϊόν της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}) και ρεύματος βραχυκυκλώματος (I_{sc}). Ανάμεσα στο I_{sc} και V_{oc} , η ισχύς θα είναι μηδενική και η μέγιστη η τιμή για την ισχύ θα εμφανιστεί μεταξύ των δυο τους. Η τάση και το ρεύμα σε αυτό το μέγιστο σημείου ισχύος χαρακτηρίζονται ως V_{MPP} και I_{MPP} αντίστοιχα.

Το FF μπορεί επίσης να ερμηνευτεί γραφικά ως η επιφάνεια της ορθογώνιας περιοχής που απεικονίζεται στην παρακάτω γραφική παράσταση.

Ένας μεγαλύτερος παράγοντας πλήρωσης είναι ο επιθυμητός και αντιστοιχεί σε ένα σκούπισμα I-V που είναι περισσότερο τετραγωνικό. Στα πραγματικά κύτταρα, η ισχύς διαχέεται μέσω των εσωτερικών αντιστάσεων και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του συντελεστή πλήρωσης. Τα στοιχεία με μεγάλες εσωτερικές αντιστάσεις θα έχουν μικρότερους παράγοντες πλήρωσης, ενώ το ιδανικό στοιχείο θα έχει έναν παράγοντα πλήρωσης ίσο με την ενότητα. Πρέπει να σημειωθεί ότι ένας παράγοντας πλήρωσης ενότητας υποδηλώνει μια χαρακτηριστική καμπύλη ορθογώνιου στοιχείου I-V. Οι τυπικοί παράγοντες πληρώσεως κυμαίνονται από 0,5 έως 0,7 για άμορφα ηλιακά στοιχεία και από 0,75 έως 0,85 για κρυσταλλικά ηλιακά στοιχεία. Ο συντελεστής πλήρωσης επίσης εκπροσωπούνται ως ποσοστό. Δεδομένου ότι μια φωτοβολταϊκή μονάδα αποτελείται από συνδεδεμένα ηλιακά στοιχεία, η παραπάνω περιγραφόμενη διαδικασία μπορεί επίσης να εφαρμοστεί σε μια φωτοβολταϊκή μονάδα.

11.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Όταν το σύστημα είναι σε θέση να εκτελέσει την διαδικασία του πειράματος, ο φοιτητής εισάγει την επιθυμητή γωνία κλίσης στο κατάλληλο πλαίσιο εισόδου λογισμικού και το σύστημα θα ρυθμίσει αυτόματα την κλίση της φωτοβολταϊκής μονάδας στην επιθυμητή γωνία. Αυτή η διαδικασία μπορεί να την παρακολουθήσει ζωντανά από τον ιστό με την χρήση της κάμερας.

Αφού ολοκληρωθεί η δοκιμή, το σύστημα θα εμφανίσει την πειραματική χαρακτηριστική καμπύλη P-I στην οθόνη και ένα εξωτερικό αρχείο με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν. Ο φοιτητής θα επεξεργαστεί τα δεδομένα από το αρχείο με τις μετρήσεις για να σχεδιάσει τη πραγματική χαρακτηριστική γραφική I-V. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του ο φοιτητής θα χρησιμοποιήσει την προαναφερθείσα εξίσωση για τον υπολογισμό Fill Factor (FF) της μονάδας. Για περαιτέρω ανάλυση, ο φοιτητής μπορεί επίσης να εισάγει το ρεύμα και την τάση IV της καμπύλης στις συνθήκες STC και στη συνέχεια να εκτελέσει τον ίδιο υπολογισμό, συγκρίνοντας και κατανοώντας εάν το FF μπορεί να επηρεαστεί από εξωτερικές συνθήκες.

