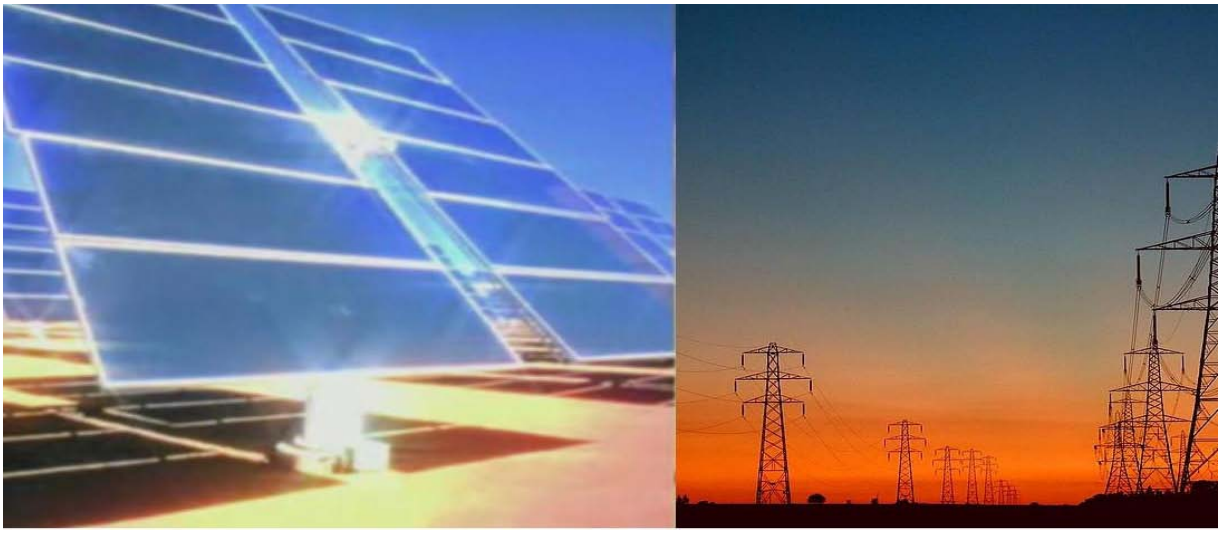
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΔΟΡΙΑΚΗΣ ΠΟΛΥΧΡΟΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΛΑΪΤΖΑΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΧΑΝΙΑ 2009

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Καλαϊτζάκη Κωνσταντίνο για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας. Επίσης τον Καθηγητή κ. Σταυρακάκη Γεώργιο και τον Καθηγητή κ. Κουτρούλη Ευτύχιο για τη συμμετοχή τους στην Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή και ιδιαιτέρως τον μεταπτυχιακό φοιτητή κ. Κορνελάκη Άρη για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια η ενεργειακή κρίση έχει αρχίσει και γίνεται ορατή σε όλες τις πτυχές της καθημερινής ζωής, επηρεάζοντάς την σε σημαντικό βαθμό. Τα αποθέματα πετρελαίου λιγοστεύουν με ταχύτατους ρυθμούς ενώ η ζήτηση αυξάνεται καθημερινά. Ταυτόχρονα, οι φυσικές καταστροφές, σημαντικό μέρος των οποίων αποδίδεται στην κλιματική αλλαγή, που με τη σειρά της αποδίδεται εν μέρει στην ρύπανση εξαιτίας της παραγωγής και χρήσης συμβατικών μορφών ενέργειας, και στη συνεχιζόμενη μόλυνση του περιβάλλοντος κατέστησαν αναγκαία την εύρεση και εφαρμογή εναλλακτικών μορφών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, φιλικές προς αυτό. Λύση στο αδιέξοδο αυτό φαίνεται να δίνουν οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας καθώς κατακτούν ολοένα και περισσότερο έδαφος στο χώρο της ενέργειας. Μορφές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας αποτελούν η αιολική ενέργεια, η ηλιακή, η υδροηλεκτρική, η ενέργεια από βιομάζα, η γεωθερμία κ.α. οι οποίες βρίσκονται σε ανάπτυξη παγκόσμια. Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται με χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζει τον τρόπο μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ωφέλιμη ηλεκτρική ενέργεια και την παροχή αυτής στο δίκτυο, καθώς και τα στοιχεία που απαρτίζουν ένα τέτοιο σύστημα και την οικονομική ανάλυση μιας τέτοιου είδους εγκατάστασης. Παράλληλα σκοπός αυτής της εργασίας είναι να αναπτυχθεί μία μέθοδος διαστασιολόγησης συστημάτων φωτοβολταϊκών διατάξεων με σκοπό τη μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους σε βάθος χρόνου. Για τη βελτιστοποίηση της λύσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων (ΒΣΣ, Particle Swarm Optimization PSO). Τέλος, γίνεται μια σύγκριση μεταξύ της μεθόδου που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία, δηλαδή με τον αλγόριθμο ΒΣΣ, με τους γενετικούς αλγορίθμους για την εξαγωγή συμπερασμάτων για το ποια αποφέρει καλύτερα αποτελέσματα στο συγκεκριμένο είδος προβλήματος.

Περιεχόμενα

1.Εισαγωγή.....8
1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Φωτοβολταϊκά Συστήματα.....8
1.2 Σχετικές προσεγγίσεις.....9
1.3 Η μέθοδος που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία:.....11
1.4 Η δομή της συγκεκριμένης εργασίας.....13
2.Ηλιακή Ενέργεια.....15
2.1 Εισαγωγή.....15
2.2 Ηλιακή ακτινοβολία.....15
2.2.1 Ακτινοβολία στην επιφάνεια του εδάφους.....16
2.2.2 Διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας.....17
2.2.3 Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας.....18
2.2.4 Ηλιακή ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας.....20
2.3 Ηλιακή γεωμετρία.....22
2.3.1 Γεωγραφικό πλάτος του τόπου φ.....22
2.3.2 Απόκλιση του ήλιου δ.....23
2.4 Σύσταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης.....25
2.5 Ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο.....26
2.5.1 Ωριαία ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο.....27
2.5.2 Μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο.....30
2.5.3 Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο.....31
3.Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία.....34
3.1 Ιστορική αναδρομή στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών.....34
3.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....36
3.3 Το Σύστημα.....36
3.3.1 Το μοντέλο του ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου.....37
3.3.2 Χαρακτηριστικές Καμπύλες I-V και P-V.....38
3.4 Φωτοβολταϊκά πλαίσια.....40

3.5 Διάκριση Φ/Β συστημάτων....42
3.6 Παράγοντες επίδρασης απόδοσης φωτοβολταϊκών....42
3.6.1 Σκίαση φωτοβολταϊκών πλαισίων....43
3.6.2 Άλλοι παράγοντες επίδρασης....46
4.Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων....48
4.1 Εισαγωγή....48
4.2 Η έννοια της βελτιστοποίησης και του αλγορίθμου....48
4.3 Περιγραφή του αλγορίθμου Βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων....49
4.3.1 Τρόπος λειτουργίας αλγορίθμου ΒΣΣ....50
4.3.2 Παραλλαγές του αλγορίθμου ΒΣΣ....52
4.3.3 Βασικές αρχές Νοημοσύνης Σμηνών....53
5. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι....55
5.1 Εισαγωγή....55
5.2 Ο βασικός γενετικός αλγόριθμος....56
5.3 Κωδικοποίηση μεταβλητών....57
5.4 Μηχανισμοί επιλογής....58
5.5 Πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης....58
6.Μετατροπείς Ισχύος....60
6.1 Εισαγωγή....60
6.2 Αρχές Λειτουργίας Αντιστροφέων....61
6.2.1 Απαιτήσεις από τους Αντιστροφείς....61
6.3 Μετατροπείς DC/AC....63
6.3.1 Απόδοση μετατροπέων DC/AC....65
7.Οικονομική αξιολόγηση ενεργειακών συστημάτων....66
7.1 Εισαγωγή....66
7.2 Ορισμοί βασικών οικονομικών παραμέτρων....66
8. Μέθοδος που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία....71
8.1 Εισαγωγή....71
8.2 Σύνδεση των Φ/Β πλαισίων με τους μετατροπείς DC/AC....72
8.3 Διάταξη των Φ/Β πλαισίων σε δεδομένη έκταση....74
8.4 Τρόπος διάταξης Φ/Β πλαισίων....77
8.5 Βάσεις στήριξης των Φ/Β πλαισίων....79
8.6 Ο αλγόριθμος SIM....81
9. Μοντελοποίηση με τον αλγόριθμο Βελτιστοποίησης Σμήνος Σωματιδίων....84

9.1 Εισαγωγή.....84
9.2 Αρχικοποίηση του αλγορίθμου.....85
9.3 Αντικειμενική συνάρτηση για τη διαστασιολόγηση συστήματος Φ/Β πλαισίων.....87
10.Αποτελέσματα.....92
10.1 Εισαγωγή.....92
10.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....94
10.2.1 Αποτελέσματα για διάφορες τιμές των παραμέτρων της ΒΣΣ.....95
10.2.2 Συγκριτικά αποτελέσματα για τους Γενετικούς Αλγορίθμους με την simple PSO και την inertia PSO με αλλαγές σε συγκεκριμένη παράμετρο.....124
10.2.3 Συγκριτικά αποτελέσματα για τους Γενετικούς Αλγορίθμους με την simple PSO και την inertia PSO με αλλαγές σε διάφορους συνδυασμούς.....130
11.Συμπεράσματα-Επεκτάσεις.....155
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....158

1. Εισαγωγή

1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Ζούμε σε μια περίοδο όπου η διόγκωση των περιβαντολλογικών προβλημάτων, σε συνδυασμό με την εξάντληση των ορυκτών ενεργειακών πόρων προβάλλει επιτακτικά την ανάγκη παράλληλα με τις συμβατικές ενεργειακές πρώτες ύλες (πετρέλαιο, φυσικό αέριο) να αξιοποιηθούν συστηματικά και με τον καλύτερο δυνατό τρόπο οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.). Η επερχόμενη ενεργειακή κρίση λόγω της εξάντλησης των ορυκτών ενεργειακών πόρων (προβλέπεται να αρχίσουν να εξαντλούνται από το 2020-2060), καθώς και τα τεράστια βήματα στην τεχνολογία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κάνουν πλέον εφικτή την αποδοτική χρήση τους και μορφές ενέργειας όπως η ηλιακή, η αιολική, η γεωθερμική και άλλες τυγχάνουν πλέον ευρείας αποδοχής.

Ο ορισμός που δίνεται στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.) είναι ότι αποτελούν τους φυσικούς διαθέσιμους πόρους (πηγές ενέργειας), που υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό μας περιβάλλον, που δεν εξαντλούνται αλλά διαρκώς ανανεώνονται και που δύνανται να μετατρέπονται σε ηλεκτρική ή θερμική ενέργεια. Πλέον ολοένα και περισσότερα συστήματα Α.Π.Ε. καταλαμβάνουν σημαντικό μερίδιο στο σύνολο της παραγωγής ενέργειας. Χαρακτηριστικό είναι ότι στόχος της Ελλάδος είναι ένα ποσοστό 20% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος της χώρας έως το 2020 να παράγεται από συστήματα Α.Π.Ε. Σημαντικό μερίδιο των συστημάτων Α.Π.Ε. καταλαμβάνουν τα συστήματα φωτοβολταϊκών (Φ/Β) διατάξεων. Τα τελευταία χρόνια μέσα στο γενικότερο κλίμα ανάπτυξης Α.Π.Ε., τα φωτοβολταϊκά γνώρισαν μεγάλη ανάπτυξη τόσο σε ερευνητικό όσο και σε επίπεδο εφαρμογών, με αποτέλεσμα την κατακόρυφη μείωση του κόστους και την σημαντική αύξηση σε επίπεδο απόδοσης. Σημαντικό ρόλο έπαιξε και το ότι τα κράτη πλέον επιδοτούν τις προσπάθειες παραγωγής ενέργειας από Α.Π.Ε. αφήνοντας έτσι ακόμα μεγαλύτερα περιθώρια κέρδους με αποτέλεσμα να υπάρχει και μεγάλο επενδυτικό ενδιαφέρον. Σκοπός αυτής της εργασίας, είναι να σχεδιαστεί ένα σύστημα το οποίο να λαμβάνει υπόψη του όλες τις παραμέτρους με σκοπό το μέγιστο οικονομικό όφελος από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από φωτοβολταϊκά.

1.2 Σχετικές Προσεγγίσεις

Στην εργασία [17] γίνεται μια γεωγραφική ανάλυση του δυναμικού της ηλιακής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση, υπολογίζοντας με κατάλληλους αλγορίθμους προσομοίωσης, για ένα σύστημα Φ/Β διατάξεων, το πηλίκο των ετησίως παραγόμενων kWh ανά kWp εγκατεστημένης ισχύος του συστήματος. Από την ανάλυση αυτή προκύπτει έντονο ενδιαφέρον για τις χώρες της Μεσογείου κυρίως και ενδιαφέρουσες διαφορές μεταξύ των χωρών αλλά και μεταξύ περιοχών ίδιων χωρών. Επίσης, γίνεται ανάλυση της επίδρασης της κλίσης των Φ/Β διατάξεων δεδομένου ότι το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής της εγκατάστασης θεωρείται ως η βέλτιστη, σταθερή κατά τη συνολική διάρκεια του έτους, κλίση για τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας. Από την ανάλυση αυτή υπολογίζονται οι διαφορές απόδοσης που παρουσιάζονται από την εγκατάσταση των Φ/Β διατάξεων στη βέλτιστη κλίση, τόσο σε εγκατάστασή τους σε μηδενική κλίση όσο και σε εγκατάστασή τους σε κλίση 90°, ανά περιοχή. Έτσι π.χ. η εγκατάσταση των διατάξεων σε οριζόντιο επίπεδο στον ελλαδικό χώρο επηρεάζει την απόδοσή τους σε σχέση με την απόδοση στη βέλτιστη κλίση στον ελάχιστο βαθμό, συγκριτικά με άλλες χώρες, και συγκεκριμένα οδηγεί σε μείωση 9-10% της ενεργειακής απόδοσης.

Στην εργασία [18] μελετάται με το λογισμικό προσομοίωσης TRNSYS η επίδραση της κλίσης και του προσανατολισμού των Φ/Β διατάξεων στην ενεργειακή απόδοσή τους για διάφορες περιπτώσεις περιοχών εγκατάστασης και εποχών. Έτσι, προκύπτουν διάφορα συμπεράσματα, όπως το ότι, ενώ ο προσανατολισμός στο Νότο μεγιστοποιεί την ενεργειακή απόδοση για τη συνολική διάρκεια του έτους, σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους (π.χ. κατά τη διάρκεια της Άνοιξης) και υπό συγκεκριμένες συνθήκες (π.χ. συννεφιά) είναι αποδοτικότερος, αν και με μικρή διαφορά, ο προσανατολισμός των διατάξεων σε διαφορετικές κατευθύνσεις.

Στην εργασία [19] εξετάζεται η χρήση ενός ή πολλαπλών μετατροπέων ισχύος DC/AC σε σύστημα εγκατεστημένης ισχύος μέχρι 5kWp. Όπως αναφέρεται σε αυτή την εργασία, είναι δυνατόν τα πραγματικά χαρακτηριστικά τάσης και ρεύματος ενός Φ/Β πλαισίου να διαφέρουν σε μικρό βαθμό από αυτά που δηλώνει ο κατασκευαστής του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πολλαπλά Φ/Β πλαίσια ίδιου τύπου συνδεδεμένα σε ένα μετατροπέα ισχύος να παρουσιάζουν μεταξύ τους μικρές διαφορές ως προς τα χαρακτηριστικά τάσης και ρεύματος, γεγονός που οδηγεί στη μείωση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος. Λαμβάνοντας υπόψη το συγκεκριμένο φαινόμενο προκύπτει ότι η χρήση ενός μοναδικού μετατροπέα ισχύος DC/AC αποτελεί τη συνολικά οικονομικότερη λύση για αυτό το σύστημα.

Στην εργασία [20] γίνεται οικονομική και περιβαλλοντική ανάλυση για ένα σύστημα Φ/Β διατάξεων, εγκατεστημένων στη βέλτιστη κλίση και στο βέλτιστο προσανατολισμό, το οποίο είναι διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο στην Ισπανία. Έτσι, για διατάξεις εγκατεστημένες στη βέλτιστη κλίση, με δεδομένη απόδοση ενέργειας και χωρίς να λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα σκίασης των διατάξεων γίνεται οικονομική ανάλυση βασισμένη στη μέθοδο της καθαρής παρούσας αξίας και του χρόνου απόσβεσης για διάφορα σενάρια επιδότησης. Επίσης γίνεται υπολογισμός της μείωσης των εκλυόμενων εκπομπών ρυπογόνων ουσιών από τις αντίστοιχες συμβατικές πηγές που θα χρειάζονταν για την παραγωγή της ενέργειας του υπό μελέτη συστήματος.

Στην εργασία [21] γίνεται ανάλυση του σχεδιασμού ενός συστήματος Φ/Β διατάξεων εγκατεστημένου στην οροφή ενός σχολείου για την κάλυψη του φορτίου του μελετώντας τον αριθμό των απαιτούμενων Φ/Β πλαισίων και τις θέσεις εγκατάστασής τους. Ο σχεδιασμός γίνεται με βάση την ενεργειακή απόδοσή του, καθώς και διαφόρων οικονομικών παραμέτρων όπως η τιμή αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας και η ετήσια αύξησή της. Η κλίση των διατάξεων επιλέγεται ίση με τη βέλτιστη για τη μέγιστη απόδοσή τους κατά τη διάρκεια του έτους (δηλαδή ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής), ενώ επιλέγεται και ένα μοντέλο υπολογισμού των αποστάσεών τους, ώστε οι συνολικές ενεργειακές απώλειες από τη μεταξύ τους σκίαση να μην υπερβαίνουν το 2%. Τέλος, γίνεται και περιβαλλοντική μελέτη με υπολογισμό των εκπομπών ρυπογόνων ουσιών που δεν εκλύονται εξαιτίας της χρήσης του εν λόγω συστήματος.

Στην εργασία [22] αναλύεται τόσο ενεργειακά όσο και οικονομικά η απόδοση διαφόρων Φ/Β συστημάτων εγκατεστημένων στη Σαουδική Αραβία με βάση μετρήσεις που ελήφθησαν από αυτά. Επίσης αναλύεται και η περιβαλλοντική επίδρασή τους με παρόμοιο τρόπο με τις προηγούμενες μεθόδους.

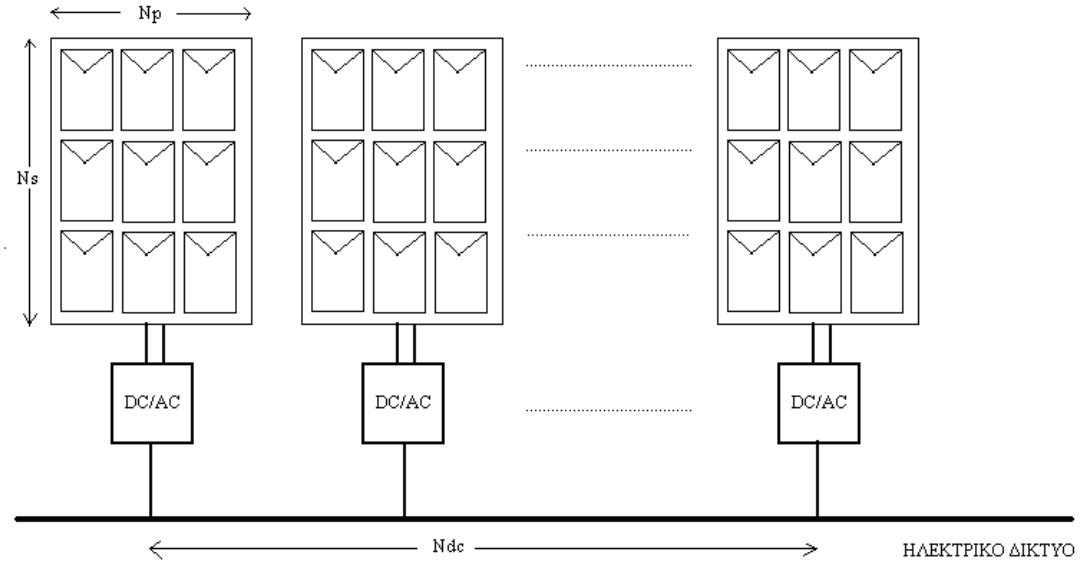
Στην εργασία [23] παρουσιάζεται η διαστασιολόγηση ενός συστήματος Φ/Β διατάξεων εγκατεστημένου στην οροφή ενός κτιρίου. Ειδικότερα δίνεται έμφαση στην έκταση που καταλαμβάνουν οι εγκατεστημένες Φ/Β διατάξεις και στην κλίση τους. Έτσι, επιλέγεται η καλύτερη θέση τους με οικονομικά κριτήρια, λαμβάνοντας υπόψη το ότι υπάρχουν ήδη εγκαταστάσεις βάσεων στήριξης από παλαιότερα εγκατεστημένους ηλιακούς συλλέκτες, και η κλίση τους επιλέγεται να είναι ίση με την κλίση της οροφής (42°). Χρησιμοποιώντας ένα λογισμικό υπολογισμού ενέργειας για τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής της εγκατάστασης, αποδεικνύεται ότι η βέλτιστη κλίση, ώστε να υπάρχει η μέγιστη δυνατή παραγωγή ενέργειας κατά τη διάρκεια του έτους, είναι περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Τέλος, υπολογίζονται τα επιμέρους κόστη για την εγκατάσταση αυτού του συστήματος.

Στην εργασία [24] προτείνεται μια μέθοδος υπολογισμού του εσωτερικού βαθμού απόδοσης της επένδυσης σε ένα σύστημα Φ/Β διατάξεων συνδεδεμένων στο ηλεκτρικό δίκτυο. Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης αποτελεί μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδο αξιολόγησης επενδύσεων. Μέσω μιας σειράς αρκετών βημάτων με μαθηματικούς υπολογισμούς που περιγράφονται και χρησιμοποιώντας παράγοντες όπως ο πληθωρισμός, η ετήσια ενεργειακή παραγωγή, η εγκατεστημένη ισχύς και η τιμή πώλησης της ενέργειας μπορεί να υπολογιστεί ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης.

1.3 Η μέθοδος που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία:

Στην παρούσα εργασία δίνεται μια σύνοψη ενός υπολογιστικού μοντέλου για τον υπολογισμό της σχέσης μεταξύ κόστους και απόδοσης και γίνεται ανάλυση των οικονομικών παραμέτρων για συστήματα φωτοβολταϊκών στοιχείων. Στην εργασία προτείνεται μια μέθοδος για την διαστασιολόγηση συστήματος φωτοβολταϊκών στοιχείων με σκοπό τη διάθεση της ενέργειας που παράγουν σε ηλεκτρικά δίκτυα. Η διαστασιολόγηση αποσκοπεί στην μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους του συστήματος για όλη τη διάρκεια της ζωής του και περιλαμβάνει τον υπολογισμό του βέλτιστου πλήθους των Φ/Β πλαισίων, του βέλτιστου αριθμού των γραμμών των Φ/Β πλαισίων ανά στήλη διάταξης εντός της διαθέσιμης έκτασης και της βέλτιστης κλίσης των πλαισίων κατά τη διάρκεια του έτους. Ο υπολογισμός της ενέργειας γίνεται χρησιμοποιώντας μετεωρολογικά δεδομένα (ηλιακή ακτινοβολία και θερμοκρασία) που έχουν προκύψει ύστερα από τη λήψη μετρήσεων. Επίσης στην μέθοδο που αναπτύχθηκε γίνεται και οικονομική αξιολόγηση των λύσεων που προκύπτουν χρησιμοποιώντας μεθόδους υπολογισμού του χρόνου απόσβεσης και του εσωτερικού βαθμού απόδοσης. Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης του προβλήματος χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων (ΒΣΣ), που αποτελεί μια πολύ αποδοτική κατηγορία αλγορίθμων επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης. Ο αλγόριθμος που έχει αναπτυχθεί είναι πλήρως παραμετροποιήσιμος από το χρήστη ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί στις οικονομικές παραμέτρους και τα επιμέρους κόστη οποιουδήποτε σχετικού προβλήματος διαστασιολόγησης.

Το σύστημα που σχεδιάστηκε αποτελείται από Φ/Β πλαίσια τα οποία συνδέθηκαν σε συγκεκριμένες διατάξεις (N_p παράλληλες ομάδες με N_s συνδεδεμένα σε σειρά Φ/Β στοιχεία η καθεμιά) με ένα αριθμό (N_{dc} μετατροπέων ισχύος DC/AC (inverters) οι οποίοι μετατρέπουν το DC ρεύμα των Φ/Β πλαισίων σε AC ρεύμα που παρέχεται στο ηλεκτρικό δίκτυο και οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι και συγχρονισμένοι με το ηλεκτρικό δίκτυο.



Σχήμα 1.1: Γενικό διάγραμμα συστήματος παραγωγής από Φ/Β πλαίσια.

Η διαστασιολόγηση του συστήματος περιλαμβάνει τον υπολογισμό:

- του βέλτιστου πλήθους των Φ/Β πλαισίων,
- του βέλτιστου αριθμού των γραμμών Φ/Β πλαισίων ανά στήλη διάταξης Φ/Β πλαισίων εντός της διαθέσιμης έκτασης και
- της βέλτιστης κλίσης των πλαισίων κατά τη διάρκεια του έτους (μία ή δύο δυνατές κλίσεις).

Οι παράμετροι κόστους της αντικειμενικής συνάρτησης που βελτιστοποιείται είναι οι εξής:

- το κόστος αγοράς και συντήρησης των Φ/Β πλαισίων,
- το κόστος αγοράς και συντήρησης των μετατροπέων DC/AC,
- το κόστος αγοράς της έκτασης όπου θα εγκατασταθεί το σύστημα παραγωγής ενέργειας
- το κόστος κατασκευής των βάσεων στήριξης.

Υποψήφιες λύσεις του προβλήματος θεωρούνται μόνο αυτές που καλύπτουν πλήρως τους περιορισμούς που τίθενται και σχετίζονται με την ορθή σύνδεση των Φ/Β πλαισίων στους μετατροπείς DC/AC και με τη διάταξη των Φ/Β πλαισίων στην έκταση που διατίθεται για την εγκατάσταση. Σχετικά με τη διάταξη στην έκταση χρησιμοποιείται μοντέλο υπολογισμού των αποστάσεων των Φ/Β πλαισίων ώστε να μην υπάρχουν ποτέ κατά τη διάρκεια του έτους απώλειες ενέργειας εξαιτίας της μεταξύ τους σκίασης. Για την αξιολόγηση μιας λύσης για τον αν μπορεί να είναι υποψήφια λύση του προβλήματος υλοποιείται προσομοίωση για τους παράγοντες της διαστασιολόγησης (αριθμός Φ/Β πλαισίων, αριθμός γραμμών Φ/Β πλαισίων ανά στήλη διάταξης στην έκταση και κλίση Φ/Β πλαισίων) σε σχέση με τον τρόπο σύνδεσης των Φ/Β πλαισίων στους μετατροπείς ισχύος DC/AC και με τον τρόπο διάταξης των Φ/Β πλαισίων στη διαθέσιμη έκταση της εγκατάστασης.

1.4 Η δομή της παρούσας εργασίας

Το 2^{ο} κεφάλαιο αναφέρεται στην ηλιακή ενέργεια. Αφού παρουσιαστούν κάποια αρχικά χαρακτηριστικά της ηλιακής ενέργειας παρουσιάζεται η σύσταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του εδάφους καθώς και οι διαφορετικές μορφές που συναντάμε την ακτινοβολία εντός ατμόσφαιρας. Τέλος παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας σε κεκλιμένο επίπεδο με βάση την προσπίπτουσα ενέργεια σε οριζόντιο επίπεδο.

Το 3^{ο} κεφάλαιο αναφέρεται στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία. Αρχικά γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή και δίνονται πληροφορίες για το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Ακολούθως, περιγράφονται τα βασικά μέρη ενός Φ/Β συστήματος που είναι το Φ/Β πλαίσιο και ο

μετατροπέας και παρατίθενται πληροφορίες για τα είδη των Φ/Β συστημάτων που υπάρχουν στην αγορά. Τέλος δίνονται στοιχεία για παράγοντες που μπορούν να επιδράσουν στην απόδοση των Φ/Β συστημάτων όπως η σκίαση μεταξύ γειτονικών πλαισίων.

Το 4^{ο} κεφάλαιο αναφέρεται στον αλγόριθμο Βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων (ΒΣΣ). Περιγράφεται αναλυτικά ο αλγόριθμος και ο τρόπος λειτουργίας αυτού στη προσπάθεια εύρεσης της βέλτιστης λύσης.

Το 5^{ο} κεφάλαιο αναφέρεται στους γενετικούς αλγορίθμους. Περιγράφονται τα βήματα του βασικού γενετικού αλγορίθμου και οι μηχανισμοί που χρησιμοποιεί για την μοντελοποίηση και την εύρεση της λύσης ενός προβλήματος.

Το 6^{ο} κεφάλαιο αναφέρεται στους μετατροπείς DC/AC και στον τρόπο λειτουργίας αυτών.

Το 7^{ο} κεφάλαιο αναφέρεται στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την οικονομική αξιολόγηση του συστήματος.

Το 8^{ο} κεφάλαιο αναφέρεται στο μοντέλο του συστήματος που χρησιμοποιήθηκε για διαστασιολόγηση και παρουσιάζεται ο αλγόριθμος προσομοίωσής του.

Το 9^{ο} κεφάλαιο αναλύει τη μέθοδο διαστασιολόγησης του συστήματος. Ειδικότερα, αναπτύσσεται ολόκληρη η μοντελοποίηση του προβλήματος με το αλγόριθμο της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων και περιγράφονται οι μηχανισμοί που χρησιμοποιήθηκαν.

Το 10^{ο} κεφάλαιο αναφέρεται στα αποτελέσματα της μεθόδου που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία και επιχειρείται σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των γενετικών αλγορίθμων.

Τέλος, στο 11^{ο} κεφάλαιο αναλύονται τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν και προτείνονται κάποιες βελτιώσεις και μελλοντικές επεκτάσεις της προτεινόμενης μεθόδου.

2. Ηλιακή Ενέργεια

2.1 Εισαγωγή

Ο ήλιος είναι ένας αστέρας του ηλιακού μας συστήματος και δεν είναι τίποτε άλλο παρά μια τεράστια σφαίρα από διάφορα αέρια κυρίαρχα των οποίων είναι το υδρογόνο και το ήλιο. Ο Ήλιος αποτελείται από 80% υδρογόνο (H_2), 19% ήλιο (He) και το υπόλοιπο 1% είναι μείγμα περισσότερων από 100 χημικών στοιχείων. Η θερμοκρασία στο εσωτερικό του εκτιμάται ότι είναι της τάξεως των 10^7 βαθμών Kelvin.

2.2 Ηλιακή ακτινοβολία

Ουσιαστικά ο ήλιος είναι ένας τεράστιος θερμοπυρηνικός αντιδραστήρας που μετατρέπει το υδρογόνο σε ήλιο. Κατά τη διάρκεια αυτή της διαδικασίας κάθε δευτερόλεπτο που περνάει περίπου 655 εκατομμύρια τόνοι υδρογόνου (από τη μάζα του ήλιου) μετατρέπονται σε 650 εκατομμύρια τόνους ηλίου He (που συνεχίζουν να αποτελούν μάζα του Ήλιου). Από τη διαφορά αυτή 4,6 εκατομμύρια τόνοι μετατρέπονται σε ενέργεια. Η ενέργεια αυτή του ήλιου φτάνει στη γη με τη μορφή ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία αυτή, διακρίνεται εύκολα από τα άλλα είδη μεταφοράς ενέργειας, καθώς δεν απαιτείται παρουσία υλικού μέσου για τη διάδοση της και διαδίδεται με την ταχύτητα του φωτός. Η Ηλιακή Ακτινοβολία αποτελεί τον σπουδαιότερο παράγοντα διαμόρφωσης του κλίματος της Γης, εξαιτίας της άνισης κατανομής της στην επιφάνεια αυτής. Η ηλιακή ακτινοβολία ταξιδεύει προς τη γη με την ταχύτητα του φωτός, και μεταφέρει ενέργεια με τα κύματα (ή φωτόνια) της. Με την φασματοσκοπική ανάλυση της ακτινοβολίας, εμφανίζονται τα διάφορα χρώματα που περιέχονται σε αυτή. Το σύνολο αυτών των χρωμάτων αποτελεί το ηλιακό φάσμα, και σε κάθε χρώμα αντιστοιχεί μια συχνότητα. Στο ένα άκρο του φάσματος υπάρχει το κόκκινο χρώμα και στο άλλο άκρο το ιώδες χρώμα. Μεταξύ του κόκκινου και του ιώδους χρώματος περιλαμβάνεται το ορατό ηλιακό φάσμα που αποτελείται από όλα τα γνωστά χρώματα και περιλαμβάνει μόνο τα 44% περίπου της ηλιακής ακτινοβολίας. Εκτός από τις ακτινοβολίες της ορατής περιοχής υπάρχουν και ακτινοβολίες αόρατες. Έτσι μετά

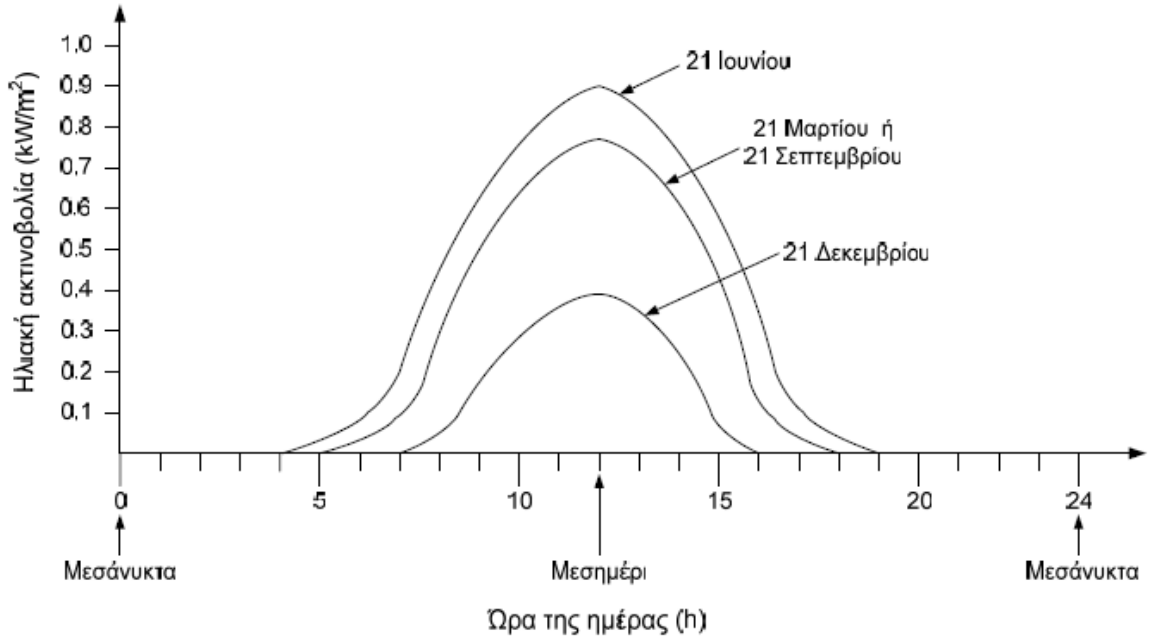
το άκρο που βρίσκεται το κόκκινο υπάρχει η αόρατη υπέρυθρη ακτινοβολία με μήκος κύματός μεγαλύτερο των 0,7 μm, που αποτελεί τα 50% περίπου της ηλιακής ακτινοβολίας. Τέλος μετά το άκρο του ιώδους χρώματος υπάρχει η αόρατη υπεριώδης ακτινοβολία, με μήκος κύματος μικρότερο των 0,4 μm, που αποτελεί τα 6% περίπου της ηλιακής ακτινοβολίας. Από όλες τις συχνότητες του ηλιακού φάσματος μόνο οι μεγάλες συχνότητες στις οποίες αντιστοιχούν φωτόνια μεγάλης ενέργειας είναι δυνατό να προκαλέσουν ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο. Οι συχνότητες αυτές αποτελούν το 75% του φάσματος περίπου ενώ οι υπόλοιπες δεν προκαλούν αξιοσημείωτα αποτελέσματα στα φωτοβολταϊκά στοιχεία

2.2.1 Ακτινοβολία στην επιφάνεια του εδάφους

Το μέγεθος που έχει μεγάλη σημασία για την αποτελεσματικότητα των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, δηλαδή το ποσό της ενέργειας που περιέχεται στο φως του ήλιου και η οποία μεταφέρει μια ακτινοβολία που μεταδίδεται προς μία κατεύθυνση στο χώρο, και ονομάζεται ροή ακτινοβολίας . Η μονάδα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι W/m^2 . Δηλαδή είναι ισχύς ανά μονάδα επιφανείας και η τιμή της είναι το μέτρο της έντασής της. Οι συμβολισμοί που χρησιμοποιούνται παρακάτω για την ηλιακή ακτινοβολία είναι G για μία στιγμιαία τιμή, I για ωριαία τιμή και H για τιμές ημερήσιες, εβδομαδιαίες, μηνιαίες, ετήσιες κ.λ.π. Ελάττωση της έντασης συμβαίνει σε όλη τη διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα της γης λόγο απορρόφησης . Όταν η ατμόσφαιρα είναι καθαρή και ο ήλιος αρκετά ψηλά ώστε οι ακτίνες να προσπίπτουν σχεδόν κάθετα στην επιφάνεια της γης, το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια απ' ευθείας είναι γύρω στα 72%. Εκτός από το ποσοστό αυτό άλλα 7% φτάνουν στην επιφάνεια από διάχυση στα σωματίδια της ατμόσφαιρας. Τα υπόλοιπα 18% απορροφιούνται από το όζον, τους υδρατμούς, τον αέρα και την σκόνη ενώ 3% επιστρέφει πίσω στο διάστημα.

2.2.2 Διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας

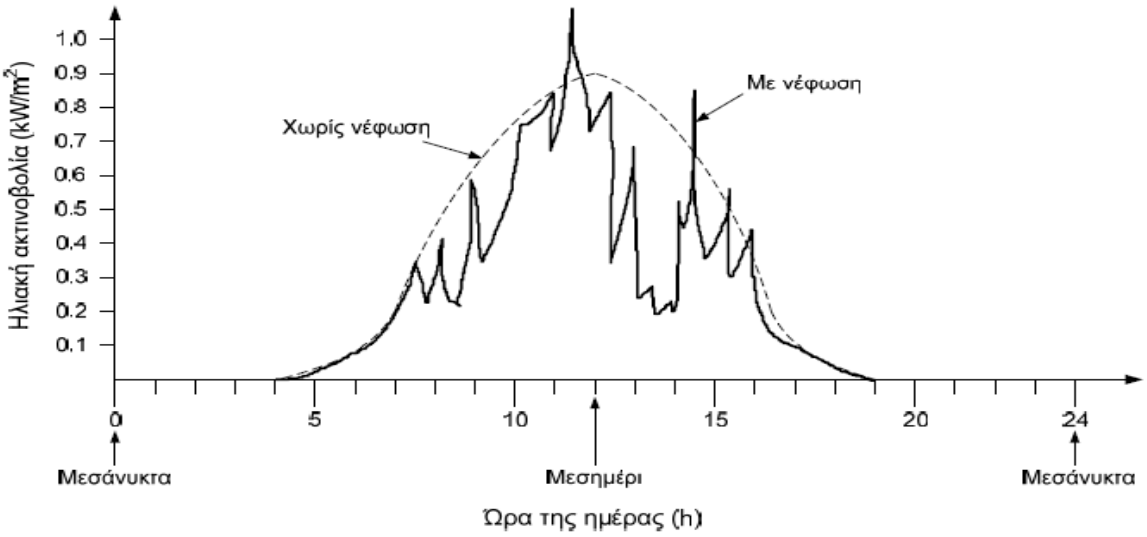
Η ηλιακή ακτινοβολία μεταβάλλεται από εποχή σε εποχή, αλλά και κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου. Έχει παρατηρηθεί πως το μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας σημειώνεται κατά το ηλιακό μεσημέρι, όταν δηλαδή ο ήλιος βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο της τροχιάς του στον ουρανό σε σχέση με τον ορίζοντα, ανεξάρτητα από την εποχή. Ας σημειωθεί πως το ηλιακό μεσημέρι, δε συμπίπτει πάντα με το ωρολογιακό μεσημέρι. Στο Σχήμα 2 1 φαίνεται η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας για ένα 24ωρο, για ορισμένες χαρακτηριστικές ημερομηνίες του έτους. Το σχήμα αναφέρεται σε συνθήκες όπου δεν επικρατεί καθόλου νέφωση, για αυτό και διακρίνεται μια σχετικά ομαλή διακύμανση της ακτινοβολίας. Ως «ώρα ημέρας» θεωρείται η «ηλιακή ώρα» και ως «μεσημέρι» το «ηλιακό μεσημέρι».



Σχήμα 2.1: Ημερήσια διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας, χωρίς την επίδραση νέφωσης.

Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται ο τρόπος που επιδρά η παρουσία νεφών στη διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας. Το σχήμα αυτό παριστά μια τυπική περίπτωση της επίδρασης νεφών κατά τη διάρκεια της ημέρας στη μεταβολή της ηλιακής διακύμανσης. Διακρίνεται ότι πολλές φορές η ακτινοβολία ξεπερνά σε ποσότητα αντίστοιχες τιμές της ακτινοβολίας χωρίς νέφωση. Αυτό

συμβαίνει καθώς η παρουσία νεφών μειώνει την άμεση ακτινοβολία, αλλά αυξάνει σημαντικά τη διάχυτη. Προφανώς, η παρουσία νεφών έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της μετατρεπόμενης ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική και άρα μείωση της παραγόμενης ισχύος.



