



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

Διπλωματική Εργασία

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΟΙΧΙΩΝ
ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ**

ΤΕΠΕΛΙΔΗΣ ΑΒΡΑΑΜ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αναπληρωτής Καθηγητής Κουτρούλης Ευύχιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος

Καθηγητής Σταυρακάκης Γεώργιος

Χανιά Μάρτιος 2020

Πρόλογος

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κουτρούλη Ευτύχιο για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και για την πολύτιμη βοήθεια που μου πρόσφερε για την πραγμάτωση της. Επίσης την οικογένεια μου για την αμέριστη στήριξη όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
2. Φωτοβολταϊκά συστήματα.....	8
2.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία.....	8
2.2 Λειτουργία Φ/Β συστημάτων.....	12
3. Μέθοδοι αναδιάταξης Φ/Β συστοιχιών.....	17
3.1 Εισαγωγικά.....	17
3.2 Particle Swarm Optimization.....	18
3.2.1 Ανάλυση του PSO της εργασίας.....	21
3.3 Genetic Algorithm.....	26
3.3.1 Ανάλυση του GA της εργασίας.....	28
3.4 Differential Evolution.....	31
3.4.1 Ανάλυση της DE της εργασίας.....	31
4. Τεχνική ανάλυση υλοποίησης.....	35
5. Αποτελέσματα.....	41
6. Συμπεράσματα.....	89
7. Βιβλιογραφία.....	91

Κατάλογος Συμβόλων

W_p	Watt peak
I_L	ρεύμα Φ/Β πάνελ (A)
I_d	ρεύμα διόδου (A)
R_s	series resistance (Ω)
R_{sh}	shunt resistance (Ω)
$MPPT$	Ανίχνευση σημείου παραγωγής μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking)
I_{mp}	ρεύμα στο MPP (A)
V_{mp}	τάση στο MPP (V)
I_{sc}	ρεύμα βραχυκυκλώματος (A)
V_{oc}	τάση ανοικτοκυκλώματος (V)
GP	Global Peak (W)
C_1	κοινωνική σταθερά (social constant)
C_2	γνωστική σταθερά (cognitive constant)
W	βάρος αδράνειας (inertia weight)
PV	φωτοβολταϊκό
G_{best}	Global best
CR	πιθανότητα διασταύρωσης (crossover propability)
F	διαφορικό βάρος (differential weight)

1.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο σύγχρονο κόσμο που η ενέργεια γίνεται όλο και πιο ακριβή λόγω των περιβαλλοντικών τελών που επιβάλλονται στους ρύπους των συμβατικών τρόπων ηλεκτροπαραγωγής (λιγνίτης, γαιάνθρακας) στις ανεπτυγμένες χώρες, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) και ειδικότερα τα Φωτοβολταϊκά (Φ/Β) συστήματα, είναι πιο επίκαιρα από ποτέ. Η τάση που κυριαρχεί για «πράσινη» ανάπτυξη και μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των επιχειρήσεων, ευνοούν την ανάπτυξη των ΑΠΕ. Αλλά και σε επίπεδο κοινωνίας, λόγω υπερβολικής φορολόγησης και συνεχών αναπροσαρμογών στα τιμολόγια του ηλεκτρικού ρεύματος αλλά και της ανάπτυξης οικολογικής συνείδησης, παρατηρείται ένα ρεύμα προς τα ενεργειακά αυτόνομα κτίρια. Συνήθως ένα τέτοιο κτίριο εξοπλίζεται με ένα αυτόνομο σύστημα αποτελούμενο από φωτοβολταϊκά πάνελ, τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε συνεχές ρεύμα, καθώς και από συσσωρευτές που αποθηκεύουν την ηλεκτρική ενέργεια, ώστε να είναι διαθέσιμη σε 24ωρη βάση ανεξαρτήτως της στιγμιαίας ηλιοφάνειας. Επίσης, τα συστήματα αυτά διαθέτουν έναν έξυπνο διαχειριστή της παραγόμενης ενέργειας, ο οποίος διαχειρίζεται τη φόρτιση των συσσωρευτών, ώστε να μεγιστοποιείται η διαθέσιμη ενέργεια, καθώς και έναν αντιστροφέα

DC/AC (inverter), που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο για χρήση από συμβατικές οικιακές συσκευές. Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη προσομοίωση λειτουργίας μιας τέτοιας Φ/Β συστοιχίας και συγκεκριμένα με τη βελτιστοποίηση της εξαγωγής ισχύος της κάτω από συνθήκες μερικής σκίασης.

Μια φωτοβολταϊκή συστοιχία (PV array) αποτελείται από πάνελ (modules) διασυνδεδεμένα μεταξύ τους σε σειρά και παράλληλα. Αυτή η διάταξη κάτω από την επίδραση μερικής σκίασης δεν θα λειτουργεί στο μέγιστο των δυνατοτήτων της και θα εμφανίζει τοπικά μέγιστα στις καμπύλες ισχύος-τάσης (P-V). Έτσι, το άθροισμα των ρευμάτων των παράλληλων πάνελ της διάταξης, θα είναι διαφορετικό. Για να μεγιστοποιηθεί η εξαγωγή της ισχύος από τη διάταξη, πρέπει να ελαχιστοποιηθούν οι διαφορές αυτών των αθροισμάτων, και για να γίνει αυτό χρειάζεται αναδιάταξη των πάνελ της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Η παρούσα διπλωματική εργασία, δεν θα ασχοληθεί με τη φυσική αναδιάταξη των πάνελ αλλά με την ηλεκτρική αφήνοντας τα στην αρχική τους θέση στη διάταξη. Για να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση των αθροισμάτων, όπως ειπώθηκε παραπάνω, χρησιμοποιούνται 3 αλγόριθμοι βελτιστοποίησης: Particle Swarm Optimization (PSO), Genetic Algorithm (GA), Differential Evolution (DE). Ακολουθούν συγκρίσεις μεταξύ των αλγορίθμων σε διαφορετικά σενάρια σκίασης της διάταξης και με την βοήθεια των καμπύλων ισχύος-τάσης (P-V), ρεύματος-τάσης (I-V) και των σημείων παραγωγής μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point, MPP), προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα.

Η δομή της διπλωματικής εργασίας έχει ως εξής:

- Στο 2^ο Κεφάλαιο αναλύεται διεξοδικά η δομή των Φ/Β συστημάτων (τα επιμέρους μέρη που αποτελούνται), ο τρόπος λειτουργίας τους και η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από αυτά. Επίσης αναφέρονται οι τεχνολογίες των Φ/Β υλικών και η απόδοσή τους.

- Στο 3^ο Κεφάλαιο αναλύονται οι 3 μέθοδοι αναδιάταξης των Φ/Β συστοιχιών που εκτελέστηκαν στις προσομοιώσεις, οι Particle Swarm Optimization, Genetic Algorithm και Differential Evolution.
- Στο 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα τεχνικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των προσομοιώσεων των αλγορίθμων.
- Στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και συγκρίσεις μεταξύ των αλγορίθμων κάτω από διάφορα σενάρια σκίασης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.
- Στο 6^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν και ενδεχόμενες μελλοντικές επεκτάσεις της εργασίας αυτής.

2.

Φωτοβολταϊκά συστήματα



2.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία

Οι κλασικές πηγές ενέργειας, όπως το πετρέλαιο και ο γαιάνθρακας, έχουν υψηλό κόστος και προκαλούν σημαντική μόλυνση στο περιβάλλον. Οι περιβαλλοντολόγοι επισημαίνουν ότι αν δεν στραφούμε προς νέες μορφές ενέργειας, το κόστος για το περιβάλλον θα είναι καταστροφικό. Η αύξηση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, εξαιτίας των

εκπομπών CO₂, ευνοεί την ανάπτυξη των ΑΠΕ στα οποία το κόστος επένδυσης έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια καθιστώντας τα ανταγωνιστικά και αξιόπιστη εναλλακτική επιλογή. Στη συνέχεια αναλύεται διεξοδικά ένα κλάδος των ΑΠΕ, τα Φ/Β συστήματα.

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική με τη χρησιμοποίηση διατάξεων που αποτελούνται από φωτοβολταϊκά στοιχεία. Η φωτοβολταϊκή μετατροπή είναι η άμεση μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρικό ρεύμα χωρίς παρεμβολές κάποιας μηχανής θερμότητας. Οι φωτοβολταϊκές συσκευές είναι ανθεκτικές και απλές στο σχεδιασμό τους, δεν έχουν μεγάλες απαιτήσεις για τη συντήρησή τους και το μεγαλύτερο πλεονέκτημά τους είναι η κατασκευή και η χρήση τους ως αυτόνομα συστήματα που έχουν τη δυνατότητα παραγωγής ισχύος της τάξεως από μικροβάτ έως μεγαβάτ. Ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται ως πηγές ενέργειας σε ηλεκτρονικές συσκευές, σε έξυπνα διασυνδεδεμένα ηλιακά κτίρια, στις επικοινωνίες, στους δορυφόρους και στα διαστημικά οχήματα, και ακόμη και σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής μεγάλης κλίμακας. Με μια τόσο μεγάλη ποικιλία εφαρμογών, η ζήτηση για φωτοβολταϊκά στοιχεία αυξάνεται κάθε χρόνο. Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα παραγωγής ενέργειας αποτελείται από πολλαπλά εξαρτήματα όπως φωτοβολταϊκές κυψέλες, καθώς και μηχανικές και ηλεκτρικές συνδέσεις με τις βάσεις και τα μέσα ρύθμισης και τροποποίησης των ηλεκτρικών παραμέτρων εξόδου. Όλα τα ηλιακά κύτταρα απαιτούν ένα υλικό απορρόφησης φωτός που υπάρχει μέσα στη δομή των κυττάρων για να απορροφούν φωτόνια και να παράγουν ελεύθερα ηλεκτρόνια μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Το φωτοβολταϊκό (PV) φαινόμενο είναι η βάση της μετατροπής του φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια στα φωτοβολταϊκά (ή ηλιακά) κύτταρα. Το ηλιακό φως, το οποίο είναι καθαρή ενέργεια, όταν προσπίπτει σε ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο, μεταδίδει αρκετή ενέργεια σε κάποια ηλεκτρόνια (αρνητικά φορτισμένα ατομικά σωματίδια) για να αυξήσουν το ενεργειακό τους επίπεδο και έτσι να τα απελευθερώσει. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παράγεται μια τάση, η οποία με τη σειρά της

χρησιμοποιείται για την οδήγηση ενός ρεύματος στο κύκλωμα του τροφοδοτούμενου ηλεκτρικού φορτίου [1-5].

Το βασικό υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του 90% των βιομηχανικών Φ/Β στοιχείων είναι το πυρίτιο (Si). Η χρήση του δεν είναι τυχαία καθώς αποτελεί το δεύτερο σε αφθονία υλικό στη φύση μετά το οξυγόνο, είναι ιδιαίτερα φιλικό προς το περιβάλλον και το κόστος του είναι χαμηλό. Ένα άλλο πλεονέκτημα του πυριτίου είναι ότι από αυτό παράγονται Φ/Β στοιχεία με μεγάλες συγκριτικά αποδόσεις. Οι λόγοι που κάνουν το πυρίτιο θελκτικό τόσο στην τεχνολογία Φ/Β πάνελ όσο και στις υπόλοιπες μορφές ηλεκτρονικών στοιχείων είναι ότι δίνει τη δυνατότητα εύκολης μορφοποίησης, οι ιδιότητες του διατηρούνται σε υψηλές θερμοκρασίες και έτσι τα ηλεκτρονικά στοιχεία μπορούν να συνεχίσουν να λειτουργούν σε ιδιαίτερα δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Μια βασική κατηγορία Φ/Β στοιχείων πυριτίου είναι τα Φ/Β συστήματα πυριτίου μεγάλου πάχους που αναφέρονται στα Φ/Β στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (single crystalline), πολυκρυσταλλικού πυριτίου (polycrystalline) και τα στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon). Το πάχος των Φ/Β στοιχείων μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι γύρω στα 0.3 χιλιοστά και η απόδοσή τους στο εμπόριο κυμαίνεται από 15-18%, ενώ στο εργαστήριο η απόδοση μπορεί να αγγίξει και το 25%. Τα χαρακτηριστικά τους είναι το υψηλότερο κόστος παραγωγής και η καλύτερη σχέση απόδοσης/επιφάνειας ή ενεργειακής πυκνότητας. Το πάχος των Φ/Β στοιχείων πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι επίσης της τάξης των 0.3 χιλιοστών. Έχουν μικρότερο κόστος παραγωγής για αυτό και η τιμή τους είναι λίγο χαμηλότερη. Οπτικά είναι εμφανείς οι μονοκρυσταλλικές περιοχές και όσο μεγαλύτερες είναι αυτές τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση των πολυκρυσταλλικών Φ/Β στοιχείων. Στο εργαστήριο επιτυγχάνουν αποδόσεις της τάξεως του 20% ενώ στο εμπόριο επιτυγχάνουν αποδόσεις περίπου 13-15%. Τα Φ/Β στοιχεία ταινίας πυριτίου χρησιμοποιούν το 50% του πυριτίου για την κατασκευή τους σε σχέση με τις

δύο προηγούμενες τεχνολογίες, έχουν το ίδιο πάχος και οι εμπορικές τους αποδόσεις κυμαίνονται μεταξύ του 12-13% και στο εργαστήριο φτάνουν το 18%.

Μια άλλη κατηγορία είναι τα Φ/Β στοιχεία από υλικά λεπτών επιστρώσεων (thin film) όπως είναι ο δισηληνοϊνδιούχος χαλκός (CIS), τα στοιχεία άμορφου πυριτίου (a-Si), το τελλουριούχο κάδμιο (CdTe) και το αρσενιούχο γάλλιο (GaAs). Ο δισηληνοϊνδιούχος χαλκός έχει πολύ καλή απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως αλλά η απόδοσή του στα Φ/Β πάνελ δεν ξεπερνάει το 11%. Στα εργαστήρια η απόδοση αγγίζει το 19% και είναι η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των τεχνολογιών λεπτής επίστρωσης. Αν προστεθεί γάλλιο η απόδοση μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο αλλά το βασικότερο μειονέκτημα είναι ότι το ίνδιο υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στη φύση. Τα Φ/Β στοιχεία άμορφου πυριτίου έχουν χαμηλότερες αποδόσεις από τις άλλες κατηγορίες. Η κατασκευή τους βασίζεται στην εναπόθεση πυριτίου επάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης που μπορεί να είναι γυαλί ή αλουμίνιο. Η μειωμένη χρήση του πυριτίου καθιστά τη συγκεκριμένη τεχνολογία φθηνότερη. Ο χαρακτηρισμός «άμορφο» προέρχεται από τον τρόπο που είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου που είναι τυχαία. Οι αποδόσεις τους κυμαίνονται μεταξύ 6-8% και στο εργαστήριο μπορούν να φτάσουν το 14%. Τα πλεονεκτήματά τους είναι ότι δεν επηρεάζονται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες και όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία αξιοποιούν καλύτερα την απόδοση από τα κρυσταλλικά Φ/Β στοιχεία. Σε κανονικές συνθήκες για να επιτευχθεί η ίδια απόδοση χρειάζεται διπλάσια επιφάνεια. Το πάχος τους είναι περίπου 0.0001 χιλιοστά και το υπόστρωμα μπορεί να είναι 1 έως 3 χιλιοστά. Το τελλουριούχο κάδμιο έχει ενεργειακό διάκενο γύρω στο 1eV το οποίο δίνει σοβαρά πλεονεκτήματα όπως τη δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, όμως με τις σύγχρονες τεχνικές η απόδοση των πάνελ περιορίζεται στο 6-8% και σε εργαστηριακές εφαρμογές αγγίζει το 16%. Μειονέκτημα στη χρήση του είναι ότι το κάδμιο σύμφωνα με κάποιες έρευνες βρέθηκε ότι είναι καρκινογόνο και επίσης προβληματίζει η έλλειψη του τελλουρίου. Το γάλλιο είναι πολύ σπάνιο καθώς είναι ένα παραπροϊόν

ρευστοποίησης άλλων μετάλλων όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Το αρσενικό δεν είναι σπάνιο αλλά είναι δηλητηριώδες. Το αρσενιούχο γάλλιο έχει ενεργειακό διάκενο 1.43V πού είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοσή του είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29%. Τα Φ/Β πάνελ αυτού του τύπου είναι εξαιρετικά ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες και αντέχουν σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας, χαρακτηριστικά που τα καθιστούν ιδανικά για διαστημικές εφαρμογές. Ένα μεγάλο μειονέκτημα είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος.

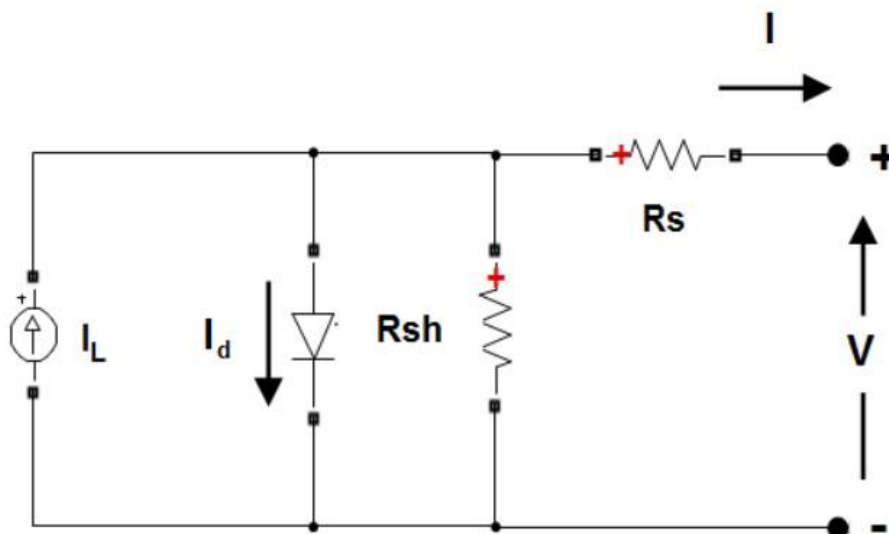
2.2 Λειτουργία Φ/Β συστημάτων

Τα χαρακτηριστικά που ξεχωρίζουν τα Φ/Β συστήματα από άλλες μορφές ΑΠΕ είναι η απευθείας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μπορούν να συνδυαστούν με άλλες μορφές ενέργειας, έχουν αθόρυβη λειτουργία και μηδενικές εκπομπές ρύπων, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και αξιοπιστία και παρέχουν πλήρη ενεργειακή αυτονομία.

Καθώς το ηλιακό φως προσπίπτει στα φωτοβολταϊκά στοιχεία, ελευθερώνει ηλεκτρικά φορτία στο εσωτερικό τους τα οποία με την ενέργεια που λαμβάνουν κινούνται ελεύθερα με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Η τάση όμως και η ισχύς των Φ/Β στοιχείων είναι πολύ μικρή για να ανταποκριθεί στην τροφοδότηση των συνηθισμένων ηλεκτρικών καταναλώσεων. Η τάση που αναπτύσσει ένα συνηθισμένο Φ/Β στοιχείο πυριτίου, σε κανονική ηλιακή ακτινοβολία, είναι μόλις 0.6 V περίπου και η ηλεκτρική ισχύς που παράγει είναι μόλις μερικά Watt. Για αυτό, τα Φ/Β στοιχεία (cells) τοποθετούνται, ανά 10 ως 60 περίπου, σε ένα πάνελ, με κοινή ηλεκτρική έξοδο. Στο πάνελ (module), τα στοιχεία συνδέονται σε σειρά σε ομάδες κατάλληλου πλήθους για την απόκτηση μιας επιθυμητής τάσης. Για την αύξηση της αξιοπιστίας ενός Φ/Β συστήματος, είναι σκόπιμο οι συνδέσεις των Φ/Β στοιχείων μέσα στα πάνελ, αλλά και στα γειτονικά πάνελ, να μην είναι μόνο στη σειρά αλλά και παράλληλες. Έτσι, αν ένα Φ/Β στοιχείο σκιαστεί ή αν πάθει βλάβη δεν θα μηδενιστεί η ισχύς που παράγει το

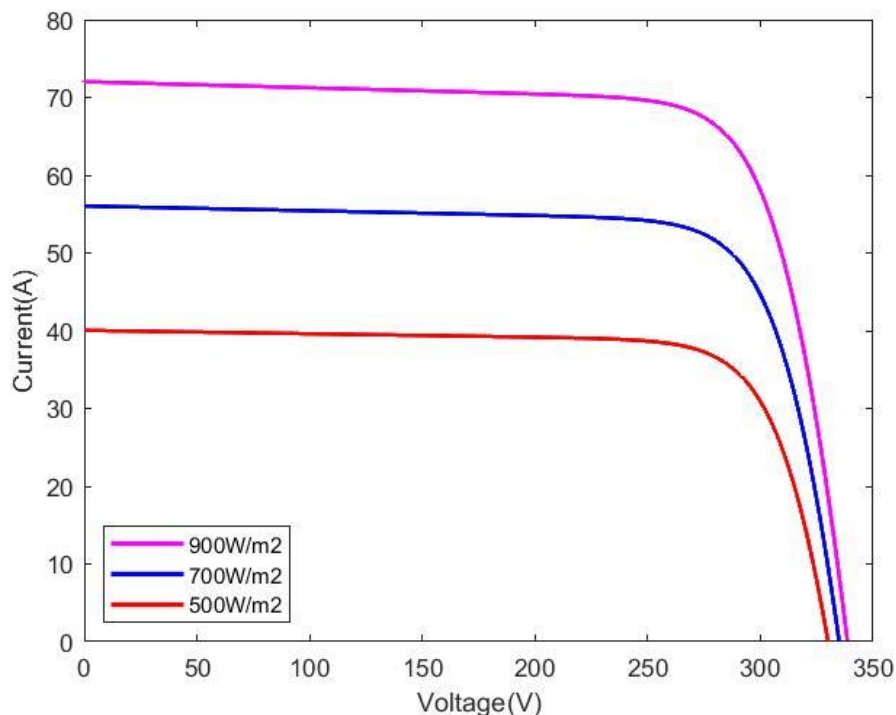
σύστημα, όπως αν συνέβαινε αν όλα τα Φ/Β στοιχεία ήταν σε σύνδεση σε σειρά. Σε μεγάλες εγκαταστάσεις, ομάδες περισσότερων Φ/Β πάνελ τοποθετούνται σε κοινή κατασκευή στήριξης και ονομάζονται Φ/Β συστοιχίες (arrays). Η σύνδεση των Φ/Β πάνελ σε σειρά ή παράλληλα, γίνεται με τρόπο που η τάση εξόδου της συστοιχίας να αποκτά την επιθυμητή τιμή. Είναι φανερό ότι η διαφορετική συνδεσμολογία των πάνελ μιας Φ/Β γεννήτριας δεν μεταβάλλει την ισχύ της, αφού όποια αύξηση της τάσης εξόδου της γεννήτριας συνεπάγεται ανάλογη μείωση της έντασης του ρεύματος που παράγει [6].

Το Φ/Β πάνελ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1 το κύκλωμα του, αποτελείται από μία πηγή ρεύματος (με ρεύμα I_L) που συνδέεται παράλληλα με μία δίοδο (με ρεύμα I_d). Περιέχει την αντίσταση R_s (series resistance) που παρεμβάλλεται στην κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια. Ακόμα, λόγω ρευμάτων διαρροής το ισοδύναμο κύκλωμα περιέχει και την παράλληλη αντίσταση R_{sh} (shunt resistance).



Σχήμα 2.1 Ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β στοιχείου/πάνελ [7].

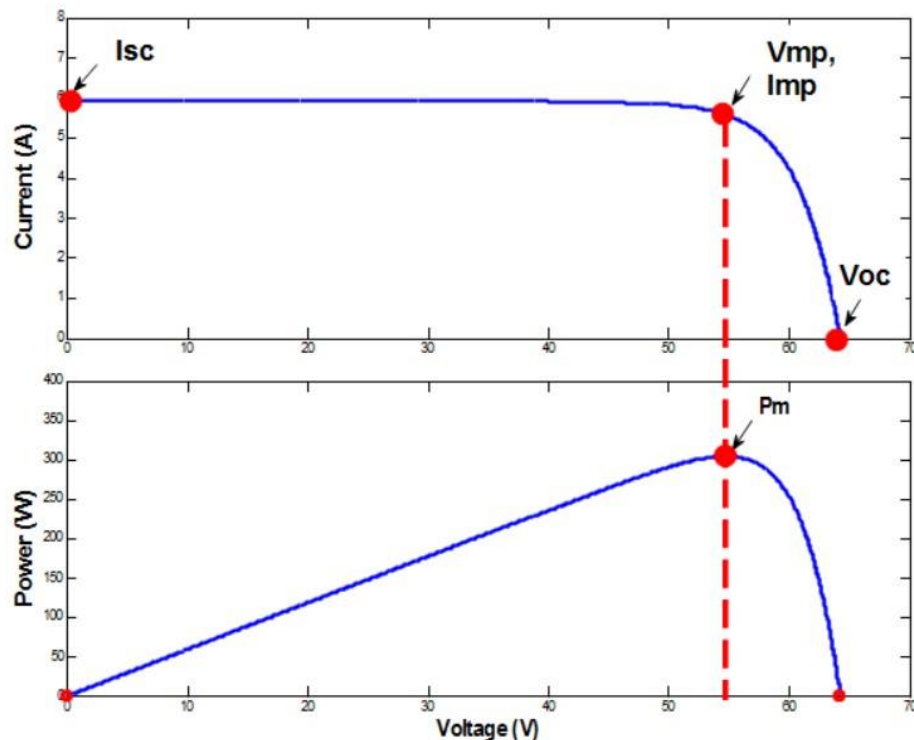
Η ένταση του ρεύματος που παρέχει στο κύκλωμα το φωτοβολταϊκό πάνελ είναι πρακτικά ανάλογη προς την ποσότητα της ακτινοβολίας που δέχεται όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 Καμπύλες I-V για διάφορες τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας.

Η ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας του πάνελ εξαρτάται από 3 μεταβλητούς παράγοντες: την ένταση της ακτινοβολίας, τη θερμοκρασία του πάνελ και την αντίσταση του ηλεκτρικού φορτίου. Στο σχεδιασμό και τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων επιδιώκεται οι παράγοντες αυτοί να παίρνουν ευνοϊκές τιμές, ώστε να παράγεται η μεγαλύτερη δυνατή ηλεκτρική ισχύς.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία για τη μελέτη της λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας αξιοποιούνται οι χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης (I-V) και ισχύος-τάσης (P-V) όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.3 σε συνθήκες ομοιόμορφης ακτινοβολίας.

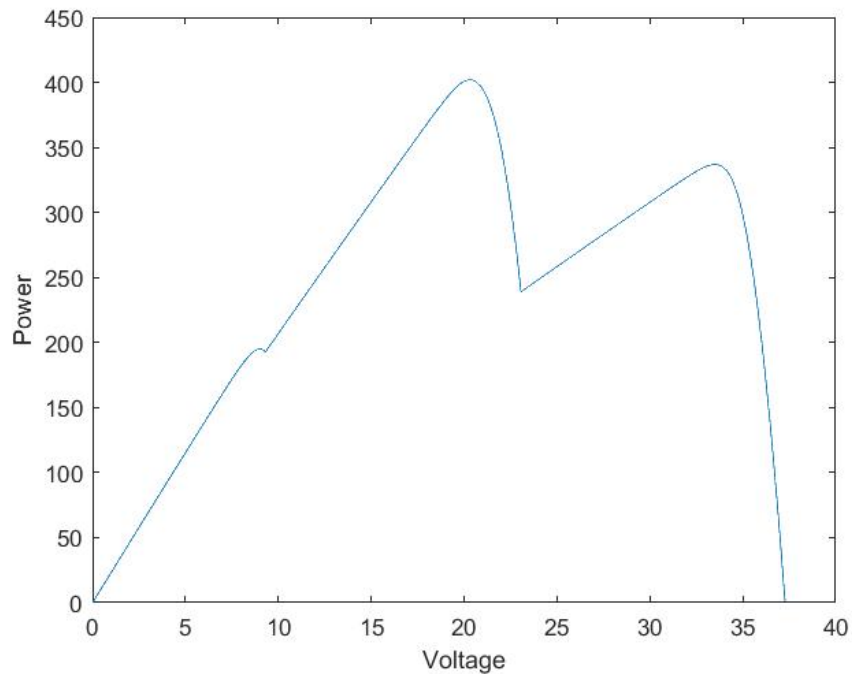


Σχήμα 2.3 Καμπύλες I-V και P-V [7].

