



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΔΙΑΦΑΝΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ
ΠΛΑΙΣΙΩΝ**

ΚΙΤΣΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αναπληρωτής Καθηγητής Κουτρούλης Ευτύχιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος

Καθηγητής Δόλλας Απόστολος

Χανιά, Δεκέμβριος 2017

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (ΗΜΜΥ) του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Αντικείμενο της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός ηλεκτρονικού συστήματος διαχείρισης της ενέργειας που παράγεται από διάφανα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η διπλωματική εργασία αυτή εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Κουτρούλη Ευτύχιου, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την υποστήριξή του.

Ευχαριστώ επίσης την εταιρεία Brite Solar, καθώς και τον κ. Νίκο Κανόπουλο και τον κ. Ηλία Σταθάτο για την παραχώρηση του διάφανου φωτοβολταϊκού πλαισίου που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία.

Περίληψη

Ένας πρόσφατος προσανατολισμός της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας είναι η ανάπτυξη διάφανων φωτοβολταϊκών στοιχείων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως διαφανή δομικά στοιχεία σε κτίρια, αντικαθιστώντας γυάλινες ή άλλες διάφανες επιφάνειες. Τα Dye-Sensitized φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι ένας τέτοιος τύπος φωτοβολταϊκού στοιχείου. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε ένα εμπορικό διάφανο, Dye-Sensitized φωτοβολταϊκό πλαίσιο της εταιρίας Brite Solar. Σκοπός της εργασίας ήταν η ανάλυση της λειτουργίας αυτού του πλαισίου σε διάφορες συνθήκες προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, σκίασης και θερμοκρασίας, καθώς και η ανάπτυξη ενός ηλεκτρονικού συστήματος που θα διαχειρίζεται τη λειτουργία του οδηγώντας το στη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση, ανεξαρτήτως συνθηκών.

Το πρώτο στάδιο της εργασίας ήταν η υλοποίηση του συστήματος αυτού και ο χαρακτηρισμός λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Το δεύτερο στάδιο αφορούσε τη βελτίωση του συστήματος, με σκοπό να λειτουργεί αυτόνομα, χωρίς δηλαδή εξωτερική τροφοδοσία, αλλά να τροφοδοτείται από το ίδιο το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Τέλος υλοποιήθηκαν δύο αλγόριθμοι ελέγχου λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου, που το οδηγούν στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος. Το τελικό σύστημα αποτελείται από, έναν μετατροπέα DC/DC και έναν μικροελεγκτή. Τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαίωσαν ότι με το σύστημα που αναπτύχθηκε μεγιστοποιείται η παραγωγή ενέργειας του Dye-Sensitized φωτοβολταϊκού πλαισίου τόσο κατά την ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας, όσο και σε συνθήκες μερικής σκίασης.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1.1 Γενικά.....	5
1.2 Σύνοψη κεφαλαίων	7
2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	8
2.1 Φωτοβολταϊκή τεχνολογία.....	8
2.2 Τρόπος λειτουργίας των DSSCs.....	12
2.3 Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των Φ/Β στοιχείων	14
2.4 Αλγόριθμοι MPPT	18
3. ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ DC/DC	29
3.1 Γενικά για τους μετατροπείς DC/DC.....	29
3.2 Μετατροπέας DC/DC τύπου Boost	31
3.2.1 Συνεχής αγωγή ρεύματος	32
3.2.2 Ασυνεχής αγωγή ρεύματος	34
4. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ	36
4.1 Το Φ/Β πλαίσιο τύπου Dye-Sensitized	37
4.2 Ο μετατροπέας DC/DC ανύψωσης τάσης.....	38
4.3 Οι αισθητήρες ρεύματος και τάσης εισόδου του μετατροπέα DC/DC.....	40
4.4 Ο μικροελεγκτής.....	43
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	45
5.1 Περιγραφή μεθοδολογίας μετρήσεων	45
5.2 Χαρακτηρισμός Φ/Β πλαισίου	48
5.2.1 Χαρακτηριστικές I-V και P-V με κάλυψη πίσω όψης.....	48
5.2.2 Χαρακτηριστικές I-V και P-V χωρίς κάλυψη πίσω όψης	55
5.2.3 Χαρακτηριστικές I-V και P-V υπό συνθήκες μερικής σκίασης.....	61
5.3 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού	75
5.4 Εφαρμογή της διαδικασίας MPPT	78
5.4.1 Πείραμα ελέγχου λειτουργίας αλγορίθμου P&O	78
5.4.2 Πείραμα ελέγχου λειτουργίας αλγορίθμου Constant Voltage.....	83
5.4.3 Πείραμα ελέγχου λειτουργίας αλγορίθμου P&O υπό συνθήκες απότομων αλλαγών στην προσπίπτουσα ακτινοβολία του Φ/Β πλαισίου.	86
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	91
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	93

1.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι μία μόνιμη, διαρκώς αυξανόμενη ανάγκη της ανθρωπότητας. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση φιλικών προς το περιβάλλον υλικών είναι ένας από τους σημαντικότερους στόχους της τεχνολογίας. Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί η χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) λόγω συρρίκνωσης των συμβατικών πόρων, όπως το πετρέλαιο, και της συνεχούς αύξησης στη ζήτηση ενέργειας. Η φωτοβολταϊκή (Φ/Β) τεχνολογία είναι ένα τμήμα της τεχνολογίας των ΑΠΕ που χρησιμοποιεί μια ανεξάντλητη πηγή, την ηλιακή ενέργεια για παραγωγή ηλεκτρικής. Η τεχνολογία αυτή έχει πολλά πλεονεκτήματα: είναι επεκτάσιμη, φιλική προς το περιβάλλον, εύκολη στη συντήρηση και μπορεί να εγκατασταθεί σχεδόν οπουδήποτε για να καλύψει τις ανάγκες του χρήστη. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα, είτε να αποθηκευτεί τοπικά ή να διοχετευτεί σε ένα υπάρχον δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν τα άκρα ενός Φ/Β στοιχείου είναι ανοικτοκυκλωμένα, τότε αυτό λειτουργεί στη μέγιστη τάση, αλλά με μηδενικό ρεύμα εξόδου, ενώ όταν τα άκρα του είναι βραχυκυκλωμένα, το Φ/Β στοιχείο λειτουργεί με μηδενική τάση αλλά παράγει το μέγιστο ρεύμα εξόδου. Ο συνδυασμός τάσης-ρεύματος εξόδου λέγεται σημείο

λειτουργίας. Ένα Φ/Β στοιχείο μπορεί να λειτουργήσει σε διάφορα σημεία λειτουργίας, αλλά ένα από αυτά είναι το σημείο όπου παράγει τη μέγιστη ισχύ. Τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας των Φ/Β στοιχείων αναπτύσσονται έτσι ώστε να τα οδηγούν σε λειτουργία σε αυτό το σημείο μέγιστης ισχύος. Τα συστήματα αυτά λέγονται συστήματα MPPT (Maximum Power Point Tracker). Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε ένα Dye-Sensitized Φ/Β πλαίσιο και αναπτύχθηκε ένα ηλεκτρονικό σύστημα για τη διαχείριση της παραγόμενης ισχύος του. Αρχικά υλοποιήθηκε το σύστημα το οποίο αποτελείται από ένα μετατροπέα DC/DC και έναν μικροελεγκτή, ενώ στην έξοδο του συστήματος υπάρχει μία μπαταρία η οποία αποθηκεύει την παραγόμενη ενέργεια από το Φ/Β πλαίσιο. Ο μετατροπέας DC/DC που υλοποιήθηκε είναι μετατροπέας ανύψωσης τάσης, που δέχεται στην είσοδό του την τάση εξόδου του Φ/Β πλαισίου και δίνει στην έξοδό του τάση ίση με αυτή της μπαταρίας ώστε η τελευταία να φορτιστεί. Ο μικροελεγκτής, ελέγχει τη λειτουργία του μετατροπέα και μέσω αλγορίθμου MPPT, οδηγεί το Φ/Β πλαίσιο σε λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος του. Τα Φ/Β στοιχεία τύπου Dye-Sensitized προορίζονται για εφαρμογές κατά τις οποίες δε θα μπορούν να μετακινούνται, όπως εγκατάσταση σε παράθυρα κτιρίων ή οροφές, οπότε θα δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία υπό διάφορες γωνίες κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ ταυτόχρονα θα λειτουργούν υπό διάφορες τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Επίσης, η φύση αυτών των εφαρμογών έχει ως αποτέλεσμα τα στοιχεία αυτά να λειτουργούν υπό διάφορες συνθήκες σκίασης, ολικής ή μερικής. Έτσι, αρχικά πραγματοποιήθηκε χαρακτηρισμός του Φ/Β πλαισίου για να εξακριβωθούν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του για αυτές τις συνθήκες και για συνδυασμούς τους. Με βάση τα αποτελέσματα του χαρακτηρισμού επιλέχθηκαν αλγόριθμοι MPPT που μπορούν να οδηγήσουν το Φ/Β πλαίσιο στο μέγιστο σημείο ισχύος, ανεξαρτήτως των συνθηκών πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας περιβάλλοντος ή σκίασης. Βάσει των αποτελεσμάτων του χαρακτηρισμού οι αλγόριθμοι MPPT που επιλέχθηκαν ήταν ο αλγόριθμος Perturb and Observe (P&O) και ο αλγόριθμος Constant Voltage (CV). Έγιναν πειράματα για να διαπιστωθεί η λειτουργία τους και η σύγκλισή τους στο σημείο μέγιστης λειτουργίας, ενώ στη συνέχεια έγινε σύγκρισή τους ώστε να βρεθεί ο πιο αποτελεσματικός. Επίσης έγιναν πειράματα για έλεγχο συμπεριφοράς των αλγορίθμων σε καταστάσεις απότομης σκίασης του Φ/Β πλαισίου. Δεύτερος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν το σύστημα να υλοποιηθεί ώστε να λειτουργεί αυτόνομα, χωρίς δηλαδή εξωτερική τροφοδοσία, αλλά να τροφοδοτείται από το ίδιο το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Τα επιμέρους στοιχεία του συστήματος επιλέχθηκαν ώστε να λειτουργούν υπό χαμηλή τάση (2.4 V) με στόχο να μπορούν να τροφοδοτηθούν από τη μπαταρία.

1.2 Σύνοψη κεφαλαίων

Η δομή αυτής της εργασίας είναι η εξής:

- Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας και των διαφορετικών τύπων Φ/Β στοιχείων που έχουν αναπτυχθεί. Περιγράφονται πιο αναλυτικά τα Dye-Sensitized Solar Cells, ο τρόπος κατασκευής τους και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας αυτής της τεχνολογίας.
- Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των μετατροπών DC-DC και αναλύεται πιο λεπτομερώς ο μετατροπέας DC/DC τύπου Boost. Επίσης, περιγράφονται εναλλακτικοί αλγόριθμοι MPPT.
- Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του συστήματος που υλοποιήθηκε και των επιμέρους στοιχείων του.
- Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα του χαρακτηρισμού του φωτοβολταϊκού πλαισίου και της λειτουργίας των αλγορίθμων MPPT.
- Στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και προτάσεις για μελλοντική μελέτη.

2.

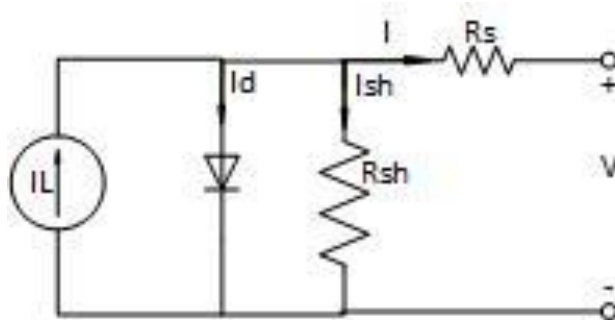
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

2.1 Φωτοβολταϊκή τεχνολογία

Στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε ο χαρακτηρισμός λειτουργίας ενός Φ/Β πλαισίου τύπου Dye-Sensitized (Dye-Sensitized Solar Cell, DSSC) που ανήκει στην κατηγορία των Φ/Β στοιχείων λεπτής μεμβράνης. Ένα συμβατικό Φ/Β στοιχείο αποτελείται από δύο κρυστάλλους πυριτίου με διαφορετικές προσμίξεις, έναν τύπου n (ημιαγωγός τύπου n) και έναν τύπου p (ημιαγωγός τύπου p). Ο κρύσταλλος τύπου n προσφέρει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και ο κρύσταλλος τύπου p προσφέρει τις οπές που χρειάζονται για να υπάρξει ηλεκτρική αγωγιμότητα. Όταν οι δύο αυτοί ημιαγωγοί έρθουν σε επαφή σχηματίζεται μια διόδος. Με την έκθεση αυτής της διάταξης σε ηλιακή ακτινοβολία, τα φωτόνια που προσπίπτουν και έχουν ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση από το ενεργειακό φράγμα του ημιαγωγού, διεγείρουν ηλεκτρόνια τα οποία απελευθερώνονται και στη θέση τους δημιουργούνται οπές. Αυτή η διαδικασία λέγεται φωτοδιέγερση. Από τη φωτοδιέγερση, δημιουργείται περίσσεια από ζεύγη φορέων φορτίου, πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Μερικοί από τους φορείς επανασυνδέονται και οι υπόλοιποι διαχωρίζονται από το ηλεκτρικό πεδίο της διόδου, και εκτρέπονται είτε προς το τμήμα τύπου n (ελεύθερα ηλεκτρόνια), είτε προς το τμήμα τύπου p (οπές), δημιουργώντας διαφορά δυναμικού στα άκρα του Φ/Β στοιχείου.

Αυτή η διαφορά δυναμικού αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, και με προσθήκη ενός φορτίου στα άκρα του Φ/Β στοιχείου, δημιουργείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου δίνεται στο Σχήμα 1. Περιλαμβάνει μια πηγή σταθερού ρεύματος σε συνδυασμό με μία ιδανική δίοδο. Στη συνέχεια τοποθετείται το μη-ιδανικό τμήμα του Φ/Β στοιχείου, το οποίο περιλαμβάνει αφενός την αντίσταση απωλειών του ρεύματος διαρροής μεταξύ των άκρων του Φ/Β στοιχείου (αντίσταση R_{sh}), η οποία είναι παράλληλα συνδεδεμένη στα άκρα της διόδου και αφετέρου την αντίσταση απωλειών από τα ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου (αντίσταση R_s).



Σχήμα 1: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα Φ/Β στοιχείου [1].

Τα υλικά και οι τρόποι κατασκευής των Φ/Β στοιχείων, καθορίζουν τη λειτουργία και την απόδοσή τους. Εν συντομία, κάποια κύρια είδη Φ/Β στοιχείων είναι τα εξής:

- Στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου

Αυτό είναι το πιο διαδεδομένο είδος Φ/Β στοιχείων. Για την κατασκευή των στοιχείων αυτών χρησιμοποιείται κυρίως κρυσταλλική επαφή p-n πυριτίου. Η μέγιστη απόδοση του Φ/Β στοιχείου από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο έχει φτάσει περίπου στο 23% με βάση το πρότυπο Standard Test Conditions [2].

- Στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Αυτά τα Φ/Β στοιχεία είναι αποτέλεσμα της κατεύθυνσης της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας προς τη μείωση του κόστους, που οδήγησε στην ανάπτυξη καινούριων τεχνικών κρυσταλλοποίησης του πυριτίου. Τα πολυκρυσταλλικά Φ/Β στοιχεία έχουν μικρότερη απόδοση (15%) σε σχέση με τα αντίστοιχα μονοκρυσταλλικά. Η κατασκευή των πολυκρυσταλλικών Φ/Β στοιχείων αρχίζει με την τήξη του πυριτίου και τη στερεοποίησή του, ώστε να προσανατολιστούν οι κρύσταλλοι

σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, σχηματίζοντας ορθογώνιες ράβδους πολυκρυσταλλικού πυριτίου που μπορούν να κοπούν σε wafers [2].

- Στοιχεία λεπτής μεμβράνης (thin film)

Τα Φ/Β στοιχεία λεπτής μεμβράνης κατασκευάζονται τοποθετώντας ένα ή περισσότερα λεπτά στρώματα ή μεμβράνες φωτοβολταϊκού υλικού, επάνω σε ένα υπόστρωμα όπως γυαλί ή διαφανές πλαστικό. Το πάχος των μεμβρανών κυμαίνεται από μερικά νανόμετρα (nm) έως δεκάδες μικρόμετρα (μm). Αυτό τα κάνει εύκαμπτα και πολύ ελαφριά. Συγκριτικά με τα κρυσταλλικά Φ/Β στοιχεία πυριτίου, η τεχνολογία των Φ/Β στοιχείων λεπτής μεμβράνης επιτυγχάνει μείωση του κόστους, μειώνοντας την ποσότητα του ημιαγωγού που απαιτείται για κάθε Φ/Β στοιχείο. Ο βαθμός απόδοσης των Φ/Β στοιχείων λεπτής μεμβράνης είναι γενικά μικρότερος από αυτόν των κρυσταλλικών στοιχείων.

- Στοιχεία άμορφου πυριτίου

Τα Φ/Β στοιχεία άμορφου πυριτίου ανήκουν στην κατηγορία των Φ/Β στοιχείων λεπτής μεμβράνης. Η εν λόγω τεχνολογία διαφέρει από αυτή του κρυσταλλικού πυριτίου στο γεγονός ότι τα άτομα πυριτίου είναι σε τυχαία θέση το ένα από το άλλο. Αυτή η τυχαία δομή των ατόμων έχει μια σημαντική επίδραση στις ηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού, προκαλώντας μεγαλύτερο ενεργειακό χάσμα σε σχέση με το κρυσταλλικό πυρίτιο. Το μεγαλύτερο ενεργειακό χάσμα επιτρέπει στα στοιχεία άμορφου πυριτίου να απορροφούν πιο έντονα το ορατό τμήμα του ηλιακού φάσματος απ' ό,τι το υπέρυθρο.

- Οργανικά Φ/Β στοιχεία (Organic Photovoltaic cells, OPV)

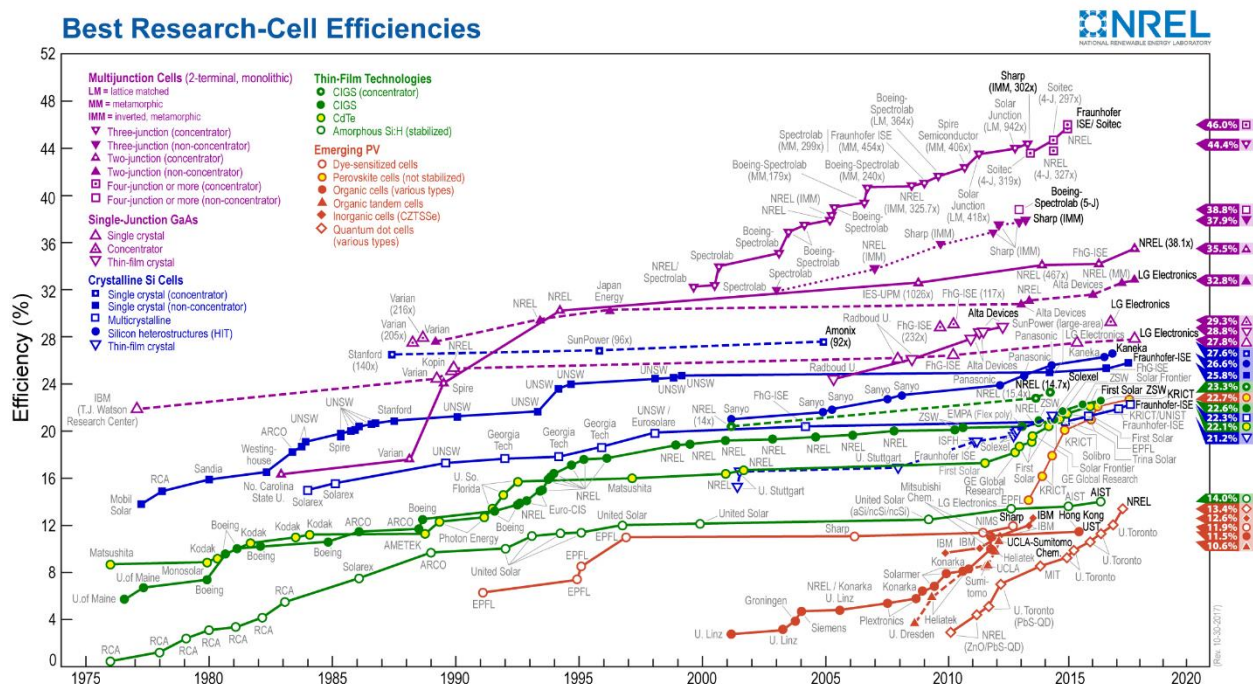
Τα οργανικά Φ/Β στοιχεία κατασκευάζονται από λεπτές μεμβράνες οργανικών ημιαγωγών όπως πολυμερή και ενώσεις μικρών μορίων. Η μεγαλύτερη απόδοση που έχει επιτευχθεί μέχρι τώρα είναι της τάξης του 11.5%. Κατασκευάζονται κυρίως από συνθετικά υλικά, σε αντίθεση με το πυρίτιο, οπότε η κατασκευαστική διαδικασία είναι οικονομικά αποδοτική (υλικό χαμηλότερου κόστους, υψηλή απόδοση παραγωγής) και τεχνικά ευκολότερη (δεν απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες). Τα Φ/Β στοιχεία αυτού του τύπου λειτουργούν ικανοποιητικά τόσο με άμεση ακτινοβολία, όσο και σε συνθήκες διάχυτου φωτισμού.

- Φ/Β στοιχεία τύπου Dye-Sensitized

Η διάταξη του συγκεκριμένου στοιχείου αποτελείται από ένα διαφανές αγωγίμο υπόστρωμα πάνω στο οποίο γίνεται εναπόθεση TiO_2 το οποίο παίζει το ρόλο της ανόδου. Στην επιφάνεια του TiO_2 τοποθετείται κατάλληλη χρωστική (ευαισθητοποιητής) και στη συνέχεια τοποθετείται ένα δεύτερο διαφανές αγωγίμο στρώμα το οποίο παίζει το ρόλο της καθόδου. Τέλος, μεταξύ των

ηλεκτροδίων παρεμβάλλεται κάποιος ηλεκτρολύτης. Τα Φ/Β στοιχεία τύπου Dye-Sensitized (Dye-Sensitized Solar Cells, DSSCs) κατασκευάζονται εύκολα, αξιοποιούν το φάσμα του ορατού φωτός και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή διαπερατών παραθύρων με ηλιακά στοιχεία. Η υψηλότερη απόδοση που έχει επιτευχθεί μέχρι σήμερα είναι της τάξης του 13.4% [3].

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται ένα γράφημα της εξέλιξης του βαθμού απόδοσης διάφορων φωτοβολταϊκών τεχνολογιών ανά έτος:



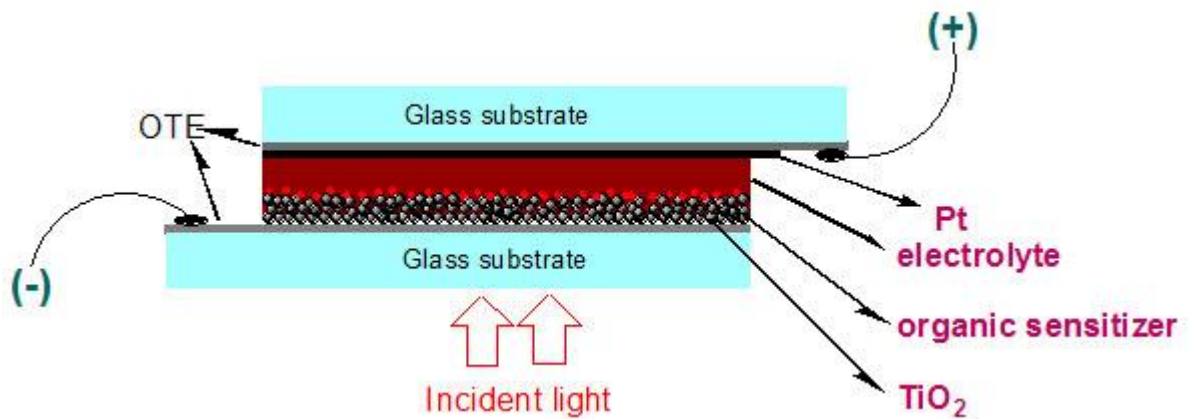
Σχήμα 2 : Πίνακας εξέλιξης του βαθμού απόδοσης τεχνολογιών Φ/Β στοιχείων [4].

Τα κρυσταλλικά Φ/Β στοιχεία είναι στοιχεία πρώτης γενιάς και τα Φ/Β στοιχεία λεπτής μεμβράνης είναι στοιχεία δεύτερης γενιάς. Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας έχει οδηγήσει στην εμφάνιση των Φ/Β στοιχείων τρίτης γενιάς όπως τα οργανικά, τα Dye-Sensitized, τα υβριδικά με περοβσκίτες κ.α. Το Φ/Β πλαίσιο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι τύπου Dye-Sensitized.

2.2 Τρόπος λειτουργίας των DSSCs

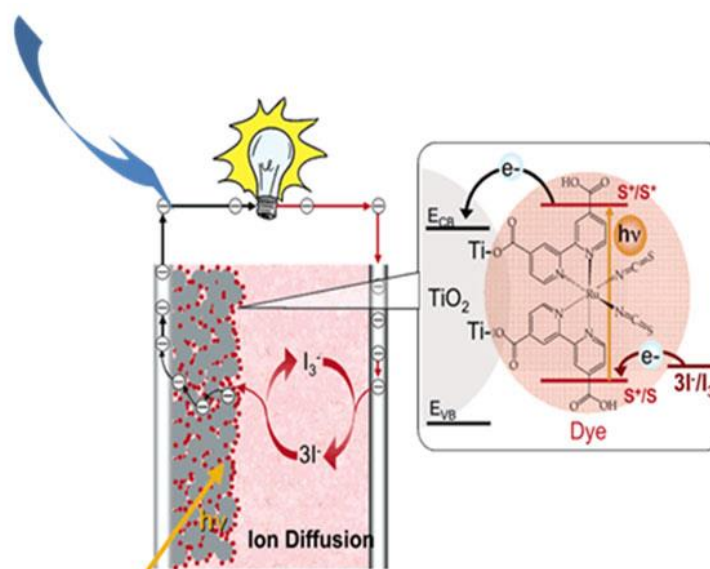
Τα DSSCs πρωτοεμφανίζονται την δεκαετία του 1990 ως εναλλακτικές λύσεις χαμηλού κόστους στα συνηθισμένα Φ/Β στοιχεία άμορφου πυριτίου, έχοντας ως πλεονέκτημα την ευκολία στην κατασκευή, το χαμηλό κόστος παραγωγής, καθώς και την επαρκή απόδοση ακόμα και σε συνθήκες χαμηλής ηλιοφάνειας ή μη απευθείας έκθεσης στο ηλιακό φως. Η απόδοσή τους είναι της τάξης του 11.5%. Τα Dye-Sensitized φωτοηλεκτροχημικά στοιχεία, αποτελούν την πιο πολλά υποσχόμενη, χαμηλού κόστους εναλλακτική λύση για την φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ενέργειας. Χρησιμοποιούν μια οργανική χρωστική ουσία για να μιμηθούν το φαινόμενο της φωτοσύνθεσης, όπου τα φυτά μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ενέργεια. Η πρώτη χρωστική ουσία εφευρέθηκε από τους Michael Gratzel και Brian O'Regan το 1988. Στα DSSCs τα ηλεκτρόνια του ρεύματος προέρχονται από την χρωστική ουσία, όταν αυτή απορροφά τα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο τρόπος λειτουργίας ενός DSSC διαφέρει από αυτόν των Φ/Β πυριτίου που χρησιμοποιούν ημιαγωγούς p και n. Τα DSSCs αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια, θετικό και αρνητικό, που κατασκευάζονται από διαφανή ηλεκτρικά αγωγίμα υλικά. Το θετικό ηλεκτρόδιο τοποθετείται επάνω σε μέταλλο, συνήθως λευκόχρυσο (Pt), και το αρνητικό ηλεκτρόδιο τοποθετείται πάνω σε μια επιφάνεια νανο-σωματιδίων συνήθως διοξειδίου του τιτανίου (TiO_2) με προσμίξεις χρωστικής ουσίας. Ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια υπάρχει υγρό αγωγίμο υλικό που ονομάζεται ηλεκτρολύτης και συνήθως παρασκευάζεται από ιόντα ιωδίου (I_3^-/I^-).

Στο Σχήμα 3 φαίνεται η εσωτερική δομή ενός Dye-Sensitized Φ/Β στοιχείου. Το εξωτερικό στρώμα είναι μια λεπτή γυάλινη επιφάνεια (Glass). Αμέσως μετά φαίνεται το αρνητικό ηλεκτρόδιο (-) το οποίο είναι διάφανο. Το φως διαπερνά το γυαλί και προσπίπτει στην επιφάνεια νανο-σωματιδίων (TiO_2) που περιέχει τις προσμίξεις της χρωστικής (Dye-Sensitizer). Αυτά με τη σειρά τους έρχονται σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη (Electrolyte). Στην άλλη πλευρά διακρίνεται η μεταλλική επιφάνεια λευκόχρυσου (Pt) επάνω στην οποία τοποθετείται το θετικό ηλεκτρόδιο (+).



Σχήμα 3: Η κατασκευή ενός Dye-Sensitized Φ/Β στοιχείου [5].

Το ηλιακό φως που προσπίπτει στο Φ/Β στοιχείο, περνά μέσα από το γυάλινο υπόστρωμα και απορροφάται από τη χρωστική, όπου διεγείρει τα ηλεκτρόνια της, τα οποία μεταβαίνουν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Αυτό το φαινόμενο λέγεται φωτοδιέγερση. Έπειτα εισέρχονται στο διοξείδιο τιτανίου (TiO_2), το οποίο λειτουργεί ως ημιαγωγός, και στη συνέχεια, τα διεγερμένα ηλεκτρόνια μεταβαίνουν στο αρνητικό ηλεκτρόδιο. Από εκεί, κινούνται μέσω ηλεκτρικού κυκλώματος και καταλήγουν στο θετικό ηλεκτρόδιο. Τέλος, κατευθύνονται προς τον ηλεκτρολύτη (I_3^-/I^-) ο οποίος τα μεταφέρει πίσω στα μόρια της χρωστικής. Το μόριο χρωστικής, έχοντας χάσει ένα ηλεκτρόνιο το οποίο δεσμεύτηκε από το διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2), οξειδώνεται, επομένως έχει ένα λιγότερο ηλεκτρόνιο από πριν. Η χρωστική δέχεται ένα ηλεκτρόνιο από τον ηλεκτρολύτη ιωδίου και επανέρχεται στην αρχική της, ουδέτερη κατάσταση [6, 10]. Στο Σχήμα 4 φαίνεται η εσωτερική λειτουργία ενός DSSC.



Σχήμα 4: Εσωτερική λειτουργία ενός DSSC [5].

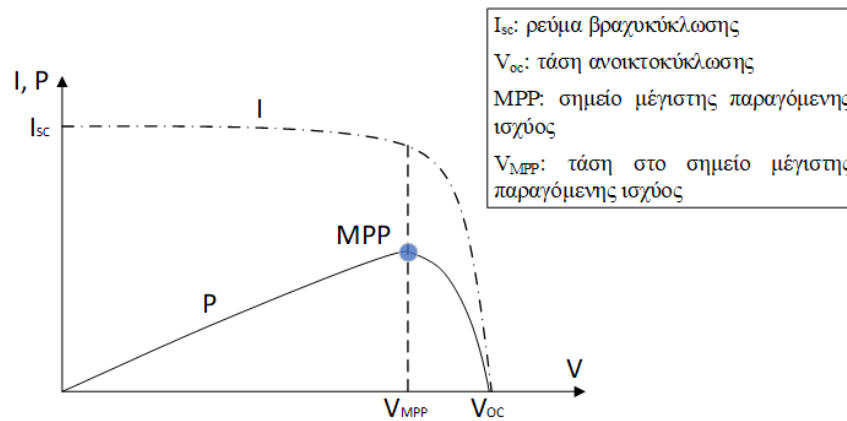
Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται και το Φ/Β στοιχείο παράγει ρεύμα όταν δεχτεί ηλιακή ακτινοβολία χωρίς να συμβαίνουν μόνιμες χημικές μετατροπές στο εσωτερικό του.

Ο τρόπος λειτουργίας ενός DSSC διαφέρει από αυτόν των Φ/Β πυριτίου που χρησιμοποιούν ημιαγωγούς p και n. Η κυριότερη διαφορά είναι ότι στα DSSCs η λειτουργία απορρόφησης του φωτός και η λειτουργία κίνησης των ηλεκτρονίων γίνονται σε διαφορετικά υλικά σε αντίθεση με τα συμβατικά Φ/Β στοιχεία p-n επαφής όπου αυτές οι λειτουργίες γίνονται στο ίδιο υλικό. Στα DSSCs η απορρόφηση του φωτός γίνεται από τα μόρια της χρωστικής ουσίας, απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια, τα ηλεκτρόνια κινούνται στον ημιαγωγό (TiO_2) και τα θετικά ιόντα προς τον ηλεκτρολύτη όπου επανασυνδέονται με ηλεκτρόνια του τελευταίου. Παρόλο που η χρωστική είναι πολύ αποτελεσματική στη μετατροπή των φωτονίων σε ελεύθερα ηλεκτρόνια στο TiO_2 , μόνο τα φωτόνια που απορροφά η χρωστική παράγουν τελικά ρεύμα. Το ποσοστό εισερχόμενων φωτονίων και παραγόμενων ηλεκτρονίων εξαρτάται από το φάσμα απορρόφησης του TiO_2 και από τη φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας. Η μέγιστη παραγωγή ρεύματος καθορίζεται από την επικάλυψη των δύο αυτών φασμάτων. Τα μόρια χρωστικής έχουν συνήθως χαμηλότερη απορρόφηση στο ερυθρό τμήμα του φάσματος σε σύγκριση με το πυρίτιο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα λιγότερα φωτόνια να προκαλούν διέγερση ηλεκτρονίων στη χρωστική, επηρεάζοντας αρνητικά την ένταση του παραγόμενου ρεύματος [7].

2.3 Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των Φ/Β στοιχείων

Η παραγωγή ενέργειας από ένα Φ/Β στοιχείο εξαρτάται από το σημείο λειτουργίας του, το οποίο είναι το ζεύγος τιμών παραγόμενου ρεύματος και τάσης εξόδου του Φ/Β στοιχείου. Το γινόμενο τους δίνει την ισχύ που παράγει το στοιχείο. Το ρεύμα εξόδου παίρνει τιμές από 0 έως I_{sc} (A) (ρεύμα βραχυκύκλωσης) και η τάση του τις τιμές από 0 (V) έως V_{oc} (τάση ανοικτοκύκλωσης). Από αυτό το σύνολο όλων των σημείων (ζεύγη τιμών τάσης-ρεύματος) προκύπτει ένα σημείο μέγιστης παραγόμενης ισχύος, το οποίο είναι το επιθυμητό σημείο λειτουργίας. Ένα σύστημα διαχείρισης της ενέργειας του Φ/Β στοιχείου έχει σκοπό να βρεθεί το σημείο μέγιστης ισχύος και να οδηγήσει το Φ/Β στοιχείο στο να λειτουργήσει στο σημείο αυτό.

Η παραγόμενη ισχύς ενός Φ/Β στοιχείου εξαρτάται κυρίως από την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία. Όσο μεγαλύτερη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας δέχεται ένα Φ/Β στοιχείο, τόσο περισσότερο ρεύμα και κατ' επέκταση ισχύ παράγει, ενώ με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται μείωση της μέγιστης ισχύος. Οι δύο τυπικές χαρακτηριστικές καμπύλες ενός Φ/Β στοιχείου έχουν τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5: Τυπικές χαρακτηριστικές καμπύλες I - V και P - V Φ/Β στοιχείων.

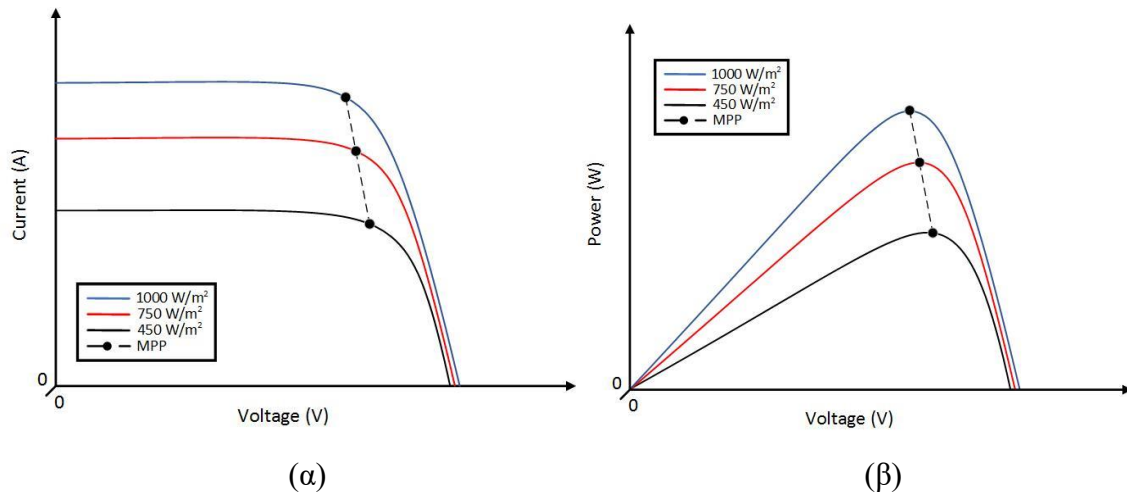
Κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο συνοδεύεται από τέτοιες χαρακτηριστικές καμπύλες, που δίνουν τις παρακάτω πληροφορίες στις πρότυπες συνθήκες λειτουργίας (Standard Test Conditions, STC: 1000W/m^2 ακτινοβολία, 25°C θερμοκρασία και Air Mass: 1.5):

1. Για δεδομένες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, η μέγιστη τιμή τάσης στα άκρα του Φ/Β στοιχείου, V_{oc} , εμφανίζεται όταν τα άκρα του είναι ανοικτοκυκλωμένα, τότε $I_{oc}=0$.
2. Το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να παραχθεί, I_{sc} , αναπτύσσεται όταν τα άκρα του στοιχείου είναι βραχυκυκλωμένα, και τότε $V_{sc}=0$. Σε αυτά τα δύο σημεία η ισχύς που παράγει το Φ/Β στοιχείο είναι 0.
3. Το σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point, MPP) είναι το ζεύγος τιμών της τάσης και της έντασης του ρεύματος που μεγιστοποιεί την παραγόμενη ισχύ $P = V \cdot I$.

Παρατηρείται λοιπόν πως η σχέση έντασης ρεύματος και τάσης των Φ/Β στοιχείων δεν είναι γραμμική, αλλά η ένταση του παραγόμενου ρεύματος ενός Φ/Β στοιχείου εξαρτάται από την τιμή της τάσης στα άκρα του με τρόπο όπως αυτός που φαίνεται στο Σχήμα 5.

