ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού και αξιολόγηση συστήματος Παραβολικών Συλλεκτών για την παραγωγή ενέργειας σε ηλεκτρικά δίκτυα

Διπλωματική Εργασία

Προκόπης Προκόπη

Εξεταστική Επιτροπή

Καθ. Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος (επιβλέπων)

Καθ. Σταυρακάκης Γεώργιος

Αναπλ. Καθ. Μπάλας Κωνσταντίνος

Χανιά 2009

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Καλαϊτζάκη Κωνσταντίνο για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας όπως επίσης και τον Καθηγητή κ. Σταυρακάκη Γεώργιο και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Μπάλα Κωνσταντίνο για τη συμμετοχή τους στην επιτροπή. Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον μεταπτυχιακό φοιτητή και φίλο Άρη Κορνελάκη για τις γνώσεις που προσέφερε και για όλο το χρόνο που αφιέρωσε παρακολουθώντας όλη την πορεία της εργασίας.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την υπομονή που έδειξαν, που με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια και που πίστεψαν στο πρόσωπό μου από την αρχή αυτής της δοκιμασίας.

Περίληψη

Η ολοένα αυξανόμενη μόλυνση του περιβάλλοντος και η εξάντληση των συμβατικών μορφών ενέργειας που διακρίνεται στον ορίζοντα οδήγησαν, τα τελευταία χρόνια, στην ανάγκη για αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον υπάρχει για την ανάπτυξη συστημάτων παραβολικών συλλεκτών με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η συγκεκριμένη εργασία, προτείνει ένα τρόπο διαστασιολόγησης ενός συστήματος παραβολικών συλλεκτών το οποίο διαθέτει την ενέργεια που παράγει σε ηλεκτρικά δίκτυα. Σκοπός της διαστασιολόγησης είναι να μεγιστοποιηθεί το οικονομικό όφελος του συστήματος για όλη τη διάρκεια ζωής του. Για την αναζήτηση και εύρεση τελικά της βέλτιστης λύσης γίνεται χρήση των γενετικών αλγορίθμων οι οποίοι ανήκουν σε μια πολύ αποδοτική κατηγορία αλγορίθμων επίλυσης τέτοιου τύπου προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 8

1.1 Τα συστήματα παραγωγής ενέργειας από παραβολικούς συλλέκτες 8

1.2 Σχετικές Προσεγγίσεις 9

1.3 Η μέθοδος που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία 10

1.4 Η δομή της εργασίας 12

2. ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ 14

2.1 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ 14

2.1.1 Εισαγωγή 14

2.1.2 Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 14

2.1.3 Ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της Γης 15

2.1.4 Συμβατική ηλιακή ακτινοβολία και ακτινοβολία ενός ήλιου 15

2.1.5 Η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους 17

2.1.6 Προσανατολισμός και κλίση των παραβολικών συλλεκτών 18

2.1.7 Σύσταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στη γήινη επιφάνεια 19

2.1.8 Μέθοδος υπολογισμού της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο 20

2.2 ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ 25

2.2.1 Εισαγωγή 25

2.2.2 Το μοντέλο των Παραβολικών Συλλεκτών για το σύστημα παραγωγής ενέργειας που μελετάται στην παρούσα εργασία 27

2.3 Σκίαση των Παραβολικών Συλλεκτών 29

3. ΟΙ ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ 34

3.1 Εισαγωγή 34

3.2 Ο βασικός γενετικός αλγόριθμος 35

3.3 Κωδικοποίηση μεταβλητών 38

3.4 Η αντικειμενική συνάρτηση και η συνάρτηση προσαρμογής. 39

3.5 Μηχανισμοί επιλογής (selection mechanisms) 40

3.6 Πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης 44

3.7 Χειρισμός περιορισμών 44

4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 46

4.1 Ορισμοί οικονομικών προβλημάτων 46

4.2 Μέθοδος προσδιορισμού χρόνου απόσβεσης 49

4.3 Μέθοδος υπολογισμού εσωτερικού βαθμού απόδοσης 49

5. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 51

5.1 Εισαγωγή 51

5.2 Η διάταξη των Παραβολικών Συλλεκτών σε δεδομένη έκταση 51

5.3 Οι βάσεις στήριξης των Παραβολικών Συλλεκτών 54

5.4 Ο αλγόριθμος SIM 55

6. Η ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΟΝ ΓΕΝΕΤΙΚΟ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ 58
6.1 Εισαγωγή 58
6.2 Η αρχικοποίηση του αλγορίθμου 59
6.3 Η αντικειμενική συνάρτηση για το υπό μελέτη σύστημα 61
6.4 Μετασχηματισμός της αντικειμενικής συνάρτησης 64
6.5 Πράξεις Διασταύρωσης και Μετάλλαξης 65
6.5.1 Διασταύρωση 65
6.5.2 Μετάλλαξη 67
6.6 Ο αλγόριθμος εύρεσης του πεδίου τιμών μιας μεταβλητής 69
6.7 Ο αλγόριθμος διόρθωσης των εσφαλμένων λύσεων 70
6.8 Σύγκλιση του αλγορίθμου 70
6.9 Ανακεφαλαίωση 71
7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 74
7.1 Εισαγωγή 74
7.2 Αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου για διάφορες τιμές επιδότησης, αγοράς έκτασης και φορολογίας εσόδων. 77
7.3 Αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου για εκτάσεις μεγαλύτερες των δέκα στρεμμάτων 94
7.4 Αποτελεσματικότητα εφαρμογής των γενετικών αλγορίθμων στο πρόβλημα διαστασιολόγησης που μελετάται 101
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ 103
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 105

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Τα συστήματα παραγωγής ενέργειας από παραβολικούς συλλέκτες

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχεται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Ονομάζονται επίσης ήπιες μορφές ενέργειας. Ο όρος "ήπιες" αναφέρεται σε δύο βασικά χαρακτηριστικά τους. Καταρχήν, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση, καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Επίσης, πρόκειται για "καθαρές" μορφές ενέργειας, πολύ φιλικές στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Η υψηλή όμως μέχρι πρόσφατα τιμή των νέων ενεργειακών εφαρμογών, τα τεχνικά προβλήματα εφαρμογής καθώς και οικονομικές σκοπιμότητες που έχουν να κάνουν με τη διατήρηση του παρόντος στάτους κβο στον ενεργειακό τομέα εμπόδισαν την εκμετάλλευση έστω και μέρους του τεχνικά εκμεταλλεύσιμου ενεργειακού δυναμικού από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας το οποίο είναι πολλαπλάσιο της παγκόσμιας συνολικής κατανάλωσης ενέργειας.

Το ενδιαφέρον για τις ΑΠΕ ανακινήθηκε τη δεκαετία του εβδομήντα, ως αποτέλεσμα των απανωτών πετρελαϊκών κρίσεων της εποχής, αλλά και της αλλοίωσης του περιβάλλοντος και της ποιότητας ζωής από τη χρήση κλασικών πηγών ενέργειας. Τη δεκαετία του ογδόντα περίπου, εξελίχθηκαν και τα συστήματα *παραβολικών συλλεκτών* με επακόλουθο την ύπαρξη υποστήριξης τόσο σε ερευνητικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο εφαρμογών. Αποτέλεσμα του μεγάλου ενδιαφέροντος είναι η εξέλιξη της τεχνολογίας τους, οδηγώντας στη σημαντική βελτίωση της απόδοσής τους και στην ανάπτυξη και επενδυτικού ενδιαφέροντος. Για την σχεδίαση όμως ενός τέτοιου συστήματος πρέπει να δοθεί λύση σε μια σειρά προβλημάτων. Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η ανάπτυξη της κατάλληλης μεθόδου για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση ενός τέτοιου

συστήματος που συνδέεται με το ηλεκτρικό δίκτυο με κριτήριο τη μεγιστοποίηση των οικονομικών οφελών από την πώληση της ενέργειας που παράγεται. Για την εύρεση λύσης λαμβάνεται υπόψη και η νομοθεσία που ισχύει στην Ελλάδα για τα συστήματα ΑΠΕ, η οποία προβλέπει επιδότηση του κόστους εγκατάστασης των συνδεδεμένων με το δίκτυο συστημάτων παραβολικών συλλεκτών σε ύψος που καθορίζεται από σχετική επιτροπή και πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγουν, σε τιμή που εξαρτάται από την εγκατεστημένη ισχύ του κάθε συστήματος.

1.2 Σχετικές Προσεγγίσεις

Στην εργασία [9] δίνεται μια σύνοψη ενός υπολογιστικού μοντέλου το οποίο χρησιμοποιείται από επιστήμονες και ερευνητές για τον υπολογισμό της σχέσης μεταξύ κόστους και απόδοσης και γίνεται ανάλυση των οικονομικών παραμέτρων για πάρκα παραβολικών συλλεκτών. Πιο συγκεκριμένα το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (National Renewable Energy Laboratory, NREL) το οποίο σήμερα ηγείται της έρευνας που γίνεται γύρω από το θέμα των Παραβολικών Συλλεκτών στις ΗΠΑ, ανάπτυξε ένα μοντέλο προσομοίωσης των παραβολικών συλλεκτών που παρέχει μια λεπτομερή ανάλυση όσον αφορά την απόδοση και το κόστος, όπως επίσης και μια οικονομική αξιολόγηση για μια μελέτη. Το NREL χρησιμοποιεί αυτό το μοντέλο για την καθοδήγηση των προσπαθειών που γίνονται για την έρευνα και την ανάπτυξη συστημάτων όπου χρησιμοποιούνται οι παραβολικοί συλλέκτες.

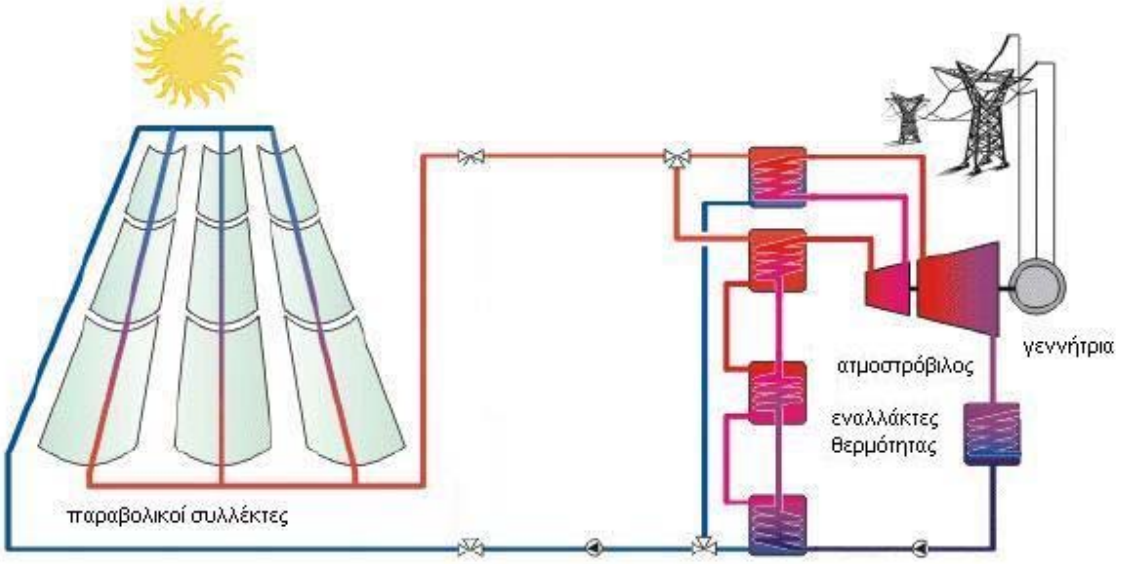
Στην εργασία [14] προτείνεται μια μέθοδος για την διαστασιολόγηση συστήματος φωτοβολταϊκών στοιχείων με σκοπό τη διάθεση της ενέργειας που παράγουν σε ηλεκτρικά δίκτυα. Η διαστασιολόγηση αποσκοπεί στην μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους του συστήματος για όλη τη διάρκεια της ζωής του και περιλαμβάνει 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 χρησιμοποιούνται οι γενετικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι αποτελούν 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.

1.3 Η μέθοδος που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται οι γενετικοί αλγόριθμοι για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση ενός οποιουδήποτε συστήματος παραβολικών συλλεκτών συνδεδεμένου στο ηλεκτρικό δίκτυο με σκοπό την πώληση της παραγόμενης ενέργειας με το μέγιστο οικονομικό όφελος. Η συγκεκριμένη κατηγορία αλγορίθμων εγγυάται την παραγωγή των βέλτιστων λύσεων του προβλήματος σε πολύ σύντομο χρόνο.

Το σύστημα αποτελείται, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1, από ένα αριθμό N παραβολικών συλλεκτών, ένα ατμοστρόβιλο, ένα αριθμό εναλλακτών θερμότητας και μια γεννήτρια η οποία παράγει AC ρεύμα που παρέχεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Στο σύστημα που μελετάται δεν υπάρχουν αποθηκευτικά μέσα (π.χ. μπαταρίες). Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται το γενικό διάγραμμα που χρησιμοποιήθηκε στη μοντελοποίηση του συστήματος παραγωγής ενέργειας που μελετάται στη παρούσα εργασία.



Σχήμα 1.1: Το γενικό διάγραμμα του συστήματος παραγωγής ενέργειας από Παραβολικούς Συλλέκτες.

Η διαστασιολόγηση του συστήματος περιλαμβάνει τον υπολογισμό:

- του βέλτιστου πλήθους των παραβολικών συλλεκτών και
- της βέλτιστης απόστασης μεταξύ των σειρών των παραβολικών συλλεκτών.

Το κριτήριο βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους που προκύπτει από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας για τα έτη της μελέτης. Το οικονομικό όφελος περιλαμβάνει τόσο το κόστος αγοράς των διαφόρων στοιχείων όσο και το κόστος συντήρησής τους.

Πιο αναλυτικά, οι παράμετροι κόστους της αντικειμενικής συνάρτησης που βελτιστοποιείται είναι οι εξής:

- το κόστος αγοράς και συντήρησης των παραβολικών συλλεκτών,
- το κόστος αγοράς και συντήρησης των εναλλακτών θερμότητας,
- το κόστος αγοράς και συντήρησης του ατμοστρόβιλου και της γεννήτριας,
- το κόστος αγοράς της έκτασης όπου θα εγκατασταθεί το σύστημα παραγωγής ενέργειας και
- το κόστος κατασκευής των βάσεων στήριξης των παραβολικών συλλεκτών.

Υποψήφιες λύσεις του προβλήματος θεωρούνται μόνο αυτές που καλύπτουν πλήρως τους περιορισμούς που τίθενται και σχετίζονται με την διάταξη των παραβολικών συλλεκτών στην έκταση που διατίθεται για την εγκατάσταση. Σχετικά με τη διάταξη στην έκταση χρησιμοποιείται μοντέλο υπολογισμού των αποστάσεων των παραβολικών συλλεκτών για κάθε ώρα της μέρας και για κάθε μέρα του χρόνου ώστε να επιλέγεται η κατάλληλη απόσταση μεταξύ των συλλεκτών που σε συνδυασμό με το πλήθος τους δίνουν τη μέγιστη δυνατή ενέργεια. Για την αξιολόγηση μιας λύσης, για το αν μπορεί να είναι υποψήφια λύση του προβλήματος υλοποιείται προσομοίωση για τους παράγοντες της διαστασιολόγησης (αριθμός παραβολικών συλλεκτών και απόσταση μεταξύ των σειρών των παραβολικών συλλεκτών).