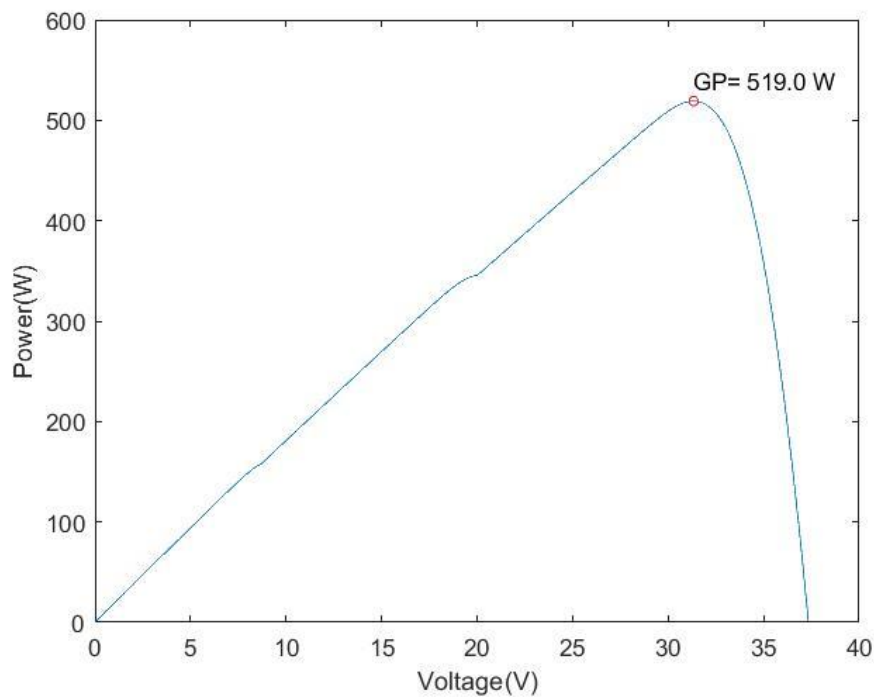
Το σημείο P_m στη καμπύλη P-V λέγεται σημείο παραγωγής μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point, MPP). Τα V_{mp} και I_{mp} είναι η τάση και το ρεύμα στο MPP αντίστοιχα. Το I_{sc} είναι το ρεύμα όταν οι άκρες του κυκλώματος είναι βραχυκυκλωμένες και V_{oc} η τάση όταν είναι ανοιχτοκυκλωμένες.

Σε συνθήκες μερικής σκίασης η καμπύλη P-V μίας φωτοβολταϊκής συστοιχίας παρουσιάζει πολλαπλές κορυφές (λόγω των διαφορετικών ακτινοβολιών στα επιμέρους πάνελ της συστοιχίας). Για να γίνει η καμπύλη P-V, όσο γίνεται, ομοιόμορφη όπως στο Σχήμα 2.3 εφαρμόζεται διασπορά σκίασης στη Φ/Β συστοιχία με την εκτέλεση αλγορίθμων βελτιστοποίησης όπως οι PSO, GA, DE (αναλύονται διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο). Παρακάτω φαίνεται η καμπύλη P-V μίας φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε συνθήκες μερικής σκίασης με τις πολλαπλές κορυφές (Σχήμα 2.4), και πως άλλαξε εκτελώντας έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης (Σχήμα 2.5) ο οποίος αύξησε και τη συνολική εξαγωγή ισχύος της συστοιχίας. Η αύξηση της ισχύος πραγματοποιήθηκε λόγω της διασποράς της σκίασης στη συστοιχία ως

αποτέλεσμα της ηλεκτρικής αναδιάταξης της από τον αλγόριθμο (συγκεκριμένα εδώ εκτελέστηκε ο PSO σε ένα 3x3 PV array με μικτές ακτινοβολίες, όπου GP=Global Peak).



Σχήμα 2.4 Καμπύλη P-V πριν τη βελτιστοποίηση.



Σχήμα 2.5 Καμπύλη P-V μετά τη βελτιστοποίηση.

3.

Μέθοδοι αναδιάταξης Φ/Β συστοιχιών

3.1 Εισαγωγικά

Στην παρούσα διπλωματική εργασία για να λυθεί το πρόβλημα των πολλαπλών κορυφών ισχύος στη χαρακτηριστική καμπύλη P-V (όπως αναφέρθηκε παραπάνω) σε συνθήκες μερικής σκίασης, χρησιμοποιείται η τεχνική της Ηλεκτρικής Αναδιάταξης Πίνακα (Electrical Array Reconfiguration, EAR). Λόγω της μερικής σκίασης, τα πάνελ της Φ/Β συστοιχίας έχουν διαφορετικά ρεύματα κι έτσι και το άθροισμα των ρευμάτων των παράλληλων πάνελ της διάταξης, θα είναι διαφορετικό. Για να μεγιστοποιηθεί η εξαγωγή της ισχύος από τη διάταξη, πρέπει να ελαχιστοποιηθούν οι διαφορές αυτών των αθροισμάτων. Κι αυτό διότι οι πολλαπλές κορυφές στη καμπύλη P-V οφείλονται στις παρακάμψεις των πάνελ που δέχονται μικρότερη ακτινοβολία λόγω σκίασης άρα έχουν και μικρότερο ρεύμα. Με τη μέθοδο EAR επιτυγχάνεται διασπορά της σκίασης στη συστοιχία με πολλαπλές εναλλαγές σε ένα πίνακα που περιέχει τις ακτινοβολίες των πάνελ της, μέχρι να βρεθεί η ελάχιστη δυνατή διαφορά αθροισμάτων, αφού ρεύματα και ακτινοβολίες είναι ανάλογα μεγέθη όπως αιτιολογείται στο Κεφάλαιο 2. Η εύρεση όμως του ιδανικού συνδυασμού εναλλαγών πραγματοποιείται ευκολότερα με την εκτέλεση

τεχνικών βελτιστοποίησης. Η εργασία ασχολείται με 3 τεχνικές της οικογένειας των evolutionary algorithms: Particle Swarm Optimization (PSO), Genetic Algorithm (GA), Differential Evolution (DE).

3.2 Particle Swarm Optimization

Η “Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων” (Particle Swarm Optimization, PSO) είναι μια στοχαστική βελτιστοποίηση, ένας εξελικτικός αλγόριθμος προσομοίωσης που πηγάζει τόσο από την ανθρώπινη συμπεριφορά όσο κι από αυτή των ζώων. Ένα προτέρημα του PSO είναι ότι μπορεί να λειτουργήσει σε συνεχή χώρο πραγματικών αριθμών άμεσα και δεν χρησιμοποιεί την συνάρτηση που βελτιστοποιείται (objective function) παρόμοια με άλλους αλγόριθμους. Ο PSO έχει λίγες παραμέτρους να ρυθμίσει και είναι εύκολος στην υλοποίηση. Η τεχνική του είναι παρόμοια με του γενετικού αλγόριθμου διότι και οι δυο βασίζονται στο πληθυσμό και είναι εξίσου αποτελεσματικοί. Επίσης ο PSO έχει καλύτερη υπολογιστική απόδοση, δηλαδή απαιτεί μικρότερο χώρο μνήμης και λιγότερη επεξεργαστική ισχύ. Ο αλγόριθμος συμπεριφέρεται το ίδιο καλά και για διακριτά και για αναλογικά συστήματα αν και για το χειρισμό διακριτών μεταβλητών η μέθοδος του PSO χρειάζεται κάποιες τροποποιήσεις [8].

Η ουσία για την ανάπτυξη του PSO ήταν η υπόθεση ότι η πιθανή λύση σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης αντιμετωπίζεται σαν ένα σημείο που πετάει σαν πουλί σε πολυδιάστατο χώρο, προσαρμόζοντας τη θέση του στο χώρο αναζήτησης ανάλογα με τη δική του προηγούμενη εμπειρία και αυτή των γειτόνων του. Αυτό το σημείο ονομάζεται σωματίδιο (particle) καθώς έχει ταχύτητα. Για να βρει το σωματίδιο την καλύτερη θέση, η αρχική ταχύτητα αυξάνεται είτε θετικά είτε αρνητικά ανάλογα με την τρέχουσα τιμή:

$$Vx = Vx + rand * C1 * (P_bestx - presentx) + rand * C2 * (P_bestx[G_bestx] - presentx) \quad (1)$$

όπου «V_x» η τρέχουσα ταχύτητα του σωματιδίου, «C1» και «C2» μη αρνητικοί συντελεστές, «P_bestx» και «G_bestx» είναι η ατομική βέλτιστη θέση και η καθολική βέλτιστη θέση αντίστοιχα (του σωματιδίου), και «presentx» η παρούσα τιμή της θέσης.

Η «V_x» και η παρούσα τιμή («presentx») είναι δισδιάστατοι πίνακες για να δείξουν τον αριθμό των σωματιδίων και τις διαστάσεις του χώρου. Λόγω απουσίας προηγούμενης ταχύτητας, τα σωματίδια δεν έχουν δυναμική και παγιδεύονται στην ίδια θέση. Οι σταθερές «C1» και «C2» παίζουν το ρόλο της στοχαστικής επιτάχυνσης που τραβούν τα σωματίδια προς τις «P_bestx» και «G_bestx» θέσεις. Το μέγεθος του πληθυσμού γενικά εξαρτάται από το πρόβλημα. Για να επιτευχθεί ο στόχος σε μια ομάδα πληθυσμού, παράγεται τυχαίος αριθμός σωματιδίων με τυχαίες θέσεις και ταχύτητες. Οι ταχύτητες και οι θέσεις τους ενημερώνονται κατά τη διάρκεια ενός αριθμού επαναλήψεων και στη συνέχεια η καταλληλότητά (fitness) τους υπολογίζεται σύμφωνα με την objective function. Η προσομοίωση εκτελείται μέσω των απλών εξισώσεων (2) και (3). Το σωματίδιο κινείται προς μια βέλτιστη λύση μέσω της τωρινής του ταχύτητας και της ατομικής βέλτιστης λύσης που βρίσκει από μόνο του σε κάθε επανάληψη καθώς και της καθολικής βέλτιστης λύσης που προκύπτει από όλα τα σωματίδια. Σε ένα φυσικό χώρο αναζήτησης, η ενημερωμένη θέση και ταχύτητα του i-th σωματιδίου υπολογίζονται με τις παρακάτω εξισώσεις.

$$V_i^{k+1} = K(V_i^k * \omega + C_1 * R_1 * (P_best(i) - X_i^k) + C_2 * R_2 * (G_best - X_i^k)) \quad (2)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (3)$$

όπου $X_i = [X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{id}]$ και $V_i = [V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{id}]$

και οι δείκτες 1, 2, ..., d δείχνουν τις πιθανές διαστάσεις για το i σωματίδιο με θέση «X_i» και ταχύτητα «V_i».

Το $P_best(i) = [X_{i1P_best}, X_{i2P_best}, \dots, X_{idP_best}]$ αναπαριστά τις ατομικές βέλτιστες θέσεις του σωματιδίου i και το $G_best = [X_{1G_best}, X_{2G_best}, \dots, X_{nG_best}]$ αναπαριστά τις καθολικές βέλτιστες

θέσεις. Το « k » αντιπροσωπεύει τον αριθμό της επανάληψης για το σύνολο των n επαναλήψεων. Το « ω » είναι το βάρος αδράνειας, το « K » είναι ο συντελεστής συστολής, οι « C_1 » και « C_2 » είναι μη αρνητικοί συντελεστές που ονομάζονται συντελεστές επιτάχυνσης, οι « R_1 » και « R_2 » είναι τυχαίοι αριθμοί διαφορετικοί μεταξύ τους και γενικά παίρνουν τιμές στο διάστημα $[0,1]$.

Η επιτυχία της βελτιστοποίησης εξαρτάται από την επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων και του συντονισμού τους μέσω της διαδικασίας αναζήτησης. Η μέση ταχύτητα μειώνεται σταδιακά, καθώς τείνει να βρεθεί μια καλή λύση. Η μέση ταχύτητα ενός μεγάλης κλίμακας προβλήματος είναι μεγαλύτερη από αυτή ενός μικρής κλίμακας με την προϋπόθεση των ίδιων παραμέτρων. Η επιτυχία ή αποτυχία της αναζήτησης σχετίζεται με το μέσο όρο της απόλυτης τιμής της ταχύτητας. Η ταχύτητα των σωματιδίων σε κάθε κατεύθυνση έχει όριο μία μέγιστη τιμή V_{max} , έτσι ώστε τα σωματίδια να μην δοκιμάσουν να ξεπεράσουν το χώρο αναζήτησης. Η ταχύτητα είναι μια σημαντική παράμετρος για τον προσδιορισμό της ανάλυσης: η πολύ υψηλή τιμή της μπορεί να κάνει το σωματίδιο να απομακρυνθεί από την καλή λύση ενώ η πολύ χαμηλή τιμή της θα προκαλέσει την παγίδευση των σωματιδίων στα τοπικά ελάχιστα.

Αν η ταχύτητα εξαιρούνταν από την εξίσωση τότε το σωματίδιο θα γνώριζε μόνο την τρέχουσα και την καλύτερη προσωπική θέση (« P_{best} »), από την οποία έχει περάσει το σωματίδιο μέχρι τότε και την καλύτερη γενική θέση (« G_{best} ») από την οποία έχει περάσει το σμήνος των σωματιδίων μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή. Η ταχύτητα όμως είναι αυτό το διάνυσμα που ορίζει προς τα πού πρέπει να κινηθεί το κάθε σωματίδιο την επόμενη χρονική στιγμή και αυτό είναι ένας συνδυασμός δύο διανυσμάτων. Το ένα διάνυσμα αντιπροσωπεύει την κατεύθυνση από την τωρινή τοποθεσία του σωματιδίου προς την καλύτερη προσωπική θέση που έχει βρει μέχρι τώρα. Το δεύτερο διάνυσμα αντιπροσωπεύει την κατεύθυνση από την τωρινή τοποθεσία του σημείου προς την καλύτερη θέση που έχει βρει όλο το σμήνος των σημείων μέχρι αυτή τη χρονική στιγμή. Έτσι, έχοντας ορίσει το ελάχιστο και μέγιστο όριο του μέτρου της ταχύτητας υπολογίζεται το νέο διάνυσμα προς το οποίο θα κινηθεί το σωματίδιο την επόμενη χρονική

στιγμή. Όπως είναι κατανοητό, μεγαλύτερο μέτρο ταχύτητας διευκολύνει την καθολική εξερεύνηση, ενώ μικρότερο μέτρο ταχύτητας ενθαρρύνει την τοπική αναζήτηση έχοντας μεγαλύτερη ακρίβεια σε έναν μικρότερο χώρο αναζήτησης.. Για να ελέγχεται κάπως η γρήγορη ή η αργή μεταβολή της ταχύτητας στο PSO έχει οριστεί και μια ακόμα παράμετρος που ορίζεται ως αδράνεια « w ». Η χρήση του βάρους αδράνειας παρέχει βελτιωμένη απόδοση σε αριθμό εφαρμογών, και μπορεί να είναι θετική σταθερά ή γραμμική/μη-γραμμική συνάρτηση του χρόνου. Η κατάλληλη επιλογή του w παρέχει μια ισορροπία μεταξύ της καθολικής εξερεύνησης και της τοπικής αναζήτησης και επίσης μειώνει τον συνολικό αριθμό επαναλήψεων αφού με αυτόν τον τρόπο καταφέρνει να προσεγγίσει την τελική λύση γρηγορότερα.

3.2.1 Ανάλυση του αλγορίθμου PSO της παρούσας εργασίας

Στην αναδιάταξη Φ/Β συστοιχιών υπάρχουν πολλοί πιθανοί συνδυασμοί συνδέσεων των πάνελ και μόνο ένας πετυχαίνει αποτελεσματική διασπορά σκίασης. Για να βρούμε αυτό το συνδυασμό χρησιμοποιούμε τον αλγόριθμο “Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων”. Παρότι ξεκινάει με τυχαίο βήμα ο αλγόριθμος βρίσκει το καλύτερο συνδυασμό συνδέσεων που πετυχαίνουν την πιο αποδοτική διασπορά σκίασης. Επίσης προγραμματίζεται εύκολα και χρησιμοποιεί παράλληλο υπολογισμό για να φτάσει στη καλύτερη λύση σε σύντομο χρόνο. Παρακάτω αναλύεται διεξοδικά η εκτέλεση του αλγορίθμου.

Αρχικά εισάγεται στο μοντέλο στο Simulink το σενάριο σκίασης δηλαδή οι ακτινοβολίες που θα έχουν τα φωτοβολταϊκά πάνελ της συστοιχίας. Καλείται το μοντέλο και παίρνονται οι καμπύλες P-V, I-V πριν την εκτέλεση του αλγορίθμου. Έτσι είναι γνωστή η μέγιστη εξαγωγή ισχύος της συστοιχίας αλλά και το ρεύμα των γραμμών των παράλληλων πάνελ, ώστε έπειτα να αξιολογηθεί καλύτερα η ποιότητα της βελτιστοποίησης. Προσδιορίζονται οι σταθερές (κοινωνική και γνωστική, « C_1 » και « C_2 » αντίστοιχα) και το βάρος αδράνειας « w ».

Αναπαρίστανται η συστοιχία, και τα 81 φωτοβολταϊκά πάνελ που περιέχει, με ένα μονοδιάστατο πίνακα «X» 81 θέσεων (το λεγόμενο σμήνος σωματιδίων ή particle swarm) που αρχικοποιείται. Επίσης αρχικοποιείται ένας πίνακας («Pbest») με τις αρχικές θέσεις του «X», και εκεί θα ενημερώνονται οι καλύτερες θέσεις του εκάστοτε σμήνους. Οι θέσεις των σωματιδίων κωδικοποιούνται στον δισδιάστατο χώρο όπως ακριβώς οπτικοποιούνται τα πάνελ στη Φ/Β συστοιχία εκείνη τη δεδομένη χρονική στιγμή. Συγκεκριμένα, το κάθε πάνελ/σωματίδιο έχει συντεταγμένες (x,y) όπου τα x και y παίρνουν τιμές στο εύρος 1-9 αφού η Φ/Β συστοιχία έχει διαστάσεις 9x9. Κάθε σωματίδιο αποκτά μια αρχική ταχύτητα («Velocity») μέσω της εξίσωσης:

$$Velocity(i) = 1 + round(rand() * 8). \quad (4)$$

Μετά τις αρχικοποιήσεις ξεκινά η κύρια εκτέλεση του αλγορίθμου μέσα σε έναν επαναληπτικό βρόχο που ανάλογα με τον αριθμό των επαναλήψεων παράγει και πιο ποιοτικό αποτέλεσμα. Στο επόμενο κεφάλαιο με τις δοκιμές εκτέλεσης των αλγορίθμων θα αναλυθεί περισσότερο αυτό το σημείο. Στο βρόχο, υπολογίζεται για κάθε σωματίδιο η ταχύτητα του μέσω της εξίσωσης

$$Velocity(i) = w * Velocity(i) + rand * C1 * (Pbest(i) - X(i)) + rand * C2 * (Gbest - X(i)) \quad (5)$$

όπου «C1» και «C2» σταθερές, «w» το βάρος αδράνειας, «X(i)» το σωματίδιο στη θέση i του πίνακα «X», «Pbest(i)» η καλύτερη θέση του σωματιδίου στο σμήνος της συγκεκριμένης επανάληψης και «Gbest» η καλύτερη θέση σωματιδίου από όλες τις μέχρι τώρα επαναλήψεις [9]. Έπειτα υπολογίζονται οι νέες θέσεις των σωματιδίων με βάση την εξίσωση $X(i) = X(i) + Velocity(i)$. Αυτό είναι το πιο κομβικό σημείο του αλγορίθμου, αφού έτσι

αλλάζουν θέσεις σύμφωνα με την τιμή του «Velocity» κάθε φορά, τα στοιχεία του πίνακα «X» (δηλαδή τα σωματίδια του σμήνους), με άλλα λόγια γίνεται εικονική αναδιάταξη των πάνελ της συστοιχίας. Έτσι αναζητείται σε κάθε επανάληψη ο καλύτερος συνδυασμός θέσεων στο πίνακα «X» ώστε οι διαφορές στα αθροίσματα ρεύματος των γραμμών των αντίστοιχων πάνελ να ελαχιστοποιηθούν (Σχήμα 3.4). Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας συνάρτησης που εκτελείται για κάθε σωματίδιο και σκοπός είναι να ελαχιστοποιηθεί το αποτέλεσμα της. Η εξίσωση της συνάρτησης είναι:

$$\sum_{i=1}^m (\text{Μέγιστο ρεύμα γραμμών} - \text{Ρεύμα γραμμής}) \quad (6)$$

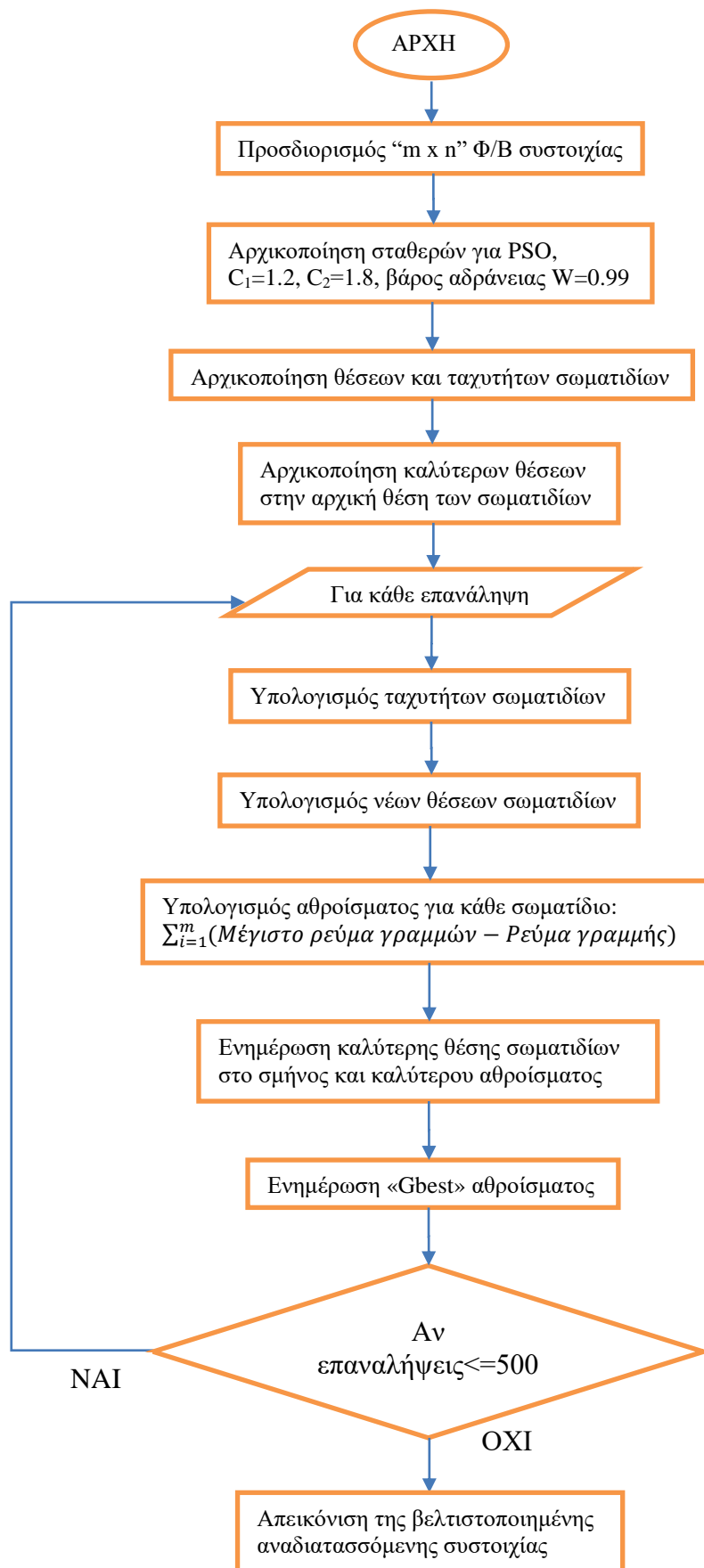
όπου «m» είναι οι γραμμές της συστοιχίας με τα παράλληλα πάνελ. Όσο πιο μικρή είναι η τελική της τιμή τόσο πιο μικρές είναι οι διαφορές των αθροισμάτων των γραμμών και έτσι πιο μεγάλη η εξαγωγή ισχύος από τη συστοιχία. Επίσης, το παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα την μη παράκαμψη των πάνελ αφού μετά την βέλτιστη αναδιάταξη οι διαφορές στα ρεύματα ελαχιστοποιούνται και δεν ενεργοποιούνται οι δίοδοι bypass που συνδέονται παράλληλα για την προστασία τους (βλέπε Σχήμα 4.2 στο επόμενο κεφάλαιο).

										ΣΙ
11	12	13	14	15	16	17	18	19	→	I ₁
21	22	23	24	25	26	27	28	29	→	I ₂
31	32	33	34	35	36	37	38	39	→	I ₃
41	42	43	44	45	46	47	48	49	→	I ₄
51	52	53	54	55	56	57	58	59	→	I ₅
61	62	63	64	65	66	67	68	69	→	I ₆
71	72	73	74	75	76	77	78	79	→	I ₇
81	82	83	84	85	86	87	88	89	→	I ₈
91	92	93	94	95	96	97	98	99	→	I ₉

Σχήμα 3.4 Διάγραμμα της συστοιχίας όπου κάθε I_i ($i = 1..9$) είναι το αντίστοιχο «Ρεύμα γραμμής» της εξίσωσης 6, δηλαδή το άθροισμα των ρευμάτων των παράλληλων πάνελ κάθε γραμμής (η αρίθμηση στα κελιά του πίνακα αντιστοιχεί στις συντεταγμένες του κάθε Φ/Β πάνελ).

Στη συνέχεια ελέγχεται αν η τιμή της συνάρτησης είναι μικρότερη από την καλύτερη τιμή μέχρι τώρα για το συγκεκριμένο σωματίδιο και ανάλογα ενημερώνεται ή όχι η καλύτερη τιμή αλλά και

η θέση του στο πίνακα «Pbest». Τέλος κρατείται η καλύτερη-μικρότερη τιμή της συνάρτησης από όλες τις επαναλήψεις («Gbest») για να φανεί πόσο καλή είναι η βελτιστοποίηση που εκτελέστηκε. Αρχικά εισάγεται στο μοντέλο στο Simulink το νέο σενάριο σκίασης, που προέκυψε ύστερα από την εικονική αναδιάταξη της συστοιχίας, καλείται το μοντέλο και παίρνονται οι καμπύλες P-V, I-V υπολογίζοντας αυξημένη ισχύ σε σχέση με πριν τη βελτιστοποίηση εξαιτίας της ομαλότητας της καμπύλης P-V λόγω μείωσης των φαινομένων bypassing. Παρακάτω δίνεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου PSO για την αναδιάταξη της Φ/Β συστοιχίας (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου PSO.

3.3 Γενετικός Αλγόριθμος

Ο δεύτερος αλγόριθμος βελτιστοποίησης που εξετάζεται στη παρούσα διπλωματική εργασία είναι ένας Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm, GA) [10]. Ο GA είναι μετα-ευρετικός αλγόριθμος εμπνεόμενος από την διαδικασία της φυσικής επιλογής και ανήκει στη μεγαλύτερη κατηγορία των εξελικτικών αλγορίθμων (evolutionary algorithms, EA). Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται ευρέως για να βρουν ποιοτικές λύσεις σε προβλήματα βελτιστοποίησης βασιζόμενοι σε λειτουργίες εμπνευσμένες από τη βιολογία όπως mutation, crossover και selection.

Ο γενετικός αλγόριθμος είναι ένας τύπος αλγορίθμου βελτιστοποίησης, που σημαίνει ότι υπολογίζει τη βέλτιστη λύση (ή λύσεις) σε ένα δεδομένο υπολογιστικό πρόβλημα που μεγιστοποιεί ή ελαχιστοποιεί μια συγκεκριμένη συνάρτηση. Οι γενετικοί αλγόριθμοι αντιπροσωπεύουν ένα κλάδο του πεδίου μελέτης που περιλαμβάνει τους εξελικτικούς υπολογισμούς [11], διότι μιμούνται τις βιολογικές διεργασίες αναπαραγωγής και τη φυσική επιλογή για την εύρεση των «πιο κατάλληλων» λύσεων [12]. Όπως στην εξέλιξη, πολλές από αυτές τις διεργασίες στους γενετικούς αλγορίθμους είναι τυχαίες, ωστόσο αυτή η τεχνική βελτιστοποίησης επιτρέπει σε κάποιον να ορίσει το επίπεδο τυχαιότητας και το επίπεδο ελέγχου. Αυτοί οι αλγόριθμοι είναι πολύ ισχυρότεροι και αποτελεσματικότεροι από τους αλγορίθμους τυχαίας αναζήτησης και τους αλγορίθμους εξαντλητικής αναζήτησης και δεν απαιτούν καμία επιπλέον πληροφορία σχετικά με το συγκεκριμένο πρόβλημα. Αυτή η λειτουργία τους επιτρέπει να βρουν λύσεις σε προβλήματα που δεν μπορούν να χειριστούν άλλες μέθοδοι βελτιστοποίησης λόγω έλλειψης συνέχειας των διάφορων παραγώγων του προβλήματος, λόγω έλλειψης γραμμικότητας ή άλλων χαρακτηριστικών.

Δεδομένου ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν σχεδιαστεί για να προσομοιώνουν μια βιολογική διαδικασία, ένα μεγάλο μέρος από τη σχετική βιβλιογραφία δανείζεται στοιχεία από τη βιολογία.

Ωστόσο, οι οντότητες που αναφέρεται αυτή η ορολογία σε γενετικούς αλγόριθμους είναι πολύ απλούστερες από τις αντίστοιχες βιολογικές. Τα βασικά στοιχεία που είναι κοινά σε όλους σχεδόν τους γενετικούς αλγόριθμους είναι μια συνάρτηση κόστους για βελτιστοποίηση, ένας πληθυσμός από χρωμοσώματα, μια ομάδα χρωμοσωμάτων που θα αναπαραχθούν, διασταυρώσεις για να παραχθεί η επόμενη γενιά χρωμοσωμάτων καθώς και τυχαίες μεταλλάξεις των χρωμοσωμάτων στη νέα γενιά.