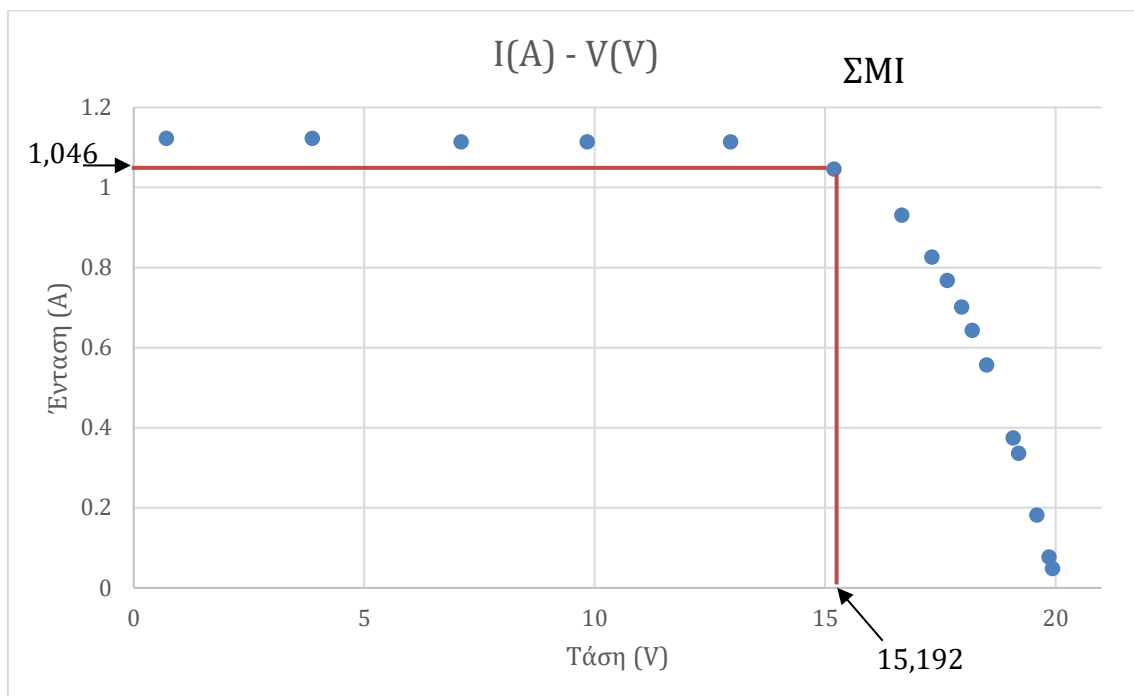
11.5 ΛΥΣΗ

Οι Μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν βρίσκονται στον παρακάτω σύνδεσμο:

: [d05-m06-y2018_h12m13s13.txt](#) 05-Jun-2018 12:13 1K

Πίνακας 11.I Πειραματικές μετρήσεις εγκατάστασης για απόδοση φωτοβολταϊκού στοιχείου

α/α	V(V)	I(A)	Ηλιακή Ακτινοβολία (W/m ²)
1	0,708	1,123	872,236
2	3,876	1,123	872,236
3	7,104	1,114	872,236
4	9,84	1,114	872,236
5	12,948	1,114	872,236
6	15,192	1,046	872,236
7	16,668	0,931	872,236
8	17,316	0,826	872,236
9	17,652	0,768	872,236
10	17,964	0,701	872,236
11	18,192	0,643	872,236
12	18,504	0,557	872,236
13	19,2	0,336	872,236
14	19,596	0,182	872,236
15	19,86	0,077	872,236
16	19,08	0,374	872,236
17	19,932	0,048	871,468



Σχήμα 11.1 Χαρακτηριστική καμπύλη I – V και ΣΜΙ

Αρχικά υπολογίζουμε το εμβαδόν που ορίζεται από τους κάθετους άξονες και την καμπύλη τάσης – έντασης (E_1), το οποίο ισούται με την θεωρητική μέγιστη ισχύ. Ο υπολογισμός του εμβαδού αυτού γίνεται μέσω της μεθόδου τραπεζίου η οποία περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$E_1 = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{2} (x_{i+1} - x_i) (f(x_{i+1}) + f(x_i)) \quad (11.5.1)$$

Όπου οι τιμές x_i είναι οι τιμές τις τάσης V και οι τιμές $f(x_i)$ είναι οι τιμές της έντασης I στα αντίστοιχα σημεία. Βρίσκουμε ότι το εμβαδόν αυτό ισούται με $E_1 = 20,214$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ η οποία ισούται με το εμβαδόν του ορθογωνίου που ορίζεται από τους κάθετους άξονες και την προβολή του σημείου της μέγιστης ισχύος σε αυτούς (E_2). Βρίσκουμε ότι το εμβαδόν αυτού του ορθογώνιου είναι $E_2 = 15,891$.

Ο συντελεστής πληρότητας προκύπτει από την σχέση (11.5.2) ως εξής:

$$FF = \frac{I_m * V_m}{I_{SC} * V_{OC}} = \frac{E_2}{E_1} \quad (11.5.2)$$

Άρα έχουμε: $FF = \frac{15.981}{20.214} = 0.7861$ ή 76,81%.