Ο υπολογισμός της παραγόμενης ενέργειας γίνεται χρησιμοποιώντας μετεωρολογικά δεδομένα που έχουν προκύψει ύστερα από λήψη μετρήσεων, οπότε υπολογίζεται η μέση ημερήσια ή η μέση μηνιαία τιμή τους. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι η ηλιακή ακτινοβολία.

Στην παρούσα μέθοδο γίνεται και οικονομική αξιολόγηση των λύσεων που προκύπτουν. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι υπολογισμού του χρόνου απόσβεσης και του εσωτερικού βαθμού απόδοσης. Επίσης, υπολογίζεται και η τιμής της καθαρής παρούσας αξίας με βάση την οποία γίνεται και η βελτιστοποίηση. Αυτό είναι δηλαδή και το κριτήριο βελτιστοποίησης του συγκεκριμένου προβλήματος.

Τέλος, να σημειωθεί ότι ο αλγόριθμος που έχει αναπτυχθεί στην παρούσα εργασία είναι πλήρως παραμετροποιήσιμος από το χρήστη ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί στις οικονομικές παραμέτρους και τα επιμέρους κόστη οποιουδήποτε σχετικού προβλήματος διαστασιολόγησης.

1.4 Η δομή της εργασίας

Η δομή αυτής της εργασίας είναι η εξής:

Το 2^{ο} κεφάλαιο αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω των Παραβολικών Συλλεκτών. Αφού παρουσιαστούν αρχικά κάποια χαρακτηριστικά της ηλιακής ενέργειας

περιγράφεται η μέθοδος υπολογισμού της προσπίπτουσας ενέργειας σε κεκλιμένο επίπεδο με βάση την προσπίπτουσα ενέργεια σε οριζόντιο επίπεδο και εν συνεχεία γίνεται μια περιγραφή ενός Παραβολικού Συλλέκτη. Τέλος, περιγράφεται το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας του συλλέκτη.

Στο 3^{ο} κεφάλαιο παρουσιάζονται οι γενετικοί αλγόριθμοι. Περιγράφονται τα βήματα του βασικού γενετικού αλγορίθμου και οι μηχανισμοί που χρησιμοποιεί για την μοντελοποίηση και την εύρεση της λύσης ενός προβλήματος.

Στο 4^{ο} κεφάλαιο περιγράφονται και αναλύονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την οικονομική αξιολόγηση του συστήματος.

Στο 5^{ο} κεφάλαιο περιγράφεται το μοντέλο του συστήματος που χρησιμοποιήθηκε για διαστασιολόγηση και παρουσιάζεται ο αλγόριθμος προσομοίωσής του.

Στο 6^{ο} κεφάλαιο αναλύεται η μέθοδος διαστασιολόγησης του συστήματος. Ειδικότερα, αναπτύσσεται ολόκληρη η μοντελοποίηση του προβλήματος με γενετικούς αλγορίθμους και περιγράφονται οι μηχανισμοί που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο 7^{ο} κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία. Αναλύονται παραδείγματα διαστασιολόγησης για διάφορες περιπτώσεις κόστους αγοράς της έκτασης εγκατάστασης και ύψους επιδότησης.

Τέλος, στο 8^{ο} κεφάλαιο αναλύονται τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν και προτείνονται κάποιες βελτιώσεις και μελλοντικές επεκτάσεις της προτεινόμενης μεθόδου.

2. ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ

2.1 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

2.1.1 Εισαγωγή

Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που παράγεται στον ήλιο. Φτάνει σχεδόν αμετάβλητη στο ανώτατο στρώμα της ατμόσφαιρας του πλανήτη μας, διαμέσου του διαστήματος, και στη συνέχεια κατά τη διέλευσή της από την ατμόσφαιρα υπόκειται σε σημαντικές αλλαγές, που οφείλονται στη σύσταση της ατμόσφαιρας. Στην επιφάνεια της γης φτάνει μόνο ένα μέρος της ακτινοβολίας που προέρχεται άμεσα από τον ήλιο, ενώ το υπόλοιπο είτε απορροφάται από τα συστατικά της ατμόσφαιρας είτε ανακλάται πάλι προς το διάστημα ή προς την επιφάνεια της γης. Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγραφούν τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία σχετικά με την παραγωγή ενέργειας από παραβολικούς συλλέκτες.

2.1.2 Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας

Ένα μέγεθος που έχει μεγάλη σημασία για την ενεργειακή απόδοση των παραβολικών συλλεκτών είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, B, ορίζεται ως το ποσό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει σε 1 m^2 επιφάνειας σε 1 sec με βάση τον τύπο:

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

όπου:

E η ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια,

P η ισχύς που προσπίπτει στην επιφάνεια

t ο χρόνος.

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στα διάφορα σημεία μεταξύ του Ήλιου και της επιφάνειας της Γης υπολογίζεται με τη σχέση:

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

όπου:

P_o η ισχύς που εκπέμπεται από τον Ήλιο

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

Η ένταση, δηλαδή, είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης από τον Ήλιο. 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.

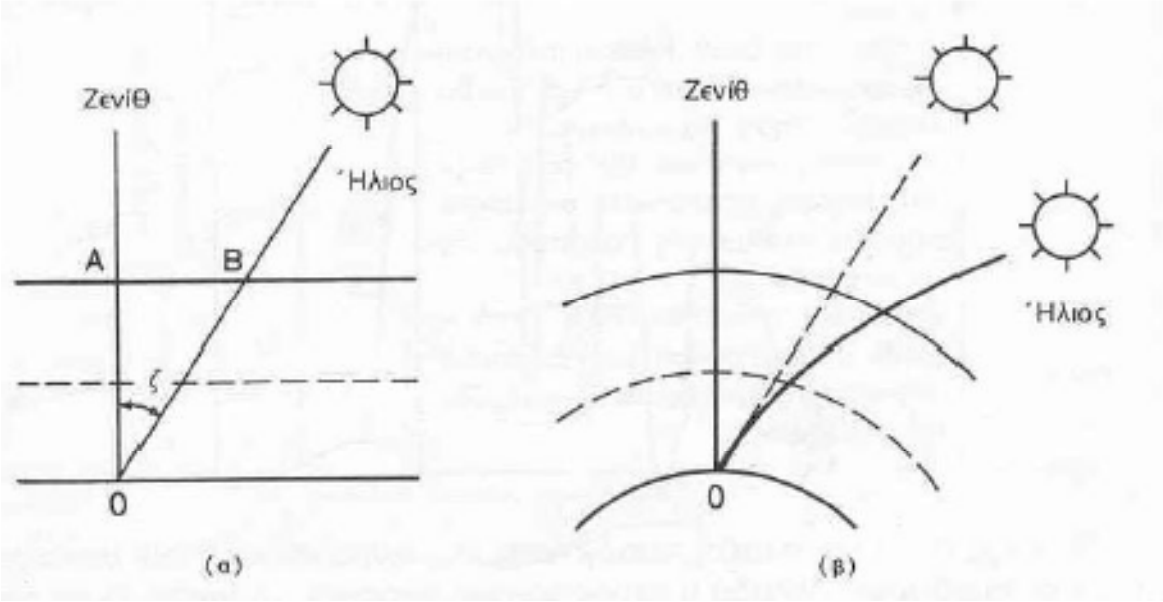
2.1.3 Ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της Γης

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μειώνεται συνεχώς καθώς αυξάνεται η απόσταση της επιφάνειας της Γης από τον Ήλιο. Αυτό υποδηλώνει η Εξ. (2.2). Έτσι, η γεωγραφική θέση και το υψόμετρο ενός τόπου επηρεάζουν άμεσα την ηλιακή ενέργεια που τελικά φτάνει σ' αυτόν. Η μείωση εξαρτάται, ακόμα, από τη σύσταση του ατμοσφαιρικού στρώματος της Γης, όπου λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της απορρόφησης. Το όζον, το οξυγόνο, το διοξείδιο του άνθρακα αλλά και οι υδρατμοί απορροφούν ποσά ηλιακής ενέργειας συμβάλλοντας έτσι στη μείωση της έντασης. Η ενέργεια δεν φθάνει υπό τη μορφή δέσμης ακτίνων αλλά κάποιο ποσοστό της σκεδάζεται ή και ανακλάται στην ατμόσφαιρα.

2.1.4 Συμβατική ηλιακή ακτινοβολία και ακτινοβολία ενός ήλιου

Εκτός από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν πιο πάνω, η τελική μορφή και η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης, είναι διαφορετική και εξαρτάται από τη θέση του Ήλιου στον ουρανό. Το μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα μέχρι τη στάθμη της θάλασσας, που είναι άμεση συνέπεια της θέσης του Ήλιου, χαρακτηρίζεται

από μία κλίμακα *μάζας αέρα ΑΜ* (air mass, ονομάζεται επίσης και οπτική μάζα αέρα) βαθμονομημένης με την τέμνουσα (το αντίστροφο του συνημιτόνου) της ζενιθιακής απόστασης (ζ), δηλαδή της γωνίας ανάμεσα στη θέση του Ήλιου και στην κατακόρυφο (Σχήμα 2.1). Δηλαδή, η κλίμακα της μάζας αέρα δείχνει πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα, σε σύγκριση με την κατακόρυφη διαδρομή της.



Σχήμα 2.1: Εξάρτηση ΑΜ από τη θέση του Ήλιου

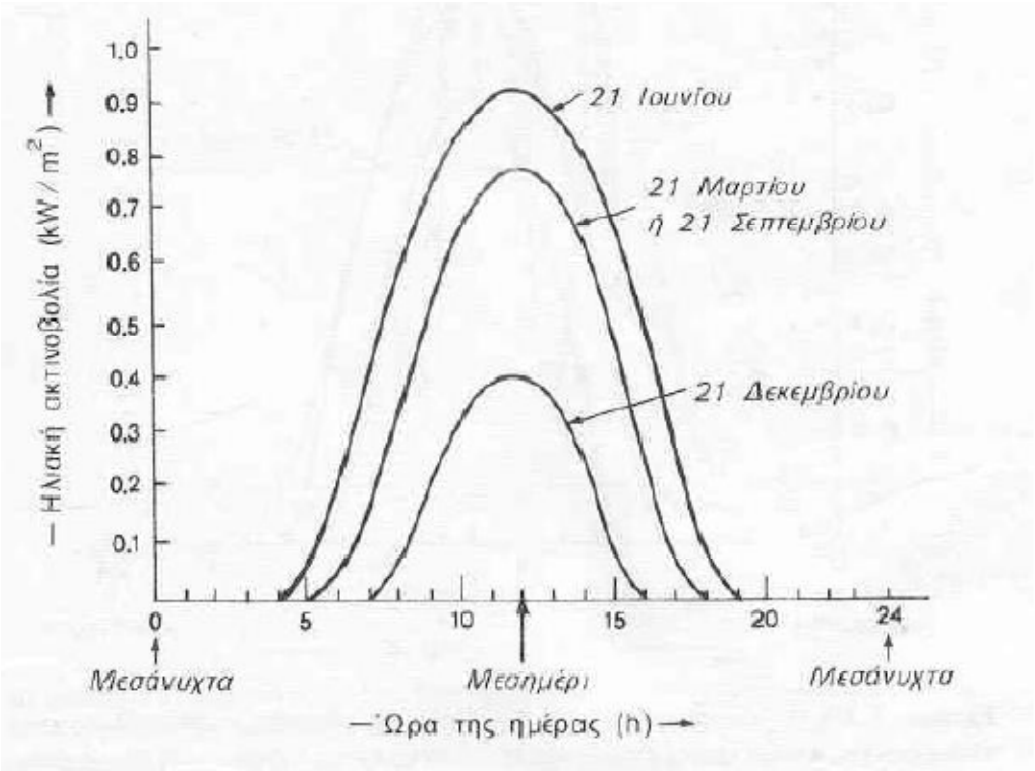
Στο Σχήμα 2.1(α) η ατμόσφαιρα θεωρείται επίπεδη και εκτείνεται έως το άπειρο. Εξ' ορισμού είναι ΑΜ=ΟΒ/ΟΑ=1/cosζ. Στο Σχήμα 2.1(β) φαίνεται η πραγματική διαμόρφωση της ατμόσφαιρας καθώς και η ατμοσφαιρική διάθλαση. Συγκεκριμένα, ως *ΑΜ1* συμβολίζεται η συνθήκη για τη θέση του Ήλιου στην κατακόρυφο (στο ζενίθ) που αντιστοιχεί στο ελάχιστο μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα. Όμοια, ως *ΑΜ1.5* συμβολίζεται η διαδρομή της ακτινοβολίας με τον Ήλιο σε γωνία 45° από το ζενίθ, *ΑΜ2* με τον Ήλιο σε γωνία 60° κ.λ.π. Το μηδέν της κλίμακας *(ΑΜ0)* συμβολίζει την πλήρη απουσία ατμοσφαιρικής παρεμβολής, δηλαδή την ηλιακή ακτινοβολία στο διάστημα, σε θέση που απέχει όση είναι η μέση απόσταση της Γης από τον Ήλιο.

Η ηλιακή ακτινοβολία *ΑΜ1.5* έχει πυκνότητα $935W/m^2$ και αποτελεί μια αρκετά αντιπροσωπευτική προσέγγιση της μέσης μέγιστης ισχύος που περίπου δέχεται μια επιφάνεια κάθετη προς τη διεύθυνση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και

στις ευνοϊκότερες συνθήκες αιχμής (καλοκαίρι, μεσημέρι, καθαρός ουρανός κ.λ.π.) ένα μεγάλο μέρος από τις περισσότερο κατοικημένες και αναπτυγμένες περιοχές της Γης. Για απλοποίηση, η παραπάνω πυκνότητα ισχύος στρογγυλοποιείται στα 1000 W/m^2, ονομάζεται συμβατικά *ακτινοβολία ενός ήλιου* (ή ενός πλήρους ήλιου).

2.1.5 Η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στη επιφάνεια της Γης παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις από εποχή σε εποχή λόγω της κίνησης της Γης γύρω από την Ήλιο. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια μιας μέρας για τρεις διαφορετικές ημερομηνίες. Χαρακτηριστικό μέγεθος είναι η τιμή της μέγιστης έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (ένταση αιχμής), που μετράται στο ηλιακό μεσημέρι, δηλαδή όταν ο Ήλιος βρίσκεται στο μεγαλύτερο ύψος του ορίζοντα, το οποίο δεν είναι αναγκαστικό να συμπίπτει με το ωρολογιακό μεσημέρι. Για παράδειγμα στην Αθήνα έχουμε ηλιακό μεσημέρι όταν το ρολόι δείχνει 12:25 τον χειμώνα, και 13:25 το καλοκαίρι.



Σχήμα 2.2: Η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο κατά τη διάρκεια των φωτεινών ωρών για τρεις διαφορετικές ημερομηνίες του έτους.