Η συνάρτηση κόστους είναι η συνάρτηση που ο αλγόριθμος προσπαθεί να βελτιστοποιήσει. Η λέξη κόστος χρησιμοποιείται από τη θεωρία εξέλιξης. Χρησιμοποιείται εδώ επειδή η συγκεκριμένη συνάρτηση ελέγχει και υπολογίζει πόσο κόστος έχει η πιθανή λύση. Η συνάρτηση κόστους είναι ένα από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά των γενετικών αλγορίθμων. Ο όρος χρωμόσωμα αναφέρεται σε μια αριθμητική τιμή ή τιμές που αναπαριστά μια υποψήφια λύση του προβλήματος που προσπαθεί να λύσει ο αλγόριθμος. Κάθε υποψήφια λύση κωδικοποιείται ως ένας πίνακας από τιμές παραμέτρων, μια διαδικασία που επίσης συναντάται στους αλγορίθμους βελτιστοποίησης [13]. Μια προσέγγιση είναι να μετατραπεί κάθε παράμετρος σε μια ακολουθία από bit που συνδέουν τις παραμέτρους σε μια αλυσίδα όπως είναι τα γονίδια στο DNA. Ιστορικά τα χρωμοσώματα κωδικοποιούνταν με αυτόν τον τρόπο και παραμένει μια κατάλληλη και εύκολη μέθοδος κωδικοποίησης στον διακριτό χώρο των λύσεων.

Ένας γενετικός αλγόριθμος ξεκινά με μια τυχαία επιλεγμένη ποικιλία χρωμοσωμάτων, η οποία χρησιμεύει ως η πρώτη γενιά (αρχικός πληθυσμός). Στη συνέχεια, κάθε χρωμόσωμα στον πληθυσμό αξιολογείται από τη λειτουργία της συνάρτησης κόστους για να ελεγχθεί πόσο καλά λύνει το πρόβλημα. Στη συνέχεια αναλύεται η εκτέλεση του αλγορίθμου.

3.3.1 Ανάλυση του αλγορίθμου GA της παρούσας εργασίας

Αρχικά εισάγεται στο μοντέλο στο Simulink το σενάριο σκίασης δηλαδή οι ακτινοβολίες που θα έχουν τα φωτοβολταϊκά πάνελ της συστοιχίας. Καλείται το μοντέλο και υπολογίζονται οι καμπύλες P-V, I-V πριν την εκτέλεση του αλγορίθμου. Έτσι είναι γνωστή η μέγιστη εξαγωγή ισχύος της συστοιχίας αλλά και το ρεύμα των γραμμών των παράλληλων πάνελ, ώστε έπειτα να αξιολογηθεί καλύτερα η ποιότητα της βελτιστοποίησης. Αναπαρίστανται η συστοιχία, και τα 81 πάνελ που περιέχει με μονοδιάστατους πίνακες 81 θέσεων (στον κώδικα επιλέχτηκαν 100 τέτοιοι πίνακες/χρωμοσώματα) οι οποίοι αρχικοποιούνται με τυχαίες μοναδικές τιμές στο εύρος 1-81. Οι πίνακες είναι οι υποψήφιες λύσεις (ή γενιές) του προβλήματος και αποτελούν το αρχικό πληθυσμό του. Αναζητείται σε κάθε γενιά ο καλύτερος συνδυασμός θέσεων ώστε οι διαφορές στα αθροίσματα ρεύματος των γραμμών των αντίστοιχων πάνελ να ελαχιστοποιηθούν (όπως και στον αλγόριθμο PSO). Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας συνάρτησης που εκτελείται για κάθε γενιά και σκοπός είναι να ελαχιστοποιηθεί το αποτέλεσμα της. Η εξίσωση της συνάρτησης είναι:

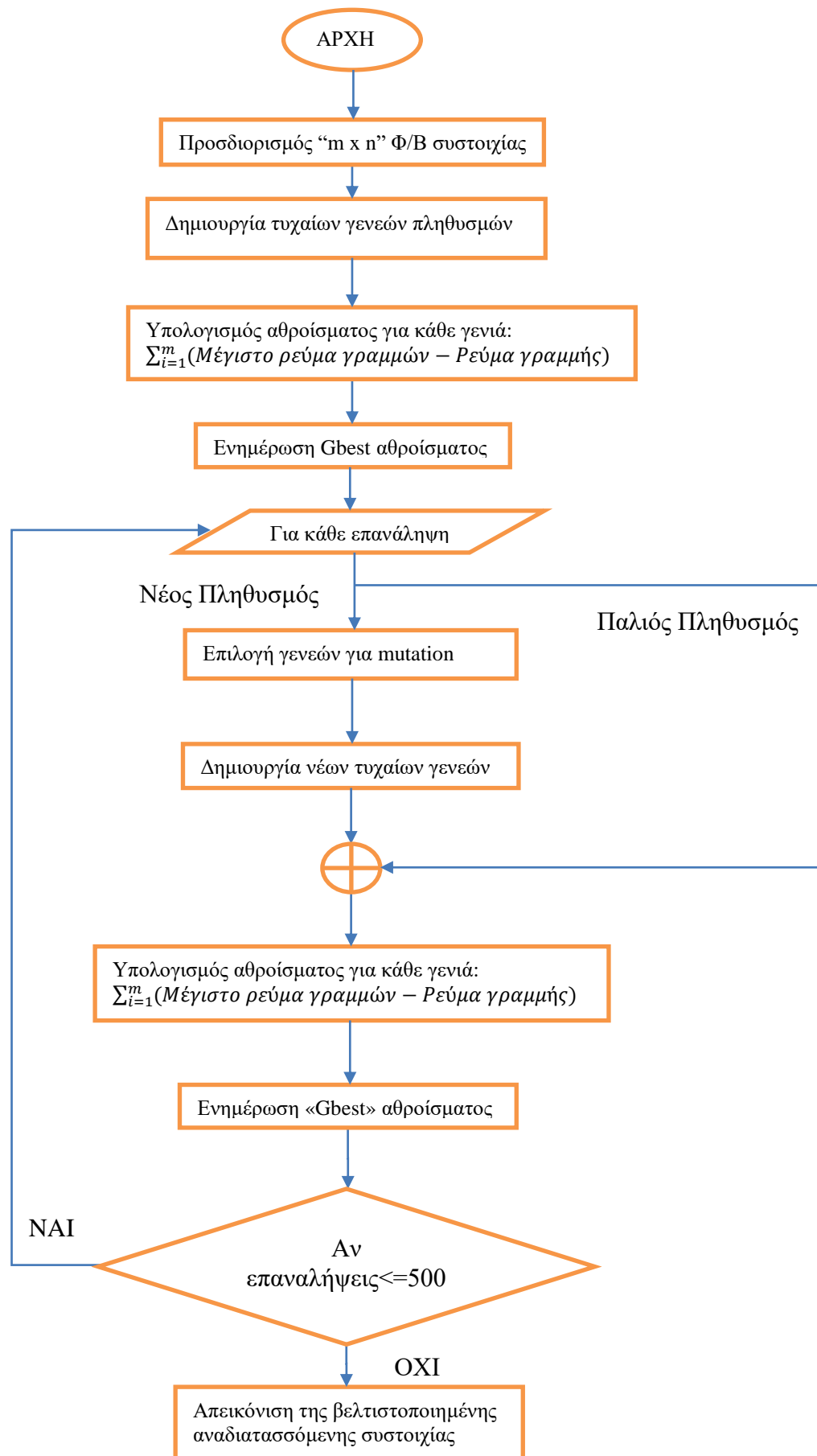
$$\sum_{i=1}^m (\text{Μέγιστο ρεύμα γραμμών} - \text{Ρεύμα γραμμής}) \quad (6)$$

όπου «m» είναι οι γραμμές της συστοιχίας με τα παράλληλα πάνελ. Όσο πιο μικρή είναι η τελική της τιμή τόσο πιο μικρές είναι οι διαφορές των αθροισμάτων των γραμμών και έτσι πιο μεγάλη η εξαγωγή ισχύος από τη συστοιχία. Επίσης, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μη παράκαμψη πάνελ αφού μετά την βέλτιστη αναδιάταξη οι διαφορές στα ρεύματα ελαχιστοποιούνται και δεν ενεργοποιούνται οι δίοδοι bypass για την προστασία τους. Στη συνέχεια κρατείται η καλύτερη-μικρότερη τιμή της συνάρτησης από όλες τις γενιές («Gbest»).

Μετά από αυτό το στάδιο, ξεκινά η εκτέλεση του αλγορίθμου μέσα σε έναν επαναληπτικό βρόχο που ανάλογα με τον αριθμό των επαναλήψεων βγάζει και πιο ποιοτικό αποτέλεσμα. Στο επόμενο κεφάλαιο με τις δοκιμές εκτέλεσης των αλγορίθμων θα αναλυθεί περισσότερο αυτό το σημείο.

Στο βρόγχο, αρχικά γίνεται αύξουσα ταξινόμηση των γενεών ανάλογα με τα αποτελέσματα της συνάρτησης για τα αθροίσματα. Οι 40 από τις 100 γενιές με το μικρότερο άθροισμα αποτελούν το παλιό πληθυσμό. Οι επόμενες 40 γενιές επιλέγονται για να εκτελεστεί το mutation. Σ' αυτό σε κάθε γενιά (από τις 40, δηλαδή από τις 41..80) επιλέγονται 2 τυχαίες μοναδικές τιμές από το πίνακα και αλλάζουν θέση. Έπειτα οι εναπομένουσες 20 γενιές αρχικοποιούνται εκ νέου με τυχαίες μοναδικές τιμές από 1..81. Έτσι στο νέο πληθυσμό που προέκυψε μαζί με τον παλιό, ξαναγίνεται χρήση της συνάρτησης με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί το αποτέλεσμα της μετά το πέρας των επαναλήψεων. Τέλος κρατείται η καλύτερη-μικρότερη τιμή της συνάρτησης από όλες τις επαναλήψεις («Gbest») για να φανεί πόσο καλή είναι η βελτιστοποίηση που εκτελέστηκε.

Αρχικά εισάγεται στο μοντέλο στο Simulink το νέο σενάριο σκίασης, που προέκυψε ύστερα από την εικονική αναδιάταξη της συστοιχίας, καλείται το μοντέλο και παίρνονται οι καμπύλες P-V, I-V υπολογίζοντας αυξημένη ισχύ σε σχέση με πριν τη βελτιστοποίηση εξαιτίας της ομαλότητας της καμπύλης P-V λόγω μείωσης των φαινομένων bypassing. Παρακάτω δίνεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου GA για την αναδιάταξη της Φ/B συστοιχίας (Σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου GA.

3.4 Differential Evolution

Η διαφορική εξέλιξη είναι ένας από τους πιο ισχυρούς και αποτελεσματικούς εξελικτικούς αλγορίθμους για την επίλυση καθολικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Η DE, που προτάθηκε αρχικά από τους Storn και Price (Price 2006, Storn και Price 1995), έχει γίνει ένας από τους ισχυρότερους στοχαστικούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης πραγματικών παραμέτρων. Η DE έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε πολλούς τομείς της μηχανικής κατά τη διάρκεια των τελευταίων δύο δεκαετιών.

3.4.1 Ανάλυση του αλγορίθμου DE της παρούσας εργασίας

Ο τελευταίος αλγόριθμος βελτιστοποίησης που εξετάζεται σ' αυτή την εργασία είναι η Διαφορική Εξέλιξη (Differential Evolution, DE). Η DE είναι μια μέθοδος που βελτιστοποιεί ένα πρόβλημα προσπαθώντας να βελτιώσει μια υποψήφια λύση σύμφωνα με ένα δοθέν μέτρο ποιότητας [14]. Τέτοιες μέθοδοι, όπως και ο GA, γνωστοί σαν μεταευρετικοί (metaheuristics), μπορούν να ερευνήσουν μεγάλα διαστήματα από υποψήφιες λύσεις αλλά δεν εγγυώνται ότι θα βρουν την βέλτιστη λύση. Ο αλγόριθμος βελτιστοποιεί το πρόβλημα, συντηρώντας ένα πληθυσμό από υποψήφιες λύσεις και δημιουργώντας νέες που είναι συνδυασμός των τωρινών. Έπειτα κρατάει την υποψήφια λύση με το καλύτερο σκορ για τη βελτιστοποίηση του προβλήματος. Στη συνέχεια αναλύεται η εκτέλεση του αλγορίθμου.

Αρχικά εισάγεται στο μοντέλο στο Simulink το σενάριο σκίασης δηλαδή οι ακτινοβολίες που θα έχουν τα φωτοβολταϊκά πάνελ της συστοιχίας. Καλείται το μοντέλο και παίρνονται οι καμπύλες P-V, I-V πριν την εκτέλεση του αλγορίθμου. Έτσι είναι γνωστή η μέγιστη εξαγωγή ισχύος της συστοιχίας αλλά και το ρεύμα των γραμμών των παράλληλων πάνελ, ώστε έπειτα να αξιολογηθεί καλύτερα η ποιότητα της βελτιστοποίησης. Αναπαρίστανται η συστοιχία, και τα 81 φωτοβολταϊκά πάνελ που περιέχει, με μονοδιάστατους πίνακες 81 θέσεων (στο κώδικα επιλέχτηκαν 100 τέτοιοι πίνακες) οι οποίοι αρχικοποιούνται με τυχαίες μοναδικές τιμές στο

εύρος 1-81. Οι πίνακες είναι οι υποψήφιες λύσεις (ή γενιές) του προβλήματος και αποτελούν τον αρχικό πληθυσμό του. Αναζητείται σε κάθε γενιά ο καλύτερος συνδυασμός θέσεων ώστε οι διαφορές στα αθροίσματα ρεύματος των γραμμών των αντίστοιχων πάνελ να ελαχιστοποιηθούν (όπως και στους αλγορίθμους PSO, GA). Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας συνάρτησης που εκτελείται για κάθε γενιά και σκοπός είναι να ελαχιστοποιηθεί το αποτέλεσμα της. Η εξίσωση της συνάρτησης είναι:

$$\sum_{i=1}^m (\text{Μέγιστο ρεύμα γραμμών} - \text{Ρεύμα γραμμής}) \quad (6)$$

όπου «m» είναι οι γραμμές της συστοιχίας με τα παράλληλα πάνελ. Όσο πιο μικρή είναι η τελική της τιμή τόσο πιο μικρές είναι οι διαφορές των αθροισμάτων των γραμμών και έτσι πιο μεγάλη η εξαγωγή ισχύος από τη συστοιχία. Επίσης έχει ως αποτέλεσμα την μη παράκαμψη πάνελ αφού μετά την βέλτιστη αναδιάταξη οι διαφορές στα ρεύματα ελαχιστοποιούνται και δεν ενεργοποιούνται οι δίοδοι bypass για την προστασία τους. Στη συνέχεια κρατείται η καλύτερη-μικρότερη τιμή της συνάρτησης από όλες τις γενιές («Gbest»).

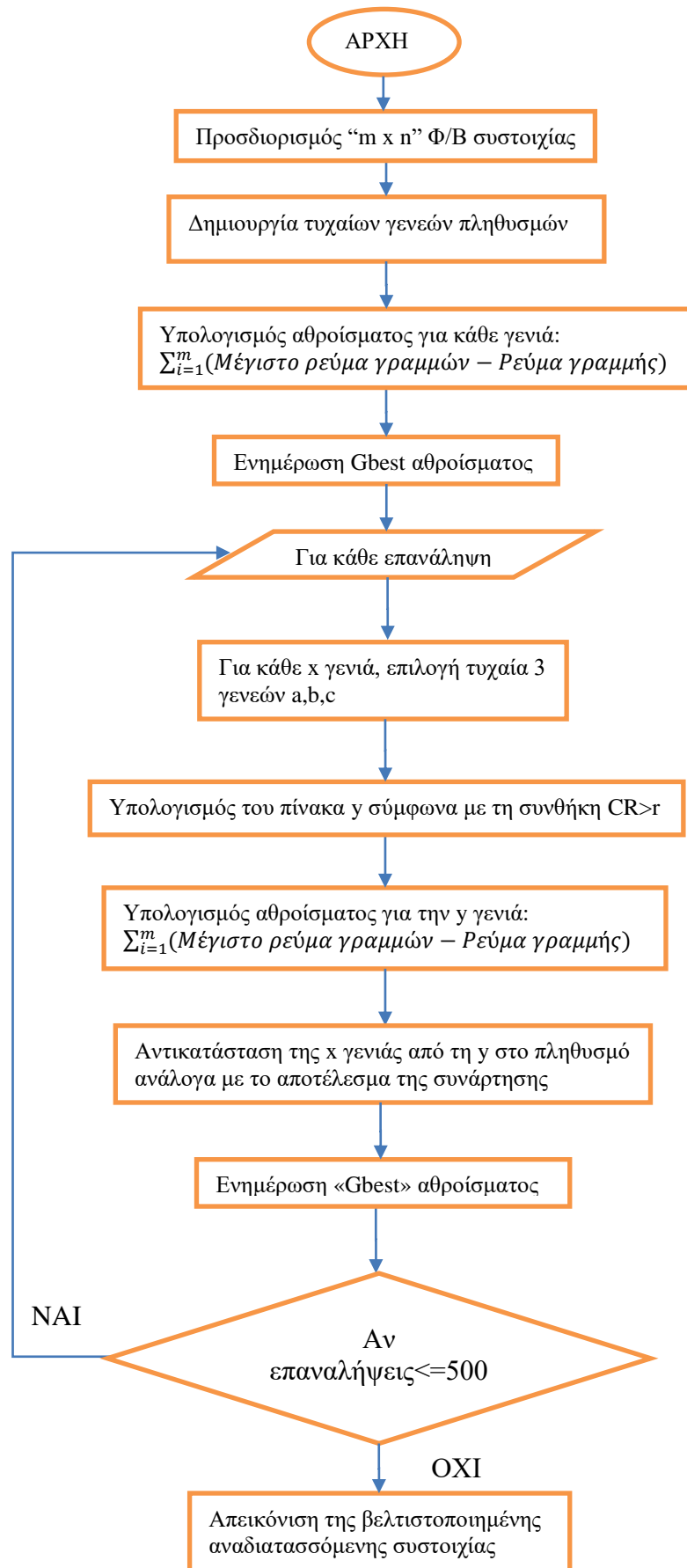
Μετά από αυτό το στάδιο, ξεκινά η εκτέλεση του αλγορίθμου μέσα σε έναν επαναληπτικό βρόχο που ανάλογα με τον αριθμό των επαναλήψεων παράγει και πιο ποιοτικό αποτέλεσμα. Στο επόμενο κεφάλαιο με τις δοκιμές εκτέλεσης των αλγορίθμων θα αναλυθεί περισσότερο αυτό το σημείο. Στο βρόχο, για κάθε γενιά «x» (από τις 100 υπάρχουσες) επιλέγονται τυχαία 3 γενιές (a, b, c) διαφορετικές μεταξύ τους και προφανώς κι από τη «x». Δίδονται οι εξής παράμετροι: η πιθανότητα διασταύρωσης $CR \in [0,1]$ (crossover propability) και το διαφορικό βάρος $F \in [0,2]$ (differential weight) των οποίων οι τιμές έχουν μεγάλη επίδραση στην απόδοση της βελτιστοποίησης. Με τη χρήση αυτών των 3 πινάκων των 81 στοιχείων και των παραπάνω παραμέτρων, δημιουργείται ένας νέος πίνακας «y» ίσου μεγέθους όπως περιγράφεται παρακάτω. Για κάθε στοιχείο του «y», παράγεται ένας τυχαίος αριθμός $r \in (0,1)$ και αν ισχύει η συνθήκη $CR > r$ τότε υπολογίζεται το στοιχείο σύμφωνα με την εξίσωση:

$$y_i = a_i + F \times (b_i - c_i) \quad \text{αλλιώς} \quad y_i = x_i \quad (7)$$

όπου « a_i », « b_i », « c_i » και « x_i » τα i στοιχεία των αντίστοιχων γενεών, και « F » το διαφορικό βάρος.

Φυσικά γίνονται έλεγχοι και προσαρμογές στα στοιχεία που εισάγονται στο « y » πίνακα ώστε να τηρείται η μοναδικότητα των στοιχείων και ότι είναι στο εύρος 1-81. Για τη γενιά « y » ξαναγίνεται χρήση της συνάρτησης με τα αθροίσματα και αν το αποτέλεσμα είναι μικρότερο από της « x » τότε παίρνει τη θέση της στο πληθυσμό. Τέλος κρατείται η καλύτερη-μικρότερη τιμή της συνάρτησης από όλες τις επαναλήψεις (« G_{best} ») για να φανεί πόσο καλή είναι η βελτιστοποίηση που εκτελέστηκε.

Αρχικά εισάγεται στο μοντέλο στο Simulink το νέο σενάριο σκίασης, που προέκυψε ύστερα από την εικονική αναδιάταξη της συστοιχίας, καλείται το μοντέλο και παίρνονται οι καμπύλες P-V, I-V υπολογίζοντας αυξημένη ισχύ σε σχέση με πριν τη βελτιστοποίηση εξαιτίας της ομαλότητας της καμπύλης P-V λόγω μείωσης των φαινομένων bypassing. Παρακάτω δίνεται το διάγραμμα ροής της DE για την αναδιάταξη της Φ/Β συστοιχίας (Σχήμα 3.7).

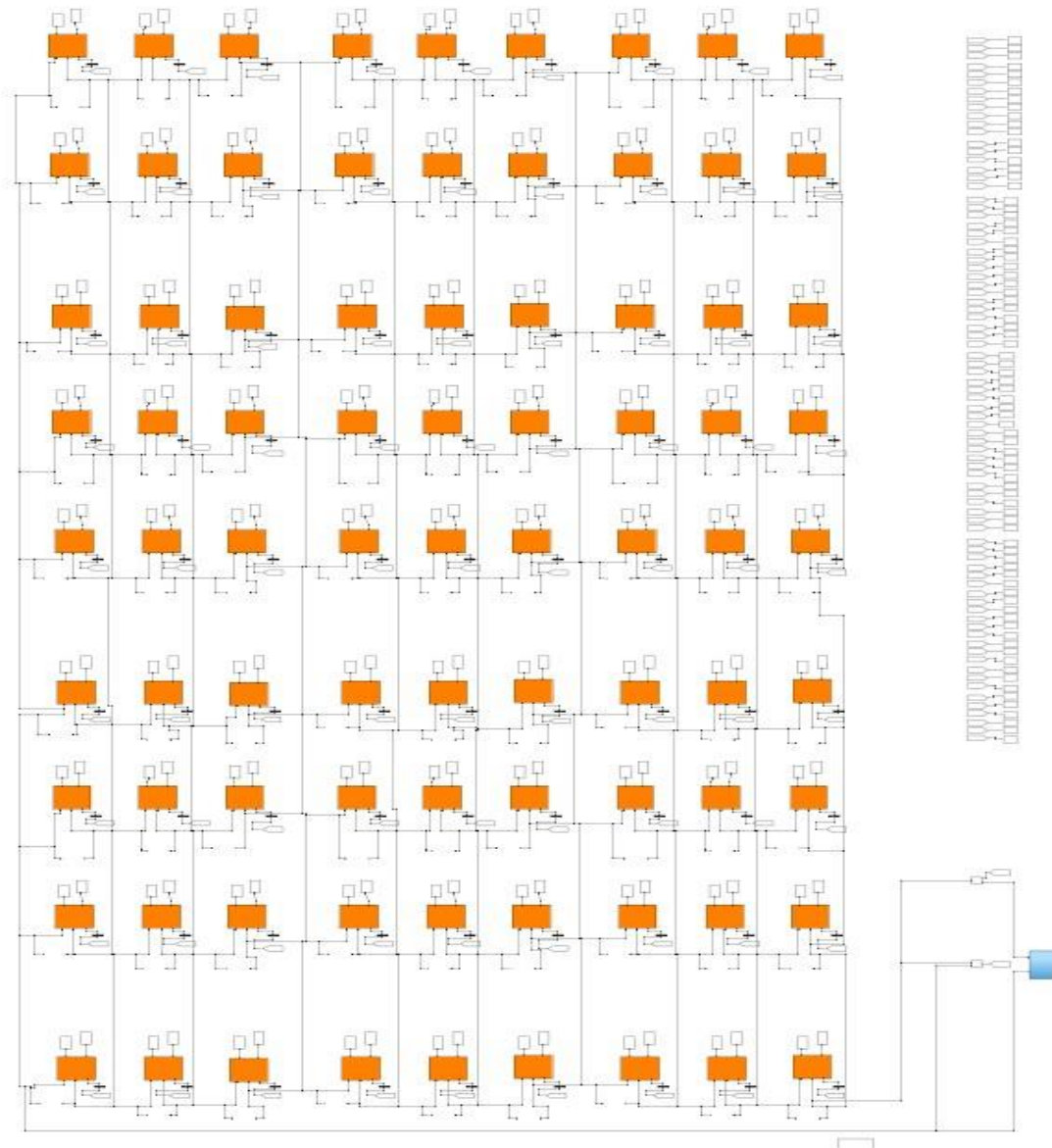


Σχήμα 3.7 Διάγραμμα ροής αλγορίθμου DE.

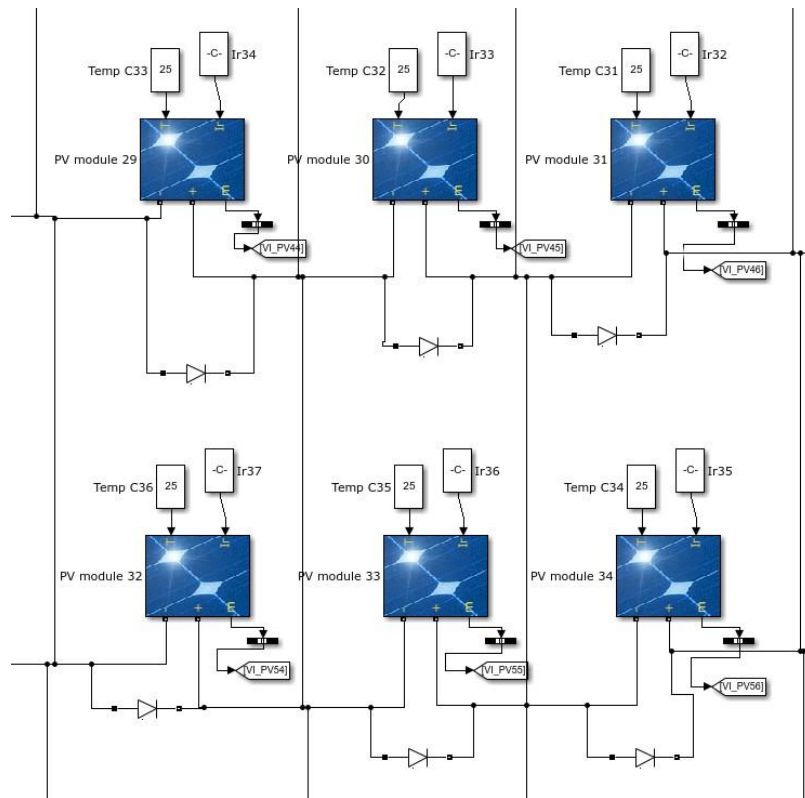
4.

Τεχνική ανάλυση υλοποίησης

Για την εκτέλεση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης και για την αναπαράσταση της Φ/Β συστοιχίας, χρησιμοποιούνται σαν εργαλεία η Matlab R2019a και το Simulink. Το μοντέλο της συστοιχίας στο Simulink είναι ένα 9x9 PV array δηλαδή 9 Φ/Β πάνελ (PV modules) σε σειρά στον οριζόντιο άξονα που το καθένα έχει 9 πάνελ παράλληλα στο κάθετο άξονα. Παρακάτω υπάρχουν εικόνες από ολόκληρο το μοντέλο (Σχήμα 4.1) και από κοντά για να φανεί ο τρόπος σύνδεσης μεταξύ των πάνελ αλλά και η bypass δίοδος που έχει το καθένα για την προστασία του (Σχήμα 4.2).