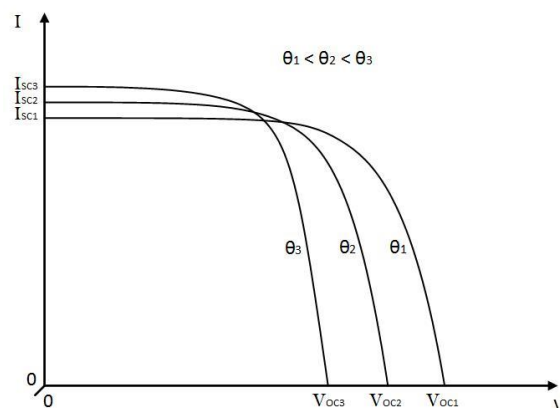
Παρατηρώντας την παραπάνω χαρακτηριστική, είναι κατανοητό πως, δοθείσης σταθερής προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο Φ/Β στοιχείο, κάθε αλλαγή της τάσης λειτουργίας συνεπάγεται αλλαγή του ρεύματος. Ελέγχοντας ένα μεγάλο φάσμα τάσεων, με αλλαγή της αντίστασης στα άκρα του Φ/Β στοιχείου μπορεί να βρεθεί το σημείο MPP. Στο σημείο MPP το Φ/Β στοιχείο έχει τη μέγιστη απόδοσή του για τις τρέχουσες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Είναι επίσης κατανοητό ότι κατά τη διάρκεια της ημέρας η ένταση της προσπίπτουσας στο Φ/Β στοιχείο ηλιακής ακτινοβολίας μεταβάλλεται συνεχώς, καθώς ο Ήλιος αλλάζει θέση, οπότε μεταβάλλονται αντιστοίχως η τιμή του παραγόμενου ρεύματος και η αντίστοιχη ισχύς. Επίσης,

σε μια συννεφιασμένη ημέρα υπάρχουν περισσότερες και μεγαλύτερες διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ υφίσταται και το ενδεχόμενο ολικής ή μερικής σκίασης του στοιχείου. Στο Σχήμα 6 απεικονίζεται η αλλαγή του MPP σε σχέση με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε ένα τυπικό φωτοβολταϊκό στοιχείο.



Σχήμα 6: (α) Τυπική χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης ($I-V$) ενός Φ/B στοιχείου και (β) Τυπική χαρακτηριστική ισχύος-τάσης ($P-V$) ενός Φ/B στοιχείου.

Σημαντικό ρόλο παίζει και η θερμοκρασία, η οποία όταν αυξάνεται προκαλεί μεν μικρή αύξηση του ρεύματος I_{sc} , αλλά μεγάλη πτώση της τάσης V_{oc} , έχοντας ως αποτέλεσμα τη μείωση της μέγιστης ισχύος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7 [8].

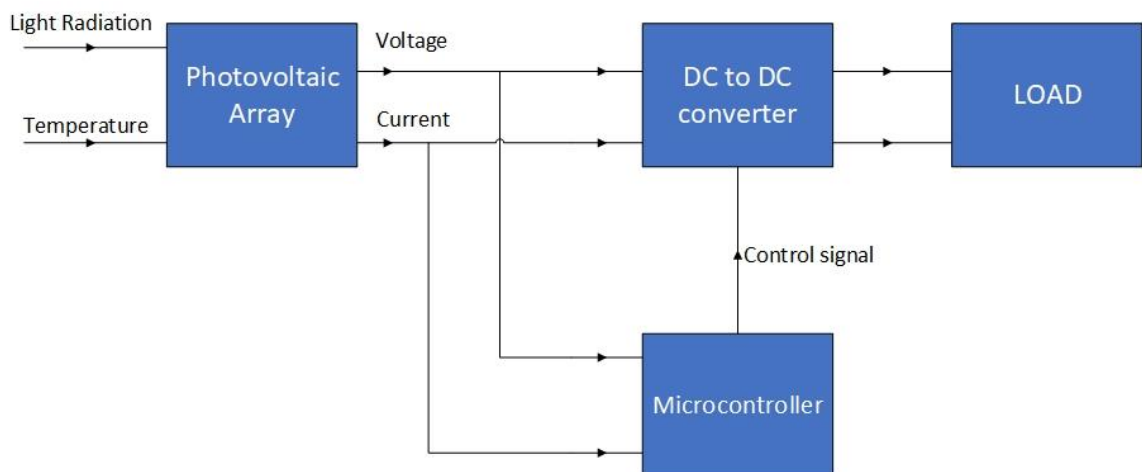


Σχήμα 7: Επίδραση της θερμοκρασίας ($\theta_1-\theta_3$) στη χαρακτηριστική $I-V$ [8].

Τα Φ/Β πλαίσια του εμπορίου συνοδεύονται από ειδικούς θερμοκρασιακούς συντελεστές που δείχνουν τη μεταβολή των παραπάνω στοιχείων με τη μεταβολή της θερμοκρασίας :

- θερμοκρασιακός συντελεστής ρεύματος I_{sc} ,
- θερμοκρασιακός συντελεστής τάσης V_{oc} και
- θερμοκρασιακός συντελεστής ισχύος P_{MPP} .

Η μετακίνηση του σημείου MPP με τις αλλαγές στις μετεωρολογικές συνθήκες υπό τις οποίες λειτουργεί το Φ/Β στοιχείο, οδήγησε στο να αναπτυχθούν συστήματα που βρίσκουν δυναμικά το σημείο MPP και οδηγούν το Φ/Β στοιχείο στην παραγωγή της μέγιστης δυνατής ισχύος για κάθε τιμή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ή θερμοκρασίας. Ένα τέτοιο σύστημα ονομάζεται ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracker, MPPT). Ο πιο διαδεδομένος τρόπος δημιουργίας ενός συστήματος MPPT χρησιμοποιεί έναν μετατροπέα DC/DC, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8. Το σύστημα ελέγχου μεταβάλλει τη σχετική διάρκεια αγωγής (duty cycle) του διακοπτικού transistor του μετατροπέα DC/DC, αλλάζοντας την τάση εισόδου του, ώστε να είναι ίδια με την τάση εξόδου του Φ/Β στοιχείου που παράγει τη μέγιστη δυνατή ισχύ (MPP). Ο έλεγχος της τιμής της σχετικής διάρκειας αγωγής γίνεται με χρήση αλγορίθμων σε έναν μικροελεγκτή και θα περιγραφεί παρακάτω.



Σχήμα 8: Διάγραμμα συστήματος MPPT με DC/DC converter.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, υλοποιήθηκε ένα τέτοιο σύστημα MPPT για ένα Dye-Sensitized Φ/Β πλαίσιο χαμηλής ισχύος. Το ίδιο το σύστημα βελτιστοποιήθηκε ώστε να λειτουργεί αυτόνομα, καταναλώνοντας ένα μικρό μέρος της παραγόμενης ισχύος, και να οδηγεί

το Φ/Β πλαίσιο ώστε να λειτουργεί στο σημείο MPP την κάθε χρονική στιγμή και να αποθηκεύει την παραγόμενη ενέργεια σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Ο υπολογισμός της απόδοσης ενός Φ/Β στοιχείου γίνεται με την εξής σχέση:

$$n\% = \frac{P_m}{P_{inc}} = \frac{I_m V_m}{P_{inc}} = \frac{I_{sc} V_{oc} ff}{P_{inc}} \times 100\% \quad (1)$$

όπου:

V_{oc} : η τάση ανοικτοκύκλωσης

I_{sc} : το ρεύμα βραχυκύκλωσης

ff: ο συντελεστής fill factor και

P_{inc} : η ισχύς της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

2.4 Αλγόριθμοι MPPT

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για να λειτουργεί το Φ/Β στοιχείο στο σημείο MPP πρέπει να εξοπλιστεί με ένα σύστημα εύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT). Με έλεγχο του duty cycle του μετατροπέα DC/DC μπορεί να αλλάζει το φορτίο που αναπτύσσεται στην έξοδο του Φ/Β στοιχείου, άρα το παραγόμενο ρεύμα και κατ' επέκταση η παραγόμενη ισχύς. Με τη βοήθεια ενός αλγορίθμου MPPT μπορεί το σύστημα να εντοπίσει το σημείο MPP, δηλαδή τον συνδυασμό τάσης-ρεύματος, που μεγιστοποιεί την παραγόμενη ισχύ και να οδηγήσει το Φ/Β στοιχείο ώστε να λειτουργήσει σε αυτό το βέλτιστο σημείο. Καθώς οι συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας αλλάζουν συνεχώς, μεταβάλλεται αντιστοίχως και το MPP. Ο αλγόριθμος MPPT ελέγχει την τάση και το ρεύμα που παράγονται από το Φ/Β στοιχείο σε πραγματικό χρόνο εξασφαλίζοντας πως το σύστημα θα οδηγεί το Φ/Β στοιχείο ώστε να παράγει τη μέγιστη ισχύ για τις τρέχουσες κάθε στιγμή μετεωρολογικές συνθήκες. Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι MPPT οι οποίοι ενώ έχουν τον ίδιο στόχο (λειτουργία στο MPP), διαφέρουν στον τρόπο εύρεσης του MPP αλλά και σε άλλες παραμέτρους με κύριες τις παρακάτω:

- ταχύτητα εύρεσης MPP,
- ακρίβεια εύρεσης MPP,
- απαιτούμενες είσοδοι και
- πολυπλοκότητα υλοποίησης (αλγορίθμου και hardware).

Μία πολύ σημαντική παράμετρος επίσης είναι η γνώση της κατεύθυνσης προς τη λύση. Όπως εξηγήθηκε παραπάνω (Σχήμα 6), η χαρακτηριστική $P-V$ ενός Φ/B στοιχείου έχει τη μορφή λοβού (ή λόφου), επομένως για την εύρεση του MPP είναι πολύ σημαντική η γνώση της θέσης του τρέχοντος σημείου λειτουργίας ως προς το μέγιστο. Αν για παράδειγμα ο αλγόριθμος γνωρίζει ότι βρίσκεται δεξιά του MPP μπορεί να κατευθυνθεί προς τα αριστερά ώστε να φτάσει στο MPP γρηγορότερα απ' ό,τι αν έπρεπε να ελέγξει και τις δύο πιθανές κατευθύνσεις. Η πρακτική αυτή θα εξηγηθεί αναλυτικότερα παρακάτω.

Επίσης πολύ σημαντικός παράγοντας είναι οι συνθήκες σκίασης του Φ/B στοιχείου. Η μορφή λοβού που παρατηρείται στην $P-V$ χαρακτηριστική ενός Φ/B στοιχείου, είναι συνήθως αποτέλεσμα μέτρησης χωρίς σκίαση στην επιφάνεια του στοιχείου. Σε τέτοιες συνθήκες η χαρακτηριστική έχει ένα ολικό μέγιστο σημείο και όσο ο αλγόριθμος προχωρά προς μεγαλύτερη μετρούμενη ισχύ, προχωρά προς το MPP. Σε πραγματικές συνθήκες όμως, το Φ/B στοιχείο μπορεί σκιάζεται μερικώς ή ολικώς σε κάποια διαστήματα της ημέρας. Ως αποτέλεσμα εμφανίζονται τοπικά σημεία MPP στη χαρακτηριστική $P-V$. Αν αυτά δε ληφθούν υπόψη, ίσως ο αλγόριθμος να εγκλωβιστεί σε κάποιο από αυτά και το σύστημα να λειτουργεί πολύ μακριά από το ολικό βέλτιστο MPP, μειώνοντας δραματικά την παραγόμενη ισχύ άρα και την απόδοση. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικοί από τους πιο διαδεδομένους αλγόριθμους MPPT που έχουν χρησιμοποιηθεί:

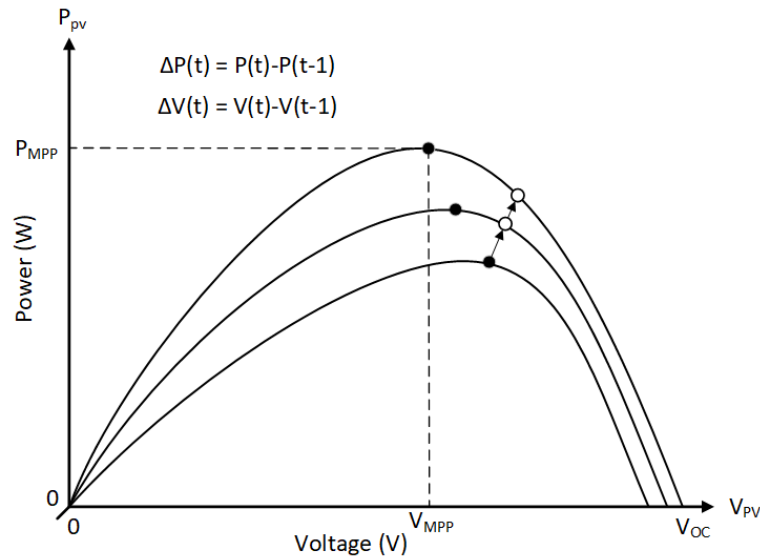
- Exhaustive Search

Ο πιο απλός αλγόριθμος εύρεσης του σημείου MPP είναι η εξαντλητική αναζήτηση (Exhaustive Search). Η εν λόγω μέθοδος αλλάζει συνεχώς τη σχετική διάρκεια αγωγής του σήματος ελέγχου του μετατροπέα DC/DC, έτσι ώστε να πάρει πολλές από τις δυνατές τιμές και έτσι λαμβάνεται όλη η χαρακτηριστική $P-V$ του Φ/B στοιχείου για τις παρούσες συνθήκες. Έχοντας όλη την καμπύλη $P-V$ είναι πολύ εύκολο να βρεθεί η μέγιστη ισχύς, και επομένως και οι τιμές τάσης και σχετικής διάρκειας αγωγής για τις οποίες παράγεται η μέγιστη ισχύς.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε για τον χαρακτηρισμό του συστήματός που υλοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Λαμβάνοντας ολόκληρες χαρακτηριστικές $P-V$ για διάφορες συνθήκες ακτινοβολίας και σκίασης, διαπιστώθηκε η συμπεριφορά του Φ/B πλαισίου σε διάφορες συνθήκες, ώστε να επιλεγθούν οι βέλτιστοι αλγόριθμοι που θα εγγυώνται τη λειτουργία στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος σε όλες τις πιθανές μετεωρολογικές συνθήκες.

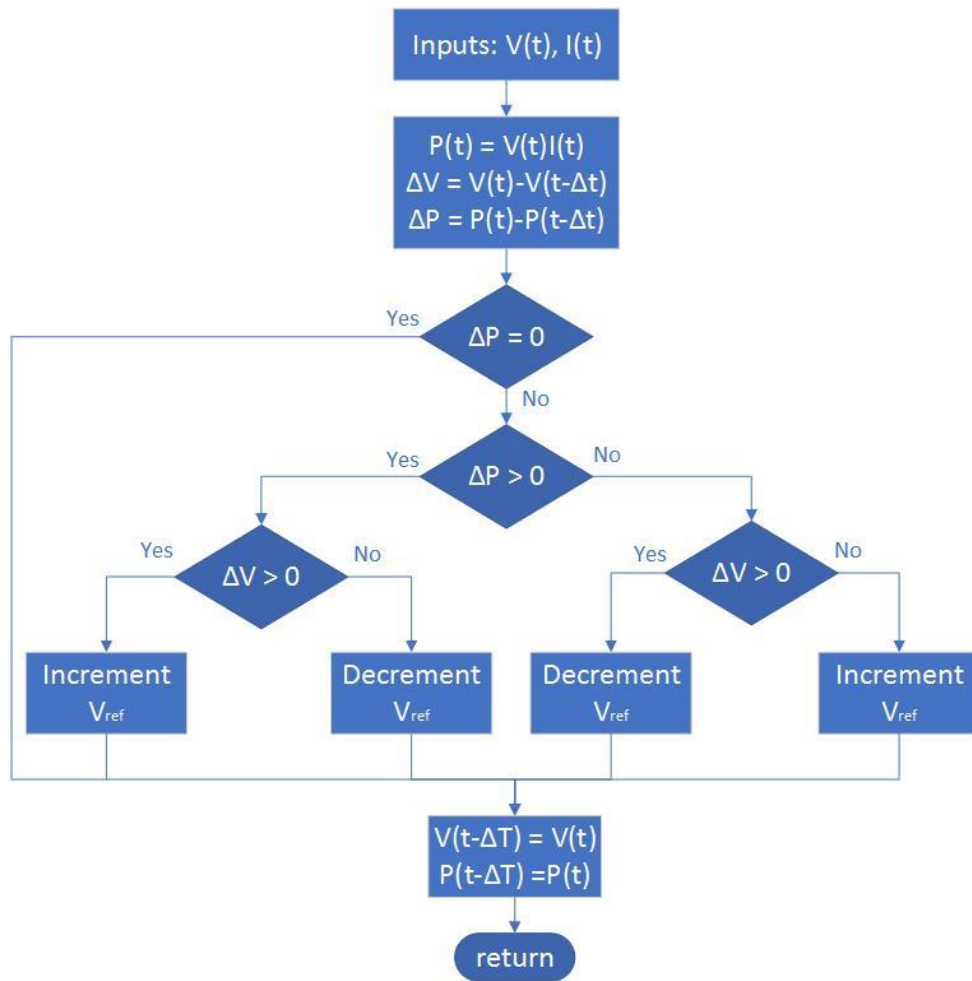
- P&O (Perturb and Observe)

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος MPPT είναι η μέθοδος P&O (Perturb and Observe), στην οποία υπολογίζεται και παρακολουθείται η παραγόμενη ισχύς από το Φ/Β στοιχείο διαταράσσοντας το τρέχον σημείο λειτουργίας. Μόλις βρεθεί η μέγιστη ισχύς, ο αλγόριθμος ταλαντώνεται γύρω από το MPP. Ο αλγόριθμος P&O είναι ο πιο διαδεδομένος αλγόριθμος MPPT, λόγω της απλής λογικής του και της εύκολης υλοποίησής του. Υπάρχουν πολλές εναλλακτικές υλοποιήσεις του P&O. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στη διατάραξη (perturbation) και παρατήρηση (observation) του σημείου λειτουργίας του Φ/Β στοιχείου. Ο αλγόριθμος φτάνει στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος μετρώντας την τάση και το παραγόμενο ρεύμα του Φ/Β στοιχείου. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η παραγόμενη ισχύς και το σύστημα ελέγχου αλλάζει την τάση προς την κατεύθυνση που μεγιστοποιείται η παραγόμενη ισχύς. Αν υπάρχει αύξηση της ισχύος, θα πρέπει να διατηρηθεί η διαταραχή προς την ίδια κατεύθυνση ώστε προοδευτικά να υπάρξει σύγκλιση στο MPP. Διαφορετικά, σε περίπτωση μείωσης, η κατεύθυνση της διαταραχής αντιστρέφεται. Το σημείο λειτουργίας του συστήματος εξαρτάται από τη σχετική διάρκεια αγωγής του σήματος ελέγχου του μετατροπέα DC/DC. Όπως εξηγήθηκε παραπάνω η σχετική διάρκεια αγωγής καθορίζει το φορτίο στα άκρα του Φ/Β στοιχείου μεταβάλλοντας την τάση και το παραγόμενο ρεύμα και επομένως τη παραγόμενη ισχύ. Για μια αρχική τιμή σχετικής διάρκειας αγωγής θα μετρηθούν η τάση και το ρεύμα (το γινόμενο τους δίνει την παραγόμενη ισχύ) και αυτές οι τιμές είναι οι τιμές αρχικοποίησης. Έπειτα διαταράσσεται το σημείο λειτουργίας, γίνεται εκ νέου μέτρηση και λαμβάνονται οι τρέχουσες τιμές. Μετά τη διατάραξη υπολογίζεται η διαφορά της τρέχουσας τάσης από την προηγούμενη τάση που μετρήθηκε $\Delta V = V(t) - V(t - \Delta t)$, καθώς και η διαφορά της τρέχουσας ισχύος από την προηγούμενη ισχύ $\Delta P = P(t) - P(t - \Delta t)$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 9: Συμπεριφορά αλγορίθμου P&O όταν υπάρχουν αλλαγές στο MPP [14].

Αν παρατηρηθεί αύξηση της ισχύος και αύξηση της τάσης της πηγής (Φ/Β στοιχείο, πλαίσιο ή συστοιχία), αυτό συνεπάγεται πως το τρέχον σημείο λειτουργίας βρίσκεται αριστερά του MPP. Επομένως, ο αλγόριθμος θα συνεχίσει να αυξάνει την τάση της πηγής όσο αυτό οδηγεί σε αύξηση της ισχύος. Αν παρατηρηθεί αύξηση της ισχύος και μείωση της τάσης της πηγής, αυτό συνεπάγεται πως το τρέχον σημείο λειτουργίας βρίσκεται δεξιά του MPP. Ο αλγόριθμος τότε θα συνεχίσει να μειώνει την τάση της πηγής όσο αυτό οδηγεί σε αύξηση της ισχύος. Το αντίστροφο θα συμβεί αν παρατηρηθεί μείωση της ισχύος με αλλαγές της τάσης πηγής. Αν παρατηρηθεί μείωση της ισχύος και αύξηση της τάσης της πηγής, τότε το τρέχον σημείο λειτουργίας βρίσκεται δεξιά του MPP οπότε ο αλγόριθμος θα αρχίσει να μειώνει την τάση της πηγής όσο αυτό οδηγεί σε αύξηση της ισχύος. Αν παρατηρηθεί μείωση της ισχύος και μείωση της τάσης της πηγής, τότε το τρέχον σημείο λειτουργίας βρίσκεται αριστερά του MPP οπότε ο αλγόριθμος θα αρχίσει να αυξάνει την τάση της πηγής όσο αυτό οδηγεί σε αύξηση της ισχύος [9]. Η λειτουργία του αλγορίθμου φαίνεται πιο αναλυτικά μέσα από το διάγραμμα ροής στο Σχήμα 10.



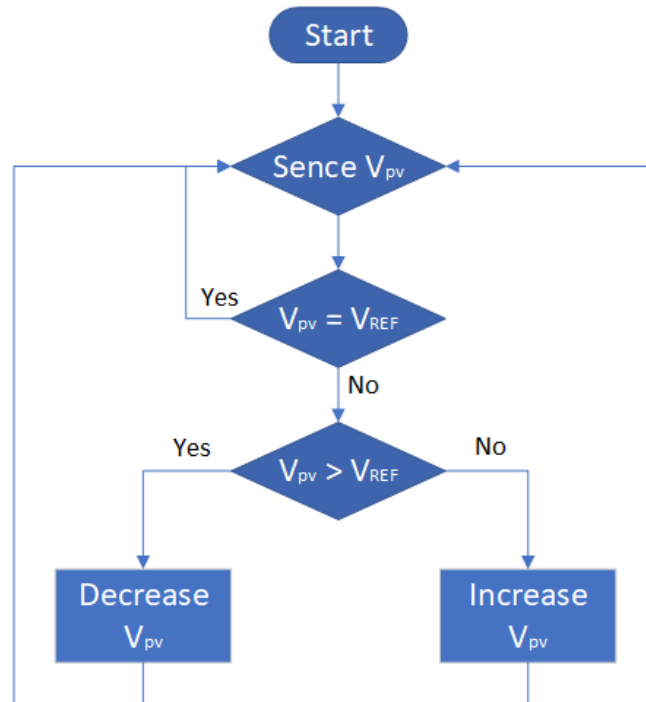
Σχήμα 10: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου P&O.

Από τα παραπάνω είναι κατανοητό πως ο αλγόριθμος P&O δεν έχει τρόπο να καταλήξει στο αν βρέθηκε το MPP αλλά θα ταλαντώνεται μεταξύ του MPP και των γειτονικών του σημείων. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα ένα χαμένο ποσό ισχύος. Το ποσό αυτό μπορεί να μειωθεί, ελαττώνοντας τη διαφορά τάσης μεταξύ γειτονικών σημείων, αλλά αυτό με τη σειρά του αυξάνει τα συνολικά σημεία τάσεων που πρέπει να διερευνηθούν και καθυστερεί την εύρεση του MPP. Τέλος, προκαλείται μεγάλη απώλεια ισχύος αν ο αλγόριθμος εγκλωβιστεί σε τοπικά μέγιστα στην περίπτωση μερικής σκίασης του Φ/Β πλαισίου (ή συστοιχίας).

- Constant Voltage

Η μέθοδος αυτή είναι πολύ απλή στην υλοποίηση και παρέχει γρήγορα αποτελέσματα, αλλά μικρής ακρίβειας. Χρησιμοποιεί μόνο μία είσοδο, την τάση λειτουργίας του Φ/Β στοιχείου. Το σήμα ελέγχου ρυθμίζει την τάση λειτουργίας του Φ/Β στοιχείου, συγκρίνοντάς την με μία

σταθερή τιμή (V_{ref}). Η V_{ref} μπορεί να οριστεί με διάφορους τρόπους όπως να ισούται με την τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος (V_{MPP}) στις συνθήκες του προτύπου STC. Ο αλγόριθμος δέχεται μία μέτρηση της τάσης λειτουργίας του Φ/Β στοιχείου, τη συγκρίνει με την V_{ref} και αλλάζει το σημείο λειτουργίας του Φ/Β ώστε η τάση του να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερη στην V_{ref} . Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Constant Voltage φαίνεται στο Σχήμα 11 [8].



Σχήμα 11: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου Constant Voltage [8].

- Incremental-Conductance

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι η κλίση στην κορυφή της χαρακτηριστικής P-V είναι ίση με το μηδέν. Η κλίση είναι θετική στην πλευρά αριστερά του MPP και αρνητική στην πλευρά δεξιά του MPP. Μετρώντας τις αλλαγές στη τάση λειτουργίας και το παραγόμενο ρεύμα ενός Φ/Β στοιχείου μπορεί να προβλέψει την επίδραση μιας αλλαγής στην τάση [10].

Μαθηματικά αυτό εκφράζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 dP / dV &= 0, \text{ MPP} \\
 dP / dV &> 0, \text{ αριστερά του MPP} \\
 dP / dV &< 0, \text{ δεξιά του MPP}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Αυτό μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (3)$$

Από τις (2) και (3) προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} dI / dV &= -I / V, \text{ στο MPP} \\ dI / dV &> -I / V, \text{ αριστερά του MPP} \\ dI / dV &< -I / V, \text{ δεξιά του MPP} \end{aligned} \quad (4)$$

- Current Sweep

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μια κυματομορφή σάρωσης για το ρεύμα εξόδου του Φ/Β στοιχείου έτσι ώστε να βρίσκει τη χαρακτηριστική καμπύλη I-V και να την ενημερώνει σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα. Η τάση του σημείου μέγιστης ισχύος μπορεί στη συνέχεια να υπολογιστεί από τη χαρακτηριστική καμπύλη στα ίδια χρονικά διαστήματα.

- Fractional Open-Circuit Voltage

Η μέθοδος αυτή δεν υπολογίζει ακριβώς το MPP αλλά φτάνει σε μία εκτίμηση του. Η βασική ιδέα είναι ότι το MPP είναι ανάλογο της τάσης ανοικτοκύκλωσης V_{oc} :

$$V_{MPP} = k \cdot V_{oc} \quad (5)$$

όπου k είναι η σταθερά της αναλογίας και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του Φ/Β στοιχείου.

Ο αλγόριθμος μετράει περιοδικά την V_{oc} και υπολογίζει το MPP χρησιμοποιώντας την εξίσωση (5). Η μέθοδος παρέχει μια εκτίμηση του MPP, οπότε το σύστημα ουσιαστικά δεν λειτουργεί ποτέ στη βέλτιστη κατάσταση [13].

- Fractional Short-Circuit Current

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο γεγονός πως η ένταση του ρεύματος στο MPP (I_{MPP}) είναι γραμμικά ανάλογη του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{sc} του Φ/Β στοιχείου, βάσει της εξίσωσης (6):

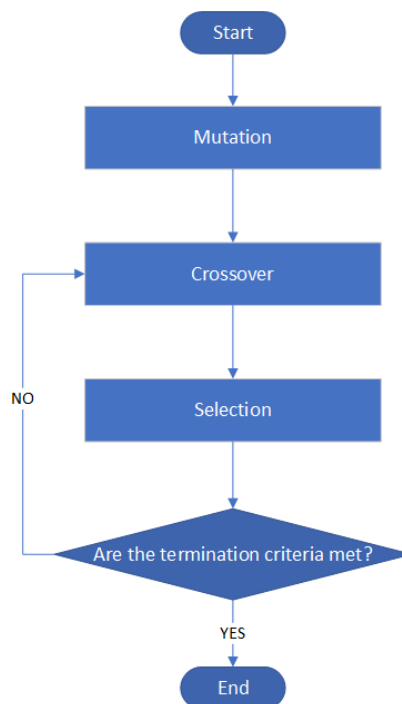
$$I_{MPP} = k \cdot I_{sc} \quad (6)$$

Ομοίως με την προηγούμενη μέθοδο η σταθερά k εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του Φ/Β στοιχείου και η μέθοδος αυτή βρίσκει μια προσέγγιση του MPP, χωρίς να εγγυάται ακρίβεια στη λύση [13].

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στη περίπτωση μερικής σκίασης ή πολύ μικρής ακτινοβολίας υπάρχει κίνδυνος εγκλωβισμού του αλγορίθμου MPPT σε τοπικά μέγιστα. Διάφοροι αλγόριθμοι που αντιμετωπίζουν αυτό το πρόβλημα έχουν προταθεί, με κυριότερους τους εξής:

- Αλγόριθμος διαφορικής εξέλιξης (Differential Evolution)

Ο αλγόριθμος διαφορικής εξέλιξης είναι μέλος των γενετικών αλγορίθμων και είναι ένας στοχαστικός, πληθυσμιακός αλγόριθμος βελτιστοποίησης. Η διαδικασία βελτιστοποίησης διεξάγεται όπως και στους γενετικούς αλγόριθμους, χρησιμοποιώντας τρεις τελεστές: διασταύρωση (crossover), μετάλλαξη (mutation) και επιλογή (selection). Η κύρια διαφορά είναι ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι βασίζονται κυρίως στη λειτουργία της διασταύρωσης, ενώ η διαφορική εξέλιξη βασίζεται κυρίως στη λειτουργία της μετάλλαξης. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τη λειτουργία μετάλλαξης ως μηχανισμό αναζήτησης και επιλογής για να κατευθύνει την αναζήτηση, Σχήμα 12 [12].



Σχήμα 12 : Διάγραμμα ροής αλγορίθμου Differential Evolution [12].

- PSO (Particle Swarm Optimization)

Η βασική ιδέα του αλγορίθμου PSO είναι η ύπαρξη ενός πληθυσμού (σμήνους) υποψήφιων λύσεων (σωματίδια). Αυτά τα σωματίδια μετακινούνται στον χώρο αναζήτησης και οι κινήσεις τους εξαρτώνται από τη δική τους καλύτερη θέση στο χώρο αναζήτησης καθώς και από την καλύτερη θέση ολόκληρου του σμήνους. Η μετακίνηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα να

ανακαλύπτονται βελτιωμένες θέσεις οι οποίες θα αντικαταστήσουν τις παλιές, καθοδηγώντας με τη σειρά τους τις κινήσεις του σμήνους. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται ώστε να βρεθεί τελικά μια ικανοποιητική λύση. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο αλγόριθμος μπορεί να επηρεάσει το σύστημα αλλάζοντας μόνο την τιμή της σχετικής διάρκειας αγωγής του μετατροπέα DC/DC, αυτό θα είναι το πεδίο αναζήτησης της λύσης. Η βασική αρχή είναι πως για κάθε σωματίδιο αποθηκεύεται πληροφορία για τη θέση του στο χώρο αναζήτησης $p_i(t)$ και την ταχύτητά του $v_i(t)$, που συμβολίζει την κατεύθυνση της επόμενης κίνησης του σωματιδίου στον χώρο αναζήτησης [11]. Αυτά υπολογίζονται με τους παρακάτω τύπους:

$$p_i(t+1) = p_i(t) + v_i(t) \quad (7)$$

$$v_i(t+1) = v_i(t) + c1 \cdot rand \cdot (p_{i\text{best}} - p_i(t)) + c2 \cdot rand \cdot (p_{g\text{best}} - p_i(t)) \quad (8)$$

$p_i(t)$: θέση σωματιδίου i ,

$v_i(t)$: ταχύτητα σωματιδίου i ,

c_1 : σταθερά τοπικής πληροφορίας,

c_2 : σταθερά ολικής πληροφορίας,

$p_{i\text{best}}$: καλύτερη θέση σωματιδίου i ,

g_{best} : καλύτερη θέση σμήνους και

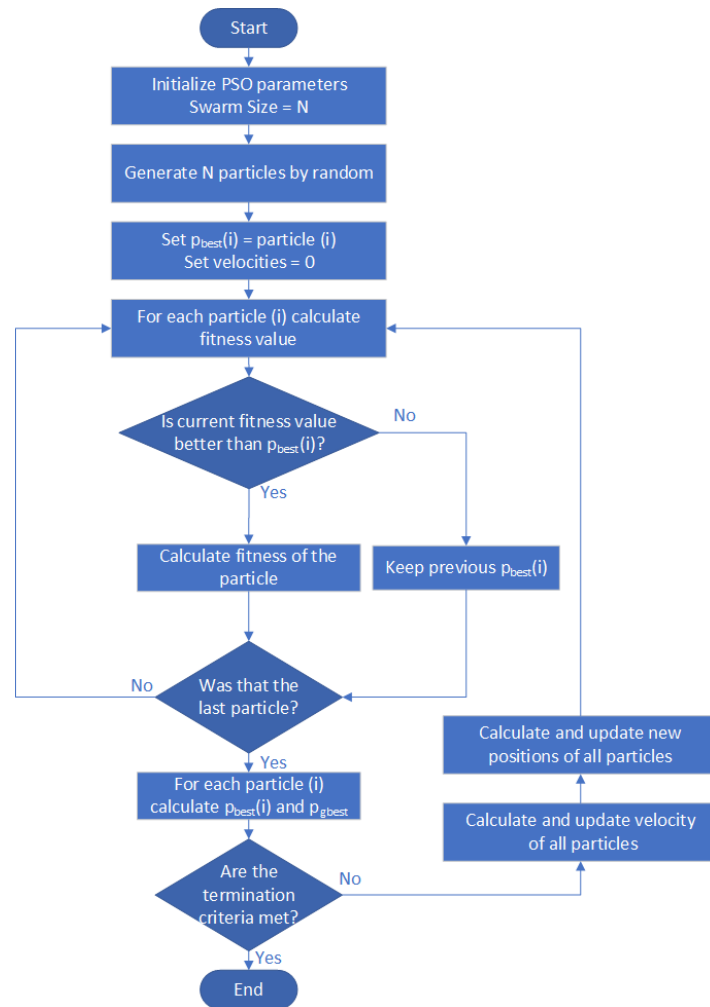
$rand$: τυχαία μεταβλητή.

Ο αλγόριθμος ξεκινάει με τη διαδικασία της αρχικοποίησης, δημιουργώντας τα αρχικά σωματίδια (particles). Τα σωματίδια χαρακτηρίζονται από δύο τιμές $p_i(t)$ και $v_i(t)$. Η τιμή της παραμέτρου $p_i(t)$ αντιστοιχεί σε τιμή σχετικής διάρκειας αγωγής του μετατροπέα DC/DC και προσδιορίζει το σημείο κάθε σωματιδίου στον χώρο αναζήτησης, που στην περίπτωση αυτή είναι το σημείο λειτουργίας του Φ/Β. Η τιμή της παραμέτρου $v_i(t)$ αντιστοιχεί στην ταχύτητα (velocity) του σωματιδίου και προσδιορίζει το αν η τρέχουσα τιμή σχετικής διάρκειας αγωγής του σωματιδίου πρέπει να αυξηθεί ή να μειωθεί και κατά πόσο, ώστε να πλησιάσει περισσότερο στο MPP. Κατά την αρχικοποίηση, οι παράμετροι $p_i(t)$ και $v_i(t)$ παίρνουν τυχαίες τιμές (πχ. η $p_i(t)$ από 0-256 και η $v_i(t)$ από 0 έως 3). Στο τέλος της αρχικοποίησης έχει δημιουργηθεί η πρώτη γενιά σωματιδίων. Μετά την αρχικοποίηση γίνεται η αξιολόγηση της γενιάς. Δηλαδή για κάθε σωματίδιο, που αποτελεί μια τιμή σχετικής διάρκειας αγωγής, δηλαδή ένα σημείο λειτουργίας του Φ/Β στοιχείου, υπολογίζονται η τάση και το ρεύμα, οπότε και η παραγόμενη

ισχύς του Φ/Β στοιχείου. Μιας και είναι η πρώτη γενιά, οι παραπάνω τιμές αποθηκεύονται για κάθε σωματίδιο στις μεταβλητές $dc_{best}(i)$, $v_{best}(i)$, $i_{best}(i)$, $p_{best}(i)$, και αποτελούν την επίδοσή του. Το σωματίδιο που αντιστοιχεί στο σημείο λειτουργίας με τη μεγαλύτερη ισχύ, σε σχέση με τα υπόλοιπα, δίνει τιμές στην ολική επίδοση του σμήνους (global τιμές) που αποθηκεύεται στις μεταβλητές dc_{gbest} , v_{gbest} , i_{gbest} και p_{g_best} . Έπειτα οι θέσεις $p_i(t)$ των σωματιδίων, αλλάζουν σύμφωνα με το αντίστοιχο $v_i(t)$ ακολουθώντας τη σχέση (7). Οι τιμές των $p_i(t+1)$ που προκύπτουν, αποτελούν την επόμενη γενιά σωματιδίων. Για να ολοκληρωθεί ο υπολογισμός της νέας γενιάς υπολογίζεται η ταχύτητα του κάθε σωματιδίου σύμφωνα με τη σχέση (8) οπότε υπολογίζονται και οι τιμές $v_i(t+1)$.

Αφού έχουν υπολογιστεί τα σωματίδια της νέας γενιάς, η διαδικασία της αξιολόγησης επαναλαμβάνεται. Υπολογίζονται και πάλι η τάση, το ρεύμα και η ισχύς για τα νέα σημεία λειτουργίας των σωματιδίων. Κάθε σωματίδιο ελέγχεται ξεχωριστά όσον αφορά το κατά πόσον το καινούριο σημείο λειτουργίας, δίνει μεγαλύτερη ή μικρότερη παραγόμενη ισχύ από το σημείο της προηγούμενης γενιάς. Αν η ισχύς είναι μεγαλύτερη, τότε ανανεώνονται οι τιμές των παραμέτρων $dc_{best}(i)$, $v_{best}(i)$, $i_{best}(i)$, $p_{best}(i)$, επειδή το σωματίδιο έχει πλέον βελτιωμένη επίδοση. Αν η ισχύς είναι μικρότερη, τότε η επίδοση είναι χειρότερη και οι παραπάνω μεταβλητές κρατούν τις προηγούμενες τιμές τους. Καθώς γίνεται αυτό για όλα τα σωματίδια, συγκρίνεται η επίδοσή τους με τη μέγιστη επίδοση του σμήνους και ανανεώνονται και οι τιμές dc_{gbest} , v_{gbest} , i_{gbest} και p_{gbest} .