Σχήμα 2.2 Ημερήσια διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας, με την επίδραση νέφωσης.

2.2.3 Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ορίζεται ως το ποσό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει σε 1 m^2 και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$B = \frac{E}{S \cdot t} = \frac{P}{S} (W / m^2) \qquad (2.1)$$

Όπου:

Β ένταση ακτινοβολίας σε (W/ m^2),

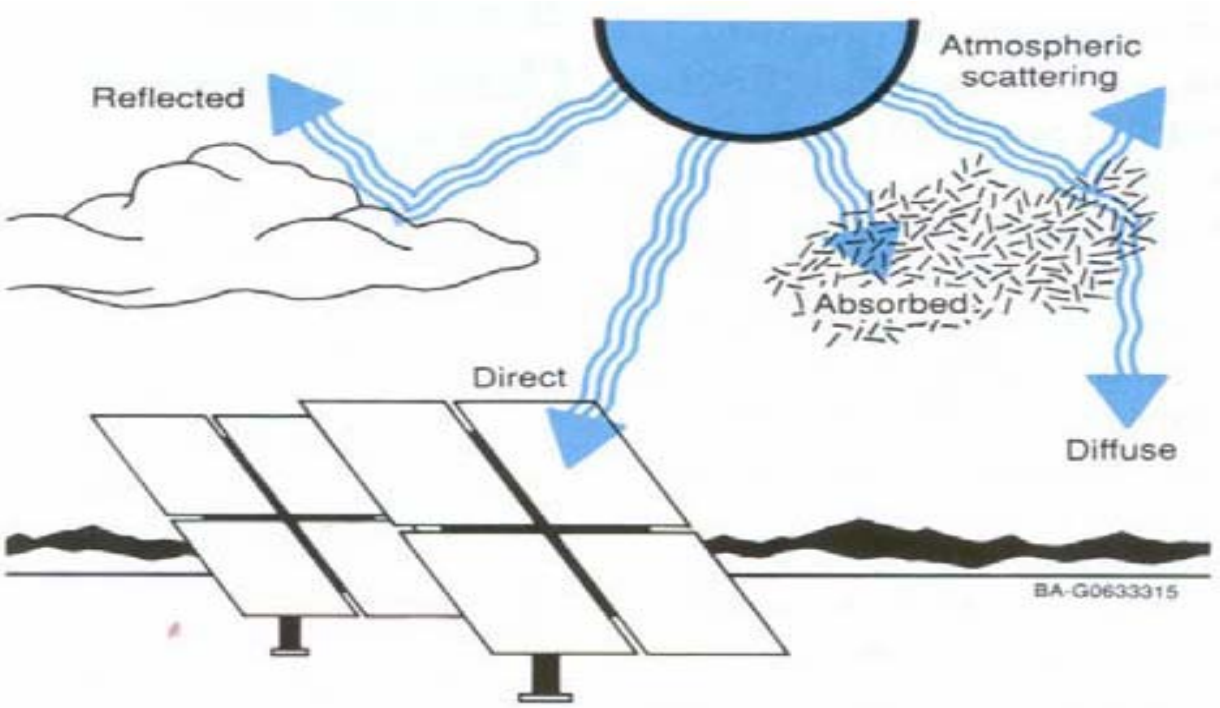
Ε η ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια,

Ρ η ισχύς που προσπίπτει στην επιφάνεια,

S εμβαδόν επιφανείας,

t ο χρόνος.

Επίσης η απορρόφηση εξαρτάται από τη μάζα αέρα που συναντά η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διαδρομή της προς την επιφάνεια της γης. Ενδεικτικό της επίδρασης της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία είναι η εξάρτηση της έντασής της από το υψόμετρο της τοποθεσίας της γης, που δέχεται την ακτινοβολία. Έτσι, έχει μετρηθεί ότι ενώ στη στάθμη της θάλασσας η μέγιστη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας φτάνει μέχρι περίπου 900 - 1000 W/m^2 η τιμή της , αυξάνεται κατά περίπου 7 W/m^2 για κάθε 100m ύψος της τοποθεσίας, επειδή μειώνεται αντίστοιχα το πάχος του στρώματος της ατμόσφαιρας που διασχίζουν οι ηλιακές ακτίνες. Επίσης από τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στην επιφάνεια της γης, που είναι συνήθως λιγότερο από το 60%, ένα ποσοστό είναι άμεση, σε μορφή δέσμης ακτινών, και η υπόλοιπη είναι διάχυτη, διότι έχει προηγουμένως σκεδαστεί και ανακλαστεί στα διάφορα σωματίδια και σταγονίδια που αιωρούνται στον αέρα, ανάλογα βέβαια με τη σύσταση της ατμόσφαιρας και το μήκος της διαδρομής της ακτινοβολίας μέσα σε αυτήν.



Σχήμα 2.3: Μορφές της ηλιακής ακτινοβολίας εντός της ατμόσφαιρας της γης.

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας αναφορικά με την απόσταση από την πηγή που στη προκειμένη περίπτωση είναι ο ήλιος υπολογίζεται με βάση τον τύπο:

$$B_r = \frac{P_o}{4\pi r^2} \tag{2.2}$$

Όπου:

P_o η ισχύς που εκπέμπεται από τον ήλιο,

$4\pi r^2$ το εμβαδόν της εσωτερικής επιφανείας μίας νοητής σφαίρας με ακτίνα r.

Στην αρχή της ατμόσφαιρας της γης η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι:

$$B_R = \frac{P_o}{4\pi R^2} \tag{2.3}$$

όπου R είναι η απόσταση Ήλιου-Γης.

2.2.4 Ηλιακή ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει ανά μονάδα επιφανείας και εκτός γήινης ατμόσφαιρας σε ένα επίπεδο που είναι κάθετο στις ηλιακές ακτίνες και βρίσκεται στη μέση απόσταση ήλιου – γης λέγεται ηλιακή σταθερά G_{sc}. Από πειραματικές μετρήσεις έχουν προταθεί διάφορες τιμές της ηλιακής σταθεράς. Μια τιμή που έχει προταθεί με αβεβαιότητα 1% είναι:

$$G_{sc} = 1353 W/m^2 \tag{2.4}$$

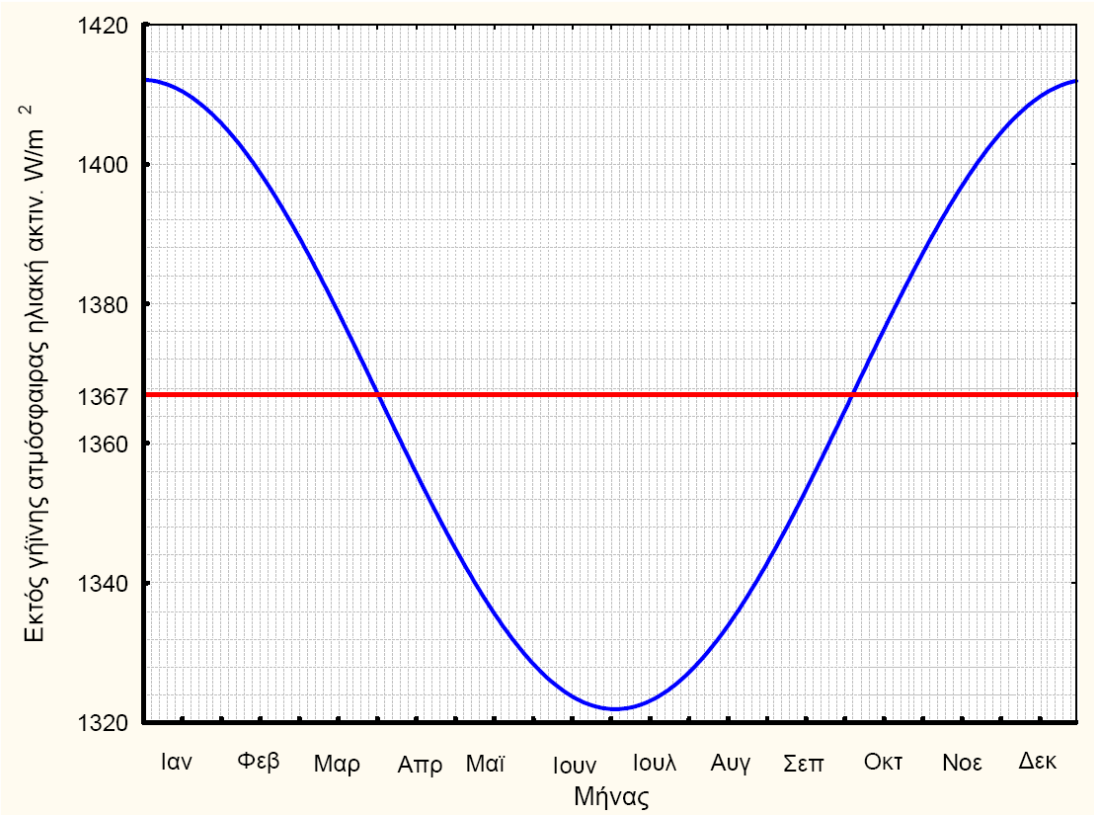
Λόγω της μεταβολής της απόστασης ήλιου-γης κατά την διάρκεια του έτους χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση για τον υπολογισμό της διαχρονικής μεταβολής της ηλιακής σταθεράς:

$$G_{on} = G_{sc}\left[1 + 0.0033\cos\frac{360 \cdot n}{365}\right] \tag{2.5}$$

Όπου:

n οι ημέρες του έτους n=1,2,3,…,365

G_{on} η ακτινοβολία που δέχεται επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας και κάθετο στις ακτίνες του ήλιου.



Σχήμα 2.4: Διαβαθμίσεις της έντασης της Ηλιακής Ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας λόγω της ελλειπτικής κίνησης της Γης γύρω από τον ήλιο.

2.3 Ηλιακή γεωμετρία

Ο βασικότερος παράγοντας στα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι η ηλιακή ακτινοβολία μιας και αυτή είναι η πηγή της ενέργειας. Παρακάτω παρατίθενται μερικά βασικά για την θέση του ήλιου πάνω στο στερέωμα , αλλά και τη θέση του τόπου πάνω στη γήινη σφαίρα στην οποία θέλουμε να εγκαταστήσουμε τα φωτοβολταϊκά μας συστήματα. Ο σημαντικότερος παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η θέση του ήλιου σε σχέση με το σημείο της γης που δέχεται την ακτινοβολία.

2.3.1 Γεωγραφικό πλάτος του τόπου φ

Το γεωγραφικό πλάτος είναι ένα από τα δύο μεγέθη των γεωγραφικών συντεταγμένων με τα οποία προσδιορίζεται η θέση των διαφόρων τόπων στην επιφάνεια της γης. Συγκεκριμένα, προσδιορίζει την γωνιακή απόσταση των διάφορων τόπων από τον Ισημερινό, ο οποίος έχει γεωγραφικό πλάτος ίσο με 0. Συμβολίζεται με το γράμμα (φ) και παίρνει τιμές:

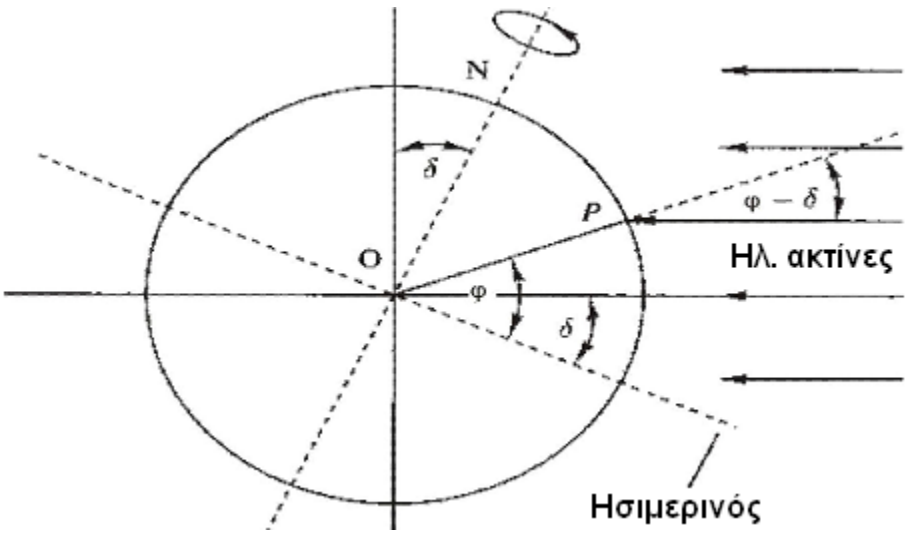
$$-90^o \leq \varphi \leq +90^o \qquad (2.7)$$

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ ΠΛΑΤΟΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ	
Πόλη ή περιοχή	**Γεωγραφικό πλάτος**
Σιδηρόκαστρο, Διδυμότειχο, Ορεστιάδα, Φλώρινα, Έδεσσα, Γιαννιτσά, Κιλκίς, Σέρρες, Δράμα, Καβάλα	41°30'
Ξάνθη, Κομοτηνή, Αλεξανδρούπολη	41°
Καστοριά, Κοζάνη, Νάουσα, Βέροια, Κατερίνη, Θεσσαλονίκη, Πολύγυρος, Σαμοθράκη	40°30'
Κόνιτσα, Γρεβενά, Λιτόχωρο, Κασσάνδρα, Λήμνος	40°
Κέρκυρα, Ηγουμενίτσα, Ιωάννινα, Μέτσοβο, Τρίκαλα, Καρδίτσα, Λάρισα, Βόλος	39°30'

Λευκάδα, Πρέβεζα, Άρτα, Καρπενήσι, Λαμία, Σκύρος,	39°
Κεφαλληνία, Ιθάκη, Αγρίνιο, Μεσολόγγι, Πάτρα, Αμφιλοχία, Λιβαδειά, Θήβα, Χαλκίδα, Χίος	38° 30'
Ζάκυνθος, Αμαλιάδα, Καλάβρυτα, Κόρινθος, Μέγαρα, Ελευσίνα, Αθήνα, Ραφήνα, Κάρυστος, Άνδρος, Ικαρία, Σάμος	38°
Πύργος, Μεγαλόπολη, Τρίπολη, Άργος, Ναύπλιο, Πόρος, Σύρος	37° 30'
Πύλος, Καλαμάτα, Σπάρτη, Πάρος, Νάξος, Κάλυμνος, Κως	37°
Γύθειο, Μήλος, Σαντορίνη, Ρόδος	36° 30'
Κύθηρα, Καστελόριζο	36°
Χανιά, Ρέθυμνο, Ηράκλειο, Κάρπαθος	35° 30'
Ιεράπετρα, Αγ. Νικόλαος Κρήτης, Κύπρος	35°

2.3.2 Απόκλιση του ήλιου δ

Κατά τη διάρκεια ενός έτους, η θέση του ήλιου παίρνει πολύ διαφορετικές τιμές σαν αποτέλεσμα της μεταβολής της απόκλισης (δ), δηλαδή της γωνίας που σχηματίζεται ανάμεσα στη ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με το κέντρο του ήλιου, και στο επίπεδο του ισημερινού. Οι τιμές της απόκλισης του ήλιου είναι θετικές για το βόρειο ημισφαίριο και αρνητικές για το νότιο. Οι ακραίες της τιμές είναι +23.45° στις 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο για το βόρειο ημισφαίριο) και -23,45° στις 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο). Άμεση συνέπεια των διαφορετικών τιμών της απόκλισης του ήλιου κατά τη διάρκεια του έτους είναι οι κυκλικές τροχιές που διαγράφονται βορειότερα στο ουρανό το καλοκαίρι, με νωρίτερα ανατολή και αργότερη δύση στο βόρειο ημισφαίριο, ενώ το χειμώνα συμβαίνει το αντίθετο. Παράλληλα διαμορφώνονται οι αντίστοιχες μετεωρολογικές και κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν σε διάφορες εποχές του έτους. Ιδιαίτερα χρήσιμα μεγέθη για τη γενική εκτίμηση της καθημερινής και της εποχιακής διακύμανσης της ακτινοβολίας σε ένα τόπο, είναι η θεωρητική ηλιοφάνεια, δηλαδή το χρονικό διάστημα από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου, καθώς και η μέση πραγματική ηλιοφάνεια που δείχνει το μέσο όρο των ωρών που ο ήλιος δεν καλύπτεται από σύννεφα. Επίσης, ο αριθμός των ημερών με ηλιοφάνεια, στη διάρκεια των οποίων ο ήλιος δεν καλύπτεται από σύννεφα, καθώς και των ανήλιων ημερών, που ο ήλιος καλύπτεται από σύννεφα σε ολόκληρο το διάστημα της ημέρας.



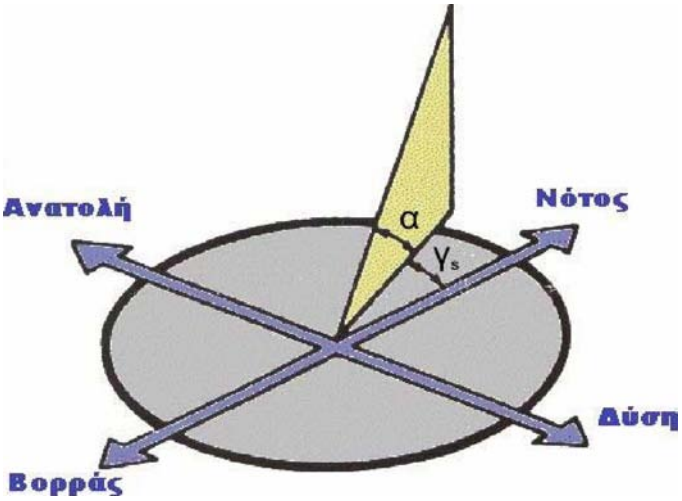
Σχήμα 2.5: Ηλιακή Γεωμετρία

Η απόκλιση του ήλιου δίνεται από την εξίσωση:

$$\delta = 23.45\sin\left(\frac{360(284+n)}{365}\right) \tag{2.8}$$

Η θέση του ήλιου στον ουρανό ενός τόπου περιγράφεται συνήθως με δύο γωνίες : την γωνία πρόσπτωσης και το αζιμούθιο του ήλιου. Γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών (α) είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της διεύθυνσης των ηλιακών ακτινών και της κάθετου στο κεκλιμένο επίπεδο. Αζιμούθιο της επιφάνειας (γ) είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της διεύθυνσης βορρά – νότου και της προβολής της στο οριζόντιο επίπεδο. Έχει θετικές τιμές δυτικά του νότου και αρνητικές τιμές ανατολικά του νότου. Η γνώση της γωνίας πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών (θ) είναι σημαντική στις εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας, διότι από την τιμή της γωνίας αυτής θα εξαρτηθεί το μέγεθος της ηλιακής ακτινοβολίας που θα δεχθεί η αντίστοιχη επιφάνεια. Έτσι όσο μικρότερη είναι η γωνία αυτή τόσο μεγαλύτερη είναι η ακτινοβολία που θα δεχθεί η επιφάνεια. Κατά την διάρκεια της ημέρας, το ύψος του ήλιου και το αζιμούθιο μεταβάλλονται συνεχώς καθώς ο ήλιος διατρέχει τον ουρανό.

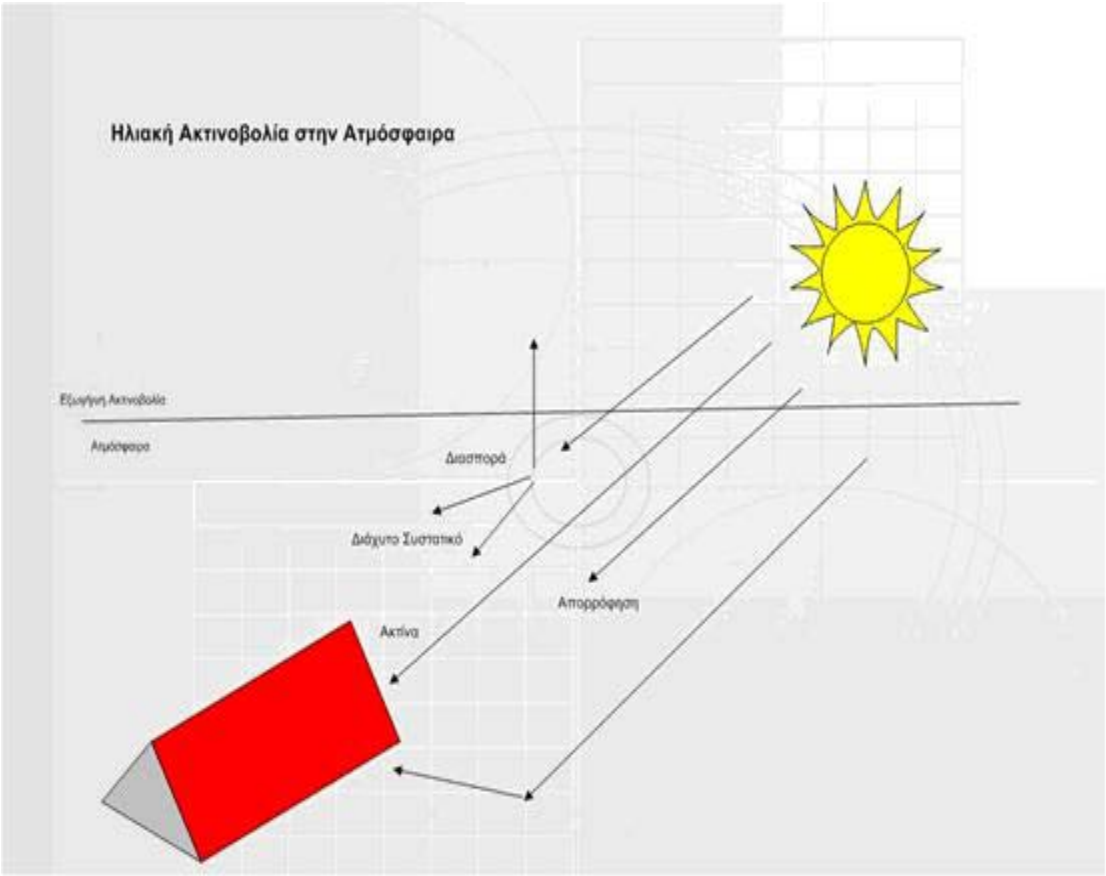
.



Σχήμα 2.6: Το ύψος (α) και το αζιμούθιο του ήλιου (γ)

2.4 Σύσταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης

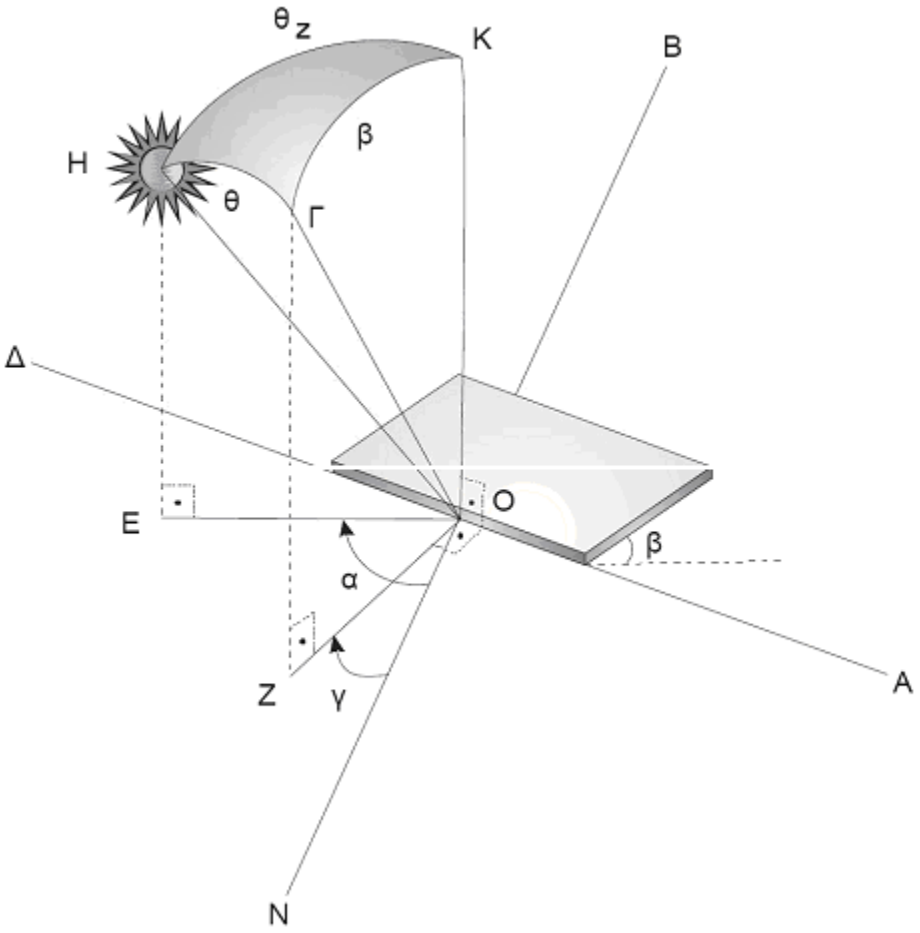
Η γη ακτινοβολεί όση ενέργεια έχει λάβει, δημιουργώντας μία κατάσταση ενεργειακής ισορροπίας σε θερμοκρασία κατάλληλη για τη διατήρηση της ζωής. Έτσι, θεωρώντας την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στη γη σε ποσοστό 100%, από αυτήν το 34% ανακλάται στο διάστημα, το 19% απορροφάται στην ατμόσφαιρα, ενώ η επιφάνεια του εδάφους δέχεται άμεση ακτινοβολία (direct radiation) κατά 24%, διάχυτη ακτινοβολία (diffuse radiation) κατά 23% και επίσης ένα ποσοστό alberto ακτινοβολίας που προέρχεται από τις ανακλάσεις του εδάφους. Δηλαδή, η συνολική ηλιακή ακτινοβολία που τελικά προσπίπτει στην επιφάνεια του εδάφους είναι περίπου 47%. Η άμεση ακτινοβολία είναι το ποσοστό του φωτός που φθάνει απευθείας από τον ήλιο και μπορεί να ανακλαστεί και να εστιαστεί κάπου. Η διάχυτη είναι το κλάσμα του φωτός που διαχέεται για παράδειγμα λόγω της ατμόσφαιρας ή νέφωσης και χωρίς την οποία ο ουρανός θα φαινόταν μαύρος. Η συνολική ακτινοβολία είναι το άθροισμα των παραπάνω συνιστωσών.



Σχήμα 2.7 : Ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα.

2.5 Ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

Η γνώση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται ένα κεκλιμένο επίπεδο είναι απαραίτητη στις περισσότερες εφαρμογές και μελέτες των ηλιακών συστημάτων, όπως βέβαια και στα φωτοβολταϊκά. Για τη σωστή επιλογή της κλίσης της φωτοβολταϊκής γεννήτριας απαιτείται η γνώση της ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο σε μηνιαία και ετήσια βάση.



Σχήμα 2.8: Θέση του ήλιου ως προς το κεκλιμένο επίπεδο.

2.5.1 Ωριαία ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

Όπως ήδη είπαμε η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ένα κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια του εδάφους αποτελείται από τρεις συνιστώσες : την άμεση που προέρχεται από τον ηλιακό δίσκο, τη διάχυτη που προέρχεται από τον ουράνιο θόλο, την ανακλώμενη που προέρχεται από το έδαφος της γύρω περιοχής. Η άμεση ακτινοβολία που θα δεχθεί το επίπεδο εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών. Η διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία που δέχεται το κεκλιμένο επίπεδο δεν εξαρτώνται από το προσανατολισμό του επιπέδου και ούτε

προέρχονται απ' όλο τον ουράνιο θόλο ή το έδαφο ς της γύρω περιοχής. Έτσι η διάχυτη ακτινοβολία που δέχεται το κεκλιμένο επίπεδο θα προέρχεται μόνο από το τμήμα του ουρανού που "βλέπει" το επίπεδο. Έπειτα απ' αυτά για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη για κάθε μία από τις συνιστώσες και ένας διορθωτικός συντελεστής. Ο διορθωτικός συντελεστής για την άμεση ηλιακή ακτινοβολία (R_b), είναι ο λόγος της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο (I_{bT}), προς αυτήν στο οριζόντιο επίπεδο (I_b):

$$R_b = \frac{I_{bT}}{I_b} = \frac{I \cdot \cos\theta}{I \cdot \cos\theta_Z} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_Z} \tag{2.9}$$

Ο υπολογισμός της συνιστώσας για την διάχυτη ακτινοβολία βασίζεται στην υπόθεση ότι η διάχυτη είναι ισοτροπική, δηλαδή είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη απ' τον ουράνιο θόλο. Ο διορθωτικό ς συντελεστής για την διάχυτη ακτινοβολία (Rd) είναι ο λόγος της διάχυτης ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο (IdT) προς αυτήν στο οριζόντιο (Id). Απ' ολόκληρη την διάχυτη ακτινοβολία που προέρχεται από τον ουράνιο θόλο, ένα μόνο ποσοστό δέχεται το κεκλιμένο επίπεδο. Το ποσοστό αυτό είναι ο λόγος του τμήματος του ουράνιου θόλου που "βλέπει" το κεκλιμένο, προς ολόκληρη την ημισφαιρική επιφάνεια του ουράνιου θόλου. Για ένα κεκλιμένο επίπεδο που δεν δέχεται σκίαση, με κλίση β, στην επιφάνεια της γης, ο διορθωτικός αυτός συντελεστής είναι :

$$R_d = \frac{I_{dT}}{I_d} = \frac{1+\cos\beta}{2} \tag{2.10}$$

Ο διορθωτικός συντελεστής για την ανακλώμενη ακτινοβολία (R_r), είναι ο λόγος της ανακλώμενης ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο (I_{rT}), προς αυτήν στο οριζόντιο (Ir). Η ανακλώμενη όμως στο οριζόντιο επίπεδο είναι το γινόμενο του συντελεστή ανάκλασης ρ του εδάφους της γύρω περιοχής επί την ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο I. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση έτσι και εδώ, αν υποθέσουμε ότι η ανακλώμενη είναι ισοτροπική, τότε για ένα κεκλιμένο επίπεδο με κλίση β, στην επιφάνεια της γης ο διορθωτικός συντελεστής είναι :

$$R_r = \frac{I_{rT}}{I\rho} = \frac{1-\cos\beta}{2} \qquad (2.11)$$

Από τα παραπάνω η ολική ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο I_t, είναι:

$$I_t = I_b R_b + I_d R_d + I\rho\frac{1-\cos\beta}{2} \qquad (2.12)$$

Αν ληφθούν υπ' όψη οι παραπάνω εξισώσεις τότε η ολική ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο υπολογίζεται :

$$I_T = I_b\frac{\cos\theta}{\cos\theta_Z} + I_d\frac{1+\cos\beta}{2} + \mathrm{I}\rho\frac{1-\cos\beta}{2} \qquad (2.13)$$

Η εξίσωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ωριαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σ' ένα κεκλιμένο επίπεδο με κλίση β, εφόσον θεωρηθούν ότι οι γωνίες θ και θz, αντιστοιχούν στο μέσο ν της αναφερόμενης ώρας. Ο συντελεστής ανάκλασης ρ λαμβάνεται συνήθως 0.2 αλλά όταν η γύρω περιοχή είναι καλυμμένη με χιόνι ο συντελεστής αυτός μπορεί να είναι πολύ υψηλός. Διάφορες τιμές του ρ δίνονται στον πίνακα 2.2:

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ Ρ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ	
Είδος επιφανείας	**Συντελεστής ανάκλασης**
Φρέσκο χιόνι	0.87
Ξηρή άμμος	0.18
Δάσος κωνοφόρων	0.05
Τσιμέντο	0.33

2.5.2 Μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

Επειδή στην εξίσωση υπολογισμού του I_t ο δεύτερος και τρίτος όρος είναι ανεξάρτητοι απ' την γωνία πρόσπτωσης, η εξίσωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο H_T, αρκεί στον πρώτο όρο να χρησιμοποιηθεί ένας διορθωτικός συντελεστής R_b και οι ακτινοβολίες να θεωρηθούν ημερήσιες. Έτσι η εξίσωση θα γίνει :

$$H_T = H_b R_b \frac{\cos\theta}{\cos\theta_Z} + H_d \frac{1+\cos\beta}{2} + H\rho \frac{1-\cos\beta}{2} \tag{2.14}$$

Ο συντελεστής R_b είναι ο λόγος της ημερήσιας άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο προς αυτήν στο οριζόντιο . Για το βόρειο ημισφαίριο και για επιφάνειες νότιου προσανατολισμού (γ = 0) ο συντελεστής αυτός μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση :

$$R_b = \frac{\int_{\omega'_{sr}}^{\omega'_{ss}} \cos\theta d\omega}{\int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}} \cos\theta_Z d\omega} \tag{2.15}$$

Όπου:

ω'_{ss} ωριαία γωνία δύσης στο κεκλιμένο επίπεδο,

ω'_{sr} ωριαία γωνία δύσης στο κεκλιμένο επίπεδο,

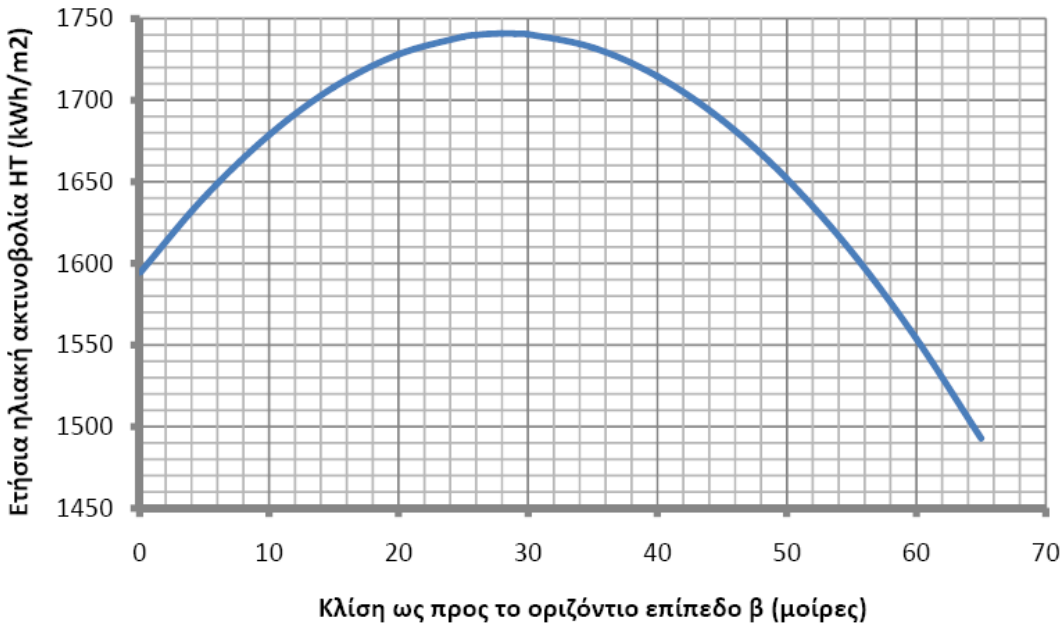
ω_{ss} ωριαία γωνία δύσης στο οριζόντιο επίπεδο και

ω_{sr} ωριαία γωνία δύσης στο οριζόντιο επίπεδο.

2.5.3 Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

Η ετήσια ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο είναι από τα πιο σημαντικά μεγέθη στις ηλιακές εφαρμογές. Ο υπολογισμός της μπορεί να γίνει με βάση τη μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή αρκεί απλά να αθροίσουμε τις τιμές της μηνιαίας ακτινοβολίας, που αντιστοιχούν στην επιλεγμένη κλίση, για όλους τους μήνες του έτους:

$$H(\beta) = \sum_{i=1}^{12} H_i(\beta) \tag{2.16}$$



Σχήμα 2.9: Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με την κλίση για γεωγραφικό πλάτος $\varphi=37^o$

Αυτό που μας ενδιαφέρει σε μια ηλιακή εφαρμογή είναι η εύρεση εκείνης της γωνίας κλίσης των συλλεκτών, που θα έχει ως αποτέλεσμα τη μέγιστη ετήσια ηλιακή ακτινοβολία. Παλιότερες μελέτες υποδείκνυαν την επιλογή γωνίας ίση με το γεωγραφικό πλάτος και κατεύθυνση προς τον νότο (γ=0) (για επιφάνειες στο βόρειο ημισφαίριο). Η πρόταση αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι μια επιφάνεια θα δέχεται τη μέγιστη ακτινοβολία όταν αυτή προσπίπτει κάθετα σε αυτή.

Επομένως η βέλτιστη κλίση για μια επιφάνεια που βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος φ και είναι στραμμένη προς τον νότο προκύπτει από το μέγεθος φ + δ, όπου δ η απόκλιση. Η γωνία αυτή κυμαίνεται μεταξύ φ+23,45^o τον χειμώνα (21 Δεκεμβρίου) και φ-23,45^0 το καλοκαίρι (21 Ιουνίου). Είναι λογικό επομένως να επιλεγεί η μέση τιμή της μεταβολής αυτής της γωνίας, για να έχουμε τη μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή γωνία ίση με το γεωγραφικό πλάτος φ. Διαφορετικά, η επιλογή γωνίας κλίσης ίσης με το γεωγραφικό πλάτος ισοδυναμεί με μια οριζόντια επιφάνεια στο επίπεδο του ισημερινού και η οριζόντια επιφάνεια αυτή θα έχει τη μέγιστη ετήσια ηλιακή ακτινοβολία.

Νεότερες μελέτες έχουν δείξει ότι κάτι τέτοιο δεν είναι απόλυτα ακριβές. Η βέλτιστη γωνία κλίσης προκύπτει σημαντικά μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος και η απόκλιση αυτή μεγαλώνει ταυτόχρονα με την αύξηση του γεωγραφικού πλάτους. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε κάποιους παράγοντες, οι οποίοι καταδεικνύουν και τις αδυναμίες-παραδοχές της προηγούμενης πρότασης:

• Μεγαλύτερο γεωγραφικό πλάτος, συνεπάγεται μεγαλύτερη διαφορά στη διάρκεια της μέρας ανάμεσα στο καλοκαίρι και τον χειμώνα και επομένως μεγαλύτερη διαφορά στην ηλιακή ακτινοβολία.
• Ο καιρός είναι στη γενική περίπτωση καλύτερος κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, όπου ο ήλιος βρίσκεται ψηλότερα στον ουρανό.
• Η συνιστώσα της διάχυτης ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη σε μικρότερες τιμές της γωνίας κλίσης του επιπέδου.
• Υπάρχει λιγότερη ατμοσφαιρική απορρόφηση όταν ο ήλιος είναι ψηλότερα στον ουρανό.
• Μικρότερες γωνίες κλίσης μειώνουν τη διάρκεια που ο ήλιος βρίσκεται πίσω από την επιφάνεια (κατά την ανατολή και τη δύση του ηλίου).

Επιπλέον, όσον αφορά τον απόλυτα νότιο προσανατολισμό (γ=0^0), αυτός θεωρείται βέλτιστος, όταν στη περιοχή που τοποθετούνται τα Φ/Β πλαίσια, ο άξονας Α-Δ δεν παρουσιάζει εμπόδια που μπορεί να δημιουργήσουν μείωση στη διάρκεια της ημερήσιας ηλιοφάνειας. Για παράδειγμα αν υποθέσουμε ότι τα Φ/Β πλαίσια τοποθετούνται σε μια περιοχή, όπου στα ανατολικά υπάρχει ένα ψηλό βουνό, έστω και σε μεγάλη απόσταση, τότε όπως είναι αναμενόμενο χάνεται ένα μέρος της ηλιοφάνειας κατά την ανατολή του ήλιου και μέχρι αυτός να ξεπεράσει σε ύψος την κορυφή του βουνού. Αν ακόμα υποθέσουμε ότι στα δυτικά δεν υπάρχει κάποιο αντίστοιχο

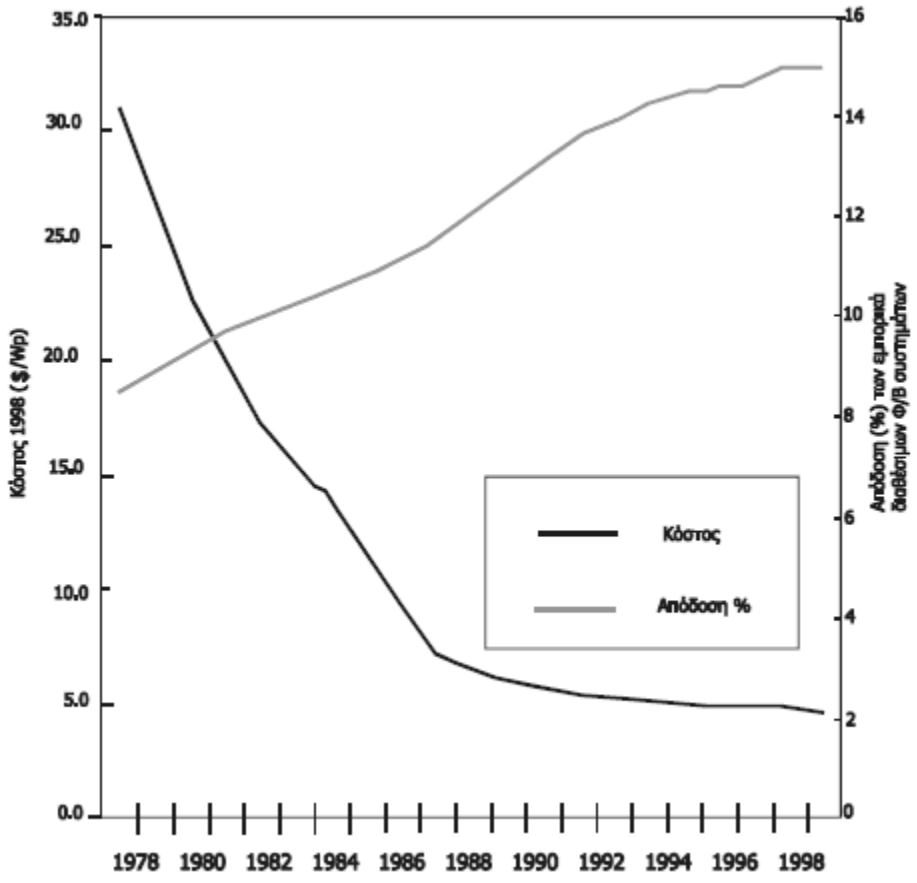
εμπόδιο, αλλά ο ορίζοντας είναι ανοιχτός, τό **ε** προκύπτει μια ασυμμετρία ως προ ς την πρόσληψη ηλιακής ακτινοβολίας από τα Φ/Β στοιχεία κατά τη διάρκεια μιας μέρας. Επομένως είναι φανερό ότι ο απόλυτα νότιος προσανατολισμός δεν είναι βέλτιστος για την περιοχή που περιγράφηκε. Η βέλτιστη λύση είναι να στραφούν οι συστοιχίες προς τα δυτικά και υπό τέτοια γωνία, ώστε να μεγιστοποιείται η ημερήσια προσλαμβανόμενη ηλιακή ακτινοβολία.

3. Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία

3.1 Ιστορική αναδρομή στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών

Η πρώτη γνωριμία του ανθρώπου με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο έγινε το 1839 όταν ο Γάλλος φυσικός Edmond Becquerel (1820 - 1891) ανακάλυψε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο κατά την διάρκεια πειραμάτων του με μια ηλεκτρολυτική επαφή φτιαγμένη από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια. Το επόμενο σημαντικό βήμα έγινε το 1876 όταν οι Adams (1836 - 1915) και ο φοιτητής του Day παρατήρησαν ότι μια ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος παραγόταν από το σελήνιο (Se) όταν αυτό ήταν εκτεθειμένο στο φως. Το 1918 ο Πολωνός Czochralski (1885 - 1953) πρόσθεσε την μέθοδο παραγωγής ημιαγωγού μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si) με την σχετική έρευνα του και η οποία μάλιστα χρησιμοποιείται βελτιστοποιημένη ακόμα και σήμερα. Μια σημαντική ανακάλυψη έγινε επίσης το 1949 όταν οι Mott και Schottky ανέπτυξαν την θεωρία της διόδου σταθερής κατάστασης. Ο δρόμος πλέον για τις πρώτες πρακτικές εφαρμογές είχε ανοίξει. Το πρώτο ηλιακό κελί ήταν γεγονός στα εργαστήρια της Bell το 1954 από τους Chapin, Fuller και Pearson. Η απόδοση του ήταν 6% εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Τέσσερα χρόνια μετά, το 1958 η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων προσαρτάται στον χώρο των διαστημικών εφαρμογών όταν τοποθετήθηκε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα στον δορυφόρο Vanguard I . Το σύστημα αυτό λειτούργησε επιτυχώς για 8 ολόκληρα χρόνια και ήταν ένα από τα πρώτα φωτοβολταϊκά συστήματα. Από το χρονικό αυτό σημείο και μετά, τα φωτοβολταϊκά συστήματα άρχισαν να ενσωματώνονται σταδιακά σε διάφορες εφαρμογές και η τεχνολογία να βελτιώνεται συνεχώς. Το 1962 η μεγαλύτερη Φ/Β εγκατάσταση στον κόσμο γίνεται στην Ιαπωνία από την Sharp, σε έναν φάρο. Η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος είναι 242Wp. Τα φωτοβολταϊκά ξεκίνησαν λοιπόν να κάνουν την εμφάνιση τους αλλά λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής η εφαρμογή τους ήταν δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις αυτόνομων συστημάτων. Η έρευνα όμως προχωρούσε και η απόδοση των Φ/Β συνεχώς βελτιωνόταν. Κυριότερος πελάτης των φωτοβολταϊκών τις δεκαετίες που ακολούθησαν ήταν η NASA. Οι υψηλές τιμές στα φωτοβολταϊκά ήταν ο σημαντικότερος λόγος που δεν υπήρχε περισσότερο ενθουσιώδης αποδοχή από την αγορά. Ενδεικτικά η τιμή των φωτοβολταϊκών ξεκινάει από τα 500$ ανά εγκατεστημένο Watt το 1956, ενώ μετά από 14 χρόνια , το 1970 αγγίζει τα 100$/Watt. Το 1973 οι βελτιώσεις στις μεθόδους παραγωγής φέρνουν το κόστος των φωτοβολταϊκών στα 50$/Watt. Η εξέλιξη αρχίζει πλέον να γίνεται με

ταχύτερους ρυθμούς. Το 1983 η παγκόσμια παραγωγή Φ/Β φτάνει τα 22MW και ο συνολικός τζίρος τα 250.000.000$. Από το 2004 και μετά η μαζική είσοδος μεγάλων εταιρειών στον χώρο των Φ/Β φέρνει την μαζική παραγωγή και αυτή με την σειρά της την τιμή των διασυνδεδεμένων συστημάτων στα 6,5 ευρώ/Wp. Γερμανία και Ιαπωνία κυριαρχούν στην κατασκευή Φ/Β πάνελ και πλέον σε όλες τις αναπτυγμένες χώρες αρχίζουν, με τον έναν (παραγωγή εξοπλισμού) ή τον άλλον τρόπο (κατασκευή Φ/Β εγκαταστάσεων), να υιοθετούν τις τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών και να τις παγιώνουν στην συνείδηση των επενδυτών αλλά και των καταναλωτών ενέργειας.



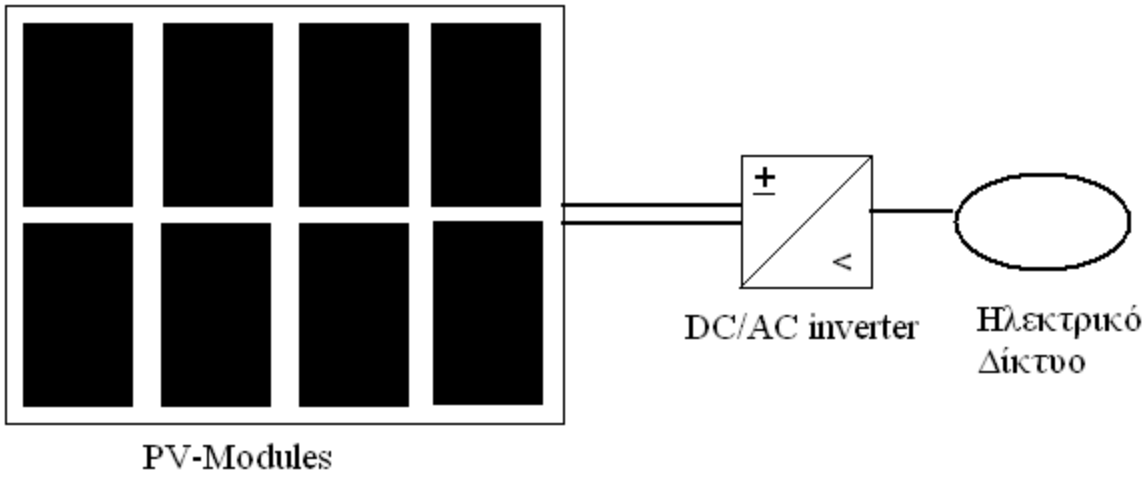
Σχήμα 3.1:Κόστη και αποδόσεις τυπικών φωτοβολταϊκών μετατροπών

3.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και η λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος στηρίζετε στις βασικές ιδιότητες των ημιαγωγών υλικών σε ατομικό επίπεδο. Όταν το φως προσπίπτει σε μια επιφάνεια είτε ανακλάται, είτε την διαπερνά (διαπερατότητα) είτε απορροφάται από το υλικό της επιφάνειας. Η απορρόφηση του φωτός ουσιαστικά σημαίνει την μετατροπή του σε μια άλλη μορφή ενέργειας (σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας) η οποία συνήθως είναι η θερμότητα. Παρόλα αυτά όμως υπάρχουν κάποια υλικά τα οποία έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν την ενέργεια των προσπιπτόντων φωτονίων (πακέτα ενέργειας) σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτά τα υλικά είναι οι ημιαγωγοί και σε αυτά οφείλεται επίσης η τεράστια τεχνολογική πρόοδος που έχει συντελεστεί στον τομέα της ηλεκτρονικής και συνεπακόλουθα στον ευρύτερο χώρο της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών. Τα Φ/Β πλαίσια έχουν ως βασικό μέρος το ηλιακό στοιχείο (solar cell) που είναι ένας κατάλληλα επεξεργασμένος ημιαγωγός λεπτού πάχους σε επίπεδη επιφάνεια. Όταν το ηλιακό φως προσπέσει στα φωτοβολταϊκά στοιχεία ελευθερώνει ηλεκτρικά φορτία στο εσωτερικό τους τα οποία με την ενέργεια που παίρνουν κινούνται ελεύθερα. Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου. Η πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας δημιουργεί ηλεκτρική τάση από 0.5 έως 1 Volt, ανάλογα πάντα από το υλικό κατασκευής και την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, και με την κατάλληλη σύνδεση σε φορτίο παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα.

3.3 Το Σύστημα

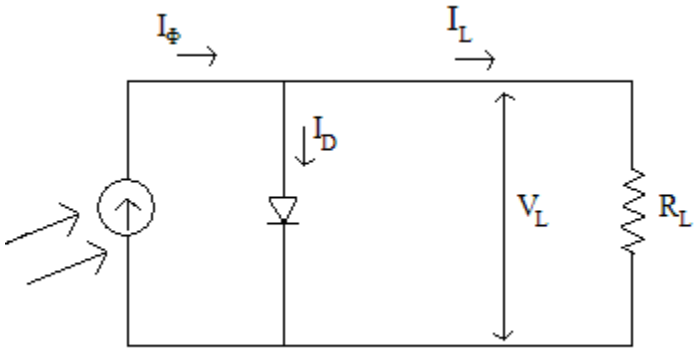
Τα πιο βασικά μέρη ενός Φ/Β συστήματος που είναι το Φ/Β πλαίσιο και ο μετατροπέας DC/AC. Ο μετατροπέας (Inverter) είναι απαραίτητος για τη μετατροπή του συνεχούς (DC) ρεύματος σε εναλλασσόμενο (AC) για να μπορούν να λειτουργούν οι διάφορες συσκευές.



Σχήμα 3.2: Σύστημα παραγωγής ενέργειας από Φ/Β πλαίσια.

3.3.1 Το μοντέλο του ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου

Οι δυο σημαντικότερες παράμετροι περιγραφής την ηλεκτρική απόδοση της κυψέλης είναι η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} και το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc}. Ένα απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα :



Σχήμα 3.3: Ισοδύναμο κύκλωμα φωτιζόμενου ηλιακού στοιχείου.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης μετριέται βραχυκυκλώνοντας την έξοδο και μετρώντας το τελικό ρεύμα υπό πλήρη ακτινοβόληση. Αγνοώντας τη μικρή δίοδο και το ρεύμα γείωσης που διαφεύγει υπό μηδενική τάση, το ρεύμα βραχυκύκλωσης υπό αυτές τις συνθήκες είναι το ρεύμα Iφ που είναι ανάλογο προς τα φωτόνια που απορροφά το ηλιακό στοιχείο, δηλαδή I_{sc}= Iφ .
Η μέγιστη τάση παράγεται υπό συνθήκες τάσης ανοιχτοκύκλωσης. Πάλι, αγνοώντας το ρεύμα γείωσης που διαφεύγει και θέτοντας I_L=0 στην εξίσωση

$$I_L = I_\Phi - I_0\left[e^{\frac{QV_{OC}}{KT}} - 1\right] \tag{3.1}$$

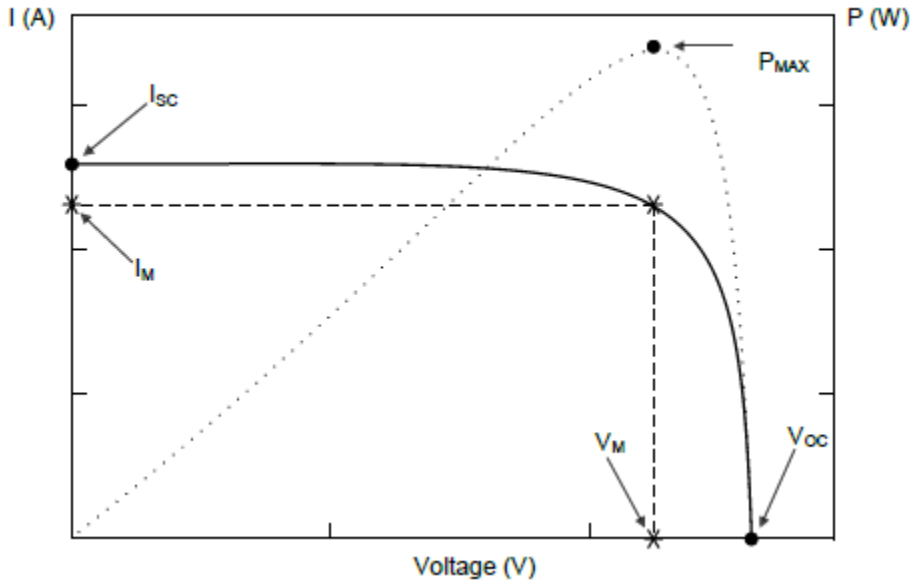
παίρνουμε τη τάση ανοιχτοκύκλωσης :

$$V_{OC} = \frac{KT}{Q}\cdot\ln\left(\frac{I_\Phi}{I_0}+1\right) \tag{3.2}$$

Όπου
I0: το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου
Q: το φορτίο του ηλεκτρονίου = $1{,}602\text{x}10^{-19}$ Coulomb
K: η σταθερά Boltzmann = $1{,}38\text{x}10^{-23}$ Joules/Kelvin
T: η απόλυτη θερμοκρασία σε Kelvin
V_L : η τάση στα άκρα της διόδου από τη πρόσπτωση του φωτός

3.3.2 Χαρακτηριστικές Καμπύλες I-V και P-V

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης γενικά αναπαρίστανται από τη καμπύλη I-V. Το παρακάτω σχήμα 3.3 δείχνει τη I-V χαρακτηριστική ενός φωτοβολταϊκού πάνελ.



Σχήμα 3.3: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός φωτοβολταϊκού.

Η αριστερή κορυφή της καμπύλης I-V υπό μηδενική τάση καλείται ρεύμα βραχυκύκλωσης. Αυτό είναι το ρεύμα που μπορούμε να μετρήσουμε με τους ακροδέκτες εξόδου βραχυκυκλωμένους (μηδενική τάση). Το κάτω δεξί μέρος της καμπύλης στο μηδενικό ρεύμα καλείται τάση ανοιχτοκύκλωσης. Πρόκειται για την τάση που μετριέται ανοιχτοκυκλώνοντας τους ακροδέκτες εξόδου (μηδενικό ρεύμα).

Η ισχύς εξόδου του πάνελ είναι το γινόμενο της τάσης και της έντασης εξόδο υ και γίνεται μέγιστη για τάση και ένταση που αντιστοιχούν στο σημείο γονάτου.

$$P_m = I_m \cdot V_m \qquad (3.3)$$

Η απόδοση της φωτομετατροπής μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης ορίζεται ως ακολούθως:
n = ηλεκτρική ισχύς εξόδου/ προσπίπτουσα φωτεινή ισχύ στη κυψέλη:

$$n = \frac{P_m}{H \cdot A} = \frac{I_m \cdot V_m}{H \cdot A} \qquad (3.4)$$

Όπου

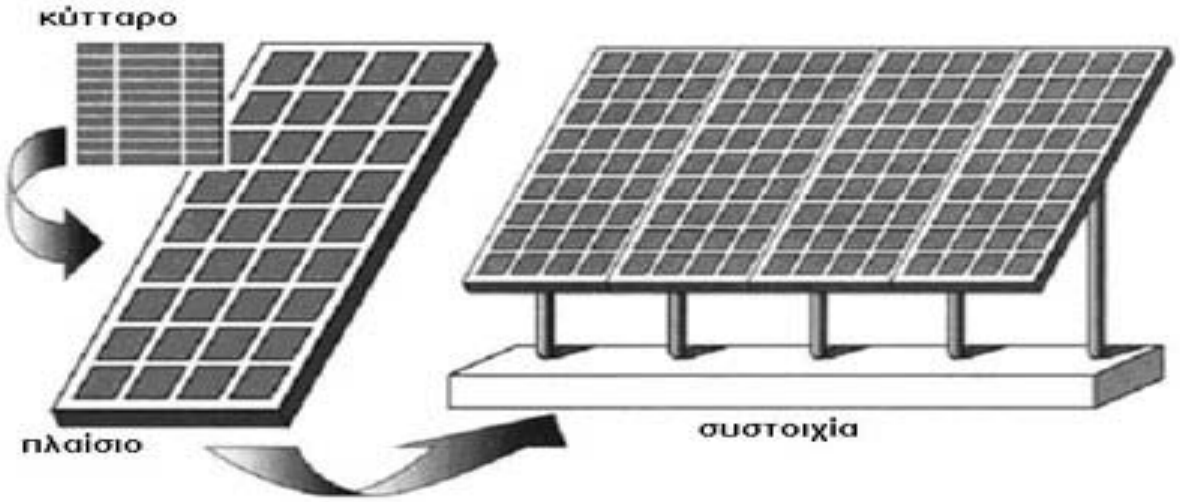
Η: ένταση της ακτινοβολίας στην επιφάνεια του Φ/Β στοιχείου

Α: το εμβαδόν της επιφάνειας του Φ/Β στοιχείου

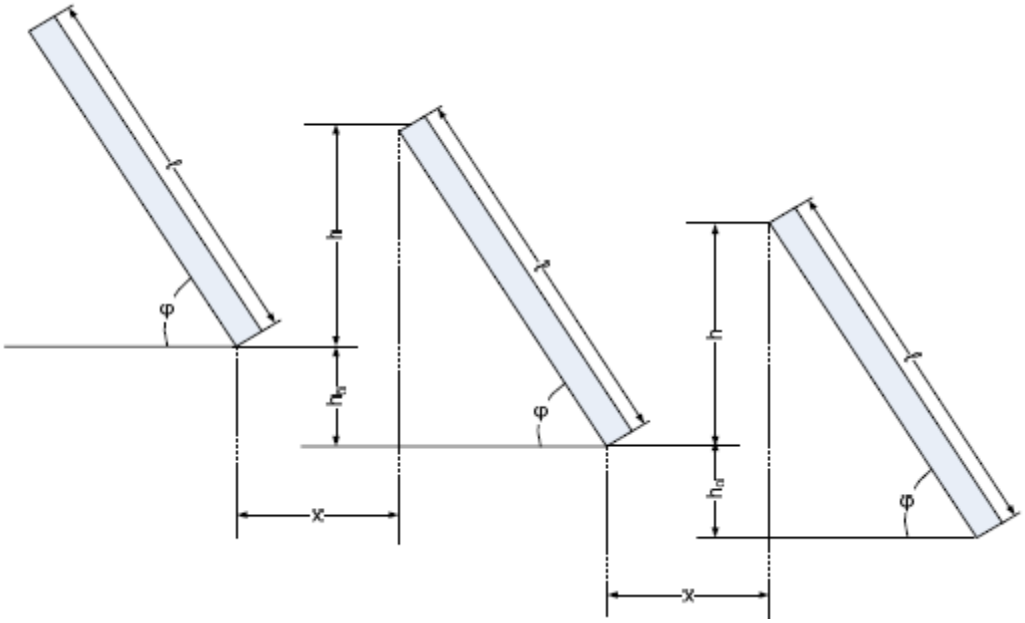
Προφανώς όσο υψηλότερη είναι η απόδοση τόσο μεγαλύτερη ισχύ εξόδου παίρνουμε υπό δεδομένη ακτινοβόληση.

3.4 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ αποτελούν προκατασκευασμένες μονάδες, έτοιμες για εγκατάσταση. Αποτελούνται από πολλά χωριστά πλαίσια, συνδεδεμένα το ένα δίπλα στο άλλο, σε ενιαία κατασκευή, και διαθέτουν κοινή ηλεκτρική σύνδεση. Ο τρόπος σύνδεσης των πλαισίων σε ένα πάνελ, είναι τέτοιος ώστε να μην υπάρχουν μόνο συνδέσεις στη σειρά, αλλά και παράλληλες. Το γεγονός αυτό αυξάνει την αξιοπιστία του πάνελ, αφού εάν πάθει βλάβη, η ισχύς που θα παράγει το σύστημα δε θα μηδενισθεί, όπως εάν οι συνδέσεις ήταν όλες στη σειρά. Σε αρκετές εφαρμογές, οι απαιτήσεις είναι τέτοιες ώστε να χρειαστεί η χρησιμοποίηση μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας, δηλαδή μιας ομάδας περισσότερων συνενωμένων Φ/Β πλαισίων ή πάνελ και με ηλεκτρική αλληλοσύνδεση. Σε μια τέτοια περίπτωση, η σύνδεση των επιμέρους πλαισίων ή πάνελ, εν σειρά ή παράλληλα, γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή τάση στην έξοδο της συστοιχίας. Στο Σχήμα 3.6 φαίνεται η γενική διάταξη των Φ/Β πάνελ και τα χαρακτηριστικά τους μεγέθη. Έχουν εντοπισθεί δύο κύριοι τύποι προβλημάτων κατά τη σύνδεση των Φ/Β πάνελ: το πρόβλημα σφάλματος (mismatch) και το πρόβλημα ζεστού σημείου (hot spot). Ο πρώτος τύπος προβλήματος συνίσταται στο γεγονός ότι η σύνδεση των Φ/Β στοιχείων δεν αποδίδει ισχύ ίση με το άθροισμα ισχύος των στοιχείων. Αυτό μπορεί να συμβεί διότι το ρεύμα που διαρρέει την κατασκευή, δε μπορεί να υπερβεί σε ένταση την ένταση ρεύματος του πιο αδύνατου ηλιακού στοιχείου. Οι συνέπειες του προβλήματος αυτού, αποτελούν αιτίες εμφάνισης του προβλήματος «ζεστού σημείου». Δηλαδή, η απώλεια ισχύος που παρατηρείται στο πρόβλημα «σφάλματος», διοχετεύεται από τα πιο ισχυρά στοιχεία στα πιο αδύναμα, με αποτέλεσμα τότε το ράγισμα των Φ/Β στοιχείων, φαινόμενο που ονομάζεται πρόβλημα «ζεστού σημείου». Το πρόβλημα ζεστού σημείου αντιμετωπίζεται προστατεύοντας τα πιο αδύναμα Φ/Β στοιχεία. Αυτό μπορεί να γίνει συνδέοντας διόδους παράλληλα με ομάδα αδύναμων στοιχείων, συνήθως ανά 15. Με τον τρόπο αυτό αντιμετωπίζεται, εν μέρει, και το πρόβλημα «σφάλματος». Ωστόσο, το τελευταίο μπορεί να αντιμετωπισθεί με την ταξινόμηση των Φ/Β στοιχείων σε ομάδες με όμοιο κύκλωμα βραχυκύκλωσης και παράλληλης σύνδεσης των ομάδων αυτών.



Σχήμα 3.5: Φ/Β πλαίσιο.



Σχήμα 3.6: Διάταξη Φ/Β πάνελ σε συστοιχίες, διακρίνεται η γωνία κλίσης των πάνελ φ.

3.5 Διάκριση Φ/Β συστημάτων

Υπάρχουν δυο κύριες κατηγορίες συστημάτων, το διασυνδεδεμένο με το δίκτυο και το αυτόνομο. Στα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά, τροφοδοτεί τα ηλεκτρικά φορτία και η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας εφ' όσον υπάρχει διαβιβάζεται και πωλείται στο δίκτυο. Στις περιπτώσεις όμως που η ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά δεν επαρκεί για να καλύψει τα φορτία τότε το δίκτυο παρέχει τη συμπληρωματική ενέργεια. Έτσι στα διασυνδεδεμένα συστήματα υπάρχουν δύο μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ένας μετράει την ενέργεια που δίνεται στο δίκτυο και ο άλλος την ενέργεια που παρέχει το δίκτυο. Επίσης στη περίπτωση των διασυνδεδεμένων συστημάτων δεν απαιτείται χρήση συσσωρευτών, γεγονός που ελαττώνει το αρχικό κόστος της εγκατάστασης καθώς και το κόστο ς συντήρησης. Ο δεύτερο ς τύπος είναι τα « Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα». Σήμερα υπάρχει πληθώρα μικρών φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κεραίες τηλεπικοινωνιακών σταθμών, εξοχικά σπίτια, αντλίες άντλησης νερού, χιονοδρομικά κέντρα, τροχόσπιτα, φάρους, μετεωρολογικούς σταθμούς, υπαίθρια φωτιστικά σώματα, σκάφη και άλλα τα οποία καθίστανται ενεργειακά αυτόνομα. Βέβαια υπάρχουν συστοιχίες συσσωρευτών οι οποίες αποθηκεύουν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, ενώ σε περίπτωση που έχουμε φορτία εναλλασσόμενου ρεύματος θα πρέπει να υπάρχει ένας αντιστροφέας στο σύστημα ο οποίος θα μετατρέπει την συνεχή σε εναλλασσόμενη τάση. Όταν τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα συνδυασθούν και με άλλη ανανεώσιμη ή συμβατική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας (ανεμογεννήτρια, ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, κ.λ.π.) τότε χαρακτηρίζονται σαν υβριδικά.

3.6 Παράγοντες επίδρασης απόδοσης φωτοβολταϊκών

Η θεωρητική εκτίμηση της αναμενόμενης ενεργειακής απόδοσης ενός Φ/Β πλαισίου ή ενός Φ/Β σταθμού δε λαμβάνει υπόψη μια σειρά από παράγοντες οι οποίοι συχνά συνεπάγονται το σημαντικό περιορισμό της. Ως γνωστόν, η ισχύς που παράγεται από ένα Φ/Β σύστημα εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων (derating factors), οι οποίοι θα πρέπει κατά κύριο λόγο να εξετάζονται κατά τη φάση σχεδιασμού του συστήματος. Η ετήσια ενεργειακή απόδοση αποτελεί την πιο κατάλληλη παράμετρο στο σχεδιασμό Φ/Β συστημάτων καθώς επίσης και το καλύτερο μέτρο για την παρακολούθηση της μακροχρόνιας συμπεριφοράς τους.

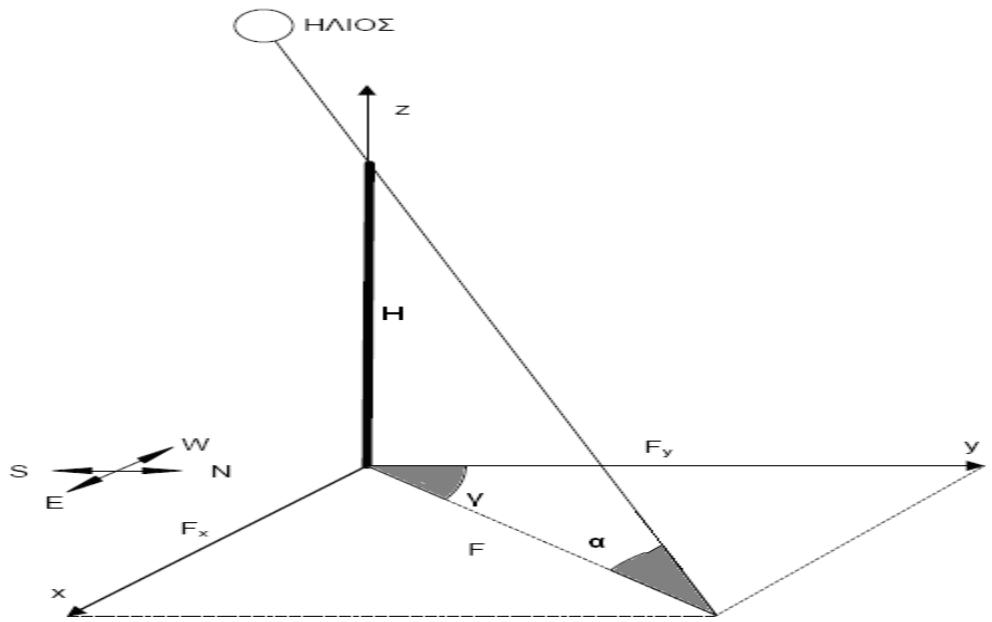
3.6.1 Σκίαση φωτοβολταϊκών πλαισίων

Ο ρυθμός σχεδίασης μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι διαρκώς αυξανόμενος και η σκίαση των συστοιχιών από παρακείμενές τους μπορεί να είναι αναπόφευκτη σε τέτοιου είδους συστήματα [9]. Το ζήτημα της περιορισμένης έκτασης για την εγκατάσταση Φ/Β συστοιχιών γίνεται έντονο, σε περιπτώσεις όπως για παράδειγμα στις στέγες των κτιρίων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, όπου η μεγιστοποίηση ή ένα συγκεκριμένο ποσό λαμβανόμενης ενέργειας είναι επιθυμητό, οι συλλέκτες που διατάσσονται σε σειρές σκιάζονται κατά τη διάρκεια της ημέρας. απλοϊκή λύση ενός μόνο συλλέκτη κεκλιμένου υπό βέλτιστη κλίση δεν είναι πάντα εφαρμόσιμη εξαιτίας αρκετών τεχνικών ή πρακτικών λόγων, είτε άλλοτε, υφίσταται περιορισμός στο μέγιστο επιτρεπόμενο ύψος του συλλέκτη. Κατά συνέπεια, οι συλλέκτες διατάσσονται σε σειρές με κάποια απόσταση μεταξύ τους, κυρίως για λόγους συντήρησης. Με αυτή τη διάταξη, οι συλλέκτες της μίας σειράς είναι δυνατόν να προκαλέσουν σκίαση σε αυτούς της επόμενης, κατά τη διάρκεια της ημέρας, με αποτέλεσμα τη μείωση της ηλιακής ενέργειας που λαμβάνεται. Η εκδήλωση του φαινομένου της σκίασης εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των σειρών συλλεκτών, το ύψος τους, το μήκος της σειράς, τη γωνία κλίσης και το γεωγραφικό πλάτος. Η ύπαρξη πολλών σειρών, από τη μία, αυξάνει τη συνολική επιφάνεια των συλλεκτών (μικρή απόσταση μεταξύ των σειρών), από την άλλη όμως, εντείνει το φαινόμενο της σκίασης.

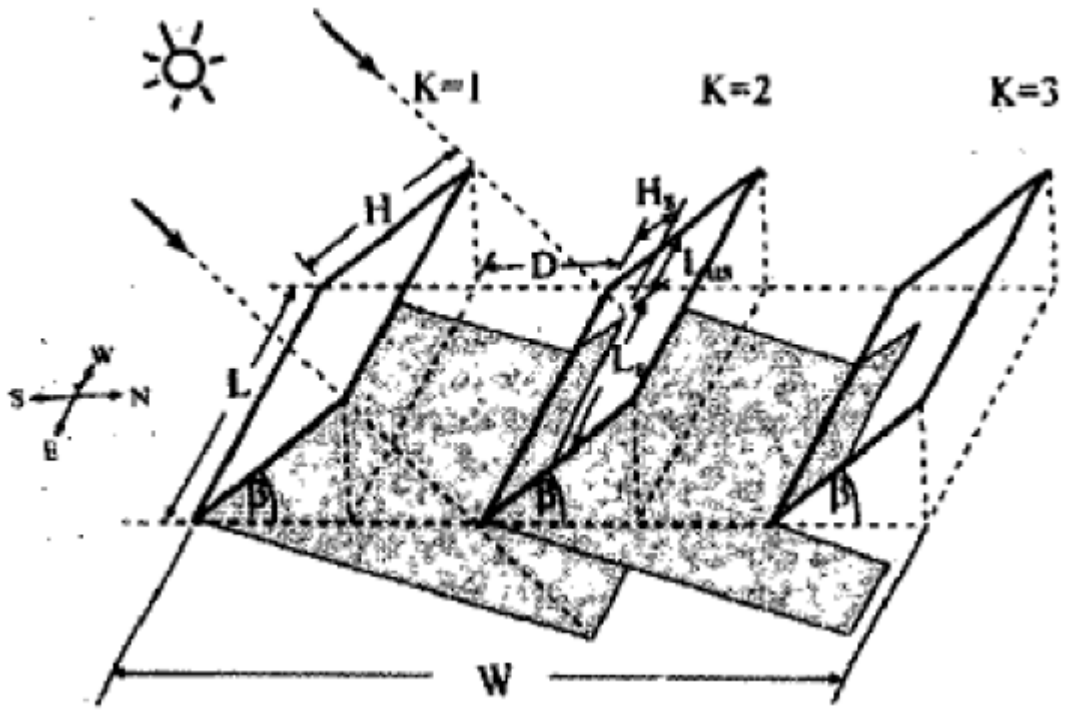
Ο ήλιος βρίσκεται σε γωνία ανύψωσης α (την ωριαία ηλιακή γωνία ω) με αζιμούθια γωνία γ. Οι εξισώσεις υπολογισμού των συνιστωσών αυτών συναρτήσει του χρόνου (ωριαία γωνία ω που σχετίζεται με την ώρα στη διάρκεια της ημέρας και ηλιακή απόκλιση δ με την ημέρα του έτους) και της τοποθεσίας (γεωγραφικό πλάτος φ) είναι οι παρακάτω:

$$F_x = H \frac{\cos\delta \sin\omega}{\sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos\omega} \tag{3.5}$$

$$F_y = H \frac{\cos\delta \sin\omega}{\sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos\omega} \tag{3.6}$$



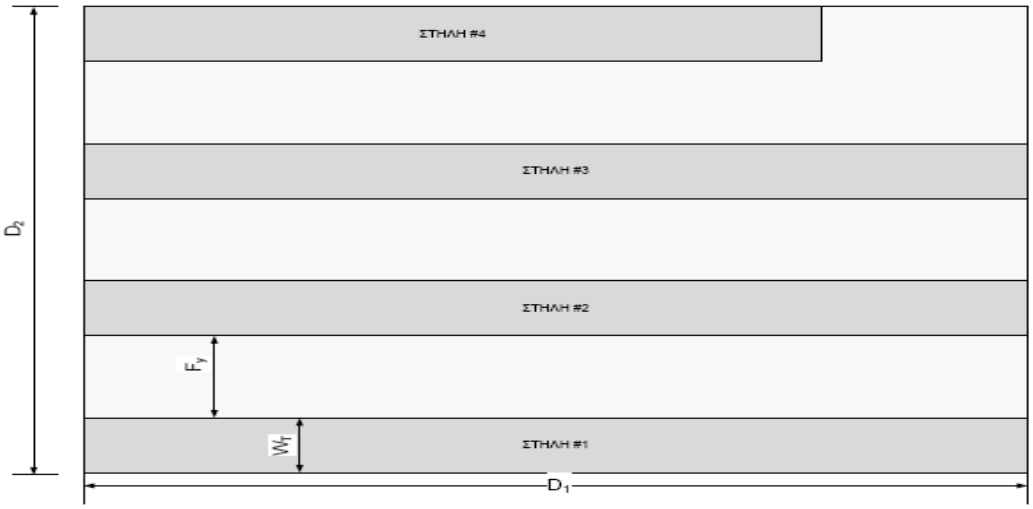
Σχήμα 3.6: Συνιστώσες σκίασης από κολώνα



Σχήμα 3.7: Σκίαση των Φ/Β πλαισίων από γειτονικά Φ/Β πλαίσια.

Για την αποφυγή της σκίασης των Φ/Β πλαισίων από γειτονικά Φ/Β πλαίσια επιλέγεται διάταξη των πλαισίων σε στήλες, με δυνατότητα πολλαπλών γραμμών Φ/Β πλαισίων σε κάθε μία από αυτές, με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται το φαινόμενο της σκίασης. Στο παραπάνω σχήμα

3.6 με F είναι σημειωμένο το μήκος της σκίασης. Το F αναλύεται στις συνιστώσες Fx και Fy από τις οποίες λόγο της υπόθεσης μας για νότιο προσανατολισμό των πλαισίων μας ενδιαφέρει η Fy.



Σχήμα 3.7: Διάταξη Φ/Β πλαισίων σε στήλες σε διαθέσιμη έκταση $D_1 \times D_2$.

Η σκίαση των συλλεκτών θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό μεγάλης κλίμακας Φ/Β συστημάτων, σε ορισμένες δε περιπτώσεις αρκετά σοβαρά. Το κόστος της έκτασης της θέσης εγκατάστασης, η ύπαρξη περιορισμένων διαθέσιμων εκτάσεων ή η επιθυμία για ένα συγκεκριμένο σχεδιασμό τόσο από τη σκοπιά του οικονομικού όσο και του ενεργειακού ζητήματος, μπορεί κάποιες φορές να οδηγήσουν σε μια λύση όπου η σκίαση είναι αναπόφευκτη. Με την αύξηση του αριθμού των σειρών των συλλεκτών σε μια δοσμένη έκταση (ή ισοδύναμα, τη μείωση της απόστασης μεταξύ των συλλεκτών), η συνολική επιφάνεια τους αυξάνεται. Κάτι τέτοιο, όμως, θα είχε σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη σκίαση. Συνεπώς υπάρχει μια βέλτιστη λύση στην περίπτωση που η μεγιστοποίηση ή ένα συγκεκριμένο ποσό λαμβανόμενης ενέργειας είναι επιθυμητό. Εφόσον ο βέλτιστος σχεδιασμός του συστήματος περιλαμβάνει το κόστος αυτού, η μέγιστη λαμβανόμενη ενέργεια αποτελεί μόνο το ένα μέρος στην εξεύρεση μιας βέλτιστης λύσης. Το άλλο μέρος περιγράφεται από τη μέση μέγιστη λαμβανόμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας του συλλέκτη. Η συνολική λοιπόν βέλτιστη λύση προκύπτει από τη σύνθεση των δύο αυτών μεγεθών. Το πρώτο σκέλος, δηλαδή η μέγιστη ενέργεια αποκλειστικά, θα είχε σαν αποτέλεσμα ένα μεγάλο αριθμό σειρών με ιδιαίτερα έντονο το φαινόμενο της σκίασης. Το δεύτερο σκέλος από την άλλη, υποδηλώνει απουσία του φαινομένου της σκίασης. Κατά συνέπεια, ο βέλτιστος αριθμός των σειρών από συλλέκτες σε ένα σύστημα καθορίζεται από το

σημείο εκείνο, πέρα από το οποίο η αύξηση της ενεργειακής απολαβής με παράλληλη αύξηση του αριθμού των σειρών είναι μικρή. Οι παράμετροι σχεδίασης του συστήματος περιλαμβάνουν: δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας, θέση εγκατάστασης (γεωγραφικό πλάτος), ύψος συλλέκτη *H*, γωνία κλίσης *β*, ελάχιστη απόσταση ανάμεσα στους συλλέκτες *Dmin*, διαστάσεις διαθέσιμης έκτασης και απόσταση συλλέκτη από το έδαφος. Καθεμία παράμετρος συνεισφέρει με διαφορετικό τρόπο στη βέλτιστη λύση (για παράδειγμα η απόσταση *d* επηρεάζει σημαντικά τη λύση, εν αντιθέσει με το μήκος σειράς *l* που έχει μικρή μόνο επίδραση). Πρέπει να σημειωθεί βέβαια ότι εκτός από τις παραμέτρους αυτές, ο εκάστοτε σχεδιασμός καθορίζεται σημαντικά από τις συγκεκριμένες σε κάθε περίπτωση απαιτήσεις.

3.6.2 Άλλοι παράγοντες επίδρασης

Αθροιστική ηλιακή ακτινοβολία: Χρονοσειρές ηλιακής ακτινοβολίας μακράς διάρκειας σχετίζονται άμεσα με τον προσανατολισμό της επιφάνειας των συλλεκτών και ενδεχομένως με τη διάταξη ανίχνευσης του ήλιου. Ο συγκεκριμένος παράγοντας εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση εγκατάστασης και κυμαίνεται ανάμεσα σε 25% μείωση περίπου για κάθετη επιφάνεια και πάνω από 30% αύξηση για σύστημα ανίχνευσης ήλιου δύο αξόνων, συγκριτικά με μια σταθερή τοποθέτηση συλλέκτη, κλίσης ίσης με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής.

Ισχύς πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες αναφοράς (Standard Test Conditions, STC): Ανάλυση αρκετών Φ/Β τεχνολογιών έχει αποδείξει ότι για την ίδια περίπου ονομαστική ισχύ, όλες οι τεχνολογίες είναι ισοδύναμες αναφορικά με την αναμενόμενη ετήσια ενεργειακή τους απόδοση, με σφάλμα υπολογισμού μέχρι και 5%.

Θερμοκρασία λειτουργίας: Ανάλυση αρκετών Φ/Β τεχνολογιών και γεωγραφικών θέσεων εγκατάστασης έχει αποδείξει ότι η ετήσια ενεργειακή απόδοση είναι δυνατόν να μειωθεί κατά έναν παράγοντα της τάξης του 2 με 5% εξαιτίας της πραγματικής θερμοκρασίας λειτουργίας. Ο παράγοντας αυτός εξαρτάται από το σχεδιασμό του πλαισίου, την ταχύτητα του ανέμου, την τεχνική τοποθέτησης και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Εξάρτηση τάσης μέγιστης ισχύος (Vmp) από το επίπεδο ακτινοβολίας: Πλαίσια τύπου a-Si και CdTe τείνουν να έχουν για χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας τιμές τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος υψηλότερες από ότι στην πρότυπη ακτινοβολία ενός ήλιου (1 Sun). Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση μέχρι και 10% της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής.