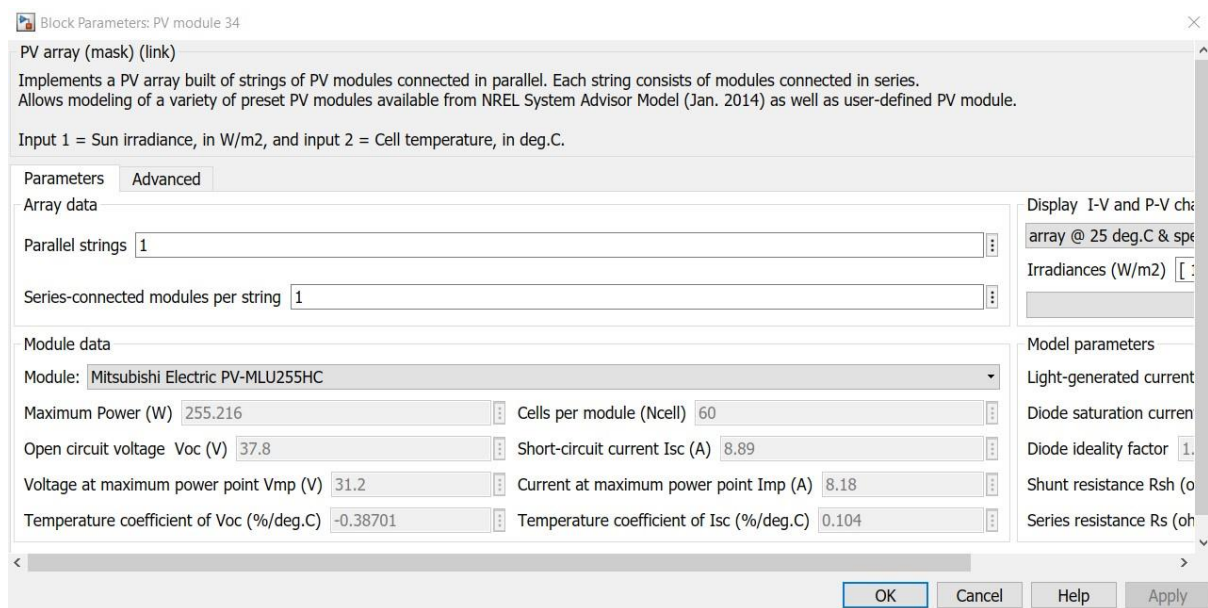


Σχήμα 4.1 Το 9x9 μοντέλο της Φ/Β συστοιχίας στο Simulink.



Σχήμα 4.2 Τα Φ/Β πάνελ της συστοιχίας.

Τα Φ/Β πάνελ που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα 255Wr PV-MLU255HC της Mitsubishi και τα χαρακτηριστικά τους φαίνονται παρακάτω.

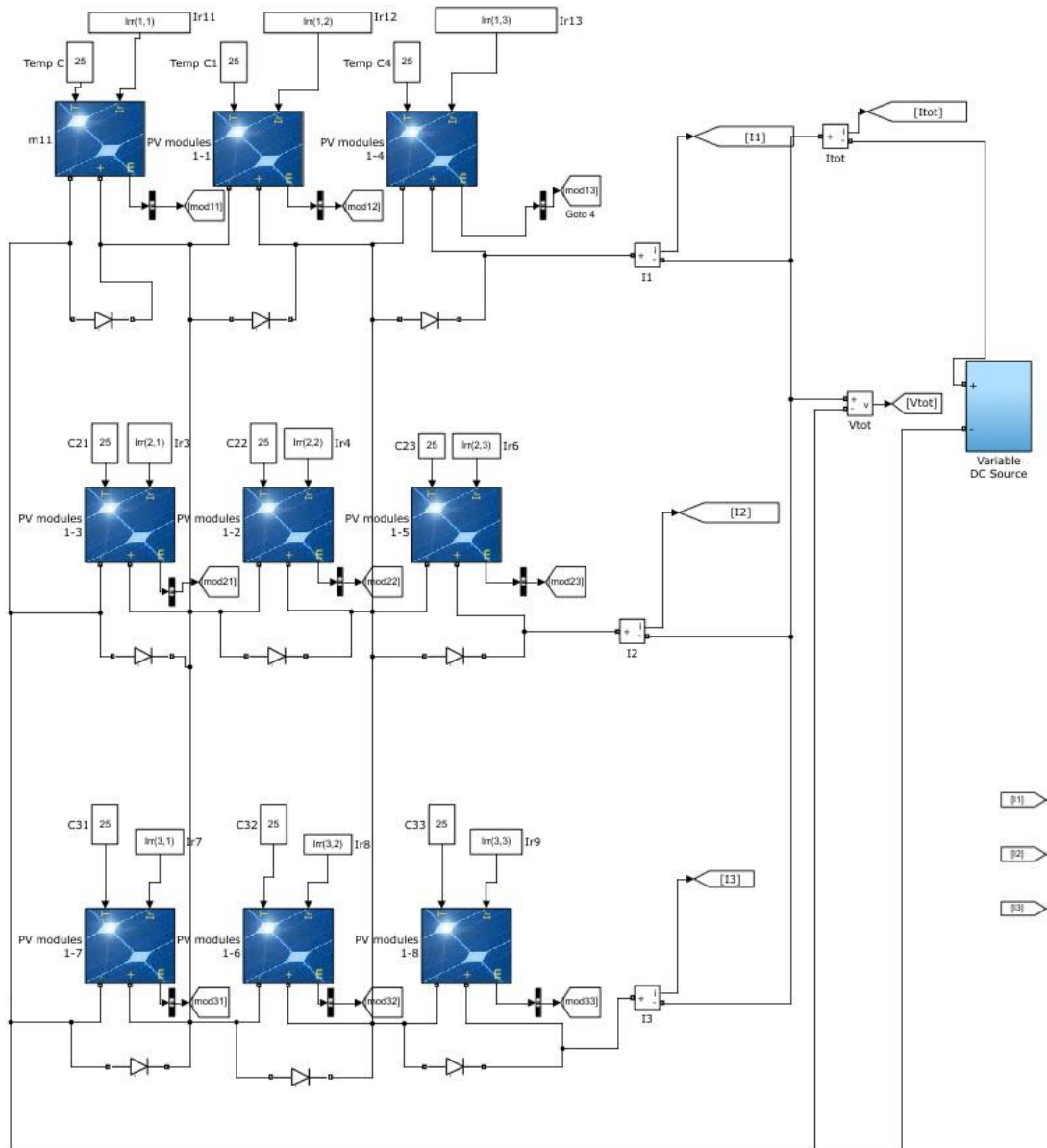


Σχήμα 4.3 Τα χαρακτηριστικά του Φ/Β πάνελ που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του Φ/Β συστήματος στο Simulink.

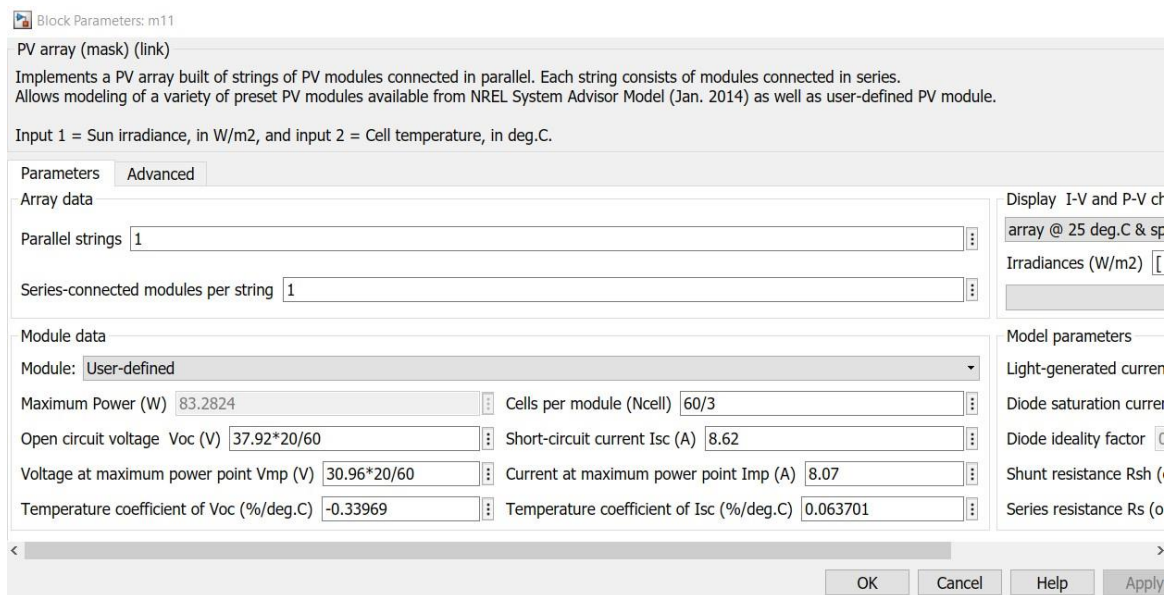
Manufacturer	MITSUBISHI ELECTRIC	
Model name	PV-MLU255HC	PV-MLU250HC
Cell type	Monocrystalline Silicon, 78mm x 156 mm	
Number of cells	120 cells	
Maximum power rating (P _{max})	255Wp	250Wp
Warranted minimum P _{max}	247.4Wp	242.5Wp
PV USA test condition rating (PTC)	230.5Wp	225.8Wp
Open circuit voltage (V _{oc})	37.8V	37.6V
Short circuit current (I _{sc})	8.89A	8.79A
Maximum power voltage (V _{mp})	31.2V	31.0V
Maximum power current (I _{mp})	8.18A	8.08A
Module efficiency	15.4%	15.1%
Aperture efficiency	16.7%	16.4%
Tolerance of maximum power rating	+3 / -3 %	
Static load test passed	5,400 Pa	
Number of bus bars per cell	4 Bus bars	
Normal operating cell temperature (NOCT)	45.7°C	
Maximum system voltage	DC 600V	
Fuse rating	15A	
Dimensions	64.0 x 40.1 x 1.81 inch (1625 x 1019 x 46 mm)	
Weight	44 lbs (20kg)	
Number of modules per pallet	20	
Number of modules per container (40 ft. container)	560	
Output terminal	[+] 800mm [-] 1250mm with MC connector (PV-KTB4/6 II-UR, PV-KST4/6 II-UR)	
Certifications	IEC 61215 2nd Edition, UL1703	
Fire rating	Class C	

Σχήμα 4.4 Τα χαρακτηριστικά του πάνελ από datasheet της Mitsubishi [15].

Στην ίδια λογική, χρησιμοποιείται κι ένα μοντέλο 3x3 PV array για την εκτέλεση των προσομοιώσεων με τη Φ/Β συστοιχία στο Simulink να φαίνεται παρακάτω, όπως και τα χαρακτηριστικά από το «user-defined» πάνελ.



Σχήμα 4.5 Το 3x3 μοντέλο της συστοιχίας στο Simulink.



Σχήμα 4.6 Τα χαρακτηριστικά του «user-defined» πάνελ στο Simulink.

Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης γράφτηκαν σε 3 matlab αρχεία (.m, ένα για κάθε αλγόριθμο) τα οποία καλούν την ίδια συνάρτηση υπολογισμού αθροισμάτων ρευμάτων. Η γενική ιδέα είναι, ότι καλείται πρώτα το μοντέλο στο Simulink με το PV array με το σενάριο σκίασης που έχουμε επιλέξει, εμφανίζει τις χαρακτηριστικές καμπύλες P-V και I-V, εκτελείται έπειτα ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης με τα δεδομένα που συλλέχτηκαν από το μοντέλο (συνολική τάση και ρεύμα), και τέλος ξανακαλείται το μοντέλο με τις αναδιατασσόμενες ακτινοβολίες που προέκυψαν στα modules εμφανίζοντας τις νέες καμπύλες P-V, I-V υπολογίζοντας αυξημένη ισχύ σε σχέση με πριν τη βελτιστοποίηση εξαιτίας της ομαλότητας της καμπύλης P-V λόγω μείωσης των φαινομένων bypassing.

5.

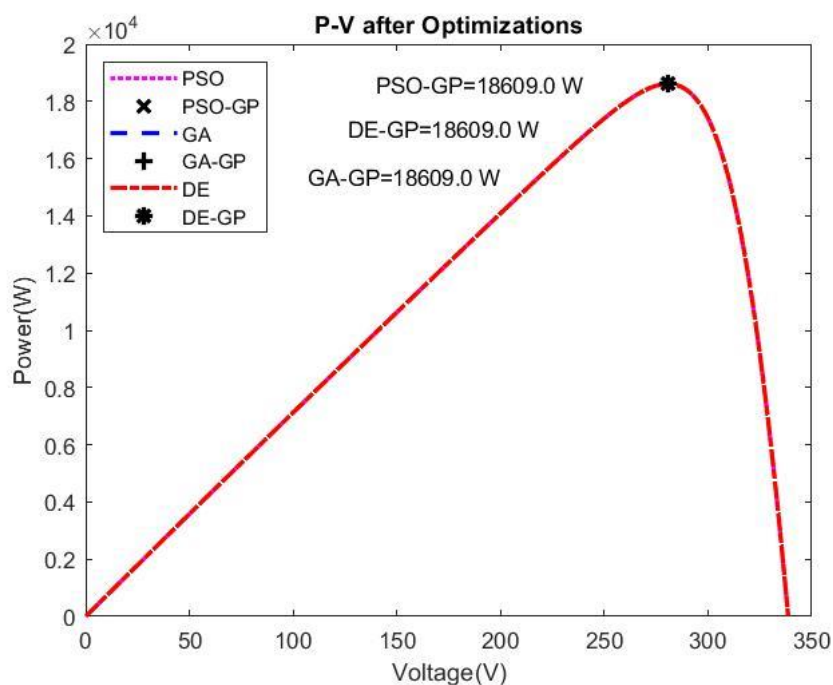
Αποτελέσματα

Για την αξιολόγηση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης που αναλύθηκαν και την χρησιμότητα τους για την αναδιάταξη Φ/Β συστοιχίας, δοκιμάστηκαν διάφορα σενάρια σκίασης σε ένα 9x9 PV array μοντέλο στο Simulink. Όλες οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν σε ένα Amd Ryzen σύστημα με επεξεργαστή 4Cores/8Threads και 16GB μνήμη χρησιμοποιώντας τη Matlab R2019a. Παρακάτω σε κάθε περίπτωση που εξετάζεται αναφέρεται η συνολική εξαγωγή ισχύος της συστοιχίας πριν και μετά τις βελτιστοποιήσεις, ο αριθμός των επαναλήψεων που εκτελέστηκε η βελτιστοποίηση, το σενάριο σκίασης στη Φ/Β συστοιχία (στις στήλες του πίνακα είναι σε σειρά τα πάνελ και στις γραμμές παράλληλα), οι καμπύλες P-V, I-V πριν και μετά τις βελτιστοποιήσεις και τα MPP των αλγορίθμων επάνω στη χαρακτηριστική P-V.

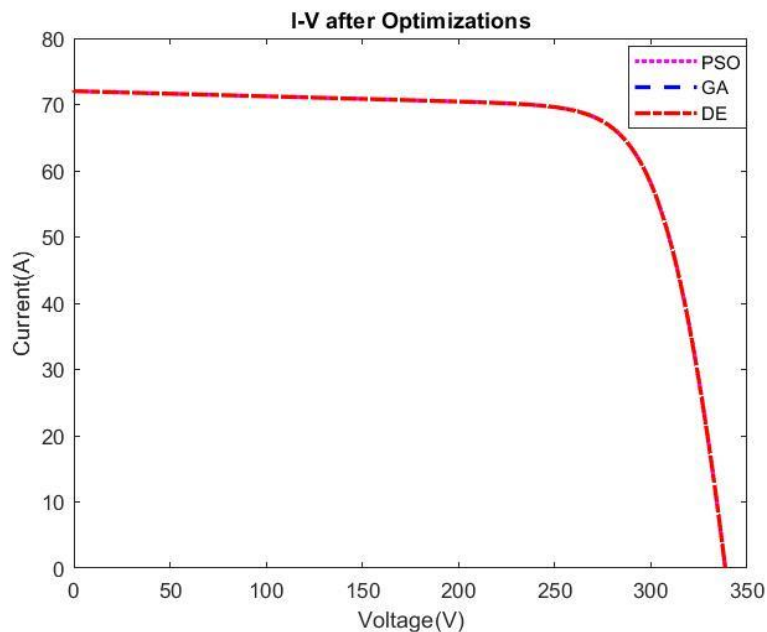
Αρχικά για ναδειχθεί ότι οι αλγόριθμοι λειτουργούν σωστά, εκτελούνται οι προσομοιώσεις με τη συστοιχία χωρίς σκίαση δηλαδή με όλα τα Φ/Β πάνελ να έχουν ακτινοβολία 900 W/m^2 (Σχήμα 5.1). Έτσι οι καμπύλες P-V και I-V είναι ταυτόσημες για όλους τους αλγορίθμους πριν και μετά την εκτέλεση τους (Σχήματα 5.2, 5.3) όπως και η συνολική εξαγωγή ισχύος της συστοιχίας είναι ίδια. Ο αριθμός των επαναλήψεων είναι 500.

11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26	27	28	29
31	32	33	34	35	36	37	38	39
41	42	43	44	45	46	47	48	49
51	52	53	54	55	56	57	58	59
61	62	63	64	65	66	67	68	69
71	72	73	74	75	76	77	78	79
81	82	83	84	85	86	87	88	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99
			900 W/m ²					

Σχήμα 5.1 Περίπτωση Φ/B συστοιχίας χωρίς σκίαση (η αρίθμηση στα κελιά του πίνακα αντιστοιχεί στις συντεταγμένες του κάθε Φ/B πάνελ).



Σχήμα 5.2 Καμπύλη P-V για την περίπτωση Φ/B συστοιχίας χωρίς σκίαση.



Σχήμα 5.3 Καμπύλη I-V για την περίπτωση Φ/B συστοιχίας χωρίς σκίαση.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα ρεύματα των πάνελ, ανάλογα την ακτινοβολία που δέχονται (Σχήμα 5.4), και τα ρεύματα των γραμμών της Φ/B συστοιχίας ανάλογα με το σενάριο σκίασης και πριν την εκτέλεση των προσομοιώσεων. Έτσι εκτός από την αύξηση της εξαγωγής ισχύος της Φ/B συστοιχίας από τη βελτιστοποίηση που πετυχαίνουν οι αλγόριθμοι, παρακάτω δίνονται η ελαχιστοποίηση των διαφορών των ρευμάτων η οποία οδήγησε σ' αυτή την αύξηση. Σε κάθε σενάριο σκίασης που ακολουθεί, δίνονται τα νέα ρεύματα γραμμής έπειτα από την εκτέλεση του εκάστοτε αλγόριθμου βελτιστοποίησης και ανατρέχοντας στο Σχήμα 5.5 μπορεί να διαπιστωθεί η ελαχιστοποίηση που αναφέρθηκε, αλλά και να συγκριθούν μεταξύ τους οι ελαχιστοποιήσεις μέσω της τελικής τιμής της συνάρτησης ελαχιστοποίησης (Best Cost) που υπολογίζει ο κάθε αλγόριθμος (PSO, GA, DE). Όσο μικρότερη είναι αυτή η τιμή τόσο πιο μικρές είναι οι διαφορές των ρευμάτων γραμμής. Επίσης δίνεται ένας θεωρητικός υπολογισμός της μέγιστης ισχύος που μπορεί να εξάγει η Φ/B συστοιχία στο ιδανικό σενάριο που δεν υπάρχει bypassing. Αυτός ο υπολογισμός (PowerNoBypass) γίνεται για κάθε σενάριο σκίασης (σύμφωνα με το τύπο 8 που ακολουθεί) και αποτελεί ένα μέτρο για το πόσο βέλτιστη είναι η προσομοίωση του κάθε αλγορίθμου.

$$\text{PowerNoBypass} = \sum_{i=1}^9 V_{mp}(i) * (\text{Ρεύμα Γραμμής}) \quad (8)$$

όπου «V_{mp}» η τάση της κάθε γραμμής παράλληλων πάνελ της Φ/Β συστοιχίας.

Ακτινοβολία (W/m ²)	Ρεύμα (A)
900	7,36
800	6,55
600	4,91
400	3,28
200	1,64

Σχήμα 5.4 Οι τιμές των ρευμάτων των πάνελ της Φ/Β συστοιχίας ανάλογα με την ακτινοβολία που δέχονται.

	Αθροίσματα ρευμάτων γραμμών (Ampere)								
Σενάρια σκίασης	1η	2η	3η	4η	5η	6η	7η	8η	9η
1ο	66,3	66,3	66,3	66,3	60,5	66,3	66,3	66,3	66,3
2ο	66,3	66,3	66,3	66,3	66,3	58,9	29,5	29,5	29,5
3ο	59,7	55,6	55,6	61,3	65,5	54,2	33,6	40,1	32,8
4ο	66,3	66,3	66,3	44,2	44,2	44,2	14,7	14,7	14,7
5ο	65,9	65,9	65,9	65,9	65,9	14,8	65,9	65,9	65,9

Σχήμα 5.5 Οι τιμές των αθροισμάτων των ρευμάτων κάθε γραμμής παράλληλων πάνελ της Φ/Β συστοιχίας ανάλογα με το σενάριο σκίασης πριν την εκτέλεση των προσομοιώσεων.

Στο 1^ο σενάριο σκίασης έχει διαφορετική ακτινοβολία μόνο ένα πάνελ της συστοιχίας (Σχήμα 5.6). Οι καμπύλες P-V και I-V είναι ταυτόσημες για όλους τους αλγορίθμους πριν και μετά την εκτέλεση τους (Σχήματα 5.10, 5.11) όπως και η συνολική εξαγωγή ισχύος της συστοιχίας είναι παρόμοια. Το μόνο που αλλάζει μετά τις προσομοιώσεις αλλά δεν επηρεάζει το MPP, είναι το σε ποια γραμμή εμφανίζεται το μοναδικό διαφορετικό άθροισμα ρευμάτων γραμμής παράλληλων πάνελ λόγω αλλαγής θέσης του σκιασμένου πάνελ μετά την αναδιάταξη στη συστοιχία (Σχήματα 5.7, 5.8, 5.9). Ο αριθμός των επαναλήψεων είναι 500.

11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26	27	28	29
31	32	33	34	35	36	37	38	39
41	42	43	44	45	46	47	48	49
51	52	53	54	55	56	57	58	59
61	62	63	64	65	66	67	68	69
71	72	73	74	75	76	77	78	79
81	82	83	84	85	86	87	88	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99
			900 W/m ²			200 W/m ²		

Σχήμα 5.6 1^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία (η αρίθμηση στα κελιά του πίνακα αντιστοιχεί στις συντεταγμένες του κάθε Φ/B πάνελ).

									ΣΙ (Ampere)
11	12	13	14	15	16	17	18	19	→ 60.5
21	22	23	24	25	26	27	28	29	→ 66.3
31	32	33	34	35	36	37	38	39	→ 66.3
41	42	43	44	45	46	47	48	49	→ 66.3
51	52	53	54	55	56	57	58	59	→ 66.3
61	62	63	64	65	66	67	68	69	→ 66.3
71	72	73	74	75	76	77	78	79	→ 66.3
81	82	83	84	85	86	87	88	89	→ 66.3
91	92	93	94	95	96	97	98	99	→ 66.3
	900 W/m ²								
			200 W/m ²						

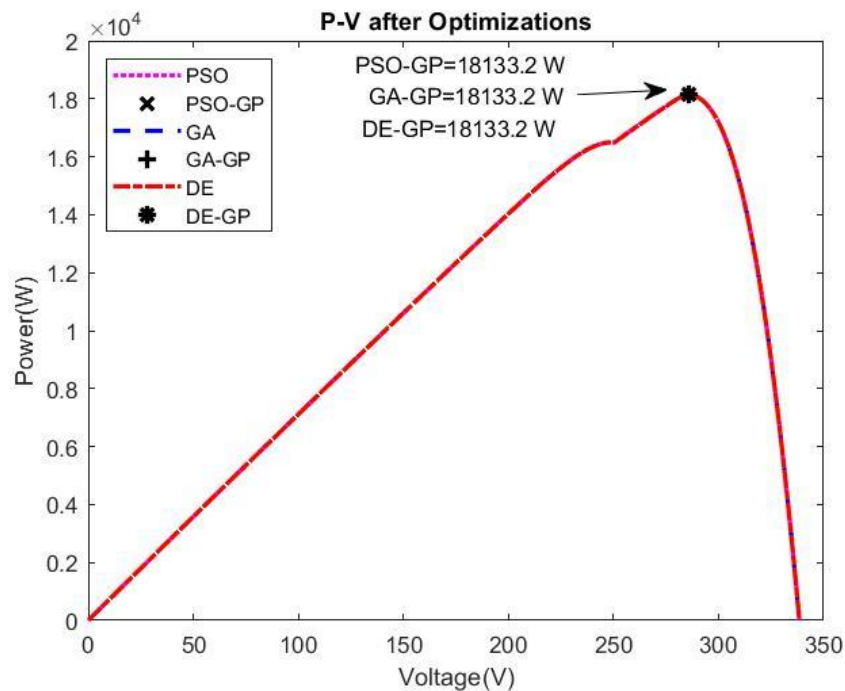
Σχήμα 5.7 1^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου PSO (η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, η αρίθμηση στα κελιά του πίνακα αντιστοιχεί στις συντεταγμένες του κάθε Φ/B πάνελ).

11	12	13	14	15	16	17	18	19	→	ΣΙ (Ampere)
21	22	23	24	25	26	27	28	29	→	66.3
31	32	33	34	35	36	37	38	39	→	66.3
41	42	43	44	45	46	47	48	49	→	66.3
51	52	53	54	55	56	57	58	59	→	66.3
61	62	63	64	65	66	67	68	69	→	60.5
71	72	73	74	75	76	77	78	79	→	66.3
81	82	83	84	85	86	87	88	89	→	66.3
91	92	93	94	95	96	97	98	99	→	66.3
	900 W/m ²		200 W/m ²							

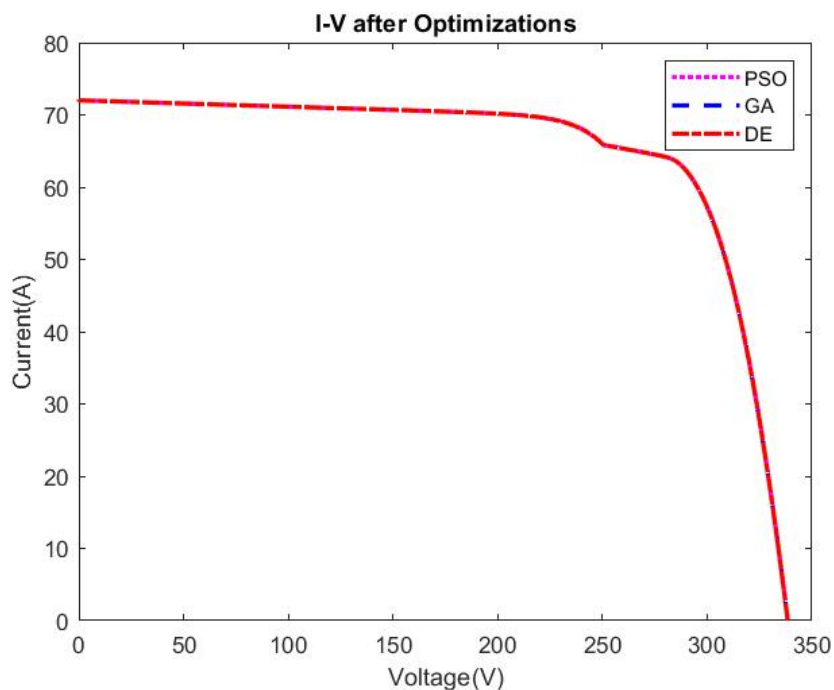
Σχήμα 5.8 1^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου GA (η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, η αρίθμηση στα κελιά του πίνακα αντιστοιχεί στις συντεταγμένες του κάθε Φ/Β πάνελ).

11	12	13	14	15	16	17	18	19	→	ΣΙ (Ampere)
21	22	23	24	25	26	27	28	29	→	66.3
31	32	33	34	35	36	37	38	39	→	66.3
41	42	43	44	45	46	47	48	49	→	66.3
51	52	53	54	55	56	57	58	59	→	60.5
61	62	63	64	65	66	67	68	69	→	66.3
71	72	73	74	75	76	77	78	79	→	66.3
81	82	83	84	85	86	87	88	89	→	66.3
91	92	93	94	95	96	97	98	99	→	66.3
	900 W/m ²		200 W/m ²							

Σχήμα 5.9 1^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου DE (η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, η αρίθμηση στα κελιά του πίνακα αντιστοιχεί στις συντεταγμένες του κάθε Φ/Β πάνελ).



Σχήμα 5.10 Καμπύλη P-V στο 1^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία.

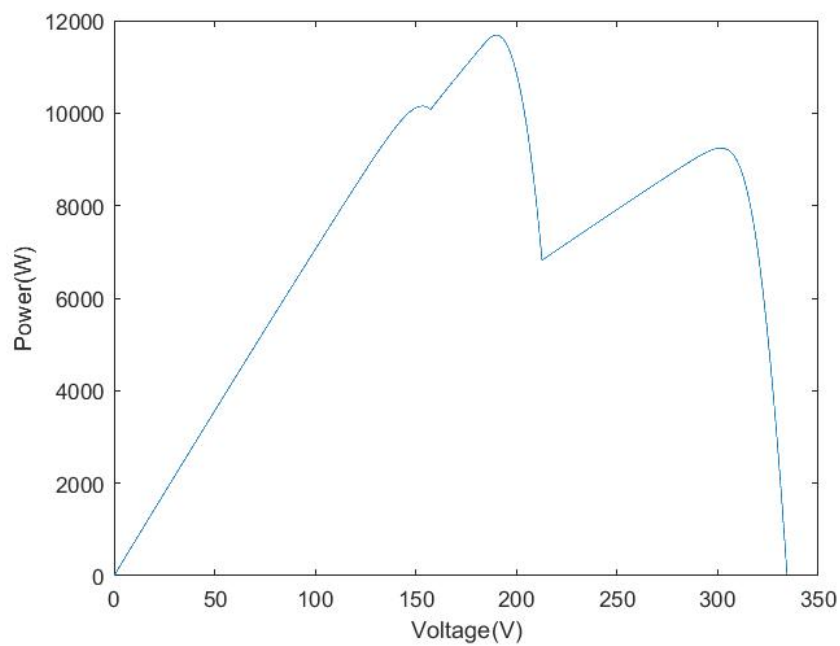


Σχήμα 5.11 Καμπύλη I-V στο 1^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία.