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για προκαθορισμένο αριθμό γενεών, που πρέπει να είναι αρκετές για την εύρεση του σημείου MPP. Μετά από καθορισμένο αριθμό επαναλήψεων-γενιών, ο αλγόριθμος φτάνει στο MPP χωρίς να επηρεάζεται από τοπικά μέγιστα που τυχόν υπάρχουν. Στο Σχήμα 13 φαίνεται το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου PSO.



Σχήμα 13 : Διάγραμμα ροής αλγορίθμου PSO [11].

3.

ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ DC/DC

3.1 Γενικά για τους μετατροπείς DC/DC

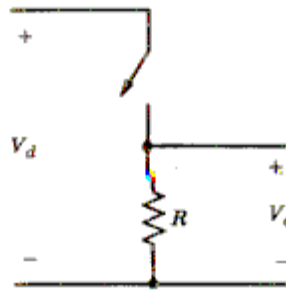
Ένας μετατροπέας DC/DC είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που μετατρέπει ένα επίπεδο DC τάσης σε ένα άλλο. Τα επίπεδα ισχύος κυμαίνονται από πολύ χαμηλές (μικρές μπαταρίες) έως πολύ υψηλές (μετάδοση ισχύος υψηλής τάσης). Πρόκειται για κυκλώματα που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικούς διακόπτες μεγάλης διακοπτικής συχνότητας ώστε να αποκόπτουν ή όχι μια DC τάση εισόδου από το φορτίο, παράγοντας έτσι μια DC τάση εξόδου με διαφορετική μέση τιμή.

Υπάρχουν πολλά είδη μετατροπέων DC/DC:

- Buck (Υποβιβασμού τάσης),
- Boost (Ανύψωσης τάσης),
- Buck-Boost (Υποβιβασμού-Ανύψωσης τάσης),
- Cuk,
- Full-bridge (Γέφυρας),
- κ.α.

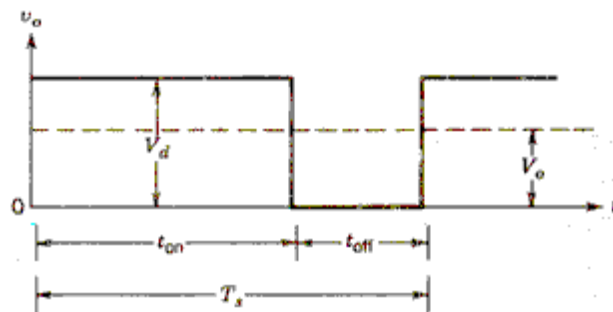
Οι βασικές τοπολογίες είναι οι μετατροπείς Buck και Boost. Οι μετατροπείς Buck-Boost και Cuk είναι συνδυασμός των δύο κύριων τοπολογιών, ενώ ο μετατροπέας Full-Bridge προκύπτει από τον μετατροπέα Buck.

Στο Σχήμα 14 παρουσιάζεται η βασική τοπολογία ενός μετατροπέα DC/DC.



Σχήμα 14: Βασική τοπολογία μετατροπέα DC/DC [1].

Γενικά, στους μετατροπείς DC/DC, η μέση τάση εξόδου ελέγχεται ώστε να πάρει την επιθυμητή τιμή, ενώ η τάση εξόδου και το φορτίο μπορούν να αλλάζουν. Ο έλεγχος αυτός γίνεται ελέγχοντας τον χρόνο που ένας διακόπτης είναι κλειστός (t_{on}) και ανοικτός (t_{off}), όπως φαίνεται στο Σχήμα 15.



Σχήμα 15: Η τάση εξόδου του μετατροπέα DC/DC του Σχ. 14 σε σχέση με τους χρόνους t_{on} και t_{off} του διακόπτη [1].

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου V_o , εξαρτάται από τα t_{on} και t_{off} . Μία μέθοδος ελέγχου της τάσης εξόδου είναι η μεταγωγή του διακόπτη (switching) με σταθερή συχνότητα ($f_s=1/T_s$) αλλάζοντας τη διάρκεια που ο διακόπτης είναι ανοικτός (t_{on}) έτσι ώστε το T_s να είναι σταθερό $T_s=t_{on}+t_{off}$. Αυτή η μέθοδος λέγεται Pulse Width Modulation (PWM) και είναι η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Μια άλλη μέθοδος είναι να αλλάζει η συχνότητα (άρα

και η περίοδος) μεταγωγής (switching) και η διάρκεια του χρονικού διαστήματος ton (Frequency Modulation) [1].

Η αναλογία του χρόνου που είναι ανοικτός ο διακόπτης σε σχέση με την περίοδο του παλμού, λέγεται σχετική διάρκεια αγωγής (D):

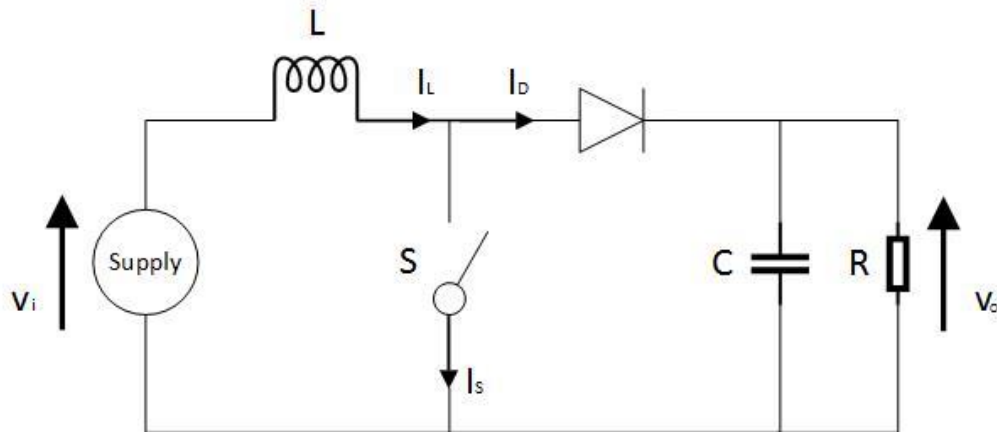
$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \cdot 100\% \quad (9)$$

Οι μετατροπείς DC/DC έχουν δύο διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας: (1) συνεχής αγωγή ρεύματος και (2) ασυνεχής αγωγή ρεύματος.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε ένας μετατροπέας DC/DC τύπου Boost καθώς η τάση εξόδου του Φ/Β πλαισίου είναι μικρότερη από την τάση της μπαταρίας που φορτίζεται με την παραγόμενη ενέργεια. Η λειτουργία των μετατροπέων DC/DC αυτού του τύπου περιγράφεται στην παράγραφο που ακολουθεί.

3.2 Μετατροπέας DC/DC τύπου Boost

Στον μετατροπέα ανύψωσης τάσης (Boost Converter, Σχήμα 16), η τάση εξόδου είναι πάντα υψηλότερη από την τάση εισόδου.

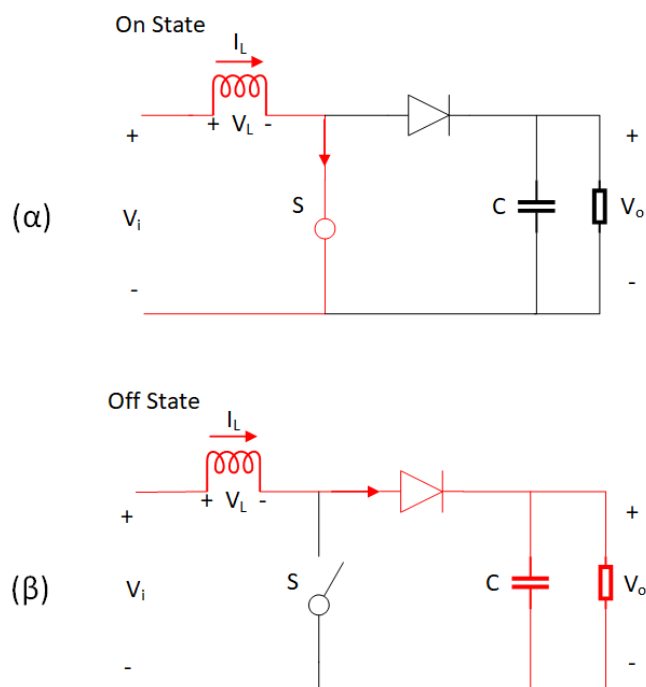


Σχήμα 16: Το ηλεκτρονικό κύκλωμα ενός μετατροπέα DC/DC τύπου Boost [16].

Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, το ρεύμα ρέει μέσω του πηνίου και το πηνίο αποθηκεύει ενέργεια δημιουργώντας ένα μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του. Η δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη και δεν άγει, έτσι η έξοδος είναι απομονωμένη από την είσοδο. Όταν ανοίξει ο

διακόπτης, η τάση αλλάζει πολικότητα. Μόλις η τάση του πηνίου γίνει ίση με $V_i - V_o$, η διόδος πολώνεται ορθά και η ενέργεια μεταφέρεται από την πηγή και την επαγωγή στο φορτίο.

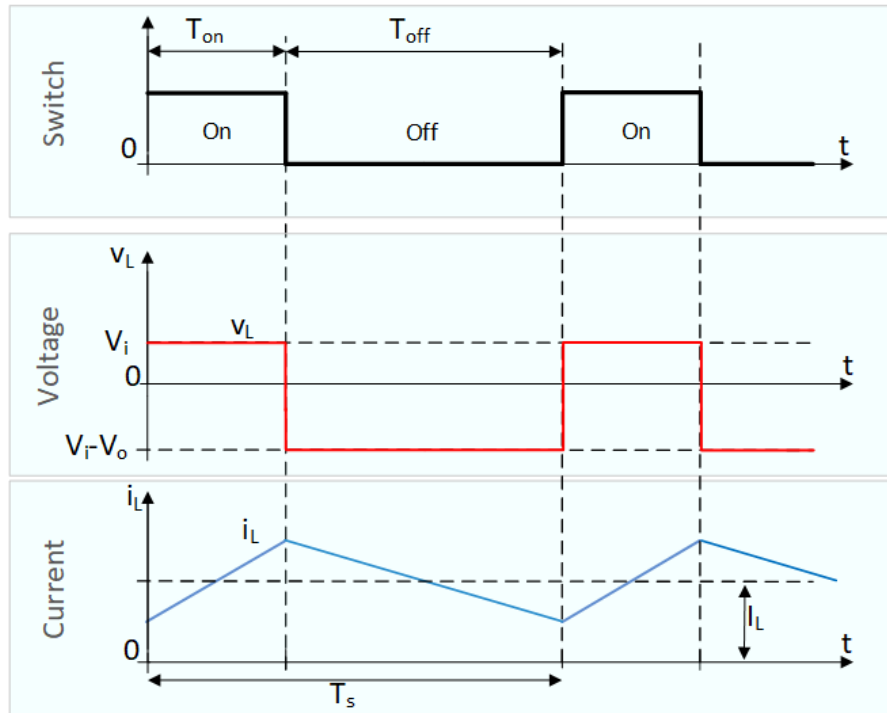
Όταν ο διακόπτης ανοίξει, Σχήμα 17 (β), η ενέργεια που έχει αποθηκεύσει το πηνίο προστίθεται σε αυτήν της πηγής και διοχετεύεται μέσω της διόδου D στο φορτίο. Συνεπώς, όταν ανοίξει ο διακόπτης το πηνίο γίνεται πηγή τάσης ίδιας πολικότητας με την πηγή εισόδου, οπότε η συνολική τάση εξόδου (στο φορτίο) προκύπτει μεγαλύτερη από αυτήν της εισόδου (πηγής). Όταν ο διακόπτης κλείσει, Σχήμα 17 (α), τότε το πηνίο αποθηκεύει ενέργεια, ενώ ο πυκνωτής θα παρέχει την τάση και την ενέργεια στο φορτίο. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρόνου, η ανάστροφα πολωμένη διόδος εμποδίζει τον πυκνωτή να αποφορτιστεί προς τον διακόπτη.



Σχήμα 17 : Συμπεριφορά μετατροπέα DC/DC τύπου Boost όταν ο διακόπτης είναι κλειστός (α), και όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός (β) [1].

3.2.1 Συνεχής αγωγή ρεύματος

Όταν ένας μετατροπέας ανύψωσης τάσης λειτουργεί σε συνεχή λειτουργία, το ρεύμα του πηνίου (I_L) δεν πέφτει ποτέ στο μηδέν (Σχήμα 18).



Σχήμα 18: Χαρακτηριστικές κυματομορφές κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα DC/DC τύπου Boost σε συνεχή αγωγή ρεύματος [1].

Κατά τη διάρκεια της κατάστασης ON, ο διακόπτης είναι κλειστός, πράγμα που κάνει την τάση εισόδου (V_i) να εμφανιστεί στο πηνίο και αυτό προκαλεί αλλαγή στο ρεύμα (I_L) που ρέει μέσω του πηνίου:

$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{V_i}{L} \quad (10)$$

Στο τέλος της κατάστασης ON, υπάρχει αύξηση του ρεύματος το πηνίου κατά ΔI_{Lon} :

$$\Delta I_{Lon} = \frac{DT}{LV_i} \quad (11)$$

όπου D είναι το duty cycle.

Η τιμή του D κυμαίνεται μεταξύ 0 (ο διακόπτης είναι πάντα ανοικτός) και το 1 (ο διακόπτης είναι πάντα κλειστός).

Κατά τη διάρκεια της κατάστασης OFF, ο διακόπτης είναι ανοικτός και έτσι το ρεύμα του πηνίου ρέει μέσω της διόδου προς το φορτίο. Αν θεωρηθεί μηδενική η πτώση τάσης στη δίοδο και παράλληλα με το φορτίο έχει συνδεθεί ένας πυκνωτής με αρκετά μεγάλη χωρητικότητα ώστε η τάση του να παραμείνει σταθερή, ισχύουν τα παρακάτω:

$$V_i - V_o = L \cdot \frac{dI_L}{dt} \quad (12)$$

Και
$$\Delta I_{Loff} = \frac{(V_i - V_o)(1-D)T}{L} \quad (13)$$

$$\Delta I_{Lon} + \Delta I_{Loff} = 0 \quad (14)$$

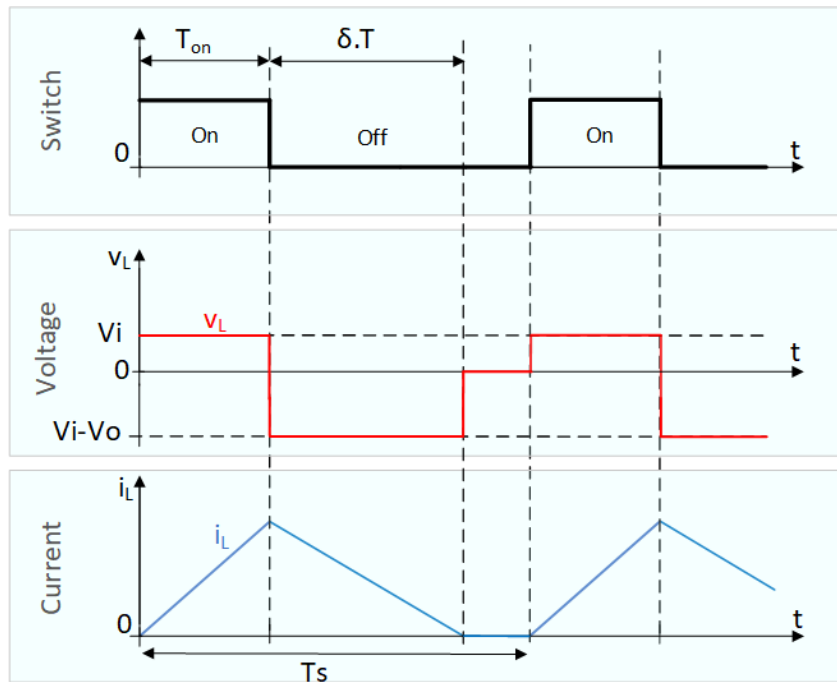
Αντικαθιστώντας την (14) με τις (11) και (13) προκύπτει ότι:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (15)$$

Επομένως η αναλογία της τάσης εξόδου με την τάση εισόδου, εξαρτάται μόνο από τη σχετική διάρκεια αγωγής D , και εφόσον το D κυμαίνεται από 0 έως 1, προκύπτει ότι $V_o > V_i$.

3.2.2 Ασυνεχής αγωγή ρεύματος

Σε αυτή την περίπτωση, το ρεύμα του πηνίου πέφτει στο μηδέν κατά τη διάρκεια ενός τμήματος της περιόδου μεταγωγής (switching, Σχήμα 19). Αυτό συμβαίνει συνήθως όταν το φορτίο του μετατροπέα είναι μικρό.



Σχήμα 19 : Χαρακτηριστικές κυματομορφές κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα DC/DC τύπου Boost σε ασυνεχή αγωγή ρεύματος [1].

Το μέγιστο ρεύμα του πηνίου μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$I_{Lmax} = \frac{V_i DT}{L} \quad (16)$$

Κατά τη διάρκεια της κατάστασης OFF του διακόπτη το ρεύμα I_L πέφτει στο 0 μετά από χρόνο δT , και ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$I_{Lmax} + \frac{(V_i - V_o) \delta T}{L} = 0 \quad (17)$$

Από τις (16) και (17) προκύπτει ότι:

$$\delta = \frac{V_i D}{V_o - V_i} \quad (18)$$

Το ρεύμα στο φορτίο είναι ίσο με το μέσο ρεύμα της διόδου (I_d). Το ρεύμα της διόδου είναι ίσο με το ρεύμα του πηνίου στην κατάσταση OFF, οπότε το ρεύμα εξόδου υπολογίζεται ως εξής:

$$I_o = \frac{I_{Lmax}}{2} \times \delta \quad (19)$$

Αντικαθιστώντας την (19) με τις (17) και (18) προκύπτει ότι:

$$I_o = \frac{V_i DT}{2L} \times \frac{V_i D}{V_o - V_i} = \frac{V_i^2 D^2 T}{2L(V_o - V_i)} \quad (20)$$

Επομένως, η σχέση της τάσης εξόδου με την τάση εισόδου μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{V_i D^2 T}{2LI_o} \quad (21)$$

Επομένως σε αντίθεση με τη λειτουργία συνεχούς αγωγής, στη λειτουργία ασυνεχούς αγωγής ρεύματος, η τιμή της τάσης εξόδου εξαρτάται όχι μόνο από τον κύκλο λειτουργίας (D), αλλά και από την τιμή του πηνίου (L), την τάση εισόδου (V_i), την περίοδο μεταγωγής (T) και το ρεύμα εξόδου (I_o).

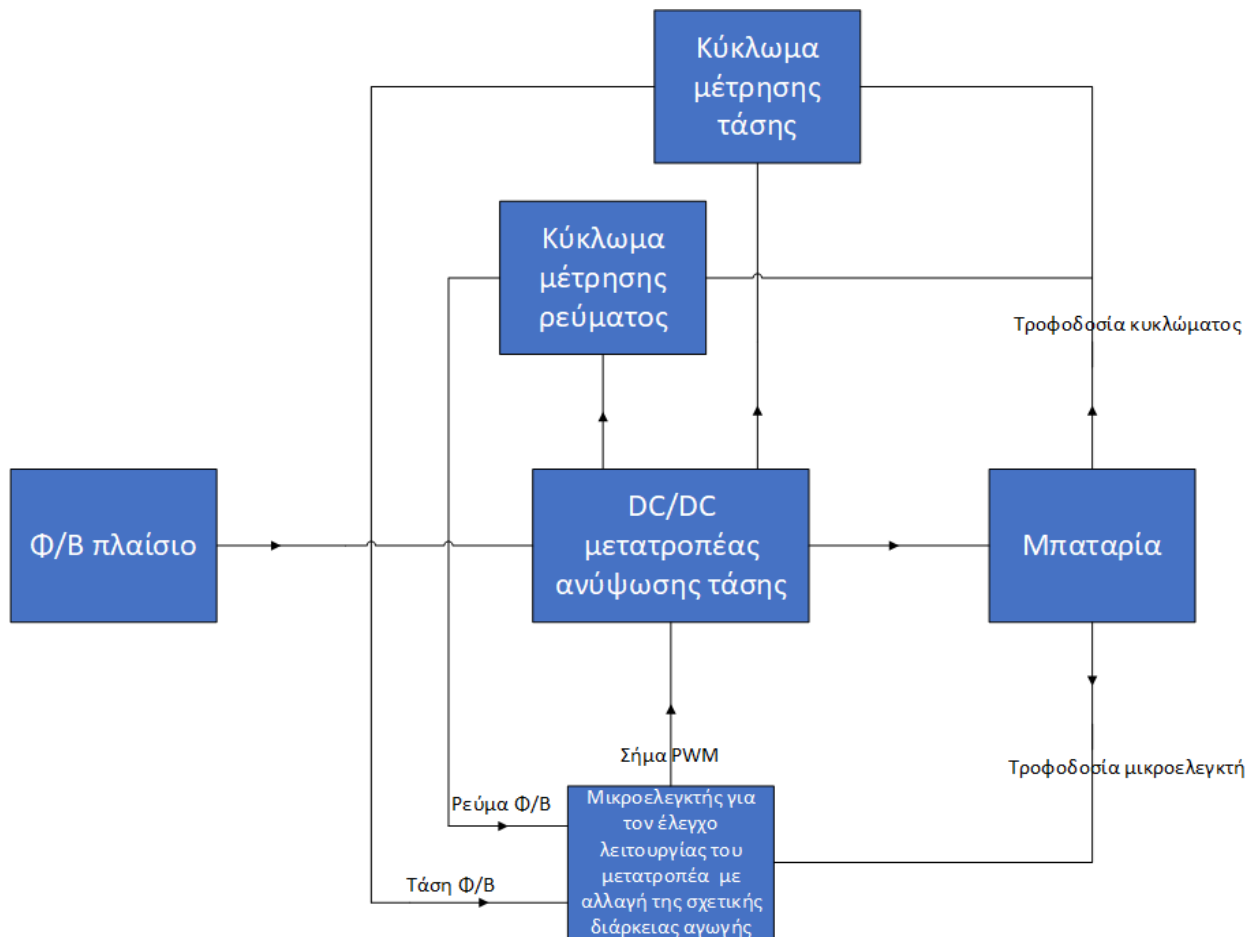
4.

ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ

Οι κυριότερες μονάδες του συστήματος που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία είναι οι εξής:

- ένα Φ/Β πλαίσιο τύπου Dye-Sensitized, κατασκευασμένο από την εταιρεία Brite Solar (Ελλάδα),
- ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης DC/DC,
- οι αισθητήρες ρεύματος και τάσης εισόδου του μετατροπέα DC/DC και
- ο μικροελεγκτής που εκτελεί τον αλγόριθμο MPPT.

Στο Σχήμα 20 φαίνεται το γενικό διάγραμμα του τελικού συστήματος που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε.



Σχήμα 20: Το γενικό διάγραμμα του τελικού συστήματος που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

4.1 Το Φ/Β πλαίσιο τύπου Dye-Sensitized

Τα εργοστασιακά χαρακτηριστικά λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου που χρησιμοποιήθηκε (Εικόνα 1) είναι τα παρακάτω (υπό ηλιακή ακτινοβολία 800 W/m^2 και θερμοκρασία 22°C):

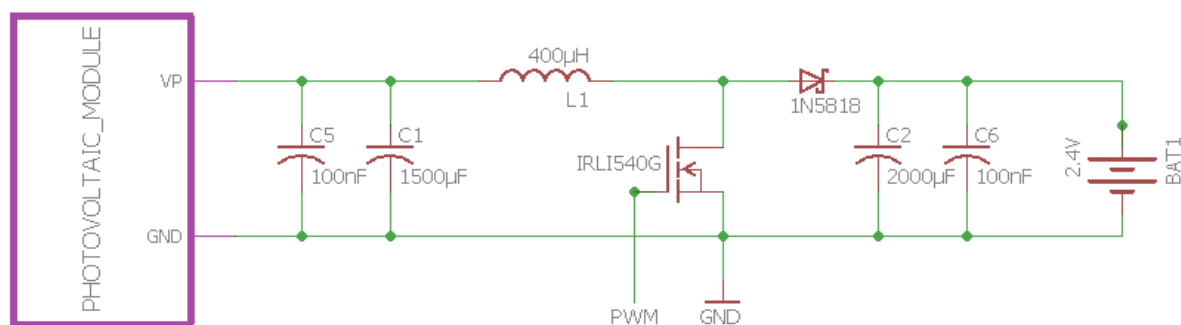
- τάση ανοικτοκύκλωσης $V_{oc} = 0.68 \text{ V}$,
- ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{sc} = 420 \text{ mA}$,
- τάση στο σημείο MPP $V_{MPP} = 0.312 \text{ V}$,
- ρεύμα στο σημείο MPP $I_{MPP} = 0.232 \text{ mA}$ και
- ισχύς στο σημείο MPP $P_{MPP} = 72.28 \text{ mW}$.



Εικόνα 1 : Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο τύπου Dye-Sensitized που χρησιμοποιήθηκε [5].

4.2 Ο μετατροπέας DC/DC ανύψωσης τάσης

Το κύκλωμα του μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης (Boost converter) υλοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας με σκοπό να αυξηθεί η τάση εξόδου του Φ/Β πλαισίου στο επίπεδο της τάσης του συσσωρευτή που συνδέεται στην έξοδο του, έτσι ώστε να μεταφέρεται σε αυτόν η ισχύς που παράγεται από το Φ/Β πλαίσιο. Με τον έλεγχο του μετατροπέα DC/DC από τον μικροελεγκτή υλοποιούνται οι αλγόριθμοι MPPT ώστε τελικά να λειτουργεί το Φ/Β πλαίσιο στο σημείο MPP.



Σχήμα 21: Διάγραμμα του μετατροπέα DC/DC που υλοποιήθηκε.

Ο μετατροπέας DC/DC που κατασκευάστηκε λειτουργεί με συχνότητα μεταγωγής (switching) ίση με 31.25 kHz. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 21, η παραγόμενη από το Φ/Β πλαίσιο ισχύς, αποθηκεύεται σε δύο επαναφορτιζόμενες μπαταρίες 1.2V η καθεμία, οι οποίες συνδέονται σε

σειρά, οπότε η συνολική τάση εξόδου του μετατροπέα είναι 2.4V. Στο τελικό σύστημα που αναπτύχθηκε, οι μπαταρίες παρέχουν τάση στα επιμέρους στοιχεία του κυκλώματος ελέγχου και συγκεκριμένα στους τελεστικούς ενισχυτές που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της τάσης και του ρεύματος που παράγεται από το Φ/Β πλαίσιο, καθώς και στον μικροελεγκτή. Επομένως, ένα μικρό μέρος της παραγόμενης ενέργειας καταναλώνεται για τη λειτουργία του συστήματος διαχείρισης ενέργειας, ώστε να αυτό να είναι πλήρως αυτόνομο, χωρίς να απαιτείται άλλη εξωτερική πηγή τροφοδοσίας του. Έτσι, όλα τα επιμέρους ηλεκτρονικά στοιχεία του κυκλώματος ελέγχου επιλέχθηκαν έτσι ώστε να λειτουργούν υπό τάση τροφοδοσίας 2.4V. Επίσης, λήφθηκε υπόψη η κατανάλωση ισχύος των επιμέρους ηλεκτρονικών στοιχείων του κυκλώματος ελέγχου, έτσι ώστε η συνολική κατανάλωση ισχύος τους να είναι πολύ χαμηλή, μειώνοντας όσο το δυνατόν λιγότερο την ισχύ που μεταφέρεται στους συσσωρευτές και κατ' επέκταση την απόδοση του συνολικού συστήματος παραγωγής ενέργειας.

Η τάση εισόδου που δέχεται ο μετατροπέας DC/DC είναι η τάση του φωτοβολταϊκού πλαισίου που σε συνθήκες MPP κυμαίνεται από 0.38 έως 0.48 V. Στην έξοδο του μετατροπέα, αυτή η τάση ανυψώνεται στο επίπεδο των 2.4 V και φορτίζει τις μπαταρίες.

4.3 Οι αισθητήρες ρεύματος και τάσης εισόδου του μετατροπέα DC/DC

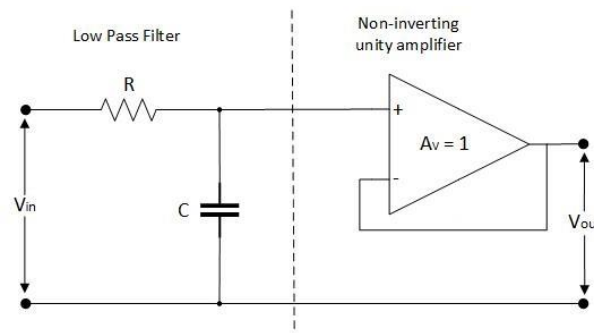
Η διαφορά δυναμικού στα άκρα του πηνίου του μετατροπέα DC/DC είναι ίση με $V_{Lin} - V_{Lout}$, όπου V_{Lin} και V_{Lout} είναι οι τάσεις που αναπτύσσονται στους ακροδέκτες του ως προς τη γείωση του κυκλώματος. Λόγω της μεταγωγικής (switching) λειτουργίας του μετατροπέα DC/DC, οι δύο αυτές τάσεις έχουν DC και AC συνιστώσα. Με τη χρήση χαμηλοπερατού φίλτρου, φιλτράρεται η AC συνιστώσα και μένει μόνο η DC. Όταν φιλτραριστούν οι τάσεις στα δύο άκρα του πηνίου, μπορεί να υπολογιστεί το dc ρεύμα που περνά μέσα από αυτό (I_L) με απλή εφαρμογή του νόμου του Ohm:

$$V_{Lin} - V_{Lout} = I_L \cdot R_L \quad (22)$$

όπου R_L η ωμική αντίσταση του τυλίγματος του πηνίου, η οποία μετρήθηκε στα 150 mΩ.

Από την (22), παρατηρείται ότι το ρεύμα εισόδου του μετατροπέα DC/DC (ρεύμα εξόδου του Φ/Β πλαισίου) μπορεί να υπολογιστεί με μέτρηση των τάσεων στα άκρα του πηνίου και ότι η σχέση ρεύματος και διαφοράς δυναμικού στα άκρα του πηνίου είναι γραμμική, μετά το φιλτράρισμα.

Ο αισθητήρας ρεύματος του συστήματος, υλοποιήθηκε βάσει των παραπάνω. Οι τάσεις στα δύο άκρα του πηνίου αρχικά φιλτράρονται με ενεργά χαμηλοπερατά φίλτρα πρώτης τάξης (Σχήμα 22).



Σχήμα 22 : Ενεργό χαμηλοπερατό φίλτρο RC.

Το παραπάνω φίλτρο, αποτελείται από ένα παθητικό RC φίλτρο που παρέχει μια διαδρομή χαμηλής συχνότητας προς την είσοδο ενός μη-αναστρέφοντα ενισχυτή με τελεστικό ενισχυτή. Ο τελεστικός ενισχυτής είναι συνδεδεμένος ως ακόλουθος τάσης δίνοντας DC κέρδος $A_v=1$. Το πλεονέκτημα αυτής της συνδεσμολογίας είναι ότι η υψηλή αντίσταση εισόδου και η χαμηλή

αντίσταση εξόδου του τελεστικού ενισχυτή αποτρέπουν την αλλοίωση της απόκρισης συχνότητας του φίλτρου από τις μεταβολές στην αντίσταση του φορτίου. Η συχνότητα αποκοπής του χαμηλοπερατού φίλτρου πρώτης τάξης υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

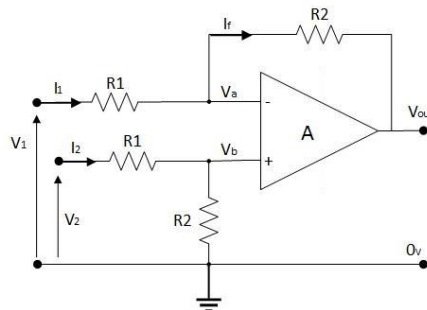
$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \text{ Hz} \quad (23)$$

Τα επιμέρους στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση αυτού του κυκλώματος είναι:

- τελεστικός ενισχυτής LM6142AIM,
- πυκνωτής $C = 100 \text{ nF}$ και
- αντίσταση $R = 220 \text{ k}\Omega$.

Ο τελεστικός ενισχυτής LM6142AIM απαιτεί ρεύμα τροφοδοσίας $650 \mu\text{A}$. Το συνολικό απαιτούμενο ρεύμα των τελεστικών ενισχυτών είναι $1300 \mu\text{A}$ με τάση τροφοδοσίας 2.4V , οπότε η συνολική κατανάλωση ισχύος τους είναι 3.12 mW .

Μετά το φιλτράρισμα των τάσεων στους ακροδέκτες του πηνίου προκύπτουν οι τάσεις V_{Lin} και V_{Lout} . Για να υπολογιστεί η διαφορά τους, μέσω της (22), χρησιμοποιήθηκε ο διαφορικός τελεστικός ενισχυτής AD8276. Για να ενισχυθεί η έξοδός του χρησιμοποιήθηκαν αντιστάσεις σε διαφορική συνδεσμολογία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 23.



Σχήμα 23 : Διαφορική συνδεσμολογία τελεστικού ενισχυτή.

Η τάση εξόδου του διαφορικού ενισχυτή δίνεται από τη σχέση:

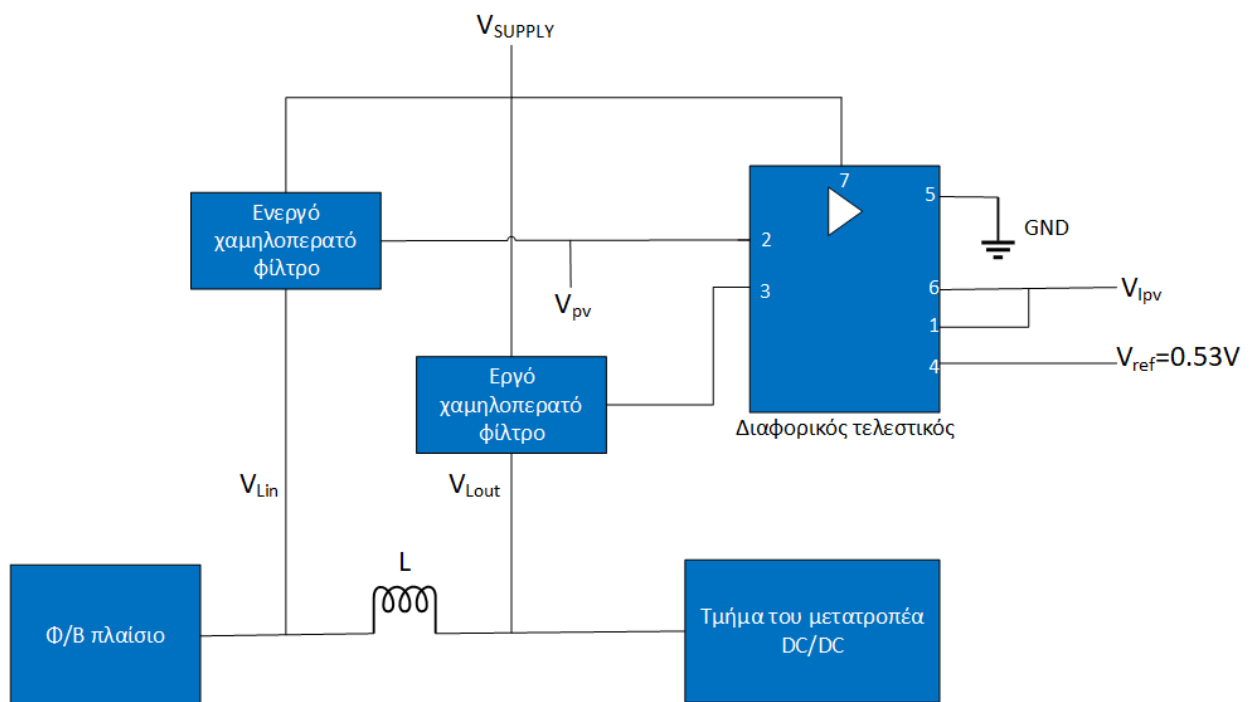
$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1) \quad (24)$$

Με $R_1 = 40 \text{ k}\Omega$ και $R_2 = 680 \text{ k}\Omega$, η ενίσχυση στην έξοδο του διαφορικού είναι $A_d = 18$. Το απαιτούμενο ρεύμα τροφοδοσίας αυτού του τελεστικού ενισχυτή είναι $200 \mu\text{A}$, οπότε υπό τάση τροφοδοσίας 2.4V η κατανάλωση ισχύος του είναι 0.48 mW . Επομένως, ο αισθητήρας ρεύματος που αναπτύχθηκε καταναλώνει συνολική ισχύ ίση με $3.12 + 0.48 = 3.6 \text{ mW}$ και επομένως

αποτελεί μια λύση πολύ χαμηλής κατανάλωσης ισχύος για τη μέτρηση του ρεύματος εισόδου του μετατροπέα DC/DC.

Το συνολικό κύκλωμα του αισθητήρα ρεύματος που υλοποιήθηκε φαίνεται στο Σχήμα 24. Οι τάσεις στους δύο ακροδέκτες του πηνίου του μετατροπέα DC/DC γίνονται είσοδοι στα ενεργά χαμηλοπερατά φίλτρα RC. Οι έξοδοι των δύο φίλτρων γίνονται είσοδοι στο διαφορικό ενισχυτή ο οποίος ενισχύει τη διαφορά τους. Για να μπορούν να μετρηθούν με ακρίβεια μικρές τιμές διαφορικής τάσης (και οι αντίστοιχες τιμές ρεύματος του πηνίου που υπολογίζονται με βάση αυτή) χωρίς να επηρεάζονται οι μετρήσεις από την ελάχιστη τάση εξόδου που μπορεί να παράγει ο τελεστικός ενισχυτής, προτίθεται στην τάση εξόδου του μία σταθερή DC τάση αναφοράς $V_{ref} = 0.53V$. Το κέρδος της διαφορικής συνδεσμολογίας είναι $A_d = 18$. Έτσι, η τάση εξόδου του διαφορικού ενισχυτή δίνεται από τη σχέση:

$$V_{IPV} = A_d \cdot (V_{Lin} - V_{Lout}) + 0.53(V) \quad (25)$$



Σχήμα 24: Το γενικό διάγραμμα του αισθητήρα ρεύματος που υλοποιήθηκε.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 24, η τάση εξόδου του Φ/Β πλαισίου, V_{Lin} , εισέρχεται σε ένα ενεργό χαμηλοπερατό φίλτρο και χρησιμοποιείται για να παρέχει στον μετατροπέα A/D του μικροελεγκτή την μετρούμενη τάση λειτουργίας του Φ/Β πλαισίου (V_{pv}). Το σήμα V_{IPV} είναι

ανάλογο του μετρούμενου ρεύματος του Φ/Β πλαισίου. Τα δύο αυτά σήματα συνδέονται σε αναλογικές εισόδους του μετατροπέα A/D του μικροελεγκτή.

