

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΜΕΙΚΤΟΣ ΑΚΕΡΑΙΟΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ
ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΑΝΕΛ
ΣΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΑΡΚΟ**

υπό

ΑΝΑΣΤΟΠΟΥΛΟΥ ΧΡΙΣΤΙΝΑΣ

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών Α.Π.Θ., 2008

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

2011

© 2011 Αναστοπούλου Χριστίνα

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Γεώργιος Κοζανίδης
(Επιβλέπων) Λέκτορας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
 Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Γεώργιος Λυμπερόπουλος
 Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
 Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δημήτριος Παντελής
 Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
 Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας μου, κ. Γεώργιο Κοζανίδη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της μεταπτυχιακής εργασίας μου, κ. Γεώργιο Λυμπερόπουλο και κ. Δημήτριο Παντελή, για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου.

Χριστίνα Αναστοπούλου

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΙΚΤΟΥ ΑΚΕΡΑΙΟΥ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΑΝΕΛ

ΑΝΑΣΤΟΠΟΥΛΟΥ ΧΡΙΣΤΙΝΑ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2011

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γεώργιος Κοζανίδης, Λέκτορας του τμήματος

Μεθόδων Βελτιστοποίησης Συστημάτων Παραγωγής/ Υπηρεσιών

Περίληψη

Κατά την παραγωγή των φωτοβολταϊκών πάνελ τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους δεν είναι πανομοιότυπα αλλά έχουν κάποια μικρή απόκλιση μεταξύ τους. Η καταγραφή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των Φ/Β πάνελ γίνεται από τον κατασκευαστή τους και αναφέρεται ως «flash report». Σε αυτήν την μεταπτυχιακή εργασία ερευνούμε την επίδραση που έχει η απόκλιση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των Φ/Β πάνελ στην παραγωγή ενός Φ/Β πάρκου καθώς επίσης αναζητούμε μία μεθοδολογία βελτιστοποίησης της κατανομής των Φ/Β πάνελ με κριτήριο την μεγιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής του Φ/Β πάρκου.

Αρχικά, περιγράφουμε την λειτουργία των Φ/Β πάνελ και την ηλεκτρική συνδεσμολογία αυτών σε ένα Φ/Β πάρκο.

Στην συνέχεια αναφέρουμε την μορφοποίηση του προβλήματος ελαχιστοποίησης της αρνητικής επίδρασης της διαφορετικότητας των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των Φ/Β πάνελ, δηλαδή της μεγιστοποίησης της ενεργειακής παραγωγής του Φ/Β σταθμού.

Κατόπιν εκτέλεσης της μορφοποίησης του προβλήματος στο λογισμικό Lingo κάνουμε μία δειγματική ποσοτικοποίηση της υπό εξέτασης επίδρασης της διαφορετικότητας των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των Φ/Β πάνελ.

Τέλος, βγάζουμε συμπεράσματα με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς, ενώ σχολιάζουμε την μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή	7
1.1	Δομή και λειτουργία φωτοβολταϊκού στοιχείου	1
1.2	Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου	5
1.3	Λειτουργία αντιστροφών σε μία φωτοβολταϊκή διάταξη	16
1.4	Διαφορετικότητα ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών πάνελ	16
Κεφάλαιο 2	Μορφοποίηση	19
2.1	Μορφοποίηση προβλήματος μεγιστοποίησης της συνολικής παραγωγής των Φ/Β πάνελ	19
2.2	Έλεγχος ακρίβειας υπολογισμού χαρακτηριστικής I-V	22
2.3	Μορφοποίηση στο Lingo	24
2.4	Ενέργειες βελτίωσης του υπολογιστικού χρόνου	27
2.5	Ευρετικός αλγόριθμος επίλυσης προβλήματος	31
2.6	Παράγοντες επίδρασης στην αντικειμενική συνάρτηση	35
Κεφάλαιο 3	Αριθμητικά Αποτελέσματα	42
3.1	Αριθμητικό Παράδειγμα 1	42
3.2	Αριθμητικό Παράδειγμα 2	43
3.3	Αριθμητικό Παράδειγμα 3	44
3.4	Αριθμητικό Παράδειγμα 4	46
3.5	Αριθμητικό Παράδειγμα 5	47
Κεφάλαιο 4	Επίδραση περιβαλλοντικών συνθηκών	50
4.1	Υπολογισμός χαρακτηριστικής I-V συναρτήσει των περιβαλλοντικών παραγόντων	50
4.2	Υπολογισμός περιθωρίου βελτιστοποίησης ισχύος για διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες.	50
Κεφάλαιο 5	Σύνοψη Μεταπτυχιακής Εργασίας	53
	Βιβλιογραφία	54

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζουμε πληροφορίες εισαγωγικού χαρακτήρα που δίνουν το κίνητρο και το υπόβαθρο αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και περιγράφουμε συνοπτικά τις βασικές ενότητες της μεταπτυχιακής εργασίας.

1.1 Δομή και λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από ημιαγωγούς, όπως είναι το πυρίτιο. Όταν το φως πέφτει πάνω σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, μία συγκεκριμένη ποσότητα απορροφάται από το υλικό του ημιαγωγού, το οποίο σημαίνει ότι ένα μέρος της ενέργειας που έχει το φως μεταφέρεται στον ημιαγωγό. Η ενέργεια αυτή απορροφάται από κάποια από τα ηλεκτρόνια, τα οποία αποδεσμεύονται από τον πυρήνα και κινούνται πλέον ελεύθερα. Ακόμα, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν ένα ή περισσότερα ηλεκτρικά πεδία τα οποία ενεργούν πάνω στα ελεύθερα ηλεκτρόνια ώστε να μετακινηθούν σε συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η κίνηση αυτή των ηλεκτρονίων δημιουργεί ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο μπορούμε να πάρουμε στο εξωτερικό κύκλωμα βάζοντας μεταλλικές επαφές στο πάνω και στο κάτω μέρος του στοιχείου. Το ρεύμα αυτό μαζί με την τάση του στοιχείου, η οποία είναι αποτέλεσμα του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου καθορίζει την ισχύ του στοιχείου. Η παραπάνω διαδικασία στηρίζεται σε μία σειρά από φυσικά φαινόμενα.

Πρώτα από όλα στηρίζεται στις ιδιότητες του πυριτίου που έχει ειδικές χημικές ιδιότητες λόγω της κρυσταλλικής του δομής. Ένα άτομο πυριτίου έχει 14 ηλεκτρόνια κατανομημένα σε 3 στιβάδες. Οι δύο πρώτες έχουν 2 και 8 ηλεκτρόνια αντίστοιχα και είναι πλήρως συμπληρωμένες, ενώ η τρίτη που είναι και η εξωτερική έχει μόλις τέσσερα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το άτομο να επιδιώκει να συμπληρώσει την εξωτερική του στιβάδα με σύνολο οκτώ ηλεκτρονίων. Για να γίνει αυτό εφικτό δημιουργεί ομοιοπολικούς δεσμούς με τέσσερα γειτονικά άτομα πυριτίου. Έτσι δημιουργείται η κρυσταλλική δομή του πυριτίου, η οποία όμως δεν είναι καλός αγωγός του ρεύματος, αφού κανένα από τα ηλεκτρόνια δεν είναι

ελεύθερο να μετακινηθεί. Όταν προσδίδεται ενέργεια στο καθαρό πυρίτιο μπορεί να σπάσουν κάποιοι δεσμοί και να ελευθερωθούν κάποια ηλεκτρόνια οπότε αφήνουν πίσω τους μία οπή. Τα ηλεκτρόνια αυτά περιφέρονται στον κρύσταλλο μέχρι να επανασυνδεθούν σε κάποιο δεσμό (δηλαδή να δεσμευτούν σε κάποια οπή) . Για τη διάρκεια που κινούνται αποκαλούνται ελεύθεροι φορείς και μεταφέρουν ηλεκτρικό ρεύμα. Όμως στο πυρίτιο οι φορείς αυτοί είναι πολύ λίγοι οπότε και το ρεύμα που δημιουργούν μικρό και δεν είναι συμφέρον να φτιαχτούν φωτοβολταϊκά στοιχεία μόνο από άτομα πυριτίου.

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία χρησιμοποιείται πυρίτιο με ατέλειες, δηλαδή πυρίτιο με κάποιο άλλο στοιχείο τοποθετημένα ανάμεσα στα άτομα του, το οποίο αλλάζει ελαφρώς τις φυσικές ιδιότητες των κρυστάλλων. Τα στοιχεία που δίνεται να τοποθετηθούν προέρχονται από τις ομάδες 13 (IIIΑ) και 15(VΑ) του περιοδικού πίνακα. Ένα από τα πιο διαδεδομένα στοιχεία της ομάδας 15 που χρησιμοποιούνται είναι ο φώσφορος (P) που έχει 5 αντί για 4 ηλεκτρόνια στην τελευταία του στιβάδα. Με ένα άτομο φωσφόρου αντικαθιστούμε ένα άτομο ανά 1.000.000 άτομα πυριτίου, διαδικασία που αποκαλείται «ντοπάρισμα» ή νόθευση του πυριτίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το άτομο του φωσφόρου να συνδέεται με τέσσερις δεσμούς με τα άτομα του πυριτίου και να του περισσέψει ένα αδέσμευτο ηλεκτρόνιο, το οποίο δεν συγκρατείται από ομοιοπολικό δεσμό. Αυτά τα ηλεκτρόνια για να αποδεσμευτούν χρειάζονται πολύ λιγότερη ενέργεια, οπότε ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι πολύ μεγαλύτερος από ότι πριν. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται ημιαγωγοί τύπου n, οι οποίοι είναι πολύ καλύτεροι αγωγοί από το καθαρό πυρίτιο. Με παρόμοιο τρόπο δημιουργούνται ημιαγωγοί τύπου p όταν το πυρίτιο «ντοπάρεται» με στοιχεία της ομάδας 13, με πιο διαδεδομένο το βόριο (B), οπότε και εμφανίζεται πληθώρα οπών που είναι κενές θέσεις χωρίς ηλεκτρόνια.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από τύπου n και τύπου p ημιαγωγούς ενωμένους, οπότε στο εσωτερικό τους δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο. Στους ημιαγωγούς τύπου n ο πλεονάζων αριθμός ηλεκτρονίων ισορροπούσε με τα πρωτόνια του P, και στους ημιαγωγούς τύπου p οι οπές ισορροπούσαν με το πρωτόνιο που έλειπε από τον πυρήνα του B. Με την ένωση των δύο ημιαγωγών το p-n στοιχείο που δημιουργείται δεν θα λειτουργούσε σωστά χωρίς το ηλεκτρικό πεδίο που εμφανίζεται στην p-n επαφή, διότι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που είναι στην n πλευρά και «αναζητούν» οπές «βλέπουν» όλες τις οπές και προσπαθούν να τις συμπληρώσουν. Αυτό που συμβαίνει όμως είναι ότι όταν στο σημείο επαφής των ημιαγωγών αναμειγνύονται οι οπές με τα ηλεκτρόνια η ουδετερότητα των δύο

αγωγών διαταράσσεται και δημιουργείται ένα φράγμα δυναμικού το οποίο κάνει όλο και πιο δύσκολη την κίνηση των ηλεκτρονίων από την n πλευρά στην p πλευρά. Τελικά επιτυγχάνεται η ισορροπία. Έχουμε ένα πεδίο μεταξύ των δύο περιοχών που συμπεριφέρεται σαν βαλβίδα επιτρέποντας τα ηλεκτρόνια να κινηθούν μόνο προς την μία κατεύθυνση (δίοδος).

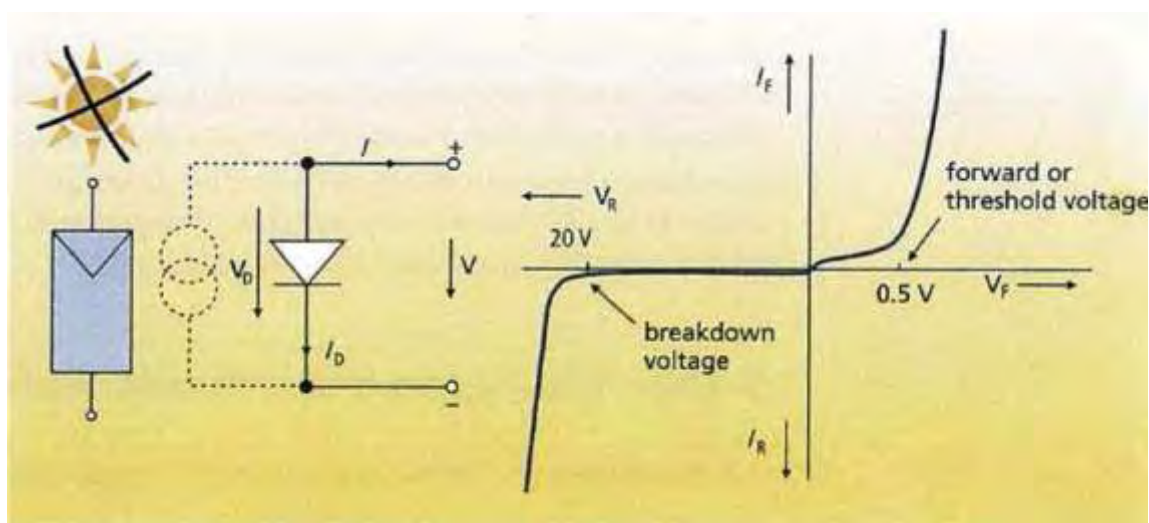
Όταν το φως πέφτει πάνω στο στοιχείο με την μορφή φωτονίου, η ενέργειά του απελευθερώνει ζεύγη οπών – ηλεκτρονίων. Η διαδικασία αυτή αποτελεί το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Κάθε φωτόνιο που έχει αρκετή ενέργεια κανονικά θα απελευθερώσει ακριβώς ένα ηλεκτρόνιο, οπότε θα δημιουργηθεί και μία οπή. Εάν αυτό συμβεί αρκετά κοντά στο πεδίο ή αν το ελεύθερο ηλεκτρόνιο και η οπή κινούνται στην ακτίνα επιρροής του το πεδίο θα «ωθήσει» την οπή προς την p πλευρά και το ηλεκτρόνιο προς την p πλευρά. Αυτό δημιουργεί περεταίρω διαταραχή της ηλεκτρικής ισορροπίας, οπότε εάν δώσουμε εξωτερική διέξοδο (σύνδεση με εξωτερικό κύκλωμα) στο ρεύμα, ηλεκτρόνια θα κινηθούν προς την p πλευρά για να ενωθούν με οπές. Η κίνηση των ηλεκτρονίων δημιουργεί ηλεκτρικό ρεύμα και ο χωρισμός των φορτίων μέσω του πεδίου δημιουργεί τάση. Έτσι και τα δύο παράγουν ισχύ $P=V \cdot I$.