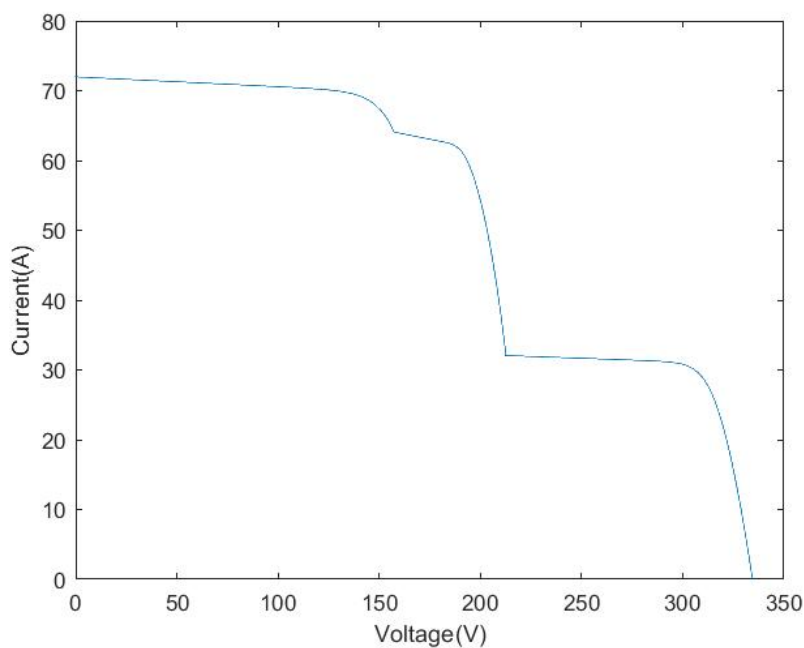
Το 2^ο σενάριο σκίασης είναι πιο ενδεικτικό για την βελτιστοποίηση του προβλήματος αφού έχει πολλαπλά επίπεδα σκίασης όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.12. Η αρχική συνολική εξαγωγή ισχύος της συστοιχίας πριν τις βελτιστοποιήσεις είναι 11688 W. Στις 500 επαναλήψεις, η εκτέλεση του PSO αυξάνει αυτήν την τιμή στα 14659 W, του GA στα 14880 W και της DE στα 14700 W. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα στις 1000 επαναλήψεις εκτέλεσης των αλγορίθμων είναι 14768 W, 14887 W και 14722 W. Παρατηρείται ότι οι παραπάνω τιμές βρίσκονται αρκετά κοντά στο μέγιστο όριο ισχύος (το PowerNoBypass όπως εξηγήθηκε παραπάνω) για το συγκεκριμένο σενάριο σκίασης που είναι 14924 W. Αυτό αποδεικνύει ότι η διασπορά της σκίασης έγινε ομοιόμορφα στη Φ/Β συστοιχία και οι παρακάμψεις των πάνελ μειώθηκαν στο ελάχιστο.

11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26	27	28	29
31	32	33	34	35	36	37	38	39
41	42	43	44	45	46	47	48	49
51	52	53	54	55	56	57	58	59
61	62	63	64	65	66	67	68	69
71	72	73	74	75	76	77	78	79
81	82	83	84	85	86	87	88	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99
	900 W/m ²							
	800 W/m ²		600 W/m ²		400 W/m ²		200 W/m ²	

Σχήμα 5.12 2^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία (η αρίθμηση στα κελιά του πίνακα αντιστοιχεί στις συντεταγμένες του κάθε Φ/Β πάνελ).

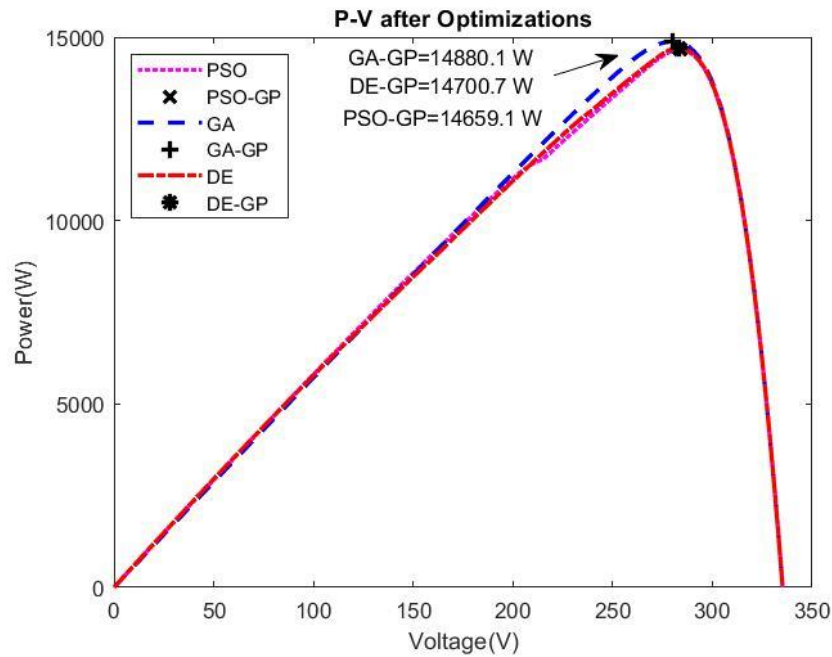


Σχήμα 5.13 Καμπύλη $P-V$ (πριν την αναδιάταξη των πάνελ) στο 2^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία.

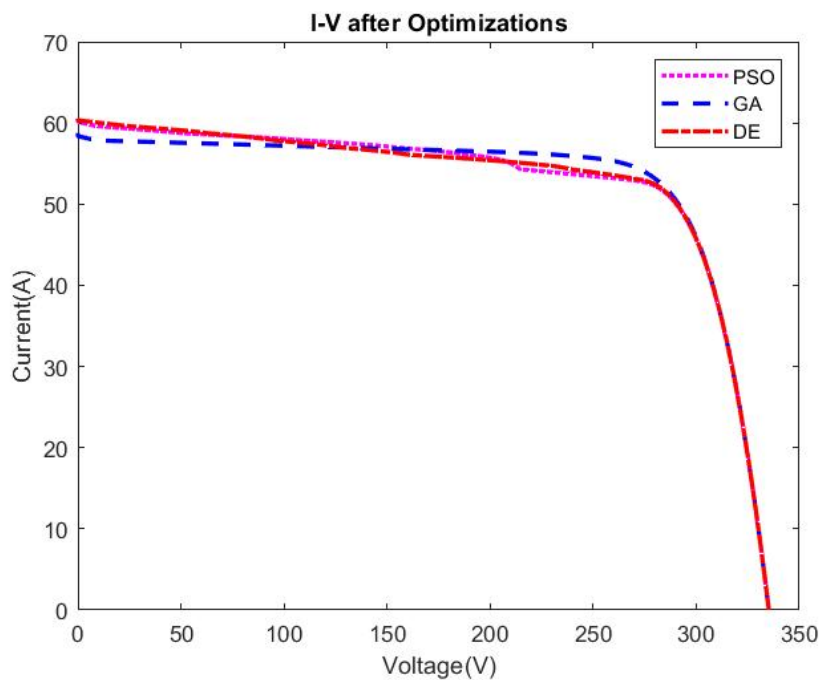


Σχήμα 5.14 Καμπύλη $P-V$ (πριν την αναδιάταξη των πάνελ) στο 2^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία.

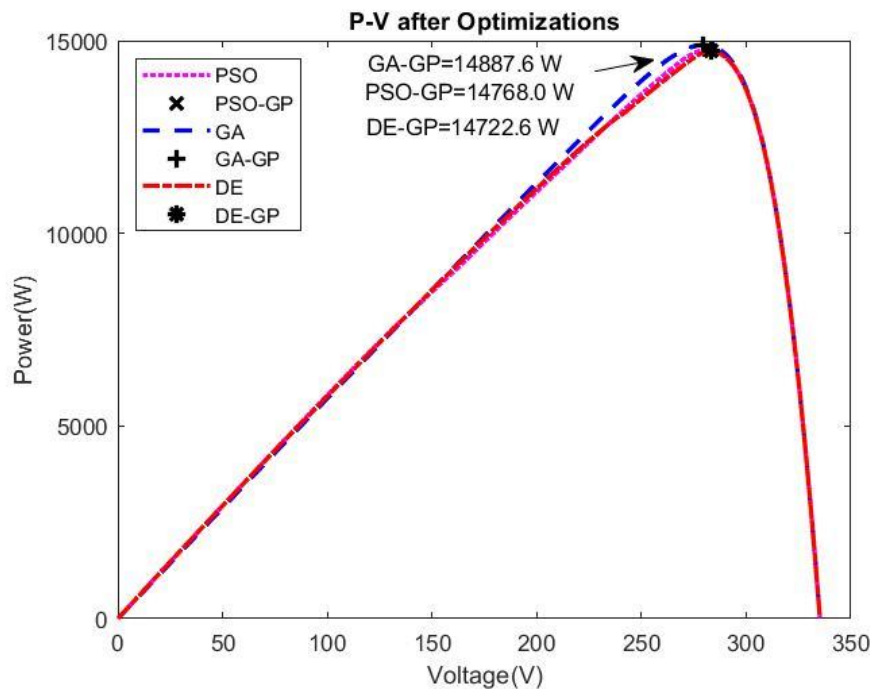
Παρακάτω φαίνονται οι καμπύλες P-V και I-V στις 500 και 1000 επαναλήψεις (Σχήματα 5.15-5.18).



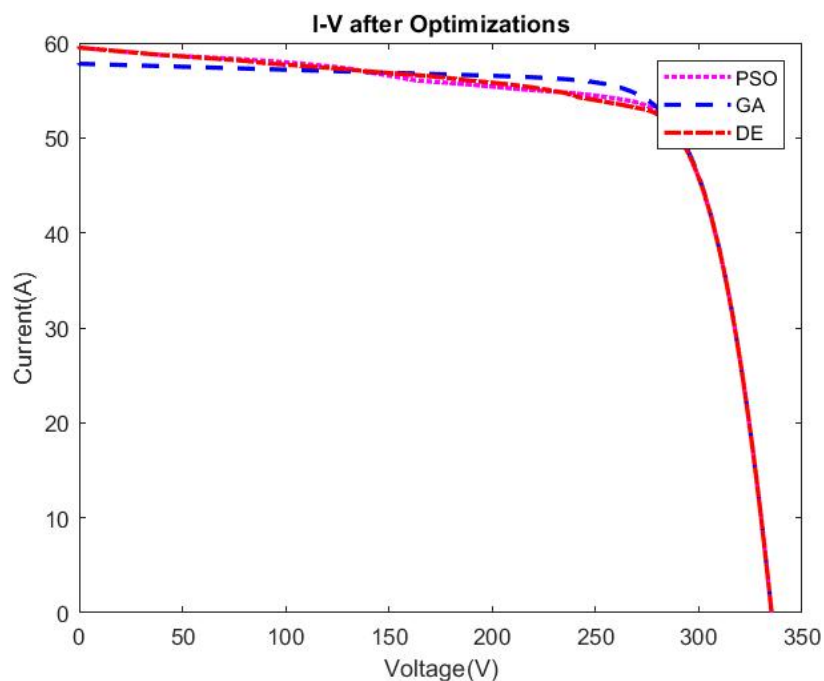
Σχήμα 5.15 Καμπύλη P-V στο 2^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία (500 επαναλήψεις).



Σχήμα 5.16 Καμπύλη I-V στο 2^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία (500 επαναλήψεις).



Σχήμα 5.17 Καμπύλη P-V στο 2^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία (1000 επαναλήψεις).



Σχήμα 5.18 Καμπύλη I-V στο 2^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία (1000 επαναλήψεις).

Στα Σχήματα 5.19-5.24 φαίνεται η Φ/B συστοιχία μετά την αναδιάταξη, έπειτα από την εκτέλεση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης PSO, GA και DE. Είναι σε 2 σενάρια

βελτιστοποιήσεων με 500 και 1000 επαναλήψεις, αντίστοιχα. Επίσης φαίνονται οι τελικές τιμές της συνάρτησης ελαχιστοποίησης (BestCost) που όσο μικρότερες είναι, ανάλογα μικρότερες είναι και οι διαφορές των αθροισμάτων των γραμμών (τα οποία αντιστοιχούν στη τελευταία στήλη). Από τη σύγκριση με το Σχήμα 5.5, όπου φαίνονται τα αρχικά αθροίσματα ρευμάτων γραμμών για όλα τα σενάρια σκίασης, συμπεραίνεται η ελαχιστοποίηση αυτών των διαφορών λόγω των βελτιστοποιήσεων.

					Best Cost =22.08					ΣI (Ampere)
200	900	200	800	900	800	900	900	900	→	53,2
900	900	400	900	900	400	900	900	600	→	55,6
900	900	400	900	900	200	900	800	800	→	54,8
900	900	800	400	900	900	900	600	400	→	54,8
200	900	200	600	900	900	900	900	900	→	52,4
900	400	600	900	200	900	900	900	900	→	54
800	600	400	800	200	900	900	600	900	→	49,9
900	600	900	800	600	200	900	800	400	→	49,9
200	900	900	900	900	600	900	400	900	→	54
	900 W/m ²		800 W/m ²		600 W/m ²		400 W/m ²		200 W/m ²	

Σχήμα 5.19 2^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου PSO (500 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

					Best Cost =7.27					ΣI (Ampere)
400	900	900	900	600	900	200	900	800	→	53,2
900	800	900	900	800	200	900	900	200	→	53,2
900	200	900	900	600	900	200	900	900	→	52,4
900	600	400	800	600	900	600	800	900	→	53,2
900	900	800	900	900	200	200	800	900	→	53,2
800	900	900	900	900	400	200	900	600	→	53,2
600	200	900	900	900	900	400	900	900	→	54
600	400	400	900	900	900	900	600	900	→	53,2
900	400	900	900	900	400	400	900	800	→	53,2
	900 W/m ²		800 W/m ²		600 W/m ²		400 W/m ²		200 W/m ²	

Σχήμα 5.20 2^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου GA (500 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

Best Cost =22.02									ΣΙ (Ampere)	
800	600	900	900	900	600	400	400	600	→	49,9
900	900	900	900	800	800	800	200	200	→	52,4
900	900	900	600	900	200	900	900	600	→	55,6
900	600	900	900	900	900	900	200	600	→	55,6
200	900	200	900	900	900	900	900	900	→	54,8
800	900	400	900	400	400	900	900	900	→	53,2
900	900	900	900	800	900	200	200	600	→	51,5
400	400	900	900	400	900	600	900	900	→	51,5
900	800	900	200	400	800	900	800	900	→	54
900 W/m ²		800 W/m ²		600 W/m ²		400 W/m ²		200 W/m ²		

Σχήμα 5.21 2^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου DE (500 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

Best Cost =14,73									ΣΙ (Ampere)	
900	900	900	800	400	400	900	600	900	→	54,8
800	900	900	400	900	200	800	400	900	→	50,7
900	800	900	400	800	900	900	900	200	→	54,8
600	600	900	600	900	400	900	900	800	→	54
900	900	900	600	400	600	200	900	900	→	51,5
900	400	900	900	400	900	900	900	200	→	52,4
900	900	600	900	900	800	200	900	200	→	51,5
900	900	900	900	900	900	200	200	800	→	54
900	800	200	600	900	900	900	600	900	→	54,8
900 W/m ²		800 W/m ²		600 W/m ²		400 W/m ²		200 W/m ²		

Σχήμα 5.22 2^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου PSO (1000 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

					Best Cost <1					ΣI (Ampere)
900	900	800	900	400	900	600	900	200	→	53,2
400	900	800	900	900	400	900	900	400	→	53,2
900	400	900	900	900	900	200	600	800	→	53,2
400	900	200	900	900	600	800	900	900	→	53,2
900	900	800	900	200	900	800	200	900	→	53,2
900	900	900	400	900	200	900	800	600	→	53,2
900	600	400	200	800	900	900	900	900	→	53,2
900	900	200	900	600	900	900	600	600	→	53,2
900	800	600	900	400	900	900	200	900	→	53,2
	900 W/m ²		800 W/m ²		600 W/m ²		400 W/m ²		200 W/m ²	

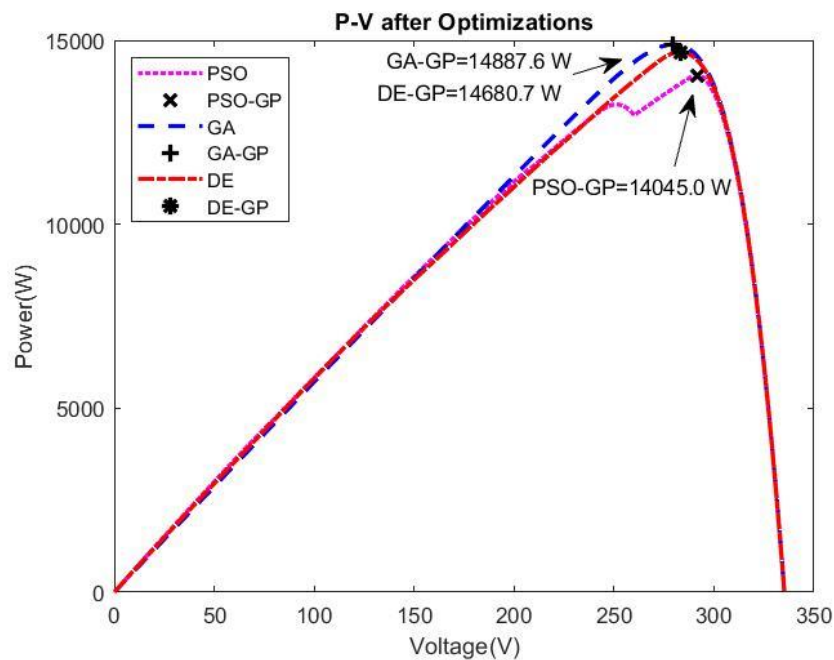
Σχήμα 5.23 2^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου GA (1000 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

					Best Cost =14.82					ΣI (Ampere)
900	900	900	900	900	400	600	600	600	→	54,8
200	400	900	900	800	800	900	900	900	→	54,8
900	900	800	800	200	900	400	800	800	→	53,2
400	200	900	900	400	800	900	800	800	→	49,9
900	900	900	900	900	200	200	900	900	→	54,8
900	400	600	900	400	900	900	600	900	→	53,2
900	900	900	600	200	900	200	900	900	→	52,4
600	900	400	200	900	900	900	900	600	→	51,5
900	400	900	200	900	900	900	600	900	→	54
	900 W/m ²		800 W/m ²		600 W/m ²		400 W/m ²		200 W/m ²	

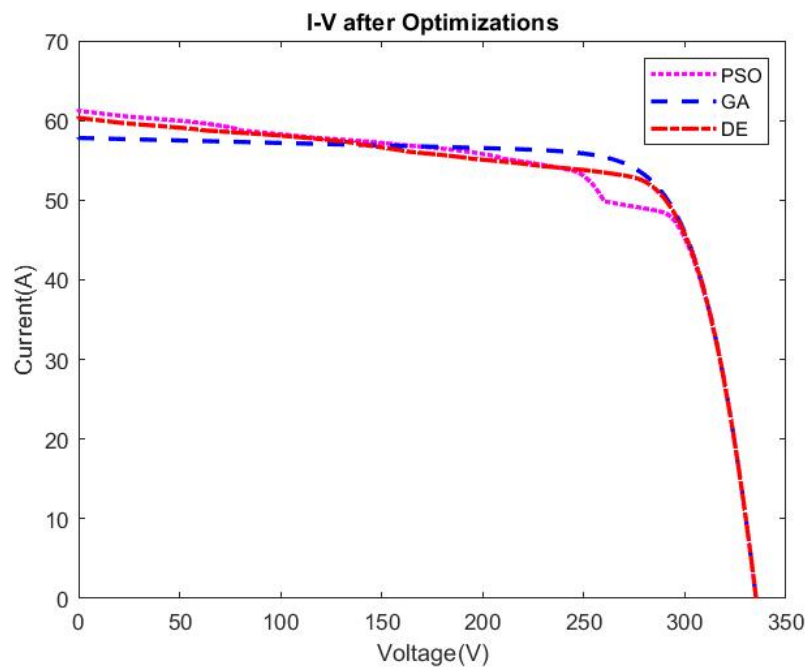
Σχήμα 5.24 2^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου DE (1000 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

Στη συνέχεια, οι βελτιστοποιήσεις εκτελούνται σε 100 και 5000 επαναλήψεις και φαίνονται οι αντίστοιχες καμπύλες P-V και I-V (Σχήματα 5.25-5.28) και η διασπορά της σκίασης μετά την αναδιάταξη της Φ/Β συστοιχίας (Σχήματα 5.29-5.34). Παρατηρείται ότι ακόμη και στις 100 επαναλήψεις οι βελτιστοποιήσεις παράγουν ικανοποιητικά αποτελέσματα και άρα οι 5000 είναι πλεονασμός και άσκοπη σπατάλη υπολογιστικών πόρων (βλέπε και Σχήμα 5.76), από τη στιγμή μάλιστα που δεν παράγουν πιο βέλτιστες λύσεις από τα προηγούμενα αποτελέσματα που

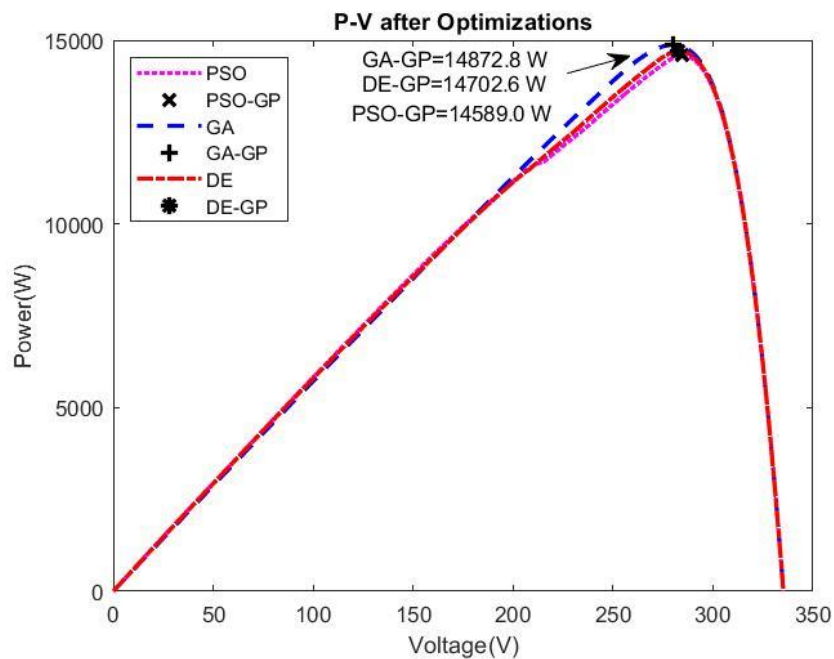
παρατέθηκαν. Γι' αυτό και επιλέγεται οι βελτιστοποιήσεις να εκτελούνται στις 500 και 1000 επαναλήψεις για την κάλυψη μιας ευρείας γκάμας σεναρίων σκίασης.



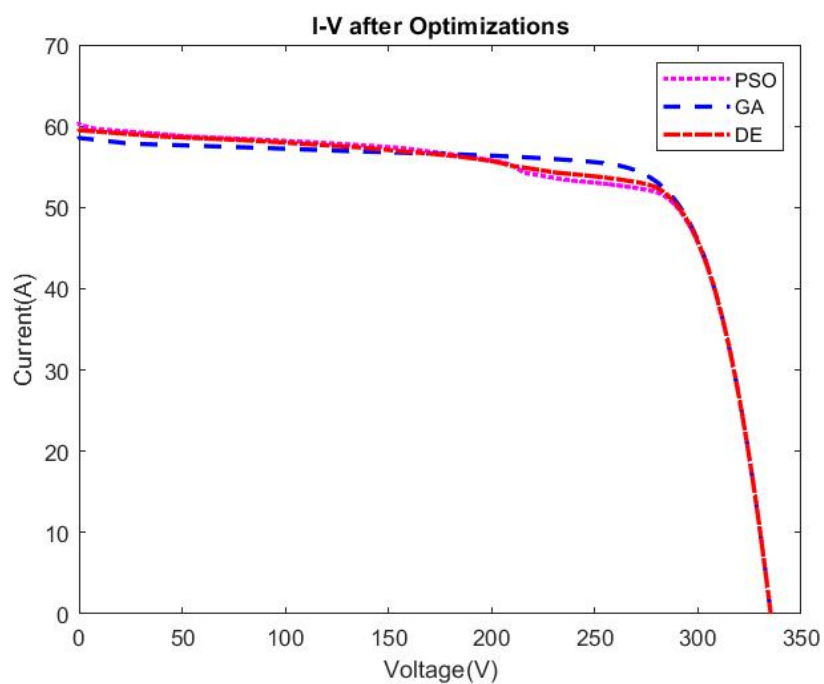
Σχήμα 5.25 Καμπύλη P-V στο 2^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία (100 επαναλήψεις).



Σχήμα 5.26 Καμπύλη I-V στο 2^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία (100 επαναλήψεις).



Σχήμα 5.27 Καμπύλη P-V στο 2^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία (5000 επαναλήψεις).



Σχήμα 5.28 Καμπύλη I-V στο 2^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία (5000 επαναλήψεις).