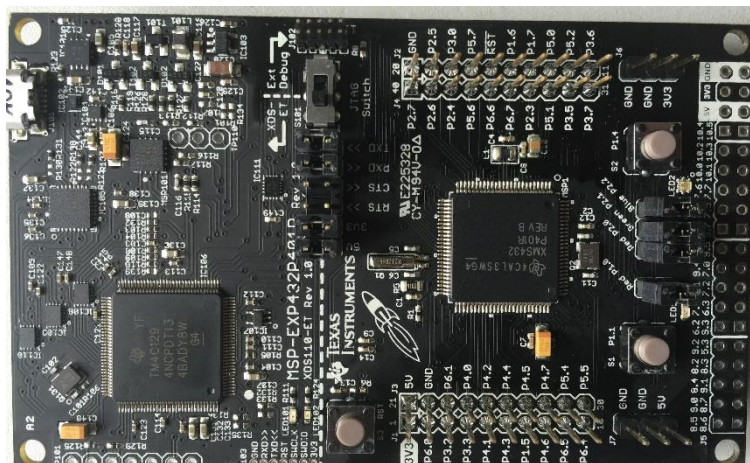
4.4 Ο μικροελεγκτής

Για την εκτέλεση του αλγορίθμου MPPT και τον έλεγχο του μετατροπέα DC/DC χρησιμοποιήθηκε ο μικροελεγκτής MSP432P401R, της εταιρίας Texas Instruments (Εικόνα 2), ο οποίος είναι μικροελεγκτής πολύ χαμηλής ισχύος και μπορεί να δεχτεί τροφοδοσία 2.4V από τις μπαταρίες. Το ρεύμα τροφοδοσίας που απαιτεί ο μικροελεγκτής είναι 80 $\mu\text{A}/\text{MHz}$, και η συχνότητα λειτουργίας του τέθηκε στα 24 MHz οπότε η απαιτούμενη ισχύς είναι $24 (\text{MHz}) * 80 (\mu\text{A}/\text{MHz}) * 2.4 (\text{V}) = 4.6 \text{ mW}$. Έτσι το σύστημα ελέγχου που αναπτύχθηκε λειτουργεί με κατανάλωση ισχύος 2.3 mW (μικροελεγκτής) + 3.6 mW (κυκλώματα αισθητήρων τάσης/ρεύματος) = 8.2 mW . Επομένως, είναι ένα σύστημα σχετικά χαμηλής κατανάλωσης ισχύος, που μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα, τροφοδοτούμενο από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο.



Εικόνα 2 : Ο μικροελεγκτής MSP432P401R [14].

Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή έγινε στην αναπτυξιακή πλακέτα MSP-EXP432P401R, Rev.1 της Texas Instruments, που φαίνεται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3 : Αναπτυξιακή πλακέτα MSP-EXP432P401R [15].

Οι δυνατότητες του μικροελεγκτή που χρησιμοποιήθηκε είναι οι παρακάτω:

- Έχει μέγιστη συχνότητα λειτουργίας 48 MHz.
- Απαιτεί πολύ χαμηλό ρεύμα τροφοδοσίας (80μΑ/MHz).
- Η τάση λειτουργίας του κυμαίνεται από 1.7-3.7 V, οπότε καλύπτει την απαίτηση του συστήματος που αναπτύχθηκε για λειτουργία στα 2.4V.
- Διαθέτει ενσωματωμένο μετατροπέα A/D 24 αναλογικών εισόδων και εσωτερικό πολυπλέκτη για την επιλογή τους. Η ψηφιακή έξοδος του μετατροπέα A/D έχει διακριτική ικανότητα έως 16 bits.
- Για τη λειτουργία του μετατροπέα A/D διαθέτει ενσωματωμένη τάση αναφοράς και αυτόματη προσαρμογή αυτής της τάσης αναφοράς στην τάση της εξωτερικής τροφοδοσίας. Στο σύστημα που αναπτύχθηκε, ο μικροελεγκτής λειτουργεί με τάση τροφοδοσίας ίση με 2.4V και ο μετατροπέας A/D ρυθμίστηκε να έχει διακριτική ικανότητα 10 bits. Αυτό σημαίνει πως κάθε bit του μετατροπέα A/D αντιστοιχεί σε $2.4 \text{ V} / 2^{10} = 2.34 \text{ mV}$, το οποίο αποτελεί επαρκή ανάλυση για τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής.
- Έχει τη δυνατότητα σειριακής σύνδεσης με H/Y μέσω UART.
- Διαθέτει 5 ψηφιακές εισόδους/εξόδους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή σήματος PWM. Το duty cycle του παραγόμενου σήματος PWM ελέγχεται από timer των 8 bits, οπότε ο χώρος αναζήτησης MPP είναι 256 τιμές ισχύος [15]. Η επιλογή αυτή έγινε διότι με μεγαλύτερο χώρο αναζήτησης απαιτείται περισσότερος χρόνος για την εύρεση του σημείου MPP του Φ/Β πλαισίου με αποτέλεσμα την απώλεια ενέργειας.

Τέλος, για τον προγραμματισμό του MSP432P401R χρησιμοποιήθηκε το Code Composer Studio 7.3.0 και το Energia 1.6.10E18, τα οποία είναι πακέτα λογισμικού της Texas Instruments.

5.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Περιγραφή μεθοδολογίας μετρήσεων

Η συμπεριφορά του συστήματος ελέγχθηκε με λήψη χαρακτηριστικών καμπυλών I-V και P-V σε διάφορες πραγματικές συνθήκες. Οι μετρήσεις λαμβάνονταν με σειριακή θύρα από την ενσωματωμένη UART του μικροελεγκτή, μέσω USB στον υπολογιστή, με ταχύτητα μετάδοσης 9600 bits/sec. Τα δεδομένα καταγράφονταν στον υπολογιστή διαβάζοντας τις εισόδους της σειριακής θύρας, με χρήση της υπολογιστικής πλατφόρμας MATLAB.

Για να σχηματιστεί μια πλήρης εικόνα της λειτουργίας του Φ/Β πλαισίου, προσομοιώθηκαν πραγματικές συνθήκες κατά τη λήψη των μετρήσεων του χαρακτηρισμού. Οι συνθήκες που επηρεάζουν τη λειτουργία ενός διάφανου Φ/Β πλαισίου είναι οι παρακάτω:

- Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία,
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος,
- Προσανατολισμός της μπροστινής πλευράς του φωτοβολταϊκού πλαισίου ως προς τον άξονα Βορρά-Νότου,
- Κλίση του φωτοβολταϊκού πλαισίου ως προς το οριζόντιο επίπεδο,
- Κάλυψη ή όχι της πίσω πλευράς του πλαισίου
- Ύπαρξη σκίασης και τρόπος σκίασης

Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία είναι ο κύριος παράγοντας που καθορίζει την παραγωγή ενέργειας των Φ/Β πλαισίων. Με αύξηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, αυξάνεται αναλογικά το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}), άρα και το ρεύμα στο MPP (I_m) και επομένως η παραγωγή ισχύος ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου. Πριν από κάθε λήψη χαρακτηριστικής καμπύλης έγινε μέτρηση της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας με το πυρανόμετρο SK111 (της εταιρίας Skye) με ευαισθησία 9.89 V/Wm^{-2} .

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, η αύξηση θερμοκρασίας επηρεάζει την παραγόμενη ισχύ, αντιστρόφως ανάλογα. Επομένως, πριν από κάθε λήψη χαρακτηριστικής καμπύλης έγινε μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Ο προσανατολισμός και η κλίση του φωτοβολταϊκού είναι σημαντικοί παράγοντες μιας και στη διάρκεια της ημέρας η θέση του ήλιου αλλάζει, οπότε για να σχηματιστεί μια πλήρης εικόνα έπρεπε να ληφθούν χαρακτηριστικές καμπύλες σε διάφορες κλίσεις και προσανατολισμούς. Η μέγιστη παραγωγή ενέργειας επιτυγχάνεται όταν το ηλιακό φως προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Όταν δε συμβαίνει αυτό, η παραγόμενη ενέργεια μειώνεται σε σχέση με τη μέγιστη που θα μπορούσε να παραχθεί αν η επιφάνεια του πλαισίου βρισκόταν κάθετα προς το ηλιακό φως. Η μερική σκίαση είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας επειδή μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα καμπύλες ισχύος-τάσης με ένα ή περισσότερα μέγιστα/ελάχιστα σημεία MPP και να παγιδευτεί το σύστημα MPPT σε ένα από αυτά, μειώνοντας την παραγόμενη ενέργεια. Επομένως, έγιναν μετρήσεις και υπό αυτές τις συνθήκες, προκειμένου να εξακριβωθεί η συμπεριφορά του διάφανου Φ/Β πλαισίου σε αυτές και να επιλεγθούν ανάλογα οι αλγόριθμοι που υλοποιήθηκαν. Τέλος, επειδή το Φ/Β πλαίσιο που μελετήθηκε είναι διάφανο, έγιναν μετρήσεις με την πίσω πλευρά του καλυμμένη και μη-καλυμμένη. Αυτό ήταν μια εξομοίωση οικιακής χρήσης του διάφανου Φ/Β πλαισίου, όπου για παράδειγμα το διάφανο Φ/Β πλαίσιο τοποθετείται σε ένα παράθυρο (ή στέγη) κτηρίου και η πίσω του πλευρά φωτίζεται ή όχι ανάλογα με τον φωτισμό στο εσωτερικό του δωματίου αυτού.

Η πειραματική διαδικασία που έγινε χωρίζεται σε δύο φάσεις:

α. Χαρακτηρισμός Φ/Β πλαισίου

Ο χαρακτηρισμός του Φ/Β πλαισίου έγινε υπό τρεις διαφορετικές συνθήκες: (α) χωρίς σκίαση και με τις δύο όψεις του πλαισίου μη-καλυμμένες (β) χωρίς σκίαση και με την πίσω όψη του πλαισίου καλυμμένη και (γ) υπό μερική σκίαση. Στη περίπτωση (α) έγιναν μετρήσεις με τη μπροστινή όψη του πλαισίου προσανατολισμένη σε οκτώ σημεία του ορίζοντα (Βόρεια, Βορειοανατολικά, Βορειοδυτικά, Ανατολικά, Νοτιοανατολικά, Νότια, Νοτιοδυτικά και Δυτικά). Για κάθε προσανατολισμό έγιναν μετρήσεις σε τρεις διαφορετικές κλίσεις (30° , 60° και 90°). Επίσης έγιναν μετρήσεις υπό κλίση 0° χωρίς να ληφθεί υπόψη ο προσανατολισμός εφόσον σε κλίση 0° ο προσανατολισμός δεν επηρεάζει την παραγωγή ενέργειας. Πριν από την κάθε λήψη χαρακτηριστικής καμπύλης, γινόταν μέτρηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και στις δύο όψεις του διάφανου Φ/β πλαισίου και μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Στην περίπτωση (β) έγινε το ίδιο με την περίπτωση (α) αλλά με μέτρηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας μόνο της μπροστινής όψης του Φ/Β πλαισίου αφού η πίσω πλευρά ήταν καλυμμένη. Στην περίπτωση (γ), έγιναν μετρήσεις με κλίση 0° με τρεις διαφορετικούς τρόπους σκίασης (οριζόντια, κάθετα και διαγώνια στα stripes του Φ/Β πλαισίου) και για κάθε έναν από αυτούς εφαρμόστηκαν τρία διαφορετικά ποσοστά σκιασμένης επιφάνειας του πλαισίου ($1/3$, $1/2$ και $2/3$, αντίστοιχα). Επίσης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με κλίση 90° 0° με δύο διαφορετικούς τρόπους σκίασης (οριζόντια και κάθετα στα stripes του Φ/Β πλαισίου) και για κάθε έναν από αυτούς εφαρμόστηκαν τρία διαφορετικά ποσοστά σκιασμένης επιφάνειας του πλαισίου ($1/3$, $1/2$ και $2/3$, αντίστοιχα).

β. Εφαρμογή αλγόριθμων MPPT

Επιλέχθηκαν δύο αλγόριθμοι, ο αλγόριθμος P&O και ο αλγόριθμος Constant Voltage. Η πειραματική διαδικασία έγινε έτσι ώστε να ελεγχθεί η λειτουργία και η αποτελεσματικότητα αυτών των αλγορίθμων, για την εύρεση του σημείου MPP του Φ/Β πλαισίου. Παρακάτω παρουσιάζονται τρία πειράματα: στο πείραμα 1 έγινε έλεγχος της λειτουργίας του αλγορίθμου P&O, στο πείραμα 2 έγινε έλεγχος της λειτουργίας του αλγορίθμου Constant Voltage, ενώ στο πείραμα 3 έγινε έλεγχος της συμπεριφοράς του αλγορίθμου P&O κατά την απότομη αλλαγή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο Φ/Β πλαίσιο.

5.2 Χαρακτηρισμός Φ/B πλαισίου

5.2.1 Χαρακτηριστικές I-V και P-V με κάλυψη πίσω όψης

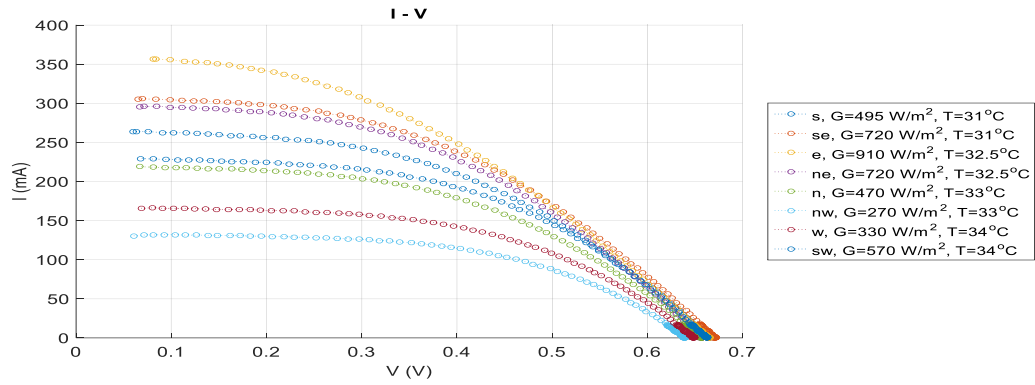
Τα παρακάτω πειραματικά δεδομένα ελήφθησαν από την περιοχή του Πολυτεχνείου Κρήτης με συντεταγμένες:

- γεωγραφικό μήκος 35.531701
- γεωγραφικό πλάτος 24.067824

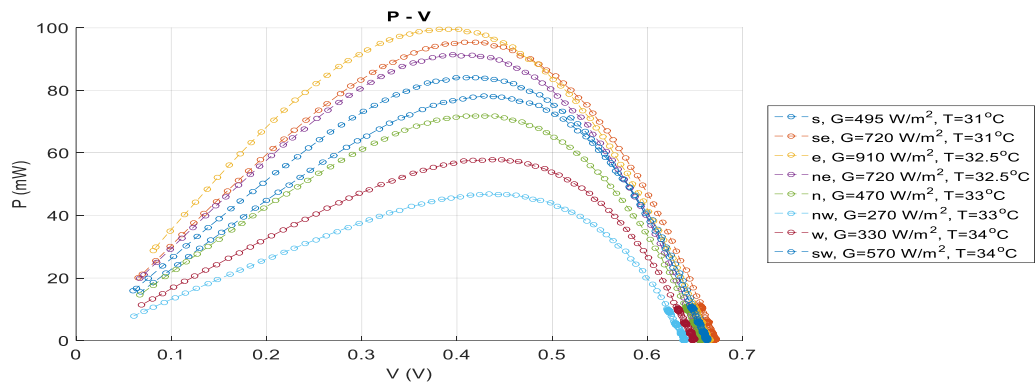
Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τον Αύγουστο του 2017 πρωινές, μεσημεριανές και απογευματινές ώρες.

Οι παρακάτω μετρήσεις έγιναν με το διάφανο Φ/B πλαίσιο να συλλέγει ηλιακή ακτινοβολία μόνο από τη μπροστινή όψη του, ενώ η πίσω όψη ήταν καλυμμένη. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι μετρήσεις με την πίσω όψη καλυμμένη είναι χρήσιμες επειδή εξομοιώνουν την οικιακή χρήση των Φ/B πλαισίων, όπως για παράδειγμα σε παράθυρα δωματίων, όπου η πίσω όψη μπορεί να μην δέχεται ηλιακή ακτινοβολία σε κάποια χρονικά διαστήματα.

Στα Σχήματα 25, 26 και 27 φαίνονται οι χαρακτηριστικές που ελήφθησαν με το Φ/B πλαίσιο υπό κλίση 30°, 60° και 90°, αντίστοιχα, σε όλους τους προσανατολισμούς (“s”: νότιος, “se”: νοτιοανατολικός, “e”: ανατολικός, “ne”: βορειοανατολικός, “n”: βόρειος, “nw”: βορειοδυτικός, “w”: δυτικός και “sw”: νοτιοδυτικός) κατά τις πρωινές ώρες της ημέρας (9:00-11:00). Με G συμβολίζεται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2) της μπροστινής όψης (front side) του Φ/B πλαισίου και με T (°C) η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

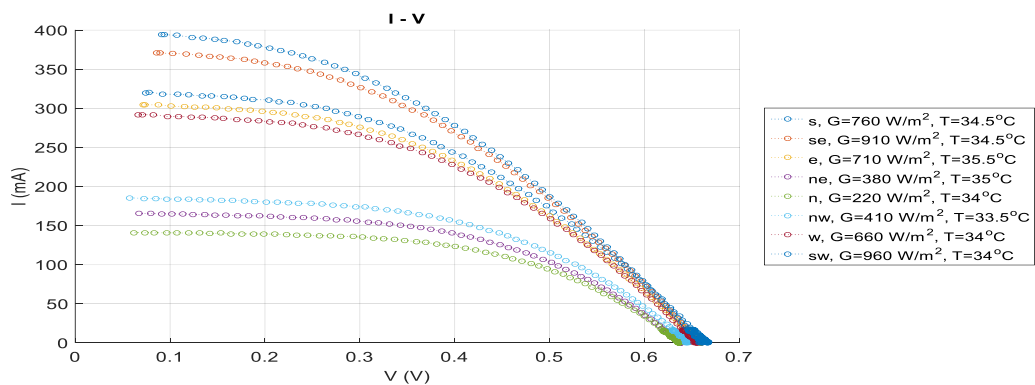


(α)

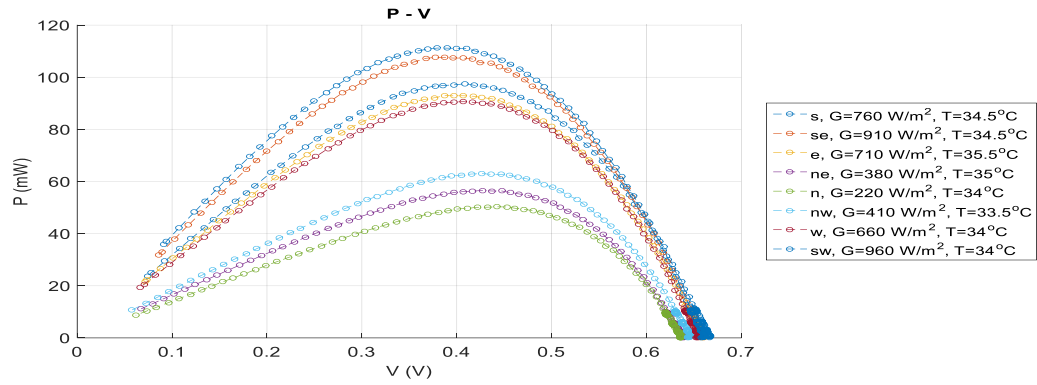


(β)

Σχήμα 25 : Χαρακτηριστικές (α) I - V και (β) P - V για κλίση 30° σε όλους τους προσανατολισμούς κατά τις πρωινές ώρες.

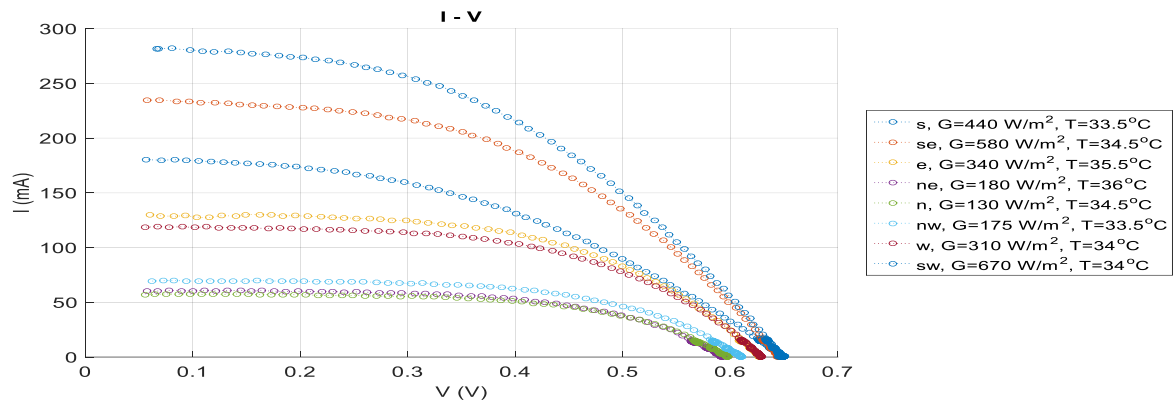


(α)

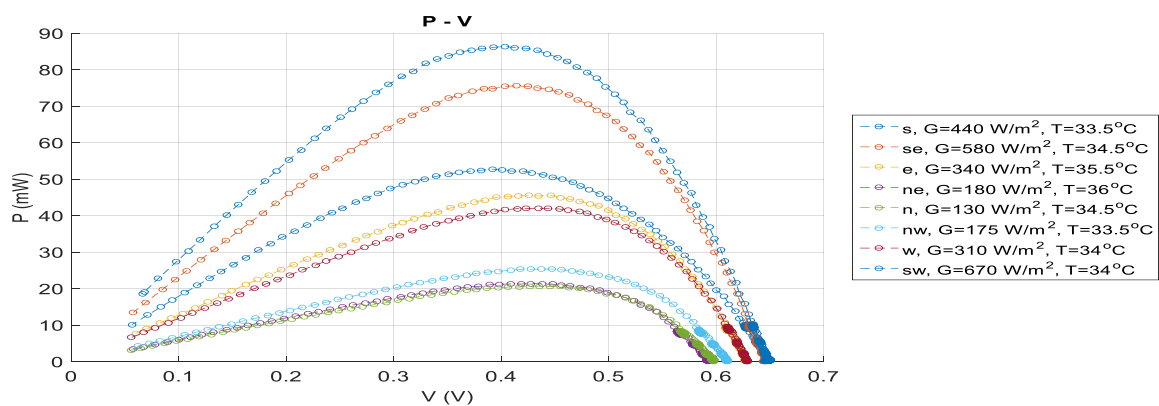


(β)

Σχήμα 26: Χαρακτηριστικές (α) $I-V$ και (β) $P-V$ για κλίση 60° σε όλους τους προσανατολισμούς κατά τις πρωινές ώρες.



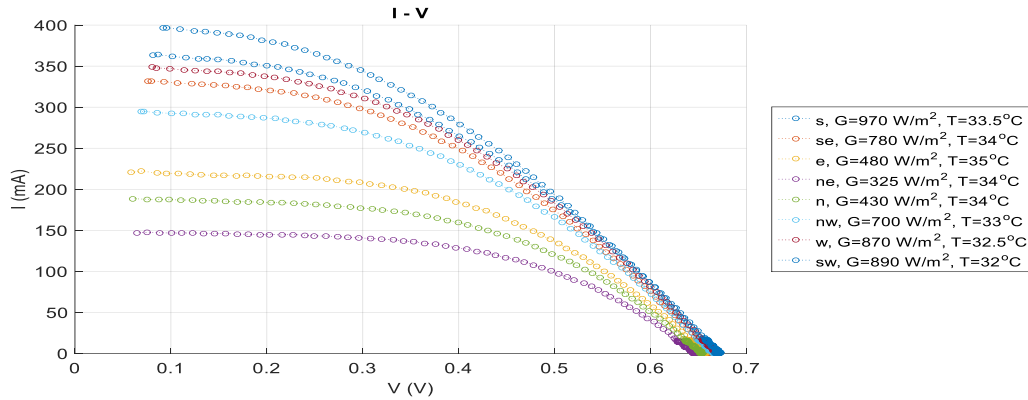
(α)



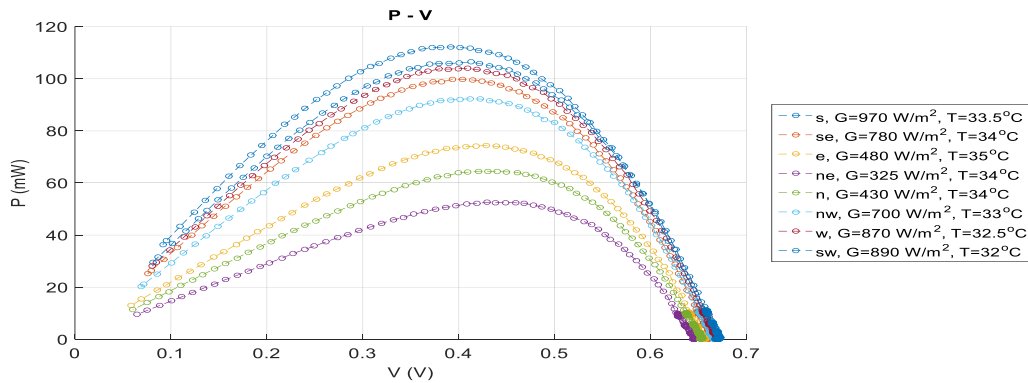
(β)

Σχήμα 27: Χαρακτηριστικές (α) $I-V$ και (β) $P-V$ για κλίση 90° σε όλους τους προσανατολισμούς κατά τις πρωινές ώρες.

Στα Σχήματα 28, 29 και 30 φαίνονται οι χαρακτηριστικές που ελήφθησαν με το Φ/Β πλαίσιο υπό κλίση 30° , 60° και 90° , αντίστοιχα, σε όλους τους προσανατολισμούς κατά τις μεσημεριανές ώρες της ημέρας (12:00 – 14:00).

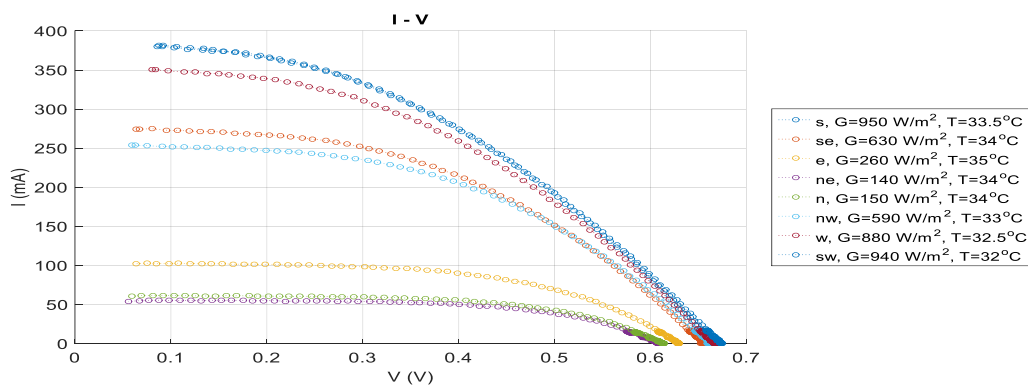


(α)

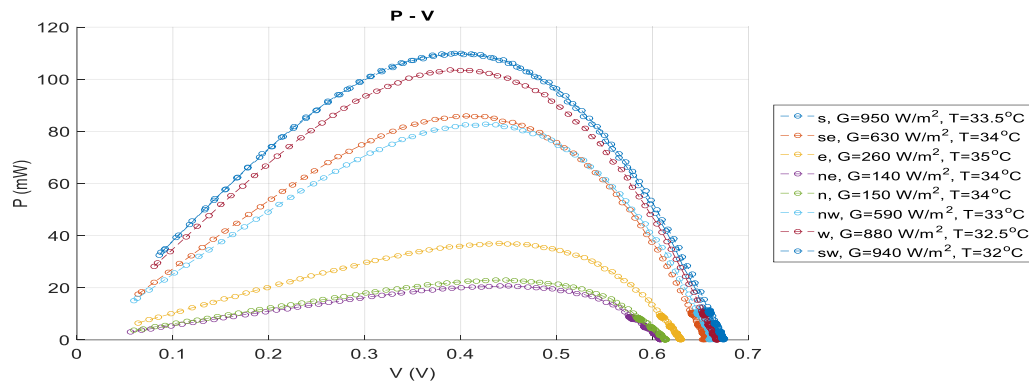


(β)

Σχήμα 28: Χαρακτηριστικές (α) $I-V$ και (β) $P-V$ για κλίση 30° σε όλους τους προσανατολισμούς κατά τις μεσημεριανές ώρες.

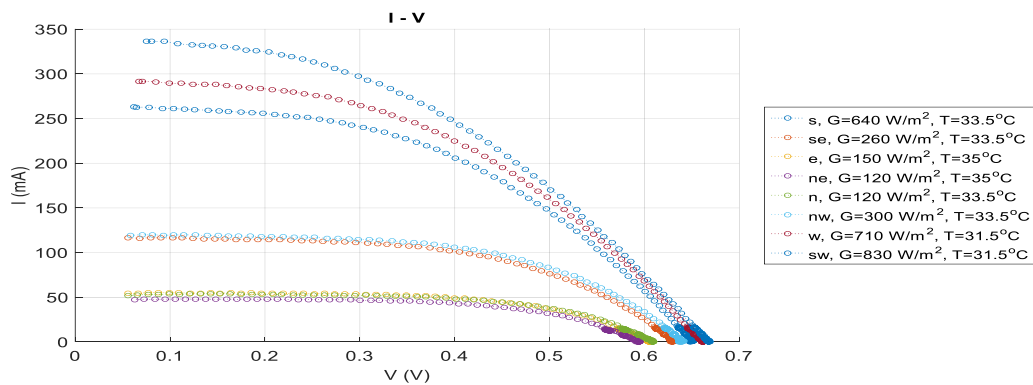


(α)

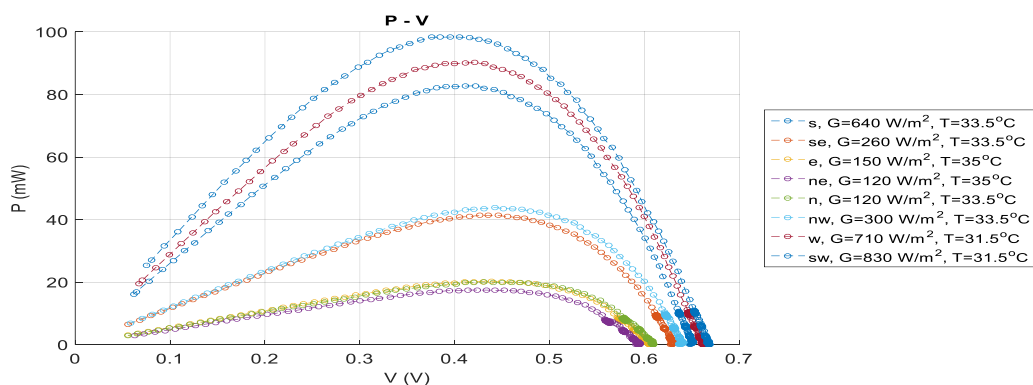


(β)

Σχήμα 29: Χαρακτηριστικές (α) $I-V$ και (β) $P-V$ για κλίση 60° σε όλους τους προσανατολισμούς κατά τις μεσημεριανές ώρες.



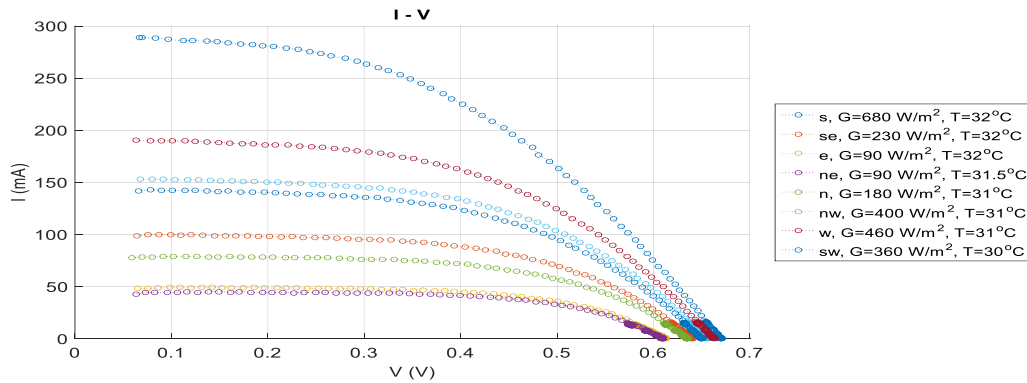
(α)



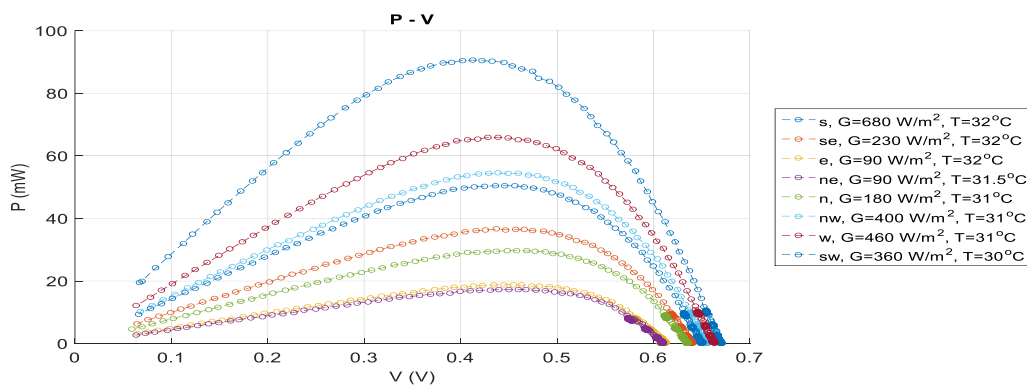
(β)

Σχήμα 30 : Χαρακτηριστικές (α) $I-V$ και (β) $P-V$ για κλίση 90° σε όλους τους προσανατολισμούς κατά τις μεσημεριανές ώρες.

Στα Σχήματα 31, 32 και 33 φαίνονται οι χαρακτηριστικές που ελήφθησαν με το πλαίσιο υπό κλίση 30° , 60° και 90° , αντίστοιχα, σε όλους τους προσανατολισμούς κατά τις απογευματινές ώρες της ημέρας (16:00 – 18:00).

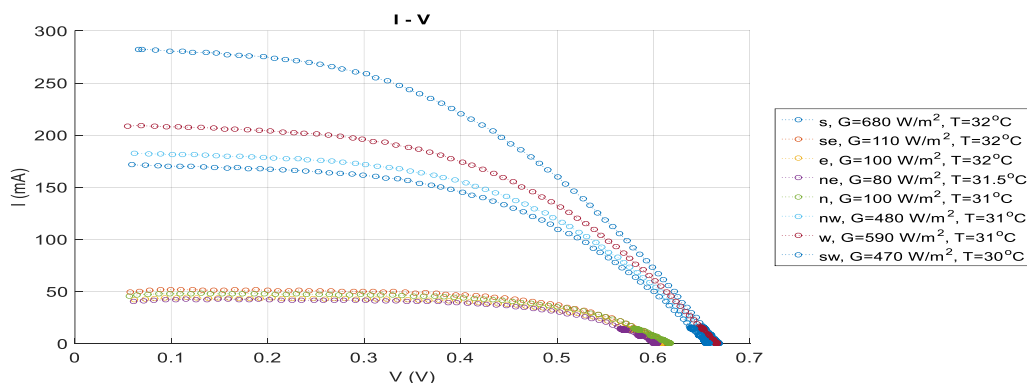


(α)

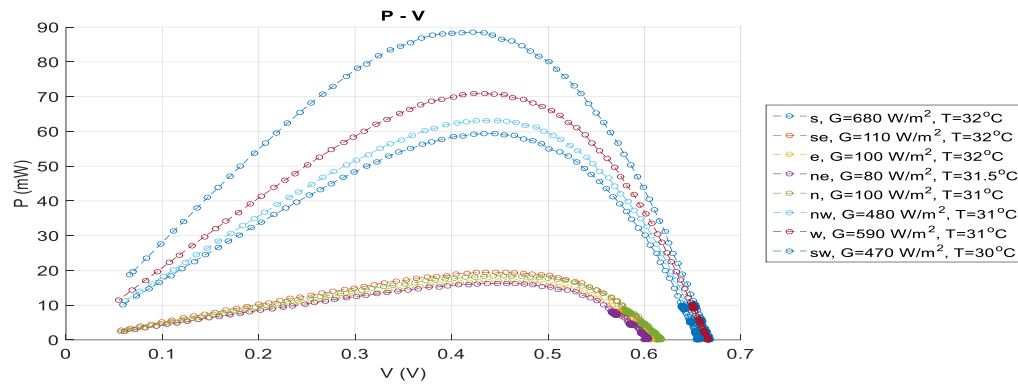


(β)

Σχήμα 31 : Χαρακτηριστικές (α) $I-V$ και (β) $P-V$ για κλίση 30° σε όλους τους προσανατολισμούς κατά τις απογευματινές ώρες.

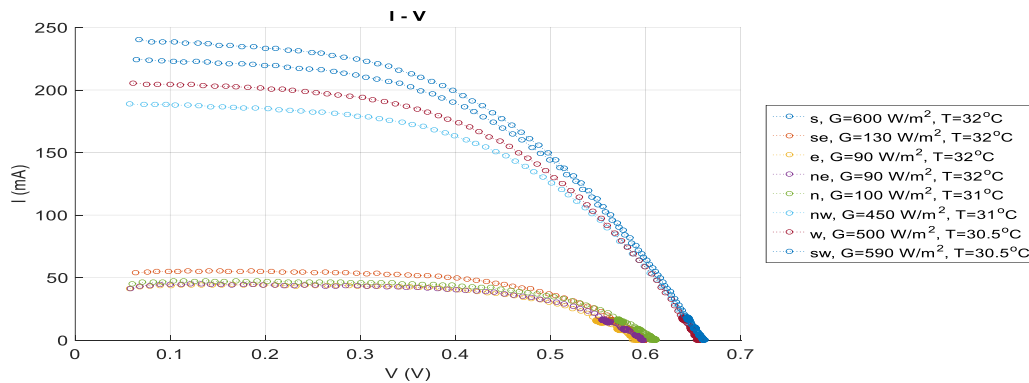


(α)

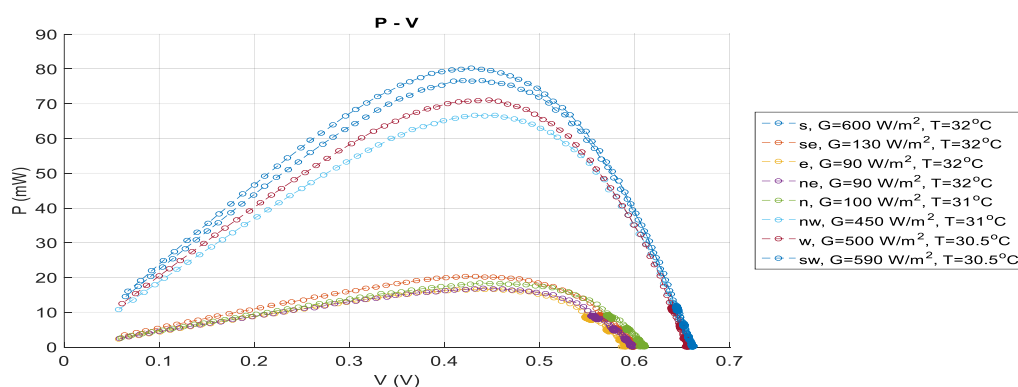


(β)

Σχήμα 32 : Χαρακτηριστικές (α) $I-V$ και (β) $P-V$ για κλίση 60° σε όλους τους προσανατολισμούς κατά τις απογευματινές ώρες.