2.1.6 Προσανατολισμός και κλίση των παραβολικών συλλεκτών

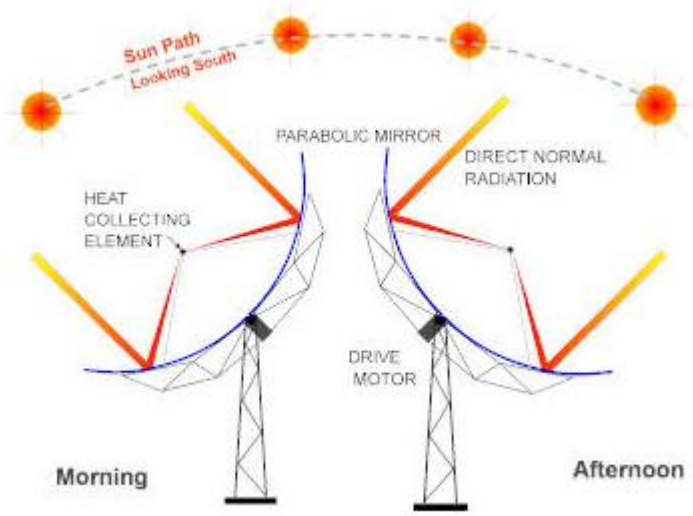
Δύο κρίσιμες επιλογές για ένα σύστημα ενέργειας που εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια είναι ο προσανατολισμός των παραβολικών συλλεκτών και η κλίση τους ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Τα δύο μεγέθη που περιγράφουν τον προσανατολισμό και την κλίση του συλλέκτη είναι η αζιμούθια γωνία θ_σ και η γωνία κλίσης β_σ.

Η κλίση του συλλέκτη β_σ είναι η δίεδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και του οριζοντίου επιπέδου και μπορεί να πάρει τιμές από -90° μέχρι 90°.

Η αζιμούθια γωνία του συλλέκτη, θ_σ, είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του συλλέκτη και στον τοπικό μεσημβρινό Βορρά – Νότου. Παίρνει τιμές -180° μέχρι $+180^o$. Η γωνία -180° (που συμπίπτει με τη γωνία $+180^o$) αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του

συλλέκτη προς τον Βορρά, η γωνία -90° προς την Ανατολή, η γωνία 0° προς τον Νότο και η γωνία +90° προς την Δύση.

Όταν η επιφάνεια του συλλέκτη είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της ακτινοβολίας, δηλαδή όταν η γωνία πρόσπτωσης, φ, είναι 0°, τότε η ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη είναι μέγιστη. Αυτό δεν είναι εύκολο να εξασφαλιστεί καθώς ο Ήλιος συνεχώς μετακινείται στον ουρανό κατά τη διάρκεια της μέρας. Για το λόγο αυτό οι παραβολικοί συλλέκτες είναι εξοπλισμένοι με ένα σύστημα παρακολούθησης της πορείας του ήλιου που μετακινεί τον παραβολικό συλλέκτη κάθε στιγμή στη βέλτιστη γωνία προς την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει επάνω στον συλλέκτη. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η κίνηση αυτή των παραβολικών συλλεκτών.



Σχήμα 2.3: Αρχή λειτουργίας παραβολικών συλλεκτών

Οι παραβολικοί συλλέκτες ακολουθούν τον Ήλιο από την Ανατολή ως τη Δύση, δηλαδή για τις πρωινές ώρες (πριν το ηλιακό μεσημέρι) η αζιμούθια γωνία των συλλεκτών λαμβάνεται ίση με -90°, ενώ για τις απογευματινές ώρες (μετά το ηλιακό μεσημέρι) η αζιμούθια γωνία λαμβάνεται ίση με 90°.

2.1.7 Σύσταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στη γήινη επιφάνεια

Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία διαπερνά την ατμόσφαιρα υφίσταται την επίδραση ενός συνόλου στοιχείων. Κάποια από αυτά τα στοιχεία, όπως είναι οι νεφώσεις,

αντανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ άλλα, όπως το όζον ή το οξυγόνο, την απορροφούν. Στοιχεία όπως είναι τα σταγονίδια νερού, ή η σκόνη διασπείρουν την ακτινοβολία, ενώ όταν τελικά η ηλιακή ακτινοβολία φτάσει στο έδαφος ένα μέρος της θα απορροφηθεί και το υπόλοιπο θα ανακλαστεί. Το σύνολο των παραπάνω επιδράσεων αποσυνθέτει την ηλιακή ακτινοβολία σε διάφορες συνιστώσες: (1) η απευθείας ακτινοβολία (direct radiation) είναι η ακτινοβολία που προέρχεται απευθείας από τον Ήλιο, (2) η διάχυτη ακτινοβολία (diffuse radiation) είναι η ακτινοβολία που συνίσταται από ακτίνες που προέρχονται από τον ουρανό όχι όμως απευθείας από τον Ήλιο (δεν περιλαμβάνονται δηλαδή ανακλάσεις από τη Γη) και (3) η albedo radiation, είναι η ακτινοβολία που προέρχεται από ανακλάσεις στο έδαφος. Η συνολική ακτινοβολία (global radiation) είναι το άθροισμα των τριών παραπάνω συνιστωσών.

2.1.8 Μέθοδος υπολογισμού της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο

Όπως έχει αναφερθεί οι παραβολικοί συλλέκτες ακολουθούν την πορεία του Ήλιου από την Ανατολή προς τη Δύση με άξονα περιστροφής το Βορρά – Νότο. Αυτό που είναι απαραίτητο είναι να υπολογίζεται η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας για την κλίση που έχει ο παραβολικός συλλέκτης κάθε ώρα και κάθε μέρα, αφού οι μετρήσεις που συνήθως είναι διαθέσιμες αφορούν το οριζόντιο επίπεδο.

Έστω λοιπόν ότι $G_d(\beta,\alpha)$ είναι η συνολική ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται κεκλιμένο επίπεδο που έχει κλίση β^o ως προς το οριζόντιο επίπεδο και αζιμούθια γωνία α^o μετρούμενη σε Wh/m^2. Για την $G_d(\beta,\alpha)$ ισχύει:

$$G_d(\beta,\alpha) = R_d(\beta,\alpha) + D_d(\beta,\alpha) + B_d(\beta,\alpha) \qquad (2.4)$$

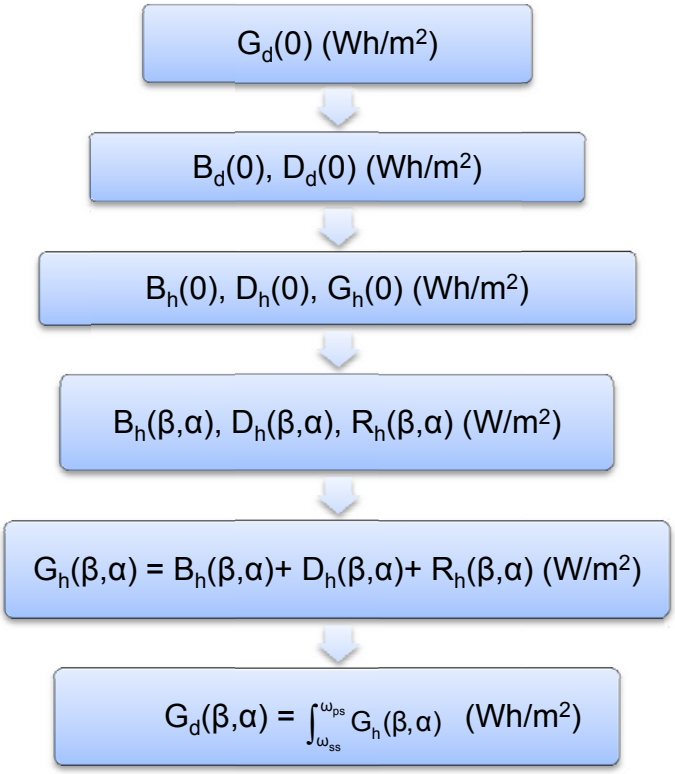
όπου:

$B_d(\beta)$ είναι η συνολική ημερήσια direct irradiation,

$D_d(\beta)$ είναι η συνολική ημερήσια diffuse irradiation και

$R_d(\beta)$ η συνολική ημερήσια albedo irradiation.

Ο όρος irradiance αναφέρεται στην πυκνότητα ισχύος (ένταση) που προσπίπτει σε μια επιφάνεια και μετριέται σε W/m^2 ενώ irradiation είναι η ενέργεια που προσπίπτει σε μια επιφάνεια κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης περιόδου. Στην ουσία, το irradiation είναι η ολοκλήρωση του irradiance στην περίοδο του χρόνου και μετριέται σε Wh/m^2. Η μέθοδος που ακολουθείται για τον υπολογισμό του $G_d(\beta)$ φαίνεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Τα βήματα της μεθόδου υπολογισμού της ημερήσιας ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα επίπεδο κλίσης β^o και αζιμούθιας γωνίας α^o.

Όπως διαπιστώνεται, η μέθοδος ξεκινώντας από τη συνολική ημερήσια ενέργεια ακτινοβολίας πάνω στο οριζόντιο επίπεδο καταλήγει στον υπολογισμό της μέσης συνολικής ημερήσιας ενέργειας της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε κεκλιμένο επίπεδο κλίσης β^0 και αζιμούθιας γωνίας α^o υπολογίζοντας ενδιάμεσα τις ωριαίες τιμές των συνιστωσών της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο και εν συνεχεία σε κεκλιμένο. Η επιλογή της κλίμακας της μιας ώρας γίνεται γιατί απλουστεύει τους υπολογισμούς. Ειδικότερα, για μια ώρα η συνολική ενέργεια (irradiation) ισούται *αριθμητικά* με τη μέση τιμή της ισχύος (irradiance) για εκείνη την ώρα. Επίσης γίνεται η παραδοχή ότι είναι ίση με την ισχύ στο μέσο της συγκεκριμένης ώρας.

Αρχικά, έχοντας τη συνολική ημερήσια ενέργεια υπολογίζονται οι ποσότητες $D_d(0)$ και $B_d(0)$ (μπορεί χωρίς σφάλματα να θεωρηθεί ότι $R_d(0)=0$, δηλαδή ότι στο οριζόντιο η ανακλώμενη από τη Γη ακτινοβολία είναι μηδενική). Η τιμή του $B_d(0)$ δίνεται από τη σχέση:

$$B_d(0) = \frac{24}{\pi} B_0 \varepsilon_0 (\cos\varphi \cos\delta)(\omega_s \cos\omega_s - \sin\omega_s) \tag{2.5}$$

όπου B_0=1367 W/m^2 είναι η ηλιακή σταθερά (η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια που απέχει από την Ήλιο τόση απόσταση όση και η μέση απόσταση Γης – Ήλιου, απουσία ατμόσφαιρας). Το ε_0 είναι το τετράγωνο του λόγου της μέσης απόστασης Γης – Ήλιου προς την απόσταση Γης – Ήλιου και δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_0 = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{360 d_n}{365}\right) \tag{2.6}$$

όπου:

d_n είναι η μέρα του χρόνου (1,2...365),

φ είναι το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (^{o}) και

δ είναι η γωνία ηλιακής απόκλισης (solar declination), δηλαδή η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο ισημερινό επίπεδο και την ευθεία γραμμή που ενώνει τη Γη με τον Ήλιο. Η τιμή του δ (^{o}) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta(^o) = 23.45 \sin\left(\frac{360}{365}\left(d_n + 284\right)\right) \tag{2.7}$$

Τέλος, ω_s είναι η γωνία ανατολής του ηλίου (sunrise angle) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\omega_s = -\arccos(-\tan\delta \cdot \tan\varphi) \tag{2.8}$$

ενώ παράλληλα ισχύει ότι:

$$\cos\omega_s = -\tan\delta \cdot \tan\varphi \tag{2.9}$$

Όσον αφορά στο $D_d(0)$, η τιμή του μπορεί να υπολογιστεί από το μοντέλο των Collares – Pereira και Rabl. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο προκύπτει ότι:

$$K_T = \frac{G_d(0)}{B_d(0)} \text{ και } K_D = \frac{D_d(0)}{G_d(0)} \tag{2.10}$$

όπου:

$$K_D = 0.99 \text{ για } K_T \leq 0.17 \tag{2.11}$$

και:

$$\begin{aligned} &K_D = 1.118 - 2.272K_T + 9.473K_T^2 - 21.856K_T^3 + 14.648K_T^4 \\ &\text{για } 0.17 \leq K_T \leq 0.8 \end{aligned} \tag{2.12}$$

Έχοντας υπολογίσει για κάθε μέρα τα $G_d(0)$ και $B_d(0)$, μπορούν να υπολογιστούν και οι ωριαίες ενέργειες (hourly irradiation) $G_h(0)$ και $D_h(0)$. Το $B_h(0)$ δίνεται από τη σχέση $B_h(0)= G_h(0) - D_h(0)$. Για τα $G_h(0)$ και $D_h(0)$ ισχύουν οι σχέσεις:

$$D_h(0) = r_d D_d(0) \text{ και } G_h(0) = r_g G_d(0) \tag{2.13}$$

όπου:

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\omega_s \cos\omega_s - \sin\omega_s} \tag{2.14}$$

και:

$$r_g = r_d(a + b\cos\omega) \tag{2.15}$$

Το ω_s έχει ήδη οριστεί, το ω είναι η ηλιακή ώρα της μέρας, ενώ τα a και b υπολογίζονται με τις σχέσεις:

$$a = 0.409 - 0.5016\sin(\omega_s + 1.047) \tag{2.16}$$

και:

$$b = 0.6609 + 0.4767\sin(\omega_s + 1.047) \tag{2.17}$$

Σε όλες τις παραπάνω σχέσεις τα ω και ω_s πρέπει να δίνονται σε ακτίνια.

Μέχρι τώρα υπολογίστηκαν οι ωριαίες συνολικές ενέργειες $B_h(0)$, $G_h(0)$ και $D_h(0)$ και πρέπει να υπολογιστούν οι αντίστοιχες ποσότητες σε κεκλιμένο επίπεδο κλίσης β^o και αζιμούθιας γωνίας α^o. Οι Εξ. (2.18), (2.21) και (2.22) που σχετίζονται με τις ποσότητες αυτές, παρέχουν ισχύ. Για τον υπολογισμό της

ενέργειας αρκεί να ολοκληρωθούν αυτές οι σχέσεις για μια ώρα. Έχοντας επιλέξει κλίμακα μιας ώρας και στηριζόμενοι στη θεώρηση που έγινε αρχικά ότι η συνολική ωριαία ενέργεια είναι αριθμητικά ίση με την ισχύ στο μέσο της ώρας, οι παραπάνω υπολογισμοί γίνονται αρκετά απλούστεροι.