Μεταβολές ηλιακού φάσματος: Έχει βρεθεί ότι οι ωριαίες μεταβολές του ηλιακού φάσματος εξαλείφονται κατά μέσο όρο σε ετήσια βάση. Η τεχνολογία άμορφου πυριτίου έχει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στο συγκεκριμένο φαινόμενο, ωστόσο οι μετρηθείσες επιπτώσεις δεν ξεπερνούν συνήθως το ποσοστό του 3%.

Οπτικές απώλειες σε υψηλές τιμές γωνίας πρόσπτωσης: Τέτοιες απώλειες οφείλονται στα αυξημένα επίπεδα ανάκλασης της γυάλινης επιφάνειας που καλύπτει το Φ/Β πλαίσιο, για γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των 60°. Εντούτοις, η εν λόγω επίδραση είναι σχετικά μικρή σε μακροχρόνια βάση (κάτω από 5%) παρόλο που μπορεί να έχει μεγαλύτερη επίδραση σε μηνιαία (εποχιακή) βάση (γύρω στα 10% για κάθετη τοποθέτηση).

Ρύπανση πλαισίων: Ο παράγοντας της ρύπανσης, μπορεί να προκαλέσει μείωση στην ετήσια ενεργειακή απόδοση σε ποσοστό μέχρι και 10% περίπου.

Παράγοντες επιπέδου συστήματος: Περιλαμβάνουν μια πληθώρα παραγόντων που επιδρούν στη διαδικασία μετατροπής της παραγόμενης dc-ενέργειας σε ac. Διαφορετικοί παράγοντες συναντώνται σε διασυνδεδεμένα και σε αυτόνομα Φ/Β συστήματα.

4. Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων

4.1 Εισαγωγή

Μία πηγή έμπνευσης για την ανάπτυξη της ποικιλίας αλγορίθμων που είναι διαθέσιμοι σήμερα, αποτέλεσε η ίδια η φύση και οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα σε αυτή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι εξελικτικοί αλγόριθμοι , οι οποίοι βασίζουν τη λειτουργία τους σε διαδικασίες που προσομοιώνουν τις διαδικασίες DNA των έμβιων οργανισμών. Μία νέα κλάση αλγορίθμων που σχετίζεται στενά με τους εξελικτικούς αλγορίθμους αποτελεί η κλάση των αλγορίθμων νοημοσύνης σμηνών, οι οποίοι προσομοιώνουν τη δυναμική και τις αλληλεπιδράσεις μελών κοινωνικών ομάδων, μεταξύ τους και με το περιβάλλον τους. Οι μέθοδοι αυτές γνωρίζουν ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια και έχουν εφαρμοστεί σε πληθώρα προβλημάτων του πραγματικού κόσμου. Μία τέτοια μέθοδος είναι και η Βελτιστοποίηση με Σμήνος Σωματιδίων (ΒΣΣ).

4.2 Η έννοια της βελτιστοποίησης και του αλγορίθμου

Πολλά προβλήματα που εμφανίζονται σε εφαρμογές σήμερα, μπορούν να αναχθούν σε προβλήματα ολικής βελτιστοποίησης δηλαδή προβλήματα όπου αναζητούμε το ολικό ελάχιστο ή μέγιστο μιας συνάρτησης με (συνήθως) πολύπλοκη μορφή και πληθώρα ακρότατων, εντός ενός χωρίου (χώρου αναζήτησης). Πολλές φορές είναι απαραίτητο οι λύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης να υπακούν επιπλέον σε συγκεκριμένους περιορισμούς και συνθήκες. Η μορφή της συνάρτησης παίζει καθοριστικό ρόλο στη ευκολία επίλυσης του προβλήματος. Ο όρος βελτιστοποίηση ανταποκρίνεται στην περίπτωση της ελαχιστοποίησης αλλά και της μεγιστοποίησης. Οι αλγόριθμοι επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες, τους τοπικούς που εγγυώνται την εύρεση ενός τοπικού ελαχιστοποιητή και τους ολικούς αλγορίθμους που εγγυώνται τον υπολογισμό ενός ολικού ελαχιστοποιητή. Εκτός από το διαχωρισμό των μεθόδων βελτιστοποίησης σε ολικές και τοπικές υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι κατηγοριοποίησης , ανάλογα με το αν χρησιμοποιούν παραγώγους, αν χρησιμοποιούν πληθυσμούς, αν είναι αλγοριθμικές και αν έχουν εγγυημένη

σύγκλιση και ακρίβεια. Στην πραγματικότητα όμως παρά την όποια προσπάθεια κατηγοριοποίησης δεν υπάρχει κάποια κατηγορία η οποία να αντιμετωπίζει με επιτυχία όλα τα προβλήματα βελτιστοποίησης. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι είναι πολύ αποδοτικοί μόνο σε ορισμένα προβλήματα, ενώ στα υπόλοιπα η απόδοση τους μετριάζεται έντονα. Έτσι, ενώ οι υπάρχουσες μέθοδοι έχουν μελετηθεί ευρέως και έχουν κερδίσει την εμπιστοσύνη της επιστημονικής κοινότητας , υπάρχουν πάντα περιθώρια για την ανάπτυξη νέων μεθόδων, οι οποίες βασίζονται σε καινοτόμες ιδέες και μπορούν να αντιμετωπίσουν αποδοτικά δύσκολα προβλήματα.

4.3 Περιγραφή του αλγορίθμου Βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων

Η Βελτιστοποίηση με Σμήνος Σωματιδίων (ΒΣΣ, Particle Swarm Optimization PSO) είναι ένας στοχαστικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης, που ανήκει στη τάξη των αλγορίθμων νοημοσύνης σμηνών, οι οποίοι είναι εμπνευσμένοι από την κοινωνική δυναμική και την συμπεριφορά που εμφανίζεται σε οργανωμένες κοινωνίες. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης με σμήνος σωματιδίων είναι εμπνευσμένος από τους Eberhart και Kennedy το 1995 [12]. Οι ιδέες που αποτελούν τη βάση της μεθόδου ΒΣΣ δεν εμπνέονται από τους εξελικτικούς μηχανισμούς που συναντιούνται στη φυσική επιλογή, αλλά μάλλον από την κοινωνική δυναμική συγκεντρωμένων σε κοπάδι οργανισμών όπως είναι τα σμήνη πουλιών και τα κοπάδια ψαριών, που διέπονται από τους κανόνες της φύσης. Αυτή η μέθοδος παρέχει μια διαδικασία αναζήτησης, που βελτιστοποιεί μια αντικειμενική συνάρτηση (objective function) εξαρτώμενη από το πρόβλημα, με τη διατήρηση και την εξέλιξη ενός σμήνους των υποψήφιων λύσεων. Το άτομο του σμήνους που παράγει την καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (objective function) σε όλες τις γενιές δίνει τη βέλτιστη λύση. Η Βελτιστοποίηση με Σμήνος Σωματιδίων είναι ένας αλγόριθμος βασισμένος σε πληθυσμό, π.χ. ανιχνεύει έναν πληθυσμό ατόμων που δίνει επιθυμητές περιοχές στο χώρο αναζήτησης. Σε αυτό το σημείο, ο πληθυσμός ονομάζεται σμήνος και τα άτομα (π.χ. στα σημεία του χώρου) ονομάζονται σωματίδια.

4.3.1 Τρόπος λειτουργίας αλγορίθμου ΒΣΣ

Κάθε σωματίδιο κινείται με μια ταχύτητα που προσαρμόζεται στο χώρο αναζήτησης, και συγκρατεί στην μνήμη την καλύτερη θέση που συνάντησε. Στην ολική παραλλαγή της μεθόδου Βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων, η καλύτερη θέση που επιτυγχάνεται από όλα τα άτομα του σμήνους μεταβιβάζεται-μεταδίδεται σε όλα τα σωματίδια. Στην τοπική παραλλαγή της μεθόδου Βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων, κάθε σωματίδιο προσδιορίζεται σε μια γειτονιά που αποτελείται από έναν προκαθορισμένο αριθμό σωματιδίων. Σε αυτή την περίπτωση, η καλύτερη θέση που επιτυγχάνεται από τα σωματίδια που συγκροτούν τη γειτονιά μεταβιβάζεται ανάμεσά τους.

Θεωρούμε ένα χώρο αναζήτησης με D-διάσταση, $S \subset \square^{D}$ και ένα σμήνος αποτελούμενο από N σωματίδια. Το *ι*-στο σωματίδιο παριστάνεται από ένα διάνυσμα D-διάστασης:

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, ...x_{iD})^T \in S \qquad (4.1)$$

Η ταχύτητα αυτού του σωματιδίου είναι:

$$V_i = (v_{i1}, v_{i2}, ...v_{iD})^T \in S \qquad (4.2)$$

Η καλύτερη προηγούμενη θέση που συναντήθηκε από το ι-στο σωματίδιο είναι ένα σημείο στο *S*, που παριστάνεται από:

$$P_i = (p_{i1}, p_{i2}, ...p_{iD})^T \in S \qquad (4.3)$$

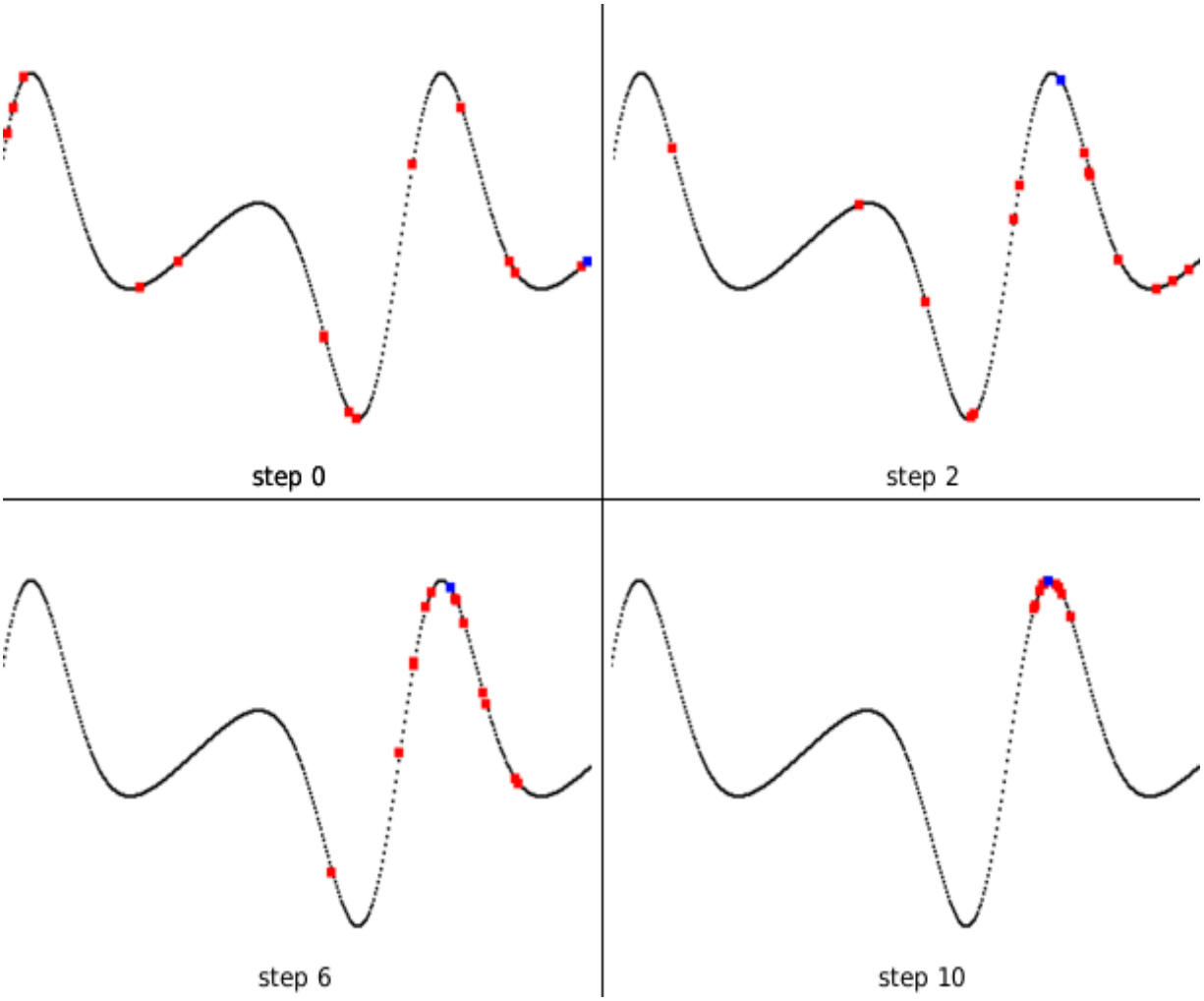
Θεωρούμε ότι το i είναι ο δείκτης του σωματιδίου που επιτυγχάνει την καλύτερη προηγούμενη θέση ανάμεσα από όλα τα σωματίδια της γειτονιάς του ι-στου σωματιδίου και είναι ο αριθμός επανάληψης. Έπειτα το σμήνος καθορίζεται (χειρίζεται) από τις εξισώσεις:

$$V_i(t+1) = x[V_i(t) + c_1 r_1 (P_i(t) - X_i(t)) + c_2 r_2 (P_{g_i}(t) - X_i(t))] \qquad (4.4)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \tag{4.5}$$

όπου i=1,...,N.

Οι c_1 και c_2 είναι δύο παράμετροι που ονομάζονται αντίστοιχα γνωστικός (cognitive) και κοινωνικός (social) παράγοντας. Ο γνωστικός παράγοντας δείχνει κατά πόσο το σωματίδιο τείνει να ακολουθήσει τη δικιά του αυτόνομη πορεία χωρίς να επηρεάζεται από το σύνολο σε αντίθεση με τον κοινωνικό παράγοντα που μας δείχνει την πρόθεση να ακολουθηθεί το σύνολο. Οι r_1, r_2 είναι τυχαίοι αριθμοί ομοιόμορφα κατανεμημένοι στο διάστημα [0,1], και g_1 είναι ο δείκτης του σωματιδίου που επιτυγχάνει είτε την καλύτερη θέση από όλο το σμήνος (ολική παραλλαγή αναζήτησης-glodal version) είτε την καλύτερη θέση στην γειτονιά του i-στου σωματιδίου (τοπική παραλλαγή-local version).



Σχήμα 4.1: Πορεία εξέλιξης του αλγορίθμου και σύγκλιση προς το βέλτιστο.

4.3.2 Παραλλαγές του αλγορίθμου ΒΣΣ

Μια διαφορετική παραλλαγή του αλγορίθμου, που εισάγει ένα συντελεστή [15] που ονομάζεται βάρος αδράνειας (inertia weight), και παριστάνεται από τις εξισώσεις:

$$V_i(t+1) = \omega V_i(t) + c_1 r_1 (P_i(t) - X_i(t)) + c_2 r_2 (P_{g_i}(t) - X_i(t)) \qquad (4.6)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \qquad (4.5)$$

Όπου:

ω είναι το βάρος αδράνειας.

Η γενική έκδοση της ΒΣΣ που περιέχει δύο παράγοντες είναι η

$$V_i(t+1) = \chi[\omega V_i(t) + c_1 r_1 (P_i(t) - X_i(t)) + c_2 r_2 (P_{g_i}(t) - X_i(t))] \qquad (4.7)$$

Οι παράμετροι χ και ω ονομάζονται περιοριστικός παράγοντας και βάρος αδράνειας αντίστοιχα, και χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του μεγέθους της ταχύτητας, δίνοντας έτσι τις δύο κύριες παραλλαγές της μεθόδου ΒΣΣ. Οι δυο παράμετροι είναι μηχανισμοί που ελέγχουν το μέγεθος των ταχυτήτων. Όμως υπάρχουν μερικές κύριες διαφορές στο ν τρόπο που υπολογίζονται και εφαρμόζονται. Η τιμή του περιοριστικού παράγοντα (constriction) καθορίζεται με αναλυτικό τρόπο από την ακόλουθη σχέση:

$$\chi = \frac{2k}{\left|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}\right|} \qquad (4.8)$$

για φ > 4 , όπου $\varphi = c_1 + c_2$, και k =1.

Από την άλλη πλευρά, το βάρος αδράνειας, ω , υπολογίζεται εμπειρικά λαμβάνοντας υπόψη ότι μεγάλες τιμές ενθαρρύνουν την ολική εξερεύνηση (εξερεύνηση νέων περιοχών του χώρου αναζήτησης) ενώ μικρές τιμές διευκολύνουν την λεπτομερέστερη τοπική εξερεύνηση. Μια κατάλληλη τιμή για το ω δίνει την επιθυμητή ισορροπία ανάμεσα στην ικανότητα ολικής και τοπικής εξερεύνησης του σμήνο υ και βελτιώνει την αποδοτικότητα του αλγορίθμου.

Πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι είναι προτιμότερο το βάρος αδράνειας να παίρνει αρχικά μια μεγάλη τιμή και διαδοχικά να ελαττώνεται έτσι ώστε να βρίσκει τις καλύτερες λύσεις. Συνοψίζοντας, σύμφωνα με την εμπειρική μέθοδο, μια αρχική τιμή του ω κοντά στο 1.0 και μια διαδοχική μείωση του προς το 0 θεωρούνται μια κατάλληλη επιλογή. Γενικά, η παραλλαγή της μεθόδου Βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων με τον περιοριστικό παράγοντα είναι γρηγορότερη από ότι η παραλλαγή με το βάρος αδράνειας, εάν και σε μερικές εφαρμογές, πειραματικά δεδομένα έδειξαν ότι η ολική παραλλαγή παρουσιάζει πρόωρη σύγκλιση. Οι συνηθισμένες (default) τιμές του κοινωνικού και γνωστικού παράγοντα προτείνονται ίσες με $c1=c1= 2$. Η αρχικοποίηση του σμήνους και των ταχυτήτων συνήθως πραγματοποιείται τυχαία και ομοιόμορφα στο χώρο αναζήτησης, εάν και πιο εξελιγμένες τεχνικές αρχικοποίησης μπορούν να δυναμώσουν την λειτουργία του αλγορίθμου.

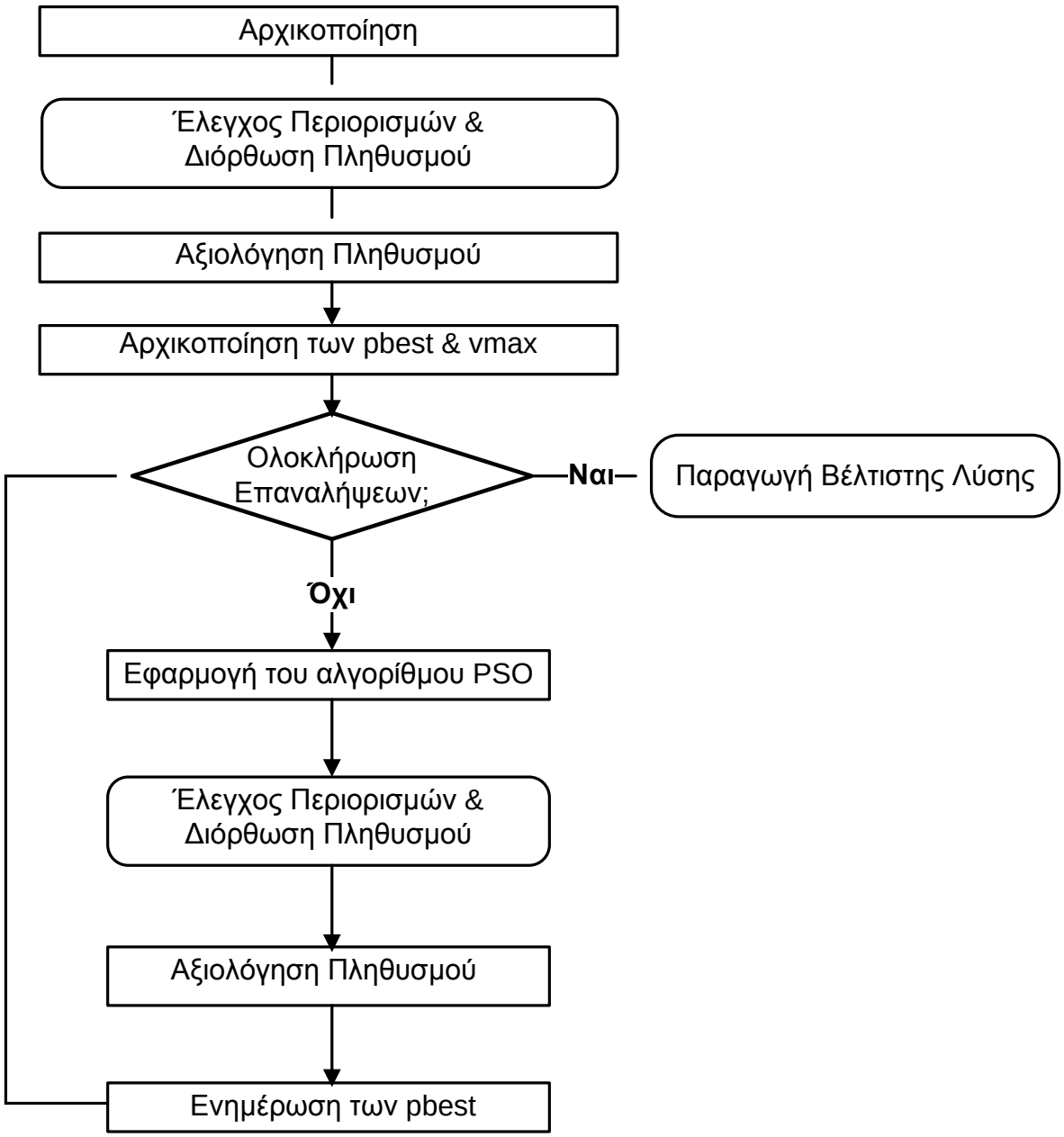
4.3.3 Βασικές αρχές Νοημοσύνης Σμηνών

Η ΒΣΣ υπακούει στις πέντε βασικές αρχές της νοημοσύνης σμηνών (ΝΣ):

1. Γειτνίαση (proximity): η ικανότητα του σμήνους να πραγματοποιεί απλούς χρονικούς και χωρικούς υπολογισμούς.
2. Ποιότητα (quality): η ικανότητα του σμήνους να αντιδρά σε ποιοτικούς παράγοντες του περιβάλλοντος.
3. Ποικιλία αντιδράσεων (diverse response): το σμήνος να έχει ευρύ φάσμα αντιδράσεων.
4. Ευστάθεια (stability): το σμήνος δε πρέπει να αλλάζει την συμπεριφορά του με μία αμελητέα αλλαγή του περιβάλλοντος.
5. Προσαρμοστικότητα (adaptability): το σμήνος πρέπει να αλλάζει την συμπεριφορά του όταν το κόστος είναι απαγορευτικό.

Το σμήνος της ΒΣΣ πραγματοποιεί χρονικούς και χωρικούς υπολογισμούς με την πάροδο του χρόνου (επαναλήψεις). Επίσης, αντιδρά σε ποιοτικούς παράγοντες που υπαγορεύονται από την καλύτερη θέση κάθε σωματιδίου και από το καλύτερο σωματίδιο της γειτονιάς του με δράσεις που εξασφαλίζουν ποικιλότητα. Τέλος, η συμπεριφορά του (κατάσταση του σμήνους) αλλάζει μόνο όταν αλλάζει το καλύτερο σωματίδιο του σμήνους ή της γειτονιάς, διασφαλίζοντας έτσι

την ευστάθεια και την προσαρμοστικότητα. Δικαίως λοιπόν, η ΒΣΣ κατατάχθηκε στην κατηγορία των αλγορίθμων ΝΣ.



Σχήμα 3.7: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ΒΣΣ

5. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι

5.1 Εισαγωγή

Οι γενετικοί αλγόριθμοι επινοήθηκαν από τον John Holland τη δεκαετία του '60 και αναπτύχθηκαν από τον ίδιο και τους φοιτητές του τις δεκαετίες του '60 και του '70. Οι γενετικοί αλγόριθμοι του Holland είναι μια μέθοδος μετακίνησης από ένα πληθυσμό "χρωμοσωμάτων" (π.χ. ακολουθίες από bits 1 και 0) σε ένα νέο πληθυσμό χρησιμοποιώντας ένα είδος "φυσικής επιλογής" μαζί με εμπνευσμένους από τη γενετική τελεστές "μετάλλαξης" (mutation) και "αντιστροφής" (inversion). Κάθε χρωμόσωμα αποτελείται από "γονίδια" (δηλαδή bits) και κάθε γονίδιο είναι ένα συγκεκριμένο "αλληλόμορφο" (allele) (π.χ. 0 ή 1) Ο τελεστής επιλογής διαλέγει τα χρωμοσώματα εκείνα του πληθυσμού στα οποία θα επιτραπεί να αναπαραχθούν και κατά μέσον όρο τα χρωμοσώματα που "προσαρμόζονται" παράγουν περισσότερους απογόνους από τα λιγότερο προσαρμόσιμα. Η "διασταύρωση" ανταλλάσσει υπομέρη των δύο χρωμοσωμάτων, μιμούμενη χονδρικά το βιολογικό επανασυνδυασμό μεταξύ δύο οργανισμών ενός απλού χρωμοσώματος. Η "μετάλλαξη" αλλάζει τυχαία τις μεταβολές των τιμών των αλληλομόρφων ορισμένων θέσεων στα χρωμοσώματα και η "αντιστροφή" αναστρέφει τη διάταξη μιας μικρής περιοχής του χρωμοσώματος, αναδιατάσσοντας έτσι τη σειρά με την οποία τοποθετούνται τα γονίδια. Σημειώνεται ότι οι όροι "διασταύρωση" και "επανασυνδυασμός" έχουν την ίδια σημασία.

Η εισαγωγή από τον Holland ενός αλγορίθμου βασισμένου στον πληθυσμό με διασταύρωση, αντιστροφή και μετάλλαξη ήταν μια μεγάλη καινοτομία. Οι στρατηγικές εξέλιξης του Rechenberg ξεκίνησαν με έναν "πληθυσμό" δύο ατόμων, ενός γονέα και ενός απογόνου, όπου ο απόγονος είναι μια μεταλλαγμένη παραλλαγή του γονέα. Πληθυσμοί πολλών ατόμων με διασταύρωση συμπεριλήφθησαν αργότερα. Αντίστοιχα, ο εξελικτικός προγραμματισμός του Walsh χρησιμοποιούσε μόνο μετάλλαξη για να προκαλέσει ποικιλία. Ο Holland ήταν αυτός ο οποίος προσπάθησε πρώτος να θέσει την υπολογιστική εξέλιξη σε μια σταθερή θεωρητική βάση. Μέχρι πρόσφατα, η θεωρητική αυτή θεμελίωση, βασιζόμενη στη θεωρία των "σχημάτων" (schemas), ήταν το θεμέλιο όλων των μεταγενέστερων θεωρητικών μελετών επάνω στους γενετικούς αλγορίθμους.

Μόλις κατά τα τελευταία χρόνια υπήρξε ευρεία αλληλεπίδραση μεταξύ των ερευνητών οι οποίοι μελετούν τις μεθόδους του εξελικτικού υπολογισμού και έτσι τα σύνορα ανάμεσα στους γενετικούς αλγορίθμους, τις στρατηγικές εξέλιξης, του εξελικτικού προγραμματισμού και άλλες εξελικτικές μεθοδολογίες έχουν σπάσει μέχρι κάποιο βαθμό. Σήμερα ο όρος "γενετικός αλγόριθμος" χρησιμοποιείται για να περιγράψει κάτι πολύ διαφορετικό από την αρχική ιδέα του Holland.

5.2 Ο βασικός γενετικός αλγόριθμος

Οι γενετικοί αλγόριθμοι προσπαθούν να επιλύσουν ένα πρόβλημα όχι με μαθηματικό αλλά με βιολογικό τρόπο, γεγονός που τους δίνει μεγάλη ενδογενή ευελιξία. Φτάνουν στη βέλτιστη (ή σχεδόν στη βέλτιστη) λύση ανεξάρτητα από το αν οι προδιαγραφές είναι γραμμικές ή μη γραμμικές, διακριτού ή συνεχούς χρόνου, πολλών ή λίγων ακροτάτων, υποκείμενες σε ανισοτικούς ή μη περιορισμούς, NP ή non-NP complete.

Έστω λοιπόν ότι έχουμε να επιλύσουμε το πρόβλημα της μεγιστοποίησης μιας συνάρτησης μιας ή πολλών μεταβλητών. Πρέπει να βρούμε το βέλτιστο συνδυασμό τιμών των μεταβλητών της συνάρτησης ώστε να αποκτήσει τη μέγιστη τιμή της. Στους γενετικούς αλγορίθμους μια οποιαδήποτε υποψήφια λύση ονομάζεται χρωμόσωμα. Κάθε χρωμόσωμα αποτελείται από ένα σύνολο γονιδίων. Κάθε γονίδιο αντιπροσωπεύει και μια μεταβλητή της συνάρτησης και μπορεί να παρασταθεί από μια ακολουθία δυαδικών ψηφίων (0 ή 1). Αν έχουμε π.χ. τη συνάρτηση f(x,y,z) τότε κάθε πιθανή λύση αυτής θα έχει τη μορφή [x y z] ή αν παρασταθεί με δυαδικά ψηφία θα έχει τη μορφή [0 0 1 | 1 0 0 | 0 0 1] όπου παρατηρείται ότι κάθε γονίδιο αναπαριστάται με τρία ψηφία (θα μπορούσε να αναπαρασταθεί με οσαδήποτε).

Ένα σύνολο χρωμοσωμάτων συγκεκριμένου πλήθους ονομάζεται γενεά. Ο γενετικός αλγόριθμος με ένα σύνολο από πράξεις παράγει νέες γενεές με την προοπτική τα νέα χρωμοσώματα να είναι καλύτερα (να δίνουν δηλαδή μεγαλύτερη βέλτιστη τιμή) από αυτά των παλαιοτέρων γενεών. Λαμβάνει χώρα δηλαδή μια διαδικασία παρόμοια με τη φυσική διαδικασία της "επιβίωσης του ισχυρότερου".

Ειδικότερα, οι τρεις πράξεις του βασικού γενετικού αλγόριθμου είναι η επιλογή, η διασταύρωση και η μετάλλαξη. Ο μηχανισμός της επιλογής (selection), το κριτήριο δηλαδή με βάση το οποίο

κάποια χρωμοσώματα θα επιλεχθούν και κάποια θα απορριφθούν από τις επόμενες γενεές είναι ένα από τα σημαντικότερα σημεία των γενετικών αλγορίθμων. Ο τελεστής της διασταύρωσης (crossover) λαμβάνει χώρα ανάμεσα σε δυο χρωμοσώματα. Αφού επιλεχθεί ένα τυχαίο σημείο ανάμεσα στα γονίδια, οι υποακολουθίες γονιδίων ανταλλάσσονται για να δημιουργηθούν έτσι δυο νέοι απόγονοι.

Ο τελεστής της μετάλλαξης που εφαρμόζεται μετά τον τελεστή της διασταύρωσης αλλάζει τυχαία κάποια από τα ψηφία ενός χρωμοσώματος. Για παράδειγμα, έστω ότι έχουμε την εξής ακολουθία ψηφίων (χρωμόσωμα) 0 0 1 1 1 0 0 1 0 και έστω ότι συμβαίνει μετάλλαξη στο τρίτο και στο τελευταίο χρωμόσωμα. Το νέο χρωμόσωμα θα είναι το 0 0 0 1 1 0 0 1 1. Η μετάλλαξη μπορεί να συμβεί σε οποιαδήποτε θέση του χρωμοσώματος με μια, όμως, πολύ μικρή πιθανότητα.

Ο εξελικτικός κύκλος συνεχίζεται μέχρι να ισχύσει κάποια επιθυμητή συνθήκη τερματισμού. Η συνθήκη αυτή μπορεί να είναι το πλήθος των συνολικών εκτελέσεων του αλγορίθμου (αριθμός γενεών) ή μια προκαθορισμένη τιμή της συνάρτησης του προβλήματος.

5.3 Κωδικοποίηση μεταβλητών

Η κωδικοποίηση των μεταβλητών της συνάρτησης βελτιστοποίησης του εκάστοτε προβλήματος αποτελεί μια πολύ κρίσιμη απόφαση κατά την μοντελοποίηση ενός προβλήματος με γενετικούς αλγορίθμους. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος κωδικοποίησης είναι όπως είδαμε με τη χρήση ακολουθιών δυαδικών ψηφίων. Μια μεταβλητή δηλαδή αναπαρίσταται με ένα ή περισσότερα δυαδικά ψηφία. Ο τρόπος αυτός έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για ένα μεγάλο σύνολο προβλημάτων, παρουσιάζει όμως ένα πολύ βασικό μειονέκτημα. Αν οι μεταβλητές του προβλήματος παίρνουν τιμές μέσα σε ένα πολύ μεγάλο εύρος τότε χρειάζονται πολλά bits κωδικοποίησης. Τα πράγματα γίνονται δυσκολότερα όταν αυξάνεται ταυτόχρονα και ο αριθμός των μεταβλητών (γονιδίων) του προβλήματος. Τότε τα χρωμοσώματα που δημιουργούνται είναι μεγάλου μήκους και το εύρος αναζήτησης (search space) μέσα στο οποίο πρέπει να ψάξει ο αλγόριθμος είναι τεράστιο. Σε τέτοιες περιπτώσεις η απόδοση των γενετικών είναι χαμηλή. Επίσης ένα άλλο πολύ σημαντικό πρόβλημα εμφανίζεται στις περιπτώσεις που έχουμε πραγματικές μεταβλητές. Η κωδικοποίηση πραγματικών αριθμών με δυαδικά ψηφία είναι εν γένει δύσκολη.

Έτσι, λοιπόν, σε ένα ευρύ σύνολο προβλημάτων χρησιμοποιείται η floating point αναπαράσταση. Σε μια τέτοια αναπαράσταση ένα χρωμόσωμα έχει τη μορφή [α1 α2 α3 ..] όπου τα αi είναι πραγματικοί αριθμοί που παίρνουν τιμές μέσα από ένα συγκεκριμένο εύρος [αi,αi]. Το αi είναι το κάτω φράγμα και το αi το άνω φράγμα αυτού του εύρους. Ενώ οι τελεστές της επιλογής και της διασταύρωσης δεν αλλάζουν, είναι σαφές ότι ο τελεστής της μετάλλαξης πρέπει να υποστεί κάποια τροποποίηση. Έτσι λοιπόν όταν ένα γονίδιο επιλεχθεί για μετάλλαξη τότε η νέα του τιμή θα επιλέγεται τυχαία μέσα από το επιτρεπτό εύρος τιμών του.

5.4 Μηχανισμοί επιλογής (selection mechanisms)

Η επιλογή αποτελεί ίσως την κρισιμότερη πράξη των γενετικών αλγορίθμων γιατί από αυτή προκύπτει το σύνολο εκείνων των χρωμοσωμάτων από τα οποία κάποια θα διασταυρωθούν και θα μεταλλαχθούν δίνοντας απογόνους στην επόμενη γενεά. Πολλοί είναι οι μηχανισμοί που έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί για την πράξη της επιλογής. Όλοι αυτοί οι μηχανισμοί έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό. Χρησιμοποιούν τη συνάρτηση προσαρμογής για να "κρίνουν" κατά πόσο ένα χρωμόσωμα θα επιβιώσει. Ένα χρωμόσωμα με μεγαλύτερη τιμή της συνάρτησης προσαρμογής έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να επιβιώσει σε σχέση με αυτό που έχει μικρότερη τιμή. Ο πιο διαδεδομένος μηχανισμός επιλογής χρωμοσωμάτων είναι ο μηχανισμός του τροχού της ρουλέτας.

5.5 Πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης

Οι πιθανότητες διασταύρωσης pc και μετάλλαξης pm σχετίζονται με το πλήθος των χρωμοσωμάτων μιας γενεάς που εμπλέκονται στις διαδικασίες της διασταύρωσης και της μετάλλαξης. Αν π.χ. έχουμε ένα πληθυσμό 20 χρωμοσωμάτων και η πιθανότητα διασταύρωσης είναι 50% τότε αναμένονται 10 χρωμοσώματα να συμμετάσχουν σε πράξεις διασταύρωσης για να δώσουν απογόνους. Η επιλογή των πιθανοτήτων διασταύρωσης και μετάλλαξης έχει να κάνει με το εκάστοτε πρόβλημα. Πάντως στη βιβλιογραφία υπάρχουν ενδεικτικές τιμές οι οποίες και αναφέρονται είναι για μεγάλους πληθυσμούς (50~100) : pc= 60% και pm=0.1% και για μικρούς πληθυσμούς (10~50) : pc= 90% και pm=1% χρωμόσωμα το οποίο παραβιάζει τους

περιορισμούς, τότε η πιθανότητα αυτού του χρωμοσώματος να επιλεχθεί μέσα από την πράξη της επιλογής πρέπει να μειωθεί. Ο περιορισμός της πιθανότητας αυτής γίνεται προσθέτοντας στην συνάρτηση προσαρμογής μια συνάρτηση penalty που ουσιαστικά μειώνει την τιμή προσαρμογής του συγκεκριμένου χρωμοσώματος. Υπάρχουν πολλές λύσεις για την επιλογή της "penalty function". Μπορεί να είναι απλά μια σταθερά αλλά μπορεί και να εξαρτάται από το κατά πόσο ένα χρωμόσωμα παραβιάζει τους περιορισμούς. Όσο περισσότερο παραβιάζεται ένας περιορισμός τόσο μεγαλύτερη ποινή επιβάλλεται.

Μια παραλλαγή των μεθόδων penalty είναι οι μέθοδοι της διαγραφής των λύσεων που παραβιάζουν τους περιορισμούς. Οι μέθοδοι αυτές δηλαδή εφαρμόζουν την έσχατη ποινή (death penalty).

Για αρκετά προβλήματα η εφαρμογή των μεθόδων penalty (απλών ή death) δεν επιδρά θετικά στην απόδοση του αλγορίθμου. Τέτοια προβλήματα είναι αυτά στα οποία η γέννηση εφικτών λύσεων γίνεται με ρυθμό σχετικά μικρό σε σχέση με το ρυθμό γέννησης λύσεων που παραβιάζουν τους περιορισμούς. Έτσι ο αλγόριθμος πρέπει να δαπανά αρκετό χρόνο στην εύρεση των ανέφικτων λύσεων και στην εφαρμογή της penalty function.

Μια άλλη κατηγορία μεθόδων για τη διαχείριση των περιορισμών είναι αυτή που βασίζεται σε αλγορίθμους διόρθωσης (repair algorithms). Αυτοί οι αλγόριθμοι έχουν σκοπό να διορθώσουν τις ανέφικτες λύσεις ώστε να ικανοποιούν τους περιορισμούς. Αυτοί οι αλγόριθμοι πρέπει να προσαρμόζονται στα δεδομένα του εκάστοτε προβλήματος. Σε κάποια προβλήματα η εύρεση τέτοιων αλγορίθμων μπορεί να είναι δυσκολότερη και από την αντιμετώπιση ολόκληρου του υπόλοιπου προβλήματος.

6. Μετατροπείς Ισχύος

6.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός ενός διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος ξεκινάει με την επιλογή ενός κατάλληλου αντιστροφέα. Αυτός καθορίζει τη τάση του συστήματος από τη πλευρά του συνεχούς και η φωτοβολταϊκή γεννήτρια μπορεί τότε να διαμορφωθεί ανάλογα με τα χαρακτηριστικά εισόδου του αντιστροφέα [19]. Ο αντιστροφέας είναι το πιο σημαντικό στοιχείο ενός φωτοβολταϊκού συστήματος ύστερα από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια. Η αρμοδιότητά του είναι να μετατρέπει το συνεχές ρεύμα που παράγεται από την ηλιακή κυψέλη σε ένα εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας 50 Hz προσαρμοζόμενο στο δίκτυο. Σε αντίθεση με τους αντιστροφείς που προορίζονται μόνο για αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα, αυτοί που προορίζονται για παράλληλη λειτουργία πρέπει να ανταποκρίνονται τόσο στα χαρακτηριστικά του δικτύου όσο και στην απόδοση της ηλιακής γεννήτριας εξίσου καλά. Καθώς το ρεύμα από τα πάνελ ρέει μέσα από τον αντιστροφέα, τα χαρακτηριστικά του ουσιαστικά επηρεάζουν τη συμπεριφορά και την λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος. Εκτός από την αποτελεσματική μετατροπή του συνεχούς σε εναλλασσόμενο ρεύμα, τα ηλεκτρονικά στοιχεία του αντιστροφέα περιλαμβάνουν επίσης στοιχεία υπεύθυνα για τον τύπο της καθημερινής λειτουργίας. Αυτά εξασφαλίζουν ότι η λειτουργία ξεκινάει την κατάλληλη χρονική στιγμή της ημέρας μόλις οι ηλιακές κυψέλες δώσουν αρκετή ισχύ. Αποτυχημένη προσπάθεια εκκίνησης απαιτεί ισχύ από το δίκτυο και θα πρέπει να αποφεύγεται. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το βέλτιστο σημείο λειτουργίας πάνω στη I-V χαρακτηριστική καμπύλη μετακινείται ανάλογα με τις διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας των πάνελ. Έξυπνος έλεγχος από τον αντιστροφέα περιλαμβάνει παρακολούθηση του σημείου μεγίστης ισχύος και συνεχή αναπροσαρμογή στο επιθυμητό σημείο λειτουργίας. Συσκευές προστασίας είναι εξίσου ενσωματωμένες στον αντιστροφέα ο οποίος αυτομάτως αποσυνδέεται από το σύστημα εάν προκύψουν ανωμαλίες στο δίκτυο ή στη φωτοβολταϊκή γεννήτρια.