(α)



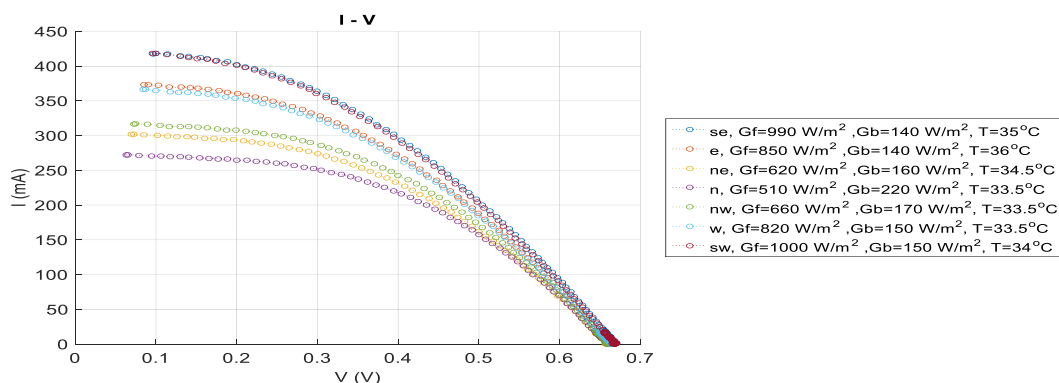
(β)

Σχήμα 33 : Χαρακτηριστικές $I-V$ και $P-V$ για κλίση 90° σε όλους τους προσανατολισμούς κατά τις απογευματινές ώρες.

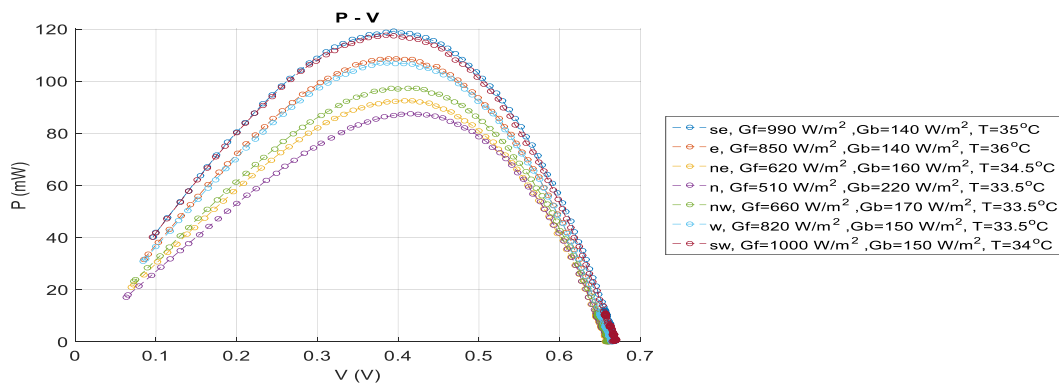
5.2.2 Χαρακτηριστικές I-V και P-V χωρίς κάλυψη πίσω όψης

Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια έγιναν με το Φ/Β πλαίσιο να δέχεται ηλιακή ακτινοβολία και από τις δύο όψεις του. Με G_f (W/m^2) συμβολίζεται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας της μπροστινής όψης (front side) του Φ/Β πλαισίου, με G_b (W/m^2) συμβολίζεται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας της πίσω όψης (back side) του Φ/Β πλαισίου και με T ($^{\circ}\text{C}$) η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στα Σχήματα 34, 35 και 36 φαίνονται οι χαρακτηριστικές που ελήφθησαν με το πλαίσιο υπό κλίση 30° , 60° και 90° , σε όλους τους προσανατολισμούς κατά τις πρωινές ώρες της ημέρας (9:00-11:00).

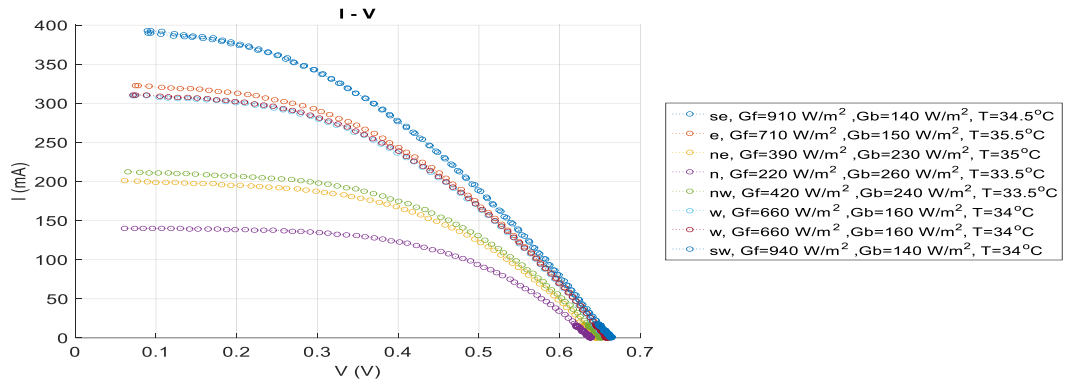


(α)

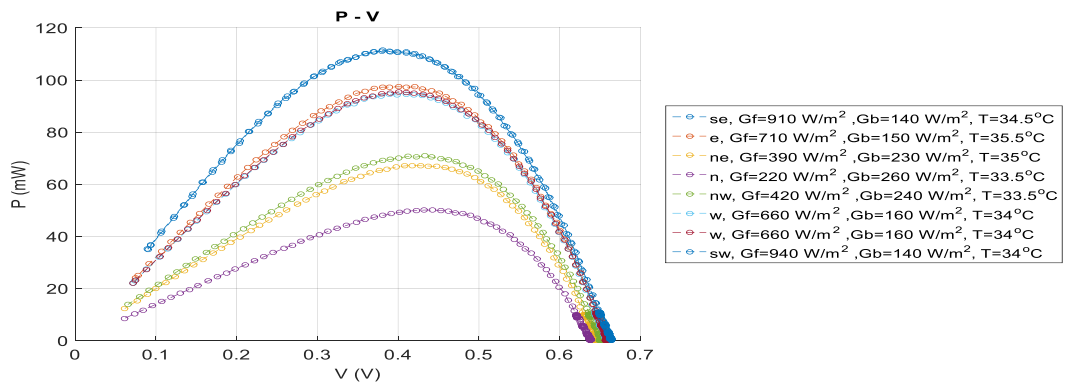


(β)

Σχήμα 34 : Χαρακτηριστικές (α) I-V και (β) P-V για κλίση 30° σε όλους τους προσανατολισμούς κατά τις πρωινές ώρες.

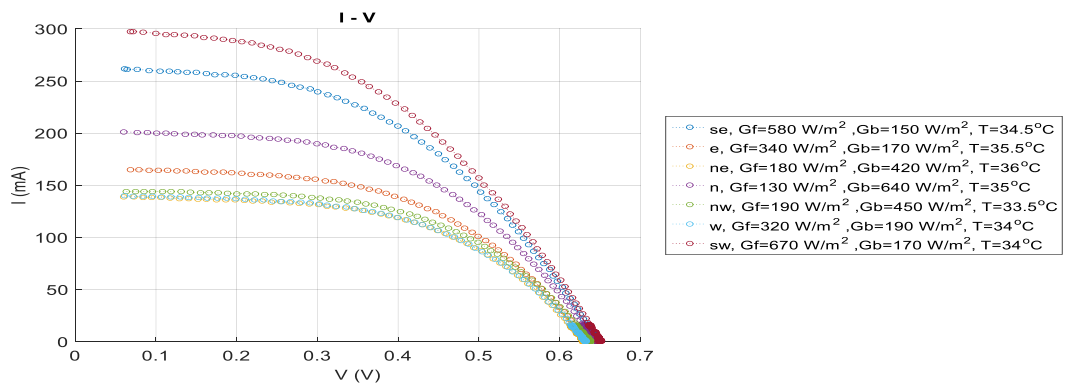


(α)

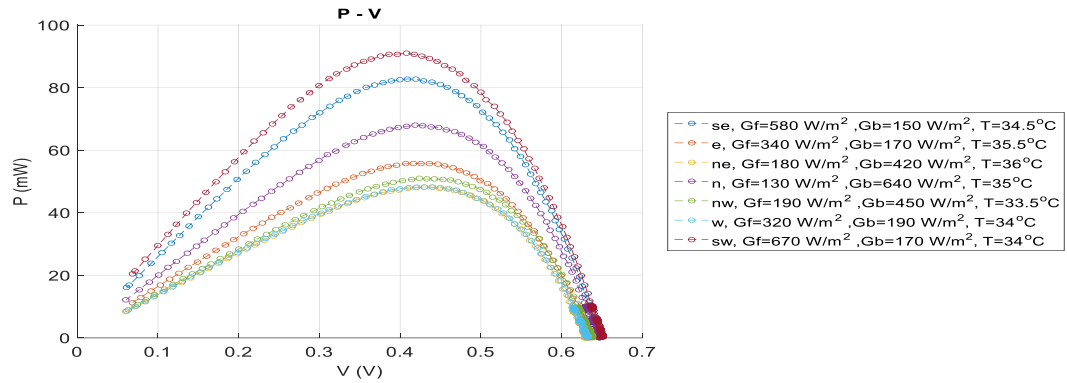


(β)

Σχήμα 35: Χαρακτηριστικές (α) I - V και (β) P - V για κλίση 60° σε όλους τους προσανατολισμούς κατά τις πρωινές ώρες.



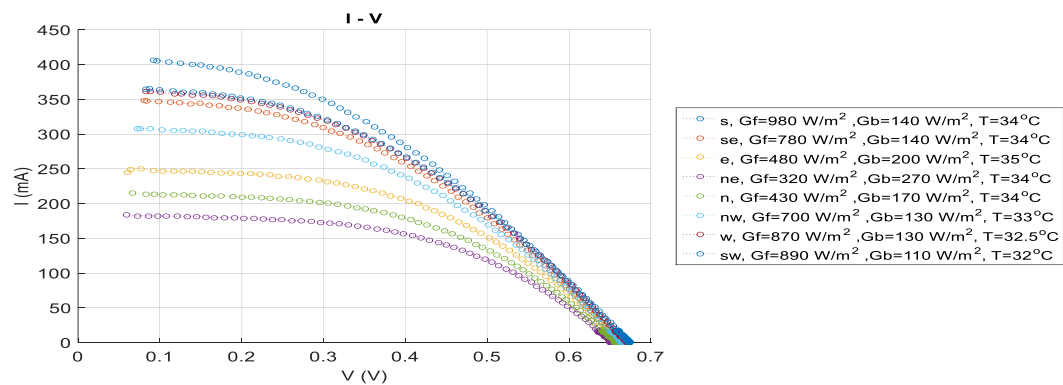
(α)



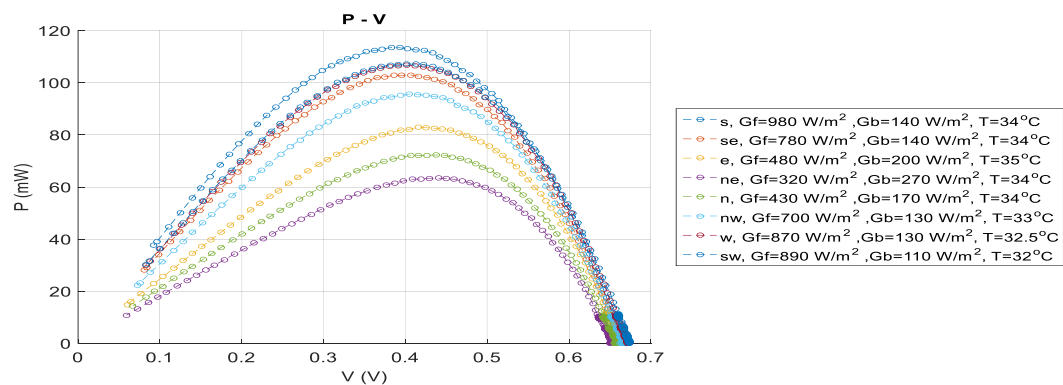
(β)

Σχήμα 36 : Χαρακτηριστικές (α) $I-V$ και (β) $P-V$ για κλίση 90° σε όλους τους προσανατολισμούς κατά τις πρωινές ώρες.

Στα Σχήματα 37, 38 και 39 φαίνονται οι χαρακτηριστικές που ελήφθησαν με το πλαίσιο υπό κλίση 30° , 60° και 90° , αντίστοιχα, σε όλους τους προσανατολισμούς κατά τις μεσημεριανές ώρες της ημέρας (12:00-14:00).

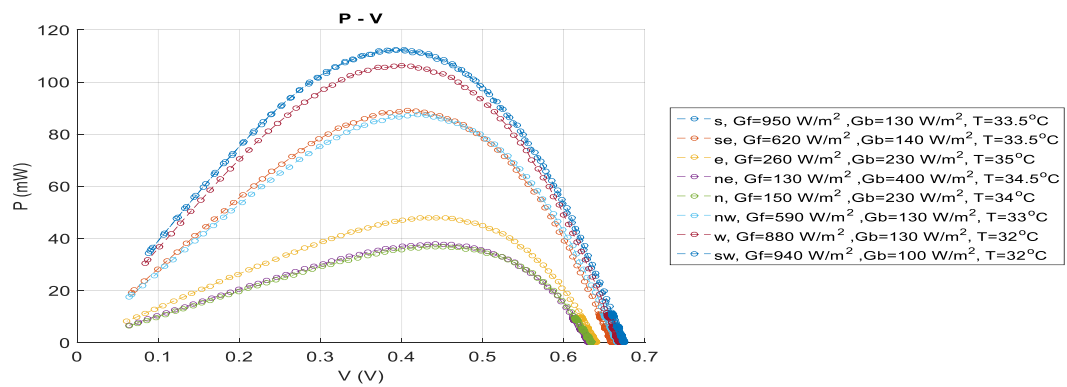
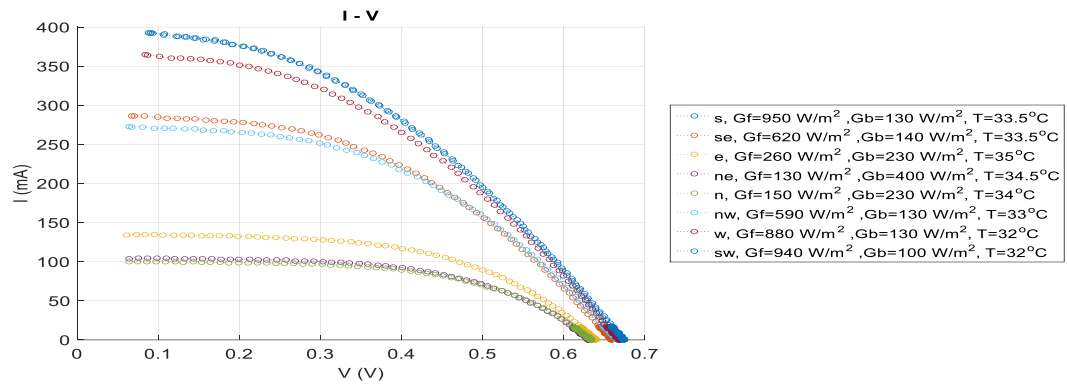


(α)

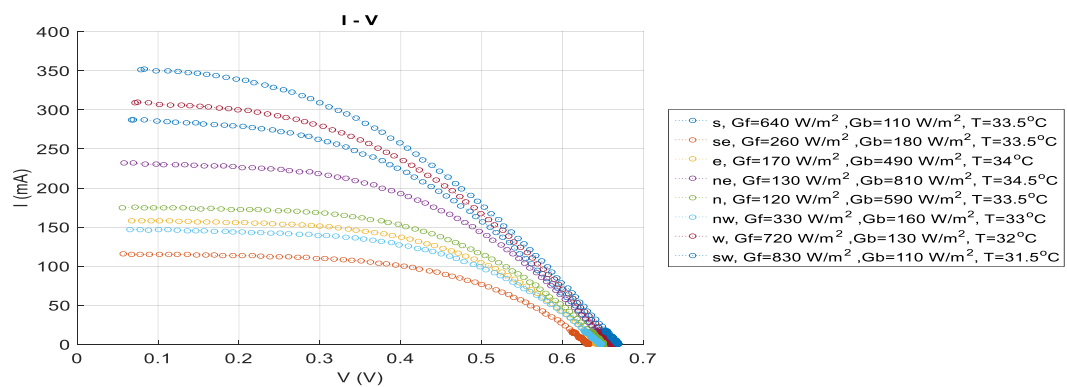


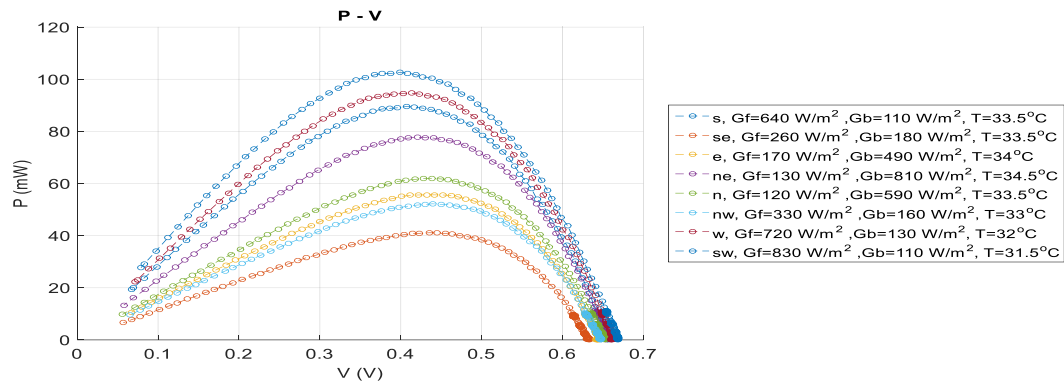
(β)

Σχήμα 37: Χαρακτηριστικές (α) $I-V$ και (β) $P-V$ για κλίση 30° σε όλους τους προσανατολισμούς κατά τις μεσημεριανές ώρες.



Σχήμα 38 : Χαρακτηριστικές (α) I-V και (β) P-V για κλίση 60° σε όλους τους προσανατολισμούς κατά τις μεσημεριανές ώρες.

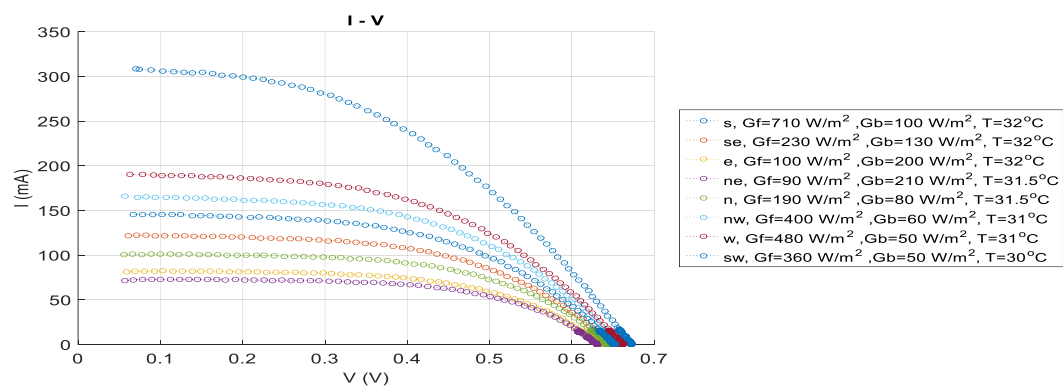




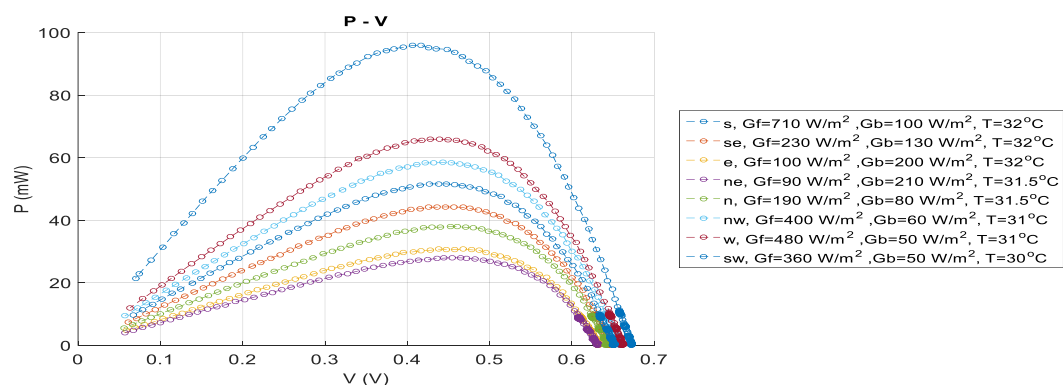
(β)

Σχήμα 39 : Χαρακτηριστικές (α) I-V και (β) P-V για κλίση 90° σε όλους τους προσανατολισμούς κατά τις μεσημεριανές ώρες.

Στα Σχήματα 40, 41 και 42 φαίνονται οι χαρακτηριστικές που ελήφθησαν με το πλαίσιο υπό κλίση 30° , 60° και 90° , σε όλους τους προσανατολισμούς κατά τις απογευματινές ώρες της ημέρας (16:00-18:00).

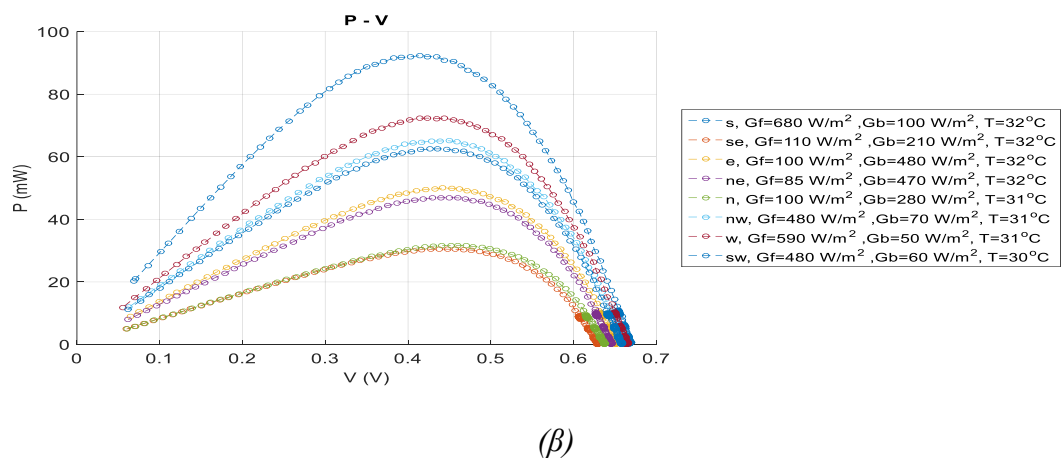
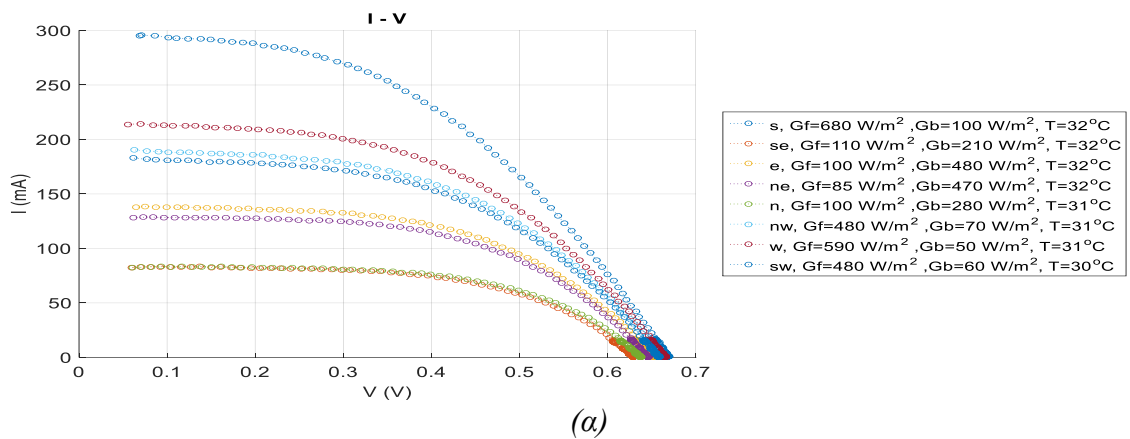


(α)

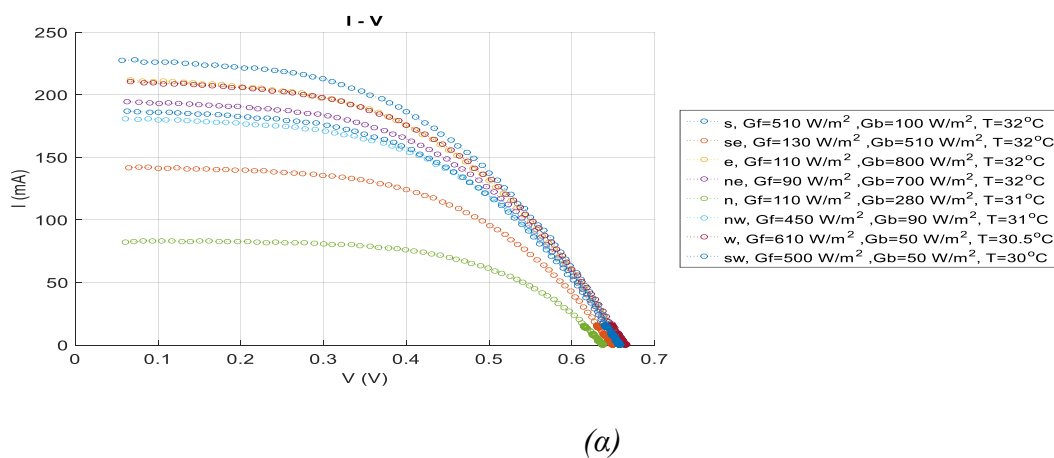


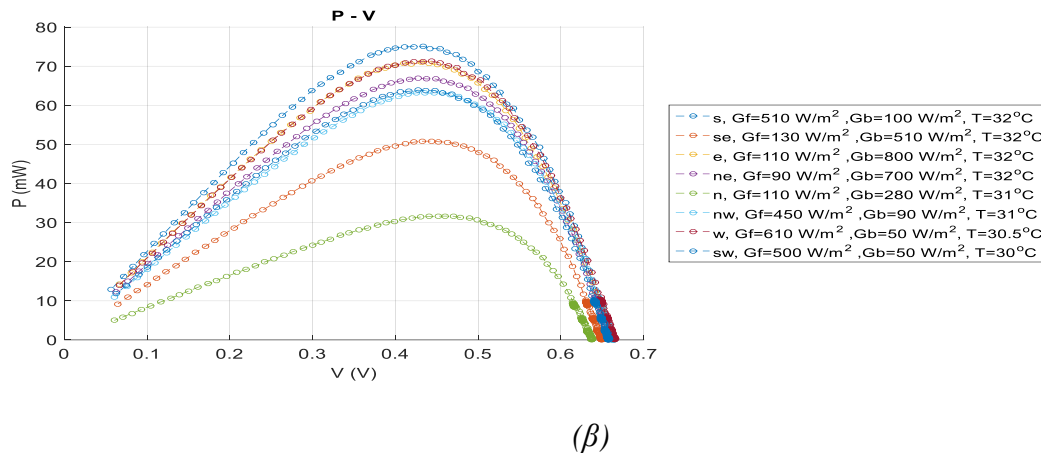
(β)

Σχήμα 40 : Χαρακτηριστικές (α) I-V και (β) P-V για κλίση 30° σε όλους τους προσανατολισμούς κατά τις απογευματινές ώρες.



Σχήμα 41: Χαρακτηριστικές (α) $I-V$ και (β) $P-V$ για κλίση 60° σε όλους τους προσανατολισμούς κατά τις απογευματινές ώρες.





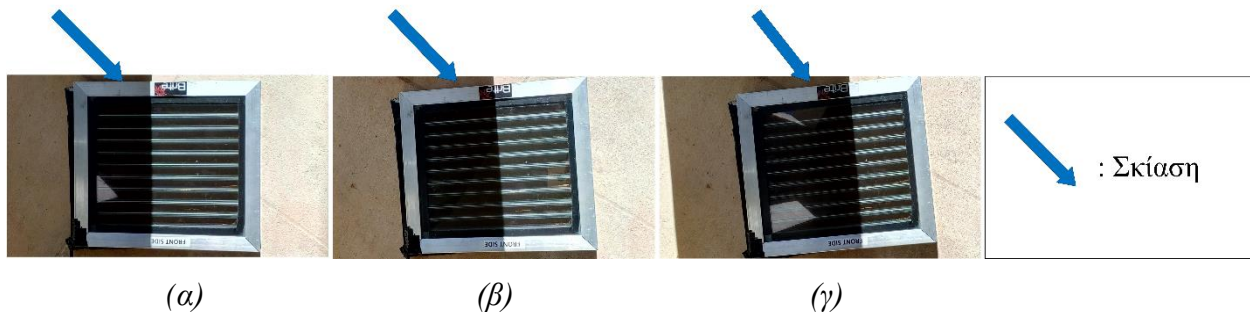
Σχήμα 42 : Χαρακτηριστικές (α) I-V και (β) P-V για κλίση 90° σε όλους τους προσανατολισμούς κατά τις απογευματινές ώρες.

Συγκρίνοντας τις μετρήσεις χωρίς κάλυψη της πίσω όψης του Φ/Β πλαισίου, με αυτές με κάλυψη της πίσω όψης, παρατηρήθηκε αύξηση της παραγόμενης ισχύος σε μετρήσεις ίδιας έντασης προσπίπτουσας ακτινοβολίας, κλίσης και προσανατολισμού στην περίπτωση μη-κάλυψης της πίσω όψης. Όπως και στις μετρήσεις με κάλυψη της πίσω όψης του Φ/Β πλαισίου, δε παρατηρούνται τοπικά μέγιστα/ελάχιστα, ανεξαρτήτως της διαφοράς στην ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας των δύο όψεων.

5.2.3 Χαρακτηριστικές I-V και P-V υπό συνθήκες μερικής σκίασης

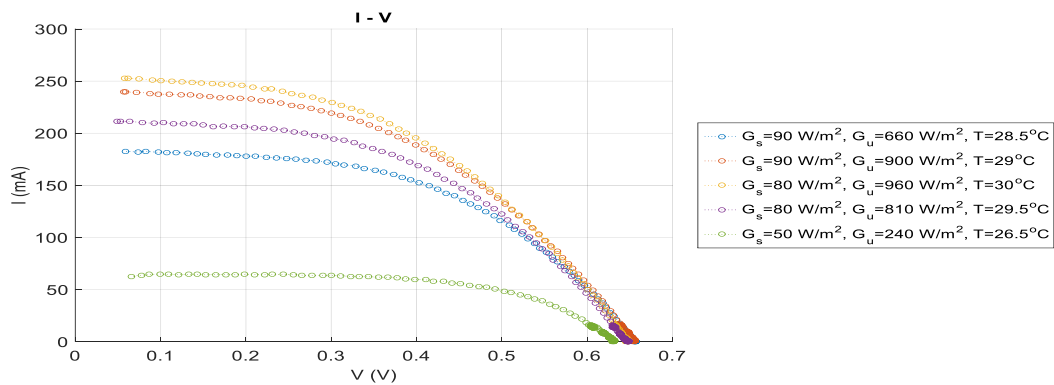
Σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας το Φ/Β πλαίσιο μπορεί να σκιάζεται μερικώς ή ολικώς, οπότε έγιναν μετρήσεις υπό διάφορες συνθήκες σκίασης. Παρακάτω φαίνονται οι χαρακτηριστικές που λήφθηκαν κατά τις μετρήσεις υπό μερική σκίαση, όπου G_s (shaded) είναι η ακτινοβολία που δέχεται η σκιασμένη περιοχή του πλαισίου (σε W/m^2), G_u (unshaded) είναι η ακτινοβολία που δέχεται η μη-σκιασμένη περιοχή του Φ/Β πλαισίου (σε W/m^2) και T ($^\circ\text{C}$) είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στην Εικόνα 4 φαίνεται η σκίαση κάθετα στα stripes του διάφανου Φ/Β πλαισίου.

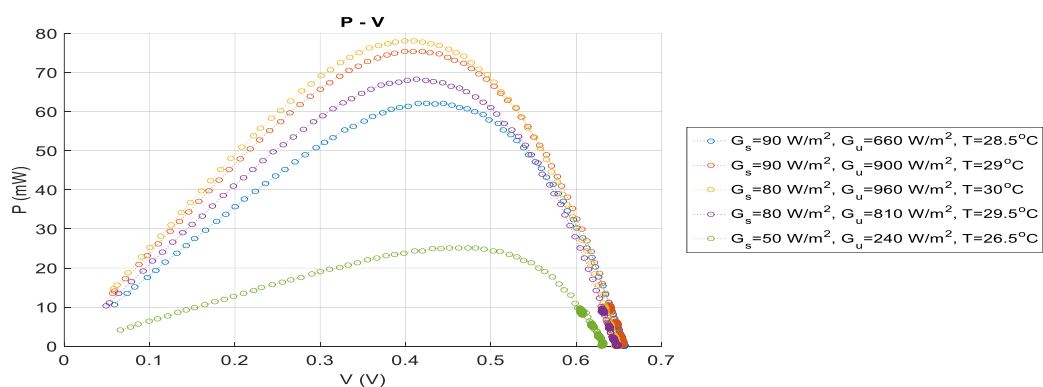


Εικόνα 4 : Σκίαση κάθετα στα stripes του διάφανου Φ/Β πλαισίου (κλίση 0°) κατά: (α) $1/3$, (β) $1/2$ και (γ) $2/3$.

Στα Σχήματα 43, 44 και 45 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές που λήφθηκαν υπό τις συνθήκες που φαίνονται στην Εικόνα 4.

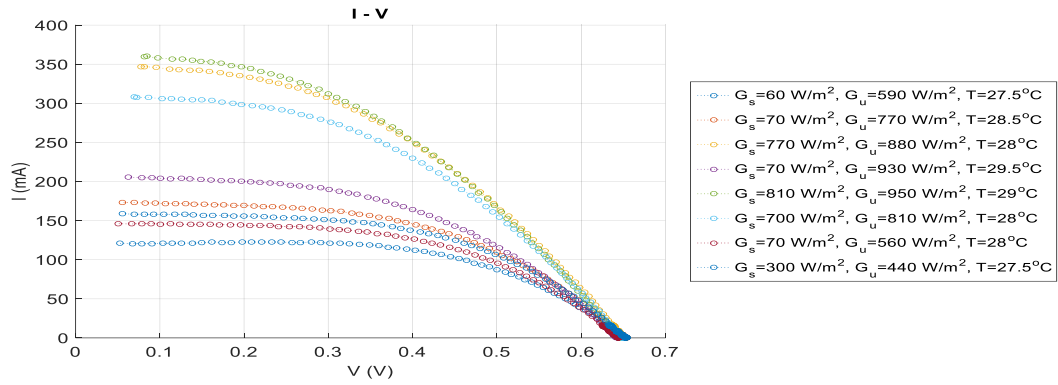


(α)

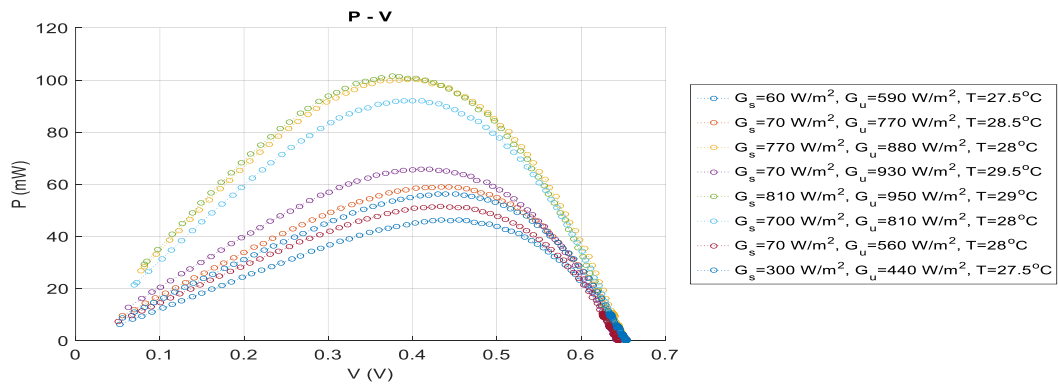


(β)

Σχήμα 43 : Χαρακτηριστικές (α) I-V και (β) P-V με σκίαση κάθετα στα stripes του Φ/Β πλαισίου κατά $1/3$ και κλίση 0° .

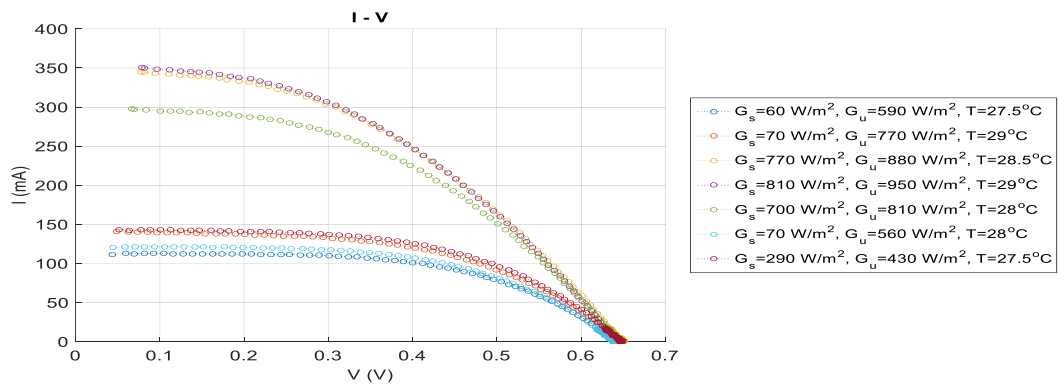


(α)

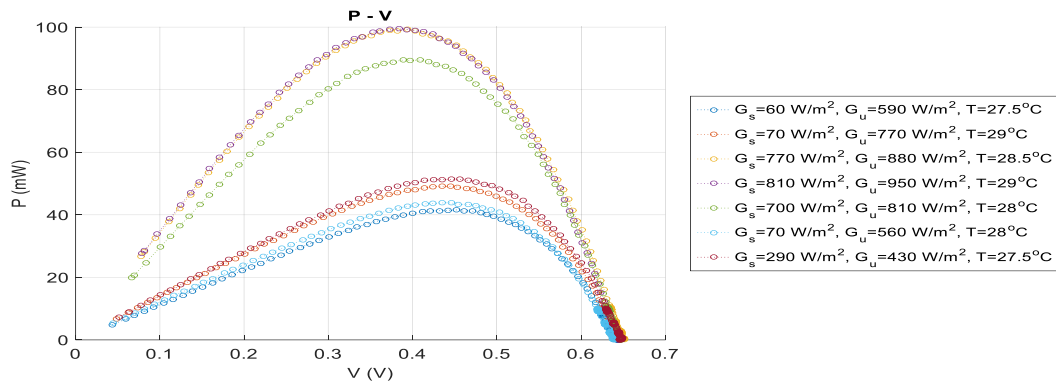


(β)

Σχήμα 44 : Χαρακτηριστικές (α) I-V και (β) P-V με σκίαση κάθετα στα stripes του Φ/B πλαισίου κατά $1/2$ και κλίση 0° .