Έτσι λοιπόν για την ακτινοβολία $B_h(0)$ ισχύει:

$$B_h(\beta,\alpha) = \left(\frac{G_h(0) - D_h(0)}{\cos\theta_{zs}}\right)\max(0,\cos\theta_s) \ \left(W/m^2\right) \tag{2.18}$$

όπου:

$$\begin{aligned}\cos\theta_s &= \sin\delta\sin\varphi\cos\beta - \sin\delta\cos\varphi\sin\beta\cos\alpha + \cos\delta\cos\varphi\cos\beta\cos\omega \\ &+ \cos\delta\sin\varphi\sin\beta\cos\alpha\cos\omega + \cos\delta\sin\alpha\sin\omega\sin\beta\end{aligned} \tag{2.19}$$

και:

$$\cos\theta_{zs} = \sin\delta\sin\varphi + \cos\delta\cos\varphi\cos\omega \tag{2.20}$$

Για την ακτινοβολία από ανάκλαση από τη Γη ισχύει:

$$R_h(\beta,\alpha) = G_h(\beta,\alpha)(1-\cos\beta)\rho/2 \ \left(W/m^2\right) \tag{2.21}$$

όπου ρ είναι ο δείκτης ανάκλασης του εδάφους και αν η τιμή του δεν είναι γνωστή λαμβάνεται ίση με 0.2. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τυπικές τιμές του ρ για διάφορους τύπους εδάφους.

Πίνακας 2.1 Συντελεστής ανάκλασης για διάφορους τύπους εδάφους

Έδαφος	**Συντελεστής ανάκλασης (ρ)**
Ξηρό – γυμνό έδαφος	0.2
Έδαφος με χορτάρι	0.3
Έρημος	0.4
Χιόνι	0.5 – 0.8

Τέλος, για τον υπολογισμό του $D_h(\beta)$ χρησιμοποιείται το ανισοτροπικό μοντέλο του Klucher σύμφωνα με το οποίο ισχύει ότι:

$$D_h(\beta,\alpha) = \frac{\left(1+\cos^2\theta_s \sin^3\theta_{zs}\right)\left(1+k_1 \sin^3\frac{\beta}{2}\right)D_h(0)\left(1+\cos\beta\right)}{2} \tag{2.22}$$

όπου:

$$k_1 = 1-\left(\frac{D_h(0)}{G_h(0)}\right) \tag{2.23}$$

Έτσι για την μέση ωριαία ισχύ (ή την συνολική ωριαία ενέργεια) ισχύει:

$$G_h(\beta,\alpha) = R_h(\beta,\alpha) + D_h(\beta,\alpha) + B_h(\beta,\alpha) \ \ (\mathrm{Wh/m^2}) \tag{2.24}$$

Για την εύρεση της συνολικά ακτινοβολούμενης ενέργειας σε μια μέρα αρκεί να ολοκληρωθεί η ποσότητα $G_h(\beta,\alpha)$ για μια ημέρα σύμφωνα με την σχέση:

$$G_d(\beta,\alpha) = \int_{\omega_{ss}}^{\omega_{ps}} G_h(\beta,\alpha)\,dt \ \ (\mathrm{Wh/m^2}) \tag{2.25}$$

όπου:

$$\omega_{ss} = \omega_{ps} = \max\left\{\omega_s, -\arccos(-\tan\delta\tan(\varphi-\beta)\right\} \tag{2.26}$$

είναι η γωνία ανατολής και δύσης αντίστοιχα με το συλλέκτη σε κλίση β^o, ενώ η σχέση που συνδέει τις ποσότητες ω και t είναι:

$$\omega\left(^\circ\right) = 15\left(12-t\right) \tag{2.27}$$

2.2 ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

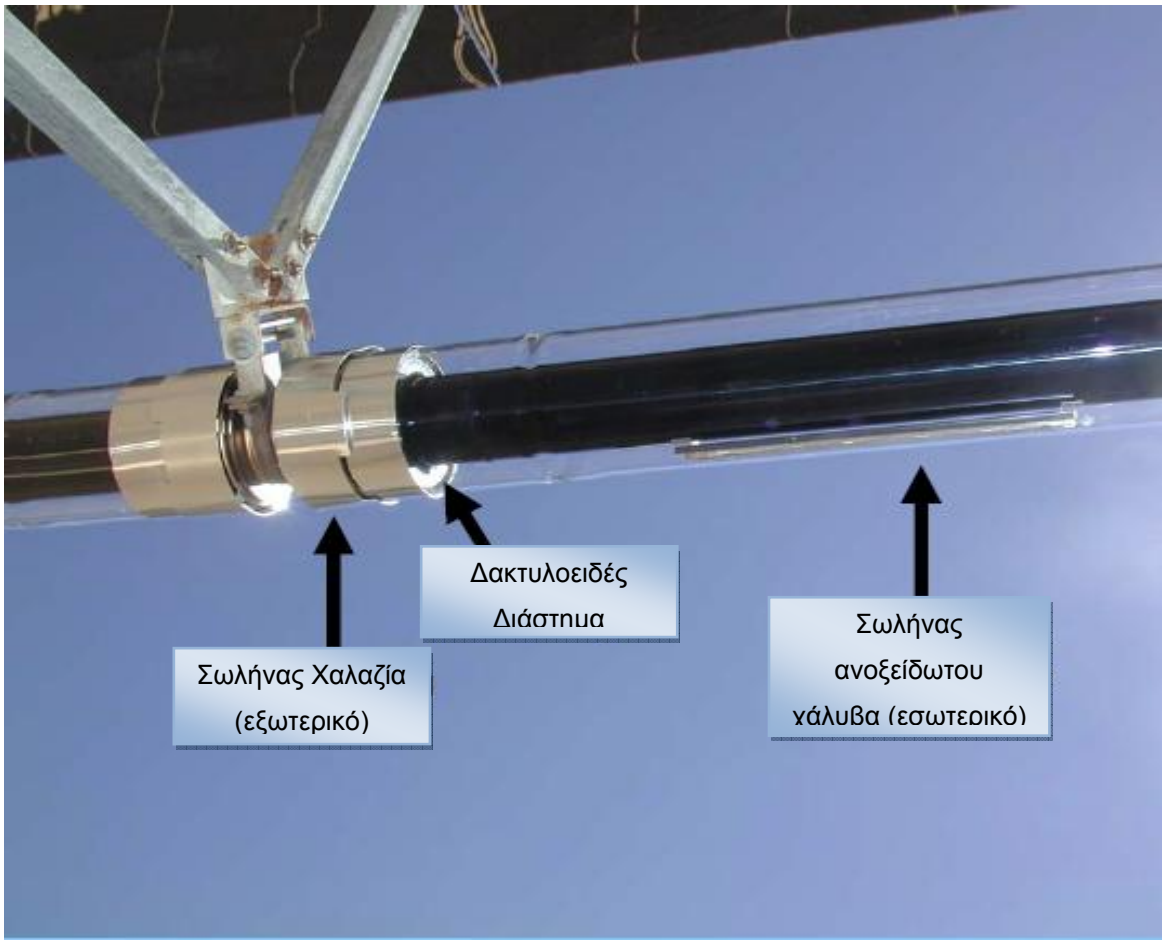
2.2.1 Εισαγωγή

Ένας παραβολικός συλλέκτης (parabolic trough) είναι ένας ηλιακός συμπυκνωτής που ακολουθεί τον Ήλιο γύρω από έναν ενιαίο, περιστροφικό άξονα. Το φως του Ήλιου αντανακλάται από τους παραβολικά διαμορφωμένους καθρέφτες και συγκεντρώνεται πολλαπλάσιες φορές (εως 80 φορές περισσότερο) επάνω στο σωλήνα υποδοχής και συγκεκριμένα στο σημείο εστίασης της παραβολής. Είναι εξοπλισμένος με ένα σύστημα παρακολούθησης της πορείας του Ήλιου που

μετακινεί τον παραβολικό συλλέκτη κάθε στιγμή στη βέλτιστη γωνία προς την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει επάνω στο συλλέκτη.

Σχήμα 2.6: Παραβολικός Συλλέκτης σε δοκιμασία (model: Solel 6)

Ο σωλήνας υποδοχής αποτελείται από έναν σωλήνα ανοξείδωτου χάλυβα που είναι καλυμμένος από ένα ειδικό επίστρωμα. Ο σωλήνας αυτός είναι καλυμμένος από ένα σωλήνα χαλαζία έτσι ώστε να μειώνονται οι θερμικές απώλειες. Το δακτυλοειδές διάστημα μεταξύ του σωλήνα απορρόφησης και του σωλήνα χαλαζία βρίσκεται υπό κενό. Μέσω του σωλήνα απορρόφησης κυκλοφορεί ένα ρευστό, συνήθως συνθετικό έλαιο, το οποίο θερμαίνεται από τη συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία μέχρι μια θερμοκρασία, σχεδόν 400°C. Το έλαιο μεταφέρει τη θερμότητα αυτή από τον ηλιακό τομέα του πάρκου στον τομέα παραγωγής ισχύος όπου η ενέργεια μετατρέπεται σε ατμό υψηλής ενθαλπίας μέσα από μια σειρά εναλλακτών θερμότητας. Αυτός ο ατμός μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας έναν συμβατικό στρόβιλο ατμού και ηλεκτρογεννήτρια.



Σχήμα 2.7: Ο σωλήνας υποδοχής ενός Παραβολικού Συλλέκτη

2.2.2 Το μοντέλο των Παραβολικών Συλλεκτών για το σύστημα παραγωγής ενέργειας που μελετάται στην παρούσα εργασία

Για τις ανάγκες της μοντελοποίησης των δομικών στοιχείων του συστήματος που εξετάζεται στην παρούσα εργασία θεωρούμε ότι κάθε παραβολικός συλλέκτης είναι ένα σύστημα με ορισμένες εισόδους και εξόδους. Εκτός από την ημέρα του έτους για την οποία πρέπει να υπολογιστεί η παραγόμενη ενέργεια του παραβολικού συλλέκτη, οι υπόλοιπες εισόδοι μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες. Σε αυτές που αφορούν τα μετεωρολογικά δεδομένα του τόπου που εξετάζεται και σε αυτές που σχετίζονται με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των παραβολικών συλλεκτών.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που λαμβάνονται ως είσοδοι είναι η συνολική ημερήσια ή μηνιαία ακτινοβολία G (Wh/m^2) η οποία είναι διαθέσιμη στο οριζόντιο επίπεδο. Ακολουθώντας όμως τη διαδικασία που έχει ήδη περιγραφεί [Σχήμα 2.5

και Εξ. (2.5) – (2.27)] μπορεί να υπολογιστεί η ακτινοβολία για όλες τις κλίσεις από -90° εως 90°.

Όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο οι παραβολικοί συλλέκτες μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια πρώτα σε θερμική και στη συνέχεια αυτή μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω μιας γεννήτριας.

Η Εξ. (2.28) μας δίνει την θερμική ενέργεια που παράγει ένας παραβολικός συλλέκτης:

$$S_to_th = R \cdot MR \cdot RA \cdot CE \qquad (2.28)$$

όπου:

S_to_th (Solar energy to thermal energy)

R είναι η ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη,

MR είναι η ικανότητα των κατόπτρων να αντανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία (Mirror Reflectivity),

RA η ικανότητα του δέκτη (σωλήνας στον οποίο εστιάζεται η ακτινοβολία) να απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία (Receiver Absorbance) και

CE η απόδοση του συλλέκτη.(Collector Efficiency)

Η επόμενη εξίσωση (Εξ. (2.29)) μας δίνει την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται:

$$Th_to_el = S_to_th \cdot TE \cdot GE \cdot (1 - PHL) \qquad (2.29)$$

όπου:

Th_to_el (Thermal energy to electric energy)

S_to_th η ποσότητα που υπολογίζεται από την Εξ. (2.28),

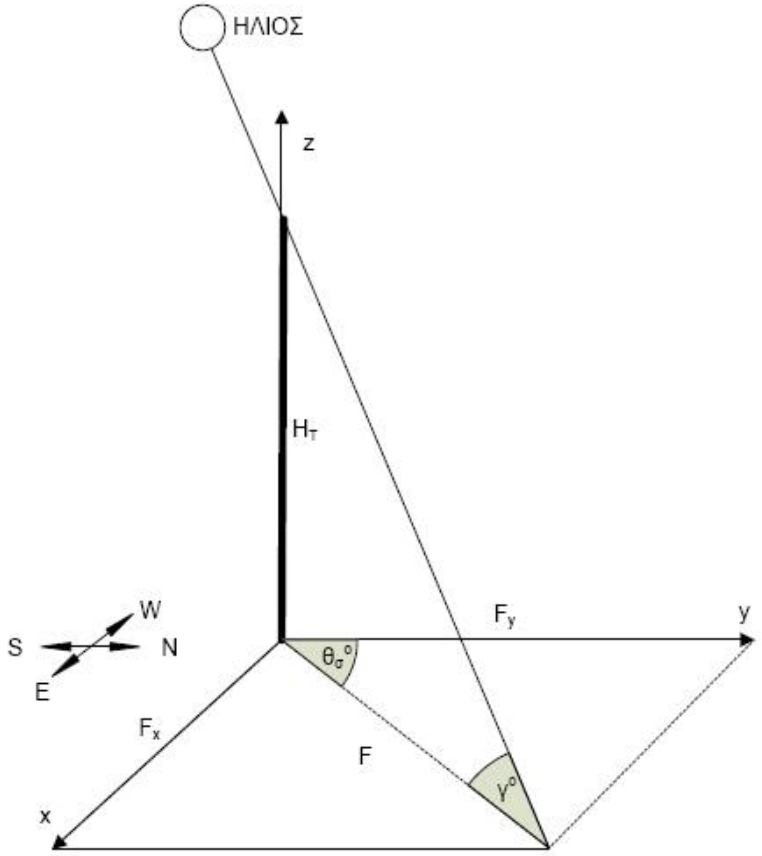
TE η απόδοση του στρόβιλου (Turbine Efficiency),

GE η απόδοση της γεννήτριας (Generator Efficiency) και

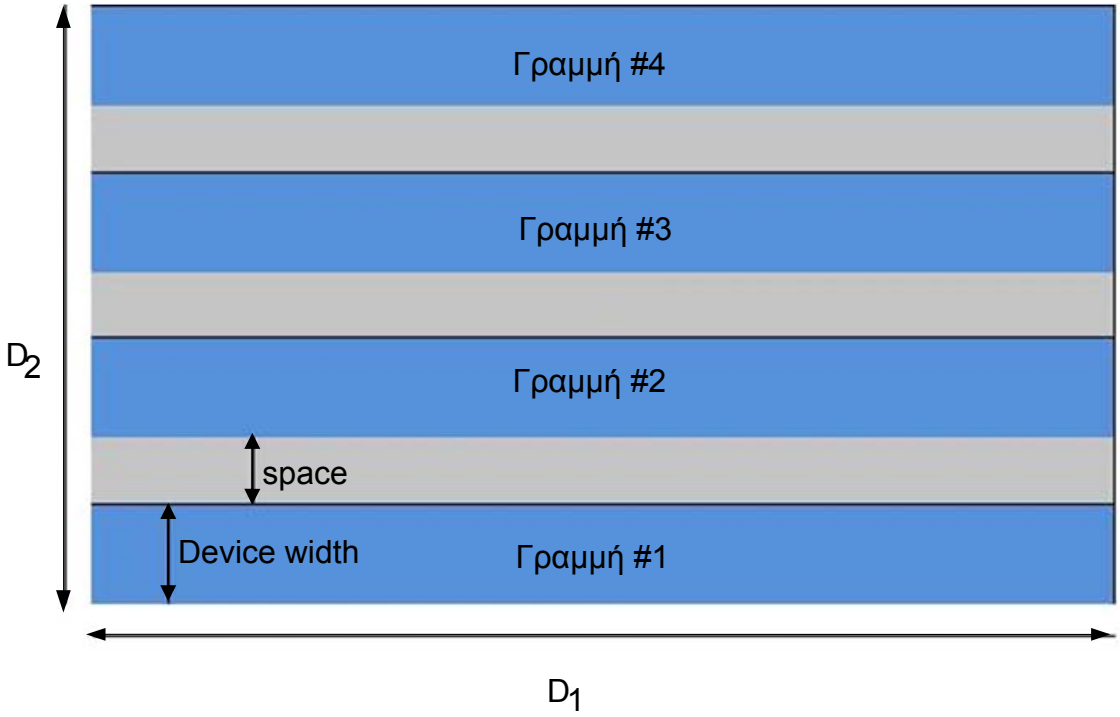
PHL οι απώλειες από τις σωληνώσεις και τους εναλλάκτες θερμότητας (Pipes – Heat Exchangers Losses)

2.3 Σκίαση των Παραβολικών Συλλεκτών

Η εγκατάσταση ενός μεγάλου αριθμού Παραβολικών Συλλεκτών σε πάρκα ηλιακής ενέργειας δημιουργεί το φαινόμενο της σκίασης μεταξύ γειτονικών συλλεκτών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μειωμένη απόδοση των Παραβολικών Συλλεκτών που σκιάζονται. Συνεπώς, ο συγκεκριμένος παράγοντας πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη όταν εγκαθίστανται συστήματα παραγωγής ενέργειας από Παραβολικά Κάτοπτρα, όπως αυτό που εξετάζεται στην παρούσα εργασία. Ο γενετικός αλγόριθμος υπολογίζει την απόσταση που καλύπτει η σκίαση ανάλογα με την μέρα του χρόνου, την ώρα και το ύψος που έχει ο παραβολικός συλλέκτης τη συγκεκριμένη στιγμή και επιλέγει τον καλύτερο συνδυασμό απόστασης – αριθμού Παραβολικών Συλλεκτών ο οποίος δίνει το καλύτερο αποτέλεσμα.