Πάνω στα φωτοβολταϊκά στοιχεία πέφτει όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα του φωτός. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δεν είναι μονοχρωματική, αλλά αποτελείται από πολλά διαφορετικά μήκη κύματος που αντιστοιχούν σε διάφορα επίπεδα ενέργειας. Άρα όταν το φως πέφτει στο στοιχείο έχει μεγάλη ποικιλία φωτονίων με διαφορετικές ενέργειες, οπότε κάποια από αυτά δεν έχουν αρκετή ενέργεια να δημιουργήσουν ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών και θα απορροφηθούν από το στοιχείο χωρίς να σπάσουν ομοιοπολικούς δεσμούς. Με τα φωτόνια που έχουν περισσότερη ενέργεια από αυτή που χρειάζεται η περίσσεια απορροφάται και γίνεται θερμότητα. Μόνο ένα συγκεκριμένο μέρος της ακτινοβολίας, μετρούμενο σε eV , θα απορροφηθεί από το στοιχείο και θα προκαλέσει το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Αυτή η συγκεκριμένη ποσότητα της ακτινοβολίας αποκαλείται ενεργειακό χάσμα και για κρύσταλλο πυριτίου είναι η $1.1 eV$. Αυτές οι δύο περιπτώσεις ευθύνονται για το χάσιμο περίπου του 70% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Λύση θα αποτελούσε η χρήση υλικού με μικρότερο ενεργειακό χάσμα οπότε θα μας ήταν ωφέλιμα περισσότερα φωτόνια. Όμως το χάσμα αυτό καθορίζει το πεδίο, άρα και την τάση, οπότε με την απορρόφηση περισσότερων φωτονίων ναι μεν αυξάνεται το ρεύμα αλλά χάνουμε έχοντας μικρότερη τιμή τάσης και η ισχύς παραμένει περίπου ίδια. Το ιδανικό χάσμα ισορροπώντας τα παραπάνω είναι $1.4 eV$ για ένα απλό

στοιχείο. Επίσης, υπάρχουν και άλλες απώλειες αφού τα ηλεκτρόνια πρέπει να κινηθούν από την μία πλευρά του στοιχείου στην άλλη μέσω του εξωτερικού κυκλώματος.

1.2 Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου

Όπως προαναφέρθηκε τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συμπεριφέρονται βασικά σαν μία δίοδο p-n. Όταν το ΦΒ στοιχείο δεν δέχεται κάποια ηλιακή ακτινοβολία τότε μπορεί να παρασταθεί από μία δίοδο, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1: Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου χωρίς ακτινοβολία και η αντίστοιχη καμπύλη τάσης- ρεύματος

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το κύκλωμα σε αυτή την περίπτωση είναι οι εξής:

$$V = V_D \quad (1.1)$$

$$I = -I_D = -I_0 \left(e^{\frac{V}{m \times V_t}} - 1 \right) \quad (1.2)$$

, όπου

V η τελική τάση του στοιχείου

V_D η τάση διόδου

V_i η τάση θερμοκρασίας

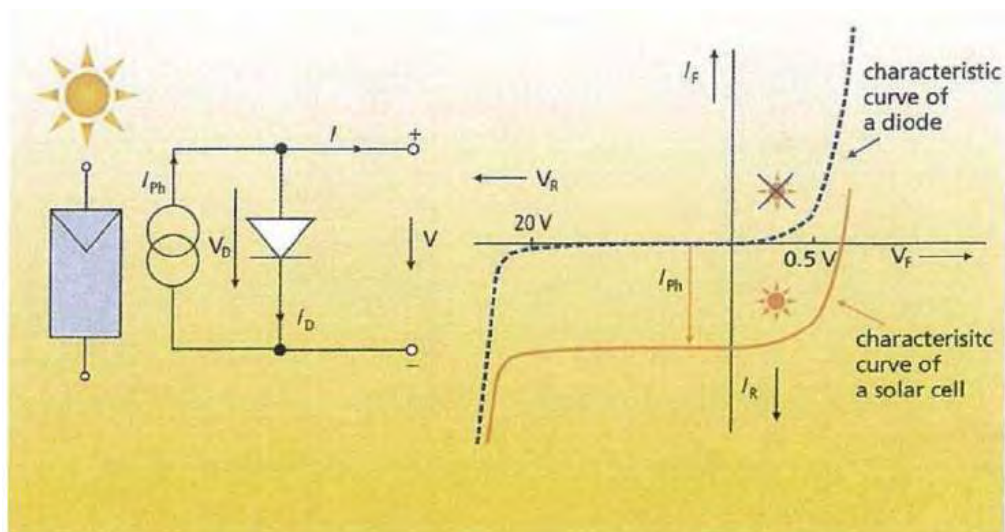
I το τελικό ρεύμα του στοιχείου

I_D το ρεύμα της διόδου

I_0 το ρεύμα κορεσμού διόδου στην ανάστροφη πόλωση

m η σταθερά της διόδου

Στην περίπτωση που το στοιχείο δεχτεί ηλιακή ακτινοβολία, η ενέργεια από τα φωτόνια δημιουργεί φορείς φορτίου. Επομένως το φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.2, από την δίοδο που είχαμε και στο προηγούμενο κύκλωμα και από μία πηγή ισχύος. Η πηγή ισχύος παράγει ένα ρεύμα, το φωτόρευμα I_{ph} . Αυτό το ρεύμα εξαρτάται από τη ακτινοβολία, G (W/m^2) και τη θερμοκρασία στα φωτοβολταϊκά στοιχεία.



Σχήμα 1.2: Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου με ακτινοβολία και η αντίστοιχη καμπύλη τάσης- ρεύματος

Η χαρακτηριστική καμπύλη I - V φαίνεται ότι μετατοπίζεται λόγω του φωτορεύματος, I_{ph} . Οι εξισώσεις που περιγράφουν το κύκλωμα σε αυτήν την περίπτωση είναι οι εξής:

$$V = V_D \quad (1.3)$$

$$I_{ph} = c_0 \times G \quad (1.4)$$

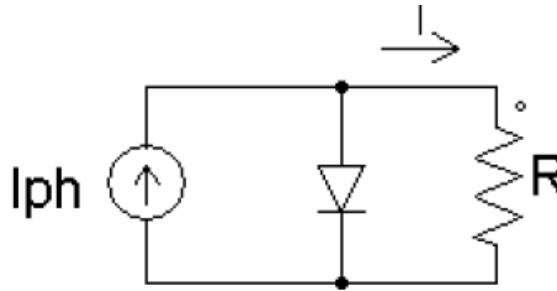
$$I = I_{ph} - I_D \quad (1.5)$$

,όπου

c_0 ο συντελεστής φωτορεύματος

G η ηλιακή ακτινοβολία

Για τον υπολογισμό της χαρακτηριστικής ρεύματος – τάσης (I-V) χρησιμοποιούνται κάποια ισοδύναμα κυκλώματα φωτοβολταϊκού στοιχείου με το πιο απλοποιημένο να είναι το μοντέλο της ιδανικής διόδου, όπως δίνεται στο σχήμα 1.3.

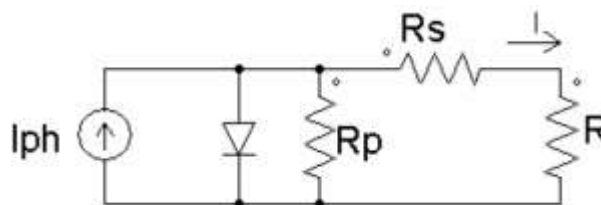


Σχήμα 1.3: Μοντέλο της ιδανικής διόδου

Η σχέση ρεύματος – τάσης δίνεται από την εξής εξίσωση:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad (1.6)$$

Λόγω του ότι το φωτοβολταϊκό στοιχείο δεν συμπεριφέρεται πλήρως ως ιδανική δίοδο αλλά έχει κάποιες απώλειες, χρησιμοποιείται αντί αυτού το μοντέλο της μίας διόδου του οποίου το ισοδύναμο κύκλωμα δίνεται στο σχήμα 1.4.



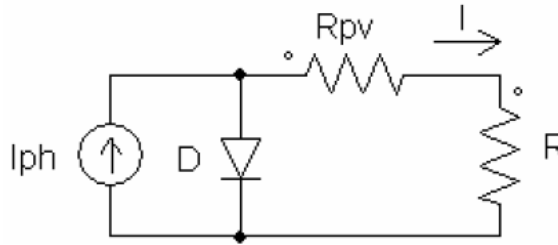
Σχήμα 1.4: Μοντέλο της μίας διόδου

Η σχέση ρεύματος – τάσης δίνεται από την εξής εξίσωση:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V + I \cdot R_s}{V_T}} - 1 \right) - V + \frac{I \cdot R_s}{R_p} \quad (1.7)$$

Η εν σειρά αντίσταση R_s αντιπροσωπεύει τις απώλειες λόγω πτώσης τάσης στις ηλεκτρικές επαφές, ενώ η εν παραλλήλω αντίσταση R_p αντιπροσωπεύει τις απώλειες λόγω των ρευμάτων διαρροής.

Αν αντικαταστήσουμε τον παράλληλο συνδυασμό αυτών των δύο αντιστάσεων με μία ισοδύναμη αντίσταση R_{pv} , τότε προκύπτει το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.5, το οποίο ορίζεται ως το κύκλωμα του αποτελεσματικού μοντέλου φωτοβολταϊκού στοιχείου.



Σχήμα 1.5: Αποτελεσματικό Μοντέλο φωτοβολταϊκού στοιχείου

Η σχέση ρεύματος – τάσης για αυτό το μοντέλο δίνεται από την εξίσωση:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V + I \cdot R_{pv}}{V_T}} - 1 \right) \quad (1.8)$$

Για τον υπολογισμό της σχέσης ρεύματος – τάσης της εξίσωσης 1.8 αρκεί να υπολογιστούν οι τέσσερις παράμετροι R_{pv} , V_t , I_0 , I_{ph} , όπως δίνονται στις παρακάτω εξισώσεις:

$$R_{pv} = -M \cdot \frac{I_{sc}}{I_{mpp}} + \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}} \cdot \left(1 - \frac{I_{sc}}{I_{mpp}} \right) \quad (1.9)$$

$$V_t = -(M + R_{pv}) \cdot I_{sc} \quad (1.10)$$

$$I_0 = I_{sc} \cdot e^{-\frac{V_{oc}}{V_t}} \quad (1.11)$$

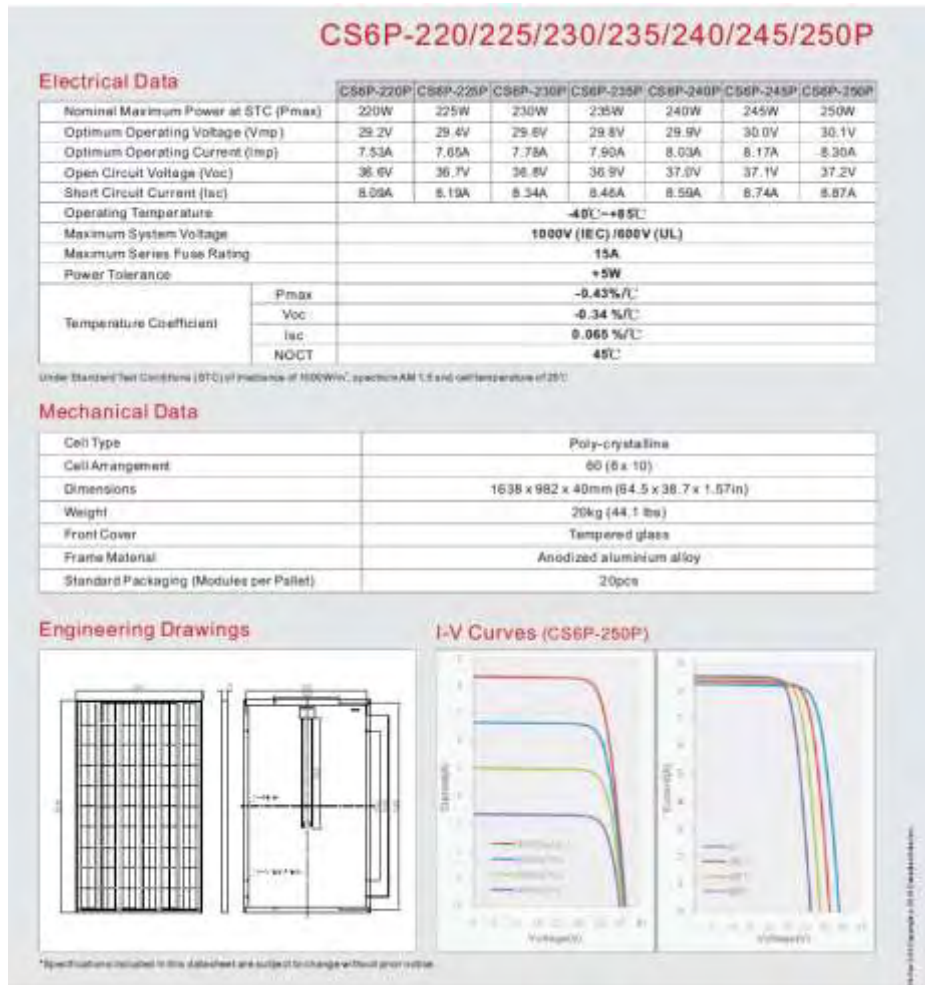
$$I_{ph} = I_{sc} \quad (1.12)$$

Ο συντελεστής M υπολογίζεται από την εξίσωση 1.13.

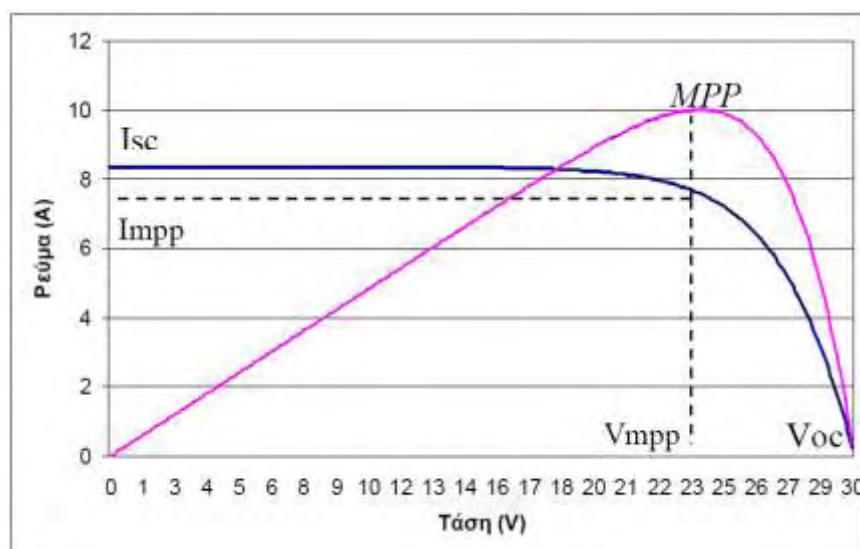
$$M = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \cdot \left(-5.411 \cdot \frac{I_{mpp}}{I_{sc}} \cdot \frac{V_{mpp}}{V_{oc}} + 6450 \cdot \frac{V_{mpp}}{V_{oc}} + 3.417 \cdot \frac{I_{mpp}}{I_{sc}} - 4.422 \right) \quad (1.13)$$

Οι παράμετροι I_{mpp} , I_{sc} , V_{mpp} , V_{oc} δίνονται στα τεχνικά φυλλάδια φωτοβολταϊκών πάνελ οποιουδήποτε κατασκευαστή, όπως για παράδειγμα φαίνεται στην εικόνα 1.1 ενός φωτοβολταϊκού πάνελ σειράς CS6P της καναδέζικης εταιρίας Canadian Solar. V_{oc} είναι η τάση ανοιχτού κυκλώματος του φωτοβολταϊκού στοιχείου, I_{sc} είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης αν οι δύο ανοιχτοκυκλωμένες επαφές του φωτοβολταϊκού στοιχείου βραχυκυκλωθούν με ένα αμπερόμετρο, ενώ I_{mpp} και V_{mpp} είναι εκείνο το ρεύμα και η τάση αντίστοιχα, των οποίων το γινόμενο που εκφράζει την ισχύ του πάνελ μεγιστοποιείται. Στο σχήμα 1.6 δίνεται η μορφή που έχει η χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης (I-V) που έχει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο και στο οποίο φαίνεται το σημείο μέγιστης ισχύς (MPP σημείο).