Best Cost =29.47									ΣΙ (Ampere)	
900	900	900	600	600	400	800	400	900	→	52,4
900	600	900	900	200	900	900	400	900	→	54
900	900	900	900	200	800	900	800	200	→	53,2
200	800	200	400	900	900	900	400	900	→	45,8
900	400	400	900	900	900	900	600	900	→	55,6
900	400	200	600	600	900	900	900	800	→	50,7
800	600	800	900	600	200	900	900	900	→	54
900	900	900	200	900	400	900	900	900	→	56,4
900	900	200	800	900	900	800	600	900	→	56,5
900 W/m ²		800 W/m ²		600 W/m ²		400 W/m ²		200 W/m ²		

Σχήμα 5.29 2^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου PSO (100 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

Best Cost <1									ΣΙ (Ampere)	
800	900	900	800	200	900	900	900	200	→	53,2
400	600	400	900	600	900	900	900	900	→	53,2
900	400	900	200	900	600	800	900	900	→	53,2
900	900	900	200	400	900	600	800	900	→	53,2
200	900	900	400	900	900	900	600	800	→	53,2
800	200	400	900	900	600	900	900	900	→	53,2
900	600	800	900	400	900	900	900	200	→	53,2
200	900	800	400	900	900	900	600	900	→	53,2
900	800	900	900	900	200	400	600	900	→	53,2
900 W/m ²		800 W/m ²		600 W/m ²		400 W/m ²		200 W/m ²		

Σχήμα 5.30 2^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου GA (100 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

					Best Cost =22.09					ΣΙ (Ampere)
600	900	900	900	900	400	600	600	600	→	52,4
900	600	800	900	800	800	900	800	200	→	54,8
900	900	800	200	200	900	900	900	900	→	54
800	900	900	400	900	200	900	900	900	→	55,6
900	900	200	900	400	900	800	400	900	→	51,5
800	900	600	900	400	600	900	900	200	→	50,7
400	900	900	900	400	900	600	900	900	→	55,6
800	200	200	900	900	400	900	900	900	→	49,9
200	900	900	900	900	400	600	900	900	→	54
	900 W/m ²		800 W/m ²		600 W/m ²		400 W/m ²		200 W/m ²	

Σχήμα 5.31 2^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου DE (100 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

					Best Cost =22.03					ΣΙ (Ampere)
900	900	900	900	900	400	600	800	400	→	54,8
900	900	200	900	800	600	600	900	900	→	54,8
600	900	900	200	600	900	800	900	800	→	54
900	800	900	200	400	900	900	200	900	→	49,9
200	800	900	400	900	900	600	400	900	→	49,1
900	900	900	900	800	900	900	400	200	→	55,6
400	900	900	900	400	200	900	900	900	→	52,4
800	600	900	600	900	900	600	900	400	→	54
900	800	900	900	900	900	200	200	900	→	54
	900 W/m ²		800 W/m ²		600 W/m ²		400 W/m ²		200 W/m ²	

Σχήμα 5.32 2^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου PSO (5000 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

Best Cost = 7.28									ΣΙ (Ampere)
900	900	400	900	400	900	200	900	900	→ 52,4
600	900	800	400	600	900	600	900	800	→ 53,2
400	900	800	900	400	900	900	900	400	→ 53,2
200	900	900	900	200	900	900	800	900	→ 54
900	600	900	200	900	600	900	900	600	→ 53,2
900	200	900	900	900	600	900	200	900	→ 52,4
900	800	800	800	200	800	900	400	900	→ 53,2
900	900	900	900	200	900	900	600	400	→ 54
200	900	600	900	900	800	400	900	900	→ 53,2
900 W/m ²		800 W/m ²		600 W/m ²		400 W/m ²		200 W/m ²	

Σχήμα 5.33 2^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου GA (5000 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

Best Cost = 14.68									ΣΙ (Ampere)
900	900	900	900	900	400	600	600	600	→ 54,8
800	900	400	900	800	900	800	900	200	→ 54
200	900	600	900	400	900	900	400	900	→ 49,9
400	800	800	900	900	900	600	900	400	→ 54
200	900	900	900	900	900	900	900	200	→ 54,8
200	400	400	900	900	900	900	900	900	→ 52,4
900	900	600	600	200	900	900	900	800	→ 54,8
900	900	900	900	900	200	600	800	400	→ 53,2
900	200	900	900	900	800	600	800	200	→ 50,7
900 W/m ²		800 W/m ²		600 W/m ²		400 W/m ²		200 W/m ²	

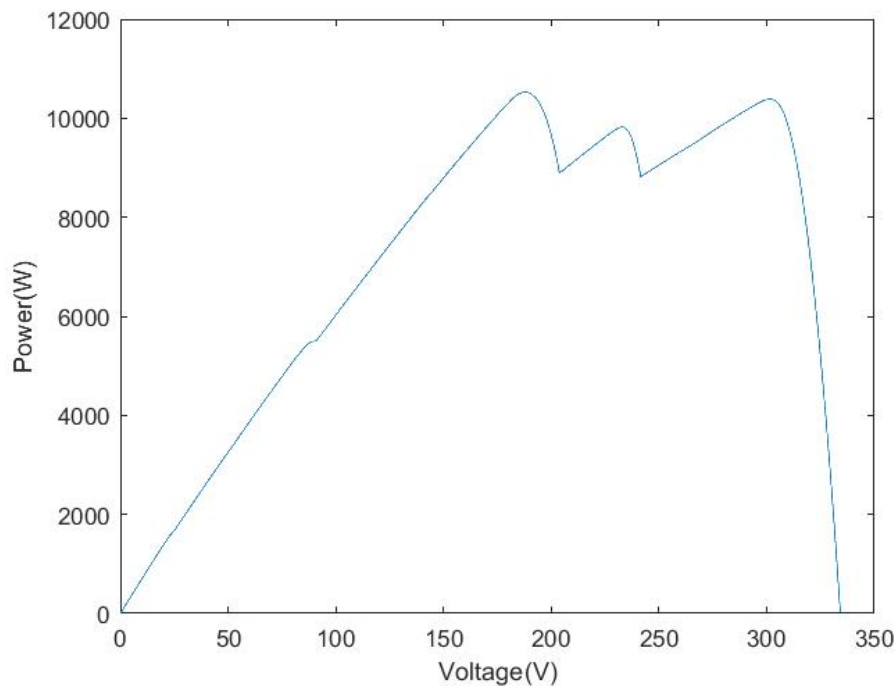
Σχήμα 5.34 2^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου DE (5000 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

Στη συνέχεια ακολουθεί ένα σενάριο σκίασης (3^ο) στο οποίο οι ακτινοβολίες στη συστοιχία δεν ακολουθούν κάποιο μοτίβο και είναι ακανόνιστα κατανεμημένες (Σχήμα 5.35). Σε αυτή την περίπτωση είναι πιο ευδιάκριτες οι διαφορές μεταξύ των αλγορίθμων. Η αρχική συνολική εξαγωγή ισχύος της συστοιχίας πριν τις βελτιστοποιήσεις είναι 10528 W. Στις 500 επαναλήψεις, η εκτέλεση του PSO αυξάνει αυτήν την τιμή στα 13329 W, του GA στα 14237 W και της DE στα 14081 W. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα στις 1000 επαναλήψεις εκτέλεσης των αλγορίθμων

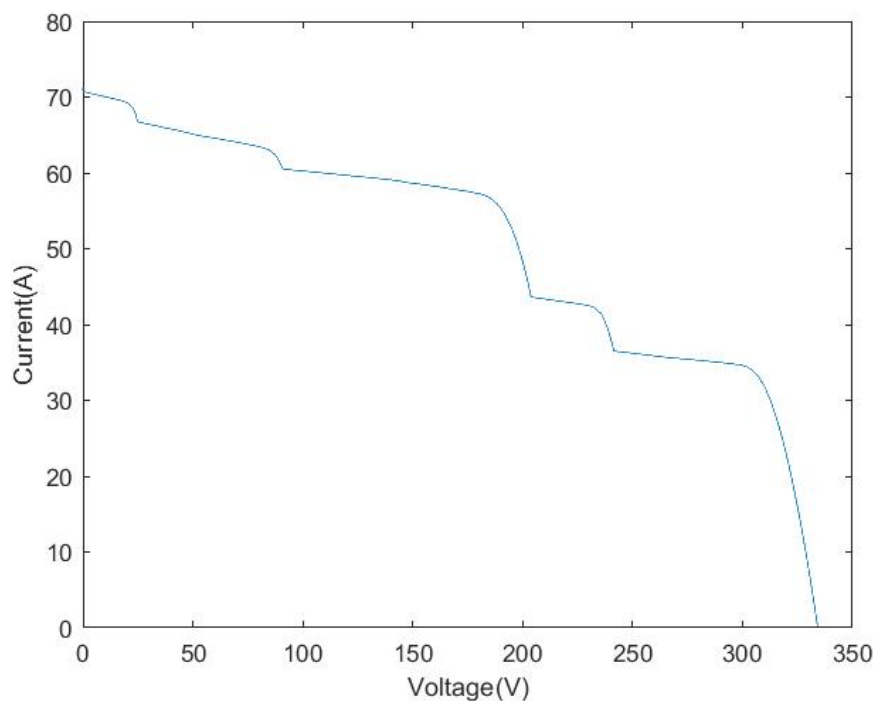
είναι 13672 W, 14228 W και 13945 W. Παρατηρείται ότι οι παραπάνω τιμές βρίσκονται αρκετά κοντά στο μέγιστο όριο ισχύος (το PowerNoBypass όπως εξηγήθηκε παραπάνω) για το συγκεκριμένο σενάριο σκίασης που είναι 14237 W με εξαίρεση του PSO που υστερεί αρκετά σε σχέση με τους άλλους 2 αλγόριθμους. Αυτό φυσικά δεν αναιρεί το γεγονός ότι και ο PSO αυξάνει σημαντικά την αρχική εξαγωγή ισχύος της συστοιχίας. Αυτό αποδεικνύει ότι η διασπορά της σκίασης έγινε ομοιόμορφα στη Φ/Β συστοιχία και οι παρακάμψεις των πάνελ μειώθηκαν στο ελάχιστο δυνατό κατά περίπτωση.

11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26	27	28	29
31	32	33	34	35	36	37	38	39
41	42	43	44	45	46	47	48	49
51	52	53	54	55	56	57	58	59
61	62	63	64	65	66	67	68	69
71	72	73	74	75	76	77	78	79
81	82	83	84	85	86	87	88	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99
	900 W/m ²							
	800 W/m ²		600 W/m ²		400 W/m ²		200 W/m ²	

Σχήμα 5.35 3^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία (η αρίθμηση στα κελιά του πίνακα αντιστοιχεί στις συντεταγμένες του κάθε Φ/Β πάνελ).

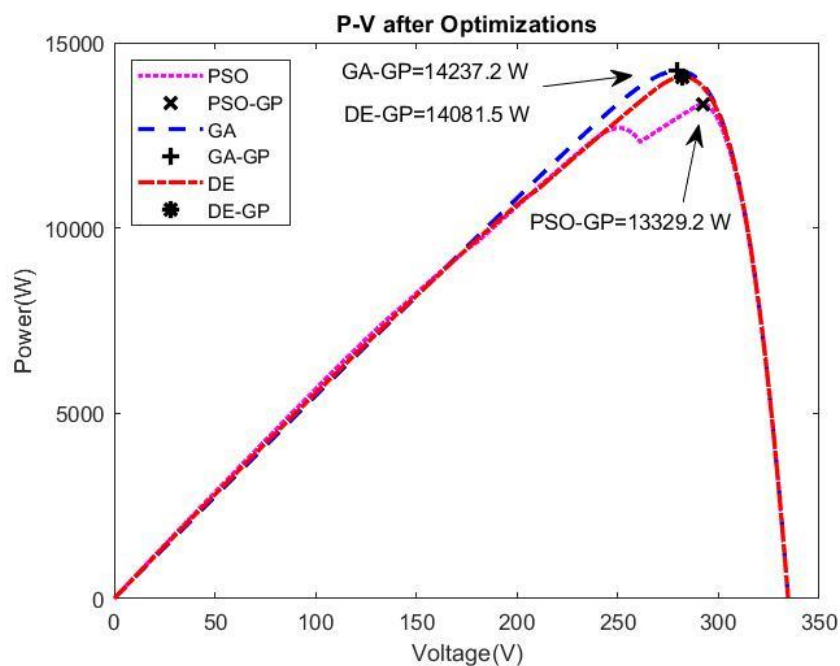


Σχήμα 5.36 Καμπύλη P-V (πριν την αναδιάταξη των πάνελ) στο 3^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία.

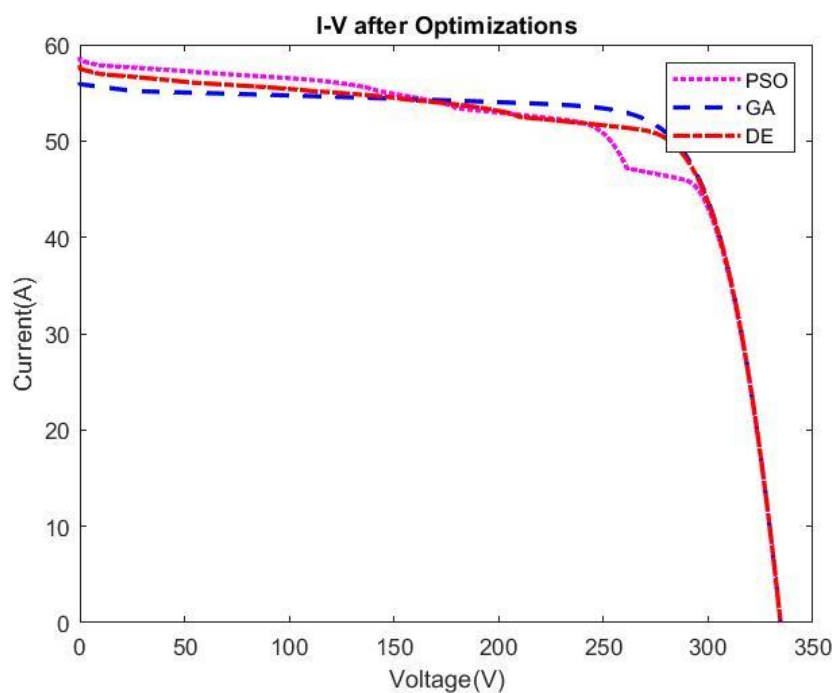


Σχήμα 5.37 Καμπύλη I-V (πριν την αναδιάταξη των πάνελ) στο 3^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία.

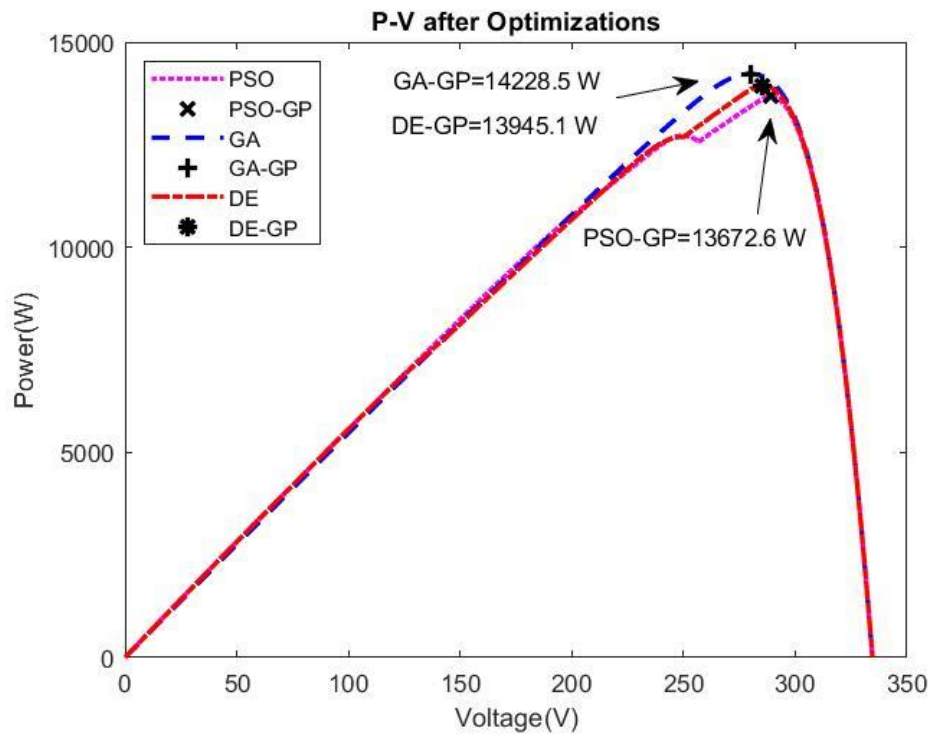
Ακολουθούν οι καμπύλες P-V και I-V που προκύπτουν έπειτα από την εκτέλεση των προσομοιώσεων στις 500 και 1000 επαναλήψεις (Σχήματα 5.38-41).



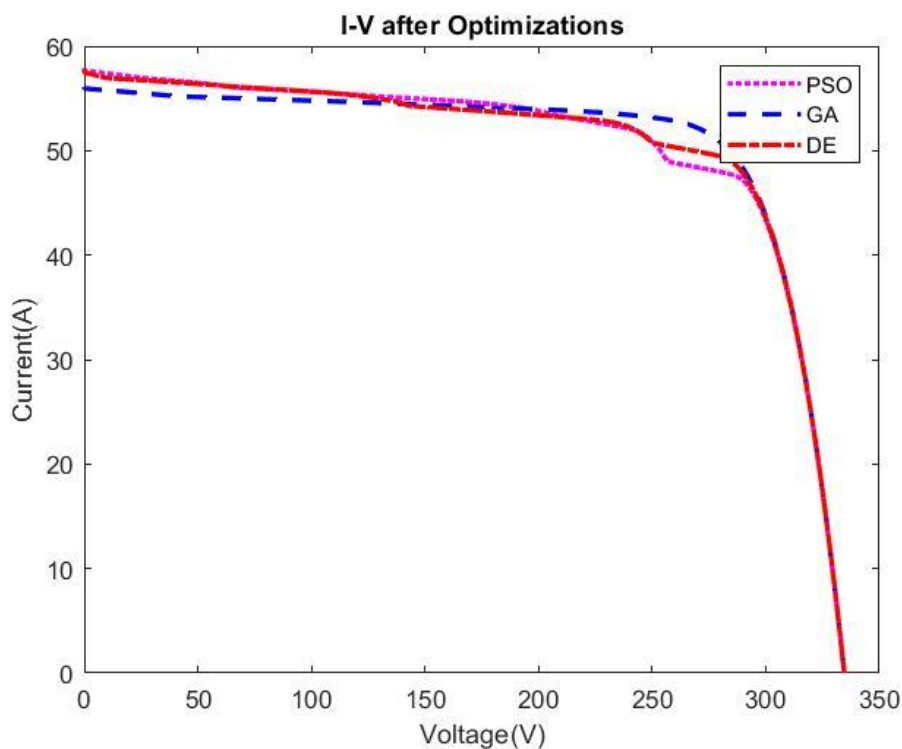
Σχήμα 5.38 Καμπύλη P-V στο 3^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία (500 επαναλήψεις).



Σχήμα 5.39 Καμπύλη I-V στο 3^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία (500 επαναλήψεις).



Σχήμα 5.40 Καμπύλη P-V στο 3^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία (1000 επαναλήψεις).



Σχήμα 5.41 Καμπύλη I-V στο 3^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία (1000 επαναλήψεις).

Στα Σχήματα 5.42-5.47 φαίνεται η Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη, έπειτα από την εκτέλεση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης PSO, GA και DE. Είναι σε 2 σενάρια βελτιστοποιήσεων με 500 και 1000 επαναλήψεις, αντίστοιχα. Επίσης φαίνονται οι τελικές τιμές της συνάρτησης ελαχιστοποίησης (BestCost) που όσο μικρότερες είναι, ανάλογα μικρότερες είναι και οι διαφορές των αθροισμάτων των γραμμών (τα οποία αντιστοιχούν στη τελευταία στήλη). Από τη σύγκριση με το Σχήμα 5.5, όπου φαίνονται τα αρχικά αθροίσματα ρευμάτων γραμμών για όλα τα σενάρια σκίασης, συμπεραίνεται η ελαχιστοποίηση αυτών των διαφορών λόγω των βελτιστοποιήσεων.

					Best Cost =27.47					ΣΙ (Ampere)
200	400	200	600	900	400	900	800	900	→	43,4
400	900	900	900	400	800	200	900	800	→	50,8
900	900	900	400	900	800	200	800	200	→	49,1
900	900	900	200	200	800	900	900	900	→	54
900	600	900	900	800	200	900	400	400	→	49,1
900	900	600	600	900	400	800	900	400	→	52,4
600	600	800	900	900	600	900	600	600	→	53,2
400	800	900	900	900	200	900	900	600	→	53,2
900	900	600	800	200	900	400	900	900	→	53,2
	900 W/m ²		800 W/m ²		600 W/m ²		400 W/m ²		200 W/m ²	

Σχήμα 5.42 3^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου PSO (500 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

					Best Cost =5.26					ΣΙ (Ampere)
900	200	900	900	200	900	900	400	900	→	50,7
400	800	900	900	200	400	900	800	900	→	50,8
600	900	900	900	900	600	200	900	400	→	51,5
800	900	900	900	200	400	600	600	900	→	50,8
900	400	200	900	800	600	600	900	900	→	50,8
400	800	800	600	800	900	900	600	400	→	50,8
400	900	200	800	900	800	900	400	900	→	50,8
900	900	900	200	600	900	900	200	800	→	51,5
200	400	800	900	900	900	600	600	900	→	50,8
	900 W/m ²		800 W/m ²		600 W/m ²		400 W/m ²		200 W/m ²	

Σχήμα 5.43 3^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου GA (500 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

					Best Cost =20.45					ΣΙ (Ampere)
900	800	900	400	200	900	600	600	600	→	48,3
800	800	900	900	900	200	800	200	900	→	52,4
900	800	900	900	900	400	600	800	200	→	52,4
900	400	900	400	900	900	200	900	800	→	51,6
600	900	600	800	900	900	600	600	200	→	49,9
200	900	200	900	900	200	900	900	800	→	48,3
900	900	600	900	800	900	400	400	400	→	50,7
400	600	900	900	400	900	400	900	900	→	51,5
200	800	900	600	400	900	900	900	900	→	53,2
	900 W/m ²		800 W/m ²		600 W/m ²		400 W/m ²		200 W/m ²	

Σχήμα 5.44 3^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου DE (500 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

					Best Cost =20.36					ΣΙ (Ampere)
800	900	900	600	200	900	400	900	400	→	49,1
900	900	900	400	200	900	900	800	600	→	53,2
900	800	200	800	400	900	900	900	400	→	50,8
600	900	900	800	200	900	200	900	900	→	51,6
200	600	400	900	900	900	900	900	800	→	53,2
200	800	900	400	900	400	900	900	900	→	51,6
900	600	900	200	900	600	900	600	800	→	52,4
400	800	600	800	600	400	600	900	400	→	45,1
200	900	800	900	900	900	900	200	600	→	51,5
	900 W/m ²		800 W/m ²		600 W/m ²		400 W/m ²		200 W/m ²	

Σχήμα 5.45 3^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου PSO (1000 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

					Best Cost =5.29					ΣΙ (Ampere)
200	800	900	900	200	900	900	900	600	→	51,5
900	900	400	800	800	400	600	800	600	→	50,8
900	200	900	900	800	900	600	900	200	→	51,5
800	900	800	200	900	400	900	900	400	→	50,8
900	400	600	900	900	400	400	900	900	→	51,5
900	800	600	400	900	900	600	900	200	→	50,8
200	600	600	900	900	900	200	900	900	→	49,9
200	900	900	900	400	900	200	900	900	→	50,8
900	600	400	400	800	600	800	800	900	→	50,8
	900 W/m ²		800 W/m ²		600 W/m ²		400 W/m ²		200 W/m ²	

Σχήμα 5.46 3^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου GA (1000 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

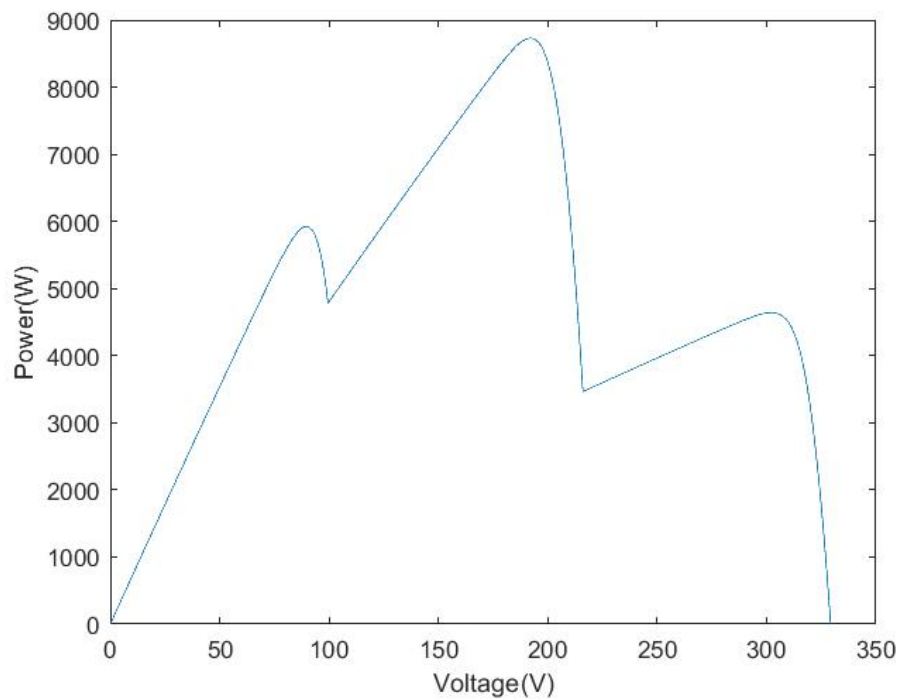
Best Cost =20.23									ΣI (Ampere)	
900	900	800	900	400	400	600	600	600	→	50
900	900	200	600	800	400	200	800	900	→	46,7
800	800	900	400	400	900	900	900	400	→	52,4
200	900	900	200	900	900	900	600	900	→	52,3
600	200	800	800	800	900	200	900	900	→	50
900	900	800	900	800	900	600	400	200	→	52,4
900	900	600	400	400	900	900	900	600	→	53,2
900	800	900	900	900	200	600	200	900	→	51,6
600	900	200	900	900	400	900	400	900	→	49,9
900 W/m ²		800 W/m ²		600 W/m ²		400 W/m ²		200 W/m ²		

Σχήμα 5.47 3^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου DE (1000 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

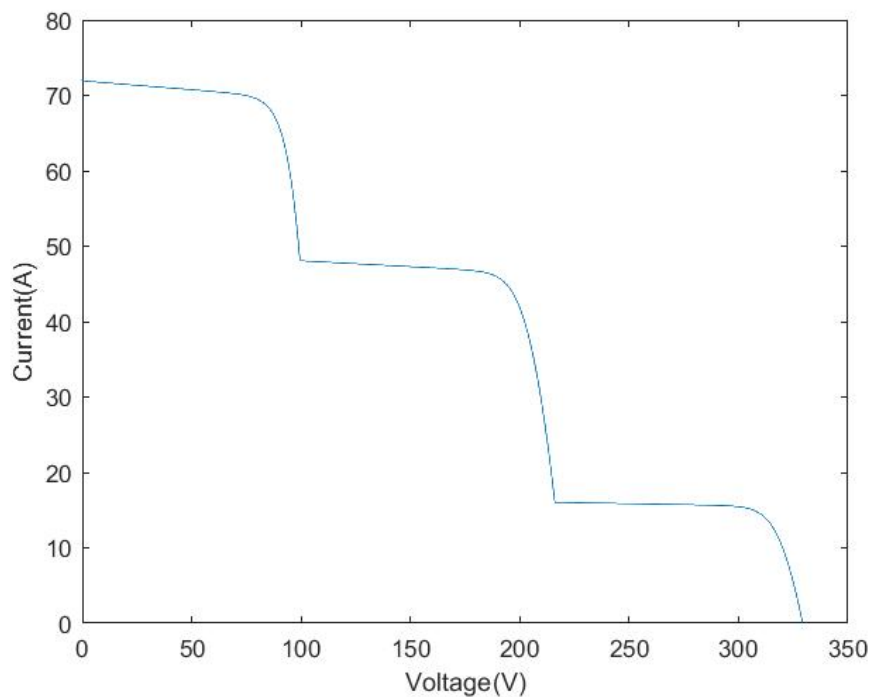
Στο 4^ο σενάριο σκίασης υπάρχουν 3 επίπεδα ακτινοβολίας ίσα κατανομημένα στη συστοιχία όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.48. Η αρχική συνολική εξαγωγή ισχύος της συστοιχίας πριν τις βελτιστοποιήσεις είναι 8729 W. Στις 500 επαναλήψεις, η εκτέλεση του PSO αυξάνει αυτήν την τιμή στα 10777 W, του GA στα 11618 W και της DE στα 11102 W. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα στις 1000 επαναλήψεις εκτέλεσης των αλγορίθμων είναι 11452 W, 11618 W και 11115 W. Παρατηρείται ότι οι παραπάνω τιμές βρίσκονται αρκετά κοντά στο μέγιστο όριο ισχύος (το PowerNoBypass όπως εξηγήθηκε παραπάνω) για το συγκεκριμένο σενάριο σκίασης που είναι 11650 W με εξαίρεση του PSO που υστερεί αρκετά σε σχέση με τους άλλους 2 αλγόριθμους αλλά μόνο στις 500 επαναλήψεις. Αυτό φυσικά δεν αναιρεί το γεγονός ότι και ο PSO αυξάνει σημαντικά την αρχική εξαγωγή ισχύος της συστοιχίας. Αυτό αποδεικνύει ότι η διασπορά της σκίασης έγινε ομοιόμορφα στη Φ/Β συστοιχία και οι παρακάμψεις των πάνελ μειώθηκαν στο ελάχιστο δυνατό κατά περίπτωση.

11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26	27	28	29
31	32	33	34	35	36	37	38	39
41	42	43	44	45	46	47	48	49
51	52	53	54	55	56	57	58	59
61	62	63	64	65	66	67	68	69
71	72	73	74	75	76	77	78	79
81	82	83	84	85	86	87	88	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99
		900 W/m ²		600 W/m ²			200 W/m ²	

Σχήμα 5.48 4^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία (η αρίθμηση στα κελιά του πίνακα αντιστοιχεί στις συντεταγμένες του κάθε Φ/B πάνελ).

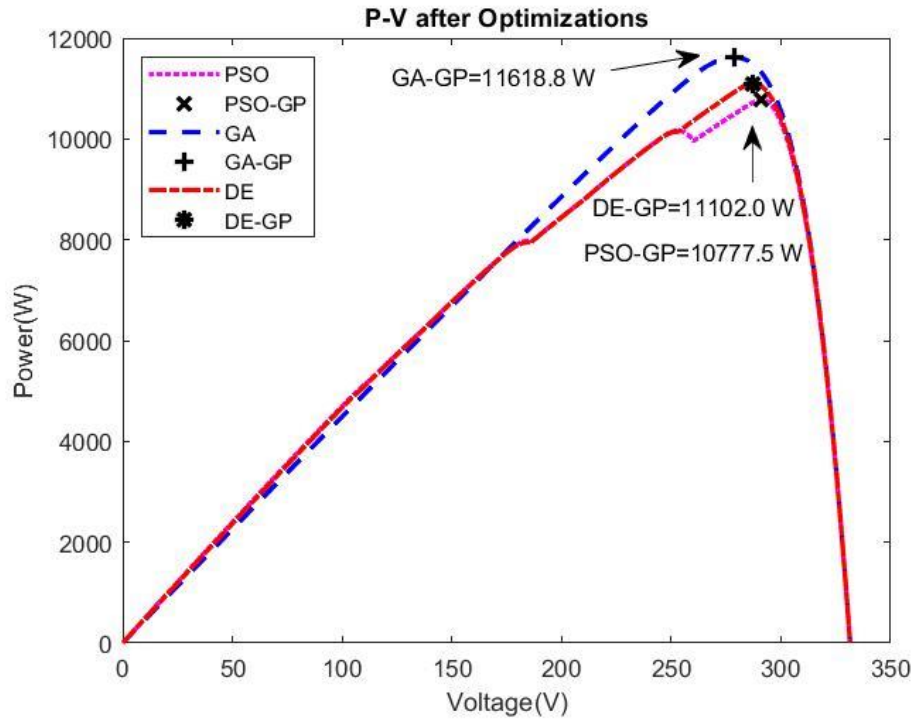


Σχήμα 5.49 Καμπύλη P-V (πριν την αναδιάταξη των πάνελ) στο 4^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία.