Για την καλύτερη κατανόηση των εμβαδών που χρησιμοποιήθηκαν μπορούμε να δούμε το παραπάνω διάγραμμα (σχήμα 11.1).

11.6 ΣΧΟΛΙΑ

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω διάγραμμα το FF είναι ένας γρήγορος τρόπος για να δούμε πόσο καλά αποδίδει ένα φ/β πλαίσιο σε διάφορα σημεία της λειτουργίας του. Γενικά όσο μεγαλύτερο είναι το FF τόσο καλύτερο είναι το φωτοβολταϊκό, πράγμα που μας επιτρέπει να μην έχουμε μεγάλες απώλειες μεταβάλλοντας την τάση και την ένταση στις οποίες δουλεύει. Το FF εξαρτάται από το πόσο καλό είναι το υλικό κατασκευής του φ/β πλαισίου (ποιότητα των κρυστάλλων πυριτίου) και όσο καλύτερο είναι τόσο καλύτερο είναι και το FF. Φυσικά τα φ/β πλαίσια με καλύτερο FF είναι και ακριβότερα.

12 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική ολοκληρώνονται πέντε εργαστηριακές ασκήσεις για την εγκατάσταση που βρίσκεται στην οροφή του εργαστηρίου των Ήπιων Μορφών Ενέργειας (Η.Μ.Ε.) στην Πανεπιστημιούπολη 1 του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής μέσω του διαδικτύου.

Η εγκατάσταση παρείχε όλα τα απαραίτητα όργανα όπως πολύμετρο, πυρανόμετρο και οι συνδεσμολογίες και η σκίαση γίνονται αυτόματα μέσω του διαδικτύου, κάτι που είναι πολύ εξυπηρετικό καθώς οποιαδήποτε στιγμή είναι εφικτό να πάρεις μετρήσεις και χωρίς φυσική παρουσία στο χώρο της εγκατάστασης.

Αναλυτικότερα η διπλωματική χωρίζεται σε τρία μέρη. Αρχικά στα κεφάλαια έξι και επτά αναφέρονται στην ιστορία των φωτοβολταϊκών και στην οικονομική τους αναδρομή. Στο κεφάλαιο οκτώ και εννιά στους τύπους φωτοβολταϊκών, στα αυτόματα συστήματα, στο βαθμό απόδοσης τους και στην γωνία κλίσης.

Στο δεύτερο μέρος της αναφέρεται στην περιγραφή της εγκατάστασης και στο τρόπο που μπορούν οι φοιτητές να προετοιμάσουν την εγκατάσταση ώστε πάρουν μετρήσεις.

Ενώ έπειτα ξεκινούν οι πέντε εργαστηριακές ασκήσεις όπου είδαμε τα εξής:

- Αρχικά στην πρώτη και στον υπολογισμό μέγιστης ισχύος αντιλαμβανόμαστε ότι στο φωτοβολταϊκό υπάρχουν απώλειες από τις καιρικές συνθήκες και από τη γήρανση του, για αυτό το λόγο και ο θεωρητικός βαθμός είναι μεγαλύτερος από το πειραματικό
- Στη δεύτερη στην σύγκριση της χαρακτηριστικής καμπύλης παρατηρείται ότι και στην πρώτη εργαστηριακή άσκηση που είναι αναμενόμενο για τους λόγους που προ αναφέραμε
- Στη τρίτη εργαστηριακή άσκηση παρατηρούμε ότι η σκίαση στο φωτοβολταϊκό αντιδρά σαν αντίσταση μειώνοντας το ρεύμα αισθητά
- Στη τέταρτη βλέπουμε τις δύο συνδεσμολογίες (παράλληλα και σε σειρά) όπου η παράλληλη σύνδεση μας δίνει τετραπλάσιο ρεύμα και η σύνδεση σε σειρά τετραπλάσια τάση. Ιδανικά στα αιολικά πάρκα, η συνδεσμολογία γίνεται σε συστοιχίες που αφού αρχικά συνδεθούν κάποια φ/β πλαίσια σε σειρά ώστε να έχουμε την απαιτούμενη τάση στη συνέχεια συνδέουμε αυτές τις συστοιχίες παράλληλα και με αυτό τον τρόπο ανεβάζουμε την ένταση του ρεύματος.

- Στη πέμπτη υπολογίσαμε συντελεστή πληρότητας $\approx 78\%$ που μας δείχνει ότι έχουμε ένα αξιοπρεπές σύστημα, το οποίο έχει κάποια προβλήματα που αναφέραμε στην πρώτη εργαστηριακή άσκηση.