Οι τιμές αυτές των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των πάνελ αντιστοιχούν σε πρότυπες συνθήκες δοκιμής τους (Standard Test Conditions – STC). Κατά τις STC συνθήκες θεωρείται ότι η ακτινοβολία του ήλιου προσπίπτει κάθετα στο πάνελ, με πυκνότητα ισχύος 1000W/m^2 και φάσμα AM1,5, ενώ η θερμοκρασία του πάνελ είναι 25°C . Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των πάνελ όλων των χαρακτηριστικών έχουν μετρηθεί στις συνθήκες STC, έτσι ώστε να μπορούν να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους.



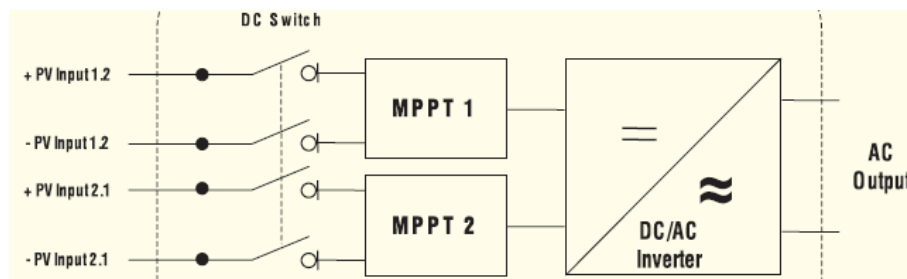
Εικόνα 1.1: Τεχνικό φυλλάδιο φωτοβολταϊκών πάνελ
σειράς CS6P της εταιρείας Canadian Solar



Σχήμα 1.6: Χαρακτηριστική I-V και καμπύλη P-V με το σημείο μέγιστης ισχύος MPP

1.3 Λειτουργία αντιστροφέων σε μία φωτοβολταϊκή διάταξη

Ο ρόλος του αντιστροφέα σε μία φωτοβολταϊκή διάταξη είναι διπλός. Καταρχήν ο αντιστροφέας αποτελείται από ένα μετατροπέα dc- ac, ο οποίος μετατρέπει το συνεχές dc ρεύμα που παράγει η φωτοβολταϊκή διάταξη σε εναλλασσόμενο ac ρεύμα, ωφέλιμο για τη έγχυσή του στο δημόσιο δίκτυο της ΔΕΗ. Επιπλέον αποτελείται από ένα μετατροπέα dc-dc ή διαφορετικά ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracker – MPPT), ο οποίος λειτουργεί έτσι ώστε κάθε χρονική στιγμή να δίνει στην έξοδο του αντιστροφέα ζευγάρι ρεύματος και τάσης που να αντιστοιχεί στην μέγιστη δυνατή ισχύ, έτσι ώστε να αυξάνεται η οικονομική – ενεργειακή απόδοση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Στο σχήμα 1.7 δίνεται παράδειγμα διάταξης ενός αντιστροφέα, ο οποίος έχει δύο ανιχνευτές MPPT.



Σχήμα 1.7: Διάταξη αντιστροφέα με 2 ανιχνευτές MPPT

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.7, ο αντιστροφέας δέχεται κάποιες εισόδους. Οι εισόδοι αυτοί είναι οι φωτοβολταϊκές στοιχειοσειρές (string), οι οποίες δεν είναι τίποτα άλλο από φωτοβολταϊκά πάνελ συνδεδεμένα εν σειρά. Βασικός σχεδιαστικός κανόνας διαστασιολόγησης ενός αντιστροφέα είναι οι στοιχειοσειρές που συνδέονται εν παραλλήλω σε ένα αντιστροφέα να αποτελούνται από ίδιο αριθμό και τύπο φωτοβολταϊκών πάνελ.

1.4 Διαφορετικότητα ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών πάνελ

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ κατά την παραγωγή τους από τον κατασκευαστή δεν φέρουν ίδια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μεταξύ τους αλλά έχουν μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους.

Ο κατασκευαστής των φωτοβολταϊκών πάνελ μετά την παραγωγή τους εκθέτει το καθένα από αυτά σε μία πολλής σύντομης διάρκειας (1-30ms), φωτεινή πηγή ισχύος από ξένον (ισχύος 1W ανά m²). Το φάσμα της πηγής αυτής είναι έτσι σχεδιασμένο, έτσι ώστε να αντιστοιχεί στο φάσμα του φωτός και τελικά οι συνθήκες μετρήσεων να αντιστοιχούν στις STC συνθήκες. Κατόπιν μετρήσεων που γίνονται σε κάθε φωτοβολταϊκό πάνελ, ο κατασκευαστής τους συντάσσει μία λίστα με τα τέσσερα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους I_{mpp} , I_{sc} , V_{mpp} , V_{oc} , η οποία ονομάζεται «flash report». Παράδειγμα μίας τέτοιας λίστας αναφοράς δίνεται στην εικόνα 1.2, η οποία αφορά το πάνελ ισχύος 220W, σειράς CS6P, της εταιρείας Canadian Solar.

Test report					Job No. :6-100-1007-019		
ID:	Isc(A)	Voc(V)	Imp(A)	Vmp(V)	Pmax(W)	CARTON	Pallet nr.
1610260440986	8.35	36.36	7.66	29.19	223.50	061024909B	19
0610260441085	8.37	36.47	7.64	29.37	224.40	061024909B	19
0610260441108	8.35	36.46	7.62	29.36	223.60	061024909B	19
0610280401962	8.42	36.30	7.65	29.33	224.30	061024909B	19
86610280402457	8.34	36.31	7.75	28.97	224.50	061024909B	19
0610280402693	8.31	36.48	7.62	29.43	224.10	061024909B	19
0610280402729	8.25	36.47	7.62	29.43	224.20	061024909B	19
0610280402746	8.25	36.41	7.74	28.96	224.10	061024909B	19
0610280402774	8.23	36.57	7.69	28.98	223.00	061024909B	19
0610280402882	8.29	36.27	7.68	28.96	222.30	061024909B	19
0610260440873	8.30	36.44	7.69	29.23	224.70	061024910B	20
0610260440985	8.38	36.40	7.60	29.57	224.80	061024910B	20
0610260441053	8.36	36.43	7.76	28.96	224.70	061024910B	20
0610280401833	8.40	36.32	7.79	28.87	224.80	061024910B	20
0610280401896	8.36	36.34	7.75	28.90	224.00	061024910B	20
0610280402022	8.34	36.34	7.75	28.95	224.20	061024910B	20
0610280402032	8.43	36.27	7.66	29.29	224.30	061024910B	20
0610280402044	8.33	36.44	7.75	28.96	224.50	061024910B	20
0610280402653	8.36	36.46	7.73	28.76	222.20	061024910B	20
0610280402858	8.31	36.29	7.71	28.90	222.80	061024910B	20
0610260440991	8.35	36.43	7.70	29.19	224.80	061024909B	19
0610260441102	8.31	36.42	7.68	28.92	222.00	061024909B	19
0610280401230	8.23	36.27	7.56	29.19	220.60	061024909B	19
0610280402445	8.39	36.47	7.63	29.34	223.80	061024909B	19
0610280402671	8.31	36.50	7.59	29.42	223.20	061024909B	19
0610280402719	8.21	36.52	7.60	29.42	223.70	061024909B	19
0610280402743	8.27	36.28	7.60	29.41	223.60	061024909B	19
0610280402750	8.31	36.29	7.77	28.52	221.50	061024909B	19
0610280402788	8.24	36.51	7.60	29.43	223.70	061024909B	19
0610280403004	8.35	36.38	7.77	28.94	224.70	061024909B	19

Εικόνα 1.2: Flash Report πάνελ ισχύος 220W,
σειράς CS6P της εταιρείας Canadian Solar

Η διαφορετικότητα αυτή μεταξύ των χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών πάνελ εκτιμάται ότι συμβάλει στην μείωση της ενεργειακής απόδοσης μίας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Η εκτίμηση αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι κάθε φωτοβολταϊκό πάνελ έχει την δική του χαρακτηριστική ρεύματος τάσης- ρεύματος (I-V). Συνεπώς για κάθε

φωτοβολταϊκό πάνελ το σημείο μέγιστης ισχύος MPP είναι διαφορετικό και καθώς σε άλλα είναι πιο υψηλό, σε άλλα είναι πιο χαμηλό. Με βάση όμως την σχεδιαστική λογική ενός αντιστροφέα, ο ενσωματωμένος ανιχνευτής MPPT «ψάχνει» κάθε χρονική στιγμή το σημείο βέλτιστης ισχύος για τον τελικό συνδυασμό των πάνελ που συνδέονται στον αντιστροφέα. Συνεπώς ένα πάνελ λιγότερης «υποσχόμενης» ισχύος υποβαθμίζει ένα πάνελ μεγαλύτερης «υποσχόμενης» ισχύος, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ενεργειακή απόδοση του συνολικού φωτοβολταϊκού συστήματος.

Σκοπός της διπλωματικής αυτής είναι ο υπολογισμός του βέλτιστου συνδυασμού των φωτοβολταϊκών πάνελ, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η παραγωγή τους, καθώς και το αντίστοιχο κέρδος ισχύος, όπως προκύπτει.

Κεφάλαιο 2 Μορφοποίηση

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύουμε τον τρόπο υπολογισμού του βέλτιστου συνδυασμού των φωτοβολταϊκών πάνελ.

Αρχικά παρουσιάζουμε την μορφοποίηση του προβλήματος, ενώ στην συνέχεια επιλύουμε το μοντελοποιημένο πρόβλημα στο λογισμικό Lingo.

2.1 Μορφοποίηση προβλήματος μεγιστοποίησης της παραγωγής φωτοβολταϊκών πάνελ

Οι παράμετροι, οι μεταβλητές απόφασης και οι περιορισμοί του προβλήματος προκύπτουν ως εξής:

Παράμετροι

- I : συνολικός αριθμός inverter
- i : δείκτης Inverter $i \in (1, 2, \dots, I)$
- P : αριθμός πάνελ
- p : δείκτης πάνελ $p \in (1, 2, \dots, P)$
- s : δείκτης στοιχειοσειράς (string) inverter $s \in (1, 2, \dots, S)$
- S : αριθμός των στοιχειοσειρών (string) ανά inverter
- N_{is} : πλήθος πάνελ του inverter i , του string s
- I_{sc_p} : το ρεύμα βραχυκύκλωσης του πάνελ p
- V_{oc_p} : τάση ανοιχτού κυκλώματος του πάνελ p
- I_{MPP_p} : ρεύμα MPP πάνελ p
- V_{MPP_p} : τάση MPP πάνελ p

- R_{pv_p} : Σταθερά χαρακτηριστικής $I_p = f(I_p, V_p)$
- M_p : Σταθερά χαρακτηριστικής $I_p = f(I_p, V_p)$
- I_{0_p} : Σταθερά χαρακτηριστικής $I_p = f(I_p, V_p)$

Από τα παραπάνω οι παράμετροι I , P , S , N_{is} ορίζονται κατά την διαστασιολόγηση μίας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, αναλόγως την ισχύ της, το πάνελ και τον αντιστροφέα που θα χρησιμοποιηθούν. Οι παράμετροι I_{sc_p} , V_{oc_p} , I_{MPP_p} , V_{MPP_p} δίνονται για κάθε φωτοβολταϊκό πάνελ από το «flash report» του κατασκευαστή. Τέλος οι παράμετροι R_{pv_p} , M_p , I_{0_p} υπολογίζονται από τις εξισώσεις 1.9, 1.13 και 1.11 αντίστοιχα για κάθε πάνελ.

Μεταβλητές απόφασης:

- $x_{isp} = 1$ αν το πάνελ p ανήκει στην στοιχειοσειρά (string) s του inverter i
 $=0$ αν το πάνελ p δεν ανήκει στην στοιχειοσειρά (string) s του inverter i
- V_p : τάση κάθε πάνελ $\forall p=1,2,\dots,P$
- I_{is} : ρεύμα του string s , του inverter i $\forall s=1,2,\dots,S, \forall i=1,2,\dots,I$
- I_p : ρεύμα κάθε πάνελ $\forall p=1,2,\dots,P$

Περιορισμοί:

Κατά την διαστασιολόγηση μίας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης προσδιορίζεται ο αριθμός των πάνελ ανά στοιχειοσειρά N_{is} . Ο περιορισμός 2.1 εξασφαλίζει ότι αυτή η παράμετρος δεν θα παραβιαστεί. Επίσης σύμφωνα με τον περιορισμό 2.2 κάθε πάνελ μπορεί να ανήκει μόνο σε μία στοιχειοσειρά.

$$\bullet \sum_{p=1}^P x_{isp} = N_{is} \quad \forall i = 1,2,\dots,I \quad (2.1)$$

$$\forall s = 1,2,\dots,S$$

$$\bullet \sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S x_{isp} = 1 \quad \forall p=1,2,\dots,P \quad (2.2)$$

Βασικοί ηλεκτρολογικοί κανόνες συνδεσμολογίας φωτοβολταϊκών πάνελ είναι οι εξής:

1. Όλα τα πάνελ που συνδέονται στην ίδια φωτοβολταϊκή στοιχειοσειρά διαρρέονται από το ίδιο ηλεκτρικό ρεύμα
2. Η ηλεκτρική τάση των φωτοβολταϊκών στοιχειοσειρών που παραλληλίζονται στην είσοδο του ανιχνευτή MPPT ενός αντιστροφέα είναι ίδια μεταξύ τους.