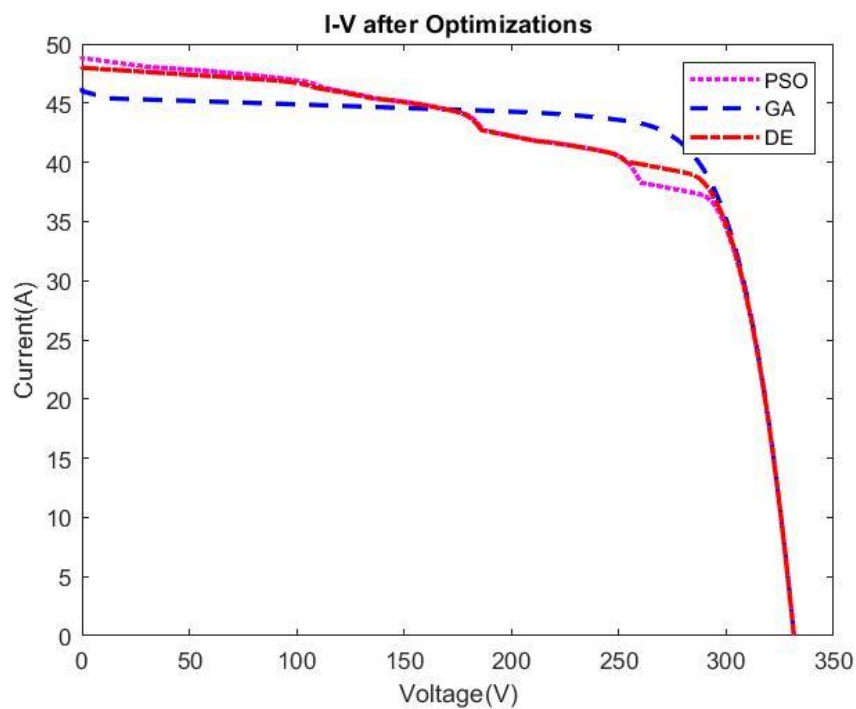


Σχήμα 5.50 Καμπύλη I-V (πριν την αναδιάταξη των πάνελ) στο 4^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία.

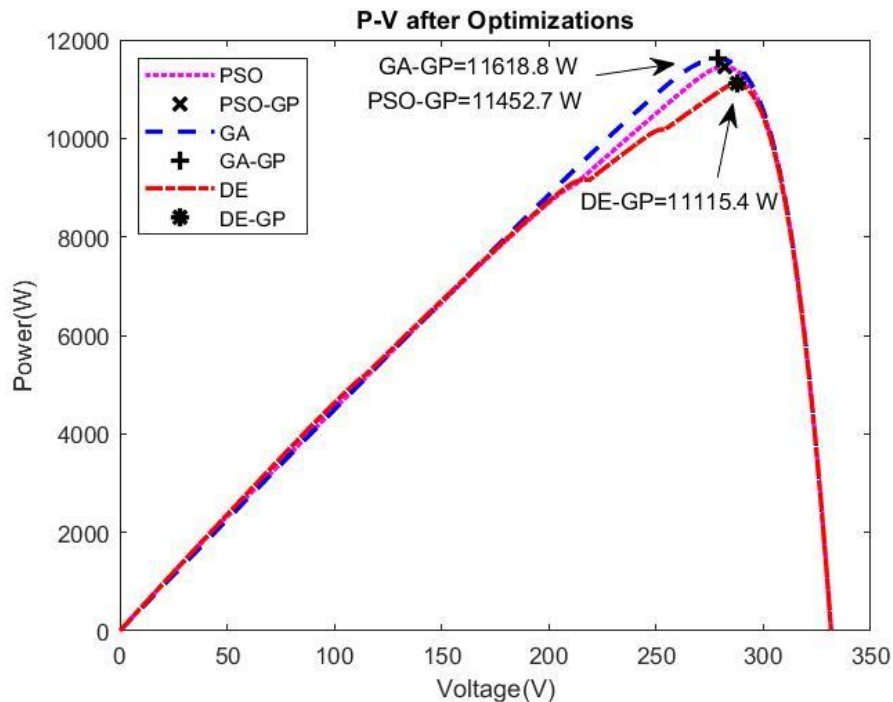
Ακολουθούν οι καμπύλες P-V και I-V που προκύπτουν έπειτα από την εκτέλεση των προσομοιώσεων στις 500 και 1000 επαναλήψεις (Σχήματα 5.51-5.54). Παρατηρείται ότι οι πολλές κορυφές που διακρίνονται στις καμπύλες πριν την αναδιάταξη των πάνελ, έχουν ομαλοποιηθεί σε ομοιόμορφες καμπύλες, αποτέλεσμα της διασποράς της σκίασης στη Φ/B συστοιχία με βέλτιστο τρόπο.



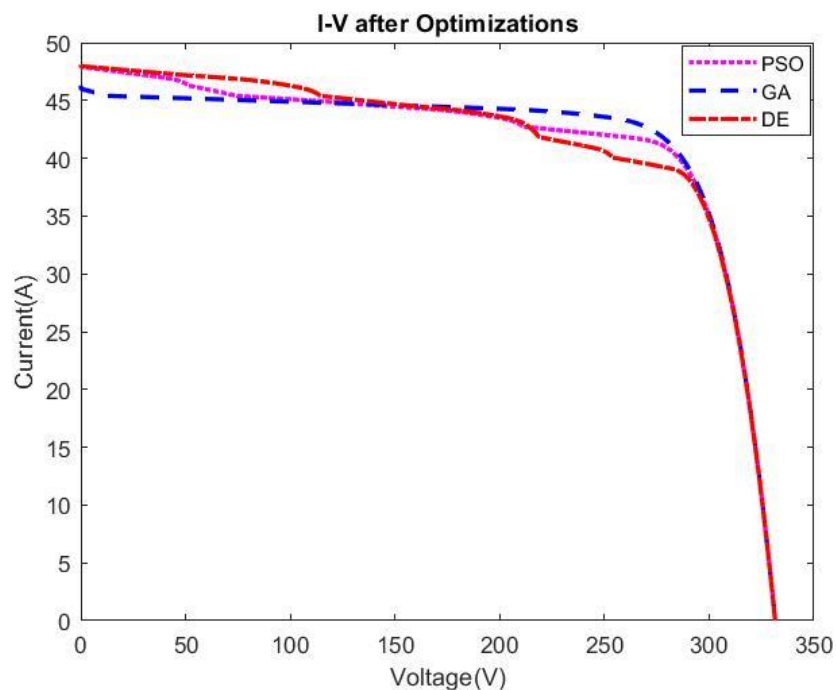
Σχήμα 5.51 Καμπύλη P-V στο 4^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία (500 επαναλήψεις).



Σχήμα 5.52 Καμπύλη I-V στο 4^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία (500 επαναλήψεις).



Σχήμα 5.53 Καμπύλη P-V στο 4^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία (1000 επαναλήψεις).



Σχήμα 5.54 Καμπύλη I-V στο 4^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία (1000 επαναλήψεις).

Στα Σχήματα 5.55-5.60 φαίνεται η Φ/B συστοιχία μετά την αναδιάταξη, έπειτα από την εκτέλεση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης PSO, GA και DE. Είναι σε 2 σενάρια

βελτιστοποιήσεων που εκτελούνται με 500 και 1000 επαναλήψεις, αντίστοιχα. Επίσης φαίνονται οι τελικές τιμές της συνάρτησης ελαχιστοποίησης (BestCost) που όσο μικρότερες είναι, ανάλογα μικρότερες είναι και οι διαφορές των αθροισμάτων των γραμμών (τα οποία αντιστοιχούν στη τελευταία στήλη). Από τη σύγκριση με το Σχήμα 5.5, όπου φαίνονται τα αρχικά αθροίσματα ρευμάτων γραμμών για όλα τα σενάρια σκίασης, συμπεραίνεται η ελαχιστοποίηση αυτών των διαφορών λόγω των βελτιστοποιήσεων.

					Best Cost =29.49					ΣΙ (Ampere)
600	900	200	600	900	900	600	600	200	→	45
900	600	900	900	200	200	200	600	900	→	44,2
600	600	900	200	200	600	200	900	600	→	39,3
600	900	900	600	900	200	200	200	600	→	41,7
600	900	200	200	200	600	900	900	200	→	38,5
600	200	200	200	200	900	200	900	900	→	35,2
600	900	200	200	900	200	900	600	900	→	44,2
600	900	600	600	900	600	200	200	600	→	42,6
600	200	600	900	900	600	200	900	600	→	45
	900 W/m ²				600 W/m ²			200 W/m ²		

Σχήμα 5.55 4^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου PSO (500 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

					Best Cost =7.46					ΣΙ (Ampere)
900	600	600	200	600	600	200	900	600	→	42,6
200	200	900	600	900	600	200	600	900	→	41,7
900	200	900	900	200	900	200	200	600	→	40,9
600	600	900	200	900	900	600	200	200	→	41,7
200	200	600	200	900	900	600	600	900	→	41,7
200	900	600	900	200	600	900	200	600	→	41,7
200	600	200	900	200	900	900	600	600	→	41,7
600	900	900	200	900	200	200	600	600	→	41,7
900	600	900	600	600	200	200	200	900	→	41,7
	900 W/m ²				600 W/m ²			200 W/m ²		

Σχήμα 5.56 4^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου GA (500 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

					Best Cost =22.02					ΣI (Ampere)
900	600	200	600	600	600	600	200	200	→	36,8
200	900	900	600	900	900	600	200	200	→	44,2
200	600	900	600	900	200	200	900	900	→	44,2
900	200	600	600	200	900	600	200	900	→	41,7
200	900	600	900	900	200	900	200	600	→	44,2
900	200	200	600	600	200	900	600	600	→	39,3
200	600	600	900	600	900	200	600	600	→	42,6
900	900	900	200	200	200	600	600	900	→	44,2
200	200	900	900	200	600	900	200	600	→	38,5
	900 W/m ²				600 W/m ²			200 W/m ²		

Σχήμα 5.57 4^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου DE (500 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

					Best Cost =22.02					ΣI (Ampere)
900	900	200	200	200	900	600	200	900	→	40,9
200	600	200	600	900	200	900	900	900	→	44,2
900	900	600	600	600	900	200	200	200	→	41,7
600	900	600	200	200	900	200	600	600	→	39,3
200	900	900	200	600	900	200	600	600	→	41,7
600	600	200	600	200	900	900	200	600	→	39,3
600	200	200	600	900	900	900	200	900	→	44,2
600	600	600	200	900	900	600	600	200	→	42,6
600	900	200	900	200	600	600	900	200	→	41,7
	900 W/m ²				600 W/m ²			200 W/m ²		

Σχήμα 5.58 4^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου PSO (1000 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

Best Cost = 7.46									ΣI (Ampere)
600	600	900	200	200	900	900	200	600	→ 41,7
900	600	600	200	200	600	200	900	900	→ 41,7
200	900	200	900	900	200	600	900	200	→ 40,9
900	600	600	200	200	600	600	900	600	→ 42,6
900	600	900	600	200	200	200	600	900	→ 41,7
600	200	900	900	200	900	200	600	600	→ 41,7
900	600	900	600	900	200	200	600	200	→ 41,7
600	200	900	600	200	200	900	600	900	→ 41,7
200	200	600	900	600	900	200	600	600	→ 41,7
900 W/m ²					600 W/m ²			200 W/m ²	

Σχήμα 5.59 4^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου GA (1000 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

Best Cost = 22.02									ΣI (Ampere)
600	600	600	200	600	600	200	200	900	→ 36,8
900	600	600	600	600	600	600	600	200	→ 43,4
900	900	200	900	600	200	200	600	900	→ 44,2
600	900	200	200	600	900	600	900	200	→ 41,7
900	900	200	900	600	200	200	900	600	→ 44,2
900	600	200	600	200	200	900	900	200	→ 38,5
600	900	600	900	600	200	200	200	900	→ 41,7
200	600	900	900	200	600	200	900	900	→ 44,2
900	200	600	900	200	900	200	900	200	→ 40,9
900 W/m ²					600 W/m ²			200 W/m ²	

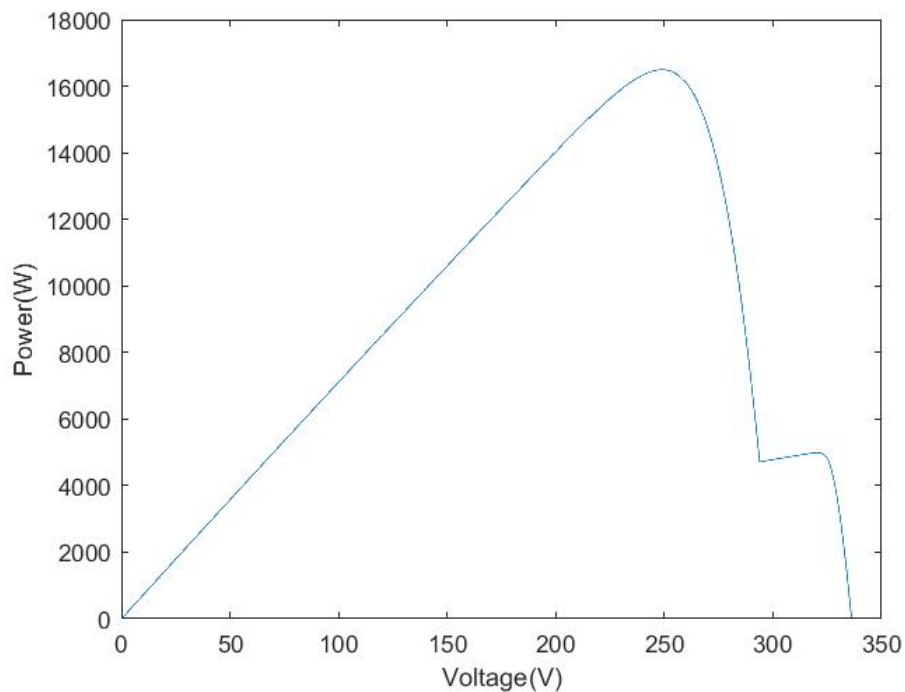
Σχήμα 5.60 4^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου DE (1000 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

Στο παρακάτω σενάριο σκίασης (5^ο) μια γραμμή παράλληλων πάνελ (από τις 9 της συστοιχίας) είναι σκιασμένη (Σχήμα 5.61) άρα και 1 άθροισμα ρευμάτων γραμμής θα ναι πολύ μικρότερο από τα υπόλοιπα 8 (66.3 A το καθένα). Έτσι, πριν τις βελτιστοποιήσεις, τα σκιασμένα πάνελ θα παρακάμπτονται όταν το ρεύμα ξεπεράσει το όριο των 14.77 A που είναι το άθροισμα των ρευμάτων τους. Η αρχική συνολική εξαγωγή ισχύος της συστοιχίας πριν τις βελτιστοποιήσεις είναι 16495 W. Στις 500 επαναλήψεις, η εκτέλεση του PSO αυξάνει αυτήν την τιμή στα

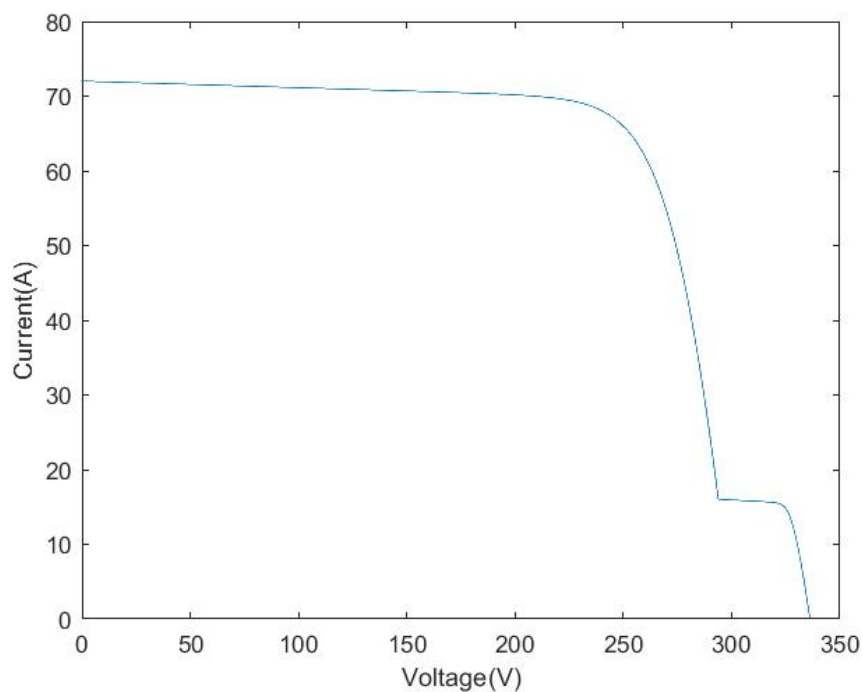
16525 W, και των GA και DE στα 16974 W. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα στις 1000 επαναλήψεις εκτέλεσης των αλγορίθμων είναι 16974 W και για τις 3 προσομοιώσεις. Παρατηρείται ότι οι παραπάνω τιμές βρίσκονται αρκετά κοντά στο μέγιστο όριο ισχύος (το PowerNoBypass όπως εξηγήθηκε παραπάνω) για το συγκεκριμένο σενάριο σκίασης που είναι 16991 W με εξαίρεση του PSO που υστερεί λίγο σε σχέση με τους άλλους 2 αλγόριθμους αλλά μόνο στις 500 επαναλήψεις. Αυτό φυσικά δεν αναιρεί το γεγονός ότι και ο PSO αυξάνει σημαντικά την αρχική εξαγωγή ισχύος της συστοιχίας. Αυτό αποδεικνύει ότι η διασπορά της σκίασης έγινε ομοιόμορφα στη Φ/Β συστοιχία και οι παρακάμψεις των πάνελ μειώθηκαν στο ελάχιστο.

11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26	27	28	29
31	32	33	34	35	36	37	38	39
41	42	43	44	45	46	47	48	49
51	52	53	54	55	56	57	58	59
61	62	63	64	65	66	67	68	69
71	72	73	74	75	76	77	78	79
81	82	83	84	85	86	87	88	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99
	900 W/m ²		200 W/m ²					

Σχήμα 5.61 5^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία (η αρίθμηση στα κελιά του πίνακα αντιστοιχεί στις συντεταγμένες του κάθε Φ/Β πάνελ).

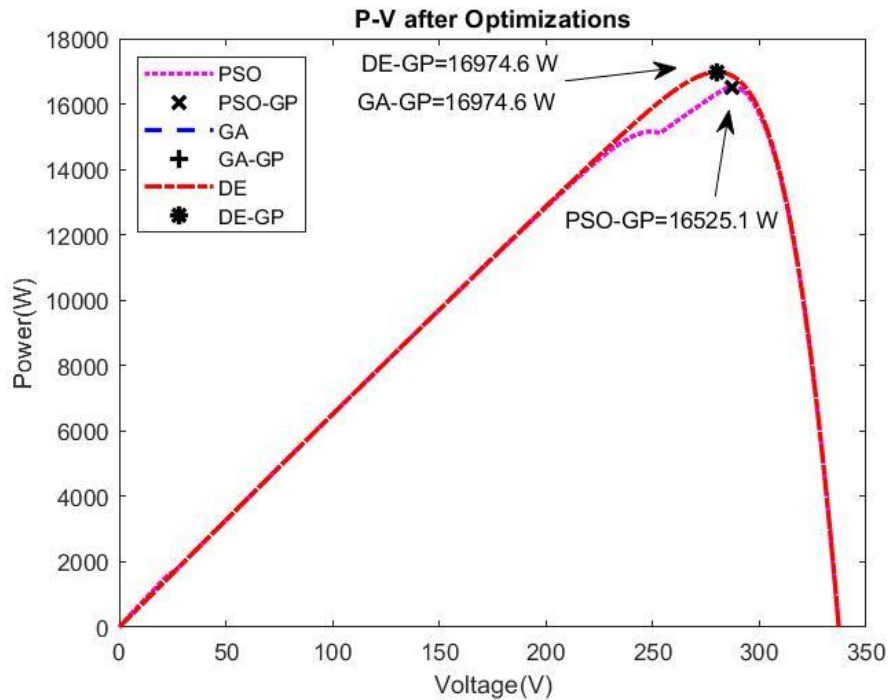


Σχήμα 5.62 Καμπύλη P - V (πριν την αναδιάταξη των πάνελ) στο 5^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία.

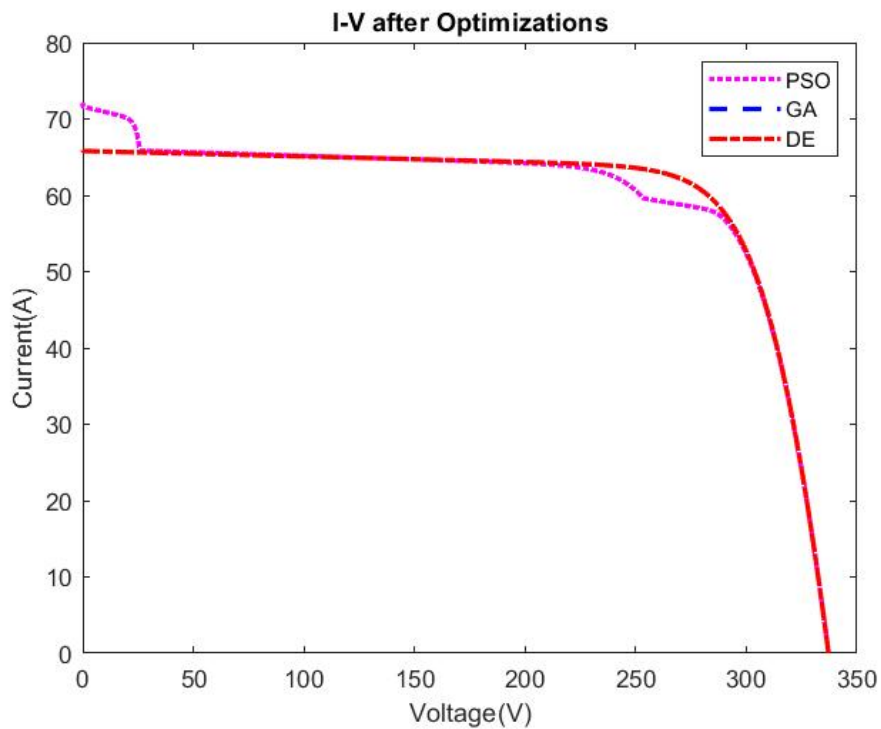


Σχήμα 5.63 Καμπύλη I - V (πριν την αναδιάταξη των πάνελ) στο 5^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία.

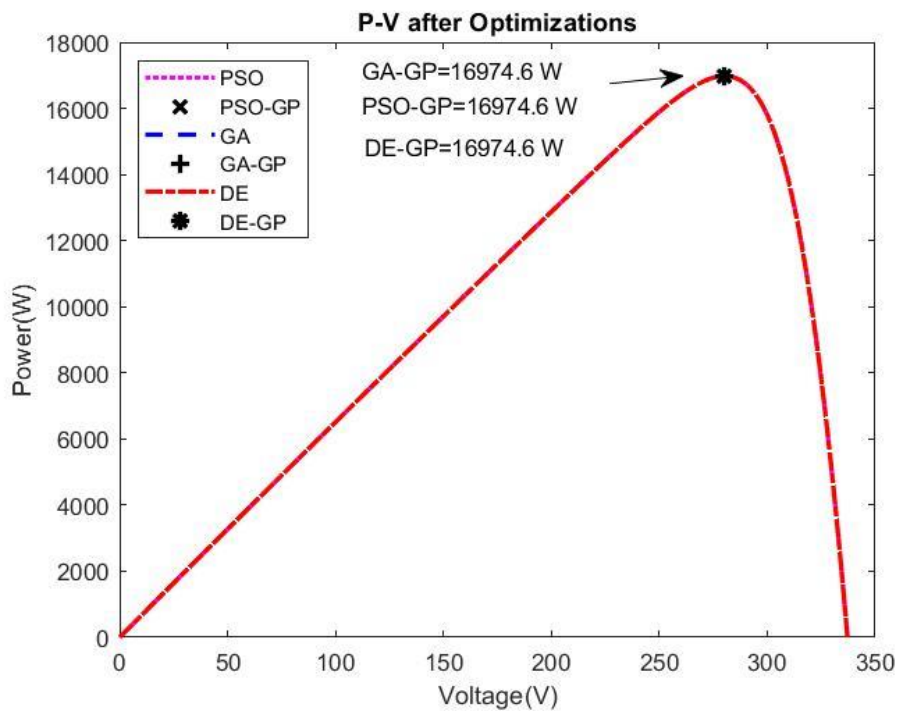
Ακολουθούν οι καμπύλες P-V και I-V που προκύπτουν έπειτα από την εκτέλεση των προσομοιώσεων στις 500 και 1000 επαναλήψεις (Σχήματα 5.64-5.67).



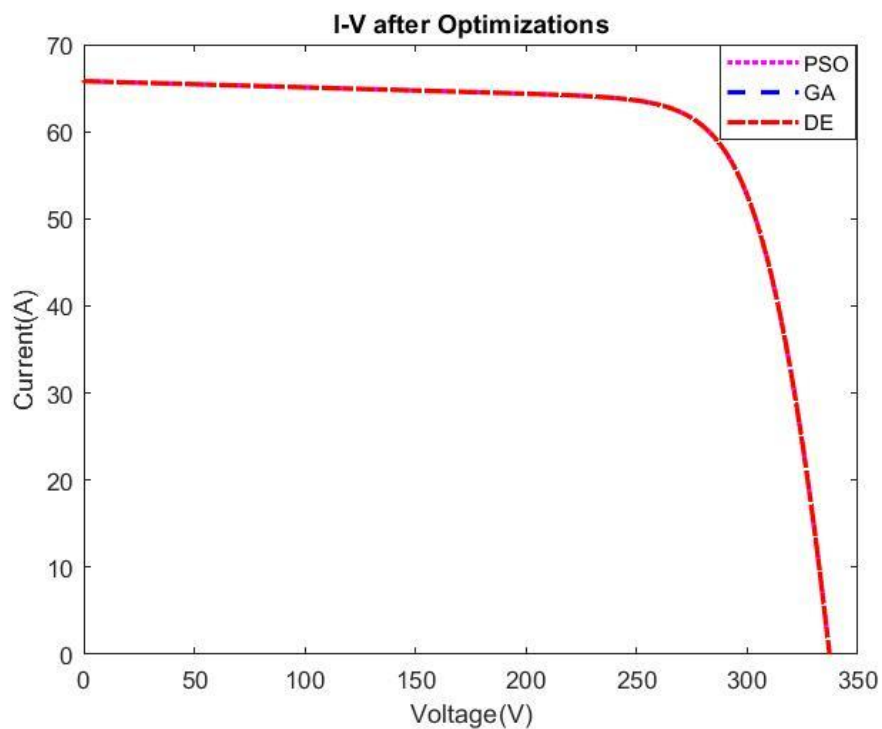
Σχήμα 5.64 Καμπύλη P-V στο 5^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία (500 επαναλήψεις).



Σχήμα 5.65 Καμπύλη I-V στο 5^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία (500 επαναλήψεις).



Σχήμα 5.66 Καμπύλη P-V στο 5^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία (1000 επαναλήψεις).



Σχήμα 5.67 Καμπύλη I-V στο 5^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία (1000 επαναλήψεις).

Στα Σχήματα 5.68-5.73 φαίνεται η Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη, έπειτα από την εκτέλεση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης PSO, GA και DE. Είναι σε 2 σενάρια βελτιστοποιήσεων με 500 και 1000 επαναλήψεις, αντίστοιχα. Επίσης φαίνονται οι τελικές τιμές της συνάρτησης ελαχιστοποίησης (BestCost) που όσο μικρότερες είναι, ανάλογα μικρότερες είναι και οι διαφορές των αθροισμάτων των γραμμών (τα οποία αντιστοιχούν στη τελευταία στήλη). Από τη σύγκριση με το Σχήμα 5.5, όπου φαίνονται τα αρχικά αθροίσματα ρευμάτων γραμμών για όλα τα σενάρια σκίασης, συμπεραίνεται η ελαχιστοποίηση αυτών των διαφορών λόγω των βελτιστοποιήσεων. Συγκεκριμένα, σε αυτό το σενάριο σκίασης γίνεται εύκολα αντιληπτό ποια είναι η διασπορά σκίασης στη Φ/Β συστοιχία που παράγει το βέλτιστο αποτέλεσμα. Και αυτό επειδή υπάρχουν ακριβώς 9 πάνελ, όσες και οι γραμμές της συστοιχίας, τα οποία έχουν διαφορετική ακτινοβολία από τα υπόλοιπα πάνελ. Άρα η διασπορά της σκίασης ομοιόμορφα και στις 9 γραμμές είναι η βέλτιστη επιλογή, την οποία την υλοποιούν οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης με εξαίρεση τον PSO στις 500 επαναλήψεις όπως φαίνεται παρακάτω.