Σχήμα 2.8: Παράγοντες σκίασης



Σχήμα 2.9: Διάταξη των Παραβολικών Κατόπτρων εντός της διαθέσιμης έκτασης

Η διάταξη των Παραβολικών Συλλεκτών εντός της διαθέσιμης έκτασης φαίνεται στο Σχήμα 2.9.

Στο Σχήμα 2.8 απεικονίζονται οι παράγοντες της σκίασης για εγκατεστημένο σύστημα Παραβολικών Συλλεκτών με κάθετο ύψος ίσο με H_T. Με θ_σ συμβολίζεται η αζιμούθια γωνία που έχει οριστεί προηγουμένως, ενώ με γ συμβολίζεται η γωνία ηλιακού ύψους (altitude) για την οποία ισχύει η σχέση:

$$\sin\gamma = \sin\delta\sin\varphi + \cos\delta\cos\varphi\cos\omega \qquad (2.30)$$

όπου:

φ το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (^{o}),

δ η γωνία ηλιακής απόκλισης (^{o}) η οποία υπολογίζεται από την Εξ. (2.7) και

ω η γωνία ηλιακού χρόνου (^{o}) η οποία υπολογίζεται από την Εξ. (2.27).

Στο Σχήμα 2.8 με F είναι σημειωμένο το μήκος της σκίασης, δηλαδή η απόσταση του σημείου προβολής στο έδαφος του ανατολικού άκρου της βόρειας πλευράς της στήλης από το σημείο μέχρι το οποίο υπάρχει η σκίαση. Το F αναλύεται στις συνιστώσες F_x και F_y. Για το μήκος F ισχύει η σχέση:

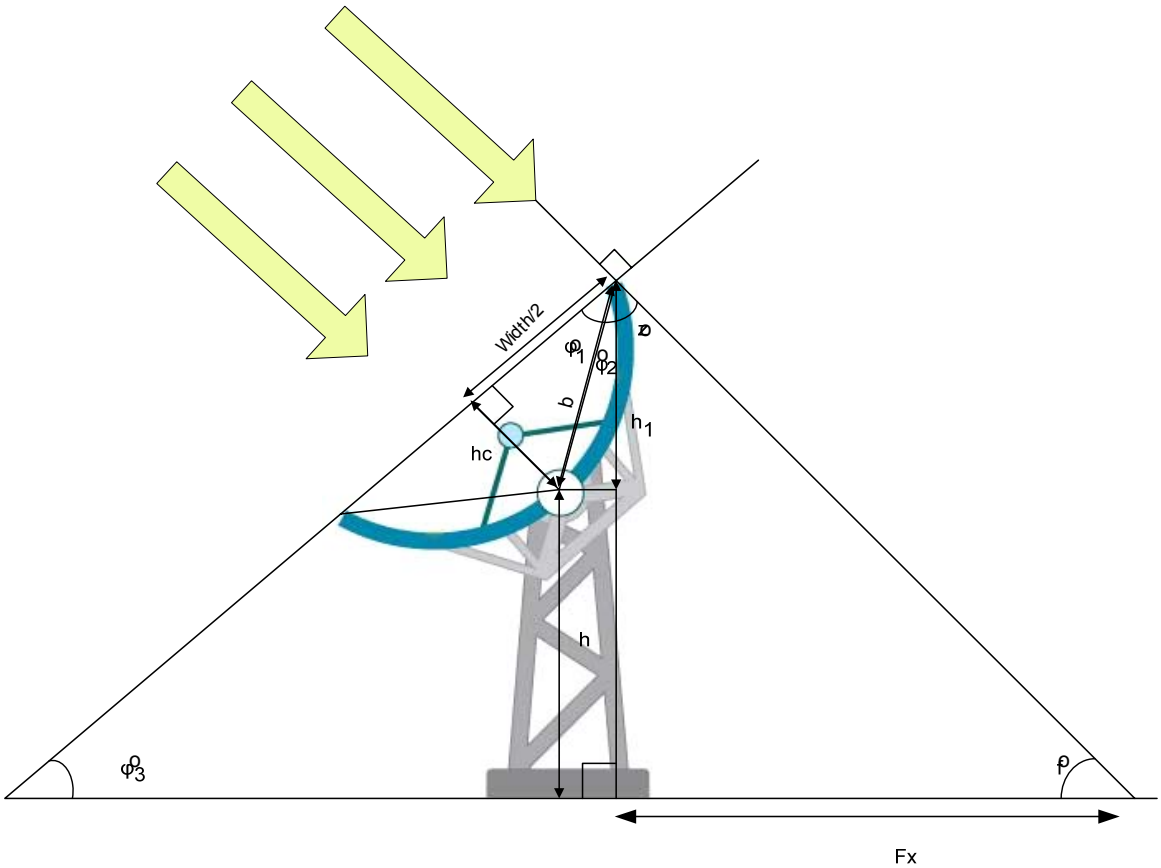
$$F = \frac{H_T}{\tan\gamma} \tag{2.31}$$

Στο σύστημα που εξετάζεται, επειδή θεωρούμε ότι οι Παραβολικοί Συλλέκτες είναι προσανατολισμένοι προς την Ανατολή το πρωί και προς την Δύση μετά το ηλιακό μεσημέρι, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, μας ενδιαφέρει μόνο η συνιστώσα F_x η οποία δίνεται από την σχέση:

$$F_x = H_T \frac{\cos\delta \sin\omega}{\sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos\omega} \tag{2.32}$$

Όπως αναφέρθηκε, η απόσταση αυτή υπολογίζεται για όλες τις ώρες του έτους και για κάθε ύψος που έχει ο παραβολικός συλλέκτης σε κάθε στιγμή. Ο αλγόριθμος επιλέγει την απόσταση (space) η οποία σε συνδυασμό με τον αριθμό των Παραβολικών Συλλεκτών θα δώσει το καλύτερο αποτέλεσμα.

Το ύψος H_T του Παραβολικού Συλλέκτη υπολογίζεται ακολουθώντας την πιο κάτω διαδικασία.



Σχήμα 2.10: Ο Παραβολικός Συλλέκτης και οι γωνίες που χρειάστηκαν για τον υπολογισμό του συνολικού ύψους H_T.

Το ύψος της βάσης h θεωρήθηκε ότι είναι ίσο με την απόσταση b συν μια ελάχιστη απόσταση την οποία εισάγει ο χρήστης (στην περίπτωση που εξετάζεται η ελάχιστη απόσταση τέθηκε ίση με 0.1m).

Η απόσταση b υπολογίζεται από τη σχέση:

$$b = \frac{width/2}{\cos\varphi_1} \tag{2.33}$$

όπου:

width είναι το πλάτος του παραβολικού συλλέκτη και

φ_1 η γωνία που φαίνεται στο Σχήμα 2.10 και δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \tan\varphi_1 &= \frac{h_c}{\frac{width}{2}} = \frac{2h_c}{width} \\ \Rightarrow \varphi_1 &= \arctan\left(\frac{2h_c}{width}\right) \end{aligned} \tag{2.34}$$

όπου:

h_c το ύψος της παραβολής, το οποίο ορίζεται ως η μέγιστη απόσταση από το κέντρο της παραβολής σε μια γραμμή που ενώνει τα δύο άκρα της και δίνεται από τη σχέση:

$$h_c = \frac{width^2}{16 \cdot f} \tag{2.35}$$

όπου:

f η απόσταση εστίασης του παραβολικού συλλέκτη (focal length)

Θεωρώντας ότι το ύψος H_T είναι ίσο με 1m τότε η απόσταση F_x δίνεται από τη σχέση:

$$F_x = \frac{\cos\delta\sin\omega}{\sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega} \tag{2.36}$$

και έτσι η γωνία z δίνεται από τη σχέση:

$$z = \arctan(F_x) \tag{2.37}$$

Αφού τώρα υπολογίστηκαν οι γωνίες z και φ_1, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η γωνία φ_2 και ως επακόλουθο και το ύψος h_1 με τις πιο κάτω σχέσεις:

$$z + \varphi_1 + \varphi_2 = 90^o \Rightarrow \varphi_2 = 90^o - \varphi_1 - z \tag{2.38}$$

$$h_1 = \cos\varphi_2 \cdot b \tag{2.39}$$

Και το συνολικό ύψος H_T δίνεται από τη σχέση:

$$H_T = h + h_1 \tag{2.40}$$

Σε περίπτωση που η απόσταση μεταξύ των στηλών η οποία επιλέγεται από τον γενετικό αλγόριθμο, είναι μικρότερη από την απόσταση F_x, δηλαδή όταν υπάρχει αλληλοσκίαση μεταξύ των στηλών των παραβολικών συλλεκτών, το πλάτος σκίασης υπολογίζεται με την σχέση:

$$\begin{aligned} \sin f &= \frac{shading_width}{F_x - space} \\ \Rightarrow shading_width &= \sin f \cdot (F_x - space) \end{aligned} \tag{2.41}$$

3. ΟΙ ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

3.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία τριάντα χρόνια, παρατηρείται ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη συστημάτων επίλυσης προβλημάτων βασισμένων στις αρχές της Φυσικής Εξέλιξης. Τα συστήματα αυτού του είδους λειτουργούν διατηρώντας έναν πληθυσμό κωδικοποιημένων πιθανών λύσεων του προβλήματος που προσπαθούμε να επιλύσουμε, και εφαρμόζοντας πάνω σε αυτόν διάφορες διαδικασίες εμπνευσμένες από τη βιολογική εξέλιξη. Έτσι, περνώντας από γενεά σε γενεά, τα συστήματα αυτά δημιουργούν συνεχώς νέους πληθυσμούς πιθανών λύσεων εξελίσσοντας τους προηγούμενους πληθυσμούς. Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι ένα παράδειγμα τέτοιου συστήματος.

Η πρώτη εμφάνιση των γενετικών αλγορίθμων χρονολογείται στις αρχές του 1950, όταν διάφοροι επιστήμονες από το χώρο της βιολογίας αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν υπολογιστές στην προσπάθειά τους να προσομοιώσουν πολύπλοκα βιολογικά συστήματα. Η συστηματική τους ανάπτυξη όμως, που οδήγησε στην μορφή με την οποία είναι γνωστοί σήμερα, πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 1970 από τον John Holland και τους συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Michigan.

Η βασική ιδέα που κρύβεται πίσω από τους γενετικούς αλγόριθμους είναι η μίμηση των μηχανισμών της βιολογικής εξέλιξης που απαντώνται στη φύση. Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν ορολογία δανεισμένη από το χώρο της Φυσικής Γενετικής. Αναφέρονται σε άτομα ή γενότυπους μέσα σε ένα πληθυσμό. Κάθε άτομο ή γενότυπος αποτελείται από χρωμοσώματα. Στους γενετικούς αλγόριθμους αναφερόμαστε συνήθως σε άτομα με μόνο ένα χρωμόσωμα. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από γονίδια που είναι διατεταγμένα σε γραμμική ακολουθία. Κάθε γονίδιο επηρεάζει την κληρονομικότητα ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών. Τα γονίδια που επηρεάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του ατόμου βρίσκονται και σε συγκεκριμένες θέσεις του χρωμοσώματος.

Κάθε γενότυπος αναπαριστά μια πιθανή λύση σε ένα πρόβλημα. Το "αποκωδικοποιημένο" περιεχόμενο ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος καλείται φαινότυπος. Μια διαδικασία εξέλιξης που εφαρμόζεται πάνω σε ένα πληθυσμό αντιστοιχεί σε ένα εκτενές ψάξιμο στο χώρο των πιθανών λύσεων. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχημένη έκβαση ενός τέτοιου ψαξίματος αποτελεί η εξισορρόπηση δύο διαδικασιών που είναι προφανώς αντικρουόμενες, της εκμετάλλευσης και διατήρησης των καλύτερων λύσεων, και της όσο το δυνατόν καλύτερης εξερεύνησης όλου του διαστήματος.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι διατηρούν ένα πληθυσμό πιθανών λύσεων, του προβλήματος που μας ενδιαφέρει, πάνω στον οποίο δουλεύουν, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους αναζήτησης που επεξεργάζονται ένα μόνο σημείο του διαστήματος αναζήτησης. Έτσι ένας γενετικός αλγόριθμος πραγματοποιεί αναζήτηση σε πολλές κατευθύνσεις και υποστηρίζει καταγραφή και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ αυτών των κατευθύνσεων. Ο πληθυσμός υφίσταται μια προσομοιωμένη γενετική εξέλιξη. Σε κάθε γενεά, οι σχετικά καλές λύσεις αναπαράγονται, ενώ οι σχετικά κακές απομακρύνονται. Ο διαχωρισμός και η αποτίμηση των διαφόρων λύσεων γίνεται με τη βοήθεια μια αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο εξελίσσεται ο πληθυσμός.