6.2 Αρχές Λειτουργίας Αντιστροφέων

Οι αντιστροφείς που συνδέονται στο δίκτυο διέπονται από κάποιες αρχές λειτουργίας οι οποίες και παρατίθενται. Η έξοδος του αντιστροφέα λαμβάνεται σαν μια ρυθμιζόμενη πηγή ρεύματος. Η αλλαγή με το χρόνο της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ρυθμίζεται έτσι ώστε να αντιστοιχεί στις αλλαγές της προβλεπόμενης τάσης του δικτύου. Εάν η τάση του δικτύου αποκλίνει σημαντικά από την ημιτονοειδή κυματομορφή, αυτή θα ακολουθηθεί από τον αντιστροφέα και θα λειτουργήσει με βάση αυτή. Ανεξάρτητα από την κυματομορφή της τάσης του δικτύου, ο αντιστροφέας παρέχει εσωτερικώς ρυθμιζόμενο, ημιτονοειδώς διαμορφωμένο ρεύμα στο δίκτυο, το οποίο ρέει ταυτόχρονα με τη τάση του δικτύου. Ο αντιστροφέας επιχειρεί να βελτιώσει τη κυματομορφή της τάσης του δικτύου παρέχοντας ηλεκτρισμό με την κατάλληλη κυματομορφή. Αυτό επιτυγχάνεται καλύτερα όταν το διασυνδεδεμένο δίκτυο έχει χαμηλότερη ισχύ (μεγαλύτερη σύνθετη αντίσταση) από ότι εκείνα με μεγαλύτερη ισχύ.

6.2.1 Απαιτήσεις από τους Αντιστροφείς

Οι αντιστροφείς του διασυνδεδεμένου δικτύου διαθέτουν μια ποικιλία στόχων που καλούνται να εκπληρώσουν και πρέπει να ικανοποιούν διάφορες ρυθμίσεις. Κατά την επιλογή ενός αντιστροφέα για το σύστημα, προσοχή θα πρέπει να δοθεί στα ακόλουθα σημεία:

Αυτόματη έναρξη λειτουργίας το πρωί : Μετά την ανατολή, ο αντιστροφέας πρέπει να αναγνωρίζει πότε η ισχύ της φωτοβολταϊκής γεννήτριας είναι αρκετά υψηλή ώστε να εξασφαλίζει σύνδεση και ηλεκτρική παροχή στο δίκτυο.

Μερική υψηλή απόδοση φορτίου: Η ηλεκτρική ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά συστήματα καθώς είναι πολύτιμη και δαπανηρή πρέπει να μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ρεύμα στον αντιστροφέα με τις ελάχιστες δυνατές απώλειες. Επειδή ο καιρός δεν είναι πάντοτε ηλιόλουστος, το σύστημα συχνά λειτουργεί με μερικό φορτίο. Η εσωτερική κατανάλωση του αντιστροφέα συνεπώς έχει σημαντική επίδραση στην καμπύλη απόδοσης. Στους καλούς αντιστροφείς η εσωτερική κατανάλωση του αντιστροφέα είναι μικρότερη από 1% της ισχύος.

Λειτουργία ορισμένης υπερφόρτισης: Όταν η ισχύς ξεπεράσει το όριο της στη πλευρά του συνεχούς ρεύματος, πρέπει να ληφθούν μέτρα που να εξασφαλίζουν ότι ο αντιστροφέας δεν θα απενεργοποιείται και θα παραμένει ανενεργός μέχρι το επόμενο πρωί. Θα είναι προτιμότερο εάν ο αντιστροφέας μπορεί να διατηρεί τη λειτουργία του διαθέτοντας ένα όριο ισχύος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μετακινώντας το σημείο λειτουργίας μακριά από το σημείο μέγιστης ισχύος προς τις υψηλότερες τιμές τάσης.

Λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος από τη πλευρά της ηλιακής γεννήτριας: Οι ηλιακές κυψέλες έχουν μια χαρακτηριστική καμπύλη με ένα προφανές μέγιστο. Για τα κρυσταλλικά πάνελ το καλύτερο σημείο λειτουργίας είναι συνήθως σε μια τάση λειτουργίας, η οποία είναι περίπου 20% χαμηλότερη από τη τάση ανοιχτοκύκλωσης. Καθώς η πυκνότητα της ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη από μια συγκεκριμένη τιμή, η τάση της ηλιακής γεννήτριας που αντιστοιχεί στο μέγιστο σημείο ισχύος (VMPP) εξαρτάται μόνο από την θερμοκρασία της ηλιακής κυψέλης. Η τάση VMPP πέφτει περίπου 0.4% για κάθε βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας σε K. Καθώς η θερμική χρονική σταθερά για το ηλιακό πάνελ είναι εννιά με δέκα λεπτά, η προσαρμογή στο σημείο μέγιστης λειτουργίας δεν χρειάζεται να επαναλαμβάνεται πολύ συχνά, περίπου κάθε τρία λεπτά.

Παροχή ηλεκτρικού ρεύματος των ηλεκτρονικών εσωτερικού ελέγχου από τη πλευρά της ηλιακής γεννήτριας: Κατά τη διάρκεια της νύχτας, ο αντιστροφέας δεν πρέπει να τραβά οποιοδήποτε ποσό ισχύος από το δίκτυο. Τα ηλεκτρονικά ισχύος ελέγχου δεν πρέπει να θέτονται σε λειτουργία έως ότου η τάση της ηλιακής γεννήτριας να ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο όριο το πρωί.

Αντοχή του αντιστροφέα σε συνθήκες βραχυκύκλωσης και ανοιχτοκύκλωσης: Ο αντιστροφέας δεν πρέπει να καταστρέφεται εάν το δίκτυο αποσυνδεθεί ενώ υφίσταται η τάση της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Το αίτημα αυτό είναι δύσκολο να ικανοποιηθεί, επειδή όταν το δίκτυο ξαφνικά αποσυνδεθεί, η αποθηκευμένη ενέργεια στα πηνία και τις χωρητικότητες δεν μπορεί πλέον να διαχυθεί στο δίκτυο αλλά να διασκορπιστεί εσωτερικώς. Αυτή η κατάσταση δύναται να συμβεί εάν ο διακόπτης κλείσει αμέσως στον αντιστροφέα κατά τη διάρκεια λειτουργίας πλήρους φορτίου.

Διηλεκτρική δύναμη: Τόσο η είσοδος όσο και η έξοδος του αντιστροφέα πρέπει να είναι αρκετά ανθεκτικές στην υπέρταση.

Ακουστικός θόρυβος: Ο ακουστικός θόρυβος πρέπει να είναι ο ελάχιστος δυνατός.

Αυτόματη αποσύνδεση από το δίκτυο σε απόκλιση τάσης ή συχνότητας: Τα ηλεκτρονικά στοιχεία του αντιστροφέα πρέπει να αναγνωρίζουν τα σφάλματα του δικτύου. Εάν υπάρχουν αποκλίσεις από τη συχνότητα ή τη τάση του δικτύου, ή διακοπή της μιας φάσης, ο αντιστροφέας πρέπει να

αποκόπτεται από το δίκτυο εντός ενός δεδομένου χρονικού πλαισίου. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από τον τύπο του εναλλασσόμενου δικτύου.

Συντελεστής ισχύος cos φ>0.9: Ο συντελεστής ισχύος του συστήματος του πελάτη πρέπει να είναι κοντά στο 1. Αυτό εμποδίζει να απορροφάται από το δίκτυο μεγάλη ποσότητα άεργου ισχύος. Αντιστροφείς με αυτόματη διαμόρφωση πλάτους έχουν συντελεστή ισχύος 1.

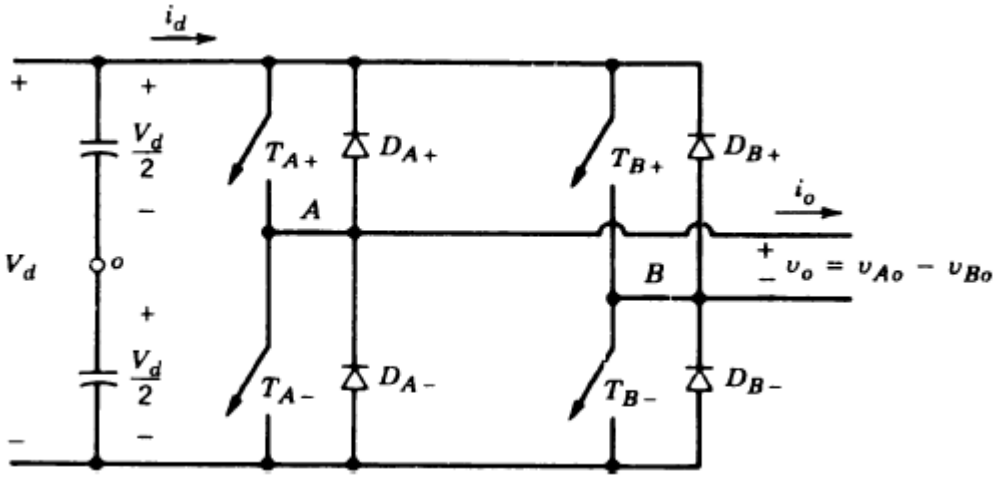
Επαρκής ενοργάνωση, απλός χειρισμός από το χρήστη: Ο χειριστής του διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος πρέπει να μπορεί να αποφαίνεται εάν το σύστημα λειτουργεί σωστά με μια γρήγορη ματιά. Η επίδειξη των ακολούθων τιμών είναι χρήσιμη για το σκοπό αυτό:

- τάση της ηλιακής γεννήτριας
- ένταση της ηλιακής γεννήτριας
- ένταση του δικτύου
- κατάσταση μόνωσης της ηλιακής γεννήτριας
- πληροφορίες κατάστασης λειτουργίας.

6.3 Μετατροπείς DC/AC

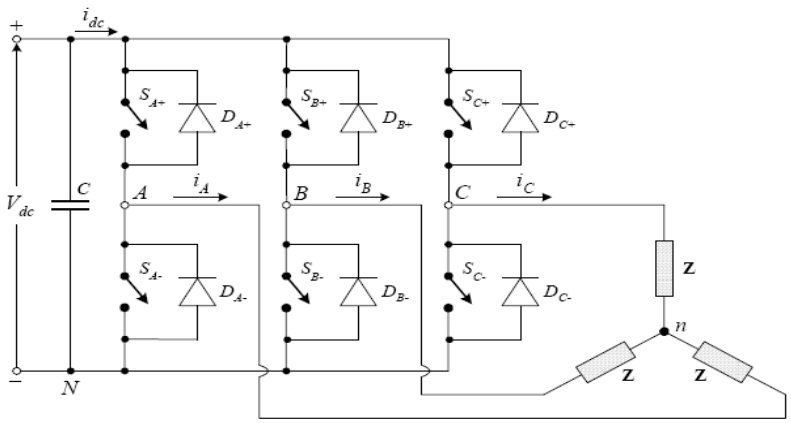
Όσο αφορά τώρα τους μετατροπείς DC/AC αυτοί μπορεί να είναι είτε μονοφασικοί είτε τριφασικοί. Όταν η είσοδος είναι μια πηγή τάσης, αυτοί ονομάζονται αντιστροφείς πηγής τάσης (VSI) ενώ όταν ως είσοδος λαμβάνεται μια πηγή έντασης ονομάζονται αντιστροφείς πηγής έντασης (CSI). Οι αντιστροφείς πηγής τάσης (voltage–source or voltage–fed inverters) τροφοδοτούνται από μια πηγή συνεχούς τάσης, ιδανικά με μηδενική εσωτερική σύνθετη αντίσταση. Η τάση της πηγής εισόδου μπορεί να είναι σταθερή ή μεταβλητή. Η συνεχής τάση εισόδου προέρχεται από μπαταρίες, από φωτοβολταϊκά στοιχεία, ή συνηθέστερα από την ανόρθωση της τάσης του δικτύου. Η έξοδος των αντιστροφέων πηγής τάσης εμφανίζει χαρακτηριστικά πηγής τάσης. Οι αντιστροφείς πηγής ρεύματος (current–source or current–fed inverters) τροφοδοτούνται από μια μεταβλητή πηγή συνεχούς ρεύματος, ιδανικά με άπειρη εσωτερική σύνθετη αντίσταση. Οι αντιστροφείς πηγής ρεύματος χρησιμοποιούνται κυρίως στον έλεγχο ac κινητήρων πολύ μεγάλης ισχύος. Αντίστοιχα με τους αντιστροφείς πηγής τάσης, η εναλλασσόμενη έξοδος των αντιστροφέων πηγής ρεύματος παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά της πηγής ρεύματος.

Για τους μονο φασικούς αντιστροφείς η μετατροπή της DC τάσης μπορεί να γίνεται είτε από μισή γέφυρα (2 ζεύγη διακοπτών – διόδων) είτε από πλήρη γέφυρα (4 ζεύγη διακοπτών – διόδων), που είναι και η συνηθέστερη περίπτωση για αντιστροφείς ισχύος. Η διαμόρφωση μπορεί να γίνεται είτε με διπολική είτε με μονοπολική τάση εξόδου.



Σχήμα 6.1: Μονοφασικός αντιστροφέας πλήρους γέφυρας

Οι τριφασικοί αντιστροφείς είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενοι. Στον έλεγχο των διακοπτών του αντιστροφέα συγκρίνονται τρία ημιτονοειδή σήματα ελέγχου ίσου πλάτους και με διαφορά φάσης 120° , με μια τριγωνική περιοδική κυματομορφή.



Σχήμα 6.2: Τριφασικός αντιστροφέας.

6.3.1 Απόδοση μετατροπέων DC/AC

Οι μετατροπείς ισχύος DC/AC έχουν βαθμό απόδοσης μετατροπής ισχύος n1, με τιμή της τάξης του 96% κατά τη λειτουργία στην ονομαστική τους ισχύ. Όταν λειτουργούν σε ισχύ διαφορετική από την ονομαστική το ϱ τότε η από δση τους είναι μειωμένη. Ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται ως εξής :

$$n_1(\%) = \frac{P_0}{P_{in}} 100\% \tag{6.1}$$

Όπου:

P_0 η ισχύς εξόδου του μετατροπέας ισχύος DC/AC

P_{in} η ισχύς εισόδου του μετατροπέα ισχύος DC/AC.

7. Οικονομική αξιολόγηση ενεργειακών συστημάτων

7.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογική εξέλιξη στο χώρο των ενεργειακών συστημάτων, σε συνδυασμό με τις θεσμικές αλλαγές σε ευρωπαϊκό και προσφάτως σε εθνικό επίπεδο, καθώς και με τη δεδομένη διάρθρωση του ενεργειακού συστήματος της Ελλάδας, δημιουργεί το περιβάλλον δραστηριοποίησης επιχειρηματικών πρωτοβουλιών στο ν τομέα της παραγωγής ενέργειας. Η αξιολόγηση των δυνατοτήτων αυτών πρέπει να γίνεται τόσο από την άποψη του υποψήφιου ιδιώτη επενδυτή, όσο και από την άποψη της εθνικής οικονομίας, αφού αυτή καθορίζει και το συνολικό περιβάλλον. Η καλή ενεργειακή απόδοση, που μπορεί να έχει ένα σύστημα παραγωγής ή εξοικονόμησης ενέργειας, είναι μία μόνο παράμετρος στην ανάλυση σκοπιμότητας της επένδυσης. Η οικο νομική ανάλυση [4] της βιωσιμότητας της επένδυσης βασίζεται στο χρόνο αποπληρωμής (payback period) και στον εσωτερικό βαθμό απόδοσης (Internal Rate of Return).

7.2 Ορισμοί βασικών οικονομικών παραμέτρων

Οικονομικός κύκλος ζωής της επένδυσης (N): Ως οικονομικός κύκλος ζωής μιας επένδυσης θεωρείται η χρονική περίοδος κατά τη διάρκεια της οποίας ανακτάται το αρχικό επενδυτικό κεφάλαιο καθώς και η επιθυμητή απόδοση αυτού. Ο οικονομικός κύκλος ζωής πρέπει να είναι ίσος ή μικρότερος της πραγματικής ζωής το υ βασικού εξοπλισμού της επένδυσης. Στην προκειμένη περίπτωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων ο χρόνος ζωής (εγγύηση καλής λειτουργίας από τον κατασκευαστή) είναι συνήθως από 20 έως 30 χρόνια.

Πληθωρισμός (i): Πληθωρισμός είναι η αύξηση του κόστους των αγαθών και υπηρεσιών ανά μονάδα χρόνου. Ο πληθωρισμός των επιμέρους συνιστωσών κόστους μιας επένδυσης μπορεί να διαφέρει από συνιστώσα σε συνιστώσα και από έτος σε έτος.

Παρούσα αξία (P): Η μέθοδος της παρούσας αξίας μετατρέπει το σύνολο των χρηματοροών που αναμένεται να εμφανιστούν σε ένα χρονικό ορίζοντα σε μια μοναδική παρούσα αξία σε σταθερό χρόνο μηδέν. Αυτό το ποσό αναφέρεται ως παρούσα αξία, παρούσα τιμή, ή καθαρή παρούσα αξία. Φυσικά, αυτό μπορεί να γίνει μόνο βάσει κάποιας υπόθεσης εργασίας για το προεξοφλητικό επιτόκιο. Δηλαδή, ο αναλυτής της επένδυσης πρέπει να χρησιμοποιήσει ως προεξοφλητικό επιτόκιο αυτό που είναι θεωρείται ευρύτερα αποδεκτό για τη δεδομένη οικονομική κατάσταση και τη συγκεκριμένη κατηγορία επένδυσης. Το επιτόκιο αυτό αποτελεί, υπό αυτήν την έννοια, μια γενική εκτίμηση της κόστους του κεφαλαίου και συχνά αναφέρεται ως ελάχιστο αποδεκτό επιτόκιο απόδοσης, Με αυτήν την προσέγγιση εάν σήμερα επενδυθεί ποσό P, το άθροισμα κεφαλαίου και τόκων (γενικότερα, απόδοσης κεφαλαίου) μετά από N περιόδους θα είναι:

$$F = P \prod_{t=1}^{N} (1 + d_t) \qquad (7.1)$$

Όπου:
dt είναι το επιτόκιο αγοράς κατά το έτος t.

Αντίστροφα, για να αποκτηθεί ποσό F μετά από N περιόδους, πρέπει σήμερα να επενδυθεί ποσό:

$$P = \frac{F}{\prod_{t=1}^{N} (1 + d_t)} \qquad (7.2)$$

Το P λέγεται παρούσα αξία του μελλοντικού ποσού F. Εάν το επιτόκιο θεωρηθεί σταθερό, τότε:

$$P = \frac{F}{(1 + d)^N} \qquad (7.3)$$

Το επιτόκιο d λέγεται και επιτόκιο αναγωγής σε παρούσα αξία.

Συντελεστής παρούσας αξίας (present worth factor, PWF): Εάν μια πληρωμή επαναλαμβάνεται κάθε χρονική περίοδο επί N περιόδους και δεν μεταβάλλεται παρά μόνον εξαιτίας πληθωρισμού, τότε η παρούσα αξία των N ποσών υπολογίζεται με τη σχέση:

$$P = \sum_{t=1}^{N} Pt = A \square PWF(N, i, d) \qquad (7.4)$$

Όπου:

A το ποσό της πρώτης πληρωμής

PWF ο συντελεστής παρούσας αξίας,

i δείκτης πληθωρισμού μιας χρονικής περιόδου (ετήσιος),

d επιτόκιο αναγωγής σε παρούσα αξία.

Καθαρή παρούσα αξία επένδυσης (Net present value, NPV): Καθαρή παρούσα αξία είναι το συνολικό καθαρό όφελος μιας επένδυσης, που προκύπτει ως διαφορά μεταξύ του λειτουργικού οφέλους και του συνόλου των δαπανών κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της επένδυσης. Όλα τα ποσά εκφράζονται σε παρούσα αξία, συνήθως στην αρχή του πρώτου έτους λειτουργίας του συστήματος. Η καθαρή παρούσα αξία προσδιορίζεται από τη σχέση

$$NPV = -Cin + \sum_{t=1}^{N} \frac{F_t}{(1+d)^t} + \frac{SV_N}{(1+d)^N} \qquad (7.5)$$

Όπου:

Cin αρχική επένδυση,

Ft ετήσιο καθαρό όφελος,

N οικονομικός κύκλος ζωής της επένδυσης,

d επιτόκιο αναγωγής σε παρούσα αξία (επιθυμητή απόδοση κεφαλαίου),

SVN αξία εκποίησης (απομένουσα αξία) της επένδυσης στο τέλος του οικονομικού κύκλου ζωής N.

Διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

• NPV>0: Η επένδυση είναι βιώσιμη κάτω από τις δεδομένες συνθήκες (οικονομικό κύκλο ζωής, N, και επιθυμητό βαθμό απόδοσης της επένδυσης, d).

• NPV=0: Η επένδυση είναι βιώσιμη με μέσο ετήσιο βαθμό απόδοσης ίσο με d.

• NPV<0: Η επένδυση είναι αντιοικονομική.

Απόδοση κεφαλαίου (internal rate of return, IRR) : Απόδοση κεφαλαίου είναι η τιμή του επιτοκίου αγοράς, IRR, που κάνει την παρούσα αξία μιας σειράς πληρωμών και εισπράξεων ίση με το μηδέν. Προσδιορίζεται ως λύση της εξίσωσης:

$$NPV_{(d=IRR)} = 0 \qquad (7.6)$$

Όπου:

NPV η παρούσα αξία

d=IRR υπονοεί ότι η εξίσωση λύνεται ως προς d.

Χρόνος αποπληρωμής: Ο χρόνος που χρειάστηκε ώστε από τα έσοδα να καλυφθεί πλήρως το αρχικό κεφάλαιο της επένδυσης αλλά και τα συνολικά έξοδα συντήρησης ονομάζεται χρόνος αποπληρωμής (payback period).

Λόγος οφέλους/ κόστους (benefit to cost ratio, BCR): Το πηλίκο του συνολικού οφέλους προς το συνολικό κόστος μιας επένδυσης κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της, N, με όλα τα ποσά να έχουν αναχθεί σε παρούσα αξία, αποτελεί επίσης ένα κριτήριο οικονομικής βιωσιμότητας μιας επένδυσης. Ο λόγος αυτός ορίζεται από τη σχέση:

$$BCR = \frac{\sum_{t=1}^{N} \frac{B_t}{(1+d)^t}}{\sum_{t=0}^{N} \frac{C_t}{(1+d)^t}} \qquad (7.7)$$

Όπου:

B_t το όφελος κατά το έτος t,

C_t κόστος κατά το έτος t (η τιμή C_0 αντιστοιχεί στην αρχική επένδυση).

Εάν οι αρχικές δαπάνες αφαιρεθούν από τα κέρδη, τότε ο αριθμητής της εξίσωσης αποτελεί καθαρό όφελος και η σχέση απλουστεύεται στη μορφή:

$$BCR = \frac{NPV + Cin}{Cin} = 1 + \frac{NPV}{Cin} \tag{7.8}$$

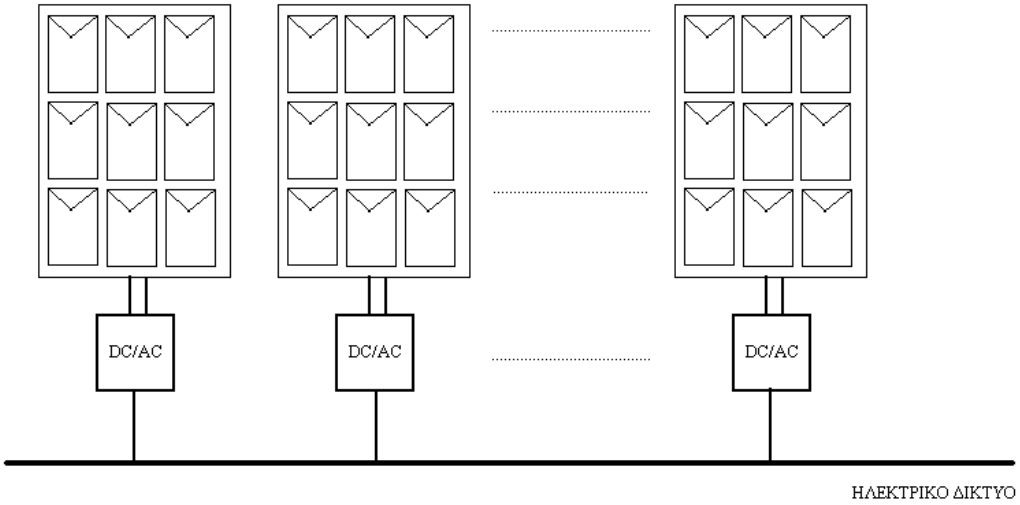
Όπου NPV και Cin όπως εμφανίζονται παραπάνω.

Μια επένδυση είναι οικονομικά βιώσιμη, εάν ο λόγος οφέλους/ κόστους είναι μεγαλύτερος από ή ίσος με τη μονάδα (BCR ≥ 1). Ειδικότερα για επενδύσεις εξοικονόμησης ενέργειας, όπως αυτές των ηλιακών συστημάτων, «όφελος» είναι η παρούσα αξία του συνόλο υ της εξοικονόμησης λειτουργικών δαπανών, ενώ «κόστος» είναι η παρούσα αξία της αρχική επένδυσης και του συνόλου των λειτουργικών δαπανών του συστήματος.

8. Η μέθοδος που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία

8.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία μελετάται ένα σύστημα φωτοβολταϊκών πλαισίων με σκοπό την παραγωγή ενέργειας και την προμήθειά της στο ηλεκτρικό δίκτυο. Τα δομικά στοιχεία του συστήματος που έχουν περιγραφεί σε προηγούμενα κεφάλαια είναι τα Φ/Β πλαίσια και οι μετατροπείς ισχύος DC/AC. Το μοντέλο του συστήματος που μελετάται παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.1.



Σχήμα 8.1: Γενικό διάγραμμα συστήματος παραγωγής από Φ/Β πλαίσια.

8.2 Σύνδεση των Φ/Β πλαισίων με τους μετατροπείς DC/AC

Όπως προαναφέρθηκε, το σύστημα που σχεδιάστηκε αποτελείται από N_{dc} μετατροπείς DC/AC διασυνδεδεμένους με το ηλεκτρικό δίκτυο, καθένας από τους οποίους είναι συνδεδεμένος με έναν αριθμό από Φ/Β πλαίσια. Πιο συγκεκριμένα, τα πλαίσια αυτά είναι συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα με τους μετατροπείς DC/AC. Με N_s συμβολίζονται τα Φ/Β πλαίσια που είναι συνδεδεμένα σε σειρά σε ένα μετατροπέα DC/AC και με N_p τον αριθμό των παράλληλων τέτοιων κλάδων με N_s αριθμό τέτοιων στοιχείων παράλληλα.

Ο ελάχιστος αριθμός Φ/Β πλαισίων που μπορούν να συνδεθούν σε ένα τέτοιο μετατροπέα συμβολίζεται με $N_{s\min}$ και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$N_{s\min} = round_up(\frac{V_{i\min}}{Vm}) \tag{8.1}$$

Όπου:

Round_up η συνάρτηση στρογγυλοποίησης στον πλησιέστερο ακέραιο αριθμό προς τα πάνω (χρειάζεται ακέραιος αριθμός μιας και αναφερόμαστε σε πλήθος Φ/Β πλαισίων),

$V_{i\min}$ η ελάχιστη τάση εισόδου του μετατροπέα

V_M η τάση του Φ/Β πλαισίου στο σημείο μέγιστης ισχύος του.

Αντίστοιχα, με $N_{s\max}$ συμβολίζεται ο μέγιστος αριθμός πλαισίων που μπορούν να συνδεθούν σε ένα μετατροπέα και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$N_{s\max} = round_down(\frac{V_{i\max}}{V_{oc}}) \tag{8.2}$$

Όπου:

Round_down η συνάρτηση στρογγυλοποίησης στον πλησιέστερο ακέραιο αριθμό προς τα κάτω(χρειάζεται ακέραιος αριθμός μιας και αναφερόμαστε σε πλήθος Φ/Β πλαισίων),

$V_{i\max}$ η μέγιστη τάση εισόδου του μετατροπέα,

V_{oc} η τάση ανοιχτοκύκλωσης του Φ/Β πλαισίου.

Ο υπολογισμός των παραπάνω παραμέτρων είναι απαραίτητος γιατί πρέπει πάντα να διασφαλίζεται ότι κάτω από οποιοδήποτε συνθήκες θα ισχύουν οι περιορισμοί λειτουργίας του μετατροπέα σε σχέση με το εύρος τάσης εισόδου του.

Με $N_{p\max}$ συμβολίζεται ο μέγιστος αριθμός κλάδων που μπορούν να συνδεθούν παράλληλα στην είσοδο ενός μετατροπέα και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$N_{p\max} = round_down(\frac{P_{\max}}{P_M}) \tag{8.3}$$

Όπου:

$P_{\max}$ η μέγιστη ισχύς εισόδου του μετατροπέα και

P_M η μέγιστη ισχύς του Φ/Β πλαισίου στις standard test conditions (STC).

Στην περίπτωση που υπάρχει μόνο ένας κλάδος δύναται η συνολική ισχύς εισόδου να είναι μεγαλύτερη από την ισχύ εισόδου του μετατροπέα κάτι που προφανώς δεν είναι επιθυμητό. Σε αυτή την περίπτωση το $N_{s\max}$ μειώνεται με βήμα μιας μονάδας μέχρι να ισχύσει ο περιορισμός.

Με σκοπό να κρατηθεί το κόστος αγοράς μετατροπέων άρα και συνολικά το ποσό της επένδυσης χαμηλά, σε κάθε μετατροπέα συνδέονται όσο το δυνατόν περισσότερα Φ/Β πλαίσια. Ο μέγιστος αριθμός Φ/Β πλαισίων που μπορούν συνδεθούν σε ένα μετατροπέα συμβολίζεται με N_{block} και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_{block} = N_{p\max} \cdot N_{s\max} \tag{8.4}$$

Ο συνολικός αριθμός των εγκατεστημένων Φ/Β πλαισίων συμβολίζεται με N_1 και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_1 = x \cdot N_{block} + y \tag{8.5}$$

Όπου:

X ο αριθμός των μετατροπέων DC/AC, στους οποίους συνδέονται N_{block} Φ/Β πλαίσια στον καθένα και

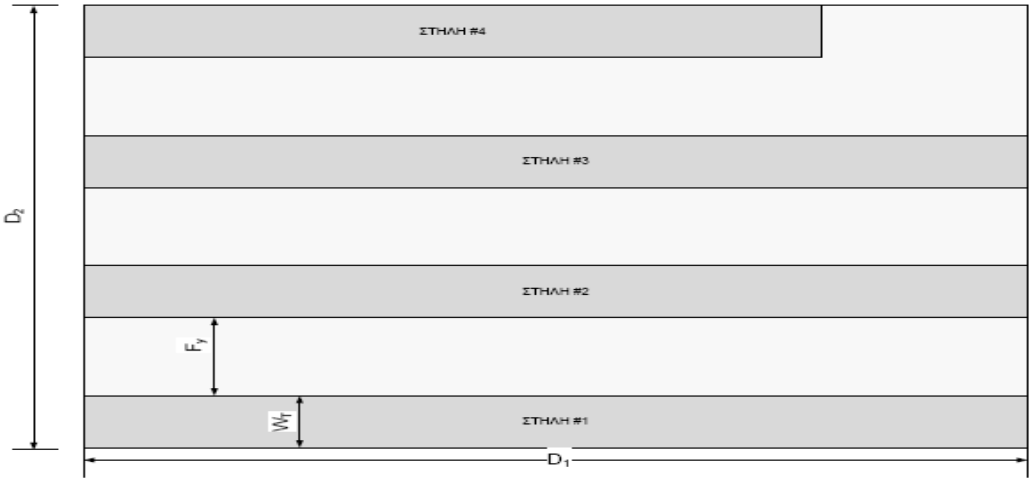
Y ο αριθμός των πλαισίων που περισσεύουν από το σύνολο των πλαισίων και τα οποία συνδέονται σε ένα μόνο μετατροπέα $\left(0 \le y \le N_{block}\right)$.

Στο μετατροπέα αυτό, εφόσον περισσεύουν πλαίσια για να συνδεθούν σε αυτόν, συνδέονται όσον το δυνατόν περισσότερα πλαίσια σε σειρά έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή τάση εισόδου και συνεπώς ελάχιστο ρεύμα εισόδου με σκοπό τη μείωση των ωμικών απωλειών.

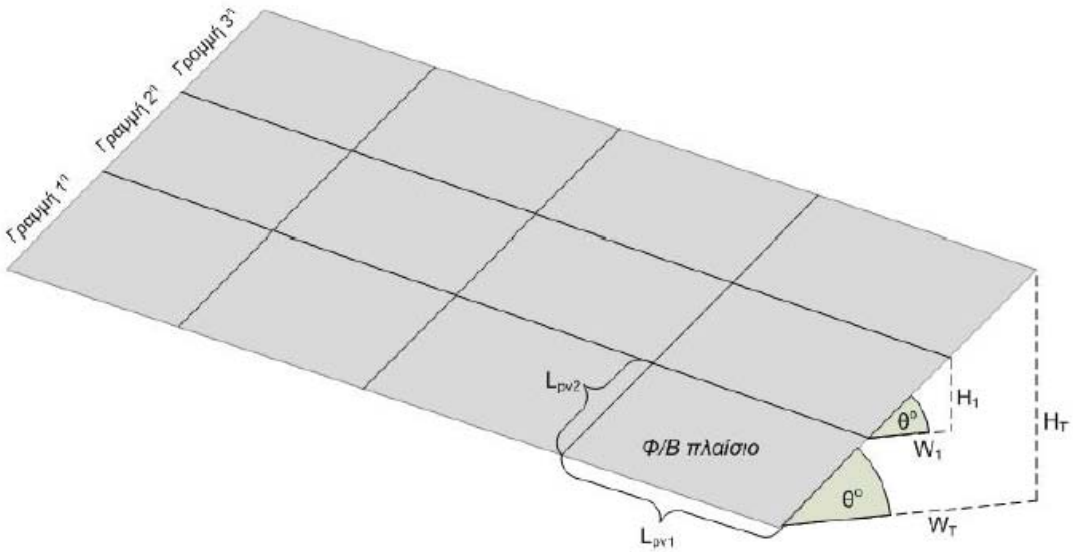
8.3 Διάταξη των Φ/Β πλαισίων σε δεδομένη έκταση.

Ένας άλλος πολύ σημαντικός παράγοντας στη μελέτη που γίνεται σε αυτή την εργασία είναι η διαθέσιμη έκταση προς εκμετάλλευση για την παραγωγή ενέργειας και πέραν αυτού ο τρόπος τοποθέτησης των πλαισίων σε αυτή. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η διάταξη των Φ/Β πλαισίων γίνεται σε στήλες (Σχήμα 8.2). Σαν D_1 και D_2 ορίζονται οι διαστάσεις της έκτασης που

απαιτείται για την εγκατάσταση του συνολικού αριθμού των πλαισίων. Η D_1 είναι η διάσταση της νότιας πλευράς του χωραφιού. Τέλος, με F_y συμβολίζεται η απαραίτητη απόσταση μεταξύ των στηλών έτσι ώστε να αποφεύγεται η σκίαση μεταξύ των πλαισίων οποιαδήποτε ώρα της ημέρας.



Σχήμα 8.2: Διάταξη των Φ/Β πλαισίων σε στήλες



Σχήμα 8.3: Διάταξη των Φ/Β πλαισίων σε μία στήλη.

Στο σχήμα 8.3 απεικονίζεται μία λεπτομερέστερη ανάλυση της διάταξης των πλαισίων σε μία στήλη. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μία στήλη μπορεί να περιέχει περισσότερες της μίας γραμμές (τρεις στο συγκεκριμένο παράδειγμα). Το πλάτος της έκτασης της στήλης ορίζεται σαν W_T και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$W_T = W_1 \cdot N_2 \tag{8.6}$$

Όπου:

N_2 ο αριθμός των γραμμών σε μία στήλη,

W_1 το πλάτος της έκτασης που καταλαμβάνει ένα πλαίσιο υπό κλίση θ^o και δίνεται από τη σχέση:

$$W_1 = L_{pv2} \cdot \cos\theta \tag{8.7}$$

Όπου:

L_{pv2} η μία διάσταση του πλαισίου.

Με L_{pv1} συμβολίζεται η διάσταση του πλαισίου που είναι στραμμένη προς το νότο.

Με H_T συμβολίζεται το συνολικό ύψος της στήλης και δίνεται από τη σχέση:

$$H_T = H_1 \cdot N_2 \tag{8.8}$$

Όπου:

H_1 το ύψος ενός Φ/Β πλαισίου εγκατεστημένου υπό κλήση θ^o και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$H_1 = L_{PV2} \cdot \sin\theta \tag{8.9}$$

8.4 Τρόπος διάταξης Φ/Β πλαισίων

Ο υπολογισμός του τρόπου διάταξης των πλαισίων γίνεται με τρόπου που αναλύεται παρακάτω. Αρχικά υπολογίζεται ο μέγιστος αριθμός πλαισίων n_t που μπορούν να τοποθετηθούν σε μια γραμμή:

$$n_t = round_downDIM_1 / L_{pv1} \tag{8.10}$$

Όπου:

DIM_1 η νότια διάσταση της δεδομένης έκτασης(η συνάρτηση στρογγυλοποίησης στον πλησιέστερο ακέραιο αριθμό προς τα κάτω γίνεται γιατί χρειάζεται ακέραιος αριθμός μιας και αναφερόμαστε σε πλήθος Φ/Β πλαισίων).

Με DIM_2 συμβολίζεται το μήκος της άλλης πλευράς κάθετης προς την νότια διάσταση. Σημαντικό είναι να επισημανθεί η διαφορά μεταξύ D_1, D_2 και DIM_1, DIM_2. Με DIM_1, DIM_2 συμβολίζονται οι διαστάσεις της διαθέσιμης έκτασης ενώ με D_1, D_2 οι τελικές διαστάσεις προς χρησιμοποίηση από τη διαθέσιμη έκταση για την τοποθέτηση των Φ/Β πλαισίων. Συνεπώς πρέπει να ισχύει $D_1 \le DIM_1$ και $D_2 \le DIM_2$.

Ο αριθμός των Φ/Β πλαισίων που συνδέονται σε μία γραμμή συμβολίζεται με $N_{ser\min}$ και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_{ser\min} = n_t \text{ αν } N_1 / N_2 > n_t$$

ή (8.11)

$$N_{ser\min} = round_up(\frac{N_1}{N_2}) \text{ σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση.}$$

Ο αριθμός των Φ/Β πλαισίων που υπάρχουν σε μια στήλη συμβολίζεται με N_{ser} και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_{ser} = N_{ser\min} \cdot N_2 \tag{8.12}$$

Το πλήθος των στηλών που απαιτούνται συνολικά συμβολίζεται με N_{row} και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_{row} = round_up \frac{N_1}{N_{ser}} \tag{8.13}$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτουν και οι τελικές διαστάσεις της έκτασης που θα χρησιμοποιηθούν εντέλει και υπολογίζονται ως εξής:

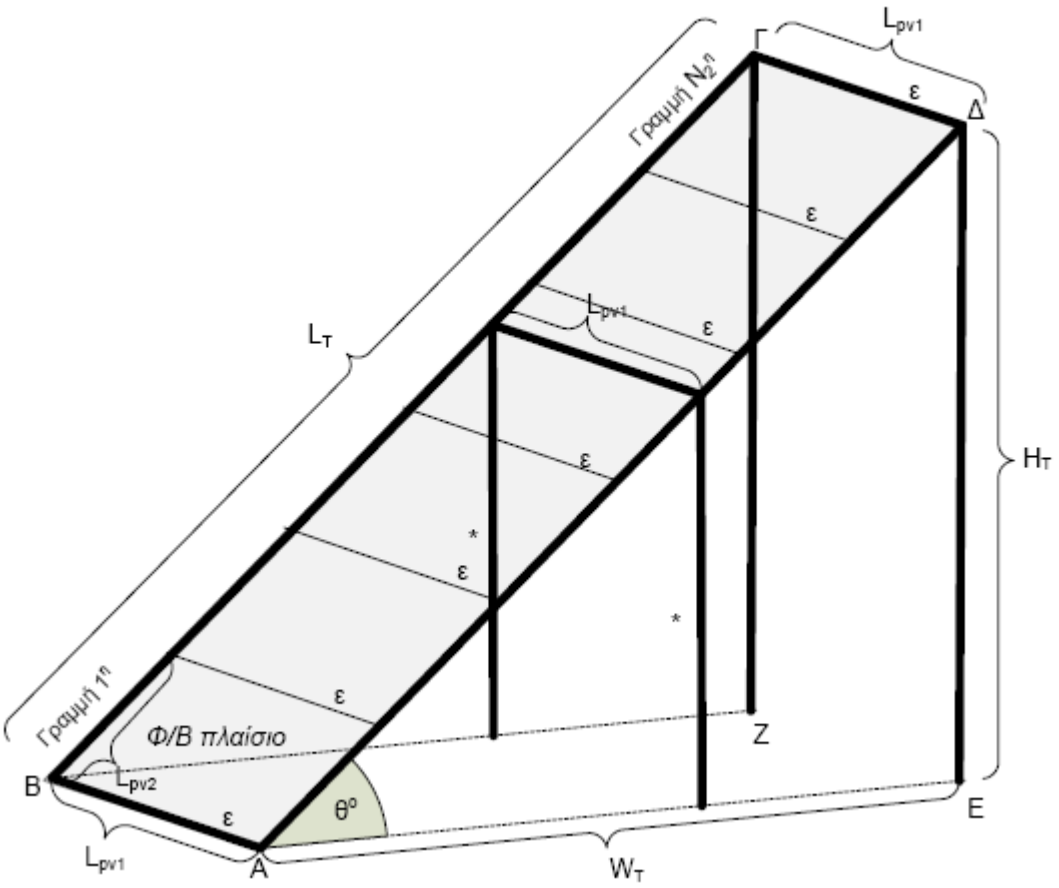
$$D_1 = N_{ser\min} \cdot L_{pv1} \tag{8.14}$$

και

$$D_2 = N_{row} \cdot W_T + (N_{row} - 1) \cdot F_y \tag{8.15}$$

8.5 Βάσεις στήριξης των Φ/Β πλαισίων

Οι βάσεις στήριξης των Φ/Β πλαισίων είναι κατασκευασμένες από μεταλλικούς δοκούς (συνήθως αλουμίνιο ή γαλβανισμένο σίδηρο). Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται υπολογισμός του μήκους των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων στην έκταση της εγκατάστασης όπως υπολογίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Αφού υπολογιστεί το μήκος των δοκών στη συνέχεια θα πολλαπλασιαστεί με το κόστος των δοκών ανά μέτρο για των υπολογισμό του κόστους.