Οι περιορισμοί αυτοί εκφράζονται από τις εξισώσεις 2.3 και 2.4 αντίστοιχα.

$$\bullet \quad \sum_{p=1}^P V_p \cdot x_{i1p} = \sum_{p=1}^P V_p \cdot x_{i2p} = \dots = \sum_{p=1}^P V_p \cdot x_{isp} \quad (2.3)$$

$$\forall \quad s = 1, 2, \dots, S, \quad \forall \quad i = 1, 2, \dots, I$$

$$\bullet \quad I_p = \sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S x_{isp} \cdot I_{is} \quad \forall \quad p = 1, 2, \dots, P \quad (2.4)$$

Το ρεύμα και η τάση κάθε φωτοβολταϊκού πάνελ συνδέονται μεταξύ τους με την χαρακτηριστική I-V, όπως ορίζεται στην εξίσωση 2.5.

$$\bullet \quad I_p = I_{scp} - I_{0p} \cdot \left(e^{\frac{V_p + I_p \cdot R_p}{a_p}} - 1 \right) \quad \forall \quad p = 1, 2, \dots, P \quad (2.5)$$

Η διαφορετικότητα των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των πάνελ έχει σαν αποτέλεσμα κάθε πάνελ να έχει διαφορετική χαρακτηριστική I-V, ενώ η αντίστοιχη χαρακτηριστική I-V της στοιχειοσειράς των πάνελ αυτών προκύπτει ως σύνθεση των επιμέρους αυτών χαρακτηριστικών. Δύο βασικές διαφορές μεταξύ αυτών των επιμέρους χαρακτηριστικών είναι τα όρια του ρεύματος και της τάσης, δηλαδή το ρεύμα και η τάση κάθε πάνελ περιορίζεται από το ρεύμα βραχυκύκλωσης και την τάση ανοιχτού κυκλώματος αντίστοιχα. Συνεπώς το ρεύμα των πάνελ που συνδέονται σε μία στοιχειοσειρά δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το μικρότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης των πάνελ που συνδέονται στην στοιχειοσειρά αυτή, όπως ορίζεται και στον περιορισμό 2.6. Αντίστοιχα η τάση κάθε πάνελ δεν μπορεί να υπερβεί την αντίστοιχη τιμή τάσης ανοιχτού κυκλώματος που το χαρακτηρίζει, όπως, όπως ορίζεται στον περιορισμό 2.8 .

$$\bullet \quad x_{isp} \cdot I_{is} \leq I_{scp} \quad \forall \quad p = 1, 2, \dots, P \quad (2.6)$$

$$\forall \quad i = 1, 2, \dots, I$$

$$\forall \quad s = 1, 2, \dots, S$$

$$\bullet \quad 0 \leq V_p \leq V_{ocp} \quad \forall p=1,2,\dots,P \quad (2.7)$$

Τέλος, η μεταβλητή απόφασης x_{isp} , όπως ορίστηκε παραπάνω είναι μία δυαδική μεταβλητή, και κατά συνέπεια ισχύει ότι:

$$\bullet \quad x_{isp} \in \{0,1\} \quad (2.8)$$

Θεωρώντας ότι ο ανιχνευτής ενός αντιστροφέα είναι ιδανικός, δηλαδή ότι κάθε χρονική στιγμή υπολογίζει το σημείο MPP της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V των πάνελ που συνδέονται σε αυτόν, δηλαδή εκείνο το σημείο στο οποίο μεγιστοποιείται η παραγόμενη ισχύς των πάνελ, προκύπτει η ακόλουθη αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος μεγιστοποίησης:

Αντικειμενική συνάρτηση:

$$MAX \left(\sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^P (V_p \cdot I_{is} \cdot x_{isp}) \right) \quad (2.9)$$

2.2 Έλεγχος ακρίβειας υπολογισμού χαρακτηριστικής I-V

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό Lingo, ελέγχτηκε η ακρίβεια υπολογισμού της χαρακτηριστικής I-V ενός πάνελ μέσω της εξίσωσης 1.8 του αποτελεσματικού μοντέλου.

Επιλέχθηκαν τυχαία 10 πάνελ με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του πίνακα 2.1, για τα οποία εφαρμόστηκε η μορφοποίηση της εικόνας 2.1. Σύμφωνα με αυτήν και όσα έχουν αναφερθεί παραπάνω, το ρεύμα και η τάση MPP ενός πάνελ αντιστοιχεί σε εκείνο το σημείο της χαρακτηριστικής I-V, για το οποίο το γινόμενο ρεύματος επί την τάση, δηλαδή η ισχύς του μεγιστοποιείται.

Οι διαφορές που προκύπτουν σύμφωνα με τα αποτελέσματα που δίνονται στον πίνακα 2.1 είναι πολύ μικρές. Κατά συνέπεια και η εξίσωση και ο τρόπος υπολογισμού των I_{panel} και του V_{panel} από το lingo είναι αρκετά ακριβείς.

Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά πάνελ από κατασκευαστή						Υπολογισμοί Lingo	
p	Isc	Voc	Impp	Vmpp	Pmpp	I_panel	V_panel
1	8.3075	36.2780	7.66	29.11	222.98	7.659	29.106
2	8.3433	36.2830	7.61	29.12	221.60	7.609	29.115
3	8.3595	36.4770	7.79	28.66	223.26	7.790	28.667
4	8.2981	36.2480	7.61	29.23	222.44	7.609	29.224
5	8.3418	36.2510	7.52	29.31	220.41	7.520	29.304
6	8.3073	36.3530	7.62	29.26	222.96	7.619	29.254
7	8.3132	36.1400	7.81	28.35	221.41	7.810	28.371
8	8.3250	36.1630	7.72	28.66	221.26	7.720	28.661
9	8.3099	36.3430	7.64	29.26	223.55	7.639	29.255
10	8.2888	36.1800	7.64	28.84	220.34	7.639	28.836

Πίνακας 2.1: Έλεγχος ακρίβειας χαρακτηριστικής I-V

```

LINGO 11.0 - [LINGO Model - lingo formulation.8.29_10panel_Υπολογισμος MPP]
File Edit LINGO Window Help

sets:
PANEL/P1..P10/:Impp, Isc, Vmpp, Voc, V_panel, I_panel, R, V_t, Io, SUM;
endsets

!Υπολογισμος χαρακτηριστικis f(I,V);

@FOR (
PANEL(P) :
I_panel(P)=Isc(P)-Io(P)*(@EXP((V_panel(P)+I_panel(P)*R(P))/V_t(P))-1)
);

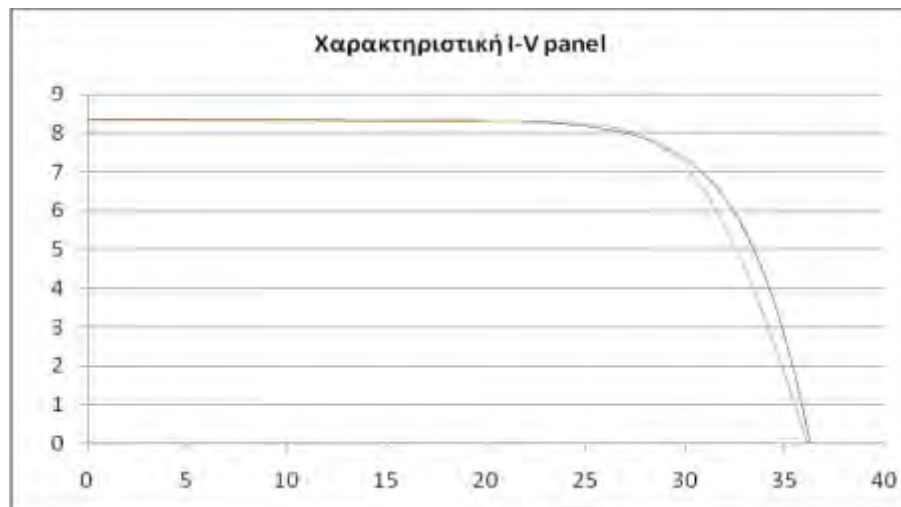
@FOR (
PANEL(P) :
SUM(P)=I_panel(P)*V_panel(P)
);

!Αντικειμενικη συνarthsh;
MAX=@sum(PANEL(P):SUM(P));

```

Εικόνα 2.1:Μορφοποίηση επαλήθευσης Impp, Vmpp

Στο σχήμα 2.1 δίνονται οι χαρακτηριστικές, όπως προκύπτουν από την εξίσωση 1.8 ενδεικτικά για τα πάνελ Νο 2 και 7 του πίνακα 2.1.



Σχήμα 1: Χαρακτηριστική I-V δύο πάνελ

2.3 Μορφοποίηση στο Lingo

sets:

```
PANEL/P1..Pmax/:Imp, Isc, Vmpp, Voc, V_panel, I_panel, R, V_t, Io;
STRING/S1..Smax/;
INVERTER/I1..Imax/:Quantity_String;
QUANTITY_PANEL(INVERTER, STRING):Q_Panel;
X(INVERTER, STRING, PANEL):YN;
INITIALIZATION(INVERTER, STRING):INTI;
OBJECTIVE(INVERTER, STRING, PANEL):OBJ;
```

```
I_string(INVERTER, STRING):Current_String;
```

endsets

DATA:

```
Q_Panel=;
Quantity_String=;
Imp=;
Vmpp=;
Isc=;
```



```

Voc=;

R=;

V_t=;

Io=;

ENDDATA

INIT:

I_panel=;

V_panel=;

ENDINIT

!Ypologimos ths f(I,V);

@FOR (
    PANEL(P) :
        I_panel(P)=Isc(P)-Io(P)*(@EXP((V_panel(P)+I_panel(P)*R(P))/V_t(P))-1)
);

!H metablhth apofashs x mporei na parei times mono 0 kai 1;

@FOR (
    X(I,S,P) :
        @BIN(YN)
);

! Posa panel mpainoun se ena string;

@FOR(
    INVERTER(I) :
        @FOR(
            STRING(S) :
                @SUM(X(I,S,P):YN(I,S,P))=Q_Panel(I,S)
        )
);

!Ena panel mporei na anhkei mono se ena string;

@FOR(
    PANEL(P) :
        @SUM(X(I,S,P):YN(I,S,P))=1
);

!Idia tash gia string poy syndeontai ston idio inverter;

@FOR (
    INVERTER(I) :
        @FOR (
            STRING(S) :
                INTI(I,S)=@SUM(PANEL(P):V_panel(P)*YN(I,S,P))
        )
);

```

```

);

@FOR (
    INVERTER(I) :
        @FOR (
            STRING(S) | S #LE# Quantity_String(I)-1:
                INTI(I,S)=INTI(I,S+1)

        )
);

!Iso reuma gia ta panel poy sundeontai sto idio string;

@FOR (
    PANEL(P) :
        I_panel(P)=@SUM(X(I,S,P):YN(I,S,P)*Current_String(I,S))

);

!Periorismoi tashs;

@FOR (
    PANEL(P) :
        V_panel(P)<=Voc(P)

);

!Periorismoi reumatos;

@FOR (
    INVERTER(I) :
        @FOR (
            STRING(S) :
                @FOR (
                    PANEL(P) :
                        YN(I,S,P)*Current_String(I,S)<=Isc(P)

                )
            )
        )
);

!Ypologismoi gia thn antikeimenikh;

@FOR (
    INVERTER(I) :
        @FOR (
            STRING(S) :
                @FOR (
                    PANEL(P) :

                        OBJ(I,S,P)=V_panel(P)*YN(I,S,P)*Current_String(I,S)

                )
            )
        )
);

!Antikeimenikh synarthsh;

MAX=@SUM(OBJECTIVE(I,S,P):OBJ(I,S,P));

```

2.4 Ενέργειες βελτίωσης υπολογιστικού χρόνου

Κατά την ανάπτυξη της μορφοποίησης του προβλήματος προέκυψαν οι εξής παρατηρήσεις:

A) Καθώς το σημείο βέλτιστης ισχύος είναι γνωστό για κάθε πάνελ ξεχωριστά, δόθηκαν αρχικές τιμές στο ρεύμα I_{panel} και την τάση V_{panel} των πάνελ ίσες με το ρεύμα και την τάση MPP του κάθε πάνελ αντίστοιχα. Με τον τρόπο αυτό επετεύχθη μία μικρή βελτίωση του υπολογιστικού χρόνου.

B) Οι περισσότεροι περιορισμοί της μορφοποίησης είναι μη γραμμικοί. Χαρακτηριστικό στοιχείο των περισσότερων από αυτούς είναι ότι εμπεριέχουν γινόμενο δυαδικής μεταβλητής απόφασης με θετική πραγματική μεταβλητή απόφασης γνωστού εύρους τιμών. Τέτοιοι περιορισμοί είναι οι 2.4, 2.5 και 2.7. Η μετατροπή αυτών των μη γραμμικών περιορισμών σε γραμμικούς μπορεί να γίνει μέσω του εξής θεωρήματος:

Θεώρημα:

Έστω x, y δύο μεταβλητές απόφασης, για τις οποίες ισχύει ότι:

- $x \in (0,1)$
- $y = [y_{\min}, y_{\max})$

Εισάγοντας μία καινούρια μεταβλητή απόφασης H για κάθε γινόμενο δυαδικής με ακέραιη μεταβλητή απόφασης ($H = x \cdot y$), προκύπτουν οι ακόλουθοι τέσσερις επιπλέον περιορισμοί:

- $y - y_{\max} \cdot (1-x) \leq H \leq x - y_{\min} \cdot (1-x)$
- $y_{\min} \cdot x \leq H \leq y_{\max} \cdot x$

Με τους παραπάνω περιορισμούς μη γραμμικοί περιορισμοί μετατρέπονται σε γραμμικοί.

Απόδειξη:

$$\text{Εάν } x=1 \text{ τότε: } \left. \begin{array}{l} y \leq H \leq y \\ y_{\min} \leq H \leq y_{\max} \end{array} \right\} \Rightarrow H = y$$

$$\text{Εάν } x=0 \text{ τότε: } \left. \begin{array}{l} y - y_{\max} \leq H \leq y - y_{\min} \\ 0 \leq H \leq 0 \end{array} \right\} \Rightarrow H = 0$$

Εφαρμόζοντας το παραπάνω θεώρημα στους περιορισμούς 2.4, 2.5 και 2.6, προκύπτει η ακόλουθη μορφοποίηση:

sets:

```
PANEL/P1..Pmax/:Impp, Isc, Vmpp, Voc, V_panel, I_panel, R, V_t, Io;  
STRING/S1..Smax/;  
INVERTER/I1..Imax/:Quantity_String;  
QUANTITY_PANEL(INVERTER, STRING):Q_Panel;  
X(INVERTER, STRING, PANEL):YN;  
INITIALIZATION(INVERTER, STRING):INTI;  
OBJECTIVE(INVERTER, STRING, PANEL):OBJ;
```

```
I_string(INVERTER, STRING):Current_String;
```

endsets

DATA:

```
Q_Panel=;  
Quantity_String=;  
Impp=;  
Vmpp=;  
Isc=;  
Voc=;  
R=;  
V_t=;  
Io=;
```

ENDDATA

INIT:

```
I_panel=;  
V_panel=;
```

ENDINIT

```
!Ypologimos ths f(I,V);
```

```
@FOR (  
    PANEL(P) :  
        I_panel(P)=Isc(P)-Io(P)*(@EXP((V_panel(P)+I_panel(P)*R(P))/V_t(P))-1)
```

```

);

!H metablhth apofashs x mporei na parei times mono 0 kai 1;

@FOR (
    X(I,S,P) :
        @BIN(YN)
);

! Posa panel mpainoun se ena string;

@FOR(
    INVERTER(I) :
        @FOR(
            STRING(S) :
                @SUM(X(I,S,P) : YN(I,S,P)) = Q_Panel(I,S)
        )
);

!Ena panel mporei na anhkei mono se ena string;

@FOR(
    PANEL(P) :
        @SUM(X(I,S,P) : YN(I,S,P)) = 1
);

!Metatropi mh grammikou periorismou isothtas tashs se grammiko;

@FOR (
    INVERTER(I) :
        @FOR (
            STRING(S) :
                @FOR (
                    PANEL(P) :
                        V_panel(P) - Voc(P) * (1 - YN(I,S,P)) <= H(I,S,P);
                        H(I,S,P) <= V_panel(P);
                        H(I,S,P) <= Voc(P) * YN(I,S,P);
                )
            )
        )
);

!Idia tash gia string poy syndeontai ston idio inverter;

@FOR (
    INVERTER(I) :
        @FOR (
            STRING(S) :
                INTI(I,S) = @SUM(X(I,S,P) : H(I,S,P))
        )
);

@FOR (
    INVERTER(I) :
        @FOR (

```

```

        STRING(S) | S #LE# Quantity_String(I) -1:
            INTI(I,S)=INTI(I,S+1)

    )

);

!Metatropi mh grammikou periorismou isothtas reumatos se grammiko;

@FOR (
    INVERTER(I) :
        @FOR (
            STRING(S) :
                @FOR (
                    PANEL(P) :
                        Current_String(I,S)-Isc(P)*(1-YN(I,S,P))<=Z(I,S,P);
                        Z(I,S,P)<=Current_String(I,S);
                        Z(I,S,P)<=Isc(P)*YN(I,S,P);
                )
            )
        )
);

!Iso reuma gia ta panel poy sundeontai sto idio string;

@FOR (
    PANEL(P) :
        I_panel(P)=@SUM(X(I,S,P):Z(I,S,P))
);

!Ypologismoι gia thn antikeimenikh;

@FOR (
    INVERTER(I) :
        @FOR (
            STRING(S) :
                @FOR (
                    PANEL(P) :
                        OBJ(I,S,P)=H(I,S,P)*Z(I,S,P)
                )
            )
        )
);

!Antikeimenikh synarthsh;

MAX=@SUM(OBJECTIVE(I,S,P):OBJ(I,S,P));

```

2.5 Ευρετικός αλγόριθμος επίλυσης προβλήματος

Λόγω του ότι το παραπάνω πρόβλημα είναι μη γραμμικό και ο δείκτης δυσκολίας επίλυσής του αυξάνεται εκθετικά καθώς αυξάνεται το μέγεθος του προβλήματος έχει αναπτυχθεί ένας ευρετικός αλγόριθμος επίλυσής του.