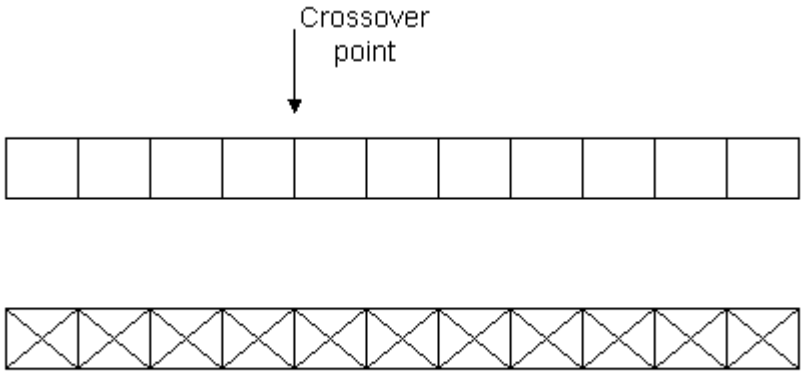
3.2 Ο βασικός γενετικός αλγόριθμος

Η δομή ενός απλού γενετικού αλγορίθμου έχει σε γενικές γραμμές ως εξής: κατά την διάρκεια της γενεάς t, ο γενετικός αλγόριθμος διατηρεί ένα πληθυσμό P(t) από n πιθανές λύσεις. Κάθε πιθανή λύση αποτιμάται και δίνει ένα μέτρο της καταλληλότητας και ορθότητάς της. Αφού ολοκληρωθεί η αποτίμηση όλων των μελών του πληθυσμού, δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός (γενεά t+1) που προκύπτει από την επιλογή των πιο κατάλληλων στοιχείων του πληθυσμού της προηγούμενης γενεάς. Μερικά μέλη από τον καινούργιο αυτό πληθυσμό υφίστανται αλλαγές με την βοήθεια των γενετικών διαδικασιών της διασταύρωσης και της μετάλλαξης σχηματίζοντας νέες πιθανές λύσεις.

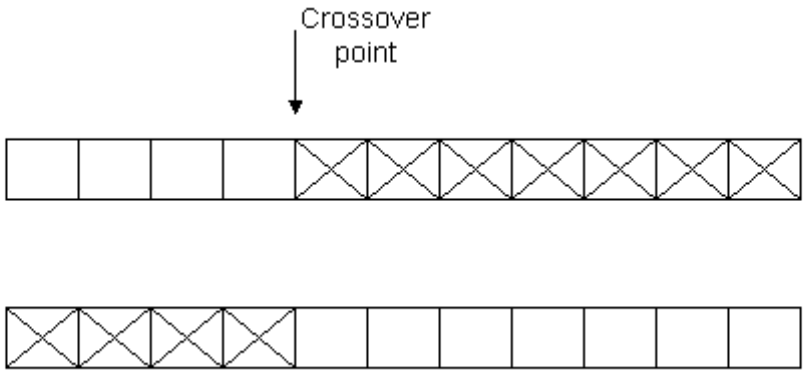
Ειδικότερα, οι τρεις πράξεις του βασικού γενετικού αλγορίθμου είναι η επιλογή, η διασταύρωση και η μετάλλαξη.

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. Για τους μηχανισμούς επιλογής που χρησιμοποιούνται γίνεται λόγος στην παράγραφο 3.5.

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 δύο νέοι απόγονοι. Διαισθητικά μπορούμε να πούμε ότι η διασταύρωση εξυπηρετεί την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ διαφορετικών πιθανών λύσεων. Η πράξη της διασταύρωσης παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.1 – 3.3.



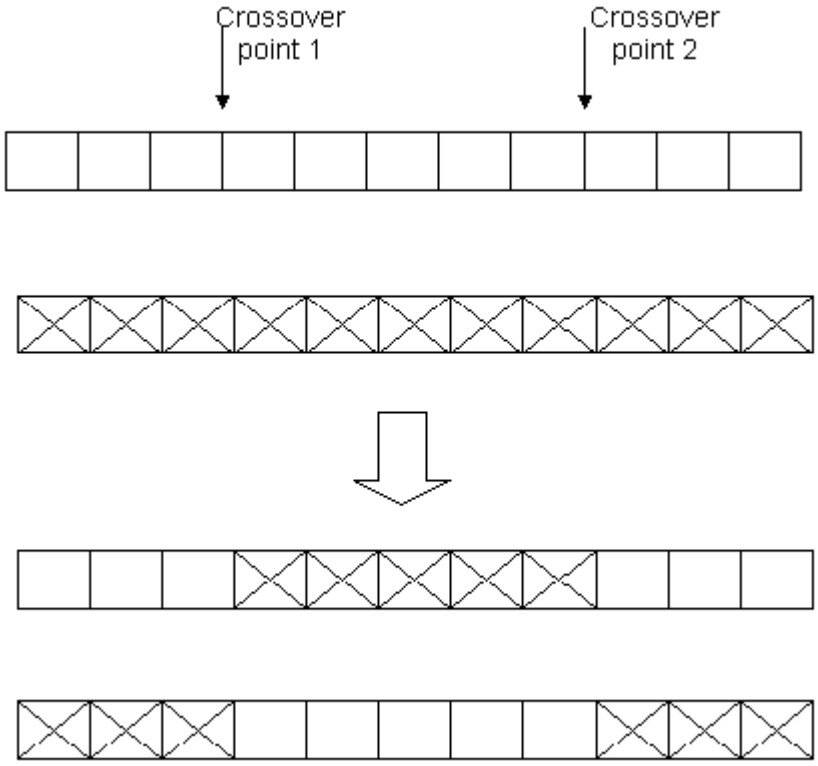
Σχήμα 3.1: Χρωμοσώματα πριν τη διασταύρωση



Σχήμα 3.2: Χρωμοσώματα μετά τη διασταύρωση

Στο Σχήμα 3.1 φαίνονται δύο χρωμοσώματα που είναι έτοιμα να διασταυρωθούν στο σημείο ακριβώς μετά το τέταρτο γονίδιο. Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζονται τα δύο χρωμοσώματα μετά την διασταύρωση.

Η διασταύρωση μπορεί να λάβει χώρα και σε περισσότερα του ενός σημεία. Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται μια διασταύρωση δύο σημείων.



Σχήμα 3.3: Διασταύρωση δύο σημείων

Ο τελεστής της μετάλλαξης που εφαρμόζεται μετά τον τελεστή της διασταύρωσης αλλάζει αυθαίρετα ένα ή περισσότερα γονίδια ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος. Πραγματοποιείται με τυχαία αλλαγή γονιδίων με πιθανότητα ίση με το ρυθμό μετάλλαξης (mutation rate). Για παράδειγμα, έστω ότι ένα χρωμόσωμα αναπαρίσταται με το διάνυσμα πέντε διαστάσεων (a,b,c,d,e), τότε το χρωμόσωμα που θα προκύψει με μετάλλαξη στη δεύτερη και στην τέταρτη διάσταση είναι το (a,b_1,c,d_1,e). Διαισθητικά μπορεί να λεχθεί ότι η μετάλλαξη εξυπηρετεί στην εισαγωγή νέων πιθανών λύσεων, διαφορετικών από τις υπάρχουσες, στον ήδη υπάρχοντα πληθυσμό.

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.

Συνοψίζοντας, το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει την διαδικασία που ακολουθείται από μια εκτέλεση του βασικού γενετικού αλγορίθμου. Από μια γενεά "i" επιλέγονται με κάποιο μηχανισμό κάποια χρωμοσώματα. Από αυτά κάποια δε θα συμμετάσχουν σε καμιά πράξη, ενώ κάποια θα διασταυρωθούν και άλλα θα μεταλλαχθούν δημιουργώντας έτσι μια νέα γενεά.

Σχήμα 3.4: Ο βασικός γενετικός αλγόριθμος σε μια εκτέλεσή του

3.3 Κωδικοποίηση μεταβλητών

Μια κρίσιμη απόφαση που πρέπει να γίνει κατά την μοντελοποίηση ενός προβλήματος με γενετικούς αλγορίθμους είναι η κωδικοποίηση των μεταβλητών της συνάρτησης βελτιστοποίησης. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος κωδικοποίησης είναι 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. Παρόλα αυτά παρουσιάζει όμως ένα πολύ βασικό μειονέκτημα. Αν οι μεταβλητές του προβλήματος παίρνουν τιμές σε ένα πολύ μεγάλο εύρος τότε είναι φυσικό να χρειάζονται πολλά bits για να κωδικοποιηθούν. Το πρόβλημα γίνεται ακόμα μεγαλύτερο όταν αυξάνεται ταυτόχρονα και ο αριθμός των μεταβλητών (γονιδίων) του προβλήματος. Σε αυτή την περίπτωση τα χρωμοσώματα έχουν πολύ μεγάλο μήκος και η απόδοση των γενετικών αλγορίθμων είναι μικρή. Επίσης ένα άλλο πολύ σημαντικό πρόβλημα, εμφανίζεται στις περιπτώσεις που έχουμε πραγματικές μεταβλητές αφού η κωδικοποίηση πραγματικών αριθμών με δυαδικά ψηφία είναι δύσκολη.

Για αυτούς του λόγους, σε ένα ευρύ σύνολο προβλημάτων, χρησιμοποιείται η floating point αναπαράσταση. Σε μια τέτοια αναπαράσταση ένα χρωμόσωμα έχει

τη μορφή [α_1 α_2 α_3...] όπου τα α_i είναι πραγματικοί αριθμοί που παίρνουν τιμές μέσα από ένα συγκεκριμένο εύρος [$\underline{\alpha}_i$, $\overline{\alpha}_i$]. Το $\underline{\alpha}_i$ είναι το κάτω φράγμα και το $\overline{\alpha}_i$ 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 όταν ένα γονίδιο επιλεχθεί για μετάλλαξη τότε η νέα του τιμή θα επιλέγεται τυχαία μέσα από το επιτρεπτό εύρος τιμών του.

3.4 Η αντικειμενική συνάρτηση και η συνάρτηση προσαρμογής.

Αντικειμενική συνάρτηση (objective function) ενός προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η συνάρτηση που αντιπροσωπεύει ένα πρόβλημα και την οποία θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε. Αυτή μπορεί να εκφράζει, ανάλογα με το πρόβλημα, οικονομικό κόστος, χρονικό κόστος, ποσότητα κάποιου μεγέθους κ.τ.λ. και μπορεί να λαμβάνει τόσο θετικές όσο και αρνητικές τιμές. Συνάρτηση προσαρμογής (fitness function) ενός γενετικού αλγορίθμου είναι η συνάρτηση που προέρχεται από την αντικειμενική συνάρτηση μέσω κάποιας αντιστοίχισης – μετατροπής και η οποία χρησιμοποιείται από τον γενετικό αλγόριθμο για την πράξη της επιλογής. Ενώ η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να παίρνει και αρνητικές και θετικές τιμές, η συνάρτηση προσαρμογής πρέπει να παίρνει μόνο μη – αρνητικές τιμές. Περισσότερα για τη συνάρτηση προσαρμογής και το πώς χρησιμοποιείται από την πράξη της επιλογής παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.5. Πρέπει όμως πρώτα να γίνει μια διευκρίνιση για τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η αντιστοίχηση μεταξύ της αντικειμενικής συνάρτησης και της συνάρτησης προσαρμογής.

Αρχικά πρέπει να διακρίνουμε δύο περιπτώσεις προβλημάτων. Τα προβλήματα μεγιστοποίησης και τα προβλήματα ελαχιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης. Οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εύρεση του μεγίστου μιας συνάρτησης. Εάν έχουμε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση την g(X) όπου X το διάνυσμα των μεταβλητών, για να επιλύσουμε το πρόβλημα με γενετικό αλγόριθμο δεν έχουμε παρά να θεωρήσουμε τη συνάρτηση f(X)= - g(X), οπότε αυτόματα το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης μεταβάλλεται σε πρόβλημα μεγιστοποίησης.

Έστω τώρα ότι παρουσιάζεται ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης μιας συνάρτησης. Για να μετατραπεί η αντικειμενική συνάρτηση g(X) σε συνάρτηση προσαρμογής (για να λαμβάνει δηλαδή μόνο μη αρνητικές τιμές) χρησιμοποιείται η εξής μετατροπή:

$$f(X)=\begin{cases} g(X)+C_{min}, & \text{αν } g(X)+C_{min}>0 \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \tag{3.1}$$

Η ποσότητα C_{min} μπορεί να είναι μια παράμετρος εισόδου ή η απόλυτη τιμή της ελάχιστης τιμής της g(X) για την τρέχουσα γενεά. Στην περίπτωση που αντιμετωπίζεται πρόβλημα ελαχιστοποίησης η αντιστοίχηση μεταξύ αντικειμενικής και συνάρτησης προσαρμογής βασίζεται στην εξής μετατροπή:

$$f(X)=\begin{cases} C_{max}-g(X), & \text{αν } C_{max}-g(X)>0 \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \tag{3.2}$$

Και εδώ το C_{max} μπορεί να είναι παράμετρος εισόδου αλλά το πιο σωστό είναι να επιλέγεται ως η μέγιστη τιμή της g(X) για κάθε γενεά.

3.5 Μηχανισμοί επιλογής (selection mechanisms)

Η πράξη της επιλογής είναι πιθανόν η κρισιμότερη από τις πράξεις των γενετικών αλγορίθμων αφού από αυτήν θα προκύψει το σύνολο των χρωμοσωμάτων τα οποία θα διασταυρωθούν και θα μεταλλαχθούν δίνοντας απογόνους στην επόμενη γενεά. Οι μηχανισμοί που έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί για την πράξη της επιλογής είναι αρκετοί και έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό. Χρησιμοποιούν τη συνάρτηση προσαρμογής για να “αποφασίσουν” 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. Αρχικά υπολογίζεται η συνάρτηση προσαρμογής f_i για όλα τα χρωμοσώματα μιας γενεάς (N θεωρείται το πλήθος των χρωμοσωμάτων ανά γενεά). Στη συνέχεια υπολογίζεται το άθροισμα $\sum_{i=1}^{N} f_i$ και για κάθε

χρωμόσωμα υπολογίζεται η πιθανότητα επιλογής του p_i. Η πιθανότητα αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^{N} f_i} \tag{3.3}$$

Αφού έχουν υπολογιστεί η πιθανότητες p_i ακολουθεί η τυχαία γέννηση αριθμών για N φορές μέσα στο διάστημα [0,1]. Ένα χρωμόσωμα επιλέγεται αν ο τυχαίος αριθμός που γεννήθηκε είναι μικρότερος από την πιθανότητα του χρωμοσώματος αυτού και μεγαλύτερη από την αμέσως μικρότερη πιθανότητα χρωμοσώματος. Ο αναμενόμενος αριθμός ενός χρωμοσώματος δίνεται από τη σχέση:

$$n_i = \frac{f_i}{\bar{f}} = N \cdot p_i \tag{3.4}$$

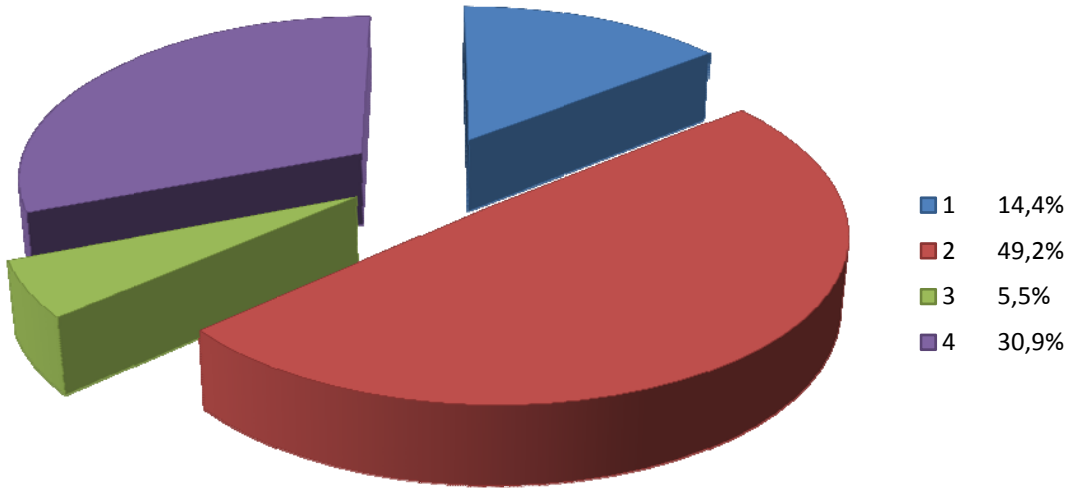
όπου $\bar{f}$ είναι η μέση τιμή της συνάρτησης προσαρμογής.