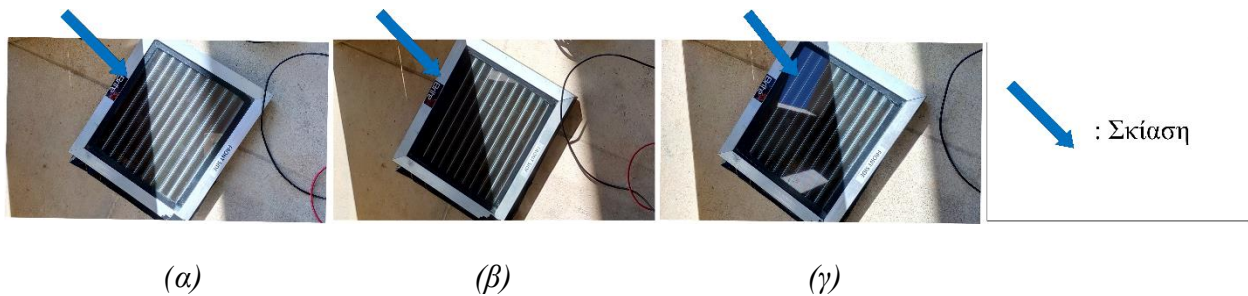
(α)



(β)

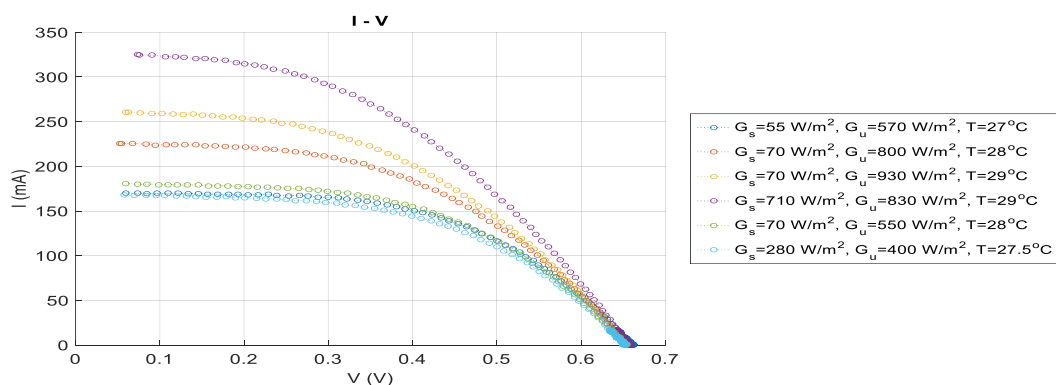
Σχήμα 45 : Χαρακτηριστικές (α) I-V και (β) P-V με σκίαση κάθετα στα stripes του Φ/B πλαισίου κατά 2/3 και κλίση 0°.

Στην Εικόνα 5 φαίνεται η σκίαση διαγώνια στα stripes του διάφανου Φ/B πλαισίου.

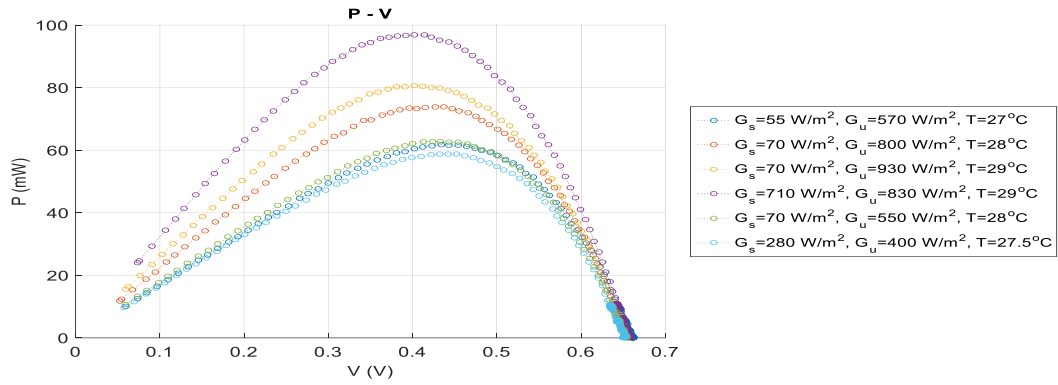


Εικόνα 5 : Σκίαση διαγώνια στα stripes του διάφανου Φ/B πλαισίου (κλίση 0°) κατά: (α) 1/3, (β) 1/2 και (γ) 2/3.

Στα Σχήματα 46, 47 και 48 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές που λήφθηκαν υπό τις συνθήκες που φαίνονται στην Εικόνα 5.

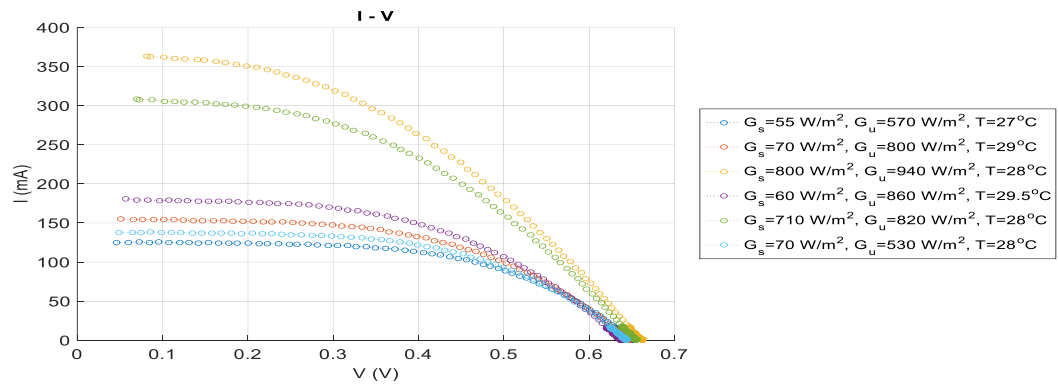


(α)

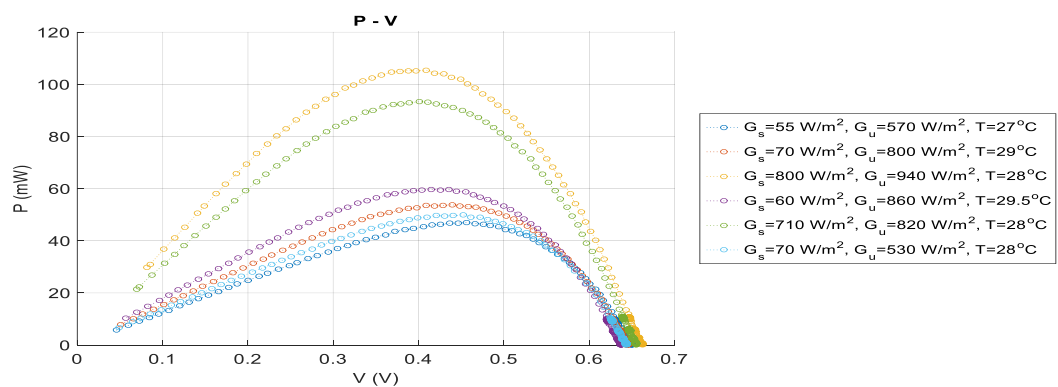


(β)

Σχήμα 46 : Χαρακτηριστικές (α) I-V και (β) P-V με σκίαση κατά 1/3 διαγώνια στα stripes του Φ/B και κλίση 0° .

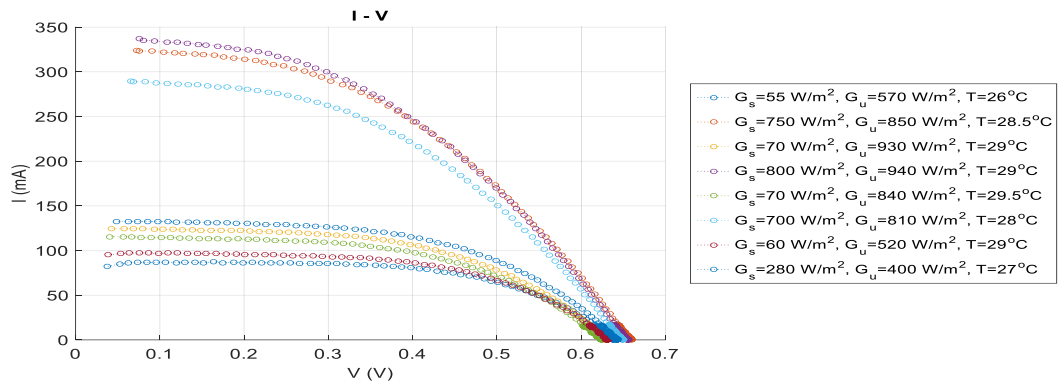


(α)

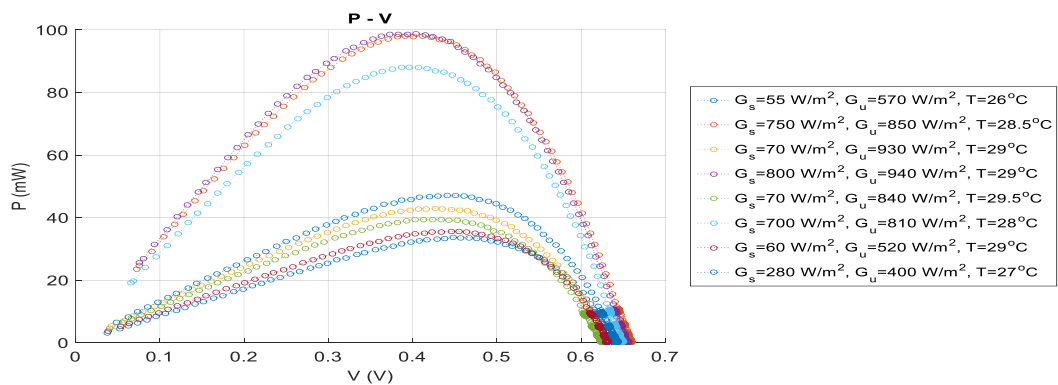


(β)

Σχήμα 47 : Χαρακτηριστικές (α) I-V και (β) P-V με σκίαση διαγώνια στα stripes του Φ/B πλαισίου κατά 1/2 και κλίση 0° .



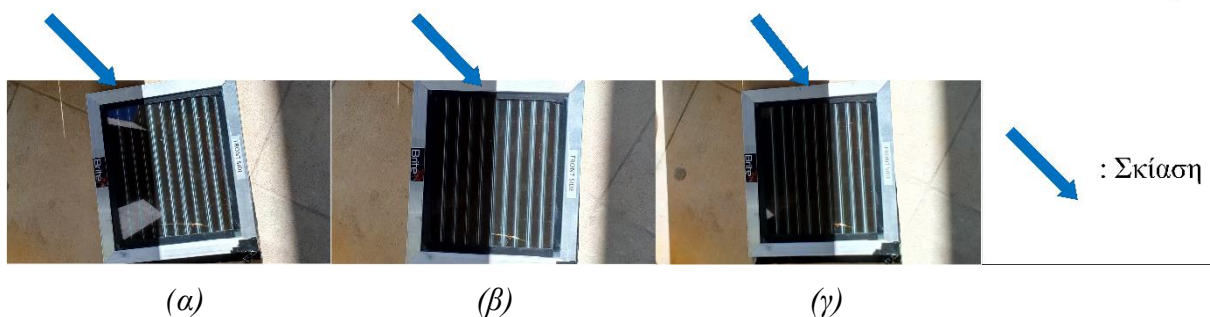
(α)



(β)

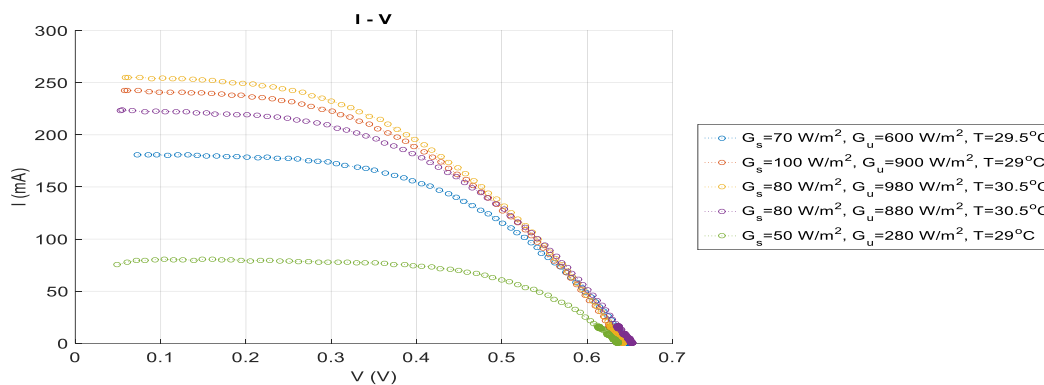
Σχήμα 48 : Χαρακτηριστικές (α) I-V και (β) P-V με σκίαση διαγώνια στα stripes του Φ/B πλαισίου κατά 2/3 και κλίση 0°.

Στην Εικόνα 6 φαίνεται η σκίαση παράλληλα με τα stripes του διάφανου Φ/B πλαισίου.

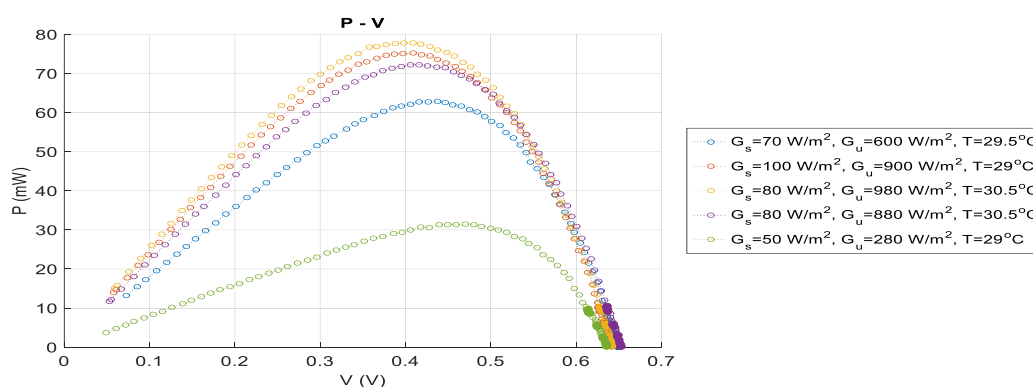


Εικόνα 6 : Σκίαση οριζόντια στα stripes του διάφανου Φ/B πλαισίου (κλίση 0°) κατά: (α) 1/3, (β) 1/2 και (γ) 2/3.

Στα Σχήματα 49, 50 και 51 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές που λήφθηκαν υπό τις συνθήκες που φαίνονται στην Εικόνα 6.

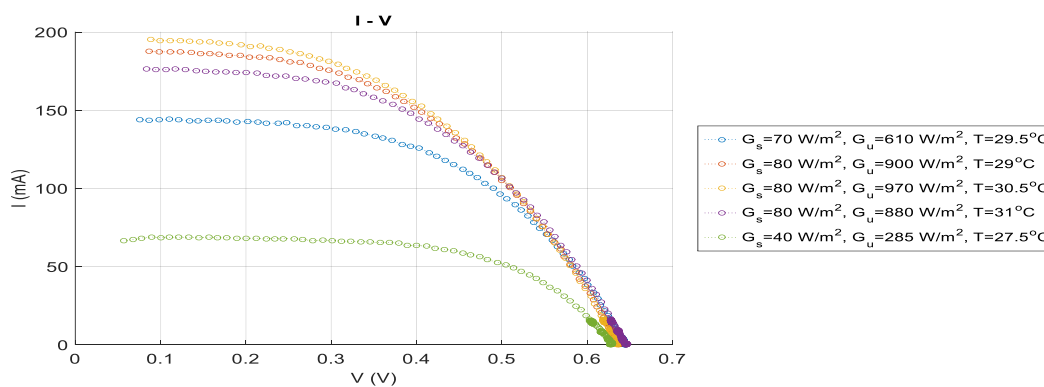


(α)

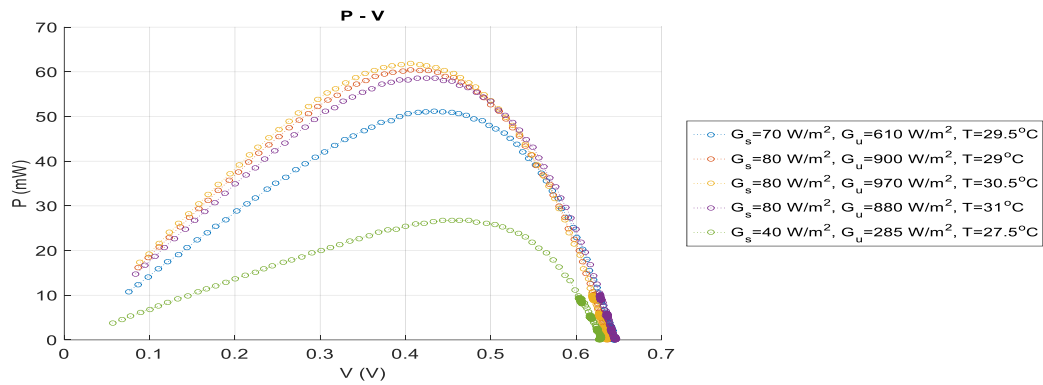


(β)

Σχήμα 49 : Χαρακτηριστικές (α) I-V και (β) P-V με σκίαση παράλληλα με τα stripes του Φ/B πλαισίου κατά $1/3$ και κλίση 0° .

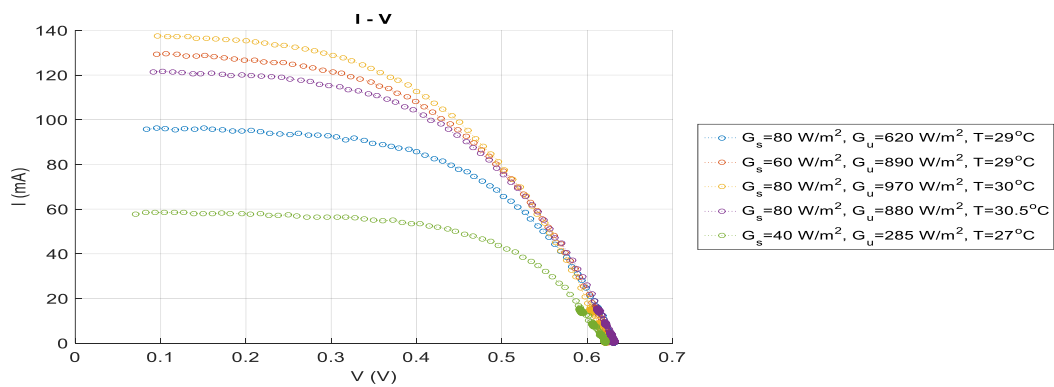


(α)

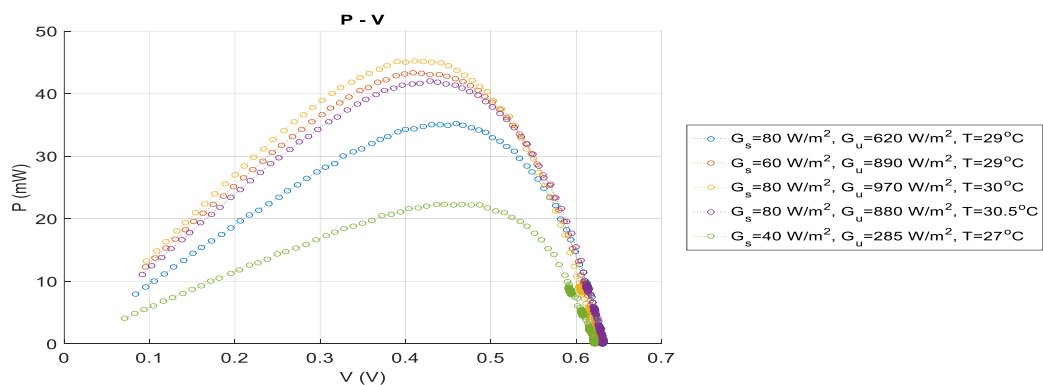


(β)

Σχήμα 50 : Χαρακτηριστικές (α) I-V και (β) P-V με σκίαση παράλληλα με τα stripes του Φ/B πλαισίου κατά $1/2$ και κλίση 0° .



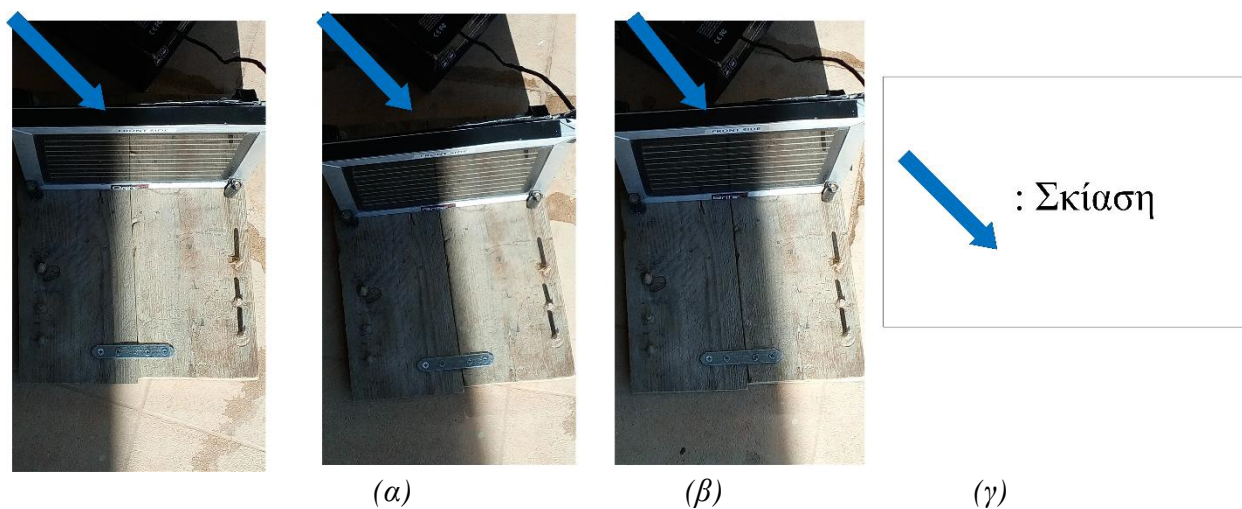
(α)



(β)

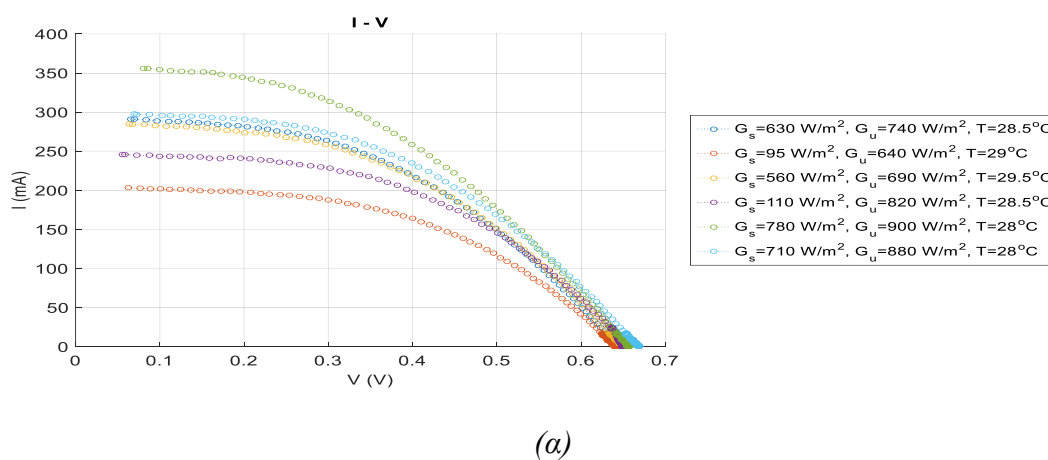
Σχήμα 51 : Χαρακτηριστικές (α) I-V και (β) P-V με σκίαση παράλληλα με τα stripes του Φ/B πλαισίου κατά $2/3$ και κλίση 0° .

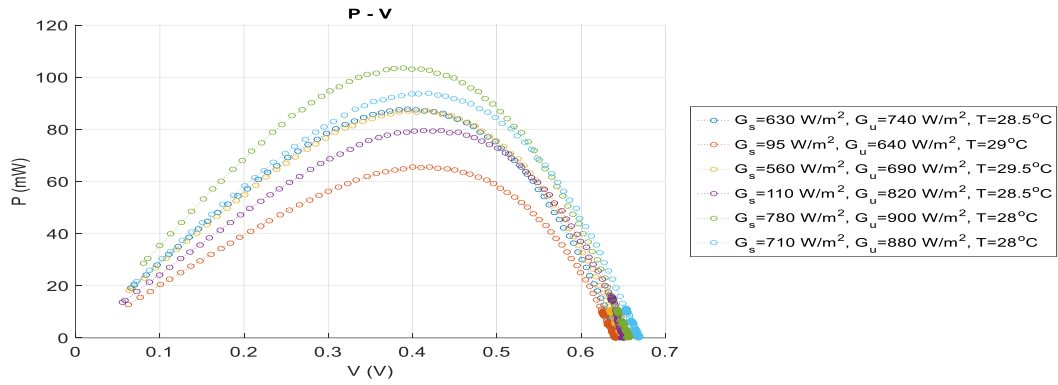
Στην Εικόνα 7 φαίνεται η σκίαση κάθετα στα stripes του Φ/B πλαισίου με κλίση 90° .



Εικόνα 7 : Σκίαση κάθετα στα stripes του Φ/B πλαισίου (κλίση 90°) κατά: (α) $1/3$, (β) $1/2$ και (γ) $2/3$.

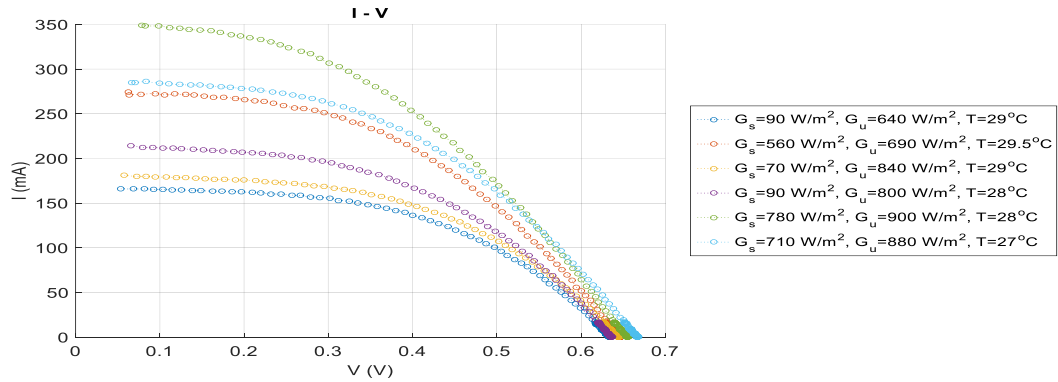
Στα Σχήματα 52, 53 και 54 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές που λήφθηκαν υπό τις συνθήκες που φαίνονται στην Εικόνα 7.



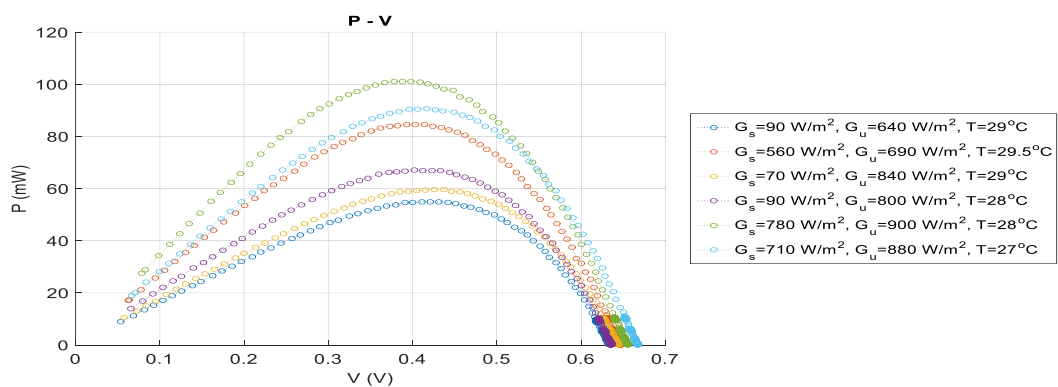


(β)

Σχήμα 52 : Χαρακτηριστικές (α) I-V και (β) P-V με σκίαση κάθετη στα stripes του Φ/B πλαισίου κατά 1/3 και κλίση 90°.

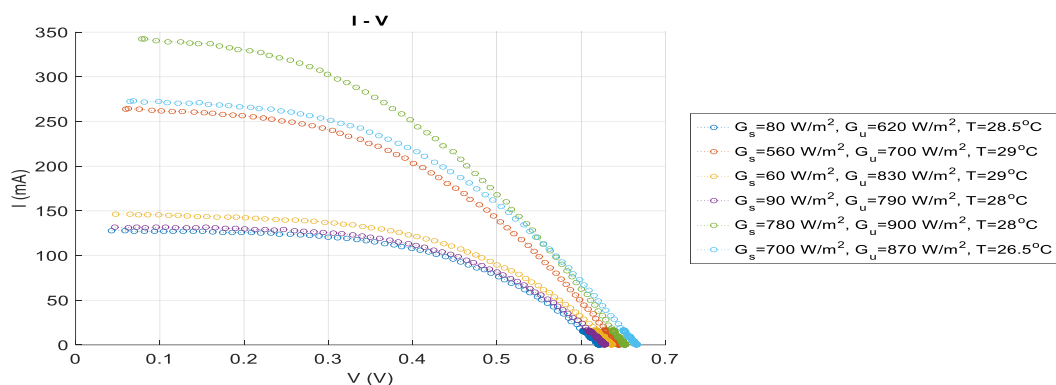


(α)

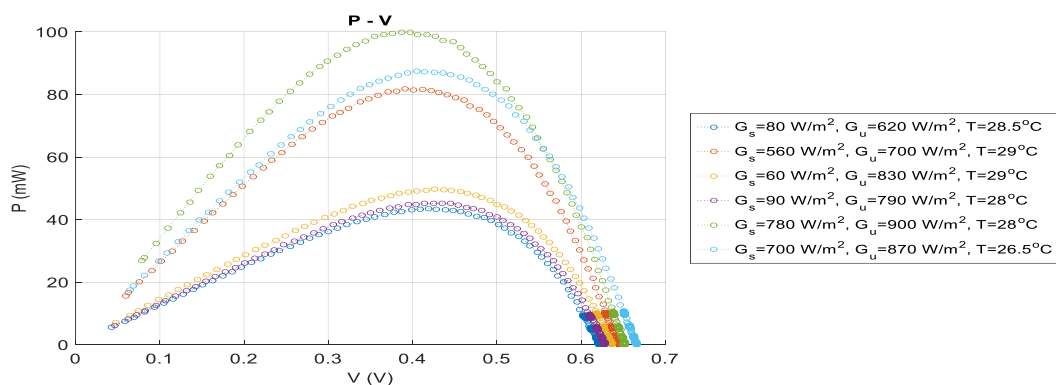


(β)

Σχήμα 53 : Χαρακτηριστικές (α) I-V και (β) P-V με σκίαση κάθετη στα stripes του Φ/B πλαισίου κατά 1/2 και κλίση 90°.



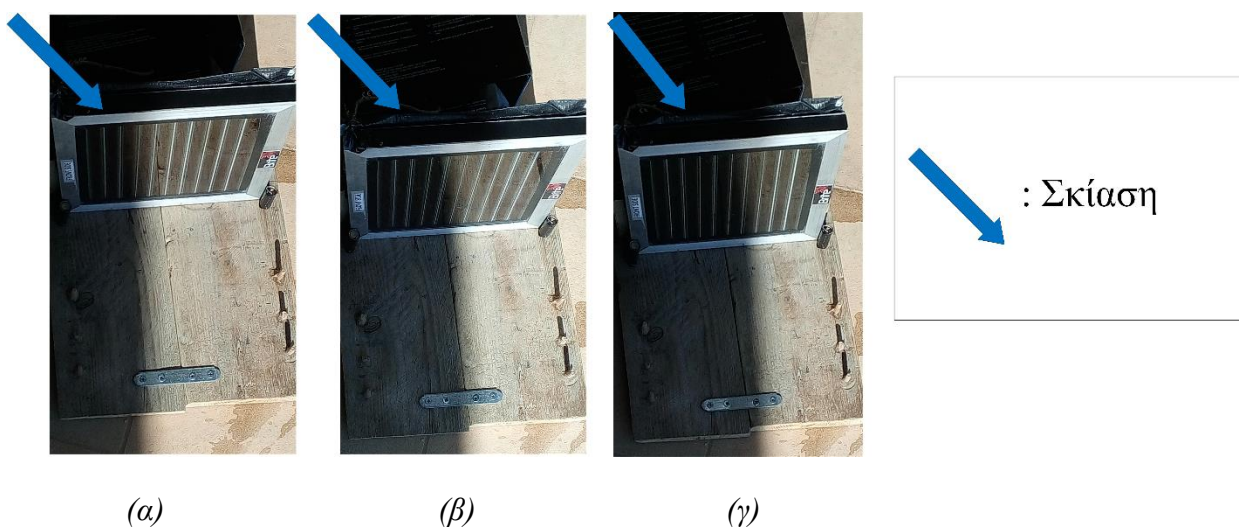
(α)



(β)

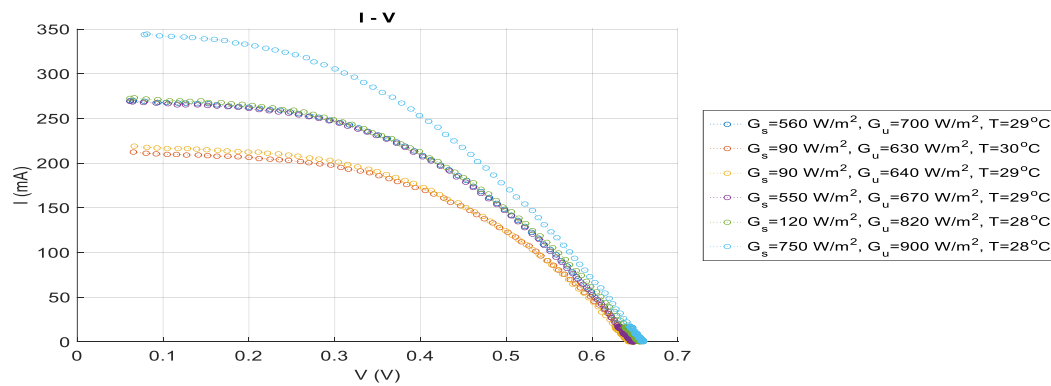
Σχήμα 54 : Χαρακτηριστικές (α) I-V και (β) P-V με σκίαση κάθετη στα stripes του Φ/Β πλαισίου κατά 2/3 και κλίση 90° .

Στην Εικόνα 8 φαίνεται η σκίαση παράλληλα με τα stripes του Φ/Β πλαισίου με κλίση 90° .

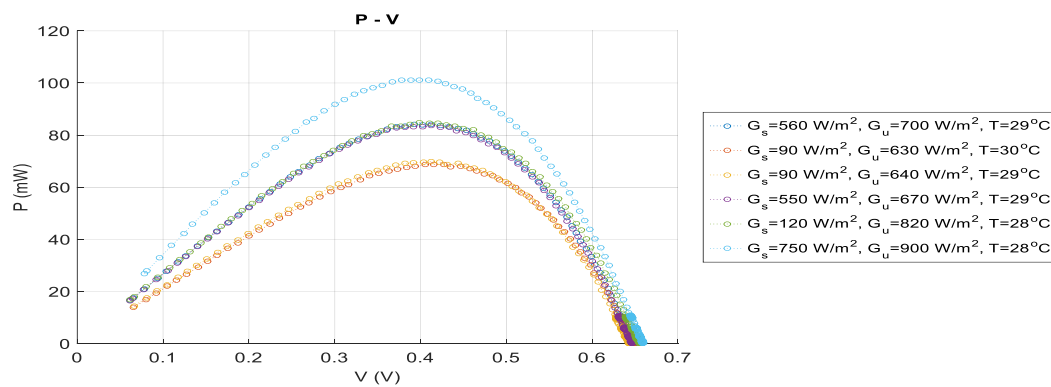


Εικόνα 8: Σκίαση παράλληλα με τα stripes του Φ/Β πλαισίου (κλίση 90°) κατά: (α) 1/3, (β) 1/2 και (γ) 2/3.

Στα Σχήματα 55, 56 και 57 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές που λήφθηκαν υπό τις συνθήκες που φαίνονται στην Εικόνα 8.

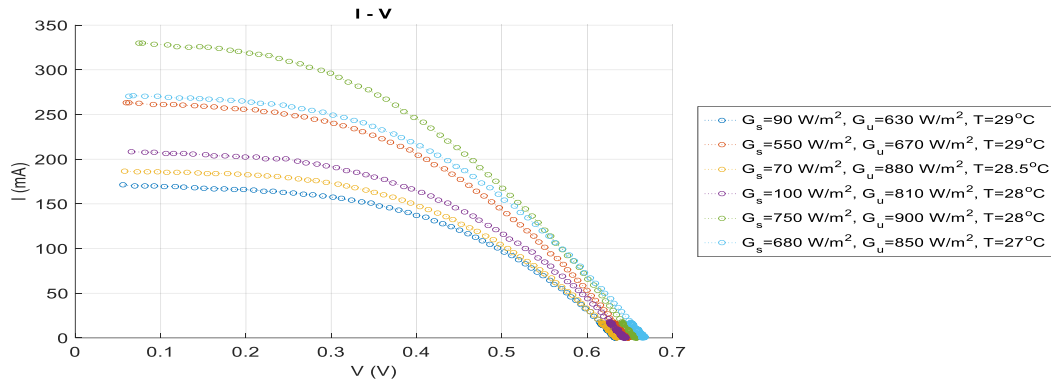


(α)

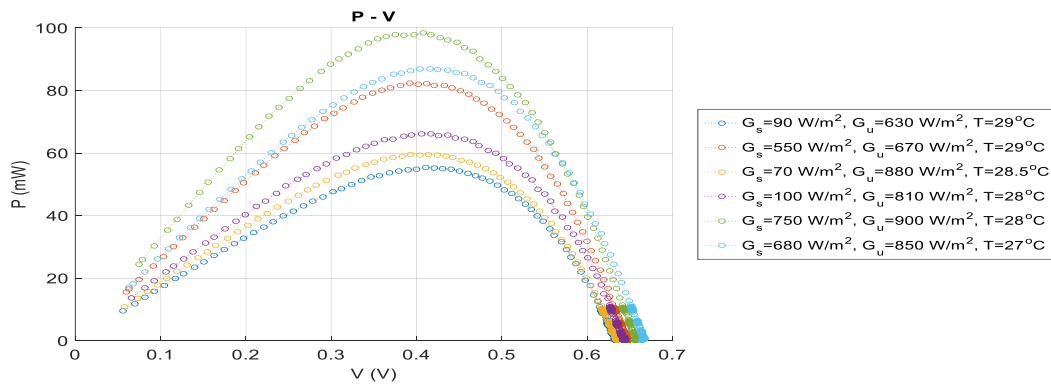


(β)

Σχήμα 55 : Χαρακτηριστικές (α) I-V και (β) P-V με σκίαση παράλληλα με τα stripes του Φ/B πλαισίου κατά $1/3$ και κλίση 90° .