Σχήμα 8.4: Διάγραμμα των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων.

Στο σχήμα 8.4 παρουσιάζονται με έντονο χρώμα οι δοκοί στήριξης των πλαισίων. Αρχικά υπολογίζεται το μήκος των δοκών για μία κάθετη γραμμή και στη συνέχεια το συνολικό μήκος για n_b κάθετες γραμμές.

$$n_b = round_up(\frac{N_1}{N_2}) \tag{8.16}$$

Οι κάθετοι δοκοί στο σχήμα 8.4 που είναι σημειωμένοι με (*) απεικονίζουν τα ενδιάμεσα υποστυλώματα για την στήριξη της στήλης. Θεωρήθηκε ότι χρειάζονται τέτοιοι ενδιάμεσοι στύλοι κάθε 2 μέτρα αυξανόμενου συνολικού ύψους H_T. Ο αριθμός τέτοιων στηλών συμβολίζεται με B_2 και υπολογίζονται με τη σχέση:

$$B_2 = round_down(\frac{H_T}{2}) \tag{8.17}$$

Το συνολικό μήκος B_{total} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$B_{total} = \sum_{i=1}^{B_2} i \cdot 2 \tag{8.18}$$

Το μήκος των στύλων ισούται με το μήκος των κάθετων υποστυλωμάτων B_{total} + ΓΖ +ΔΕ (Σχήμα 8.4) επιπλέον το μήκος των δύο πλευρών ΑΒ +ΓΔ και των μεταξύ τους ενώσεων μήκους L_{pv1} η κάθε μία από αυτές (οι πλευρές που είναι σημειωμένες με ε στο σχήμα 8.4). Το σύνολο αυτών των ενώσεων είναι το άθροισμα των ενδιάμεσων υποστυλωμάτων και των δύο ενώσεων όπως αυτές φαίνονται στο σχήμα, δηλαδή $B_2 + 2$. Τέλος, πριν υπολογιστεί το συνολικό μήκος πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι όταν μιλάμε για δοκούς αναφερόμαστε σε πρώτη ύλη που στην αγορά υπάρχει σε συγκεκριμένες διαστάσεις και αυτό πρακτικά σημαίνει ότι πάντα θα υπάρχει ένα ποσοστό από αυτές τις δοκούς που θα περισσέψει που επιβαρύνει όμως οικονομικά το συνολικό έργο. Συνήθως αυτό το ποσοστό κυμαίνεται γύρω στο 10%. Άρα, το συνολικό μήκος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$B_1 = (2 \cdot (B_{total} + H_T + L_T) + (B_2 + 2) \cdot L_{pv2}) \cdot 110\% \tag{8.19}$$

Όπου:

L_T το κεκλιμένο πλάτος της στήλης όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα 8.4 και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$L_T = N_2 \cdot L_{pv2} \tag{8.20}$$

Άρα το συνολικό μήκος των δοκών Β υπολογίζεται από τη σχέση:

$$B = B_1 \cdot n_b \tag{8.21}$$

Κάτι τελευταίο που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι πως στην κάθετη πλευρά ΑΒ (δηλαδή αυτή που βρίσκεται στο έδαφος) και εκεί που τοποθετούνται τα τελευταία υποστυλώματα ύψους H_T υπάρχουν τοιχία στήριξης κατασκευασμένα από σκυρόδερμα ύψους 0.5m , πάχους 0.15m και μήκους όσο και το μήκος L_{pv1} του κάθε πλαισίου. Το κόστος κατασκευής αυτών των τοιχίων συμπεριλαμβάνεται στο κόστος των βάσεων στήριξης και ο υπολογισμός του κόστους γίνεται βάση του όγκου τους. Άρα, για τον υπολογισμό τους κόστους χρειάζεται να γνωρίζουμε το συνολικό όγκο B_B ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

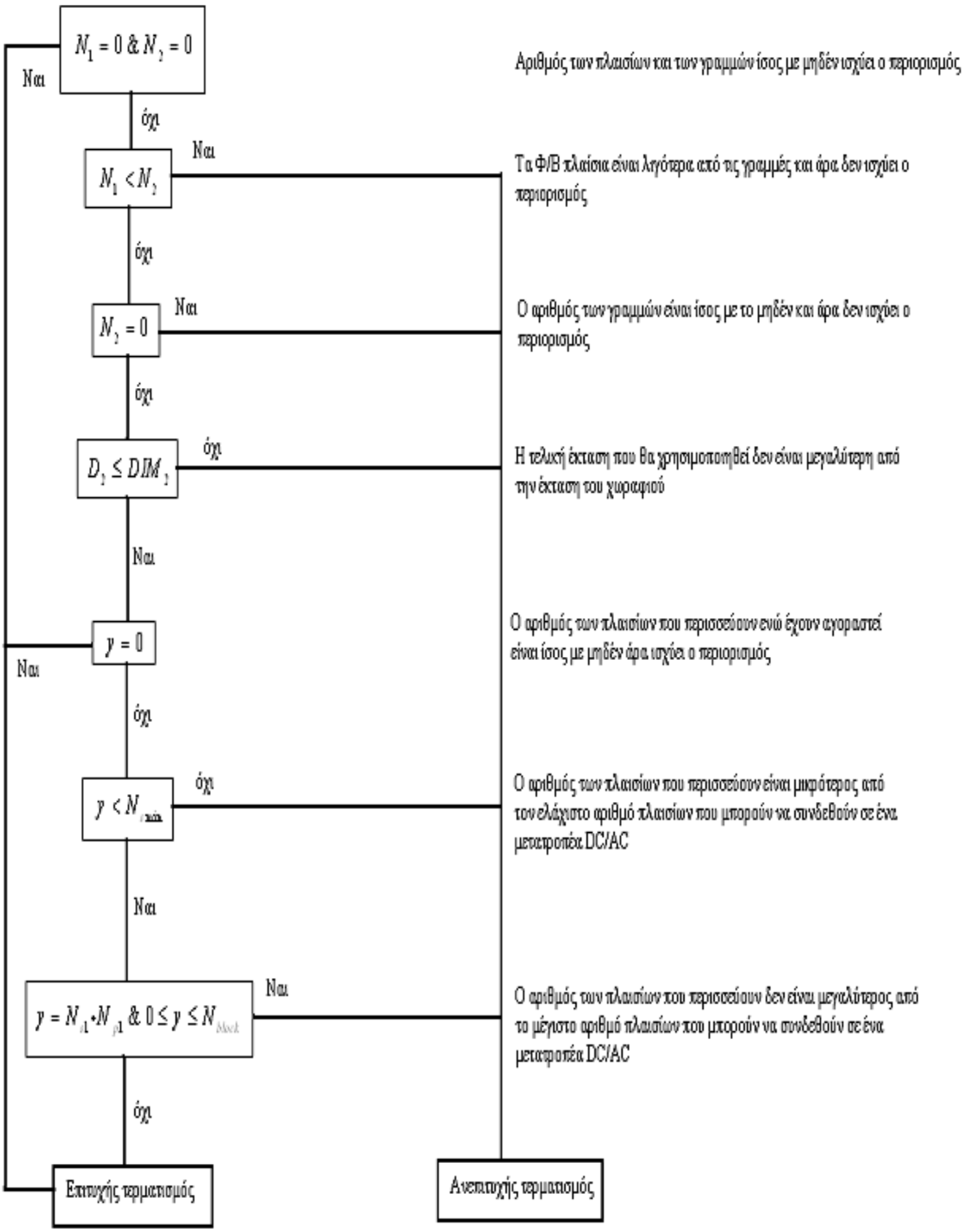
$$B_B = 2 \cdot 0.5 \cdot 0.15 \cdot L_{pv1} \cdot n_b \text{`} \tag{8.21}$$

Το τελικό κόστος κατασκευής υπολογίζεται από το κόστος των βάσεων στήριξης και των στηριγμάτων από σκυρόδερμα.

8.6 Ο αλγόριθμος SIM

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας υλοποιήθηκε ένας αλγόριθμος προκειμένου να ελέγχονται οι διάφορες λύσεις που παράγονται από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων. Οι παράμετροι του αλγορίθμου ήταν ο αριθμός των πλαισίων, ο αριθμός των γραμμών και η κλίση των πλαισίων. Οι διάφορες λύσεις που παράγει ο αλγόριθμος ελέγχονται ως προς την επάρκεια της διαθέσιμης έκτασης για την διάταξη των N_1 πλαισίων σε N_2 γραμμές καθώς επίσης και ως

προς τον τρόπο σύνδεσης των N_1 πλαισίων στους μετατροπείς DC/AC. Πέραν από τους παραπάνω ελέγχους, γίνεται έλεγχος για το αν ο αριθμός των γραμμών N_2 είναι μεγαλύτερος από των αριθμό των πλαισίων N_1 κάτι που προφανώς είναι άτοπο. Επίσης αν προκύψει αριθμός N_2 ίσος με το μηδέν ενώ ο αριθμός των πλαισίων N_1 είναι μεγαλύτερος του μηδέν καταλήγει πάλι σε άτοπο. Εφόσον οι παραπάνω έλεγχοι πληρούν όλες τις προϋποθέσεις που έχουν τεθεί ο αλγόριθμος τερματίζει με επιτυχία ενώ σε αντίθετη περίπτωση γίνεται διόρθωση των παραχθέντων λύσεων όπως περιγράφεται σε παρακάτω κεφάλαιο. Στο σχήμα 8.5 γίνεται μια λεπτομερής ανάλυση του αλγορίθμου SIM βήμα προς βήμα.

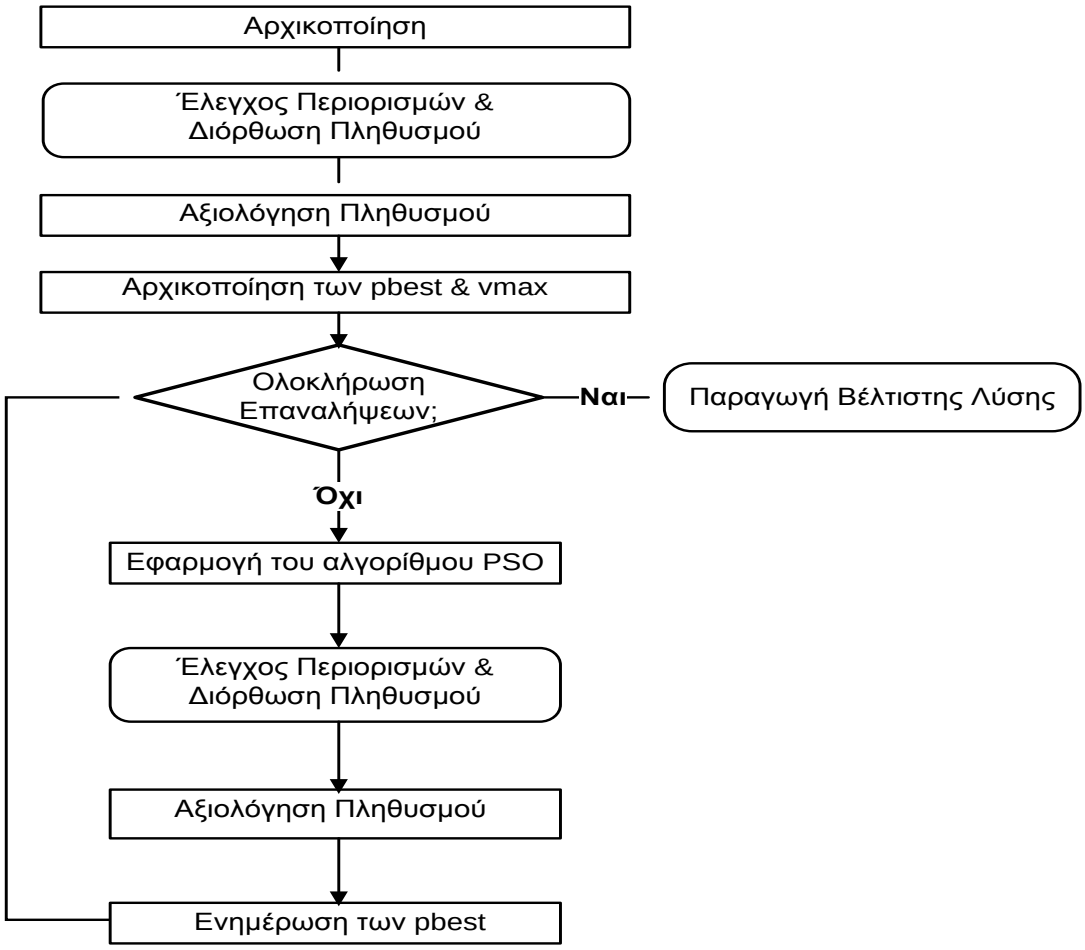


Σχήμα 8.5: Ανάλυση του αλγορίθμου SIM βήμα προς βήμα.

9. Μοντελοποίηση του προβλήματος με τον αλγόριθμο Βελτιστοποίησης Σμήνος Σωματιδίων

9.1 Εισαγωγή

Το πρόβλημα που έπρεπε να αντιμετωπιστεί είναι η βέλτιστη διαστασιολόγηση ενός συστήματος Φ/Β πλαισίων συνδεδεμένου με το ηλεκτρικό δίκτυο για την πώληση της παραχθείσας ενέργειας και τη μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους από αυτήν. Ο αλγόριθμος παρουσιάζεται συνοπτικά στο σχήμα 9.1.



Σχήμα 9.1: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ΒΣΣ

Η διαστασιολόγηση του προβλήματος αφορά τον συνολικό αριθμό των Φ/Β πλαισίων, των γραμμών σε μία στήλη και της κλίσης των Φ/Β πλαισίων. Έτσι ο αλγόριθμος περιέχει τρεις παραμέτρους της μορφής $c_1 = [N_1, N_2, \theta]$, όπου N_1 ο συνολικός αριθμός των πλαισίων , το N_2 ο συνολικός αριθμός των γραμμών σε μία στήλη και θ η κλίση των πλαισίων. Εδώ, αξίζει να σημειωθεί πως έμμεσα στον υπολογισμό του συνολικού κόστους συμμετέχουν και άλλοι παράγοντες όπως η αγορά των μετατροπέων AC/DC που θα χρειαστούν, οι βάσεις στήριξης των πλαισίων και βέβαια η αγορά της τελικής έκτασης που θα χρειαστεί για την εγκατάσταση των Φ/Β. Οι παραπάνω παράμετροι δε χρησιμοποιούνται άμεσα στην παραγωγή λύσεων από τον αλγόριθμο αλλά συμμετέχουν στον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης. Στον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης γίνεται διαστασιολόγηση του συστήματος στην οποία περιλαμβάνονται το αρχικό κεφάλαιο, το κόστος συντήρησης των στοιχείων του συστήματος και τα κέρδη από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας.

Αν από το χρήστη δοθεί σαν είσοδος πολλοί τύποι τόσο Φ/Β πλαισίων όσο και μετατροπέων AC/DC τότε ο αλγόριθμος εκτελείται τόσες φορές όσοι και οι δυνατοί συνδυασμοί όλων των τύπων. Για κάθε έναν από τους δυνατούς συνδυασμούς προκύπτει μία λύση που αντιστοιχεί στη λύση του ελάχιστου κόστους του συστήματος. Τελικά, επιλέγεται η βέλτιστη λύση όσον αφορά το κόστος συστήματος από τους προαναφερόμενους συνδυασμούς.

9.2 Αρχικοποίηση του αλγορίθμου

Πριν εφαρμοστεί ο αλγόριθμος για κάποιο συνδυασμό στοιχείων του συστήματος πρέπει να διαβαστούν όλες οι είσοδοι-παράμετροι που απαιτούνται για την εκτέλεση του αλγορίθμου. Ακολούθως γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί όπως ο υπολογισμός της παραγόμενης ενέργειας κάθε Φ/Β πλαισίου για κάθε δυνατή ημέρα και κλίση. Οι είσοδοι του αλγορίθμου διαβάζονται από αρχεία που διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά τις παραμέτρους του αλγορίθμου ΒΣΣ και κάποιες παραμέτρους του συστήματος και η δεύτερη αφορά τις παραμέτρους των στοιχείων του συστήματος. Οι παράμετροι των στοιχείων του συστήματος έχουν σχέση με τα χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαισίων και τα χαρακτηριστικά των μετατροπέων DC/AC. Είσοδοι, επίσης, που σχετίζονται με τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας του συστήματος είναι οι ετήσιες χρονοσειρές μέσων ημερησίων ή μηνιαίων τιμών της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας, καθώς και το γεωγραφικό πλάτος και ο συντελεστής ανάκλασης του τόπου της μελέτης. Αφού διαβαστούν όλες οι είσοδοι γίνονται οι υπολογισμοί

της ενέργειας που παράγουν τα Φ/Β πλαίσια για κάθε ημέρα του έτους και για κάθε δυνατή κλίση ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί ο γενετικός αλγόριθμος.

Ακολουθεί αναλυτικά η περιγραφή όλων των εισόδων:

Φ/Β πλαίσια: Όλα τα είδη των Φ/Β πλαισίων μαζί με τα χαρακτηριστικά τους βρίσκονται σε ένα αρχείο. Ανάλογα με το Φ/Β πλαίσιο του συνδυασμού εκείνου που έχει επιλεχθεί για τη διαδικασία της διαστασιολόγησης, διαβάζονται τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά. Αυτά είναι η ονομασία του, ο αριθμός των στοιχείων που περιλαμβάνει σε σειρά και παράλληλα, η τάση ανοιχτοκύκλωσης σε Volts, το ρεύμα βραχυκύκλωσης σε Amperes, η τάση μέγιστης ισχύος σε Volts, το ρεύμα μέγιστης ισχύος σε Amperes, η ισχύ αιχμής του σε Watts, το NCOT σε C, το κόστος αγοράς του σε €, το κόστος συντήρησής του σε €/έτος, οι δύο διαστάσεις του πλαισίου (η πρώτη είναι αυτή της πλευράς που θα εγκατασταθεί προς το Νότο) σε μέτρα, τα έτη ορθής λειτουργίας που δίνει ο κατασκευαστής και ο συντελεστής εξάρτησης της τάσης από τη θερμοκρασία ανά °C πάνω από τους 25°C. Ο συντελεστής αυτός έχει αρνητικό πρόσημο που σημαίνει ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας η τάση του Φ/Β πλαισίου μειώνεται. Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται για την εύρεση της μέγιστης δυνατής τάσης ανοιχτοκύκλωσης και της ελάχιστης δυνατής τάσης μέγιστης ισχύος για όλη τη διάρκεια του έτους, για την ετησίως ελάχιστη και μέγιστη αντίστοιχα θερμοκρασία από αυτές που εισάγονται. Το αρχείο που περιέχει τους τύπους των Φ/Β πλαισίων έχει την παρακάτω μορφή:

1 KC170 1 1 29.0 8.0 23.4 7.27 170 47 515.0 5.15 1.29 0.99 25 -0.109
2 SM50 1 1 19.8 3.4 15.9 3.15 50 45 202.0 2.02 1.22 0.329 25 -0.07

Μετατροπείς AC/DC: Τα χαρακτηριστικά που περιλαμβάνονται στο αρχείο των μετατροπέων DC/AC είναι η ονομασία τους, ο βαθμός απόδοσής τους, η ακρίβεια του αλγορίθμου MPPT που περιλαμβάνουν, η μέγιστη ισχύς εισόδου τους σε Watts, ο μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών, MTBF, σε ώρες, το κόστος εγκατάστασής τους σε €, το ετήσιο κόστος συντήρησής τους σε €/έτος, η ελάχιστη και η μέγιστη τάση εισόδου τους σε Volts και το κόστος επισκευής τους σε περίπτωση βλαβών σε €/επισκευή. Επίσης, αν ο κατασκευαστής δεν δίνει το μέσο χρόνο μεταξύ βλαβών τότε αυτός παίρνει την τιμή των 25 χρόνων, δηλαδή 219000 ώρών, μια τιμή που ισχύει γενικότερα για αυτού του τύπου τις συσκευές.

Το αρχείο που περιέχει τους τύπους των μετατροπέων DC/AC έχει την παρακάτω μορφή:

1 FRONIUS1450 0.944 1.0 3000 219000 1450 25 150 450 14.5
2 SUNNYB_7000 0.953 1.0 7000 219000 3008 45 335 560 30

Ακτινοβολία και θερμοκρασία: Δίνονται σε αρχεία με μέσες μηνιαίες ή μέσες ημερήσιες τιμές. Στην περίπτωση που οι είσοδοι είναι μηνιαίες τιμές γίνεται αναγωγή τους σε ημερήσιες. Επίσης στο αρχείο με την ακτινοβολία υπάρχει το γεωγραφικό πλάτος της υπό μελέτη περιοχής καθώς και ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους σε αυτή την περιοχή.
Μετά την είσοδο των παραπάνω παραμέτρων στον αλγόριθμο της παρούσας εργασίας γίνεται ο υπολογισμός της ενέργειας που παράγει ένα Φ/Β πλαίσιο κάθε ημέρα του έτους για όλες τις δυνατές κλίσεις των Φ/Β πλαισίων $(0 \le \theta \le 90)$.

9.3 Αντικειμενική συνάρτηση για τη διαστασιολόγηση συστήματος Φ/Β πλαισίων

Η αντικειμενική συνάρτηση για τη διαστασιολόγηση του συστήματος με μία κλίση πλαισίων είναι της μορφής:

$$g(N_1, N_2, \theta) = IC_n + FC_n - R_n \tag{9.1}$$

Στη συνέχεια περιγράφονται οι επιμέρους παράγοντες της αντικειμενικής συνάρτησης. Το συνολικό κόστος εγκατάστασης ανηγμένο στο n-οστό έτος είναι:

$$IC_n = (1-\gamma) \cdot IC_0 \cdot (1+i)^n \tag{9.2}$$

Όπου:

IC_0 είναι το αρχικά επενδυμένο κεφάλαιο,

γ είναι το ύψος της επιδότησης,

i είναι το ετήσιο κόστος χρήματος,

n ο συνολικός χρόνος μελέτης σε έτη.

Στο IC_0 περιλαμβάνεται το κόστος αγοράς των στοιχείων το υ συστήματος, το κό σο ς κατασκευής των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων καθώς και το κόστος αγοράς της έκτασης. Το IC_0 δίνεται από τη σχέση:

$$IC_0 = N_1 \cdot C_1 + N_{dc} \cdot C_2 + C_L + C_B \tag{9.3}$$

Όπου:

N_1 είναι ο συνολικός αριθμός των εγκατεστημένων Φ/Β πλαισίων,

C_1 το κόστος εγκατάστασης κάθε Φ/Β πλαισίου(€),

N_{dc} είναι ο αριθμός των εγκατεστημένων μετατροπέων DC/AC,

C_2 είναι το κόστος εγκατάστασης του μετατροπέα(€),

C_L είναι το κόστος αγοράς της έκτασης (€) και

C_B το κόστος κατασκευής των βάσεων (€).

Για το κόστος αγοράς της έκτασης ισχύει η σχέση:

$$C_L = D_1 \cdot D_2 \cdot C_3 \tag{9.4}$$

όπου:

D_1 είναι το μήκος της νότιας πλευράς της έκτασης που απαιτείται (m),

D_2 είναι το μήκος της δεύτερης πλευράς της έκτασης που απαιτείται (m) και

C_3 είναι το κόστος αγοράς της έκτασης ανά m^2.

Αν δε χρειάζεται να συμπεριληφθεί το κόστο ς αγοράς της έκτασης στο ν υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης τότε αρκεί να δοθεί μηδενική τιμή στο κόστος C_3.

Για το κόστος κατασκευής των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων ισχύει η σχέση:

$$C_B = B \cdot C_4 + B_B \cdot C_5 \tag{9.5}$$

όπου:

B είναι το συνολικό μήκος (m) των δοκών που απαιτούνται για την κατασκευή των βάσεων,

C_4 είναι το εγκατεστημένο κόστος (€) των παραπάνω στύλων ανά μέτρο,

B_B είναι ο συνολικός όγκος του σκυροδέματος που απαιτείται για την κατασκευή των βάσεων σε m^3,

C_5 είναι το εγκατεστημένο κόστος (€) του σκυροδέματος ανά m^3.

Το κόστος συντήρησης της εγκατάστασης για τα n χρόνια μελέτης υπολογίζεται για το n-οστό έτος από την παρακάτω εξίσωση:

$$FC_n = (N_1 \cdot C_{m1} + N_{dc} \cdot C_{m2}) \cdot (1+g) \cdot (1+i)^n \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{1+g}{1+i} \right)^n}{i-g} \right] + IN_c \tag{9.6}$$

όπου:

C_{m1} είναι το ετήσιο κόστος συντήρησης των Φ/Β πλαισίων (€/Φ/Β πλαίσιο),

C_{m2} είναι το ετήσιο κόστος συντήρησης των μετατροπέων (€/μετατροπέα),

g είναι ο ετήσιος πληθωρισμός και

IN_c είναι το κόστος επισκευής (€) των μετατροπέων DC/AC.

Το IN_c δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$IN_c = N_{dc} \cdot R_{\cos t} \cdot \left[\sum_{j=k} \frac{1+g^j}{1+i^j} \right] \cdot (1+i)^n \tag{9.7}$$

όπου:

R_{cost} είναι το κόστος επισκευής των μετατροπέων (€/επισκευή μετατροπέα) και

k* είναι οι χρονιές που απαιτείται επισκευή.

Για τον υπολογισμό του INC χρειάζεται να υπολογιστεί το άθροισμα των επισκευών μόνο για εκείνες τις χρονιές που χρειάζεται να γίνει επισκευή. Έτσι αν για παράδειγμα ο χρόνος MTBF είναι 4 έτη και η μελέτη γίνεται για 15 χρόνια τότε το k* θα είναι 4, 8 και 12. Το k* υπολογίζεται βάσει του χρόνου MTBF που δίνει ο κατασκευαστής του επιλεγμένου μετατροπέα.

Για τον υπολογισμό των έντοκων κερδών από την πώληση της ενέργειας στο n-οστό έτος χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$R_n = (1 - tax) \cdot C_0 \cdot N_1 \cdot E_{tot} (1+i)^n \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{1}{1+i} \right)^n}{i} \right] \tag{9.8}$$

Όπου:

Co είναι τιμή πώλησης της ενέργειας (€) ανά kWh και

E_{tot} είναι η συνολική ενέργεια (kWh) που παράγει ένα Φ/Β πλαίσιο σε ένα χρόνο.

tax το ποσοστό του φόρου επί των καθαρών κερδών

Βάσει της ισχύουσας νομοθεσίας για εκμετάλλευση της ενέργειας από Φ/Β συστήματα η τιμή πώλησης της ενέργειας είναι σταθερή για όλα τα χρόνια της μελέτης. Σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία η τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας από Φ/Β στοιχεία ορίζεται στα 0,45€/kWh για συστήματα με εγκατεστημένη ισχύ έως 100kWp και στα 0,40€/kWh για συστήματα με εγκατεστημένη ισχύ μεγαλύτερη από 100kWp. Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται η τελική τιμή πώλησης της ενέργειας χρησιμοποιώντας τις δύο παραπάνω τιμές πώλησης που δίνονται ως είσοδοι από το χρήστη. Η εγκατεστημένη ισχύς υπολογίζεται ως το γινόμενο του πλήθους των εγκατεστημένων πλαισίων N επί τη μέγιστη ισχύ του κάθε πλαισίου.

Η παραγόμενη ενέργεια E_{tot} του Φ/Β πλαισίου σε kWh προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$E_{tot} = \frac{n_1 \cdot n_{MPPT} \cdot E_{PV}}{1000} \tag{9.9}$$

Όπου:

n είναι ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα DC/AC,

n_{MPPT} είναι η ο βαθμός ακρίβειας της λειτουργίας MPPT του μετατροπέα και

E_{PV} είναι το άθροισμα για ένα έτος της ημερήσιας ενέργειας που παράγουν τα Φ/Β πλαίσια (ο τρόπος υπολογισμού της ενέργειας περιγράφεται στο 2ο κεφάλαιο) για τη δεδομένη κλίση τους και δίνεται σε Wh.

Η διαίρεση με 1000 γίνεται για την αναγωγή της ενέργειας σε kWh.

10. *Αποτελέσματα*

10.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται διάφορα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου για διάφορα σενάρια διαστασιολόγησης. Στη παρούσα εργασία, όπως έχει ήδη αναφερθεί υλοποιήθηκε ο αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και συγκεκριμένα δύο είδη αυτού η απλή μορφή της Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (simple PSO) και μια πιο σύνθετη που εισάγει έναν επιπλέον παράγοντα το Βάρος Αδράνειας (inertia weight) στον αλγόριθμο Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (inertia PSO). Αρχικά παρουσιάζονται οι λύσεις για όλους τους συνδυασμούς παραμέτρων που μπορούν να έχουν η simple PSO και η inertia PSO. Για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για την συμπεριφορά των αλγορίθμων εξετάστηκαν αρχικά μόνο παράμετροι που έχουν να κάνουν καθαρά με την ΒΣΣ, δηλαδή το inertia weight (μόνο για την περίπτωση της inertia PSO), τα C_1, C_2, το Vmax, το πλήθος των επαναλήψεων και το πλήθος σμήνους. Στη συνέχεια εξετάστηκε η συμπεριφορά των αλγορίθμων αλλάζοντας κάθε φορά μία μόνο συγκεκριμένη παράμετρο και στους τρεις προς εξέταση αλγόριθμους(Γενετικοί Αλγόριθμοι (ga), inertia PSO και simple PSO). Αφού διαπιστώθηκε η συμπεριφορά των αλγορίθμων στις αλλαγές των παραπάνω παραμέτρων και έγινε επιλογή των τιμών των οποίων θα έχουν, εξετάστηκαν διάφορα σενάρια διαστασιολόγησης για διάφορους συνδυασμούς διαθέσιμης έκτασης (1 στρέμμα, 2 στρέμματα, 3 στρέμματα, 5 στρέμματα), ύψους επιδότησης(0%,30%,40%,50%), κόστους αγοράς έκτασης ανά τετραγωνικό μέτρο (0 euro, 30 euro, 40 euro, 50 euro) και του ύψους της φορολογίας επί των κερδών (0% , 25%).

Οι τύποι αλλά και τα κόστη των εμπορικά διαθέσιμων δομικών μονάδων του συστήματος (Φ/Β πλαίσια, μετατροπείς DC/AC) που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.1:

Πίνακας 10.1 Τύποι και κόστη των στοιχείων του συστήματος					
Είδος	*Όνομα*		*Κόστος αγοράς(€)*	*Κόστος συντήρησης(€)*	*Κόστος επισκευής(€)*
Φ/Β	1.	KC170	515	5.15	-
	2.	SM12	515	5.15	-
	3.	SM50	202	2.02	-
DC/AC	1.	FRONIUS1450	1450	25	14.5
	2.	SUNNYB_1100	1200	18	12
	3.	SUNNYB_7000	3008	45	30
	4.	Powergate30	39800	600	398

Το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής (Πολυτεχνείο Κρήτης) για την οποία έγινε η διαστασιολόγηση είναι 35,53^{o} και ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους θεωρήθηκε ίσος με 0.2. Για τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την ακτινοβολία (σε οριζόντιο επίπεδο) και τη θερμοκρασία χρησιμοποιήθηκαν μέσες ημερήσιες τιμές. Για τον υπολογισμό του κόστους των βάσεων χρησιμοποιήθηκε η τιμή των 33€ανά μέτρο για γαλβανισμένους δοκούς από σίδηρο διαστάσεων 80mm x 40mm και πάχους 2mm. Αυτή η τιμή εγκατεστημένου κόστους δόθηκε ως αντιπροσωπευτική, για τα δεδομένα της παρούσας εργασίας, από κατασκευαστές τέτοιου είδους βάσεων στήριξης. Με αντίστοιχο τρόπο έχει εκτιμηθεί και η τιμή του εγκατεστημένου κόστους για κάθε κυβικό μέτρο οπλισμένου σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε και είναι ίση με 230€/m^3. Επίσης, όλες οι τιμές αναφέρονται σε παρούσα αξία (στο χρόνο 0). Οι τιμές των παραμέτρων που έχουν υπολογιστεί αναφέρονται σε μελλοντική αξία στο τελευταίο έτος (n-οστό) της μελέτης ανήχθησαν στο έτος 0, μέσο της διαίρεσής τους με $(1+i)^n$ όπου i είναι το ετήσιο κόστος χρήματος. Να σημειωθεί ότι όλοι οι παράμετροι κόστους είναι είσοδοι του αλγορίθμου οπότε επιλέγονται από το χρήστη, όπως και οι τιμές του ετήσιου πληθωρισμού και του ετήσιου κόστους χρήματος, που στην παρούσα εργασία έχουν τεθεί ίσες με 3% και 4,5% αντίστοιχα.

10.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Θεωρήθηκε πως τα Φ/Β πλαίσια στην παρούσα εργασία έχουν μία σταθερή κλίση κατά τη διάρκεια του έτους. Αρχικά επιλέχθηκε να αναπτυχθούν διάφορα σενάρια για τις τιμές των παραμέτρων που διέπουν αποκλειστικά την ΒΣΣ ώστε να γίνει όσο το δυνατόν καλύτερη επιλογή των τιμών αυτών για να εξαχθούν όσο το δυνατόν αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα. Εξετάστηκαν λοιπόν διάφορα σενάρια για διάφορες τιμές της κάθε παραμέτρου τα οποία ακολούθως παρουσιάζονται σε συγκεντρωτικούς πίνακες. Αφού εξετάστηκαν οι παράμετροι που διέπουν την ΒΣΣ (και για τις δύο μορφές της που υλοποιήθηκαν) δημιουργήθηκαν σενάρια για την εξαγωγή αποτελεσμάτων αλλάζοντας κάθε φορά μία μονάχα παράμετρο και στη συνέχεια για συνδυασμούς για διάφορες τιμές επιδότησης εγκατάστασης, για το κόστος της προς εκμετάλλευσης γης καθώς και για την φορολογία επί των κερδών. Σκοπός όμως της παρούσας εργασίας δεν ήταν μόνο η εξαγωγή αποτελεσμάτων με χρήση της simple PSO και της inertia PSO για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση, αλλά και να γίνει σύγκριση με τα αποτελέσματα που εξάγονται από τους γενετικούς αλγορίθμους για το αντίστοιχο πρόβλημα. Έτσι λοιπόν για όποιο σενάριο εξετάστηκαν η simple PSO και η inertia PSO για το αντίστοιχο σενάριο εξετάστηκαν και οι γενετικοί αλγόριθμοι. Για την σύγκριση των τριών αλγορίθμων παρήχθησαν αρχεία τύπου txt για το κάθε σενάριο τα οποία περιέχουν τα αποτελέσματα και από τους τρεις αλγορίθμους. Πάντα σε αυτά τα αρχεία παρουσιάζεται πρώτα ο γενετικός αλγόριθμος ακολούθως η inertia PSO και τέλος η simple PSO. Τέλος σε κάθε ένα σενάριο υπάρχει και ένας συγκεντρωτικός πίνακας για την συμπεριφορά των αλγορίθμων για το εκάστοτε σενάριο ως προς το κέρδος και την σύγκλιση. Στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων κρίθηκε σκόπιμο λόγο του πολύ μεγάλου όγκου δεδομένων να παρουσιαστούν ενδεικτικά κάποια αποτελέσματα αναλυτικά με παρουσίαση τόσο των αρχείων αποτελεσμάτων όσο και των συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων ενώ για τα υπόλοιπα σενάρια παρουσιάζονται απλά οι πίνακες με τα συγκριτικά αποτελέσματα των τριών αλγορίθμων.

10.2.1 Αποτελέσματα για διάφορες τιμές των παραμέτρων της ΒΣΣ

Πίνακες αποτελεσμάτων για διάφορα inertia weight και Vmax=0.3, επαναλήψεις 400 και πλήθος σμήνους 20.

```
-------------------------ID of the chosen Devices------------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA------------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 1.00
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 83.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 82.17 meters
Pv module inclinations: 0
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 281100.07 Euros
==========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2651620.28
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 183427.07 kWh
Energy Profits:5028607.61
Payback Period: 8.60 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.1 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για αρχικό inertia weight 0.9

```
-------------------------ID of the chosen Devices--------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA---------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 1.00
Number of pv modules in one line of a row: 6
Number of lines in a row: 96.00
Final southern dimension of land: 7.74 meters
Final western dimension of land: 95.04 meters
Pv module inclinations: 0
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 281553.29 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2648516.43
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 183427.07 kWh
Energy Profits:5028607.61
Payback Period: 8.60 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.2 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για αρχικό inertia weight 0.7

```
-------------------------ID of the chosen Devices---------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA----------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 1.00
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 83.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 82.17 meters
Pv module inclinations: 0
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 281100.07 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2651620.28
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 183427.07 kWh
Energy Profits:5028607.61
Payback Period: 8.60 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.3 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για αρχικό inertia weight 0.5

```
-------------------------ID of the chosen Devices--------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA---------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 1.00
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 83.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 82.17 meters
Pv module inclinations: 0
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 281100.07 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2651620.28
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 183427.07 kWh
Energy Profits:5028607.61
Payback Period: 8.60 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.4 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για αρχικό inertia weight 0.3

Πίνακας 10.2 Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για διάφορα Inertia weights

Αρχικό inertia weight	**Τελικό inertia weight**	**Κέρδος**	**Σύγκλιση**
0.9	0.1	281100.29	50
0.7	0.1	281553.51	150
0.5	0.1	281100.29	84
0.3	0.1	281100.29	47

Πίνακες αποτελεσμάτων για διάφορα inertia weight και Vmax=0.05, επαναλήψεις 400 και πλήθος σμήνους 20.

```
-------------------------ID of the chosen Devices--------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA---------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 7.00
Distance between rows: 2.70 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 12.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.53 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 292819.76 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2714969.16
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:5172218.56
Payback Period: 8.50 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.5 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για αρχικό inertia weight 0.9

```
-------------------------ID of the chosen Devices-------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA--------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 3.00
Distance between rows: 6.52 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 29.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.32 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 291277.51 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2725531.25
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:5172218.56
Payback Period: 8.50 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.6 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για αρχικό inertia weight 0.7

```
-------------------------ID of the chosen Devices---------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA----------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 3.00
Distance between rows: 6.52 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 29.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.32 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 291277.51 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2725531.25
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:5172218.56
Payback Period: 8.50 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.7 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για αρχικό inertia weight 0.5

```
-------------------------ID of the chosen Devices------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 3.00
Distance between rows: 6.52 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 29.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.32 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 291277.51 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2725531.25
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:5172218.56
Payback Period: 8.50 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.8 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για αρχικό inertia weight 0.3

Πίνακας 10.3 Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για διάφορα Inertia weights

Αρχικό_inertia_weight	**Τελικό_inertia_weight**	**Κέρδος**	**Σύγκλιση**
0.9	0.1	292819.99	28
0.7	0.1	291277.74	74
0.5	0.1	291277.74	78
0.3	0.1	291277.74	20

Πίνακες αποτελεσμάτων για διαφορετικό αριθμό επαναλήψεων και Vmax=0.3 και πλήθος σμήνους 20.

```
-------------------------ID of the chosen Devices-------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA--------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 1.00
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 83.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 82.17 meters
Pv module inclinations: 0
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 281100.07 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2651620.28
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 183427.07 kWh
Energy Profits:5028607.61
Payback Period: 8.60 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.9 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για αριθμό επαναλήψεων 400

```
-------------------------ID of the chosen Devices--------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA---------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 1.00
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 83.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 82.17 meters
Pv module inclinations: 0
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 281100.07 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2651620.28
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 183427.07 kWh
Energy Profits:5028607.61
Payback Period: 8.60 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.10 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για αριθμό επαναλήψεων 500

```
-------------------------ID of the chosen Devices-------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA--------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 1.00
Number of pv modules in one line of a row: 6
Number of lines in a row: 96.00
Final southern dimension of land: 7.74 meters
Final western dimension of land: 95.04 meters
Pv module inclinations: 0
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 281553.29 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2648516.43
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 183427.07 kWh
Energy Profits:5028607.61
Payback Period: 8.60 years
Internal Rate of Return: 0.17
=======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.11 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για αριθμό επαναλήψεων 600

Πίνακας 10.4 Συγκεντρωτικός Πίνακας για διαφορετικό αριθμό επαναλήψεων και Vmax=0.3

Vmax	Inertia_weight	Αριθμός Επαναλήψεων	Κέρδος	Σύγκλιση
0.3	0.9 ---> 0.1	400	281100.29	50
0.3	0.9 ---> 0.1	500	281553.51	142
0.3	0.9 ---> 0.1	600	281553.51	257
0.3	0.9 ---> 0.1	800	281553.51	308
0.3	0.9 ---> 0.1	900	281100.29	234
0.3	0.9 ---> 0.1	1500	281553.51	706

Πίνακες αποτελεσμάτων για διαφορετικό αριθμό επαναλήψεων και Vmax=0.05 και πλήθος σμήνους 20

```
-------------------------ID of the chosen Devices-------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA--------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 7.00
Distance between rows: 2.70 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 12.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.53 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 292819.76 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2714969.16
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:5172218.56
Payback Period: 8.50 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.12 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για αριθμό επαναλήψεων 400

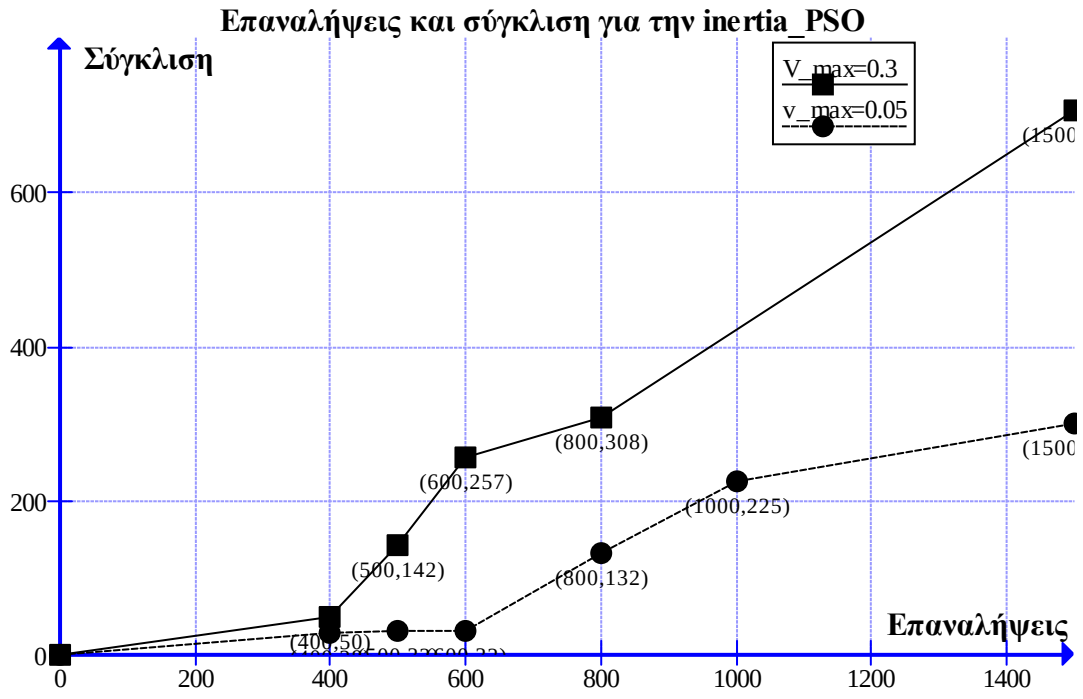
```
-------------------------ID of the chosen Devices--------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA--------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 7.00
Distance between rows: 2.70 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 12.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.53 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 292819.76 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2714969.16
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:5172218.56
Payback Period: 8.50 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.13 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για αριθμό επαναλήψεων 500

```
-------------------------ID of the chosen Devices-------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA-------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 7.00
Distance between rows: 2.70 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 12.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.53 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 292819.76 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2714969.16
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:5172218.56
Payback Period: 8.50 years
Internal Rate of Return: 0.17
=======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.14 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για αριθμό επαναλήψεων 600

Πίνακας 10.5 Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για διαφορετικό αριθμό επαναλήψεων				
Vmax	**Inertia_weight**	**Αριθμός Επαναλήψεων**	**Κέρδος**	**Σύγκλιση**
0.05	0.9 ---> 0.1	400	292819.99	28
0.05	0.9 ---> 0.1	500	292819.99	32
0.05	0.9 ---> 0.1	600	292819.99	32
0.05	0.9 ---> 0.1	700	292819.99	113
0.05	0.9 ---> 0.1	800	292819.99	132
0.05	0.9 ---> 0.1	900	292819.99	156
0.05	0.9 ---> 0.1	1000	292819.99	225
0.05	0.9 ---> 0.1	2000	292819.99	352



Σχήμα 1 01. : Διακύμανση της σύγκλισης στο βέλτιστο σε σχέση με το ν αριθμό των επαναλήψεων.