Για να γίνει πιο σαφής ο μηχανισμός αυτός ακολουθεί ένα παράδειγμα. Έστω η συνάρτηση προσαρμογής μιας μεταβλητής $f(x) = x^2$ και έστω ότι διατίθεναται τα εξής τέσσερα χρωμοσώματα: [13], [24], [8] και [19] (δηλαδή N=4). Στον Πίνακα 3.1 φαίνονται οι τιμές της συνάρτησης, οι πιθανότητες επιλογής των χρωμοσωμάτων, ο αναμενόμενος αριθμός επιλογής κάθε χρωμοσώματος και ο πραγματικός αριθμός επιλογής όπως προέκυψε από τις γεννήσεις τεσσάρων τυχαίων αριθμών.

Πίνακας 3.1 Επιλογή τροχού ρουλέτας

X	$f(x) = x^2$	p_i	n_i	$n_{i,actual}$
13	169	0.14	0.58	1
24	576	0.49	1.97	2
8	64	0.06	0.22	0
19	361	0.31	1.23	1
Άθροισμα	1170	1	4	4
Μέσος Όρος	293	0.25	1	1
Μέγιστη Τιμή	576	0.49	1.97	2

Όπως φαίνεται, το χρωμόσωμα [24] επιλέγεται 2 φορές, τα [13] και [19] 1 φορά και το [8] καμιά φορά. Τα αποτελέσματα αυτά είναι πολύ κοντά στα αναμενόμενα τα οποία βρίσκονται στην τέταρτη στήλη του πίνακα. Το παρακάτω σχήμα δείχνει την κατανομή των πιθανοτήτων p_i. Επειδή η γέννηση ενός τυχαίου αριθμού για την επιλογή ενός χρωμοσώματος μοιάζει με τη ρίψη της μπίλιας στη ρουλέτα, η μέθοδος αυτή ονομάστηκε μέθοδος του τροχού της ρουλέτας.



Σχήμα 3.5: Κατανομή πιθανοτήτων επιλογής χρωμοσωμάτων για το παράδειγμα του Πίνακα 3.1

Όσο μεγαλύτερη επιφάνεια κατέχει ένα χρωμόσωμα στη ρουλέτα τόσο μεγαλύτερη πιθανότητα έχει να επιλεχθεί για να δώσει απογόνους στην επόμενη γενεά.

Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά και άλλοι μηχανισμοί επιλογής οι οποίοι έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί σε διάφορα προβλήματα.

- *Ελιτισμός*: Τα άτομα με καλύτερη ποιότητα από κάθε γενεά είναι εγγυημένο ότι θα επιλεγούν. (Οι περισσότεροι ΓΑ δεν χρησιμοποιούν καθαρό ελιτισμό, αλλά αντιθέτως, χρησιμοποιούν μία τροποποιημένη μορφή όπου το μοναδικό καλύτερο, ή λίγα από τα καλύτερα άτομα από κάθε γενεά αντιγράφονται στην επόμενη σε περίπτωση που δεν υπάρξει κάτι καλύτερο.

- *Αναλογία Ποιότητας*: Τα πιο ποιοτικά άτομα είναι πιο πιθανόν, αλλά όχι βέβαιο, για να επιλεχθούν.

- *Τροχός της Ρουλέτας*: Μία μορφή, που έχει την σωστή αναλογία ποιότητας στην οποία η τύχη ενός ατόμου να επιλεγεί είναι ανάλογη στο μέγεθος κατά το οποίο η ποιότητά του είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την ποιότητα του ανταγωνιστή του. (Εννοιολογικά, αυτό μπορεί να αναπαρασταθεί σαν ένα παιχνίδι ρουλέτας. Κάθε άτομο παίρνει μία φέτα του τροχού, αλλά το πιο ποιοτικό παίρνει μεγαλύτερη φέτα από τα λιγότερο ποιοτικά. Το τροχός τότε γυρίζει και σε όποιο άτομο ανήκει το κομμάτι στο οποίο έχει σταματήσει ο τροχός, τότε επιλέγεται αυτό).

- *Κλιμακωτή*: Καθώς η μέση ποιότητα του πληθυσμού αυξάνεται, η δύναμη της επιλεκτικής πίεσης αυξάνεται επίσης και η συνάρτηση αξιολόγησης γίνεται πιο διακριτή. Αυτή η μέθοδος μπορεί να προσφέρει μεγάλη βοήθεια κάνοντας την καλύτερη επιλογή αργότερα όταν όλα τα άτομα έχουν σχετικά υψηλή ποιότητα και μόνος μικρές διαφορές στην ποιότητα ξεχωρίζουν το ένα από το άλλο.

- *Τουρνουά*: Υποομάδες ατόμων επιλέγονται από έναν μεγαλύτερο πληθυσμό, και μέλη της κάθε ομάδας, διαγωνίζονται το έναν εναντίον του άλλου. Μόνο ένα άτομο από κάθε ομάδα επιλέγεται να αναπαραχθεί.

- *Βαθμική*: Σε κάθε άτομο στον πληθυσμό ανατίθεται ένας αριθμητικός βαθμός βασισμένος στην ποιότητά του και η επιλογή γίνεται με βάση στον βαθμό του παρά στις απόλυτες διαφορές στην ποιότητα. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί να αποτρέψει άτομα με μεγάλη ποιότητα από το να κυριαρχήσουν νωρίς εις βάρος των λιγότερων ποιοτικών, κάτι το οποίο θα μείωνε την γενετική ποικιλομορφία και μπορεί να εμπόδιζε τις προσπάθειες για μία αποδεκτή λύση.

- *Γενεολογική*: Ο απόγονος των ατόμων που επιλέχθηκαν από κάθε γενεά γίνεται η επόμενη ολόκληρη γενεά. Κανένα άτομο δεν διατηρείται μεταξύ των γενιών.

- *Σταθερή κατάσταση*: Ο απόγονος των ατόμων που επιλέχθηκαν από κάθε γενεά πάνε πίσω στην προυπάρχουσα «δεξαμενή» γονιδίων,

αντικαθιστώντας κάποια από τα λιγότερα ποιοτικά μέλη της προηγούμενης γενεάς. Κάποια άτομα διατηρούνται μεταξύ των γενιών.

- *Ιεραρχική*: Τα άτομα περνούν μέσα από πολλαπλούς γύρους επιλογής σε κάθε γενεά. Χαμηλότερου επιπέδου αξιολογήσεις είναι γρηγορότερες και λιγότερο διακριτές, ενώ εκείνες που επιζούν σε ανώτερα επίπεδα αξιολογούνται πιο αυστηρά. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μειώνει τον συνολικό χρόνο υπολογισμού τρέχοντας γρηγορότερα, λιγότερο επιλεκτική αξιολόγηση, για να απομακρύνει την πλειοψηφία των ατόμων τα οποία δίνουν μικρή ή καθόλου υπόσχεση και υποβάλλουν μόνο αυτά τα οποία επιβιώνουν αυτή την αρχική δοκιμασία σε πιο αυστηρή και πιο ακριβή υπολογιστικά αξιολόγηση.

3.6 Πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης

Οι πιθανότητες διασταύρωσης p_c και μετάλλαξης p_m έχουν σχέση με το πλήθος των χρωμοσωμάτων μιας γενεάς που εμπλέκονται στις διαδικασίες της διασταύρωσης και της μετάλλαξης. Αν π.χ. έχουμε ένα πληθυσμό 30 χρωμοσωμάτων και η πιθανότητα διασταύρωσης είναι 50% τότε αναμένεται ότι 15 χρωμοσώματα θα 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 αναφέρονται εδώ:

Για μεγάλους πληθυσμούς (50~100): p_c=60% και p_m=0.1%

Για μικρούς πληθυσμούς (10~50): p_c=90% και p_m=1%

3.7 Χειρισμός περιορισμών

Είναι συχνό φαινόμενο ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης να πρέπει να λυθεί μέσα στα πλαίσια ενός συνόλου από περιορισμούς. Οι περιορισμοί αυτοί αφορούν στις μεταβλητές του προβλήματος και οι σχέσεις που τις περιγράφουν μπορεί να είναι είτε γραμμικές είτε μη – γραμμικές. Στις περιπτώσεις όπου υπάρχουν

προβλήματα με περιορισμούς, πολύ συχνά γεννιούνται κάποιες λύσεις μέσα από τη διαδικασία του αλγορίθμου που δεν πληρούν τις προϋποθέσεις που θέτουν ένας ή περισσότεροι περιορισμοί. Άρα είναι χρήσιμη η ύπαρξη συγκεκριμένων μηχανισμών χειρισμού αυτών των μη επιθυμητών λύσεων.

Μια κατηγορία μηχανισμών για τη διαχείριση των περιορισμών είναι αυτή κατά την οποία γίνεται χρήση μια “penalty function”. Αρχικά το πρόβλημα λύνεται σαν να μην υπάρχουν περιορισμοί. Αν στην συνέχεια προκύψει κάποιο χρωμόσωμα το οποίο παραβιάζει τους περιορισμούς, τότε η πιθανότητα αυτού του χρωμοσώματος να επιλεχθεί μέσα από την πράξη της επιλογής πρέπει να ελαττωθεί. 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 περισσότεροι περιορισμοί παραβιάζονται 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 λύσεις που παραβιάζουν τους περιορισμούς με τέτοιο τρόπο ώστε να τους ικανοποιούν. Τέτοιοι 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.

4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η οικονομική ανάλυση της βιωσιμότητας της επένδυσης βασίζεται στον προσδιορισμό του σύνθετου χρόνου απόσβεσης (payback period) και του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (Internal Rate of Return ή IRR) της επένδυσης. Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζονται τα παραπάνω μεγέθη, αφού πρώτα οριστούν κάποιες οικονομικές παράμετροι και ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν τους διάφορους υπολογισμούς.

4.1 Ορισμοί οικονομικών προβλημάτων

Για την οικονομική αξιολόγηση της υπό εξέταση επένδυσης απαιτείται ο ορισμός των παρακάτω παραμέτρων:

Χρονικός ορίζοντας επένδυσης: ο χρόνος ζωής των Παραβολικών Συλλεκτών κυμαίνεται από 30 χρόνια και άνω. Έτσι ο χρονικός ορίζοντας της αξιολόγησης της επένδυσης δεν μπορεί να υπερβαίνει το όριο ζωής των συσκευών του συστήματος.

Παράμετροι εγχώριας οικονομίας: ένα μέγεθος που επηρεάζει σημαντικά την οικονομική ανάλυση είναι ο *πληθωρισμός* g (%). Πληθωρισμός είναι η αύξηση του κόστους των αγαθών και υπηρεσιών ανά μονάδα χρόνου. Για λόγους ευκολίας, συνηθίζεται ο πληθωρισμός να αναφέρεται σε ένα έτος. Βάσει προβλέψεων που αφορούν τη συμπεριφορά των οικονομικών δεικτών κατά τη διάρκεια της ανάλυσης ο μέσος ετήσιος πληθωρισμός επιλέγεται ίσος με 4.4%. Ένα άλλο μέγεθος που επηρεάζει την ανάλυση είναι το ετήσιο *κόστος χρήματος* i. Ο υπολογισμός του μεγέθους αυτού είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό της καθαρής παρούσας αξίας. Η παράμετρος αυτή εμπλέκεται λόγω της ιδιότητας του χρήματος να μην διατηρεί σταθερή την αξία του. Αυτό συμβαίνει επειδή ένα δολάριο σήμερα έχει μεγαλύτερη αξία από αύριο, επειδή το δολάριο σήμερα μπορεί να επενδυθεί για να αρχίζει να κερδίζει τόκο αμέσως. Αυτή είναι η πρώτη βασική αρχή της οικονομικής. Στον Πίνακα 4.1 που ακολουθεί δίνεται το σύνολο των σταθερών επιτοκίων των Ελληνικών τραπεζών για επιχειρησιακό δάνειο με εξόφληση από 20 έως 25 χρόνια. Χρησιμοποιώντας το κόστος χρήματος,

ανάγουμε τις μελλοντικές καθαρές ταμειακές ροές σε σημερινές αξίες ώστε να είναι συγκρίσιμες με το κόστος εγκατάστασης που εκφράζεται σε σημερινές τιμές και αντίστροφα.

Πίνακας 4.1: Σταθερά επιτόκια Ελληνικών τραπεζών για επιχειρησιακό δάνειο	
Εθνική τράπεζα	7,20%
Citibank	7.86%
Aspis bank	7.75%
Probank	8.05%
Marfin bank	7.25%
Alpha bank	7.25%
Omega bank	7.75%
Τράπεζα Πειραιώς	7.50%
Εμπορική τράπεζα	7.20%
ATE bank	7.45%
Atticabank	7.75%

Σύμφωνα με τον παραπάνω Πίνακα το κόστος χρήματος i λαμβάνεται ίσο με 7.54%.

Επιδότηση εγκατάστασης: το σύστημα παραγωγής ενέργειας που μελετάται αποτελεί εφαρμογή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Λόγω της ωφελιμότητάς τους ως προς το περιβάλλον, τέτοιες επιχειρήσεις είναι δυνατόν να πάρουν επιδότηση όπως ορίζεται στο ισχύον νομικό πλαίσιο.