Σύμφωνα με αυτό η ελαχιστοποίηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των πάνελ επιτυγχάνεται αρχικά με την ελαχιστοποίηση των διαφορών του ηλεκτρικού ρεύματος των πάνελ που συνδέονται εν σειρά σε μία στοιχειοσειρά. Για τον λόγο αυτό ταξινομούνται τα πάνελ σε αύξουσα σειρά ρεύματος και στην συνέχεια ομαδοποιούνται τα πάνελ ανά στοιχειοσειρά.

Η επόμενη μεταβλητή απόφασης είναι ποιες στοιχειοσειρές θα παραλληλιστούν και θα συνδεθούν στον ίδιο αντιστροφέα, ή στον ίδιο ανιχνευτή MPPT. Ο έλεγχος γίνεται στην συνολική τάση των πάνελ που ανήκουν στην αντίστοιχη στοιχειοσειρά, όπως κατανεμήθηκαν στο πρώτο στάδιο βελτιστοποίησης. Συνεπώς στον ίδιο αντιστροφέα ή στον ίδιο ανιχνευτή MPPT θα συνδεθούν εκείνες οι στοιχειοσειρές που έχουν μεταξύ τους την μικρότερη απόκλιση στην τιμή της ηλεκτρικής τάσης τους.

Στον πίνακα 2.2 δίνονται 42 φωτοβολταϊκά πάνελ με τα αντίστοιχα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους. Τα πάνελ αυτά θα πρέπει να κατανεμηθούν σε 3 αντιστροφείς, όπου ο καθένας έχει δύο στοιχειοσειρές των 7 πάνελ η καθεμία. Στην συνέχεια στον πίνακα 2.3 δίνεται η κατανομή των πάνελ ανά στοιχειοσειρά, ακολουθώντας την παραπάνω λογική βελτιστοποίησης.

S/N	Actual Power (Watts)	Vmp (Volts)	Imp (Amp.)	Voc (Volts)	Isc (Amp.)
G51P01730012	321.50	54.70	5.88	65.48	6.25
G51P01730014	323.53	54.68	5.92	65.29	6.23
G51P01729939	325.82	54.94	5.93	65.41	6.27
G51P01729936	324.30	54.92	5.90	65.22	6.23
G51P01729937	323.21	54.91	5.89	65.19	6.22
G51P01729938	323.30	54.79	5.90	65.20	6.21
G51P01729940	323.43	55.19	5.86	65.40	6.22
G51P01729944	325.28	54.80	5.94	65.38	6.24

G51P01729942	324.09	54.80	5.91	65.38	6.24
G51P01729943	322.97	54.82	5.89	65.34	6.22
G51P01730124	325.31	55.17	5.90	65.40	6.24
G51P01730018	325.48	55.23	5.89	65.42	6.24
G51P01729941	324.80	55.16	5.89	65.49	6.23
G51P01729946	325.55	55.22	5.90	65.41	6.24
G51P01730325	321.09	54.80	5.86	65.41	6.25
G51P01730016	318.83	54.83	5.81	65.33	6.26
G51P01730015	319.50	54.82	5.83	65.23	6.23
G51P01729945	321.78	54.87	5.86	65.37	6.27
G51P01730017	320.48	54.81	5.85	65.28	6.24
G51P01729931	325.93	54.78	5.95	65.32	6.37
G51P01729934	320.45	54.78	5.85	65.14	6.35
G51P01730005	324.29	54.80	5.92	65.22	6.36
G51P01730007	322.41	54.77	5.89	65.21	6.36
G51P01729927	325.82	54.77	5.95	65.31	6.36
G51P01730004	324.69	54.77	5.93	65.27	6.36
G51P01729928	325.64	54.81	5.94	65.33	6.36
G51P01729929	325.64	54.82	5.94	65.32	6.36
G51P01729930	326.52	54.84	5.95	65.36	6.35
G51P01730484	324.97	54.82	5.93	65.33	6.37
G51P01729446	325.17	54.83	5.93	65.24	6.38
G51P01730483	324.29	54.81	5.92	65.30	6.35
G51P01730485	324.79	54.80	5.93	65.29	6.38
G51P01730482	325.53	54.82	5.94	65.31	6.35
G51P01730486	325.36	54.82	5.93	65.34	6.37
G51P01729449	323.21	54.82	5.90	65.28	6.38
G51P01729444	321.77	54.82	5.87	65.28	6.34
G51P01730326	323.00	54.86	5.89	65.42	6.39
G51P01729447	325.58	54.78	5.94	65.30	6.39
G51P01730328	322.14	54.78	5.88	65.31	6.37
G51P01730327	326.06	54.83	5.95	65.38	6.39
G51P01729921	325.50	54.83	5.94	65.24	6.25
G51P01730317	324.71	54.84	5.92	65.34	6.37

Πίνακας 2.2: Flash Report 42 πάνελ ισχύος 318W, της εταιρίας Sunpower

A/A Στοιχειοσειράς	S/N	Actual Power (Watts)	Vmp (Volts)	Imp (Amp.)	Voc (Volts)	Isc (Amp.)
1	G51P01730016	318.83	54.83	5.81	65.33	6.26
	G51P01730015	319.50	54.82	5.83	65.23	6.23
	G51P01730017	320.48	54.81	5.85	65.28	6.24
	G51P01729934	320.45	54.78	5.85	65.14	6.35
	G51P01730325	321.09	54.80	5.86	65.41	6.25
	G51P01729940	323.43	55.19	5.86	65.40	6.22
	G51P01729945	321.78	54.87	5.86	65.37	6.27
Τάση στοιχειοσειράς:			384.10			
Διακύμανση % Ρεύματος Imp _{pp} :				0.87		
2	G51P01729444	321.77	54.82	5.87	65.28	6.34
	G51P01730012	321.50	54.70	5.88	65.48	6.25
	G51P01730328	322.14	54.78	5.88	65.31	6.37
	G51P01729937	323.21	54.91	5.89	65.19	6.22
	G51P01730007	322.41	54.77	5.89	65.21	6.36
	G51P01730326	323.00	54.86	5.89	65.42	6.39
	G51P01729941	324.80	55.16	5.89	65.49	6.23
Τάση στοιχειοσειράς:			384.01			
Διακύμανση % Ρεύματος Imp _{pp} :				0.32		
3	G51P01729943	322.97	54.82	5.89	65.34	6.22
	G51P01730018	325.48	55.23	5.89	65.42	6.24
	G51P01729946	325.55	55.22	5.90	65.41	6.24
	G51P01729449	323.21	54.82	5.90	65.28	6.38
	G51P01730124	325.31	55.17	5.90	65.40	6.24
	G51P01729938	323.30	54.79	5.90	65.20	6.21
	G51P01729936	324.30	54.92	5.90	65.22	6.23
Τάση στοιχειοσειράς:			384.97			
Διακύμανση %				0.22		

Ρεύματος Impp:						
4	G51P01729942	324.09	54.80	5.91	65.38	6.24
	G51P01730014	323.53	54.68	5.92	65.29	6.23
	G51P01730483	324.29	54.81	5.92	65.30	6.35
	G51P01730005	324.29	54.80	5.92	65.22	6.36
	G51P01730317	324.71	54.84	5.92	65.34	6.37
	G51P01730485	324.79	54.80	5.93	65.29	6.38
	G51P01730004	324.69	54.77	5.93	65.27	6.36
Τάση στοιχειοσειράς:			383.51			
Διακύμανση % Ρεύματος Impp:				0.23		
5	G51P01730484	324.97	54.82	5.93	65.33	6.37
	G51P01729446	325.17	54.83	5.93	65.24	6.38
	G51P01729939	325.82	54.94	5.93	65.41	6.27
	G51P01730486	325.36	54.82	5.93	65.34	6.37
	G51P01729944	325.28	54.80	5.94	65.38	6.24
	G51P01729921	325.50	54.83	5.94	65.24	6.25
	G51P01730482	325.53	54.82	5.94	65.31	6.35
Τάση στοιχειοσειράς:			383.87			
Διακύμανση % Ρεύματος Impp:				0.17		
6	G51P01729929	325.64	54.82	5.94	65.32	6.36
	G51P01729928	325.64	54.81	5.94	65.33	6.36
	G51P01729447	325.58	54.78	5.94	65.30	6.39
	G51P01730327	326.06	54.83	5.95	65.38	6.39
	G51P01729927	325.82	54.77	5.95	65.31	6.36
	G51P01729931	325.93	54.78	5.95	65.32	6.37
	G51P01729930	326.52	54.84	5.95	65.36	6.35
Τάση στοιχειοσειράς:			383.65			
Διακύμανση % Ρεύματος Impp:				0.23		

Πίνακας 2.3: Κατανομή πάνελ του πίνακα 2.2 ανά στοιχειοσειρά

Σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα 2.3, η κατανομή των ΦΒ στοιχειοσειρών στους αντιστροφείς θα γίνει σύμφωνα με τον πίνακα 2.4.

Αντιστροφήας	Στοιχειοσειρές / Αντιστροφήα
I1	1,2
I2	3,4
I3	5,6

Πίνακας 2.4: Κατανομή στοιχειοσειρών ανά αντιστροφήα

Σύμφωνα με το lingo η παραπάνω heuristic λύση του πίνακα 2.3 αντιστοιχεί σε συνολική ισχύ Φ/Β πάρκου 13605,75W. Θεωρώντας δύο τυχαίες λύσεις προέκυψαν στο lingo οι αντίστοιχες ισχύς 13602.54W και 13602.77W, δηλαδή μία απόκλιση της τάξης του μόλις 0.022%.

2.6 Παράγοντες επίδρασης στην αντικειμενική συνάρτηση

Κατά την ανάλυση τους ευρετικού αλγορίθμου μορφοποίησης, μελετήσαμε την επίδραση της διαφοροποίησης των τιμών του ρεύματος I_{mprr} των πάνελ που συνδέονται σε μία στοιχειοσειρά.

Οι παράγοντες που επιδρούν στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι η διασπορά του ρεύματος I_{mprr} που συνδέονται σε μία στοιχειοσειρά, καθώς και το εύρος των τιμών I_{mprr} των πάνελ που συνδέονται σε αυτή.

Θεωρώντας ότι έχουμε ένα μόνο αντιστροφήα, καθώς και μία μόνο στοιχειοσειρά μελετάμε την επίδραση που έχουν οι παραπάνω παράγοντες στην θεωρητική μέγιστη ισχύ των πάνελ που συνδέονται στην στοιχειοσειρά αυτή, δηλαδή στο άθροισμα των ισχύων MPP των επιμέρους πάνελ.

Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν τα πάνελ του πίνακα 2.5, τα οποία έχουν κοινό χαρακτηριστικό την ίδια τιμή ρεύματος I_{mprr} . Η τιμή της ισχύς της στοιχειοσειράς υπολογίστηκε 3325.13W, ενώ η αθροιστική τιμή της ισχύος P_{mprr} των πάνελ είναι 3324.85W, δηλαδή προέκυψε διαφορά ισχύος +0.008% μεταξύ της αναμένουσας ισχύος και

της πραγματικής ισχύος. Η αναμενόμενη διαφορά αυτών των δύο τιμών είναι μηδέν, εφόσον η τιμή του ρεύματος των πάνελ που συνδέονται στην στοιχειοσειρά είναι ίδια και κατά συνέπεια δεν αλλάζει το MPP σημείο κάθε πάνελ. Η διαφορά που προκύπτει έγκειται στο ποσοστό απώλειας ακρίβειας που προκύπτει από το αποτελεσματικό μοντέλο προσομοίωσης της χαρακτηριστικής I-V.

p	Isc	Voc	Impp	Vmpp	Pmpp
1	8.3250	36.1630	7.720	28.66	221.26
2	8.2919	36.2800	7.720	28.97	223.65
4	8.2850	36.0000	7.720	28.59	220.71
3	8.3297	36.2100	7.720	28.69	221.49
5	8.2850	36.0000	7.720	28.59	220.71
7	8.2850	36.0000	7.720	28.59	220.71
6	8.3453	36.1280	7.720	28.85	222.72
8	8.2841	36.4220	7.720	28.73	221.80
9	8.4003	36.4000	7.720	28.95	223.49
10	8.3317	36.0800	7.720	28.50	220.02
11	8.3453	36.1280	7.720	28.85	222.72
12	8.3250	36.1630	7.720	28.66	221.26
13	8.3858	36.1690	7.720	28.76	222.03
14	8.2886	36.2200	7.720	28.70	221.56
15	8.2850	36.0000	7.720	28.59	220.71