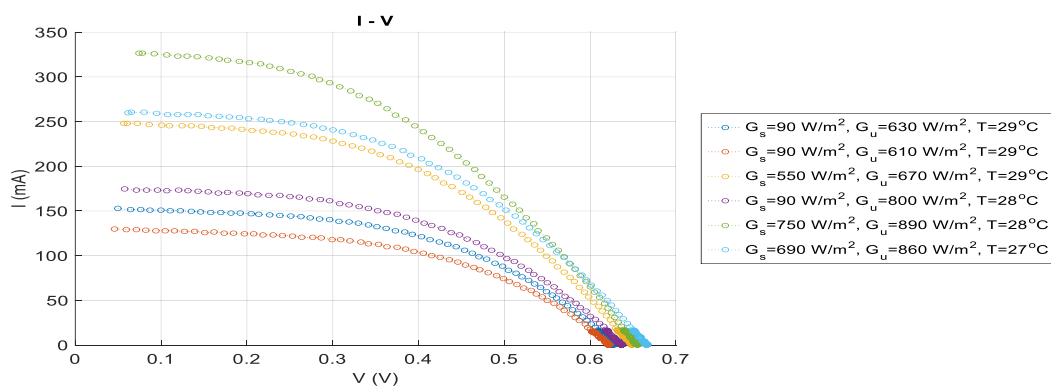


(α)

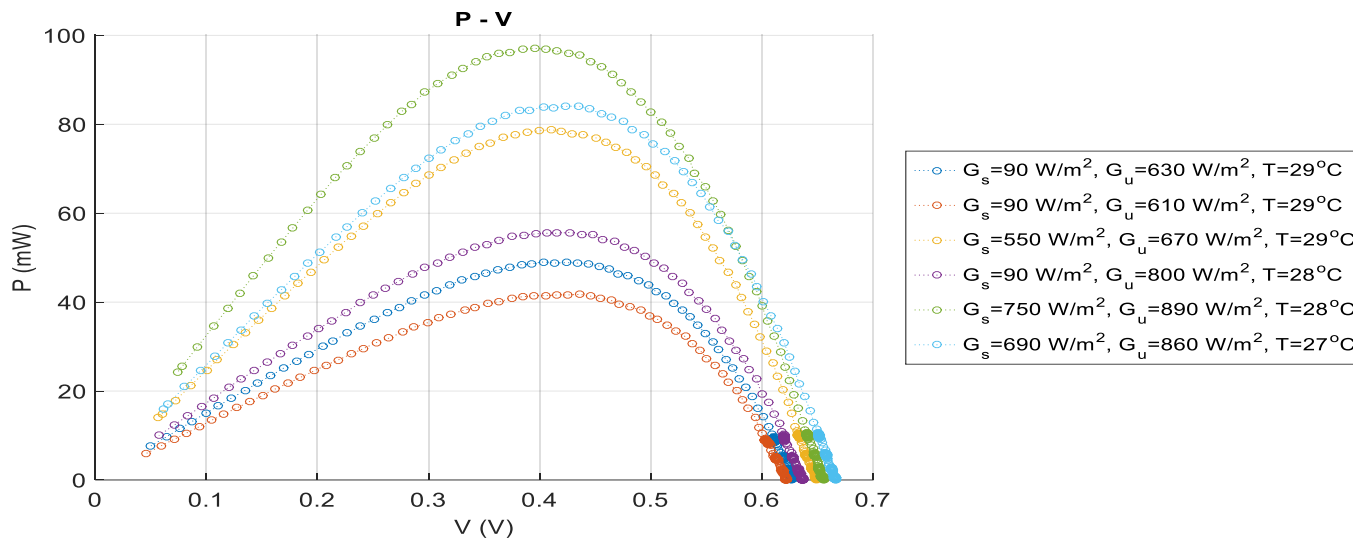


(β)

Σχήμα 56: Χαρακτηριστικές (α) $I-V$ και (β) $P-V$ με σκίαση παράλληλα με τα stripes του Φ/B πλαισίου κατά $1/2$ και κλίση 90° .



(α)



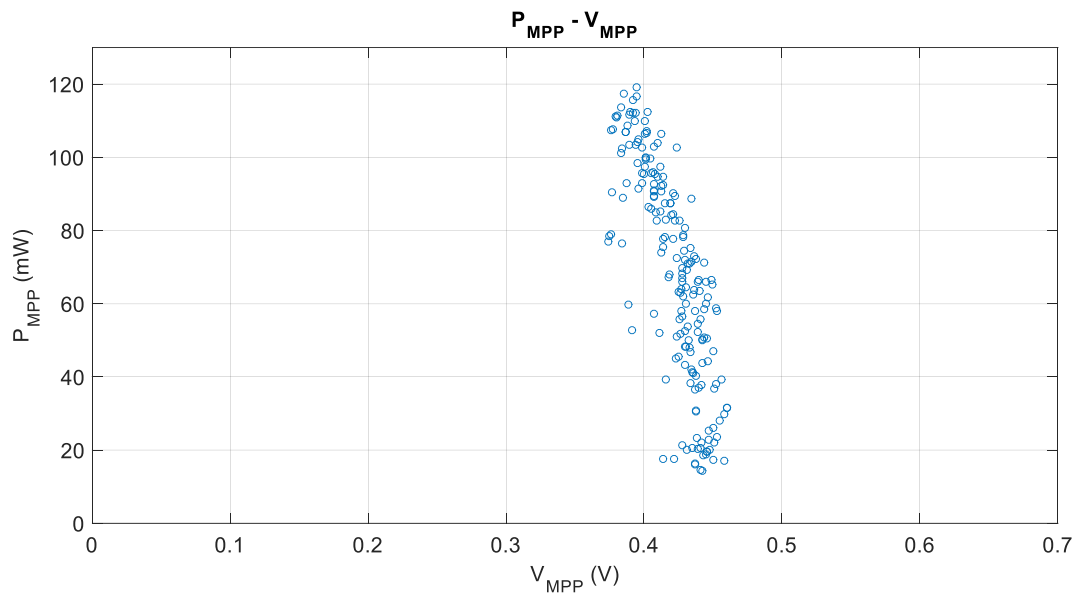
(β)

Σχήμα 57: Χαρακτηριστικές I-V και P-V με σκίαση παράλληλα με τα stripes του Φ/B πλαισίου κατά 2/3 και κλίση 90° .

Παρατηρείται πως η μερική σκίαση της επιφάνειας του Φ/B πλαισίου δεν οδηγούν σε εμφάνιση τοπικών μεγίστων/ελαχίστων, όπως δείχνουν οι παραπάνω μετρήσεις.

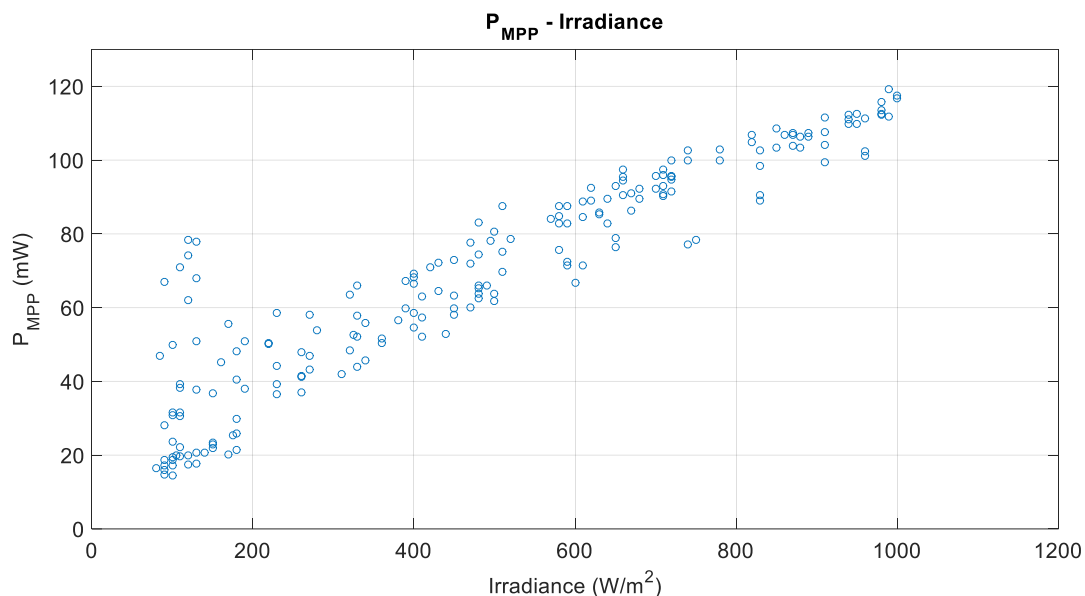
5.3 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού

Στο Σχήμα 58 φαίνεται η σχέση της ισχύος και της τάσης στο MPP ($P_{MPP} - V_{MPP}$) όπως προέκυψε από τον χαρακτηρισμό. Παρατηρείται πως οι τάσεις V_{MPP} είναι συγκεντρωμένες στην περιοχή μεταξύ 0.38V και 0.48V για όλα τις τιμές ισχύος P_{MPP} που μετρήθηκαν. Επίσης με την αύξηση της τιμής του P_{MPP} μειώνεται η τιμή του V_{MPP} .



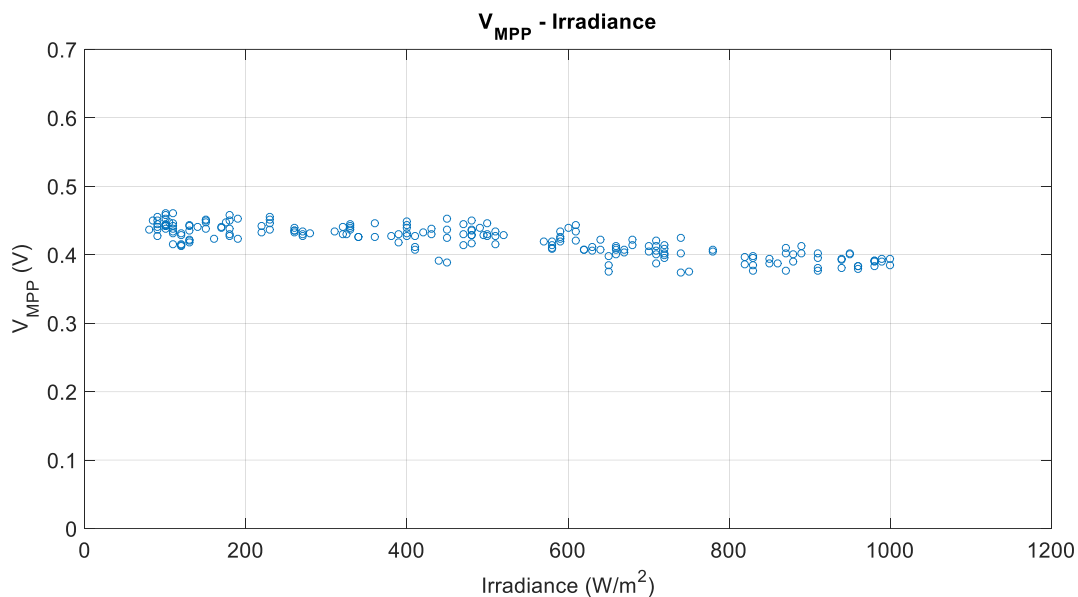
Σχήμα 58 : Σχέση $P_{MPP}-V_{MPP}$, όπως προέκυψε από τον χαρακτηρισμό.

Στο Σχήμα 59 φαίνεται η σχέση της ισχύος στο MPP (P_{MPP}) με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Παρατηρείται πως με την αύξηση της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, αυξάνεται η μέγιστη τιμή της ισχύος.



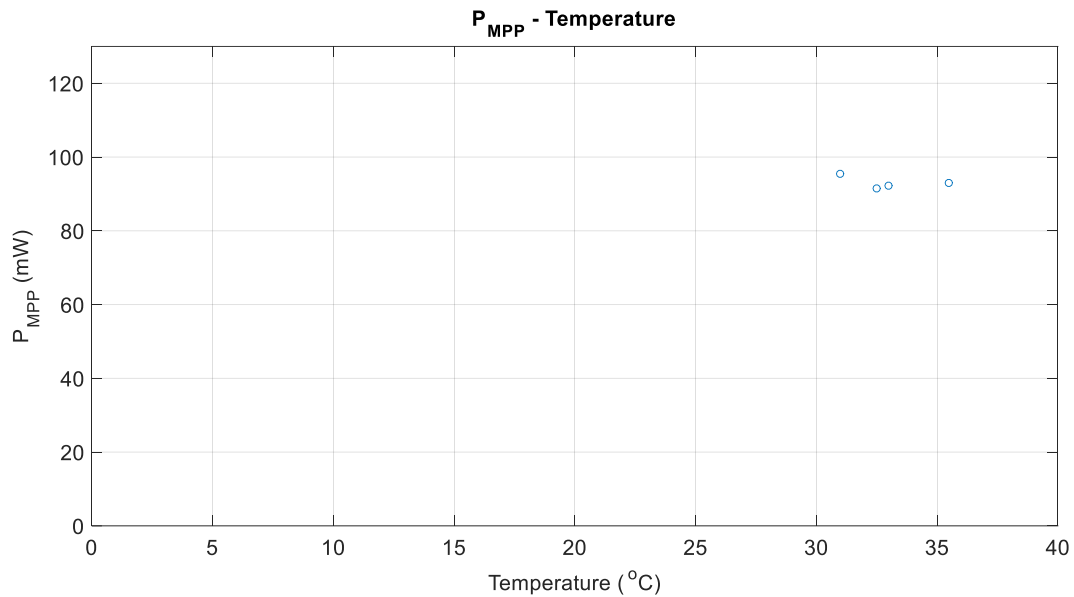
Σχήμα 59 : Σχέση P_{MPP} - έντασης ηλιακής ακτινοβολίας (irradiance), όπως προέκυψε από τον χαρακτηρισμό.

Στο Σχήμα 60 φαίνεται η σχέση της τάσης στο MPP (V_{MPP}) με την έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Παρατηρείται πως με την αύξηση της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, μειώνεται η τιμή της τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος.



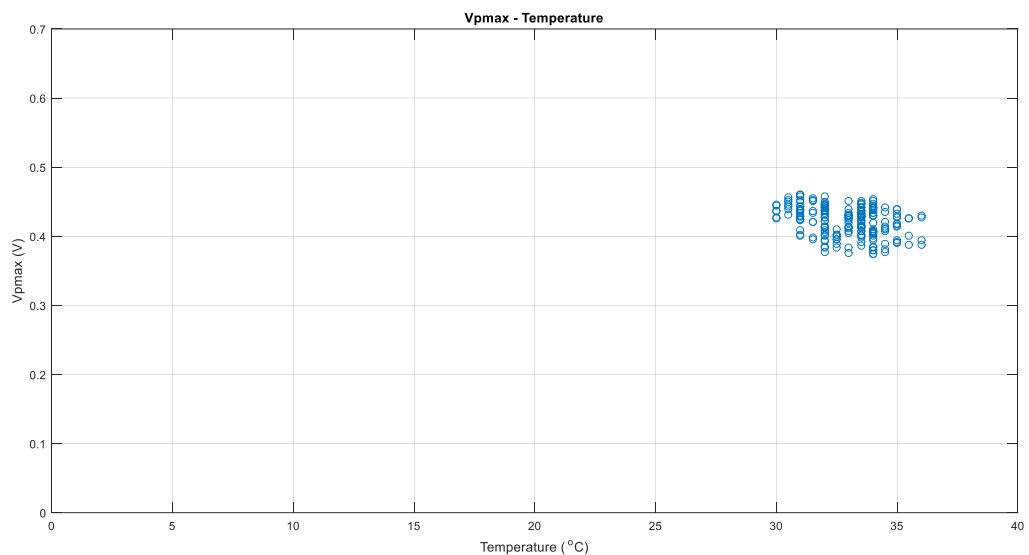
Σχήμα 60 : Σχέση V_{MPP} - έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, όπως προέκυψε από τον χαρακτηρισμό.

Στο Σχήμα 61 φαίνεται η σχέση της ισχύος στο MPP (P_{MPP}) με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, για τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας 720 W/m^2 .



Σχήμα 61 : Σχέση P_{MPP} – θερμοκρασίας περιβάλλοντος για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $G=720 \text{ W/m}^2$.

Στο Σχήμα 62 φαίνεται η σχέση της τάσης στο MPP (V_{MPP}) με τη θερμοκρασίας περιβάλλοντος.



Σχήμα 62 : Σχέση V_{MPP} – θερμοκρασίας περιβάλλοντος, όπως προέκυψε από τον χαρακτηρισμό.

Ο χαρακτηρισμός του διάφανου Φ/Β πλαισίου έδειξε πως ανεξαρτήτως τιμής της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και συνθηκών σκίασης, δε παρατηρούνται τοπικά μέγιστα στην καμπύλη ισχύος-τάσης. Έτσι, για την εκτέλεση της λειτουργίας MPPT επιλέχθηκε ο αλγόριθμος P&O που είναι ένας απλός στην υλοποίηση και σχετικά γρήγορος αλγόριθμος MPPT.

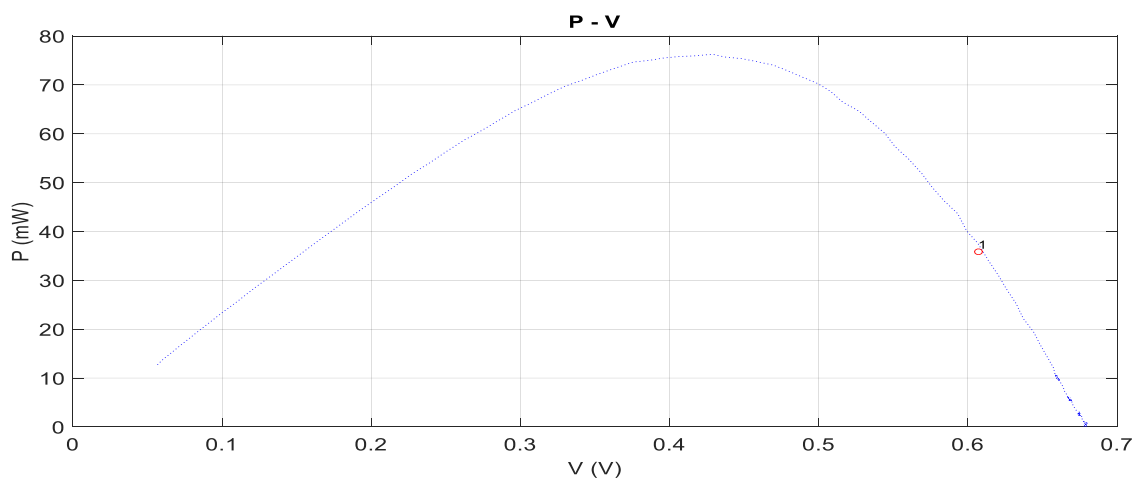
5.4 Εφαρμογή της διαδικασίας MPPT

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, υλοποιήθηκαν δύο εναλλακτικοί αλγόριθμοι MPPT, ο P&O και ο Constant Voltage.

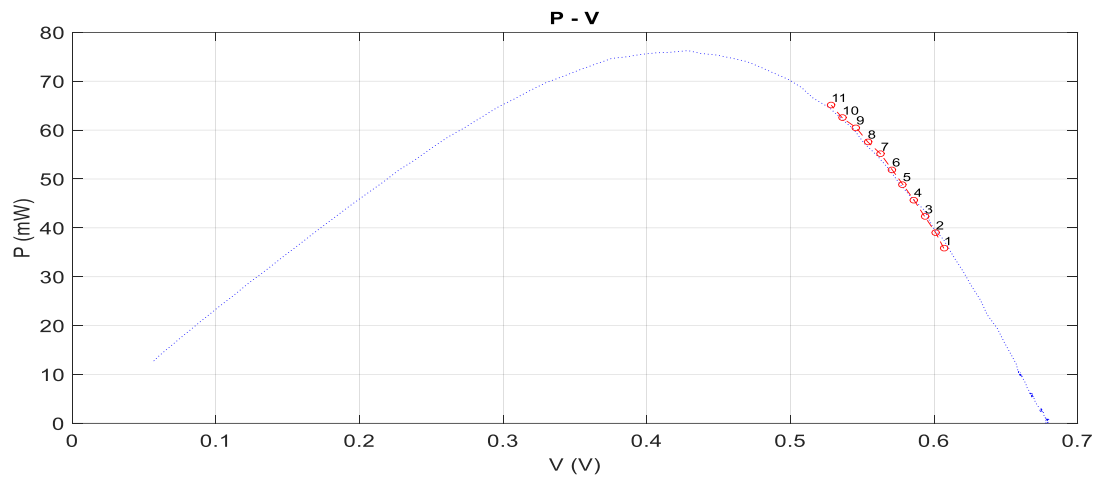
5.4.1 Πείραμα ελέγχου λειτουργίας αλγορίθμου P&O

Αρχικά, ο έλεγχος λειτουργίας του αλγορίθμου P&O πραγματοποιήθηκε σε συνθήκες ακτινοβολίας $G = 600 \text{ W/m}^2$, χωρίς μερική σκίαση και με θερμοκρασία περιβάλλοντος $T=22^\circ \text{C}$. Το διάφανο Φ/Β πλαίσιο τοποθετήθηκε σε κλίση $\theta=0^\circ$ με νότιο προσανατολισμό.

Αρχικά ο αλγόριθμος εκκινεί την αναζήτηση από ένα σημείο μακριά από το MPP (Σχήμα 63). Ελέγχει το τρέχον σημείο λειτουργίας του Φ/Β πλαισίου και το μετατοπίζει προς την κατεύθυνση που έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της παραγόμενης ισχύος (Σχήμα 64). Η αναζήτηση συνεχίζεται ελέγχοντας διαδοχικά σημεία λειτουργίας μέχρι να βρεθεί το MPP (Σχήμα 65). Όταν βρεθεί το MPP, το σημείο λειτουργίας του Φ/Β πλαισίου ταλαντώνεται μεταξύ του MPP και των γειτονικών του σημείων λειτουργίας (Σχήμα 66).

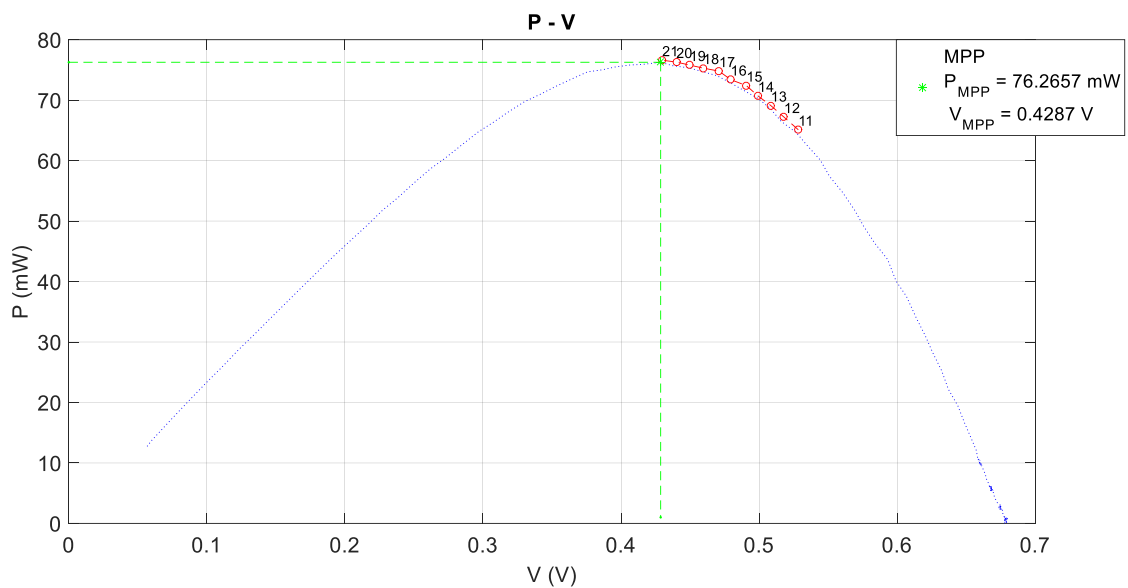


Σχήμα 63 : Εκκίνηση του αλγορίθμου P&O από ένα σημείο λειτουργίας μακριά από το MPP.



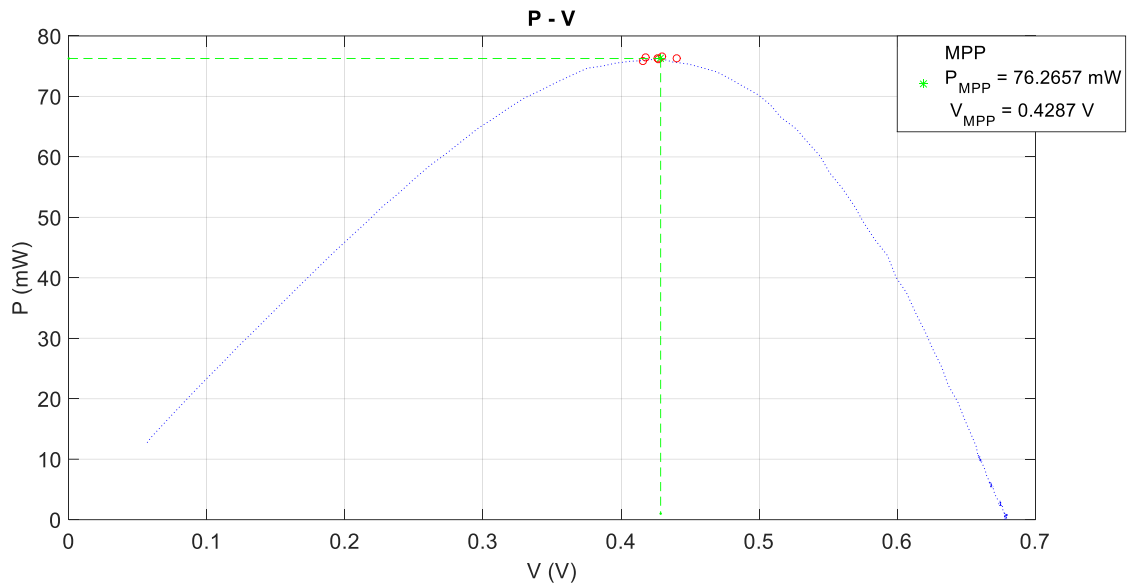
Σχήμα 64 : Διαδοχικά βήματα αναζήτησης του MPP από τον αλγόριθμο P&O στα σημεία λειτουργίας 1-11, αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 65 φαίνεται η σύγκλιση του αλγορίθμου P&O στο MPP μετά την αναζήτηση σε 20 σημεία λειτουργίας.



Σχήμα 65 : Εύρεση του MPP από τον αλγόριθμο P&O μετά την ολοκλήρωση της αναζήτησης στα σημεία λειτουργίας 11-21.

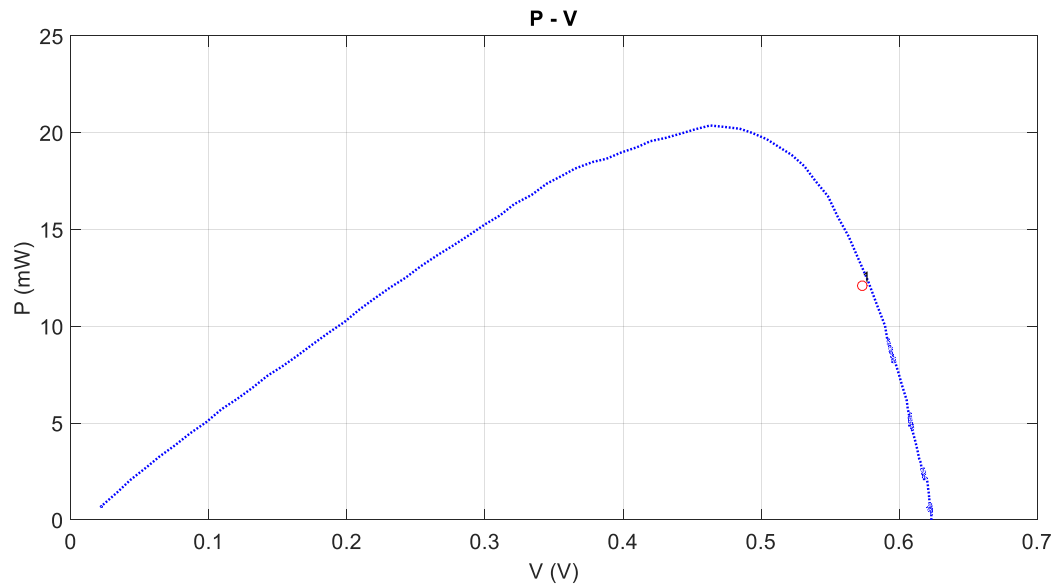
Στο Σχήμα 66 φαίνεται η ταλάντωση του αλγορίθμου γύρω από το MPP.



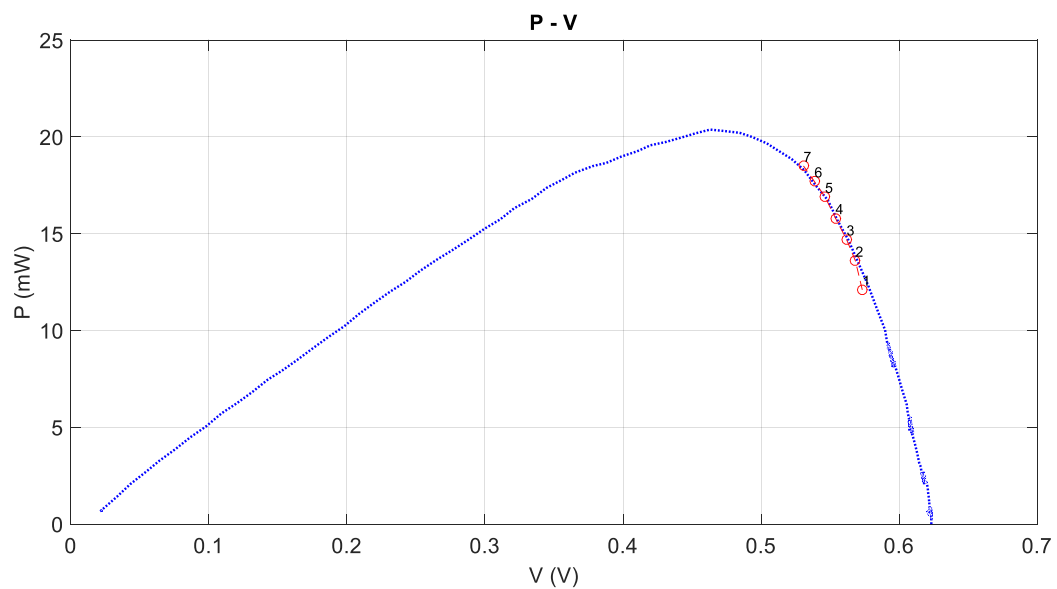
Σχήμα 66 : Ταλάντωση του σημείου λειτουργίας γύρω από το MPP κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου P&O.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της λειτουργίας του αλγορίθμου P&O σε συνθήκες μικρής έντασης ηλιακής ακτινοβολίας και με σκίαση του μισού Φ/Β πλαισίου. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στη μη-σκιασμένη περιοχή του Φ/Β πλαισίου μετρήθηκε στην τιμή $G_{unshaded} = 190 \text{ W/m}^2$ και της σκιασμένης περιοχής στην τιμή $G_{shaded} = 100 \text{ W/m}^2$. Επίσης, η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν $T = 22^\circ \text{ C}$ και το Φ/Β πλαίσιο τοποθετήθηκε σε κλίση 90° με βόρειο προσανατολισμό.

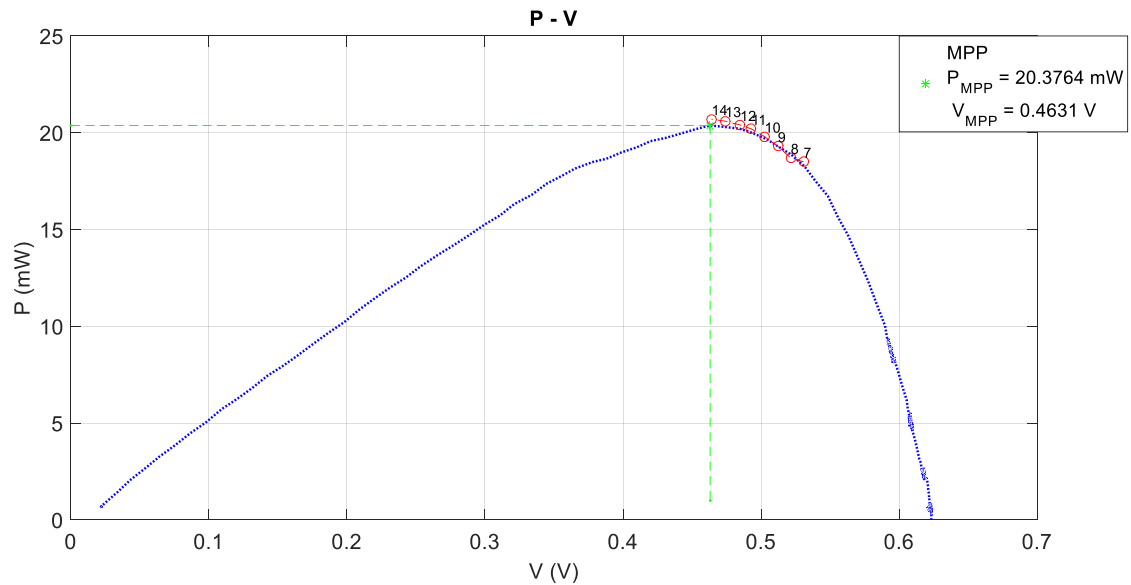
Στο Σχήμα 67 φαίνεται η εκκίνηση του αλγορίθμου. Παρότι η ηλιακή ακτινοβολία είναι μικρής έντασης και το μισό Φ/Β πλαίσιο είναι σκιασμένο, δεν υπάρχουν τοπικά μέγιστα που να επηρεάζουν τη λειτουργία του αλγορίθμου. Επομένως, η διαδικασία της αναζήτησης του MPP εκτελείται μέχρι να βρεθεί το ένα και μοναδικό MPP (Σχήματα 68 και 69). Τελικά, το σημείο λειτουργίας του Φ/Β πλαισίου ταλαντώνεται μεταξύ του MPP και των γειτονικών του σημείων (Σχήμα 70).



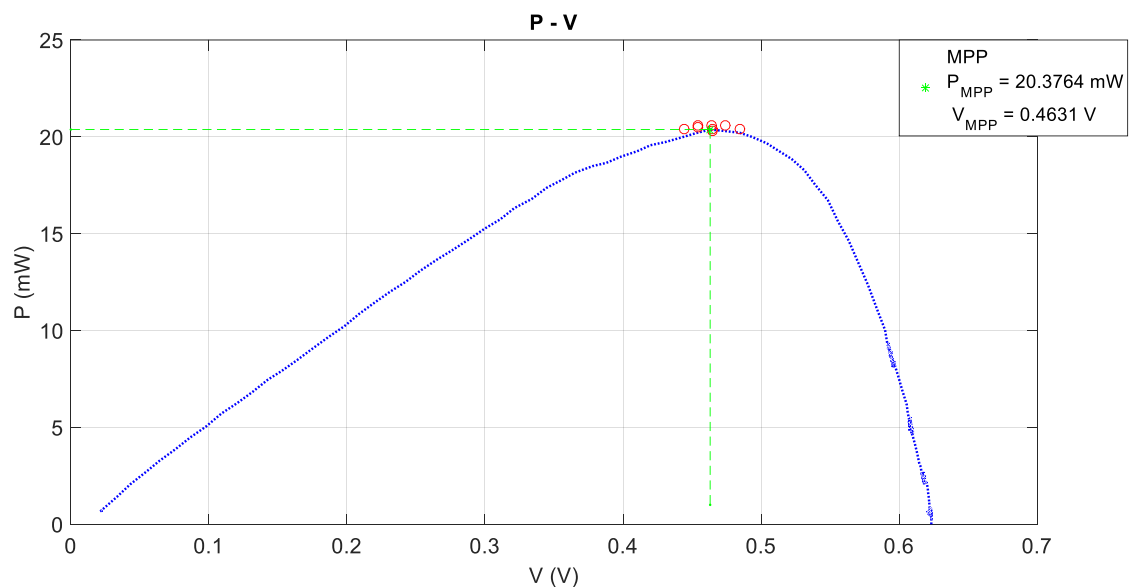
Σχήμα 67 : Εκκίνηση αλγορίθμου P&O σε συνθήκες χαμηλής ακτινοβολίας και μερικής σκίασης.



Σχήμα 68 : Διαδοχικά βήματα αναζήτησης του MPP με τον αλγόριθμο P&O, σε συνθήκες χαμηλής ακτινοβολίας και μερικής σκίασης, στα σημεία λειτουργίας 1-7, αντίστοιχα.



Σχήμα 69 : Εύρεση του MPP με τον αλγόριθμο P&O, σε συνθήκες χαμηλής ακτινοβολίας και μερικής σκίασης, μετά την ολοκλήρωση της αναζήτησης στα σημεία λειτουργίας 7-14.