Πίνακες αποτελεσμάτων για διαφορετικό πλήθος σμήνους για την simple PSO, επαναλήψεις 400 και Vmax=0.05.

```
-------------------------ID of the chosen Devices--------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA---------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 3.00
Distance between rows: 6.52 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 29.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.32 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 291277.51 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2725531.25
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:5172218.56
Payback Period: 8.50 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.15 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για πλήθος σμήνους 20

```
-------------------------ID of the chosen Devices-----------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 7.00
Distance between rows: 2.70 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 12.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.53 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 292819.76 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2714969.16
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:5172218.56
Payback Period: 8.50 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.16 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για πλήθος σμήνους 30

```
-------------------------ID of the chosen Devices--------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA---------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 3.00
Distance between rows: 6.52 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 29.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.32 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 291277.51 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2725531.25
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:5172218.56
Payback Period: 8.50 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.17 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για πλήθος σμήνους 40

Πίνακας 10.6 Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για διαφορετικό πλήθους σμήνους		
Πλήθος Σμήνους	**Κέρδος**	**Σύγκλιση**
20	291277.74	14
30	292819.99	13
40	291277.74	40
50	291277.74	8
60	291277.74	6

Πίνακες αποτελεσμάτων για διαφορετικό πλήθος σμήνους για την inertia PSO, αρχικό inertia weight 0.9, αριθμός επαναλήψεων 400 και πλήθος σμήνους 20

```
-------------------------ID of the chosen Devices-----------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 7.00
Distance between rows: 2.70 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 12.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.53 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 292819.76 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2714969.16
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:5172218.56
Payback Period: 8.50 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.18 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για πλήθος σμήνους 20

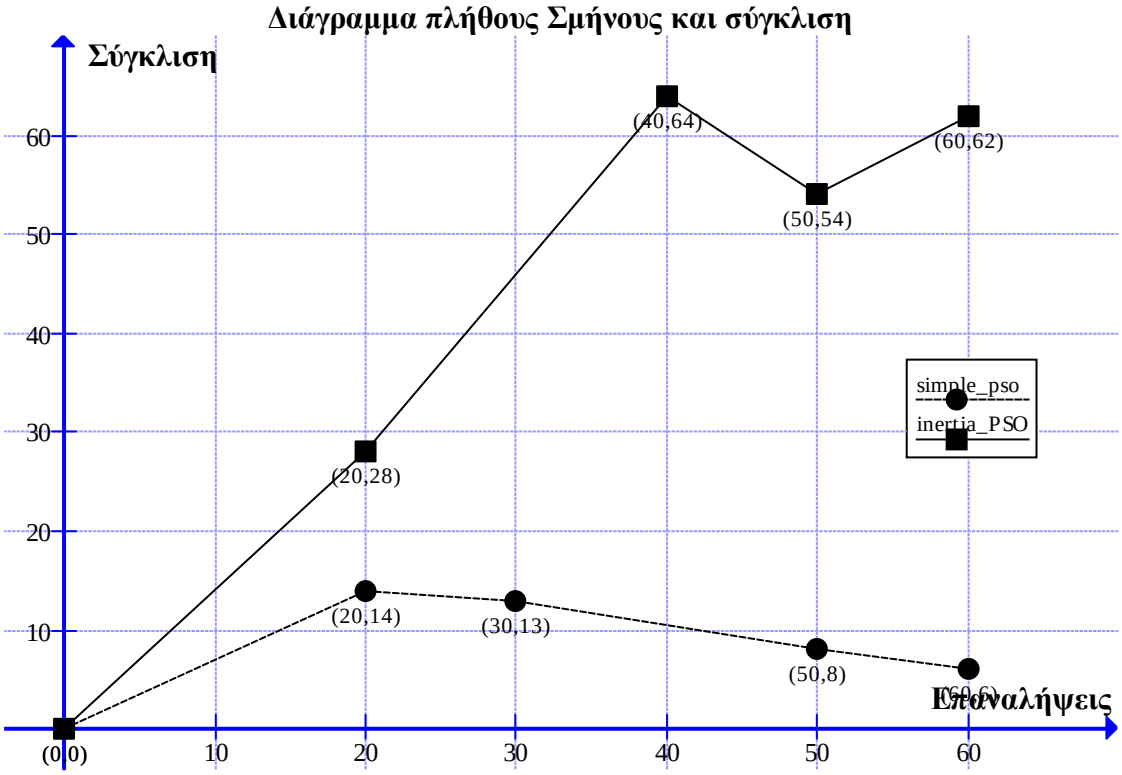
```
-------------------------ID of the chosen Devices-----------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 7.00
Distance between rows: 2.70 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 12.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.53 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 292819.76 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2714969.16
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:5172218.56
Payback Period: 8.50 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.19 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για πλήθος σμήνους 30

```
-------------------------ID of the chosen Devices---------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA---------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 7.00
Distance between rows: 2.70 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 12.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.53 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 292819.76 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2714969.16
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:5172218.56
Payback Period: 8.50 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.20 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για πλήθος σμήνους 40

Πίνακας 10.7 Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για διαφορετικό πλήθους σμήνους		
Πλήθος Σμήνους	**Κέρδος**	**Σύγκλιση**
20	292819.99	28
30	292819.99	72
40	292819.99	64
50	292819.99	54
60	292819.99	62



Σχήμα 10.2: Διακύμανση της σύγκλισης στο βέλτιστο σε σχέση με τον αριθμό πλήθους σμήνους.

Πίνακες αποτελεσμάτων για διαφορετικό Vmax για την simple PSO, αριθμό επαναλήψεων 400 και πλήθος σμήνους 20.

```
-------------------------ID of the chosen Devices----------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA-----------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 4.00
Distance between rows: 2.95 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 21.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 91.71 meters
Pv module inclinations: 5
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 289026.13 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2693788.32
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 186945.23 kWh
Energy Profits:5125057.09
Payback Period: 8.50 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.21 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για Vmax 0.01

```
-------------------------ID of the chosen Devices-------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA--------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 3.00
Distance between rows: 6.52 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 29.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.32 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 291277.51 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2725531.25
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:5172218.56
Payback Period: 8.50 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.22 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για Vmax 0.05

```
-------------------------ID of the chosen Devices------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA-------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 7.00
Distance between rows: 2.70 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 12.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.53 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 292819.76 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2714969.16
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:5172218.56
Payback Period: 8.50 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.23 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για Vmax 0.2

Πίνακας 10.8 Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για διαφορετικά Vmax

Vmax	**Κέρδος**	**Σύγκλιση**
0.01	289026.35	30
0.05	291277.74	14
0.1	292819.99	130
0.2	292819.99	8
0.3	292819.99	22
0.4	292819.99	36
0.5	292819.99	82

Πίνακες αποτελεσμάτων για διαφορετικό Vmax για την inertia PSO, αρχικό inertia weight 0.9, αριθμός επαναλήψεων 400 και πλήθος σμήνους 20.

```
-------------------------ID of the chosen Devices----------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA-----------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 5.00
Distance between rows: 2.87 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 17.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 95.16 meters
Pv module inclinations: 6
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 290943.93 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2697235.98
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 187550.08 kWh
Energy Profits:5141638.80
Payback Period: 8.50 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.24 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για Vmax 0.01

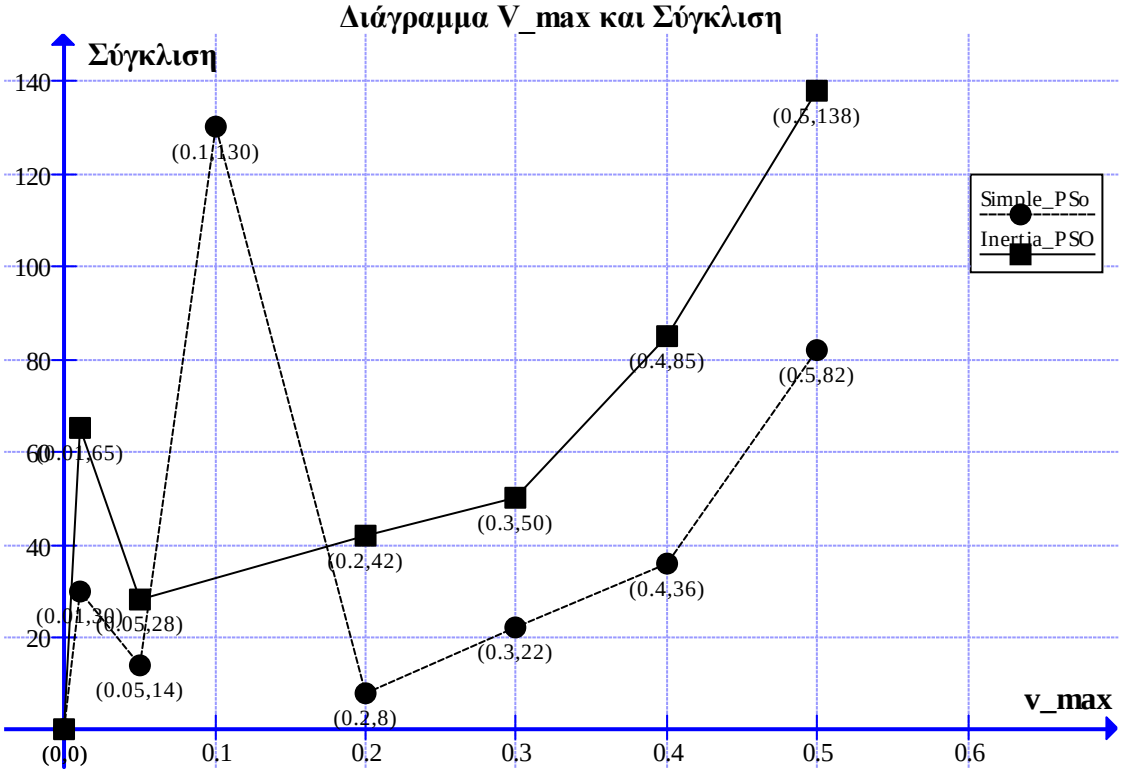
```
-------------------------ID of the chosen Devices-------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA-------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 7.00
Distance between rows: 2.70 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 12.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.53 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 292819.76 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2714969.16
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:5172218.56
Payback Period: 8.50 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.25 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για Vmax 0.05

```
-------------------------ID of the chosen Devices----------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA----------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 1.00
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 83.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 82.17 meters
Pv module inclinations: 0
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 281100.07 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2651620.28
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 183427.07 kWh
Energy Profits:5028607.61
Payback Period: 8.60 years
Internal Rate of Return: 0.17
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.26 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για Vmax 0.2

Πίνακας 10.9 Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για διαφορετικά Vmax		
Vmax	**Κέρδος**	**Σύγκλιση**
0.01	290943.93	65
0.05	292819.99	28
0.1	292819.99	180
0.2	281100.29	42
0.3	281100.29	50
0.4	281553.51	85
0.5	281553.51	138



Σχήμα 10.3: Διακύμανση της σύγκλισης στο βέλτιστο σε σχέση με το Vmax.

10.2.2 Συγκριτικά αποτελέσματα για τους Γενετικούς Αλγορίθμους με την simple PSO και την inertia PSO με αλλαγές σε συγκεκριμένη παράμετρο.

Διαθέσιμη Έκταση:

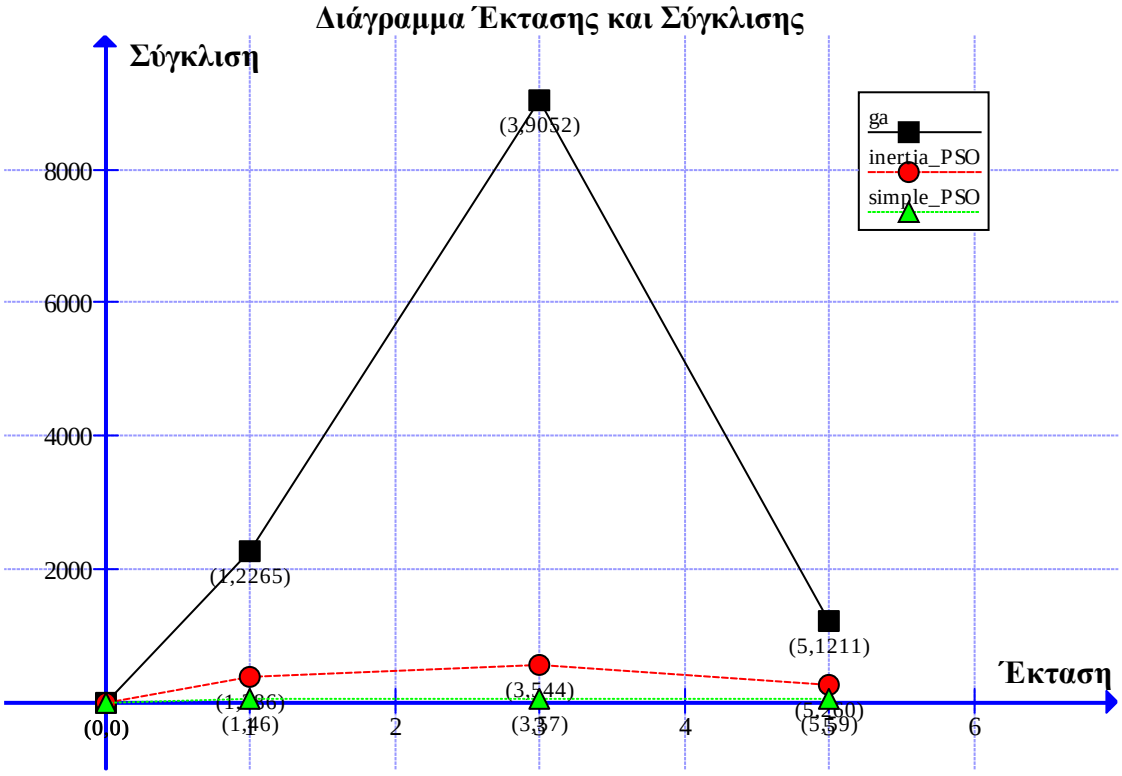
Παρουσίαση αποτελεσμάτων για διάφορες τιμές της προς εκμετάλλευσης έκτασης ($1000\,m^2$,$3000\,m^2$,$5000\,m^2$) με τις υπόλοιπες παραμέτρους να έχουν τις παρακάτω τιμές:

- κόστος γης 0 euro ανά τετραγωνικό μέτρο
- επιδότηση εγκατάστασης 30%
- φορολογία επί των κερδών 25%
- αριθμός επαναλήψεων 1000
- πλήθος σμήνους 30
- Vmax για την simple PSO=0.2
- Vmax για την inertia PSO=0.05

Πίνακας 10.10: Συγκριτικά αποτελέσματα για έκταση 1 στρέμματος			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	413555.03 Euros	413554.70 Euros	413554.70 Euros
Σύγκλιση	2265	386	46

Πίνακας 10.11: Συγκριτικά αποτελέσματα για έκταση 3 στρεμμάτων			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	1322668.33 Euros	1325777.63 Euros	1308552.61 Euros
Σύγκλιση	9052	544	57

Πίνακας 10.12: Συγκριτικά αποτελέσματα για έκταση 5 στρεμμάτων			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	2191124.84 Euros	2144451.75 Euros	2167596.54 Euros
Σύγκλιση	1211	260	59



Σχήμα 10.4: Διακύμανση της σύγκλισης στο βέλτιστο σε σχέση με την διαθέσιμη έκταση.

Κόστος Έκτασης ανά τετραγωνικό μέτρο:

Παρουσίαση αποτελεσμάτων για διάφορες τιμές κόστους αγοράς ανά τετραγωνικό μέτρο(0 euro, 30 euro, 50 euro, 100 euro) με τις υπόλοιπες παραμέτρους να έχουν τις παρακάτω τιμές:

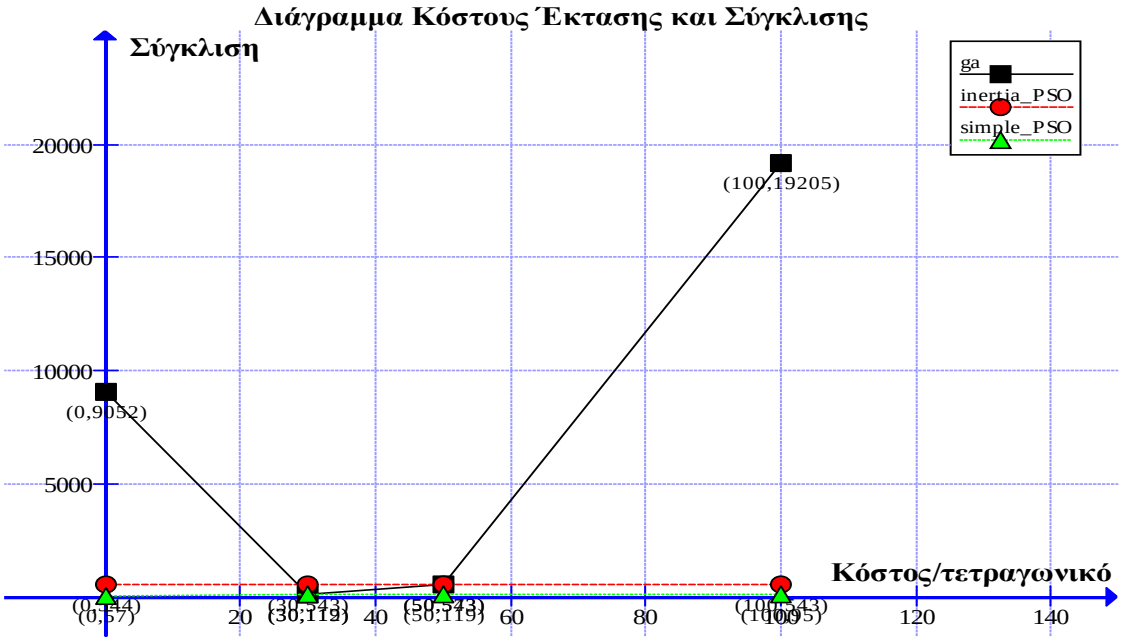
- Έκταση προς εκμετάλλευσης γης 3000 m^2
- επιδότηση εγκατάστασης 30%
- φορολογία επί των κερδών 25%
- αριθμός επαναλήψεων 1000
- πλήθος σμήνους 30
- Vmax για την simple PSO=0.2
- Vmax για την inertia PSO=0.05

Πίνακας 10.13: Σύγκριση για κόστος έκτασης 0 euro ανά τετραγωνικό			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	1322668.33 Euros	1325777.63 Euros	1308552.61 Euros
Σύγκλιση	9052	544	57

Πίνακας 10.14: Σύγκριση για κόστος έκτασης 30 euro ανά τετραγωνικό			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	1260845.93 Euros	1263562.24 Euros	1246251.84 Euros
Σύγκλιση	112	543	119

Πίνακας 10.15: Σύγκριση για κόστος έκτασης 50 euro ανά τετραγωνικό			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	1222047.22 Euros	1222085.32 Euros	1204717.99 Euros
Σύγκλιση	573	543	119

Πίνακας 10.16: Σύγκριση για κόστος έκτασης 100 euro ανά τετραγωνικό			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	1118465.46 Euros	1118464.56 Euros	1100883.37 Euros
Σύγκλιση	19205	543	95



Σχήμα 10.5: Διακύμανση της σύγκλισης στο βέλτιστο σε σχέση με το κόστος έκτασης ανά τετραγωνικό.

Ύψος Επιδότησης:

Παρουσίαση αποτελεσμάτων για διάφορα ποσοστά επιδότησης εγκατάστασης (0%, 30%, 40%, 50%) με τις υπόλοιπες παραμέτρους να έχουν τις παρακάτω τιμές:

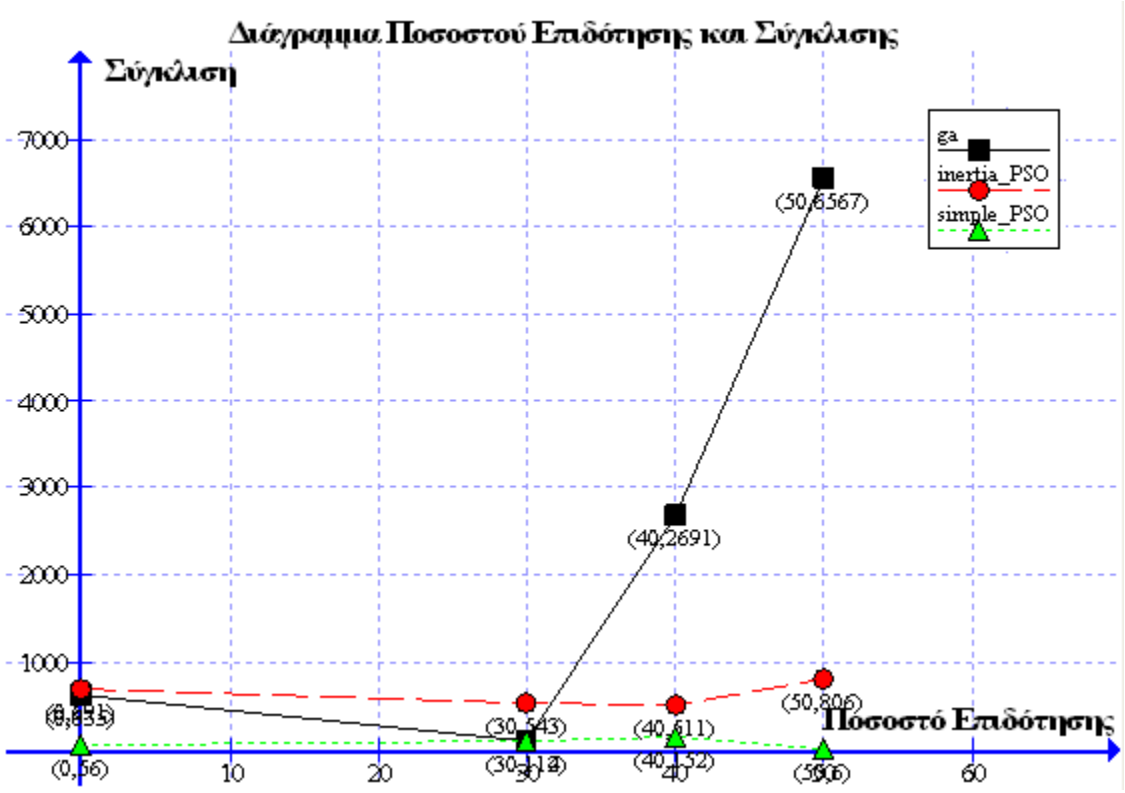
- Έκταση προς εκμετάλλευσης γης 3000 m^2
- Κόστος ανά τετραγωνικό 30 euro
- φορολογία επί των κερδών 25%
- αριθμός επαναλήψεων 1000
- πλήθος σμήνους 30
- Vmax για την simple PSO=0.2
- Vmax για την inertia PSO=0.05

Πίνακας 10.17: Συγκριτικά αποτελέσματα για επιδότηση εγκατάστασης 0%			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	761215.19 Euros	761214.58 Euros	757887.16 Euros
Σύγκλιση	635	691	56

Πίνακας 10.18: Συγκριτικά αποτελέσματα για επιδότηση εγκατάστασης 30%			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	1260845.93 Euros	1263562.24 Euros	1246251.84 Euros
Σύγκλιση	112	543	114

Πίνακας 10.19: Συγκριτικά αποτελέσματα για επιδότηση εγκατάστασης 40%			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	1246251.84 Euros	1432473.73 Euros	1432473.73 Euros
Σύγκλιση	2691	511	152

Πίνακας 10.20: Συγκριτικά αποτελέσματα για επιδότηση εγκατάστασης 50%			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	1615698.99 Euros	1623884.64 Euros	1615697.69 Euros
Σύγκλιση	6567	806	6



Σχήμα 10.6: Διακύμανση της σύγκλισης στο βέλτιστο σε σχέση με το ποσοστό επιδότησης .

Ύψος Φορολογίας:

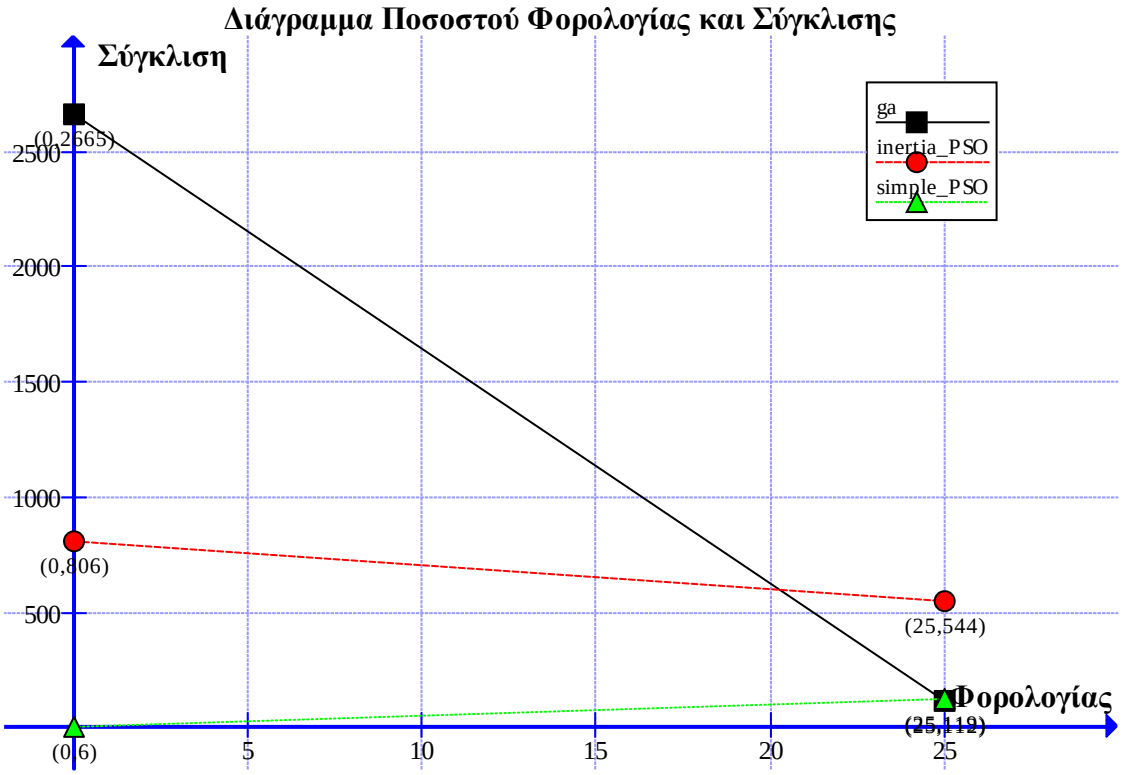
Παρουσίαση αποτελεσμάτων για διάφορα ποσοστά φορολογίας επί των καθαρών κερδών (0%, 25%) με τις υπόλοιπες παραμέτρους να έχουν τις παρακάτω τιμές:

- Έκταση προς εκμετάλλευσης γης 3000 m^2
- Επιδότηση εγκατάστασης 30%
- Κόστος αγοράς ανά τετραγωνικό μέτρο 30 euro

- Αριθμός επαναλήψεων 1000
- Πλήθος σμήνους 30
- Vmax για την simple PSO=0.2
- Vmax για την inertia PSO=0.05

Πίνακας 10.21: Συγκριτικά αποτελέσματα για 0% φορολογία επί των κερδών			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	2177595.33 Euros	2185689.16 Euros	2173758.58 Euros
Σύγκλιση	2665	806	6

Πίνακας 10.22: Συγκριτικά αποτελέσματα για 25% φορολογία επί των κερδών			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	1260845.93 Euros	1263562.24 Euros	1246251.84 Euros
Σύγκλιση	112	544	119



Σχήμα 10.7: Διακύμανση της σύγκλισης στο βέλτιστο σε σχέση με το ποσοστό φορολογίας επί των καθαρών κερδών.

10.2.3 Συγκριτικά αποτελέσματα για τους Γενετικούς Αλγορίθμους με την simple PSO και την inertia PSO με αλλαγές σε διάφορους συνδυασμούς.

Πίνακες αποτελεσμάτων για φορολογία 0% και κόστος αγοράς 0 euro/m^2 για έκταση 1000 m^2

```
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA----------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 7.00
Distance between rows: 2.70 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 12.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.53 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 544565.50 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2714969.16
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:6896291.41
Payback Period: 5.70 years
Internal Rate of Return: 0.23
======================Next Result:
-------------------------ID of the chosen Devices---------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
```

```
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA----------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 7.00
Distance between rows: 2.70 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 12.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.53 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 544565.06 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2714969.16
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:6896291.41
Payback Period: 5.70 years
Internal Rate of Return: 0.23
======================Next Result:
-------------------------ID of the chosen Devices---------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt
```

```
-------------------------OUTPUT_DATA--------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 7.00
Distance between rows: 2.70 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 12.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.53 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 544565.06 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2714969.16
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:6896291.41
Payback Period: 5.70 years
Internal Rate of Return: 0.23
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.27 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για ga, inertia PSO, simple PSO με παραμέτρους 0% φορολογία και κόστους έκτασης 0 euro για 2 στρέμματα.

Πίνακας 10.23: Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για 1 στρέμμα			
	ga	inertia pso	Pso
Κέρδος	544565.50 Euros	544565.06 Euros	544565.06 Euros
Σύγκλιση	3787	338	41

Πίνακες αποτελεσμάτων για 0% επιδότηση, κόστος 0 euro/ m^2 , φορολογία 0% και εμβαδόν έκτασης 2000 m^2

```
-------------------------ID of the chosen Devices----------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA-----------------------------
Number of pv modules :  1512.00
Number of inverters :  42
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 1.00
Number of pv modules in one line of a row: 15
Number of lines in a row: 101.00
Final southern dimension of land: 19.35 meters
Final western dimension of land: 99.02 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 42 of the 42 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 1457753.53 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 30.00

Price per kWh: 0.45
Years: 25
Installation Cost:5799460.53
Maintenance Cost:1052339.07
Total Energy produced every year: 495247.01 kWh
Energy Profits:16292488.46
Payback Period: 5.10 years
Internal Rate of Return: 0.25
======================Next Result:
```

```
-------------------------ID of the chosen Devices-----------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA------------------------------
Number of pv modules :  1512.00
Number of inverters :  42
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 1.00
Number of pv modules in one line of a row: 15
Number of lines in a row: 101.00
Final southern dimension of land: 19.35 meters
Final western dimension of land: 99.61 meters
Pv module inclinations: 5
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 42 of the 42 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 1457781.04 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 30.00

Price per kWh: 0.45
Years: 25
Installation Cost:5586953.29
Maintenance Cost:1052339.07
Total Energy produced every year: 490731.23 kWh
Energy Profits:16143929.82
Payback Period: 4.90 years
Internal Rate of Return: 0.26
======================Next Result:
```

```
-------------------------ID of the chosen Devices-----------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA------------------------------
Number of pv modules :  1476.00
Number of inverters :  41
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 3.00
Distance between rows: 0.00 meters
Number of pv modules in one line of a row: 15
Number of lines in a row: 33.00
Final southern dimension of land: 19.35 meters
Final western dimension of land: 98.01 meters
Pv module inclinations: 0
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 41 of the 41 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 1400489.31 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 30.00

Price per kWh: 0.45
Years: 25
Installation Cost:5248552.53
Maintenance Cost:1027283.38
Total Energy produced every year: 470031.87 kWh
Energy Profits:15462968.41
Payback Period: 4.80 years
Internal Rate of Return: 0.27
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.28 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για ga, inertia PSO, simple PSO με παραμέτρους 0% φορολογία και κόστους έκτασης 0 euro για 2 στρέμματα.

Πίνακας 10.24: Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για 2 στρέμματα			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	1457753.53	1457781.04 Euros	1400489.31 Euros
Σύγκλιση	194	509	123

Πίνακες αποτελεσμάτων για 0% επιδότηση, κόστος 30 euro/m^2, φορολογία 0% και εμβαδόν έκτασης 1000 m^2

```
-------------------------ID of the chosen Devices-----------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA------------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 7.00
Distance between rows: 2.70 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 12.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.53 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 517874.46  Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2897762.09
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:6896291.41
Payback Period: 6.20 years
Internal Rate of Return: 0.22
======================Next Result:
```

```
-------------------------ID of the chosen Devices-------------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA-----------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 7.00
Distance between rows: 2.70 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 12.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.53 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 517874.05 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2897762.09
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:6896291.41
Payback Period: 6.20 years
Internal Rate of Return: 0.22
======================Next Result:
```

```
=====================Next Result:
-------------------------ID of the chosen Devices-----------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA------------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 7.00
Distance between rows: 2.70 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 12.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.53 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 517874.05 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2897762.09
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:6896291.41
Payback Period: 6.20 years
Internal Rate of Return: 0.22
=====================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.29 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για ga, inertia PSO, simple PSO με παραμέτρους 0% φορολογία, 0% επιδότηση και κόστους έκτασης 30 euro για 1 στρέμμα.

Πίνακας 10.25: Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για 2 στρέμματα			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	517874.46 Euros	517874.05 Euros	517874.05 Euros
Σύγκλιση	781	172	637

Πίνακες αποτελεσμάτων για 0% επιδότηση, κόστος 30 euro/m^2, φορολογία 25% και εμβαδόν έκτασης 1000 m^2

```
-------------------------ID of the chosen Devices-----------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA------------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 7.00
Distance between rows: 2.70 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 12.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.53 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 266128.74 Euros
==========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2897762.09
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:5172218.56
Payback Period: 9.30 years
Internal Rate of Return: 0.16
======================Next Result:
```

```
-------------------------ID of the chosen Devices-----------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA------------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 7.00
Distance between rows: 2.70 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 12.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.53 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 273573.87 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2897762.09
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:5172218.56
Payback Period: 9.30 years
Internal Rate of Return: 0.16
======================Next Result:
```

```
-------------------------ID of the chosen Devices-----------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA------------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 3.00
Distance between rows: 6.52 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 29.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.32 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 264641.84 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2907945.09
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:5172218.56
Payback Period: 9.40 years
Internal Rate of Return: 0.16
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.30 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για ga, inertia PSO, simple PSO με παραμέτρους 25% φορολογία, 0% επιδότηση και κόστους έκτασης 30 euro για 1 στρέμμα.

Πίνακας 10.26: Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για 1 στρέμμα			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	266128.96 Euros	266128.74 Euros	266128.74 Euros
Σύγκλιση	3074	188	11

Πίνακες αποτελεσμάτων για 0% επιδότηση, κόστος 40 euro/m^2, φορολογία 25% και εμβαδόν έκτασης 1000 m^2

```
-------------------------ID of the chosen Devices-----------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA------------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 7.00
Distance between rows: 2.70 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 12.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.53 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 257231.94 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2958693.07
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:5172218.56
Payback Period: 9.60 years
Internal Rate of Return: 0.15
======================Next Result:
```

```
-------------------------ID of the chosen Devices-----------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA------------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 7.00
Distance between rows: 2.70 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 12.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 98.53 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 257231.74 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2958693.07
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:5172218.56
Payback Period: 9.60 years
Internal Rate of Return: 0.15
======================Next Result:
```

```
-------------------------ID of the chosen Devices-----------------
Pv module: 1 in pvmodules.txt
Inverter:  2 in inverters.txt

-------------------------OUTPUT_DATA------------------------------
Number of pv modules :  576.00
Number of inverters :  16
Arrangement of pv modules in the given land :
Number of rows: 3.00
Distance between rows: 6.29 meters
Number of pv modules in one line of a row: 7
Number of lines in a row: 28.00
Final southern dimension of land: 9.03 meters
Final western dimension of land: 94.93 meters
Pv module inclinations: 8
Arrangement of pv modules on the inverters :

On 16 of the 16 inverters :
Number of pv modules connected in series : 18
Number of branches connected in parallel : 2
NPV: 256046.93 Euros
=========================================================
Subsidization percent: 0.00

Price per kWh: 0.50
Years: 25
Installation Cost:2966807.18
Maintenance Cost:400891.08
Total Energy produced every year: 188665.53 kWh
Energy Profits:5172218.56
Payback Period: 9.70 years
Internal Rate of Return: 0.15
======================Next Result:
```

Αποτέλεσμα 10.31 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για ga, inertia PSO, simple PSO με παραμέτρους 25% φορολογία, 0% επιδότηση και κόστους έκτασης 40 euro για 1 στρέμμα.

Πίνακας 10.27: Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για 1 στρέμμα			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	257231.94 Euros	257231.74 Euros	256046.93 Euros
Σύγκλιση	613	350	11

Πίνακες αποτελεσμάτων για 0% επιδότηση, κόστος 70 euro/m^2, φορολογία 25% και εμβαδόν έκτασης 1000 m^2

Πίνακας 10.28: Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για 1 στρέμμα			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	234201.60 Euros	234201.59 Euros	231445.04 Euros
Σύγκλιση	890	340	25

Πίνακες αποτελεσμάτων για 0% επιδότηση και εμβαδόν έκτασης 1 στρέμμα

Πίνακας 10.29: Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για 1 στρέμμα			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	292820.00	292819.76	291277.51
Σύγκλιση	4478	28	14

Πίνακες αποτελεσμάτων για 30% επιδότηση και εμβαδόν έκτασης 1 στρέμμα

Πίνακας 10.30: Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για 1 στρέμμα			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	413555.03 Euros	413554.70 Euros	413554.70
Σύγκλιση	3720	142	12

Πίνακες αποτελεσμάτων για 30% επιδότηση και εμβαδόν έκτασης 2 στρέμματα

Πίνακας 10.31: Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για 2 στρέμμα			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	870349.95 Euros	870408.24 Euros	836252.92 Euros
Σύγκλιση	2078	122	12

Για τον inertia PSO τα αποτελέσματα του υστερούσαν για τις επιλεγμένες τιμές παραμέτρων λόγω της μεγάλης έκτασης και επιλέχθηκαν άλλες τιμές για το Vmax=0.2(αντί για 0.05) και αριθμός επαναλήψεων 1000(αντί για 400) και πράγματι παρατηρήθηκε βελτίωση.

Πίνακες αποτελεσμάτων για 0% επιδότηση και εμβαδόν έκτασης 2 στρέμματα

Πίνακας 10.32: Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για 2 στρέμμα			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	558417.36 Euros	558416.91 Euros	539339.06 Euros
Σύγκλιση	17537	205	40

Πίνακες αποτελεσμάτων για 0% επιδότηση και εμβαδόν έκτασης 10 στρέμματα

Πίνακας 10.33: Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για 10 στρέμματα			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	2294140.36 Euros	2294138.51 Euros	2294138.51 Euros
Σύγκλιση	3877	359	40

Πίνακες αποτελεσμάτων για 30% επιδότηση και εμβαδόν έκτασης 10 στρέμματα

Πίνακας 10.34: Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για 10 στρέμματα			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	3536766.01 Euros	3454530.20 Euros	3552048.79 Euros
Σύγκλιση	4028	378	33

Για τον inertia PSO τα αποτελέσματα του υστερούσαν για τις επιλεγμένες τιμές παραμέτρων λόγω της μεγάλης έκτασης και επιλέχθηκαν άλλες τιμές για το Vmax=0.2(αντί για 0.05) και αριθμός επαναλήψεων 1000(αντί για 400) και πράγματι παρατηρήθηκε βελτίωση.