Συνοψίζοντας, διαπιστώνουμε ότι το κύριο παράγοντας που επηρεάζει την εγκατάσταση είναι η σκίαση, διότι μειώνει αισθητά την απόδοση του φωτοβολταϊκού. Από την άλλη οι δύο συνδεσμολογίες παρόλο που τετραπλασιάζουν τις τιμές του ρεύματος και της τάσης αντίστοιχα, τελικά δεν αλλάζουν τη συνολική παραγόμενη ισχύ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Dr. E Kaplani**, 2012 “Ageing effects in PV cells and modules”, presentation for Week on “PV Systems Engineering and the other Renewable Energy Systems” at T.E.I. of Patras, Greece https://repository.edulll.gr/edulll/retrieve/11478/3664_EKaplani-PV_Ageing_Effects.pdf
2. **T-S SPACECYSTEMS**, IV Measurement Software, Britain <https://www.ts-space.co.uk/iv-measurement-software.html>
3. **Καλδέλλης Ι., Καββαδίας Κ.**, 2001, “Εργαστηριακές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας”, Εκδ. ΑΘ. ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ, Αθήνα
4. **HELIOSYSTEMS**, “Ιστορικό φωτοβολταϊκών και τρέχουσες εξελίξεις”, <https://selasenergy.gr/history.php>
5. **HELIOSYSTEMS**, “Φωτοβολταϊκά Στοιχεία-Αποδόσεις Φωτοβολταϊκών Συστημάτων”, https://selasenergy.gr/fv_systems.php
6. **HELIOSYSTEMS**, 2019, “Τιμοκατάλογος Ελληνικού Συστήματος”, <https://selasenergy.gr/entupa-dei.php>
7. **TIMELOAST**, 2016, “Ιστορική εξέλιξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων”, <https://www.timetoast.com/timelines/8dc5db37-3597-4a90-a33e-01e524dd45e9>
8. **Mp energy**, “Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά”, <https://www.mp-energy.gr/αυτονομα-συστηματα/αυτονομα-φωτοβολταικα.html>
9. **HELAPCO Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών**, 2013 “Βασικές τεχνικές πληροφορίες για τα φωτοβολταϊκά” https://helapco.gr/pdf/PV_Guide_Aug_2013.pdf
10. **HELIOSYSTEMS**, “Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά” <https://selasenergy.gr/autonomous.php>
11. **HELAPCO Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών**, 2020 “Στατιστικά στοιχεία αγοράς φωτοβολταϊκών για το 2019” <https://helapco.gr/statistika-agoras-fwtovoltaikwn/statistika-ellinikis-agoras-2019-2/>
12. **EUNICE ENERFY GROUP**, <http://eunice-group.com/gr/>
13. **ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**, “Τρόποι σύνδεσης φωτοβολταϊκών πλαισίων, φωτοβολταϊκά συστήματα” https://pv.hmu.gr/photovoltaic_systems
14. **ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**, “Η καμπύλη I-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου” https://pv.hmu.gr/photovoltaic_electrical

15. **Μπεμπεδέλης Γ.**,2017 “Μελέτη εγκατάστασης φωτοβολταϊκού συστήματος ισχύος 10kW σε μόνιμη κατοικία, με διασύνδεση στο δίκτυο της Δ.Ε.Η.
<http://okeanis.lib.puas.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/3843/%CE%A0%CF%84%CF%85%CF%87%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%B7%20%CE%9C%CF%80%CE%B5%CE%BC%CF%80%CE%B5%CE%B4%CE%AD%CE%BB%CE%B7%CF%82%20%CE%93%CF%81%CE%B7%CE%B3%CF%8C%CF%81%CE%B7%CF%82.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
16. **Λιανός Ι.**,2012 “Διαστασιολόγηση Φωτοβολταϊκού Πάρκου Ισχύος 500 kWp με χρήση trackers”
<https://nemertes.library.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/5598/1/%CE%94%CE%99%CE%A0%CE%9B%CE%A9%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%97%20%281%29teliko.pdf>
17. **Φυσέας Α. Κ.**, 2018, “Φωτοβολταϊκά συστήματα και μελέτη απόδοση τους για την πόλη της Θεσσαλονίκης”
<http://ikee.lib.auth.gr/record/300358/files/%CE%A0%CF%84%CF%85%CF%87%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AE.pdf>