					Best Cost =51.15					ΣΙ (Ampere)
900	900	200	900	900	900	900	900	900	→	60,2
900	200	900	900	900	900	900	900	900	→	60,2
900	900	900	900	900	900	900	900	900	→	65,9
900	900	900	900	900	200	900	900	200	→	54,6
900	900	200	900	900	900	900	900	900	→	60,2
900	900	900	200	900	900	900	900	900	→	60,2
200	900	900	900	900	900	900	900	900	→	60,2
900	900	900	900	200	900	900	900	900	→	60,2
900	900	900	900	900	900	900	200	900	→	60,2
	900 W/m ²				200 W/m ²					

Σχήμα 5.68 5^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου PSO (500 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

					Best Cost<1					ΣΙ (Ampere)
900	900	900	900	900	900	900	200	900	→	60,2
900	900	900	900	900	900	900	900	200	→	60,2
200	900	900	900	900	900	900	900	900	→	60,2
900	900	900	900	900	200	900	900	900	→	60,2
200	900	900	900	900	900	900	900	900	→	60,2
900	200	900	900	900	900	900	900	900	→	60,2
900	900	900	200	900	900	900	900	900	→	60,2
900	900	900	900	900	900	900	900	200	→	60,2
900	900	900	900	900	900	200	900	900	→	60,2
	900 W/m ²				200 W/m ²					

Σχήμα 5.69 5^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου GA (500 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

					Best Cost<1					ΣΙ (Ampere)
200	900	900	900	900	900	900	900	900	→	60,2
900	900	900	900	900	900	900	900	200	→	60,2
900	900	900	900	200	900	900	900	900	→	60,2
900	900	200	900	900	900	900	900	900	→	60,2
900	900	900	900	900	900	900	200	900	→	60,2
900	900	900	900	900	900	900	900	200	→	60,2
900	900	200	900	900	900	900	900	900	→	60,2
900	900	900	900	900	900	200	900	900	→	60,2
200	900	900	900	900	900	900	900	900	→	60,2
	900 W/m ²				200 W/m ²					

Σχήμα 5.70 5^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου DE (500 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

					Best Cost<1					ΣΙ (Ampere)
900	900	900	900	900	900	900	900	200	→	60,2
900	900	900	900	900	900	900	200	900	→	60,2
200	900	900	900	900	900	900	900	900	→	60,2
900	900	200	900	900	900	900	900	900	→	60,2
900	900	900	900	900	200	900	900	900	→	60,2
900	900	900	900	200	900	900	900	900	→	60,2
900	900	900	900	900	900	900	900	200	→	60,2
900	200	900	900	900	900	900	900	900	→	60,2
900	900	900	200	900	900	900	900	900	→	60,2
	900 W/m ²				200 W/m ²					

Σχήμα 5.71 5^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου PSO (1000 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

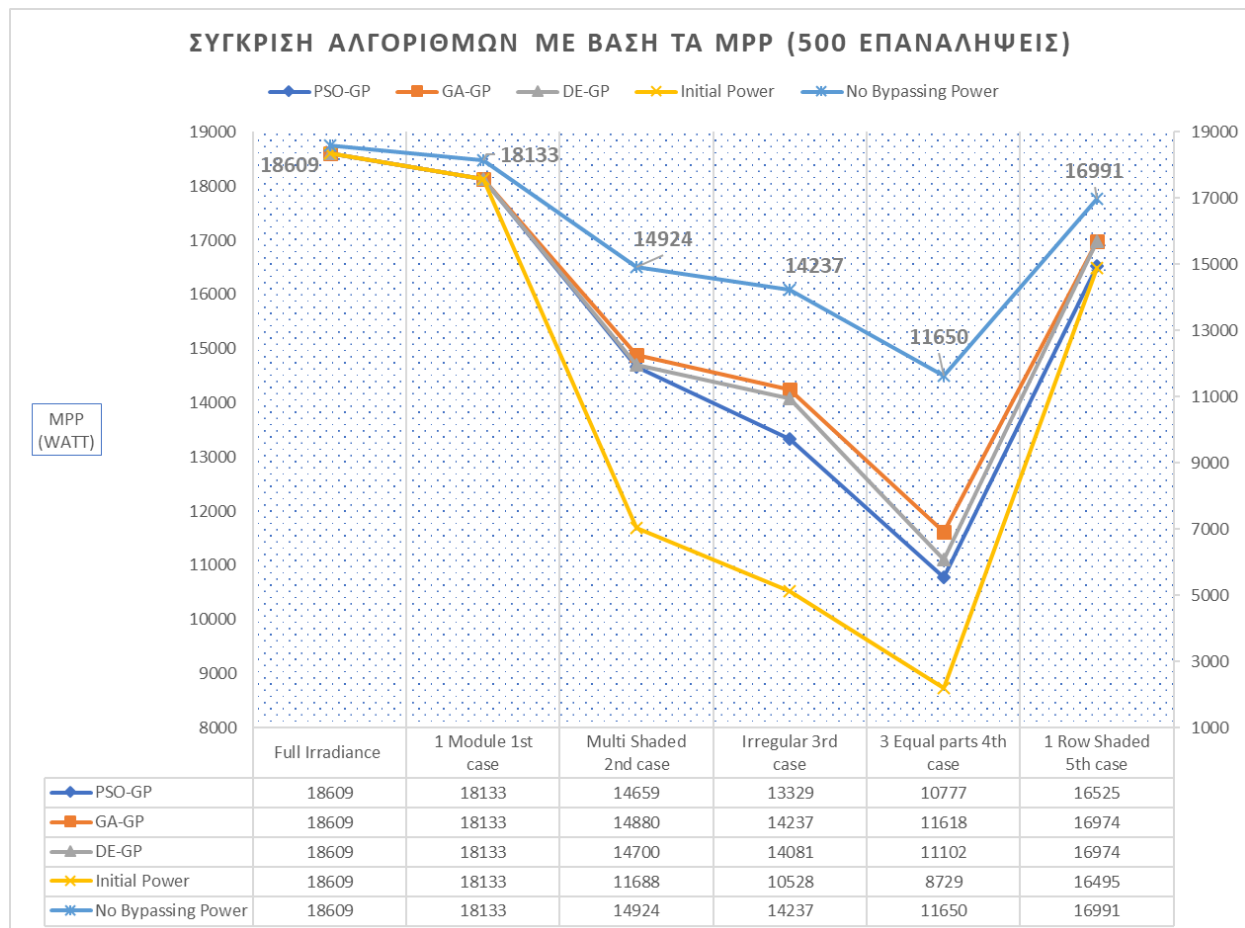
					Best Cost<1					ΣΙ (Ampere)
200	900	900	900	900	900	900	900	900	→	60,2
900	900	900	900	900	200	900	900	900	→	60,2
900	900	900	900	900	900	200	900	900	→	60,2
900	900	900	900	900	900	900	200	900	→	60,2
200	900	900	900	900	900	900	900	900	→	60,2
900	900	900	900	900	900	900	200	900	→	60,2
900	900	900	900	200	900	900	900	900	→	60,2
900	900	900	900	200	900	900	900	900	→	60,2
900	900	200	900	900	900	900	900	900	→	60,2
	900 W/m ²				200 W/m ²					

Σχήμα 5.72 5^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου GA (1000 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

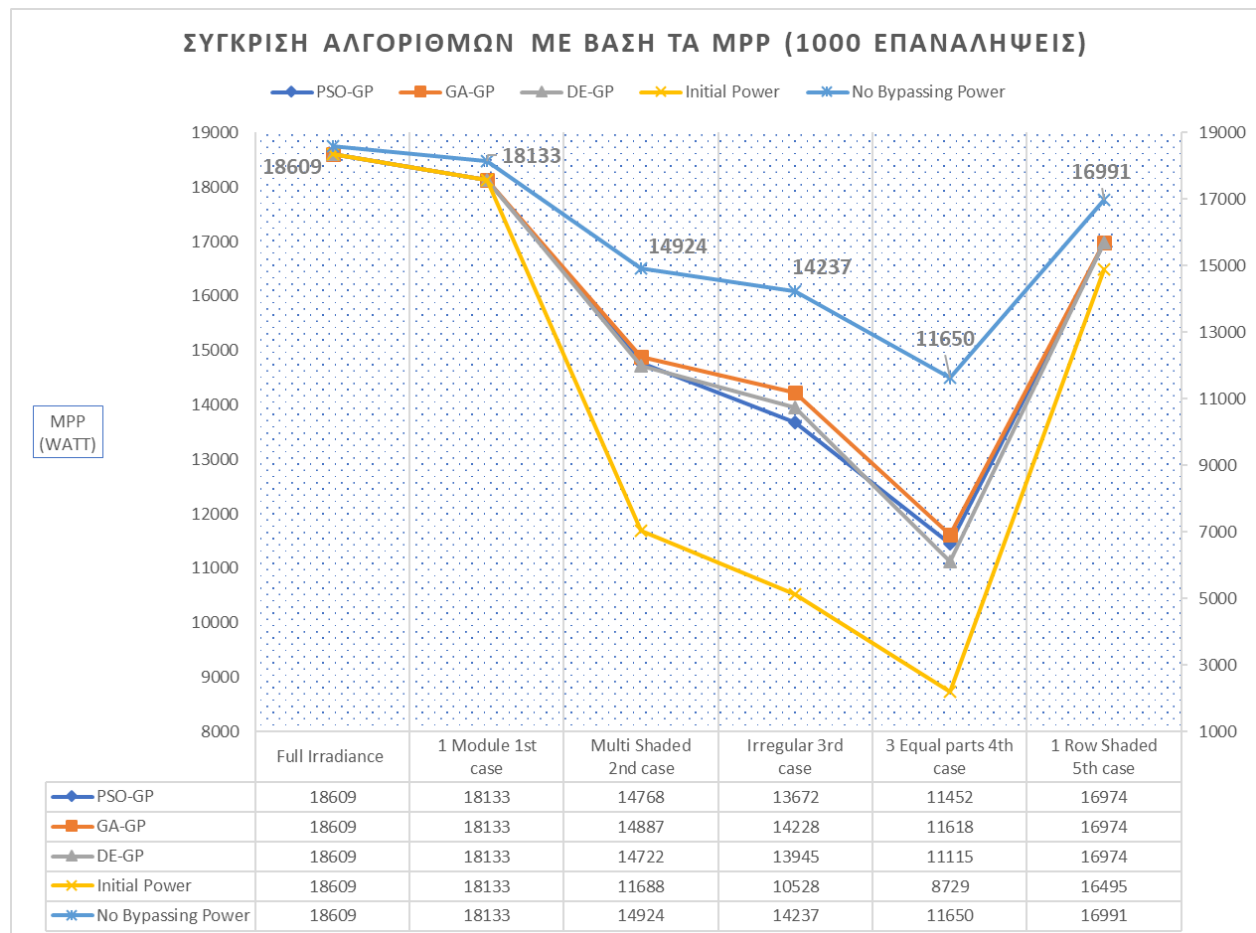
					Best Cost <1					ΣI (Ampere)
200	900	900	900	900	900	900	900	900	→	60,2
900	900	900	900	900	900	900	900	200	→	60,2
900	200	900	900	900	900	900	900	900	→	60,2
900	900	900	900	200	900	900	900	900	→	60,2
200	900	900	900	900	900	900	900	900	→	60,2
900	900	900	900	200	900	900	900	900	→	60,2
200	900	900	900	900	900	900	900	900	→	60,2
900	900	900	200	900	900	900	900	900	→	60,2
900	900	900	900	900	200	900	900	900	→	60,2
	900 W/m ²				200 W/m ²					

Σχήμα 5.73 5^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/Β συστοιχία μετά την αναδιάταξη με χρήση του αλγορίθμου DE (1000 επαναλήψεις, η τελευταία στήλη είναι τα αθροίσματα ρευμάτων γραμμής, το Best Cost είναι η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης του αλγορίθμου).

Παρακάτω παρουσιάζονται δύο συγκεντρωτικά γραφήματα (Σχήματα 5.74 και 5.75 για 500 επαναλήψεις και 1000 αντίστοιχα) που συγκρίνουν τα MPPs των 3 αλγορίθμων βελτιστοποίησης μεταξύ τους στα παραπάνω 5 σενάρια σκίασης (συν αυτό με την ομοιόμορφη ακτινοβολία), σε σχέση με την αρχική συνολική εξαγωγή ισχύος κάθε σεναρίου και σε σχέση με την μέγιστη θεωρητική ισχύ χωρίς την επίδραση του bypassing (σύμφωνα με τη σχέση 8 όπως αναλύθηκε στην αρχή του κεφαλαίου). Παρατηρείται ότι ξεχωρίζει ο αλγόριθμος GA που είναι καλύτερος σε όλες τις περιπτώσεις. Επιπρόσθετα, ο PSO φαίνεται να υστερεί αρκετά στις 500 επαναλήψεις σε σχέση με τους υπόλοιπους αλγορίθμους, όμως αυτή η υστέρηση εξαλείφεται όταν αυξάνονται αυτές στις 1000. Αυτό δεν είναι απαραίτητα κακό, αν συνυπολογιστεί και η ταχύτητα εκτέλεσης του αλγορίθμου PSO όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.76 που ο χρόνος εκτέλεσης του στις 1000 επαναλήψεις είναι κατά πολύ μικρότερος από αυτούς των άλλων 2 αλγορίθμων στις 500. Επίσης φαίνεται ότι όσο πιο μεγάλο είναι το ποσοστό σκίασης στη συστοιχία (άρα και πιο μικρό το συνολικό ποσό ακτινοβολίας σ' αυτή) τόσο πιο μικρή είναι η συνολική εξαγωγή ισχύος.



Σχήμα 5.74 Σύγκριση της ισχύος των MPPs που προέκυψαν με εφαρμογή των αλγορίθμων PSO, GA, DE για διάφορα σενάρια σκίασης και ομοιόμορφης πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας στη Φ/Β συστοιχία (η γραμμή με τις ετικέτες αντιπροσωπεύει την μέγιστη θεωρητική ισχύ χωρίς την επίδραση του bypassing και αντιστοιχεί με το δεξιό άξονα τιμών, 500 επαναλήψεις).



Σχήμα 5.75 Σύγκριση της ισχύος των MPPs που προέκυψαν με εφαρμογή των αλγορίθμων PSO, GA, DE για διάφορα σενάρια σκίασης και ομοιόμορφης πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας στη Φ/Β συστοιχία (η γραμμή με τις ετικέτες αντιπροσωπεύει την μέγιστη θεωρητική ισχύ χωρίς την επίδραση του bypassing και αντιστοιχεί με το δεξιό άξονα τιμών, 1000 επαναλήψεις).

Η σύγκριση των αλγορίθμων έγινε και σε σχέση με το χρόνο εκτέλεσης τους. Συγκεκριμένα μετρήθηκε ο χρόνος που χρειάζεται καθαρά να εκτελεστεί ο κάθε αλγόριθμος χωρίς να υπολογίζονται οι κλήσεις του μοντέλου Simulink της συστοιχίας που γίνονται πριν και μετά την βελτιστοποίηση και καθυστερούν σημαντικά την εκτέλεση. Για παράδειγμα, για ολόκληρο τον κώδικα του GA μαζί με τις κλήσεις του μοντέλου για 100 επαναλήψεις, η εκτέλεση του διαρκεί 57 sec όταν την ίδια στιγμή μόνο το κομμάτι της βελτιστοποίησης διαρκεί μόλις 3.7 sec. Για τη

σύγκριση επιλέχθηκε ενδεικτικά το 2^ο σενάριο σκίασης και μετρήθηκε ο χρόνος για 4 σενάρια επαναλήψεων: 100, 500, 1000 και 5000. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω γράφημα γραμμών (Σχήμα 5.27), με μεγάλη διαφορά από τους υπόλοιπους, ο πιο γρήγορος αλγόριθμος βελτιστοποίησης είναι ο PSO. Ακόμη και στο σενάριο των 5000 επαναλήψεων ο PSO αποδεικνύεται εξαιρετικά γρήγορος σε σύγκριση με την σημαντική καθυστέρηση που επιδεικνύουν οι άλλοι 2 αλγόριθμοι.



Σχήμα 5.76 Σύγκριση των PSO-GA-DE σε 4 σενάρια επαναλήψεων με βάση το χρόνο εκτέλεσης για τη Φ/Β συστοιχία.

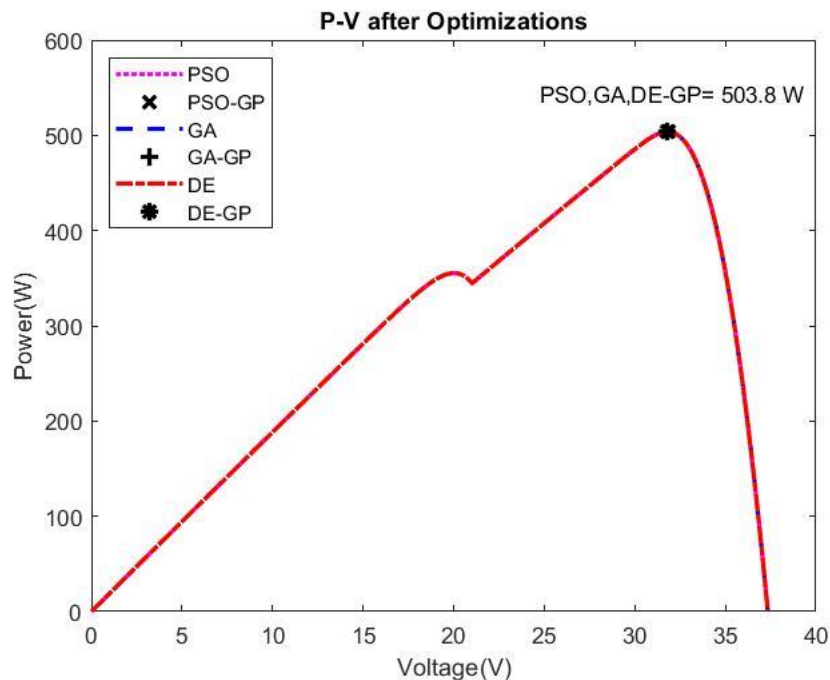
Στη συνέχεια εκτελούνται οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης σε πιο μικρή κλίμακα μοντέλου στο Simulink και συγκεκριμένα σε μία 3x3 Φ/Β συστοιχία. Χρησιμοποιούνται τα ίδια σενάρια σκίασης με το 9x9 μοντέλο προσαρμοσμένα φυσικά λόγω της κλίμακας. Επειδή οι πιθανοί συνδυασμοί για την εύρεση του βέλτιστου αποτελέσματος είναι προφανώς λιγότεροι γι' αυτό και τα MPP των αλγορίθμων συμπίπτουν και δεν παρατηρούνται διαφορές στην απόδοση. Για τον ίδιο λόγο δεν είναι απαραίτητες και περισσότερες από 100 επαναλήψεις στην εκτέλεση των προσομοιώσεων. Ακολουθεί το Σχήμα 5.77 με τα σενάρια σκίασης και μια ενδεικτική καμπύλη P-V με τις ταυτόσημες χαρακτηριστικές των αλγορίθμων σε ένα από τα σενάρια.

11	12	13		11	12	13		11	12	13
21	22	23		21	22	23		21	22	23
31	32	33		31	32	33		31	32	33
	900 W/m ²			900 W/m ²	200 W/m ²			900 W/m ²	800 W/m ²	600 W/m ²
	α)				β)			400 W/m ²	200 W/m ²	γ)
11	12	13		11	12	13		11	12	13
21	22	23		21	22	23		21	22	23
31	32	33		31	32	33		31	32	33
900 W/m ²	800 W/m ²	600 W/m ²		900 W/m ²	600 W/m ²	200 W/m ²		900 W/m ²	200 W/m ²	
400 W/m ²	200 W/m ²	δ)			ε)				στ)	

Σχήμα 5.77 Σενάρια σκίασης: α) Full Irradiance, β) 1 Module Shaded, γ) Multi Shaded,

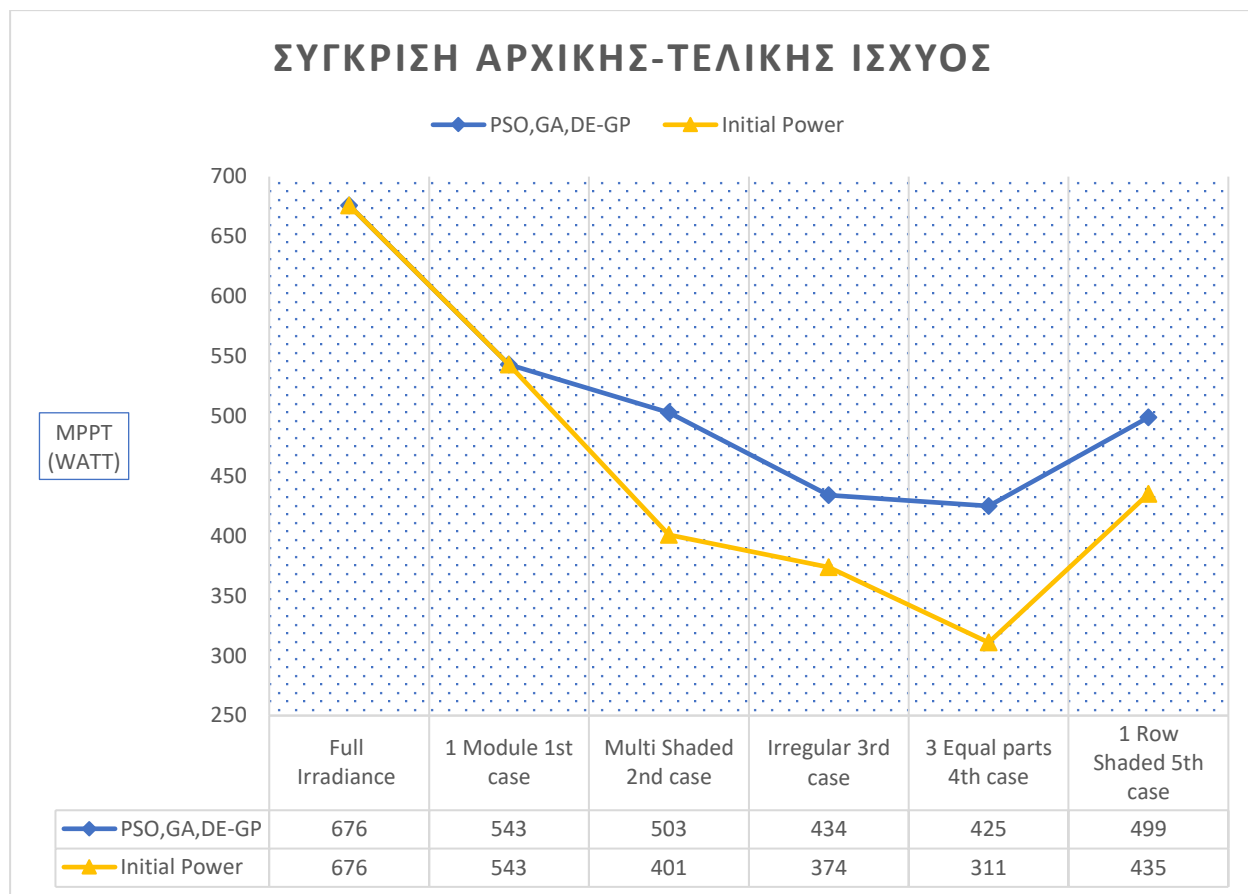
δ) Irregular Shaded, ε) 3 Equal parts Shaded, στ) 1 Row Shaded για τη Φ/Β συστοιχία (η

αρίθμηση στα κελιά του πίνακα αντιστοιχεί στις συντεταγμένες του κάθε Φ/Β πάνελ).



Σχήμα 5.78 Ταυτόσημες καμπύλες P-V των PSO-GA-DE στο 3^ο σενάριο σκίασης για τη Φ/B συστοιχία.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα συγκεντρωτικό γράφημα γραμμών (Σχήμα 5.79) που συγκρίνει τα MPPs των 3 αλγορίθμων βελτιστοποίησης στα παραπάνω 5 σενάρια σκίασης (συν αυτό με τη πλήρη ακτινοβολία) με την αρχική συνολική εξαγωγή ισχύος κάθε σεναρίου. Επίσης παρατηρείται κι εδώ η διαπίστωση που αναφέρθηκε παραπάνω για την εξάρτηση της συνολικής εξαγωγής ισχύος με το ποσοστό σκίασης της Φ/B συστοιχίας.



Σχήμα 5.79 Σύγκριση αρχικής ισχύος με την ισχύ στα *MPPs* που προέκυψαν από την εκτέλεση των αλγορίθμων *PSO-GA-DE* σε 5 σενάρια σκίασης για τη Φ/B συστοιχία.

6.

Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσίασε τους αλγόριθμους βελτιστοποίησης PSO, GA και DE και με την βοήθεια τους, την αναδιάταξη μιας Φ/Β συστοιχίας υπό μερική σκίαση. Η αναδιάταξη επιτυγχάνεται με μεταβολή των ηλεκτρικών συνδέσεων των Φ/Β πάνελ της συστοιχίας, διατηρώντας τις φυσικές θέσεις των Φ/Β πάνελ αμετάβλητες. Η ελαχιστοποίηση των διαφορών των αθροισμάτων ρευμάτων γραμμών της συστοιχίας γίνεται με τις προσομοιώσεις των αλγορίθμων βελτιστοποίησης.

Οι συγκρίσεις μεταξύ των αλγορίθμων σε διαφορετικά σενάρια σκίασης της διάταξης και με την βοήθεια των καμπύλων ισχύος-τάσης (P-V), ρεύματος-τάσης (I-V) και των σημείων παραγωγής μέγιστης ισχύος, έγιναν σε 5 σενάρια σκίασης με τον αλγόριθμο GA να ξεχωρίζει σε όλες τις περιπτώσεις αλλά με σχετικά μικρή διαφορά (ειδικά στις 1000 επαναλήψεις). Εκεί που υπήρξε ξεκάθαρος νικητής, ήταν στο πεδίο της ταχύτητας εκτέλεσης της βελτιστοποίησης, κι αυτός ήταν με μεγάλη διαφορά ο αλγόριθμος PSO σε όλα τα σενάρια επαναλήψεων που δοκιμάστηκε. Η καθυστέρηση που παρουσιάζουν οι άλλοι 2 αλγόριθμοι ειδικά πάνω από τις 1000 επαναλήψεις, πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στο tradeoff με την απόδοση των βελτιστοποιήσεων τους. Η ιδιαιτερότητα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ότι όλοι οι

αλγόριθμοι φτιάχτηκαν βήμα-βήμα και δεν είναι έτοιμες συναρτήσεις (black box), οπότε είναι και εύκολη η παραμετροποίηση τους για διαφορετική ενδεχόμενη χρήση. Η πλατφόρμα πάνω στην οποία αναπτύχθηκαν και εκτελέστηκαν οι προσομοιώσεις είναι η Matlab R2019a για τον κώδικα και την εκτέλεση του και το Simulink για το μοντέλο που αναπαριστά τη Φ/Β συστοιχία. Αυτό το γεγονός προσφέρει στην εργασία μεγάλη ευελιξία για την επαναχρησιμοποίηση του μοντέλου ή του κώδικα των αλγορίθμων σε πληθώρα μοντέλων που έχει στις βιβλιοθήκες του το Simulink. Μια εφαρμογή για την αξιοποίηση της εργασίας θα ήταν η ανάπτυξη λογισμικού για τον υπολογισμό του βέλτιστου MPP από τους 3 αλγορίθμους σε κάθε σενάριο σκίασης ενός πραγματικού Φ/Β συστήματος και την ανάλογη αναδιάταξη του.

7.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] T. Johansson, H. Kelly, A. Reddy and R. Williams, «Renewable energy: sources for fuels and electricity», Island Press, 1993.
- [2] N. Panwar, S. Kaushik and S. Kothari, «Role of renewable energy sources in environmental protection: A review», Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, no. 3, pp. 1513-1524, 2011.
- [3] P. A. Owusu and S. Asumadu-Sarkodie, «A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation», Cogent Engineering, vol. 3, no. 1, pp. 1-14, 2016.
- [4] J. Aghaei and M. I. Alizadeh, «Demand response in smart electricity grids equipped with renewable energy sources: A review», Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 18, pp. 64-72, 2013.
- [5] M. Beaudin, H. Zareipour, A. Schellenberglobe and W. Rosehart, «Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review», Energy for Sustainable Development, vol. 14, no. 4, pp. 302-314, 2010.
- [6] Γ. Σταυρακάκης, «Διδακτικές Σημειώσεις για το μάθημα ΑΠΕ», Πολυτεχνείο Κρήτης, 2013.
- [7] <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/pvarray.html>
- [8] A. Khare and S. Rangnekar, «A Review of Particle Swarm Optimization and Its Applications in Solar Photovoltaic System», Applied Soft Computing, vol. 13, no. 5, pp. 2997-3006, 2013.
- [9] T. S. Babu, J. P. Ram, T. Dragicevic, M. Miyatake, F. Blaabjerg, N. Rajasekar, «Particle Swarm Optimization Based Solar PV Array Reconfiguration of the Maximum Power Extraction Under Partial Shading Conditions», IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 9, no. 1, pp. 74-85, 2018.

- [10] R. Ramaprabha and B.L. Mathur, «Genetic Algorithm Based Maximum Power Point Tracking for Partially Shaded Solar Photovoltaic Array», International Journal of Research and Reviews in Information Sciences, vol. 2, no. 1, pp. 1-3, 2012.
- [11] P. J. Angeline and K. E. Kinnear, «Advances in Genetic Programming», MIT Press, vol. 2, 1996.
- [12] D. E. Goldberg, «Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning», Addison-Wesley Longman Publishing Co, 1989.
- [13] U. K. Chakraborty, «Advances in differential evolution», Springer, vol. 143, 2008.
- [14] R. Ramaprabha and B.L. Mathur, «Enhanced Maximum Power Point Tracking using Differential Evolution Algorithm for Partially Shaded Solar Photovoltaic Array», International Journal of Electrical Engineering and Embedded Systems, vol. 2, no. 2, pp. 159-164, 2010.
- [15] https://www.mitsubishielectricsolar.com/images/uploads/documents/specs/MLU_spec_sheet_250W_255W.pdf.