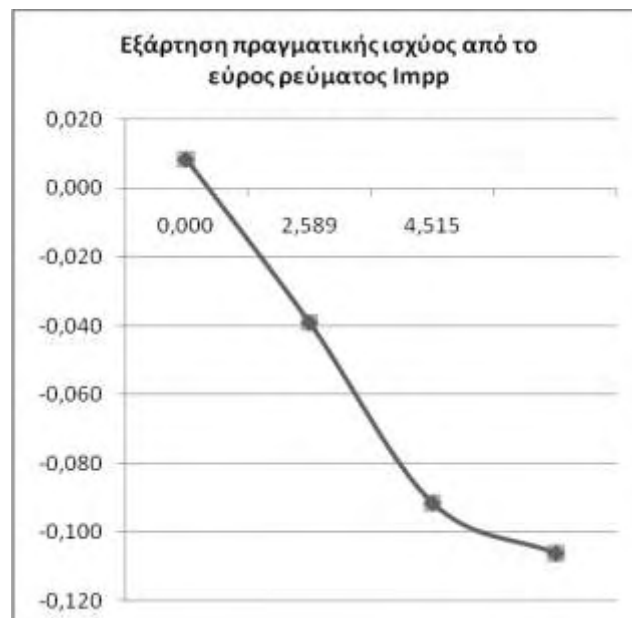
Πίνακας 2.5: 15 πάνελ στοιχειοσειράς ίδιου ρεύματος Impp

Στον πίνακα 2.6 δίνονται τρεις ομάδες δεδομένων. Τα πάνελ σε κάθε μία από τις ομάδες αυτές επιλέχθηκαν έτσι ώστε η συνολική ισχύς των ομάδων να είναι όσο το δυνατόν όμοια μεταξύ τους, ενώ το εύρος τιμών του ρεύματος Impp να είναι μεταβλητό.

p	Impp	Vmpp	Pmpp	p	Impp	Vmpp	Pmpp	p	Impp	Vmpp	Pmpp
1	7.57	29.16	220.80	1	7.67	28.73	220.36	1	7.704	28.684	220.982
2	7.63	29.037	221.44	2	7.53	29.30	220.63	2	7.706	28.797	221.910
4	7.66	28.854	220.99	4	7.59	29.04	220.41	4	7.707	28.716	221.314

3	7.73	29.044	224.63	3	7.77	28.533	221.79	3	7.694	28.795	221.549
5	7.74	28.603	221.24	5	7.61	28.961	220.54	5	7.737	28.617	221.410
7	7.76	28.548	221.68	7	7.63	29.037	221.44	7	7.686	28.669	220.350
6	7.77	28.648	222.48	6	7.60	29.21	222.00	6	7.896	28.500	225.050
8	7.59	29.33	222.61	8	7.61	29.47	224.27	8	7.67	28.814	221.032
9	7.68	28.672	220.23	9	7.78	28.468	221.62	9	8.09	27.696	224.178
10	7.76	28.518	221.36	10	7.87	28.41	223.59	10	7.708	28.784	221.867
11	7.65	28.989	221.77	11	7.80	28.526	222.65	11	7.615	28.961	220.538
12	7.66	28.783	220.48	12	7.81	28.528	222.69	12	7.626	29.037	221.436
13	7.66	28.860	221.10	13	7.68	28.72	220.57	13	7.659	28.854	220.993
14	7.67	28.806	221.00	14	7.67	28.81	220.97	14	7.659	28.841	220.893
15	7.61	29.30	222.97	15	7.70	28.73	221.221	15	7.661	28.880	221.250
Ptotal:			3324.77	Ptotal:			3324.73	Ptotal:			3324.75
100*(Impp_max- Impp_min)/Impp_min:			2.589	100*(Impp_max- Impp_min)/Impp_min:			4.515	100*(Impp_max- Impp_min)/Impp_min:			6.292
100*(Ptotal- Pbest)/Ptotal:			-0.046	100*(Ptotal- Pbest)/Ptotal:			-0.097	100*(Ptotal- Pbest)/Ptotal:			-0.148

Πίνακας 2.6: Ομάδες πάνελ ίδιας ισχύος και μεταβλητού εύρους Impp



Σχήμα 2.2: Εξάρτηση πραγματικής ισχύος από το εύρος τιμών του ρεύματος Impp

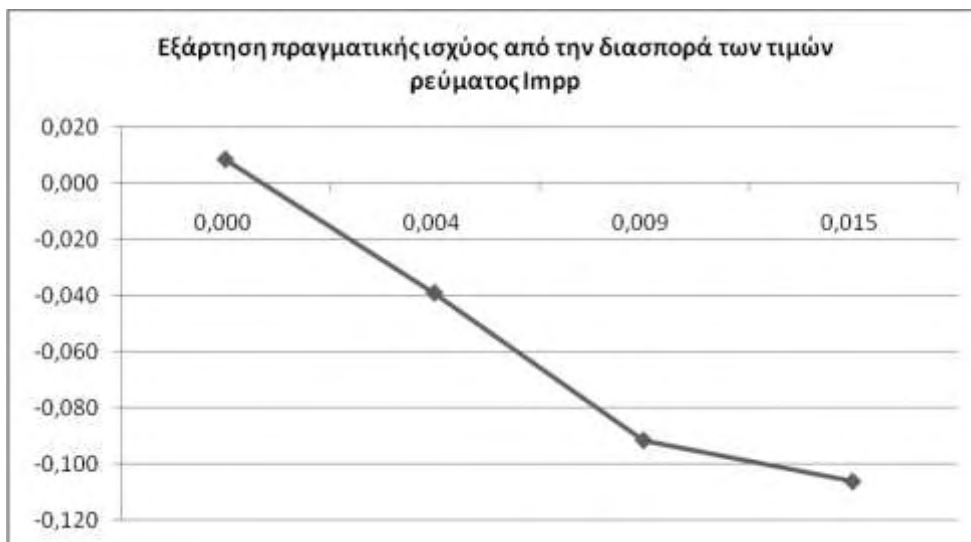
Από τα αποτελέσματα του πίνακα 2.6 παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται το εύρος του ρεύματος I_{mpp} αυξάνεται και η μείωση της πραγματικής ωφέλιμης ισχύος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2.

Ένας άλλος παράγοντας που επιδρά στην πραγματική ισχύ μίας στοιχειοσειράς πάνελ είναι η διασπορά των τιμών του ρεύματος I_{mpp} . Στον πίνακα 2.7 δίνονται οι ομάδες πάνελ και οι αντίστοιχες τιμές πραγματικής ισχύος αναλόγως της διασποράς των τιμών του ρεύματος I_{mpp} .

ρ	I_{mpp}	V_{mpp}	P_{mpp}	ρ	I_{mpp}	V_{mpp}	P_{mpp}	ρ	I_{mpp}	V_{mpp}	P_{mpp}
1	7.57	29.16	220.80	1	7.67	28.73	220.36	1	7.704	28.684	220.982
2	7.63	29.037	221.44	2	7.53	29.30	220.63	2	7.706	28.797	221.910
4	7.66	28.854	220.99	4	7.59	29.04	220.41	4	7.707	28.716	221.314
3	7.73	29.044	224.63	3	7.77	28.533	221.79	3	7.694	28.795	221.549
5	7.74	28.603	221.24	5	7.61	28.961	220.54	5	7.737	28.617	221.410
7	7.76	28.548	221.68	7	7.63	29.037	221.44	7	7.686	28.669	220.350
6	7.77	28.648	222.48	6	7.60	29.21	222.00	6	7.896	28.500	225.050
8	7.59	29.33	222.61	8	7.61	29.47	224.27	8	7.67	28.814	221.032
9	7.68	28.672	220.23	9	7.78	28.468	221.62	9	8.09	27.696	224.178
10	7.76	28.518	221.36	10	7.87	28.41	223.59	10	7.708	28.784	221.867
11	7.65	28.989	221.77	11	7.80	28.526	222.65	11	7.615	28.961	220.538
12	7.66	28.783	220.48	12	7.81	28.528	222.69	12	7.626	29.037	221.436
13	7.66	28.860	221.10	13	7.68	28.72	220.57	13	7.659	28.854	220.993
14	7.67	28.806	221.00	14	7.67	28.81	220.97	14	7.659	28.841	220.893
15	7.61	29.30	222.97	15	7.70	28.73	221.221	15	7.661	28.880	221.250
Ptotal:			3324.77	Ptotal:			3324.73	Ptotal:			3324.75
Διασπορά (σ^2)			0.004	Διασπορά (σ^2)			0.009	Διασπορά (σ^2)			0.015
100*(Ptotal-Pbest)/Ptotal:			-0.039	100*(Ptotal-Pbest)/Ptotal:			-0.092	100*(Ptotal-Pbest)/Ptotal:			-0.106

Πίνακας 2.7: Ομάδες πάνελ ίδιας ισχύος και μεταβλητής διασποράς ρεύματος I_{mpp}

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 2.7 παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται η διασπορά του ρεύματος I_{mprr} αυξάνεται και η μείωση της πραγματικής ωφέλιμης ισχύος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Εξάρτηση πραγματικής ισχύος από την διασπορά ρεύματος I_{mprr}

Παρατηρείται ότι τόσο η καμπύλη του σχήματος 2.2 όσο και η καμπύλη του σχήματος 2.3 που προκύπτει δεν είναι γραμμικές. Αυτό συμβαίνει επειδή επίδραση στην πραγματική ισχύ έχει και το εύρος των τιμών του ρεύματος I_{mprr} αλλά και η διασπορών αυτών. Η μεταξύ τους σχέση είναι αυτή που καθορίζει την τελική επίπτωση στην πραγματική ισχύ της στοιχειοσειράς.

Στην συνέχεια μελετήσαμε την επίδραση που έχει η διαφορά τάσης δύο στοιχειοσειρών που συνδέονται σε ένα σύστημα ανίχνευσης MPPT. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν τα πάνελ του πίνακα 2.8. Η επιλογή των πάνελ έγινε με κριτήριο το ρεύμα I_{mprr} , έτσι ώστε η επίδρασή του στον υπολογισμό της πραγματικής ισχύος να είναι μηδαμινή.

Θεωρώντας ότι σε ένα αντιστροφέα συνδέονται δύο στοιχειοσειρές με όμοιες ομάδες πάνελ, υπολογίστηκε η ιδεατή ισχύς σε 6650.26W. Εφόσον δεν υπάρχει μεταβλητότητα στις τιμές ρεύματος των πάνελ που συνδέονται σε μία στοιχειοσειρά καθώς επίσης και στην τάση μεταξύ των δύο στοιχειοσειρών η ισχύς των δύο στοιχειοσειρών ισούται με το άθροισμα των επιμέρους P_{mprr} όλων των πάνελ, η οποία υπολογίζεται σε 6649.70W. Η διαφορά μεταξύ των

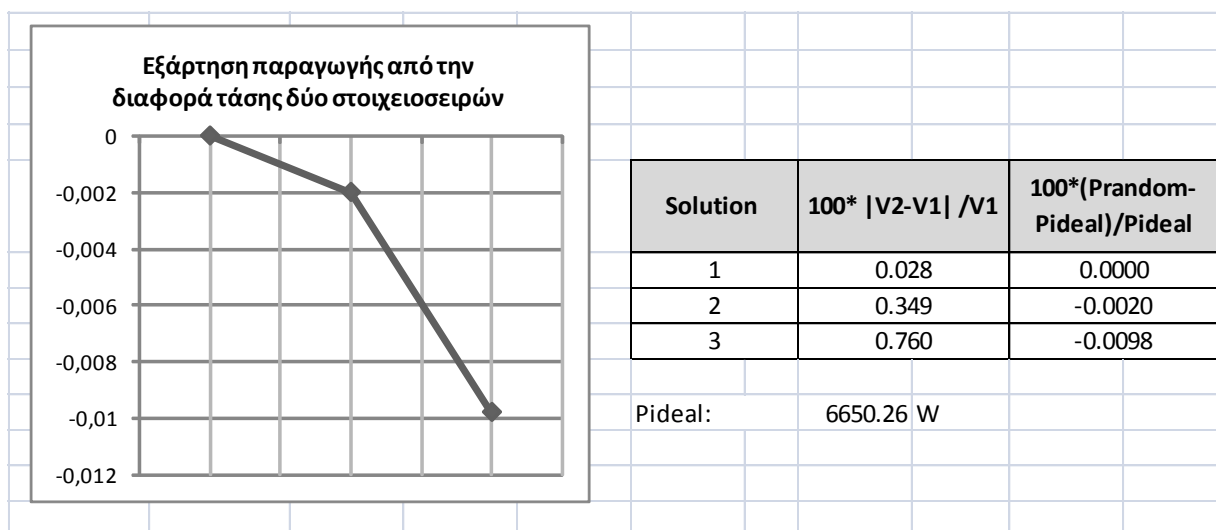
δύο αυτών τιμών έγκειται, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στο ποσοστό απώλειας ακρίβειας που προκύπτει από το αποτελεσματικό μοντέλο προσομοίωσης της χαρακτηριστικής I-V.

Τα αποτελέσματα τριών τυχαίων συνδυασμών των πάνελ συνοψίζονται στην εικόνα 2.2, όπου δίνεται η ποσοστιαία διαφορά τάσης μεταξύ των δύο στοιχειοσειρών και η αντίστοιχη απόκλιση της παραγωγής από την ιδεατή, όπως υπολογίστηκε στο Lingo. Ειδικά για τον τρίτο συνδυασμό πάνελ σημειώνεται ότι η κατανομή των πάνελ στις δύο στοιχειοσειρές έγινε έτσι ώστε η διαφορά των τάσεων τους να είναι η μέγιστη δυνατή.

p	Isc	Voc	Impp	Vmpp	Pmpp
1	8.3250	36.1630	7.720	28.660	221.26
2	8.2919	36.2800	7.720	28.970	223.65
4	8.2850	36.0000	7.720	28.590	220.71
3	8.3297	36.2100	7.720	28.690	221.49
5	8.2850	36.0000	7.720	28.590	220.71
7	8.2850	36.0000	7.720	28.590	220.71
6	8.3453	36.1280	7.720	28.850	222.72
8	8.2841	36.4220	7.720	28.730	221.80
9	8.4003	36.4000	7.720	28.950	223.49
10	8.3317	36.0800	7.720	28.500	220.02
11	8.3453	36.1280	7.720	28.850	222.72
12	8.3250	36.1630	7.720	28.660	221.26
13	8.3858	36.1690	7.720	28.760	222.03
14	8.2886	36.2200	7.720	28.700	221.56
15	8.2850	36.0000	7.720	28.590	220.71
16	8.3250	36.1630	7.720	28.660	221.26
17	8.2919	36.2800	7.720	28.970	223.65
18	8.2850	36.0000	7.720	28.590	220.71
19	8.3297	36.2100	7.720	28.690	221.49
20	8.2850	36.0000	7.720	28.590	220.71
21	8.2850	36.0000	7.720	28.590	220.71
22	8.3453	36.1280	7.720	28.850	222.72
23	8.2841	36.4220	7.720	28.730	221.80
24	8.4003	36.4000	7.720	28.950	223.49

25	8.3317	36.0800	7.720	28.500	220.02
26	8.3453	36.1280	7.720	28.850	222.72
27	8.3250	36.1630	7.720	28.660	221.26
28	8.3858	36.1690	7.720	28.760	222.03
29	8.2886	36.2200	7.720	28.700	221.56
30	8.2850	36.0000	7.720	28.590	220.71

Πίνακας 2.8: Πάνελ για τον υπολογισμό της επίδρασης της διαφοράς τάσης μεταξύ των στοιχειοσειρών στην πραγματική ισχύ



Εικόνα 2.2: Αποτελέσματα υπολογισμών επίδρασης της διαφοράς τάσης των στοιχειοσειρών ενός MPPT

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που δίνονται στην εικόνα 2.2 παρατηρείται ότι η επίδραση της διαφοράς τάσης μεταξύ των στοιχειοσειρών που συνδέονται σε ένα MPPT είναι λιγότερη από αυτή της διασποράς και του εύρους του ρεύματος I_{mprr} των πάνελ που συνδέονται στην εκάστοτε στοιχειοσειρά.