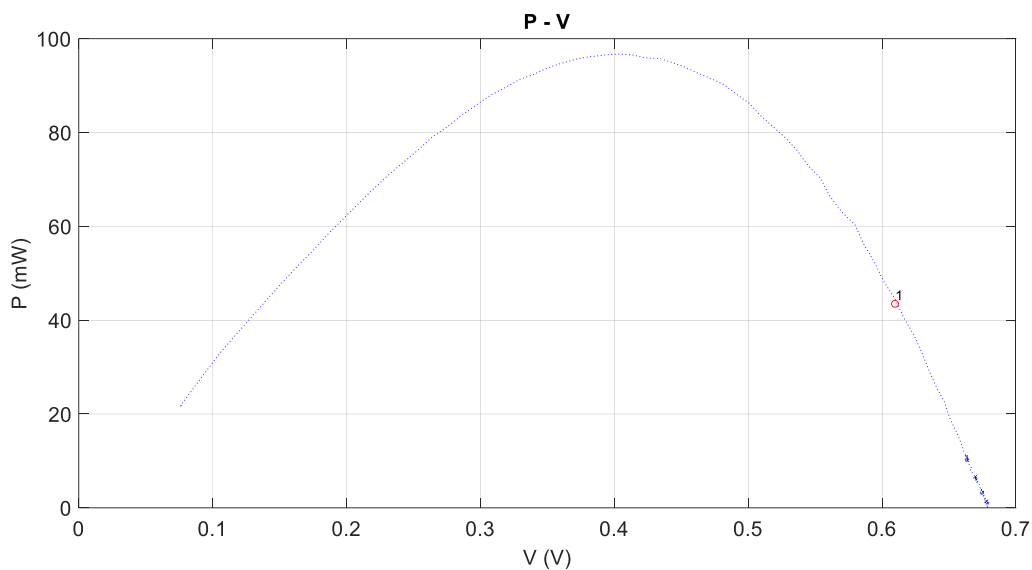
Σχήμα 70 : Ταλάντωση του σημείου λειτουργίας γύρω από το MPP κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου P&O σε συνθήκες χαμηλής ακτινοβολίας και μερικής σκίασης.

Το πείραμα αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο αλγόριθμος P&O που υλοποιήθηκε, οδηγεί το διάφανο Φ/Β πλαίσιο στο σημείο λειτουργίας MPP ανεξαρτήτως της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και πιθανής μερικής σκίασης του.

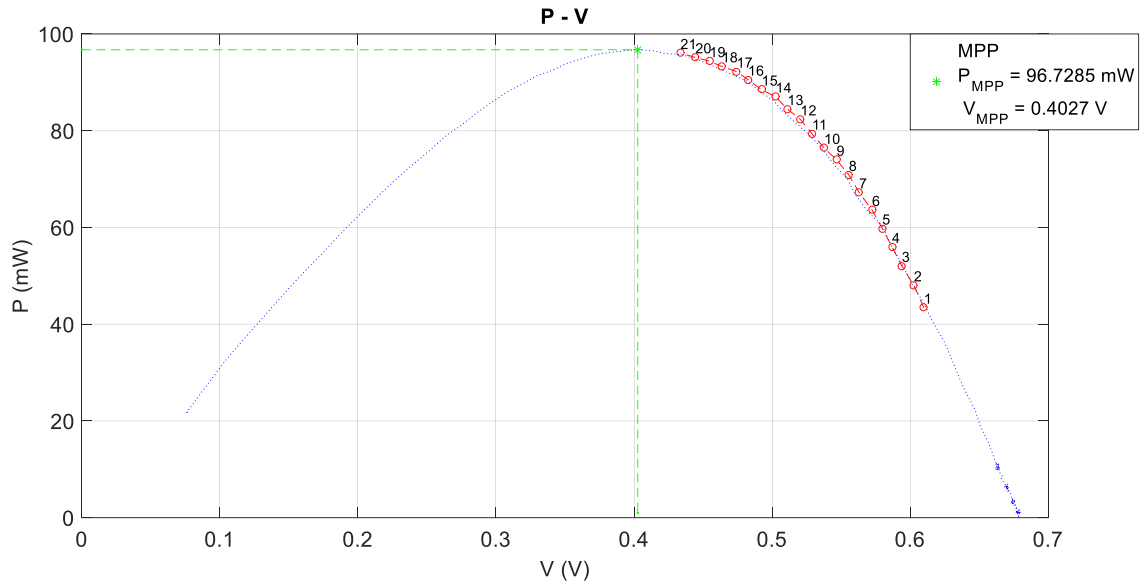
5.4.2 Πείραμα ελέγχου λειτουργίας αλγορίθμου Constant Voltage

Αρχικά, ο έλεγχος λειτουργίας του αλγορίθμου Constant Voltage πραγματοποιήθηκε σε συνθήκες ακτινοβολίας $G = 800 \text{ W/m}^2$, χωρίς σκίαση και με θερμοκρασία περιβάλλοντος $T=20^\circ\text{C}$. Το Φ/Β πλαίσιο τοποθετήθηκε σε κλίση $\theta=0^\circ$ με νότιο προσανατολισμό.

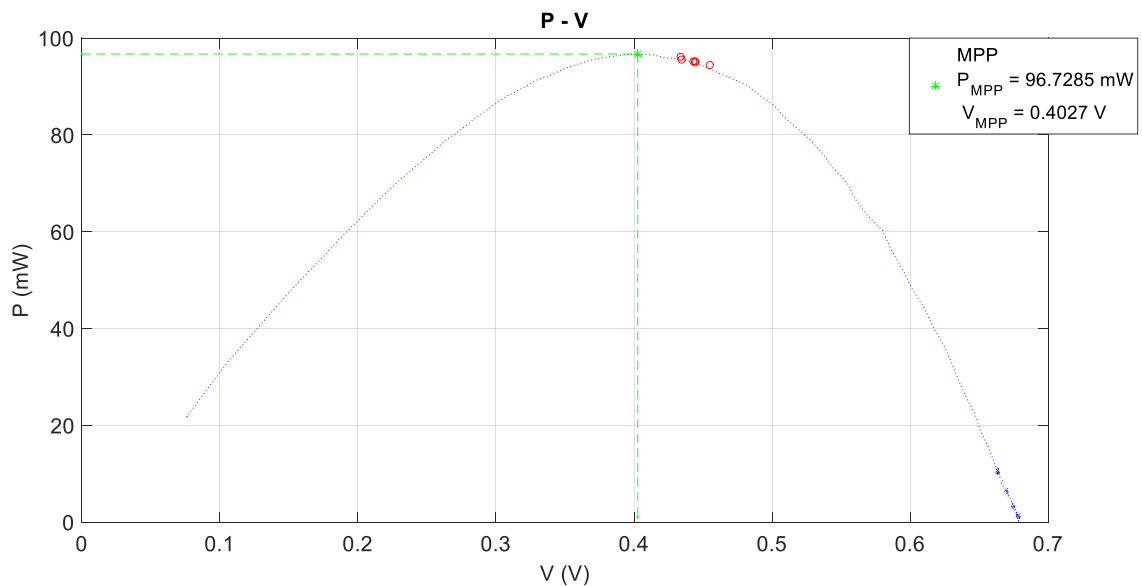
Ο αλγόριθμος Constant Voltage οδηγεί το Φ/Β σε λειτουργία γύρω από μια τάση αναφοράς V_{ref} . Βάσει των αποτελεσμάτων του χαρακτηρισμού, ως V_{ref} επιλέχθηκε η μέση τιμή των τάσεων του σημείου μέγιστης ισχύος που μετρήθηκαν, η οποία είναι ίση με 0.43V . Ο αλγόριθμος Constant Voltage ελέγχει μόνο την τάση λειτουργίας του Φ/Β πλαισίου και μεταβάλλει ανάλογα τη σχετική διάρκεια αγωγής του μετατροπέα DC/DC, ενώ ο P&O ελέγχει την τάση και την παραγόμενη ισχύ. Ο αλγόριθμος ξεκινάει από ένα σημείο λειτουργίας μακριά από το MPP (Σχήμα 71) και προοδευτικά συγκλίνει προς το σημείο λειτουργίας όπου η τάση του Φ/Β πλαισίου είναι ίση με την V_{ref} (Σχήμα 72). Τελικά, το σημείο λειτουργίας του Φ/Β πλαισίου ταλαντώνεται γύρω από το σημείο όπου η τάση του Φ/Β πλαισίου είναι ίση με την V_{ref} (Σχήμα 73).



Σχήμα 71 : Εκκίνηση του αλγορίθμου Constant Voltage σε συνθήκες υψηλής έντασης ηλιακής ακτινοβολίας.



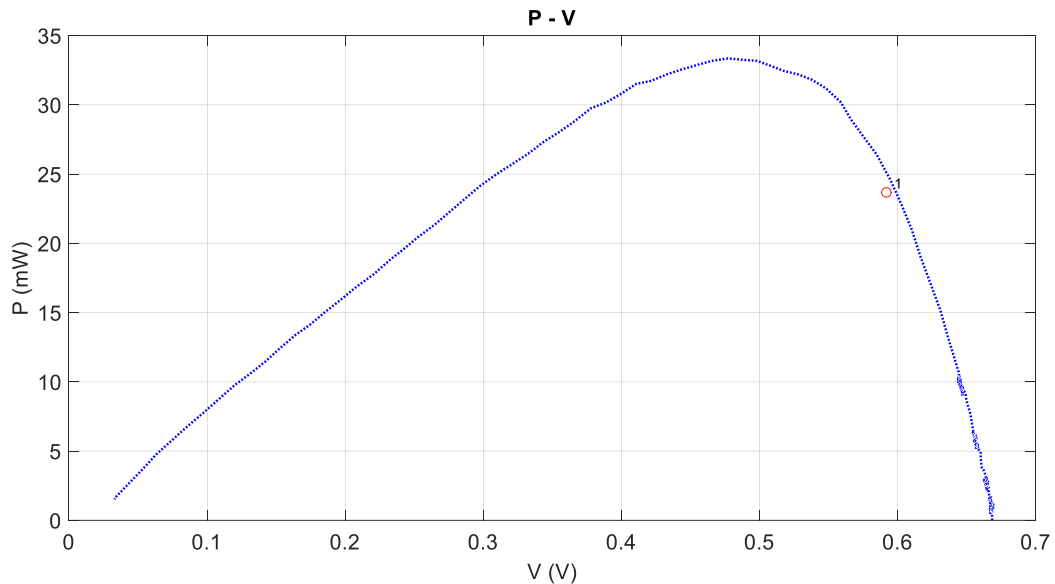
Σχήμα 72: Διαδοχικά βήματα αναζήτησης του σημείου με τάση λειτουργίας ίση με $V_{ref}=0.43V$ από τον αλγόριθμο *Constant Voltage*, στα σημεία λειτουργίας 1-21, αντίστοιχα.



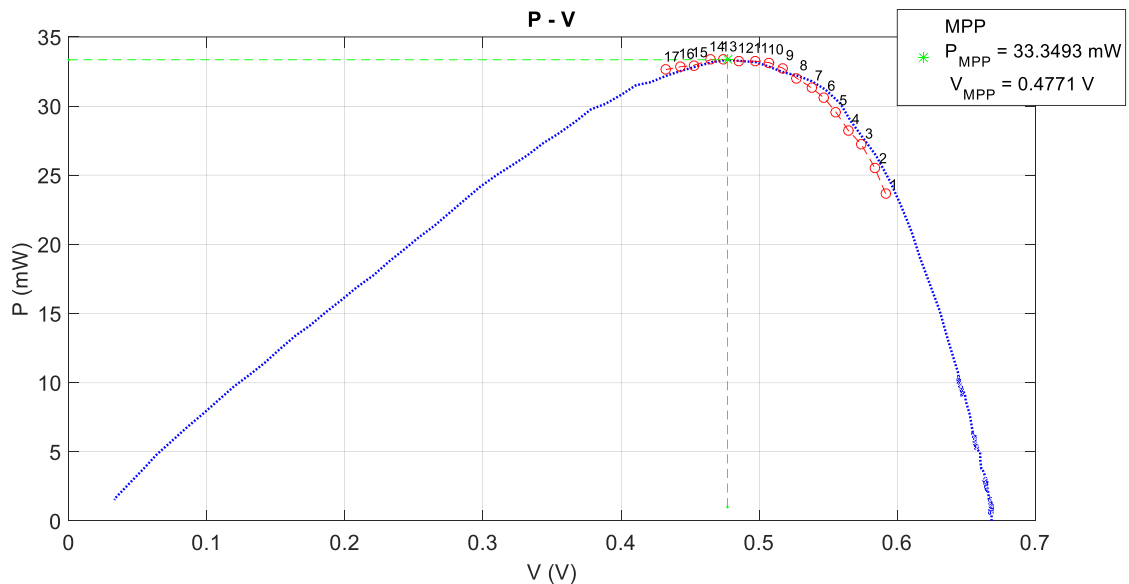
Σχήμα 73: Ταλάντωση του σημείου λειτουργίας γύρω από την V_{ref} κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου *Constant Voltage* σε συνθήκες υψηλής έντασης ηλιακής ακτινοβολίας.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε έλεγχος λειτουργίας του αλγορίθμου *Constant Voltage* σε συνθήκες ακτινοβολίας $G = 200 \text{ W/m}^2$, χωρίς σκίαση και με θερμοκρασία περιβάλλοντος $T=20^\circ\text{C}$. Το Φ/Β πλαίσιο τοποθετήθηκε σε κλίση $\theta=0^\circ$ με νότιο προσανατολισμό. Η εκκίνηση του αλγορίθμου είναι η ίδια με το προηγούμενο πείραμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 74. Ο

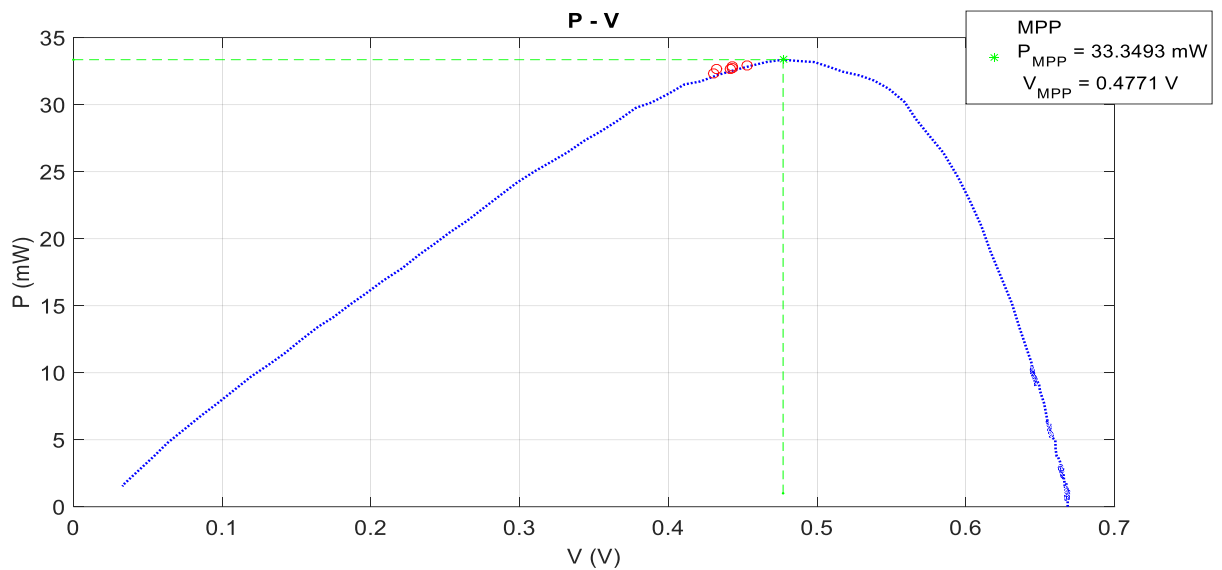
αλγόριθμος συνεχίζει την αναζήτηση μέχρι την εύρεση του σημείου λειτουργίας με τάση ίση με την V_{ref} (Σχήμα 75), και στη συνέχεια το σημείο λειτουργίας του Φ/Β πλαισίου ταλαντώνεται γύρω από αυτό (Σχήμα 76).



Σχήμα 74 : Εκκίνηση του αλγορίθμου *Constant Voltage* σε συνθήκες χαμηλής έντασης ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 75 : Διαδοχικά βήματα αναζήτησης του σημείου με τάση λειτουργίας ίση με $V_{ref}=0.43V$ από τον αλγόριθμο *Constant Voltage*, στα σημεία λειτουργίας 1-17, αντίστοιχα.



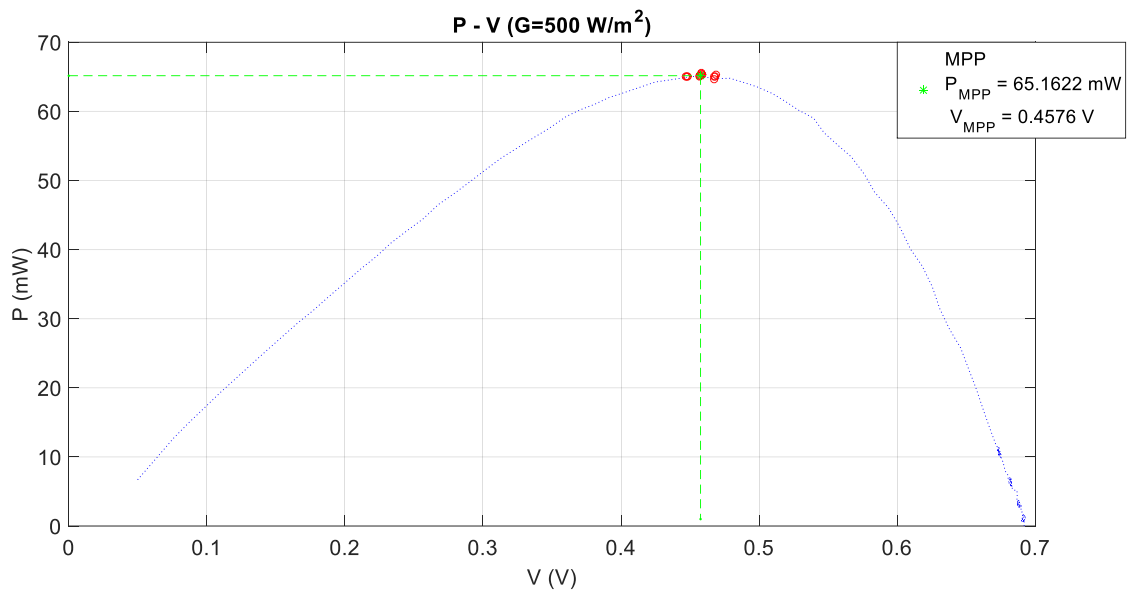
Σχήμα 76 : Ταλάντωση του σημείου λειτουργίας γύρω από την V_{ref} κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου Constant Voltage σε συνθήκες χαμηλής έντασης ηλιακής ακτινοβολίας.

Από Σχήματα 73 και 76 παρατηρείται πως σε μεγάλες τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας ο αλγόριθμος Constant Voltage συγκλίνει στη δεξιά πλευρά της χαρακτηριστικής P-V, ενώ στις μικρές τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας συγκλίνει στην αριστερή πλευρά της χαρακτηριστικής P-V. Αυτό ήταν αναμενόμενο επειδή για αύξηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας παρατηρείται μείωση της τάσης στο σημείο μέγιστης λειτουργίας MPP. Επίσης παρατηρείται πως οι απώλειες ισχύος λόγω αυτής της συμπεριφοράς του αλγορίθμου Constant Voltage για τα δύο πειράματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω είναι 1.72 % και 2.16 %, αντίστοιχα. Τα παραπάνω πειράματα δείχνουν ότι ο αλγόριθμος Constant Voltage που υλοποιήθηκε, οδηγεί το Φ/Β πλαίσιο σε σημείο λειτουργίας κοντά στο MPP, αλλά η απόκλιση που προκύπτει προκαλεί σημαντική απώλεια ισχύος.

5.4.3 Πείραμα ελέγχου λειτουργίας αλγορίθμου P&O υπό συνθήκες απότομων αλλαγών στην προσπίπτουσα ακτινοβολία του Φ/Β πλαισίου

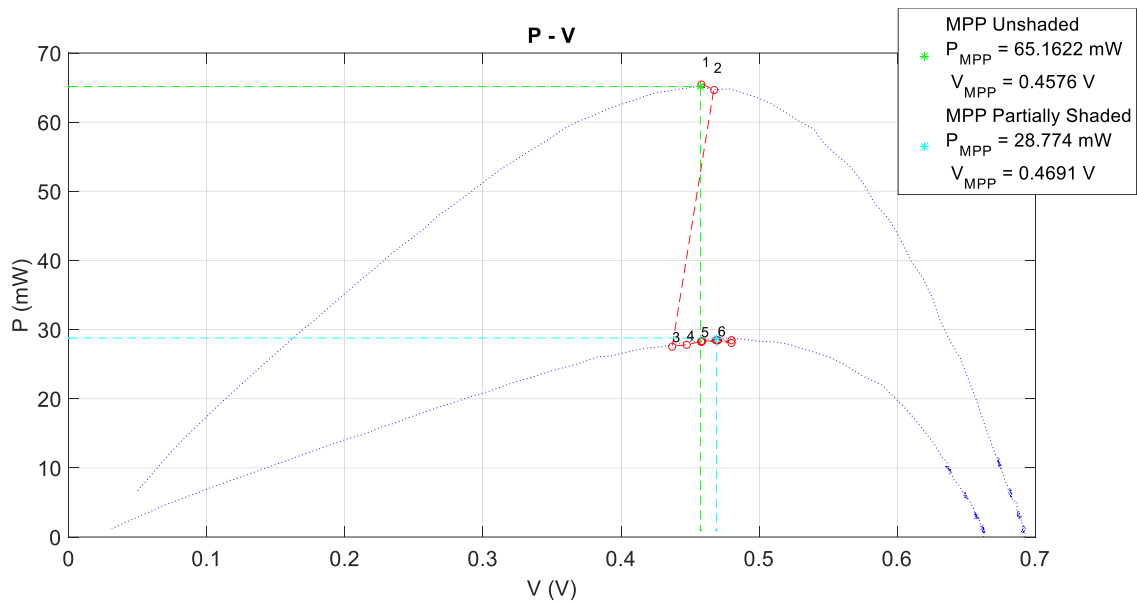
Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η προσπίπτουσα στο πλαίσιο ηλιακή ακτινοβολία μεταβάλλεται. Η αλλαγή αυτή μπορεί να είναι αποτέλεσμα μερικής σκίασης ή νέφωσης. Ο αλγόριθμος πρέπει να επιτυγχάνει εύρεση του MPP ανεξαρτήτως αυτών των αλλαγών στις συνθήκες λειτουργίας του Φ/Β πλαισίου. Στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε, αρχικά, ο αλγόριθμος P&O βρίσκει το σημείο MPP υπό ακτινοβολία 500W/m^2 και χωρίς σκίαση (Σχήμα 77). Η θερμοκρασία

περιβάλλοντος μετρήθηκε ίση με $T = 21^\circ\text{C}$ και με το Φ/Β πλαίσιο τοποθετημένο σε κλίση $\theta=0^\circ$ με ανατολικό προσανατολισμό. Έπειτα, προστίθεται πηγή σκίασης που σκιάζει το Φ/Β πλαίσιο κατά τα 2/3 του διαγωνίου. Η ακτινοβολία της σκιασμένης περιοχής μετρήθηκε στα 100W/m^2 . Στο Σχήμα 77 φαίνεται η λειτουργία του αλγορίθμου όταν έχει συγκλίνει στο σημείο MPP και το σημείο λειτουργίας ταλαντώνεται γύρω από αυτό.



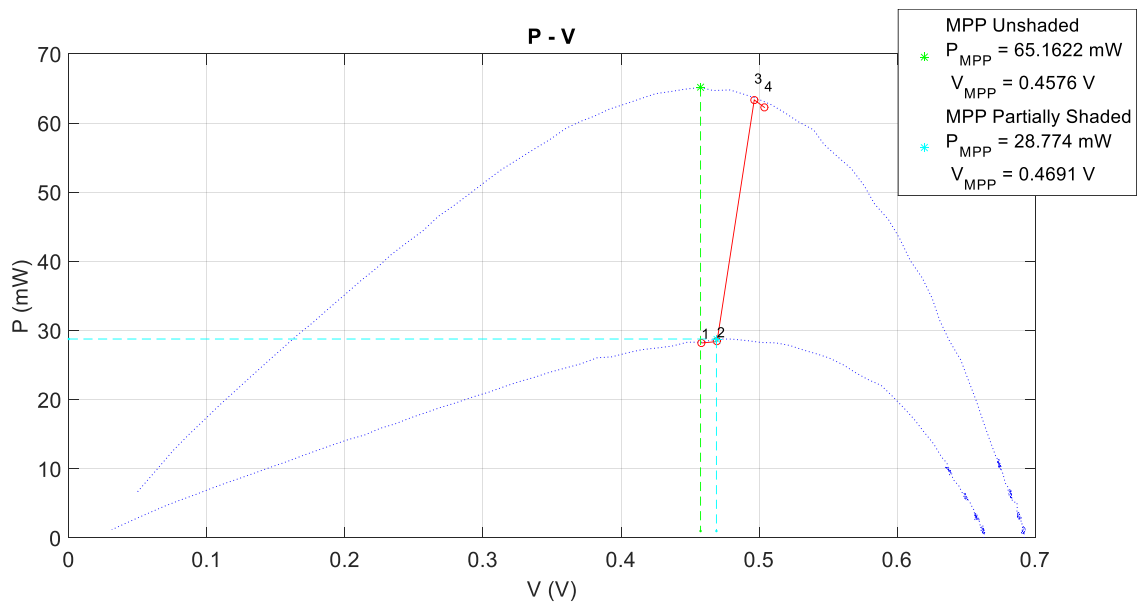
Σχήμα 77 : Λειτουργία Φ/Β πλαισίου στο MPP με εφαρμογή του αλγορίθμου P&O.

Στο Σχήμα 78 φαίνεται η συμπεριφορά του αλγορίθμου μετά τη σκίαση. Το σημείο λειτουργίας βρίσκεται αρχικά στη θέση 1 και το επόμενο σημείο που ελέγχει βρίσκεται στη θέση 2. Η μετακίνηση του σημείου λειτουργίας από τη θέση 1 στην 2 έχει ως αποτέλεσμα να μειωθεί η παραγόμενη ισχύς, ενώ η τάση λειτουργίας αυξήθηκε. Λόγω της μείωσης στην παραγόμενη ισχύ, ο αλγόριθμος θα κινηθεί προς την αντίθετη κατεύθυνση, μειώνοντας την τάση του Φ/Β πλαισίου. Στη συνέχεια, η επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου σκιάζεται, με αποτέλεσμα να μειώνονται η παραγόμενη ισχύς και η τάση λειτουργίας (σημείο 3). Ο αλγόριθμος δεν είναι σε θέση να γνωρίζει τις όποιες αλλαγές στις συνθήκες ακτινοβολίας, αλλά παρατηρεί πως με τη μείωση της τάσης μειώθηκε και η παραγόμενη ισχύς, άρα η αναζήτηση αλλάζει και πάλι κατεύθυνση, οδηγώντας το Φ/Β πλαίσιο σε μεγαλύτερη τάση λειτουργίας (σημείο 4). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί η ισχύς και ο αλγόριθμος συνεχίζει την αναζήτηση προς την ίδια κατεύθυνση, μέχρι να βρει το καινούριο σημείο MPP (σημείο 6).



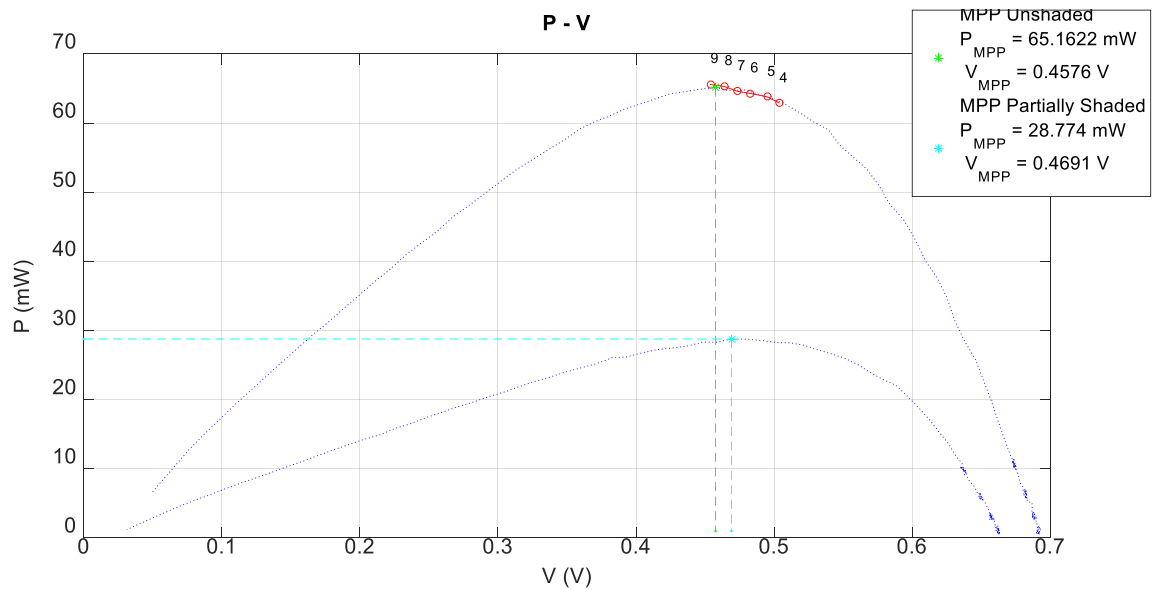
Σχήμα 78 : Συμπεριφορά του συστήματος MPPT με πρόσθεση σκίασης στην επιφάνεια του Φ/B πλαισίου, κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου P&O.

Υπό τις ίδιες συνθήκες μετρήσεων έγινε το αντίστροφο πείραμα, δηλαδή αφαιρέθηκε η πηγή σκίασης από Φ/B πλαίσιο και παρατηρήθηκε η συμπεριφορά του αλγορίθμου P&O. Στο Σχήμα 79 φαίνεται η λειτουργία του αλγορίθμου σε συνθήκες μερικής σκίασης του Φ/B πλαισίου κατά τα 2/3 του, με ένταση ακτινοβολίας της σκιασμένης περιοχής ίση με 100W/m^2 και ένταση ακτινοβολίας της μη-σκιασμένης περιοχής ίση με 500W/m^2 . Η θερμοκρασία περιβάλλοντος μετρήθηκε ίση με $T = 21^\circ \text{C}$ και το Φ/B πλαίσιο ήταν τοποθετημένο σε κλίση $\theta=0^\circ$ με ανατολικό προσανατολισμό.



Σχήμα 79 : Συμπεριφορά του συστήματος MPPT μετά την αφαίρεση της σκίασης από την επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου, κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου P&O.

Επειδή το σημείο λειτουργίας ταλαντώνεται γύρω από το MPP, η κατεύθυνση της αναζήτησης αλλάζει συνεχώς. Το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει από το σημείο 1 στο σημείο 2 του διαγράμματος, αυξάνοντας την τάση λειτουργίας και, ως αποτέλεσμα, την παραγόμενη ισχύ, οπότε η αναζήτηση παραμένει στην ίδια κατεύθυνση. Αμέσως μετά την αφαίρεση της σκίασης, το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει στο σημείο 3. Ο αλγόριθμος διαπιστώνει και πάλι αύξηση της παραγόμενης ισχύος με αύξηση της τάσης του Φ/Β πλαισίου, οπότε συνεχίζει την αναζήτηση αυξάνοντας την τάση περεταίρω. Με τη μετάβαση από το σημείο 3 στο σημείο 4 διαπιστώνεται μείωση της παραγόμενης ισχύος με αύξηση της τάσης λειτουργίας του Φ/Β πλαισίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αναζήτηση προς την αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή μείωσης της τάσης μέχρι να βρεθεί το σημείο MPP στις νέες συνθήκες λειτουργίας (Σχήμα 80). Ξεκινώντας από το σημείο 4, ο αλγόριθμος συγκλίνει προοδευτικά στο MPP (σημείο 9) όπως φαίνεται στο Σχήμα 80.



Σχήμα 80 : Σύγκλιση στο MPP μέσω των σημείων λειτουργίας 4-9 κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου P&O σε συνθήκες μεταβαλλόμενης έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Από αυτό το πείραμα προκύπτει το συμπέρασμα πως το σύστημα MPPT με εφαρμογή του αλγορίθμου P&O συγκλίνει στο MPP, ανεξαρτήτως μεταβολών στις συνθήκες λειτουργίας του διάφανου Φ/Β πλαισίου.

6.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε και αναπτύχθηκε ένα σύστημα για τη διαχείριση της ενέργειας ενός Dye-Sensitized Φ/Β πλαισίου. Το σύστημα αποτελείται από τρία ηλεκτρονικά υποσυστήματα: τον μετατροπέα ανύψωσης τάσης DC/DC τύπου Boost, τα ηλεκτρονικά κυκλώματα μέτρησης της τάσης και του ρεύματος εξόδου του Φ/Β πλαισίου και την μονάδα ελέγχου που βασίζεται σε μικροελεγκτή. Ο στόχος ήταν το σύστημα να λειτουργεί αυτόνομα, λαμβάνοντας όλη την ισχύ που απαιτείται για τη λειτουργία του από το Φ/Β πλαίσιο. Επειδή το Φ/Β πλαίσιο που χρησιμοποιήθηκε είναι χαμηλής ισχύος, έπρεπε η σχεδίαση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων του συστήματος που υλοποιήθηκαν να είναι πολύ χαμηλών απαιτήσεων ισχύος. Αυτό έκανε τη σχεδίαση του συστήματος πιο απαιτητική σε σχέση με αντίστοιχα συστήματα συμβατικών Φ/Β πλαισίων. Τα επιμέρους στοιχεία του κυκλώματος επιλέχθηκαν ώστε να λειτουργούν υπό χαμηλή τάση 2.4 V και, ταυτόχρονα, να έχουν όσο το δυνατόν λιγότερες απαιτήσεις ισχύς τροφοδοσίας.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε χαρακτηρισμός του διάφανου Φ/Β πλαισίου για να εξακριβωθούν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του. Ο χαρακτηρισμός έγινε υπό πολλές διαφορετικές συνθήκες, βοηθώντας στην ανάλυση της συμπεριφοράς του Φ/Β πλαισίου. Η μέγιστη παραγόμενη ισχύς που μετρήθηκε ήταν 117.5 mW υπό ακτινοβολία 1000 W/m² στην μπροστινή όψη και 150 W/m² στην πίσω όψη του Φ/Β πλαισίου με θερμοκρασία περιβάλλοντος 34°C.

Διαπιστώθηκε ότι ανεξαρτήτως της κάλυψης ή μη, της πίσω όψης του Φ/Β πλαισίου, η καμπύλη P-V δεν παρουσιάζει τοπικά μέγιστα. Από τις μετρήσεις που δε καλύπτεται η πίσω όψη του Φ/Β πλαισίου, παρατηρήθηκε αύξηση της παραγόμενης ισχύος σε σχέση με τις μετρήσεις όπου η πίσω όψη καλύπτεται, όταν οι υπόλοιπες συνθήκες μέτρησης είναι όμοιες. Επίσης, από τις μετρήσεις υπό συνθήκες μερικής σκίασης, δεν παρατηρούνται τοπικά μέγιστα ανεξαρτήτως του ποσοστού της σκιασμένης επιφάνειας του Φ/Β πλαισίου και ανεξαρτήτως της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Οι παραπάνω παρατηρήσεις οδήγησαν στην επιλογή του αλγορίθμου P&O για την υλοποίηση του συστήματος MPPT, ο οποίος βάσει των πειραμάτων αποδεικνύεται πως οδηγεί το Φ/Β πλαίσιο σε λειτουργία στο MPP. Επίσης, η διαδικασία MPPT υλοποιήθηκε δοκιμάζοντας και τον αλγόριθμο Constant Voltage, ο οποίος δε βρίσκει με ακρίβεια το MPP αλλά καταλήγει σε σημείο αρκετά κοντινό σε αυτό, προκαλώντας απώλεια ισχύος. Συγκριτικά, ο αλγόριθμος P&O προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια στον προσδιορισμό του σημείου MPP, ενώ ο αλγόριθμος Constant Voltage είναι απλούστερος στην υλοποίηση αλλά δεν παρέχει πλήρη εκμετάλλευση της διαθέσιμης ενέργειας του Φ/Β πλαισίου.

Μελλοντική εργασία θα μπορούσε να γίνει με μελέτη συστοιχίας τέτοιων διάφανων Φ/Β πλαισίων ώστε να εξομοιωθούν συνθήκες πιο κοντά στις πραγματικές μιας και τα πλαίσια αυτά προορίζονται για χρήση σε Φ/Β συστοιχίες ενσωματωμένες σε κτίρια ή άλλες κατασκευές. Για τις διατάξεις αυτές μπορούν να υλοποιηθούν και να συγκριθούν ως προς τη λειτουργία τους και άλλες τεχνικές MPPT (πχ. κεντριοποιημένες ή κατανεμημένες αρχιτεκτονικές MPPT) έτσι ώστε να διαπιστωθεί ποια είναι αποδοτικότερη για εφαρμογές διάφανων Φ/Β πλαισίων που ενσωματώνονται σε κτήρια.

7.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] N. Mohan and T. M. Undeland, Power Electronics: Converters, Applications, and Design. John Wiley & Sons, 2007.
- [2] L. El Chaar and N. El Zein, “Review of Photovoltaic Technologies”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, no. 5, pp. 2165–2175, 2011.
- [3] M. R. Narayan, “Dye-Sensitized Solar Cells Based on Natural Photosensitizers”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, no. 1, pp. 208–215, 2012.
- [4] <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>, 2017.
- [5] <http://www.britesolar.com/technology/brite-solar-glass/#>.
- [6] Frederic Labat, Tangui Le Bahers, Ilaria Ciofini, and Carlo Adamo “First-Principles Modeling of Dye-Sensitized Solar Cells: Challenges and Perspectives”, Accounts of Chemical Research, vol. 45, no. 8, pp. 268–277, 2012.
- [7] E. Stathatos, “Dye-Sensitized Solar Cells: A New Prospective to the Solar to Electrical Energy Conversion. Issues to Be Solved for Efficient Energy Harvesting”, Journal of Engineering Science & Technology Review, vol. 5, no. 4, pp. 9-13, 2012.

- [8] R. B. Koad and A. F. Zobaa, “Comparative Study of Five Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Systems”, *International Journal on Energy Conversion (IRECON)*, vol. 2, no. 1, pp. 17–25, 2014.
- [9] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, and N. C. Voulgaris, “Development of a Microcontroller-Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 16, no. 1, pp. 46–54, 2001.
- [10] T. Eswam and P. L. Chapman, “Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, 2007.
- [11] M. Miyatake, M. Veerachary, F. Toriumi, N. Fujii, and H. Ko, “Maximum Power Point Tracking of Multiple Photovoltaic Arrays: A PSO Approach,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 47, no. 1, pp. 367–380, 2011.
- [12] H. Taheri, Z. Salam, and K. Ishaque, “A Novel Maximum Power Point Tracking Control of Photovoltaic System Under Partial and Rapidly Fluctuating Shadow Conditions Using Differential Evolution”, *2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications (ISIEA)*, pp. 82–87, 2010.
- [13] G. Mamatha, “Assessment of Different MPPT Techniques for PV System”, *Journal of Electrical Engineering*, vol. 16, pp. 1-8, 2016.
- [14] MSP432P401R, MSP432P401M SimpleLink™ Mixed-Signal Microcontrollers datasheet (Rev. G), www.ti.com, 2017.
- [15] <http://www.ti.com/product/msp432p401r?keyMatch=msp432p401r&tisearch=Search-EN-Everything>, 2017.
- [16] A.Pradeep Kumar Yadav, S.Thirumaliah, G.Haritha, “Comparison of MPPT Algorithms for DC-DC Converters Based PV Systems”, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering* Vol. 1, Issue 1, pp.18-23, 2012