Πίνακες αποτελεσμάτων για 30% επιδότηση και εμβαδόν έκτασης 10 στρέμματα

Πίνακας 10.35: Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για 10 στρέμματα			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	3344903.79 Euros	3234790.45 Euros	3344901.10 Euros
Σύγκλιση	9612	175	22

Για τον inertia PSO τα αποτελέσματα του υστερούσαν για τις επιλεγμένες τιμές παραμέτρων λόγω της μεγάλης έκτασης και επιλέχθηκαν άλλες τιμές για το Vmax=0.2(αντί για 0.05) και αριθμός επαναλήψεων 1000(αντί για 400) και πράγματι παρατηρήθηκε βελτίωση.

Πίνακες αποτελεσμάτων για 30% επιδότηση και εμβαδόν έκτασης 1 στρέμμα, φορολογία 25% και κόστος έκτασης 30 euro/ m^2

Πίνακας 10.36: Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για 1 στρέμμα			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	394871.30 Euros	394870.98 Euros	392506.35 Euros
Σύγκλιση	497	202	21

Πίνακες αποτελεσμάτων για 30% επιδότηση και εμβαδόν έκτασης 1 στρέμμα και φορολογία 25% και κόστος έκτασης 40 euro/ m^2

Πίνακας 10.37: Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για 1 στρέμμα			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	388643.39 Euros	388643.08 Euros	386704.49 Euros
Σύγκλιση	1220	142	21

Πίνακες αποτελεσμάτων για 30% επιδότηση και εμβαδόν έκτασης 1 στρέμμα και φορολογία 25% και κόστος έκτασης 70 euro/ m^2

Πίνακας 10.38: Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για 1 στρέμμα			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	369959.66 Euros	369959.37 Euros	369811.68 Euros
Σύγκλιση	1829	157	11

Πίνακες αποτελεσμάτων για 40% επιδότηση και εμβαδόν έκτασης 5 στρέμματα και φορολογία 25% και κόστος έκτασης 40 euro/ m^2

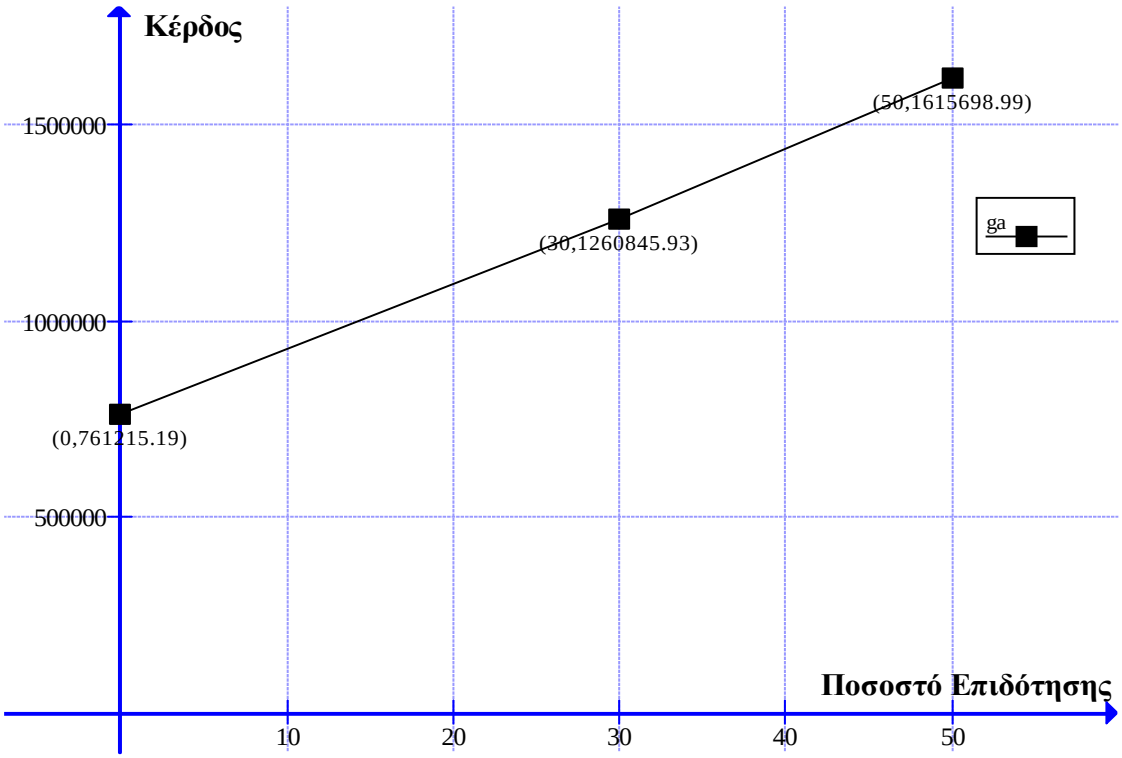
Πίνακας 10.39: Συγκριτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων για 5 στρέμματα			
	ga	inertia pso	pso
Κέρδος	2321308.81 Euros	2321306.95 Euros	2280988.15 Euros
Σύγκλιση	11733	218	13

Για τον inertia PSO τα αποτελέσματα του υστερούσαν για τις επιλεγμένες τιμές παραμέτρων λόγω της μεγάλης έκτασης και επιλέχθηκαν άλλες τιμές για το Vmax=0.2(αντί για 0.05) και αριθμός επαναλήψεων 1000(αντί για 400) και πράγματι παρατηρήθηκε βελτίωση.

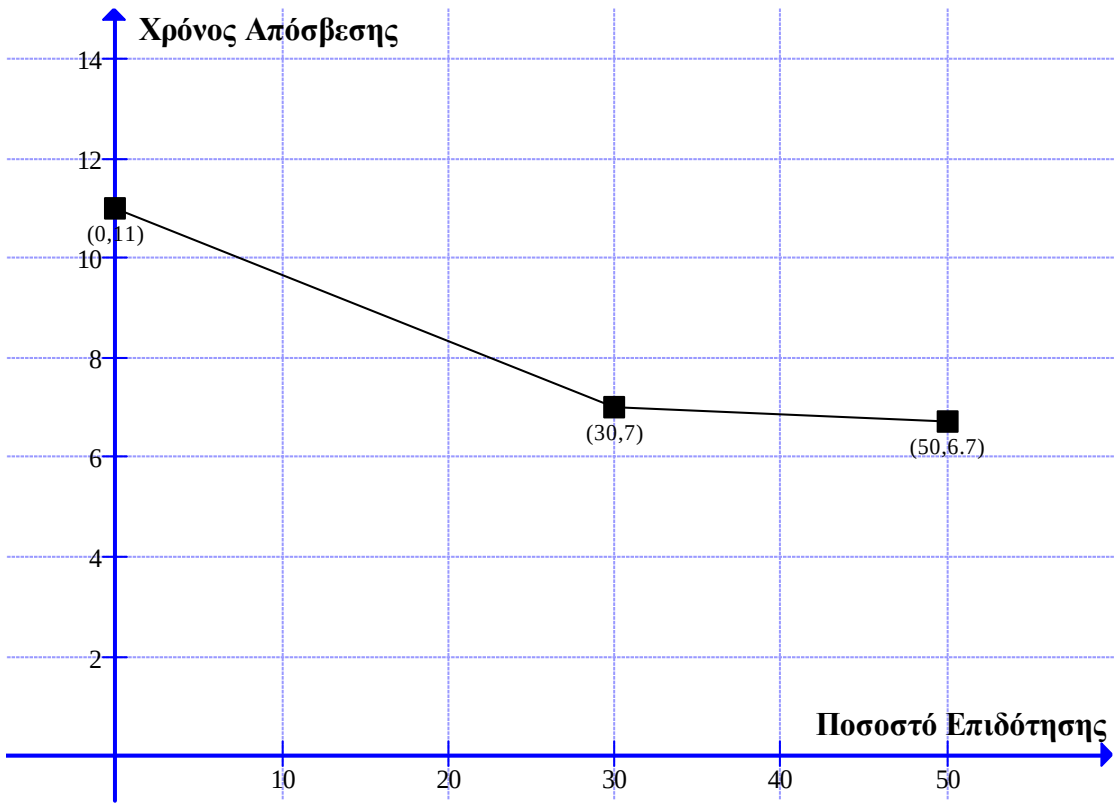
Όπως παρατηρήθηκε από τα παραπάνω αποτελέσματα το μεγαλύτερο μερίδιο από τα συνολικά έξοδα κατέχει το κόστος εγκατάστασης σε σχέση με τα έξοδα συντήρησης. Μία άλλη σημαντική παρατήρηση είναι πως σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται το σύνολο σχεδόν της διαθέσιμης προς εκμετάλλευσης έκτασης .

Στα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζεται η διακύμανση του καθαρού κέρδους , του χρόνου απόσβεσης και του εσωτερικού βαθμού απόδοσης σε σχέση με την τιμή επιδότησης για κάθε έναν από τους αλγορίθμους που εξετάστηκαν.

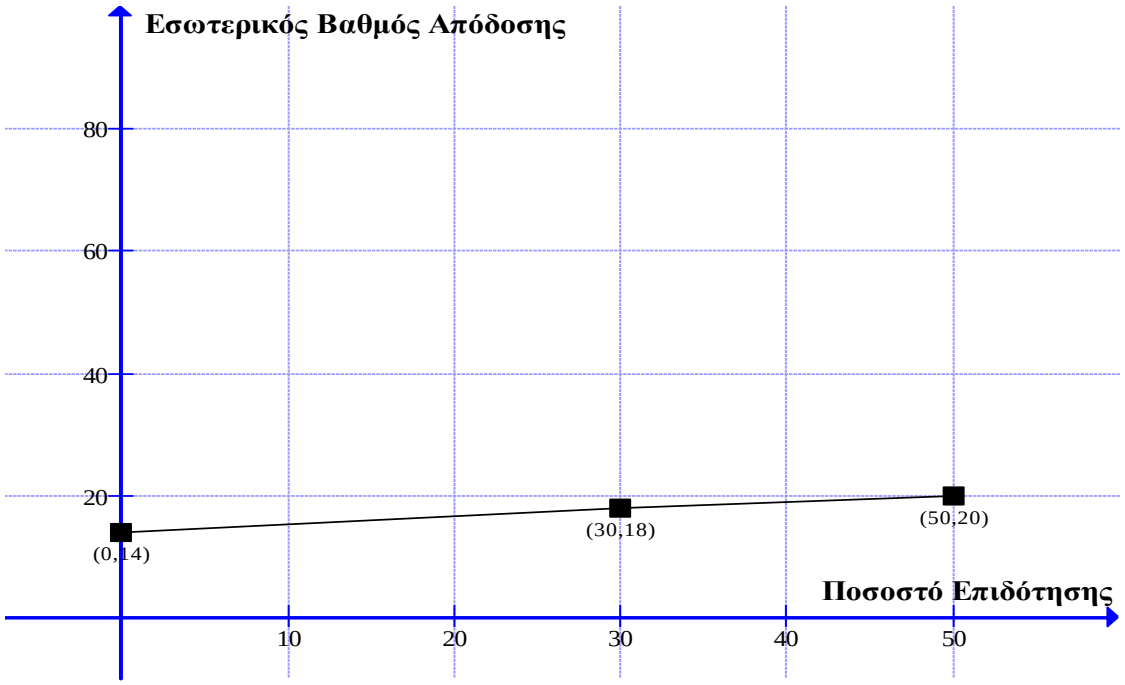
Γενετικοί αλγόριθμοι:



Σχήμα 10.8: Διακύμανση του κέρδους σε σχέση με το ποσοστό επιδότησης της εγκατάστασης.

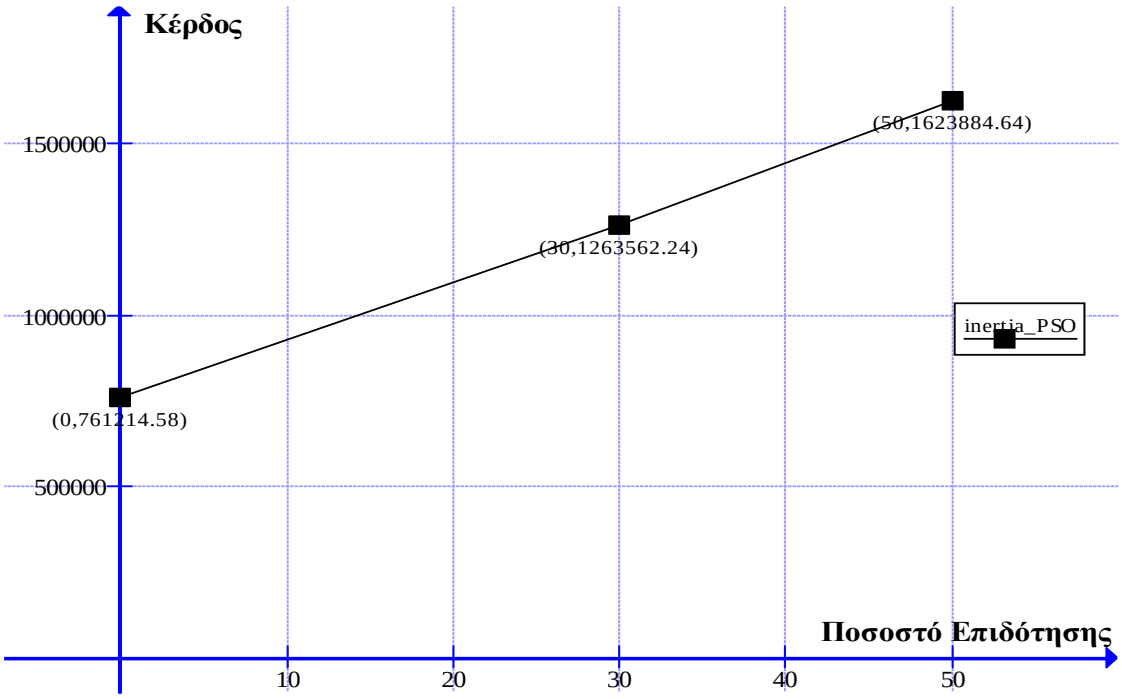


Σχήμα 10.9: Διακύμανση του χρόνου απόσβεσης σε σχέση με το ποσοστό επιδότησης της εγκατάστασης.

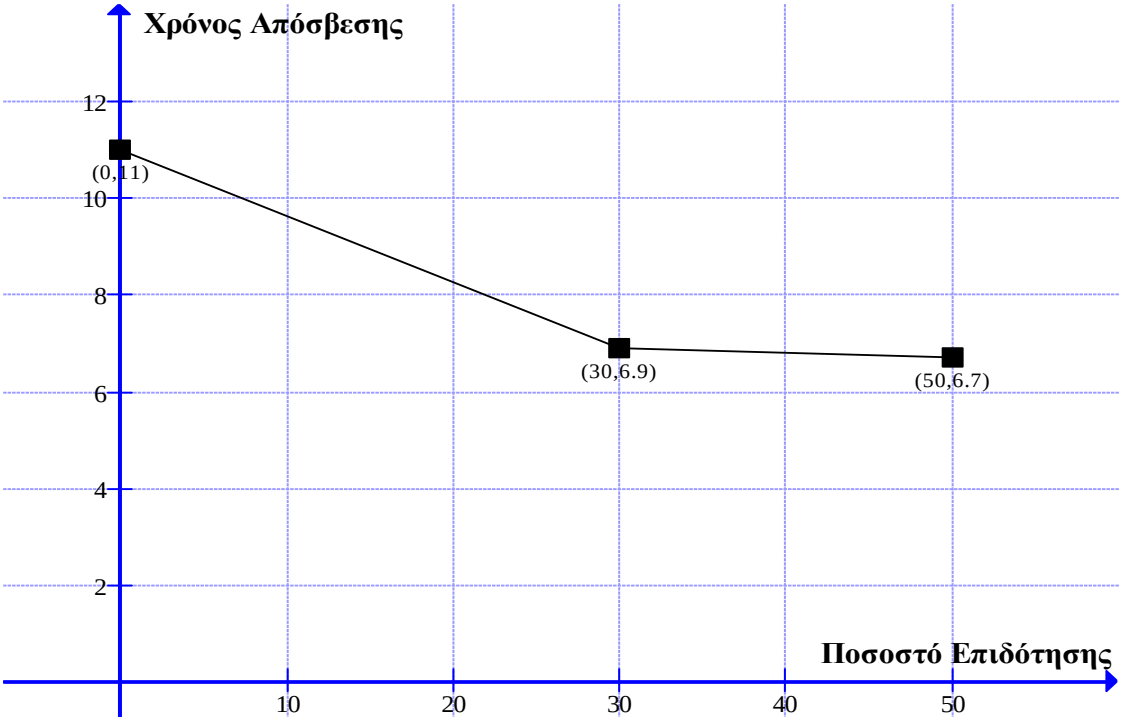


Σχήμα 10.10: Διακύμανση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης σε σχέση με το ποσοστό επιδότησης της εγκατάστασης.

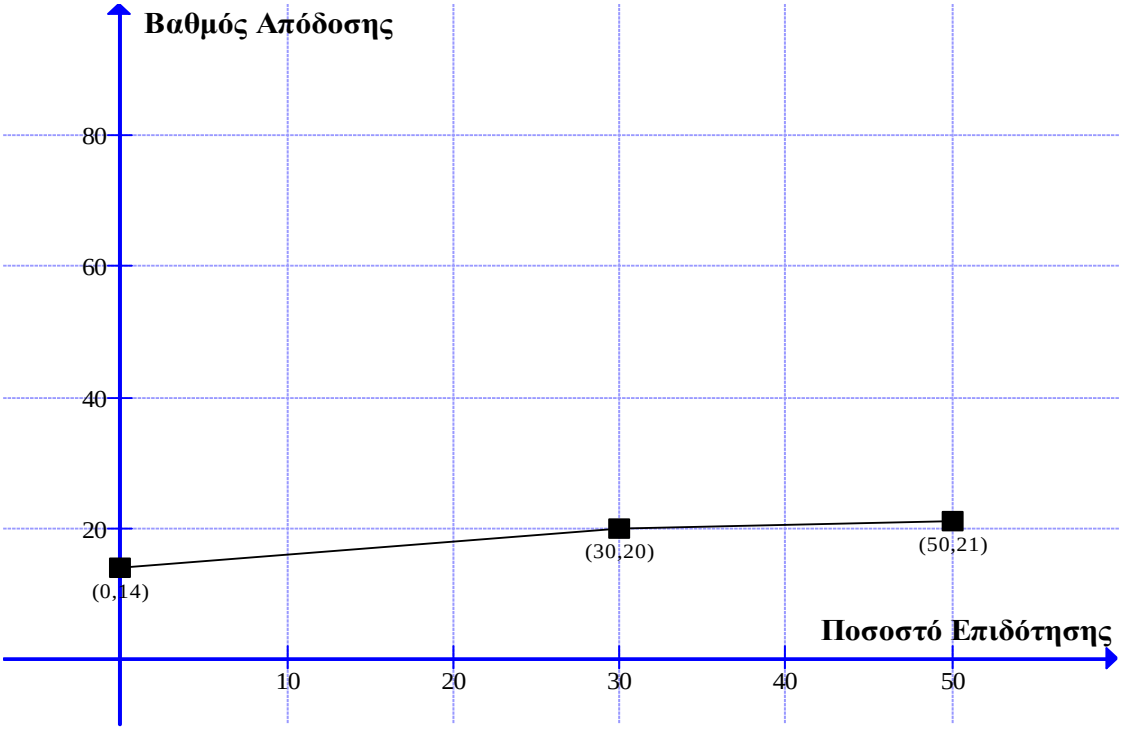
Inertia PSO:



Σχήμα 10.11: Διακύμανση του κέρδους σε σχέση με το ποσοστό επιδότησης της εγκατάστασης.

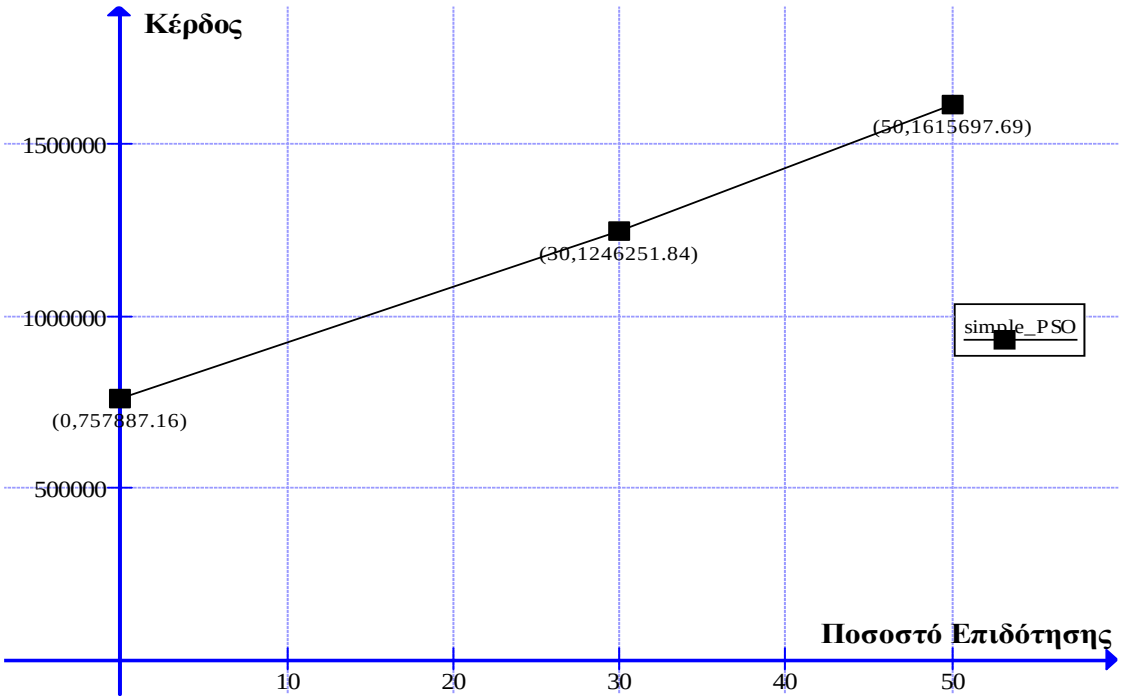


Σχήμα 10.12: Διακύμανση του χρόνου απόσβεσης σε σχέση με το ποσοστό επιδότησης της εγκατάστασης.

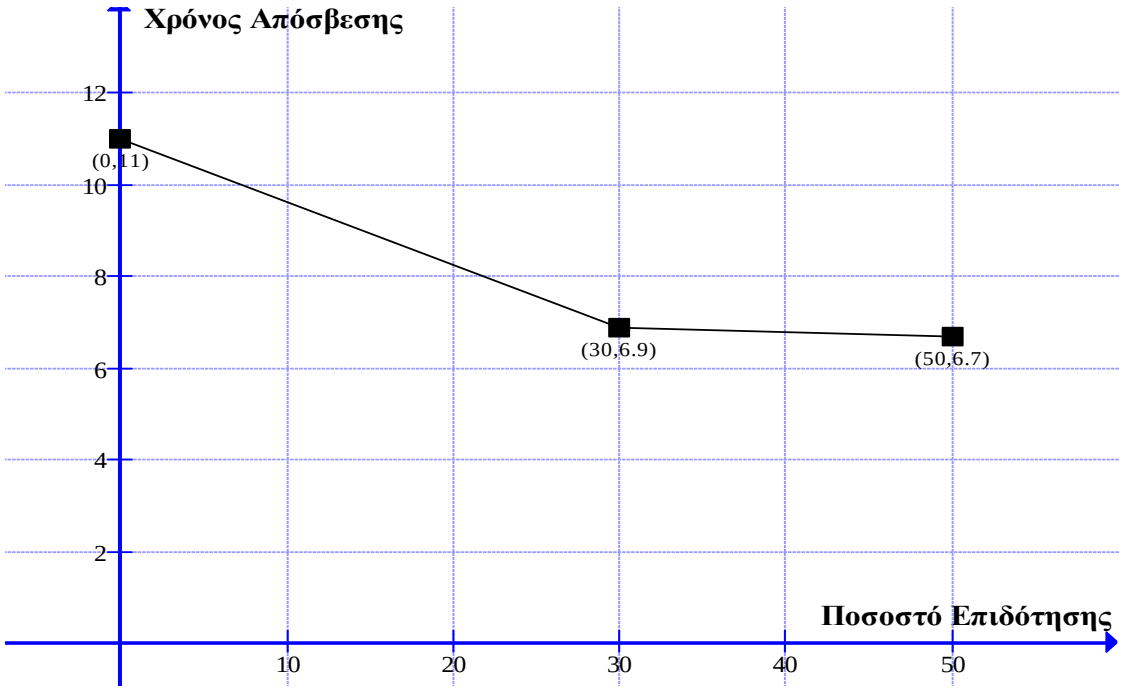


Σχήμα 10.12: Διακύμανση του βαθμού απόδοσης σε σχέση με το ποσοστό επιδότησης της εγκατάστασης.

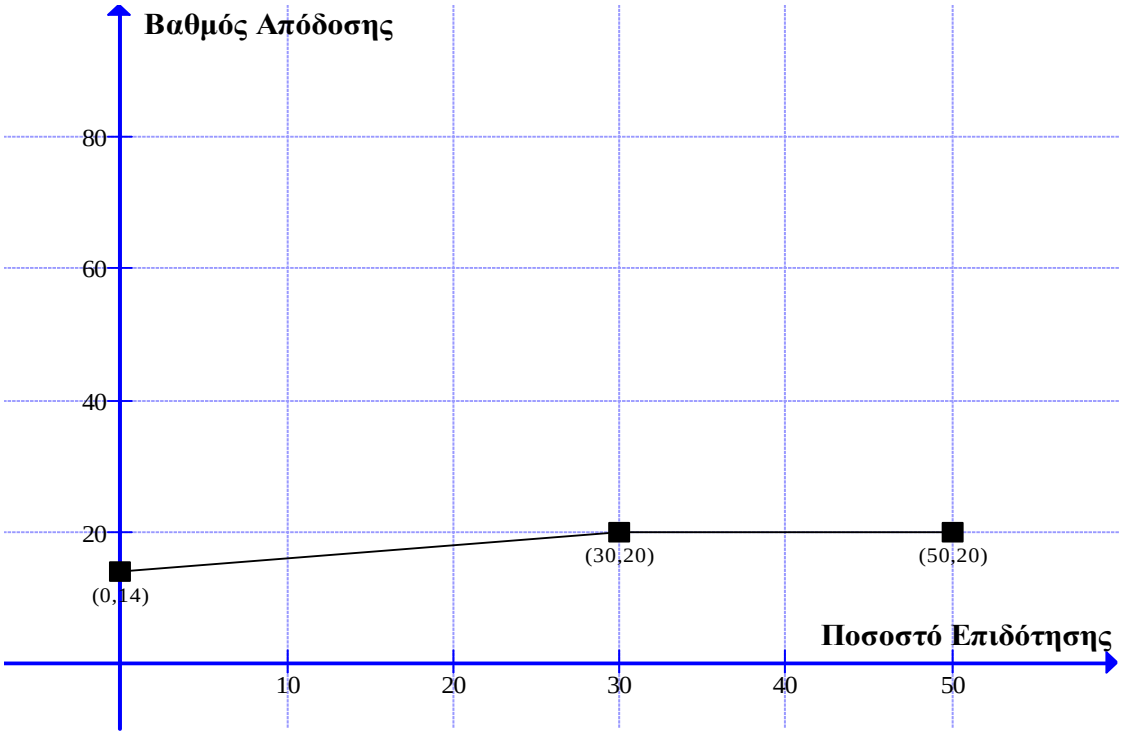
Simple PSO:



Σχήμα 10.13: Διακύμανση κέρδους σε σχέση με το ποσοστό επιδότησης της εγκατάστασης.



Σχήμα 10.14: Διακύμανση του χρόνου απόσβεσης σε σχέση με το ποσοστό επιδότησης της εγκατάστασης.



Σχήμα 10.15: Διακύμανση του βαθμού απόδοσης σε σχέση με το ποσοστό επιδότησης της εγκατάστασης.

11. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Η ανάγκη προώθησης των ΑΠΕ, δεν επιβάλλεται μόνο από λόγους περιβαλλοντικούς αλλά και οικονομικούς. Το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής είναι αναμφίβολα μια απειλή η οποία όμως προσφέρει και ευκαιρίες για την ανάδειξη νέων κλάδων παραγωγής ενέργειας φιλικότερους προς το περιβάλλον. Ένας από αυτούς είναι η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων. Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μια μέθοδος διαστασιολόγησης συστήματος Φ/Β στοιχείων για την παραγωγή ενέργειας και την παροχή της σε ηλεκτρικά δίκτυα, καθώς και οικονομικής αξιολόγησης της επένδυσης σε ένα τέτοιο σύστημα. Παράλληλα σκοπός της εργασίας αυτής είναι η αξιολόγηση δύο ευρέως διαδεδομένων αλγορίθμων, των Γενετικών και της Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων, που εφαρμόζονται για τον υπολογισμό της βέλτιστης διαστασιολόγησης Φ/Β στοιχείων.

Στα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο 10° κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκαν εμπορικά διαθέσιμα επιμέρους δομικά στοιχεία με τιμές κόστους που βρέθηκαν στην αγορά κατά τη εκπόνηση αυτής της εργασίας. Από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει ότι, βάσει αυτών των τιμών κόστους, τέτοιου είδους συστήματα έχουν επενδυτικό ενδιαφέρον, καθώς υπάρχει σχεδόν πάντοτε περιθώριο υψηλού κέρδους από αυτά. Σημαντικό ρόλο στο τελικό κέρδος έχει πάντα το κόστος αγοράς της έκτασης για την εγκατάστασή τους, το κόστος συσκευών του συστήματος, η φορολογία επί των καθαρών κερδών καθώς και η τυχόν επιδότηση για την εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος, παράμετροι που μπορούν να καθορίσουν κατά πόσο μία επένδυση είναι συμφέρουσα ή όχι.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η τελική κλίση των Φ/Β πλαισίων δεδομένης της άμεσης σχέσης της με το κόστος κατασκευής των βάσεων στήριξης σε συνδυασμό με το γεγονός ότι επηρεάζει την παραγόμενη ενέργεια. Από τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε ότι είναι προτιμότερες μικρές κλίσεις σε σχέση με αυτή του γεωγραφικού πλάτους της περιοχής, που χρησιμοποιείται συνήθως για τη μέγιστη παραγωγή ενέργειας κατά τη διάρκεια του έτους για την περιοχή αυτή, αλλά και λόγω του υψηλότερου κόστους κατασκευής των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων στις μεγαλύτερες κλίσεις.

Ενδιαφέρον, επίσης, έχει ο τρόπος διάταξης των πλαισίων σε στήλες στην έκταση της εγκατάστασης σε συνδυασμό και με την κλίση των πλαισίων, δεδομένου ότι στην παρούσα εργασία λαμβάνεται υπόψη και ο παράγοντας της σκίασης μεταξύ των στηλών. Έτσι, σε περιπτώσεις υψηλού κόστους αγοράς της έκτασης είναι προτιμότερη η διάταξη των πλαισίων σε μία στήλη έστω και σε μικρή κλίση, ενώ σε περιπτώσεις σχετικά χαμηλού κόστους της έκτασης είναι περισσότερο συμφέρουσα η διάταξη σε πολλαπλές στήλες.

Ο χρόνος απόσβεσης για τις βέλτιστες λύσεις εξαρτάται κατά πολύ από την επιδότηση και κυμαίνεται κατά μέσο όρο στα 8-11 χρόνια για ποσοστό μηδενικής επιδότησης με σημαντική μείωση όμως όσο το ποσοστό της επιδότησης αυξάνεται.

Όπως αναφέρθηκε όμως σκοπός παρούσας εργασίας δεν ήταν μόνο η διαστασιολόγηση των Φ/Β στοιχείων αλλά και να γίνει μία σύγκριση μεταξύ των γενετικών αλγορίθμων και της Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για το ποια παράγει καλύτερα αποτελέσματα για το συγκεκριμένο είδος προβλήματος. Όσον αφορά τα περιθώρια καθαρού κέρδους και οι γενετικοί αλγόριθμοι και η inertia PSO απέφεραν παρόμοια αποτελέσματα σε όλα τα σενάρια περιπτώσεων που προσομοιώθηκαν, με την inertia PSO όμως να υπερτερεί έστω και για λίγο των γενετικών αλγορίθμων στο σύνολο σχεδόν των περιπτώσεων. Αντίστοιχα η απλή ΒΣΣ, φαίνεται να υστερεί ελάχιστα στα περιθώρια καθαρού κέρδους σε σχέση με τους άλλους αλγορίθμους. Εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι σε περιπτώσεις πολύ μεγάλης έκτασης η απλή ΒΣΣ επέφερε τα καλύτερα αποτελέσματα και σε ορισμένες των περιπτώσεων με διάφορα σενάρια επιδότησης και κόστους έκτασης επρόκειτο για ουσιαστική οικονομική διαφορά. Παράλληλα στις περιπτώσεις με έκταση μεγαλύτερης των ενός, δύο στρεμμάτων παρατηρήθηκε πως η inertia PSO δεν επέφερε τα αναμενόμενα αποτελέσματα με τους άλλους δύο αλγορίθμους κάτι που οφειλόταν στην αρχική επιλογή των τιμών των παραμέτρων που την επηρεάζουν. Με την αναπροσαρμογή των τιμών των παραμέτρων που είχαν να κάνουν με το Vmax, το πλήθος επαναλήψεων και του πλήθους σμήνους επέφερε αντίστοιχα αποτελέσματα με τους δύο άλλους αλγορίθμους. Συμπερασματικά λοιπόν παρατηρείται πως η inertia PSO επιφέρει τα καλύτερα ποσοστά κέρδους, χρειάζεται όμως προσεχτική αναπροσαρμογή των τιμών των παραμέτρων που εισάγονται, ανάλογα με τις εκδοχές του εκάστοτε προβλήματος για να καταφέρει να φτάσει στον ολικό βέλτιστο, κάτι που όμως δε χρειάστηκε να γίνει με τους γενετικούς αλγορίθμους ούτε με την απλή PSO.

Το ουσιαστικό ενδιαφέρον παρουσιάστηκε στο πότε ο κάθε αλγόριθμος παρουσίαζε σύγκλιση στο ολικό βέλτιστο. Ο γενετικός αλγόριθμος στο σύνολο σχεδόν τον περιπτώσεων χρειαζόταν πολύ μεγάλο αριθμό επαναλήψεων (ελάχιστες φορές κάτω από τις 1000 επαναλήψεις ενώ κάποιες φορές μέχρι και 18000) για να επιφέρει σύγκλιση στο ολικό βέλτιστο σε σχέση με τις δύο εκδοχές της ΒΣΣ που υλοποιήθηκαν. Όσον αφορά τις δύο εκδοχές της ΒΣΣ, την απλή εκδοχή και την inertia PSO και οι δύο κατάφεραν να συγκλίνουν στο ολικό βέλτιστο σχετικά πολύ γρήγορα, με την απλή ΒΣΣ ωστόσο να υπερτερεί σημαντικά. Ενδεικτικά αναφέρεται πως σε ελάχιστες των περιπτώσεων η απλή ΒΣΣ χρειάστηκε πέραν των 150 επαναλήψεων για σύγκλιση στο βέλτιστο ενώ η inertia PSO κυμάνθηκε γύρω από τις 500 επαναλήψεις.

Συμπερασματικά λοιπόν παρατηρείται πως η inertia PSO υπερτερεί ελαφρώς στο συγκεκριμένο είδος προβλήματος σε σχέση με τους γενετικούς αλγορίθμους και την απλή εκδοχή της ΒΣΣ. Σε συνδυασμό με την απλότητα του αλγορίθμου της inertia PSO (πολλοί λίγες παράμετροι και σχετικά εύκολη υλοποίηση σε σχέση με τους γενετικούς), την καθιστά μία πολύ καλή λύση για προβλήματα βέλτιστης διαστασιολόγησης Φ/Β στοιχείων.

Μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας εργασίας θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν διάφορες επιμέρους βελτιώσεις. Τέτοιες βελτιώσεις θα μπορούσαν να σχετίζονται με τη μοντελοποίηση επιπλέον παραμέτρων σχετικά με την έκταση της εγκατάστασης όπως η εδαφική κλίση της, ο ενδεχόμενος διαφορετικός προσανατολισμός της, εκτός από τον προσανατολισμό στο Νότο όπως θεωρείται στην παρούσα εργασία, ή διάφοροι άλλοι τύποι σχημάτων της έκτασης πέραν του ορθογωνίου που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Επιπλέον, θα μπορούσε να διερευνηθεί και η συμπεριφορά διαφόρων άλλων νεότερων εκδοχών της Βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων για την παραγωγή ακόμα καλύτερων αποτελεσμάτων. Τέλος ενδιαφέρον παρουσιάζουν και παρόμοιες εφαρμογές για περιπτώσεις σχεδιασμού άλλων τύπων Φ/Β συστημάτων με διαφορετικές απαιτήσεις, όπως χαρακτηριστικά Φ/Β συστήματα διασυνδεμένα με κτίρια κ.λ.π.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Κ. Καγκαράκη, Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία, Εκδόσεις Συμμετρία, 1992.

[2] Eduardo Lorenzo, Solar Electricity - Engineering of photovoltaic Systems, Progensa, 1994.

[3] Δ. Λαμπρίδη, Π.Ντοκόπουλου, Γ.Παπαγιάννη, Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Ζήτη, 2007.

[4] Ι. Ψαρράς, Σημειώσεις του μαθήματος "Συστήματα Χρηματοοικονομικής Διοίκησης", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθήνα, 2008.

[5] Α. Παπαδόπουλου, Σημειώσεις του μαθήματος "Οικονομική Ανάλυση Ενεργειακών Συστημάτων", Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2002.

[6] Κ. Κυρηττόπουλου, Σημειώσεις του μαθήματος "Παίγνιο Επιχειρήσεων -Επιχειρηματικά Σχέδια", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθήνα, 2007.

[7] Α. Κυρίτσης, Ι. Κομπούγιας , Διερεύνηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών μονοφασικών μετατροπέων για την άμεση διασύνδεση φωτοβολταϊκών γεννητριών με το δίκτυο χαμηλής τάσης των αστικών περιοχών,Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών Πάτρας.

[8] Α. Κορνελάκης , Βελτιστοποίηση σχεδιασμού και αξιολόγηση συστήματος φωτοβολταϊκών στοιχείων για την παραγωγή ενέργειας σε ηλεκτρικά δίκτυα, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2008.

[9] Ι. Ρουτσόλιας, Επιδράσεις σκίασης και ρύπανσης στην ενεργειακά απόδοση Φωτοβολταϊκού Σταθμού,Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,2008.

[10] J. Appelbaum, J. Bany, Shadow Effect of Adjacent Solar Collectors in Large Scale Systems, Solar Energy, 23, 497-507, 1979.

[11] L. Keller, P. Affolter, Optimizing the panel area of a photovoltaic system in relation to the static inverter-practical results, Solar Energy, 55, 1995.

[12] J. Kennedy, R.C. Eberhart, Particle swarm optimization, Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, 1942–1948, 1995.

[13] R.C. Eberhart, P. Simpson, R. Dobbins, Computational intelligence PC tools, AP Professional, 212–226, 1996.

[14] Y. Shi, R.C Eberhart, A modified particle swarm optimizer, Proceedings of the IEEE international conference on evolutionary computation, 69–73, 1998.

[15] R.C Eberhart, Y. Shi, Comparing Inertia Weights and Constriction Factors in Particle Swarm Optimization, Proceedings of IEEE congress evolutionary computation, 84–88, 2000.

[16] M. Clerc, J. Kennedy, The particle swarm: explosion, stability and convergence in a multi-dimensional complex space, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 58–73, 2002.

[17] M. Suri, T. Huld, E. Dunlop, H. Ossenbrink, Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries, Solar Energy, 81, 1295-1305, 2007.

[18] J. Mondol, Y. Yohanis, B. Norton, The impact of array inclination and orientation on the performance of a grid-connected photovoltaic system, Renewable Energy, 32, 118-140, 2007.

[19] P.A.B. James, A.S. Bahaj, R.M. Braid, PV array < 5 kWp + single inverter = grid connected PV system: Are multiple inverter alternatives economic?, Solar Energy, 80, 1179-1188, 2006.

[20] J. Bernal-Agustin, R. Dufo-Lopez, Economic and environmental analysis of grid-connected photovoltaic systems in Spain, Renewable Energy, 31, 11071128, 2006.

[21] A. Fernando-Infantes, J. Contreras, J. Bernal-Agustin, Design of grid-connected PV systems considering electrical, economical and environmental aspects: A practical case, Renewable Energy, 31, 2042-2062, 2006.

[22] S. Rehman, M. Bader, S. Al-Moallem, Cost of solar energy generated using PV panels, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11, 1843-1857,2007.

[23] X. Gong, M. Kulkarni, Design optimization of a large scale rooftop photovoltaic system, Solar Energy, 78, 362-374, 2005.

[24] D. Talavera, G. Nofuentes, J. Aguilera, M. Fuentes, Tables for the estimation of the internal rate of return of photovoltaic grid-connected systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11, 447-466, 2007.

Sites

[25] Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών (ΣΕΦ) – *http://www.helapco.gr*

[26] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) – *http://www.cres.gr*

[27] Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) – *http://www.rae.gr*

[28] Ελληνικός Σύνδεσμος Ηλεκτροπαραγωγών από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας – *http://www.hellasres.gr*