Κεφάλαιο 3 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό υπολογίζουμε και παραθέτουμε παραδείγματα υπολογισμών για τρία μεγέθη Φ/Β πάρκων, προκειμένου να διεξαχθούν τα απαραίτητα συμπεράσματα. Λόγω του ότι ο υπολογιστικός χρόνος εκτέλεσης της μορφοποίησης στο λογισμικό Lingo είναι πολύ μεγάλος, σε καθένα από τα παρακάτω παραδείγματα παραθέτονται αποτελέσματα της heuristic λύσης, καθώς και τυχαίων λύσεων, εκτός από το παράδειγμα 1 που αντιστοιχεί σε πολύ μικρού μεγέθους πρόβλημα, για το οποίο είναι εφικτή η εύρεση της ολικής βέλτιστης λύσης.

3.1 Αριθμητικό Παράδειγμα 1

Αρχικά χρησιμοποιήσαμε τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μόλις 8 Φ/Β πάνελ. Στην καθημερινότητα δεν μπορεί να υπάρξει Φ/Β πάρκο αυτού του αριθμού πάνελ, αλλά για αυτό το μέγεθος προβλήματος είναι εφικτός ο υπολογισμός μίας ολοκληρωμένης λύσης, η οποία αποτελείται από τον υπολογισμό της ολικά βέλτιστης λύσης, της ολικά βέλτιστης λύσης, της ευρετικής λύσης αλλά και τυχαίας λύσης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1.

Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά Φ/Β Πάνελ				
p	Isc	Voc	Impp	Vmpp
1	8.32	36.35	7.65	29.02
2	8.36	36.33	7.71	28.62
3	8.32	36.22	7.61	29.02
4	8.30	36.44	7.66	29.02
5	8.33	36.37	7.66	29.02
6	8.29	36.33	7.65	29.02
7	8.42	36.08	7.69	28.67
8	8.33	36.55	7.72	29.08
	Ολικά Βέλτιστη Λύση	Τοπικά Βέλτιστη Λύση	Heuristic Λύση	Τυχαία Λύση
Ισχύς Σταθμού (W)	1774.81	1774.81	1774.81	1774.53

Πίνακας 3.1: Σύνοψη αποτελεσμάτων επεξεργασίας 8 Φ/Β πάνελ

Τα 8 πάνελ κατανέμονται σε δύο αντιστροφείς, σε καθένα από τους οποίους συνδέονται δύο στοιχειοσειρές των δύο πάνελ η καθεμία.

Σημειώνεται ότι το πρόγραμμα Lingo υπολόγισε την ολικά βέλτιστη λύση για αυτό το μέγεθος προβλήματος μετά από μία ώρα.

3.2 Αριθμητικό Παράδειγμα 2

Χρησιμοποιήσαμε τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά 45 Φ/Β πάνελ ονομαστικής ισχύος 220W το καθένα. Μία τέτοια ποσότητα Φ/Β πάνελ θα μπορούσε να αντιστοιχεί σε ένα οικιακό Φ/Β πάρκο ισχύος 9.9kW.

Με βάση τα flash report του κατασκευαστή η ισχύς αυτών των πάνελ ισούται με 10415.07W. Τα 45 πάνελ ισομοιράζονται σε τρεις στοιχειοσειρές των 15 πάνελ η καθεμία, ενώ και οι τρεις στοιχειοσειρές συνδέονται παράλληλα σε έναν αντιστροφέα.

	Heuristic Λύση	Τυχαία Λύση 1	Τυχαία Λύση 2	Τυχαία Λύση 3
Διακύμανση ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 1 (%)	0.0127	0.0219	0.0258	0.0175
Διακύμανση ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 2 (%)	0.0002	0.0133	0.0042	0.0205
Διακύμανση ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 3 (%)	0.0013	0.0014	0.0146	0.0087
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 1 (%)	4.3068	6.4139	6.4139	6.1309
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 2 (%)	0.5135	4.1211	3.5510	5.9203
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 3 (%)	1.4110	1.4752	5.9278	4.2776
Ισχύς Σταθμού (W)	10419.76	10413.17	10409.02	10407.28

Πίνακας 3.2: Σύνοψη αποτελεσμάτων επεξεργασίας 45 Φ/Β πάνελ

Στον πίνακα 3.2 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των τεσσάρων προσομοιώσεων στο lingo. Σύμφωνα με αυτά παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται η διακύμανση των ρευμάτων I_{mprr} και το εύρος του ρεύματος I_{mprr} των πάνελ που συνδέονται σε μία στοιχειοσειρά, τόσο αυξάνεται και η μείωση της επωφελούμενης ισχύος του Φ/Β πάρκου. Μεταξύ της τυχαίας λύσης 3 και της ευρετικής λύσης παρατηρείται μία μείωση ισχύος μόλις 0.12%.

Εφόσον δεν είναι δυνατή η εύρεση της βέλτιστης λύσης του πραγματικού προβλήματος με το λογισμικό Lingo, χαλαρώσαμε τους περιορισμούς του προβλήματος και αντικαταστήσαμε τις δυαδικές μεταβλητές απόφασης x_{isp} σε συνεχείς με εύρος τιμών [0,1]. Η λύση που πρόέκυψε ήταν 10430.25W, η οποία απέχει μόλις 10.5W από την ευρετική λύση.

3.3 Αριθμητικό Παράδειγμα 3

Στην συνέχεια χρησιμοποιήσαμε τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά 90 Φ/Β πάνελ ονομαστικής ισχύος 220W το καθένα, τα οποία αντιστοιχούν σε πάρκο της μικρότερης δυνατής ισχύος που συνηθίζεται να εγκαθίσταται σε αγροτεμάχιο, δηλαδή σε ονομαστική ισχύ 19,80kW.

Με βάση τα flash report του κατασκευαστή η ισχύς αυτών των πάνελ ισούται με W. Τα 90 πάνελ ισομοιράζονται σε τρεις αντιστροφείς. Σε κάθε αντιστροφή συνδέονται δύο στοιχειοσειρές, παράλληλα συνδεδεμένες μεταξύ τους, των 15 πάνελ η καθεμία.

Στον πίνακα 3.3 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των τεσσάρων προσομοιώσεων στο lingo. Σύμφωνα με αυτά παρατηρείται και πάλι ότι καθώς αυξάνεται η διακύμανση των ρευμάτων I_{mprr} και το εύρος του ρεύματος I_{mprr} των πάνελ που συνδέονται σε μία στοιχειοσειρά, τόσο αυξάνεται και η μείωση της επωφελούμενης ισχύος του Φ/Β πάρκου. Μεταξύ της τυχαίας λύσης 3 και της ευρετικής λύσης παρατηρείται μία μείωση ισχύος μόλις 0.05%

	Heuristic Λύση	Τυχαία Λύση 1	Τυχαία Λύση 2	Τυχαία Λύση 3
Διακύμανση ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 1 (%)	0.0018	0.0011	0.0047	0.0115
Διακύμανση ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 2 (%)	0.0068	0.0266	0.0306	0.0209
Διακύμανση ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 3 (%)	0.0002	0.0001	0.0017	0.0041
Διακύμανση ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 4 (%)	0.0002	0.0041	0.0032	0.0040
Διακύμανση ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 5 (%)	0.0001	0.0062	0.0034	0.0055
Διακύμανση ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 6 (%)	0.0063	0.0160	0.0222	0.0070
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 1 (%)	1.9920	1.3920	3.1254	6.0466
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 2 (%)	0.3906	0.6858	2.0235	3.1455
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 3 (%)	0.3906	0.6858	2.0235	3.1455
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 4 (%)	0.5681	3.4166	2.3540	3.0223
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 5 (%)	0.3851	4.7556	2.2947	3.7384
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 6 (%)	4.1348	8.1591	8.1591	4.1036
Ισχύς Σταθμού (W)	20060.53	20054.03	20050.64	20050.58

Πίνακας 3.3: Σύνοψη αποτελεσμάτων επεξεργασίας 90 Φ/B πάνελ

Εφόσον δεν είναι δυνατή η εύρεση της βέλτιστης λύσης του πραγματικού προβλήματος με το λογισμικό Lingo, όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα, χαλαρώσαμε τους περιορισμούς του προβλήματος και αντικαταστήσαμε τις δυαδικές μεταβλητές απόφασης x_{isp} σε συνεχείς με εύρος τιμών $[0,1]$. Η λύση που πρόέκυψε ήταν 20065.63W, η οποία απέχει μόλις 5.1W.

3.4 Αριθμητικό Παράδειγμα 4

Αυξήσαμε τον αριθμό των χρησιμοποιηθέντων πάνελ στα 120. Η ονομαστική ισχύς του πάρκου είναι 26400W. Τα 120 πάνελ ισομοιράζονται σε τέσσερις αντιστροφείς, σε κάθε από τον οποίο συνδέονται δύο στοιχειοσειρές, παράλληλα συνδεδεμένες μεταξύ τους, των 15 πάνελ η καθεμία.

Στον πίνακα 3.4 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των τριών προσομοιώσεων στο lingo. Σύμφωνα με αυτά παρατηρείται και πάλι ότι καθώς αυξάνεται η διακύμανση των ρευμάτων I_{mprr} και το εύρος του ρεύματος I_{mprr} των πάνελ που συνδέονται σε μία στοιχειοσειρά, τόσο αυξάνεται και η μείωση της επωφελούμενης ισχύος του Φ/Β πάρκου. Μεταξύ της τυχαίας λύσης 3 και της ευρετικής λύσης παρατηρείται μία μείωση ισχύος μόλις 0.03%.

	Heuristic Λύση	Τυχαία Λύση 1	Τυχαία Λύση 2	Τυχαία Λύση 3
Διακύμανση ρεύματος I_{mprr} Στοιχειοσειράς 1 (%)	0.0004	0.0023	0.0046	0.0006
Διακύμανση ρεύματος I_{mprr} Στοιχειοσειράς 2 (%)	0.0146	0.0242	0.0184	0.0277
Διακύμανση ρεύματος I_{mprr} Στοιχειοσειράς 3 (%)	0.0000	0.0035	0.0052	0.0006
Διακύμανση ρεύματος I_{mprr} Στοιχειοσειράς 4 (%)	0.0000	0.0027	0.0009	0.0015
Διακύμανση ρεύματος I_{mprr} Στοιχειοσειράς 5 (%)	0.0000	0.0013	0.0023	0.0011
Διακύμανση ρεύματος I_{mprr} Στοιχειοσειράς 6 (%)	0.0000	0.0024	0.0053	0.0017
Διακύμανση ρεύματος I_{mprr} Στοιχειοσειράς 7 (%)	0.0019	0.0049	0.0023	0.0049
Διακύμανση ρεύματος I_{mprr} Στοιχειοσειράς 8 (%)	0.0125	0.0094	0.0025	0.0179
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος I_{mprr} Στοιχειοσειράς 1 (%)	0.8000	2.2667	2.8986	1.0596
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος I_{mprr} Στοιχειοσειράς 2 (%)	0.2646	1.4570	2.9139	1.1905

Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 3 (%)	0.2646	1.4570	2.9139	1.1905
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 4 (%)	0.2632	2.6455	1.3210	1.7219
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 5 (%)	0.1312	1.7173	2.1164	1.8519
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 6 (%)	0.2621	2.2517	3.4667	1.7196
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 7 (%)	0.5229	2.7668	1.8543	2.5232
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 8 (%)	1.5605	3.1704	2.2667	4.1333
Ισχύς Σταθμού (W)	26798.43	26791.50	26791.10	26791.10

Πίνακας 3.4: Σύνοψη αποτελεσμάτων επεξεργασίας 120 Φ/Β πάνελ

Χαραλώνοντας τους περιορισμούς του προβλήματος και αντικαθιστώντας τις δυαδικές μεταβλητές απόφασης x_{isp} σε συνεχείς με εύρος τιμών $[0,1]$ υπολογίστηκε η ισχύς σε 26801.6W, η οποία απέχει μόλις 3.17W από την ευρετική λύση.

3.5 Αριθμητικό Παράδειγμα 5

Η επικρατέστερη ισχύς ενός εγκατεστημένου πάρκου στην Κρήτη είναι 80KW. Θεωρώντας και πάλι ότι η ονομαστική ισχύς ενός πάνελ είναι 220W, η ισχύς αυτή αντιστοιχεί σε 360 τεμάχια Χρησιμοποιώντας τα flash report των 360 αυτών τεμαχίων προέκυψαν τα αποτελέσματα του πίνακα 3.5.

	Heuristic Λύση	Τυχαία Λύση 1	Τυχαία Λύση 2	Τυχαία Λύση 3
Διακύμανση ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 1 (%)	0.0006	0.0082	0.0062	0.0042
Διακύμανση ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 2 (%)	0.0001	0.0013	0.0031	0.0047
Διακύμανση ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 3 (%)	0.0000	0.0009	0.0045	0.0026
Διακύμανση ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 4 (%)	0.0000	0.0024	0.0016	0.0047

Διακύμανση ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 5 (%)	0.0000	0.0022	0.0028	0.0029
Διακύμανση ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 6 (%)	0.0000	0.0018	0.0040	0.0026
Διακύμανση ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 7 (%)	0.0000	0.0016	0.0027	0.0036
Διακύμανση ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 8 (%)	0.0001	0.0153	0.0240	0.0277
Διακύμανση ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 9 (%)	0.0000	0.0041	0.0042	0.0045
Διακύμανση ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 10 (%)	0.0000	0.0024	0.0028	0.0010
Διακύμανση ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 11 (%)	0.0000	0.0011	0.0021	0.0017
Διακύμανση ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 12 (%)	0.0000	0.0028	0.0037	0.0057
Διακύμανση ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 13 (%)	0.0000	0.0019	0.0024	0.0037
Διακύμανση ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 14 (%)	0.0000	0.0014	0.0047	0.0049
Διακύμανση ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 15 (%)	0.0000	0.0020	0.0036	0.0058
Διακύμανση ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 16 (%)	0.0000	0.0010	0.0046	0.0042
Διακύμανση ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 17 (%)	0.0000	0.0006	0.0040	0.0076
Διακύμανση ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 18 (%)	0.0000	0.0015	0.0036	0.0026
Διακύμανση ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 19 (%)	0.0000	0.0039	0.0042	0.0017
Διακύμανση ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 20 (%)	0.0000	0.0060	0.0049	0.0031
Διακύμανση ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 21 (%)	0.0000	0.0019	0.0032	0.0015
Διακύμανση ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 22 (%)	0.0000	0.0008	0.0024	0.0037
Διακύμανση ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 23 (%)	0.0005	0.0070	0.0031	0.0022
Διακύμανση ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 24 (%)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 1 (%)	1.0667	4.9333	3.8564	3.3201
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 2 (%)	0.3958	1.4304	2.7704	2.9255
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 3 (%)	0.1314	1.5686	3.8259	2.2463
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Ιmpp Στοιχειοσειράς 4 (%)	0.2625	2.4902	1.7681	3.1704

Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 5 (%)	0.0000	2.5099	3.5857	2.7668
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 6 (%)	0.1309	2.2078	2.3513	2.1108
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 7 (%)	0.1307	1.9894	2.3407	3.1579
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 8 (%)	0.1305	1.1734	1.8277	2.5066
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 9 (%)	0.1304	3.0343	2.9216	3.1746
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 10 (%)	0.1302	2.5232	2.3715	1.5748
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 11 (%)	0.0000	1.5544	2.0893	2.1080
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 12 (%)	0.1300	2.3904	2.6316	3.8259
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 13 (%)	0.0934	2.2305	2.5099	2.4129
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 14 (%)	0.0958	1.6883	3.1621	3.7333
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 15 (%)	0.0419	2.0110	2.6307	3.4529
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 16 (%)	0.1295	1.4376	3.7333	2.7668
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 17 (%)	0.1294	1.1911	3.0423	4.3767
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 18 (%)	0.1292	1.9841	2.9101	2.1916
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 19 (%)	0.1196	1.6993	3.0423	2.4869
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 20 (%)	0.1107	2.4598	3.1662	2.2251
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 21 (%)	0.0730	3.2257	3.4483	2.2280
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 22 (%)	0.1901	1.8277	2.7632	2.0346
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 23 (%)	0.1284	1.3291	2.4967	2.4902
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος Impp Στοιχειοσειράς 24 (%)	0.8974	2.8422	2.8327	1.8507
Ισχύς Σταθμού (W)	80218.84	80190.00	80186.65	80185.70

Πίνακας 3.5: Σύνοψη αποτελεσμάτων επεξεργασίας 360 Φ/B πάνελ

Κεφάλαιο 4 Επίδραση κλιματολογικών συνθηκών

Οι υπολογισμοί που έγιναν μέχρι τώρα αφορούσαν τις πρότυπες συνθήκες STC, σύμφωνα με τις οποίες η ακτινοβολία είναι 1000W/m^2 , ενώ η θερμοκρασία του πάνελ είναι 25°C . Στην πραγματικότητα όμως οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι διαφορετικές. Στην ενότητα αυτή υπολογίζεται εκ νέου το περιθώριο βελτίωσης της παραγόμενης ισχύος για διάφορες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

4.1 Υπολογισμός χαρακτηριστικής I-V συναρτήσεως των κλιματολογικών παραγόντων

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των πάνελ, όπως η τάση ανοιχτού κυκλώματος, το ρεύμα βραχυκύκλωσης, η τάση MPP και το ρεύμα I_{mpp} εξαρτώνται τόσο από την προσπίπτουσα στο πάνελ ακτινοβολία όσο και από την θερμοκρασία που αποκτά το πάνελ. Η εξάρτηση αυτή για καθένα από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά υπολογίζεται σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις, ενώ για τις νέες τιμές η χαρακτηριστική I-V υπολογίζεται και πάλι από τις εξισώσεις 1.8 έως 1.13.

$$I_{sc} = I_{sc_{ref}} \cdot \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) + a_0 \cdot (\theta_{cell} - \theta_{cell_{ref}})$$

(4.1)

$$V_{oc} = V_{oc_{ref}} + \beta_0 \cdot (\theta_{cell} - \theta_{cell_{ref}}) + (I_{sc} - I_{sc_{ref}}) \cdot R_s$$

(4.2)

$$I_{mpp} = I_{mpp_{ref}} + a_0 \cdot \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \cdot \Delta\Theta + \left[\left(\frac{G}{G_{ref}} \right) - 1 \right] \cdot I_{sc_{ref}}$$

(4.3)

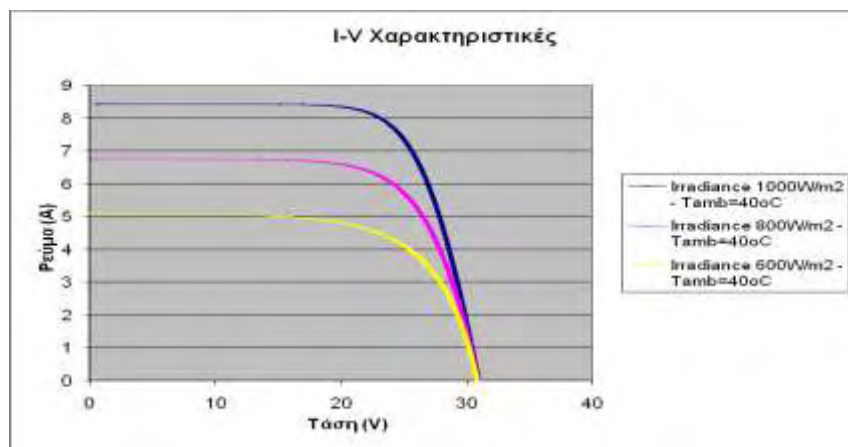
$$V_{mpp} = V_{mpp_{ref}} + \beta_0 \cdot (\theta_{cell} - \theta_{cell_{ref}}) + R_s \cdot \left(a_0 \cdot \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \cdot \Delta\Theta + \left[\left(\frac{G}{G_{ref}} \right) - 1 \right] \cdot I_{sc_{ref}} \right) \quad (4.4)$$

$$\theta_{cell} = T_{amb} + \frac{(T_{noct} - 20)}{800} \cdot G \quad (4.5)$$

Όπου:

- $I_{sc_{ref}}$, $V_{oc_{ref}}$, $V_{mpp_{ref}}$, $I_{mpp_{ref}}$ τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του πάνελ σε πρότυπες συνθήκες STC
- θ_{cell} η θερμοκρασία του πάνελ
- G η ακτινοβολία
- T_{noct} η θερμοκρασία του πάνελ για 20° C θερμοκρασία περιβάλλοντος και 800W/m² ακτινοβολία
- T_{amb} η θερμοκρασία περιβάλλοντος
- a_0 ο θερμοκρασιακός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης (A/°C)
- β_0 ο θερμοκρασιακός συντελεστής τάσης ανοιχτού κυκλώματος (V/°C)
- R_s η εν σειρά αντίσταση, της τάξης 0.5Ω

Στο σχήμα 4.1 δίνονται οι χαρακτηριστικές I-V ενός πάνελ για τρεις διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας και για θερμοκρασία πάνελ 40° C.



Σχήμα 4.1: Χαρακτηριστικές I-V για διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας

4.2 Υπολογισμός περιθωρίου βελτιστοποίησης ισχύος για διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες

Στο Κεφάλαιο 3 υπολογίσαμε το περιθώριο κέρδους της παραγόμενης ισχύος για διάφορα μεγέθη Φ/Β πάρκων θεωρώντας ότι η προσπίπτουσα ακτινοβολία στο πάνελ είναι 1000W/m^2 και η θερμοκρασία του πάνελ είναι 25°C . Λόγω του ότι οι συνθήκες αυτές είναι σχεδόν ανέφικτο να επιτευχθούν στην κανονική λειτουργία ενός Φ/Β σταθμού, υπολογίσαμε εκ νέου την παραγόμενη ισχύ του παραδείγματος 3 για προσπίπτουσα ακτινοβολία 900W/m^2 και θερμοκρασία περιβάλλοντος 40°C . Τα καινούρια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των 90 πάνελ υπολογίστηκαν με βάση τις εξισώσεις 4.1 έως 4.5. Στον Πίνακα 4.1 συνοψίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

	Heuristic Λύση	Τυχαία Λύση 1	Τυχαία Λύση 2	Τυχαία Λύση 3
Διακύμανση ρεύματος I_{mp} Στοιχειοσειράς 1 (%)	0.0016	0.0009	0.0043	0.0043
Διακύμανση ρεύματος I_{mp} Στοιχειοσειράς 2 (%)	44.2041	59.3446	29.6828	0.0281
Διακύμανση ρεύματος I_{mp} Στοιχειοσειράς 3 (%)	0.0001	0.0001	0.0016	0.0016
Διακύμανση ρεύματος I_{mp} Στοιχειοσειράς 4 (%)	0.0002	0.0038	0.0033	0.0033
Διακύμανση ρεύματος I_{mp} Στοιχειοσειράς 5 (%)	0.0001	0.0059	0.0029	0.0029
Διακύμανση ρεύματος I_{mp} Στοιχειοσειράς 6 (%)	0.0058	0.0146	0.0203	0.0203
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος I_{mp} Στοιχειοσειράς 1 (%)	2.0130	1.4265	3.1561	3.1561
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος I_{mp} Στοιχειοσειράς 2 (%)	0.5950	0.7520	2.1054	2.1054
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος I_{mp} Στοιχειοσειράς 3 (%)	0.5950	0.7520	2.1054	2.1054
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος I_{mp} Στοιχειοσειράς 4 (%)	0.6568	3.7559	2.6116	2.6116
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος I_{mp} Στοιχειοσειράς 5 (%)	0.4609	5.0302	2.3050	2.3050
Ποσοστιαίο εύρος ρεύματος I_{mp} Στοιχειοσειράς 6 (%)	4.3211	8.4265	8.4265	8.4265
Ισχύς Σταθμού (W)	14825.74	14820.63	14818.30	14818.30

Πίνακας 4.1: Σύνοψη αποτελεσμάτων επεξεργασίας 90 Φ/Β πάνελ για ακτινοβολία 900W/m^2 και θερμοκρασία περιβάλλοντος 40°C

Κεφάλαιο 5 Σύνοψη Μεταπτυχιακής Εργασίας

Στην μεταπτυχιακή αυτή εργασία μελετήσαμε και αναλύσαμε την επίπτωση που έχει η διαφοροποίηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των πάνελ και ο τυχαίος ή μη συνδυασμός αυτών στην ηλεκτρική συνδεσμολογία ενός πάρκου. Κατόπιν υπολογισμών που έγιναν σε παραδείγματα μικρού, μεσαίου και μεγάλου μεγέθους Φ/Β σταθμού προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1) Στον Πίνακα 5.1 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών παραδειγμάτων 2 έως 5. Σύμφωνα με τον Πίνακα αυτό και όσα μελετήσαμε έως τώρα το ποσοστό μείωσης της παραγόμενης ισχύος εξαρτάται τόσο από την διακύμανση όσο και από το εύρος των τιμών των ρευμάτων I_{mpP} των πάνελ. Παρατηρείται, ότι στο παράδειγμα 2 των 45 πάνελ, όπου η συνολική διασπορά και το εύρος τιμών ρεύματος ανά ποσότητα Φ/Β πάνελ έχουν τις υψηλότερες τιμές, η αντίστοιχη μείωση της πραγματικής ισχύος είναι και η μέγιστη. Μεταξύ των αποτελεσμάτων των αριθμητικών παραδειγμάτων 4 και 5, παρατηρείται ότι η τελική επίδραση της διασποράς και του εύρους τιμών στην μείωση της παραγωγής εξαρτάται τελικά από την μεταξύ τους σχετική σχέση. Στον Πίνακα 5.1 δίνονται επίσης οι αθροιστικές τιμές διασποράς και εύρους όλων των στοιχειοσειρών για καθένα παράδειγμα ξεχωριστά.

Αρ. Panel	Συνολική Διασπορά Τιμών	Συνολικό Εύρος Τιμών (%)	Συνολικό Εύρος Τιμών (%) / Πάνελ	$\Sigma (\sigma^2_{\text{random}})$	$\Sigma (\text{εύρος}_{\text{random}})$	$\Sigma (\sigma^2_{\text{random}}) / \text{Πάνελ}$	$\Sigma (\text{εύρος}_{\text{random}}) / \text{Πάνελ}$	Μείωση Ισχύος (%)
45	0.0164	6.4	0.142	0.047	16.320	0.00104	0.36267	0.12
90	0.0071	8.16	0.091	0.053	23.200	0.00059	0.25778	0.05
120	0.0036	4.13	0.034	0.056	15.390	0.00047	0.12825	0.049
360	0.0043	4.93	0.014	0.107	65.130	0.00030	0.18092	0.027

Πίνακας 5.1: Σύνοψη αποτελεσμάτων αριθμητικών παραδειγμάτων 2 έως 5

2) Όπως μελετήθηκε στο κεφάλαιο 2.6, η επίπτωση της διαφοράς τάσης των στοιχειοσειρών που συνδέονται παράλληλα σε ένα MPPT σύστημα ή αντιστροφέα είναι μικρότερη από αυτή του ρεύματος MPP. Για τον λόγο αυτό στους παραπάνω υπολογισμούς έχουν ληφθεί υπόψη μόνο οι επιπτώσεις της διασποράς και εύρους των τιμών του ρεύματος των πάνελ, χωρίς όμως αυτό να ακυρώνει την επίπτωση αυτής της διαφοράς τάσης των στοιχειοσειρών στην τελική τιμή της αντικειμενικής.

3) Στην τελευταία παράγραφο του κεφαλαίου 4 υπολογίστηκε ότι το περιθώριο κέρδους ισχύος ενός βέλτιστου συνδυασμού πάνελ από ένα τυχαίο συνδυασμό πάνελ δεν εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες του πάνελ. Το συμπέρασμα αυτό μας οδήγησε στον περιορισμό των υπολογισμών στις πρότυπες συνθήκες STC, στις οποίες είναι υπολογισμένα τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των πάνελ από τους κατασκευαστές.

4) Κατά την εκπόνηση της εργασίας, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Lingo. Παρόλο που το λογισμικό αυτό είναι κατάλληλο για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων, το μέγεθος των προβλημάτων που μπορεί να επιλύσει είναι αρκετά μικρό. Για προβλήματα μεγέθους που έχουν εφαρμογή στην πραγματικότητα, ο υπολογιστικός χρόνος προκύπτει απαγορευτικός. Για το λόγο αυτό θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο περαιτέρω εργασίας η ανάπτυξη κώδικα σε κάποια προγραμματιστική γλώσσα, με τον οποίο θα ήταν εφικτή η εύρεση της βέλτιστης λύσης για Φ/Β σταθμούς της τάξης του MW.

Βιβλιογραφία

- [1] Chiung-Chou Liao, “Genetic k-means algorithm based RBF network for photovoltaic MPP prediction”, *Energy* 35 (2010) 529-536
- [2] G. Notton, V. Lazarov, L. Stoyanov, “Optimal sizing of a grid-connected PV system for various PV module technologies and inclinations, inverter efficiency characteristics and locations”, *Renewable Energy* 35 (2010) 541-554
- [3] T. Tafticht, K. Agbossou, M.L. Doumbia, A. Cheriti, “An improved maximum power point tracking method for photovoltaic systems”, *Renewable Energy* (2008) 1508-1516
- [4] “Planning and Installing Photovoltaics Systems”, Earthscan 2006
- [5] Lingo 11 Users Manual
- [6] Francisco M. Gonzalez-Longatt, “Model of Photovoltaic Module in Matlab”, *II Cibelec 2005* 1-5
- [7] Αβραμίδης Γεώργιος, «Διερεύνηση της βέλτιστης ισχύος των inverter σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις στην Ελλάδα», ΑΠΘ, 2007
- [8] Αρχεία Flash Report της κατασκευαστικής εταιρίας Canadian Solar