Παρούσα αξία (P): η μέθοδος της παρούσας αξίας μετατρέπει το σύνολο των χρηματορροών που αναμένεται να εμφανιστούν σε ένα χρονικό ορίζοντα σε μια μοναδική παρούσα αξία σε σταθερό χρόνο μηδέν. Αυτό το χρηματικό ποσό αναφέρεται ως παρούσα αξία. Φυσικά, αυτό μπορεί να γίνει μόνο βάσει κάποιας υπόθεσης εργασίας για το προεξοφλητικό επιτόκιο i. Με αυτή την προσέγγιση εάν σήμερα επενδυθεί ποσό P, το άθροισμα του κεφαλαίου και τόκων (γενικότερα, απόδοσης κεφαλαίου) μετά από n έτη θα είναι:

$$F = P(1+i)^n \tag{4.1}$$

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

$$P = \frac{F}{(1+i)^n} \tag{4.2}$$

<u>Συντελεστής παρούσας αξίας (present worth factor, PWF)</u>: εάν μια πληρωμή επαναλαμβάνεται κάθε χρονική περίοδο επί n περιόδους και δε μεταβάλλεται παρά μόνον εξαιτίας του πληθωρισμού g, τότε η παρούσα αξία των n ποσών υπολογίζεται με τη σχέση:

$$P = \sum_{t=1}^{n} P_t = A \cdot PWF \tag{4.3}$$

όπου:

A το ποσό της πληρωμής και

PWF ο συντελεστής παρούσας αξίας που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$PWF = \sum_{t=1}^{n} \frac{(1+g)^{t-1}}{(1-i)^t} = \frac{1-\left(\frac{1+g}{1+i}\right)^n}{1-g} \tag{4.4}$$

<u>Καθαρή παρούσα αξία επένδυσης (Net present value, NPV)</u>: καθαρή παρούσα αξία είναι το συνολικό καθαρό όφελος μιας επένδυσης, που προκύπτει ως η 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, ανηγμένη συνήθως στην αρχή του πρώτου έτους λειτουργίας του συστήματος. Η καθαρή παρούσα αξία στην περίπτωσή μας προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$NPV = \frac{R_n}{(1+i)^n} - IC_0 - \frac{FC_n}{(1+i)^n} \tag{4.5}$$

όπου:

IC_0 το αρχικά επενδυμένο κεφάλαιο,

FC_n το συνολικό κόστος εγκατάστασης ανηγμένο στο n – οστό έτος και

R_n τα κέρδη από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας ανηγμένα στο n – οστό έτος

Ο αναλυτικός τρόπος υπολογισμού των παραμέτρων IC_n, FC_n και R_n περιγράφεται στο 6° κεφάλαιο.

4.2 Μέθοδος προσδιορισμού χρόνου απόσβεσης

Ο χρόνος απόσβεσης (payback period) n^* ορίζεται ως το χρονικό σημείο κατά το οποίο η διαφορά των συνολικών εσόδων από το άθροισμα του αρχικού κεφαλαίου που επενδύθηκε και των συνολικών εξόδων συντήρησης είναι μηδενική. Επομένως, ισχύει η σχέση:

$$NPV = 0, \text{ για } n=n^* \tag{4.6}$$

Συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία επιλέγεται το μεγαλύτερο δυνατό n^*, δηλαδή η τελευταία φορά στα n χρόνια της μελέτης που ισχύει η Εξ. (4.6). Αυτό γίνεται επειδή είναι δυνατόν, π.χ. λόγω συντήρησης - επισκευής των συσκευών και συνεπώς λόγω μεγάλης αύξησης των συνολικών εξόδων σε μια στιγμή μεταγενέστερη ενός χρονικού σημείου n^*, να προκύπτουν περισσότερα του ενός σημεία n^* για τα οποία ισχύει η Εξ. (4.6). Επίσης, στην παρούσα εργασία ο χρόνος απόσβεσης υπολογίζεται με ακρίβεια ενός δεκάτου του έτους.

4.3 Μέθοδος υπολογισμού εσωτερικού βαθμού απόδοσης

Η δεύτερη μέθοδος που χρησιμοποιείται για την οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης σε συνδυασμό με τη μέθοδο προσδιορισμού του χρόνου απόσβεσης είναι η μέθοδος προσδιορισμού του εσωτερικού βαθμού απόδοσης της επένδυσης (IRR). Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης ορίζεται ίσος με εκείνο το κόστος χρήματος για το οποίο η καθαρά παρούσα αξία της επένδυσης είναι μηδενική στα n χρόνια της αξιολόγησης. Ισχύει, δηλαδή, η εξής σχέση:

$$NPV = 0, \text{ για } i=IRR \tag{4.7}$$

Για την αξιολόγηση της επένδυσης βάσει του εσωτερικού βαθμού απόδοσης που προκύπτει υπάρχουν οι παρακάτω περιπτώσεις:

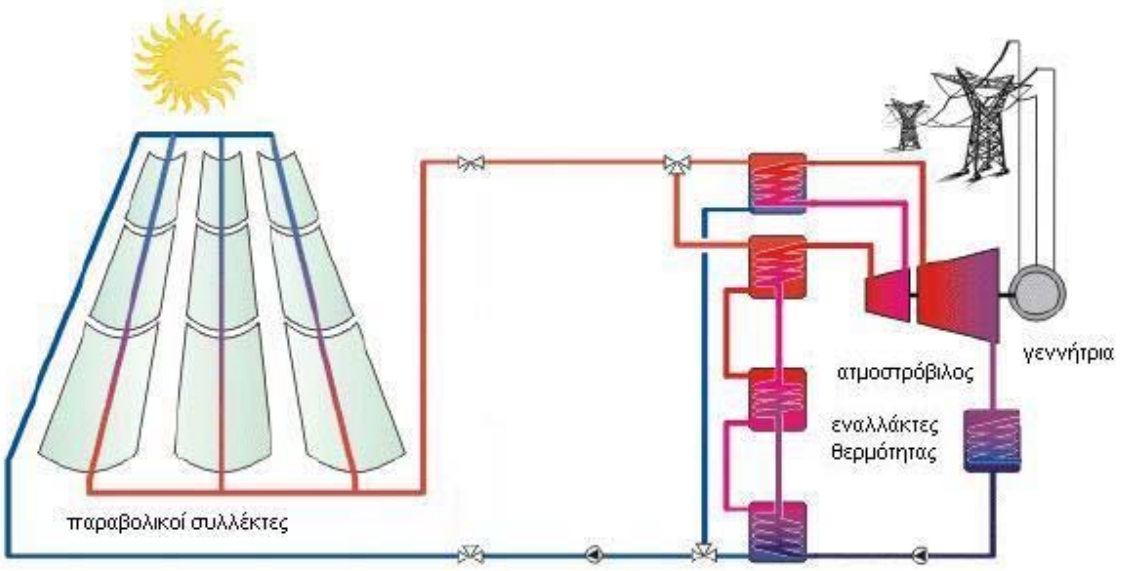
- όταν ισχύει IRR > i, η επένδυση είναι αποδεκτή
- όταν ισχύει IRR = i, η επένδυση είναι οριακή οπότε δεν έχει ενδιαφέρον ή αξιολογείται κατά περίπτωση
- όταν ισχύει IRR < i, η επένδυση απορρίπτεται.

Να σημειωθεί, όμως, ότι ο IRR δεν αρκεί από μόνος του ως κριτήριο και η αξιολόγηση της επένδυσης πρέπει να συνδυάζεται με την τιμή της NPV.

5. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία μελετάται ένα σύστημα Παραβολικών Συλλεκτών με σκοπό την παραγωγή ενέργειας και την προμήθειά της στο ηλεκτρικό δίκτυο. Τα δομικά στοιχεία του συστήματος που αναφέρθηκαν είναι οι Παραβολικοί Συλλέκτες, οι εναλλάκτες θερμότητας, ο ατμοστρόβιλος και η γεννήτρια. Το μοντέλο του συστήματος που μελετάται παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1.

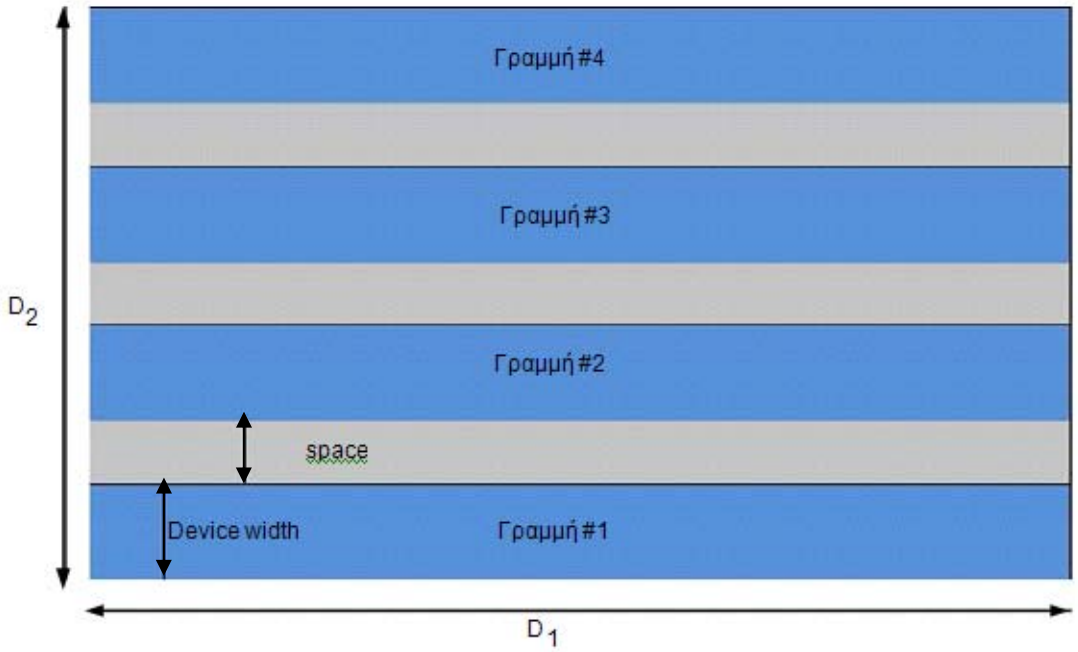


Σχήμα 5.1: Το γενικό διάγραμμα του συστήματος παραγωγής ενέργειας από Παραβολικούς Συλλέκτες

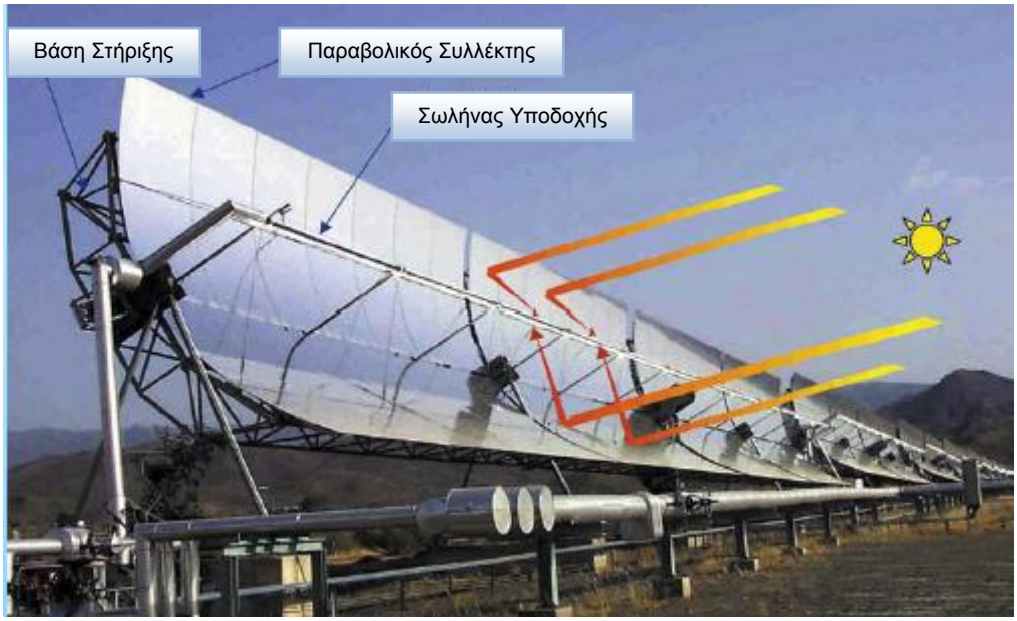
5.2 Η διάταξη των Παραβολικών Συλλεκτών σε δεδομένη έκταση

Η δεδομένη έκταση για την οποία γίνεται η μελέτη έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς δημιουργεί απαιτήσεις σχετικές με την τοποθέτηση των Παραβολικών Συλλεκτών εντός αυτής. Για αυτό το λόγο στην παρούσα εργασία έγινε μοντελοποίηση του

τρόπου αυτής της τοποθέτησης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2, οι Παραβολικοί Συλλέκτες διατάσσονται σε γραμμές. Το πλάτος της έκτασης που καταλαμβάνει κάθε η γραμμή είναι ίσο με το πλάτος της συσκευής (device_width) που είναι εγκατεστημένη στην έκταση. Επίσης D_1 και D_2 είναι οι διαστάσεις της έκτασης που απαιτείται για την εγκατάσταση του αριθμού των Παραβολικών Συλλεκτών που υπολογίζεται από τον αλγόριθμο. Η διάσταση D_1 αναφέρεται στη νότια πλευρά της έκτασης.



Σχήμα 5.2: Διάταξη των Παραβολικών Συλλεκτών σε γραμμές εντός της έκτασης.



Σχήμα 5.3: Μέρος μια γραμμής Παραβολικών Συλλεκτών (σημειώνονται οι βάσεις στήριξης, το κάτοπτρο (παραβολικός συλλέκτης) και ο σωλήνας υποδοχής)

Ο υπολογισμός του τρόπου διάταξης των Παραβολικών Συλλεκτών σε μια έκταση γίνεται ως εξής: αρχικά υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός των συλλεκτών που θα εγκατασταθούν στην έκταση από το γενετικό αλγόριθμο. Ο αριθμός των συλλεκτών που θα εγκατασταθούν σε μια γραμμή δίνεται από τη σχέση:

$$n_t = \text{round_down}\left(\text{DIM}_1 / \text{device_length}\right) \qquad (5.1)$$

όπου:

DIM_1 το μήκος της ανατολικής πλευράς της δεδομένης από το χρήστη έκτασης και,

device_length το μήκος του παραβολικού συλλέκτη.

Η προς τα κάτω στρογγυλοποίηση στην Εξ. (5.1) γίνεται ώστε το n_t που προκύπτει να είναι ακέραιος αριθμός καθώς αναφέρεται σε πλήθος Παραβολικών Συλλεκτών.

Με DIM_2 συμβολίζεται το μήκος της άλλης πλευράς (κάθετης προς αυτή, με μήκος DIM_1) της δεδομένης έκτασης. Να αναφερθεί ότι οι αποστάσεις DIM_1 και DIM_2 είναι διαφορετικές από τις αποστάσεις D_1 και D_2. Οι πρώτες αναφέρονται στις διαστάσεις της προς μελέτη έκτασης και δίνονται από το χρήστη, ενώ οι δεύτερες

είναι οι τελικές διαστάσεις που απαιτούνται για την εγκατάσταση N_1 Παραβολικών Συλλεκτών και προκύπτουν με τον τρόπο που περιγράφεται πιο κάτω. Η διαφορά τους είναι ότι οι πρώτες διαστάσεις αποτελούν περιορισμό του προβλήματος καθώς είναι το άνω όριο των δυνατών διαστάσεων της έκτασης. Αποτελούν ουσιαστικά τις διαστάσεις της διαθέσιμης έκτασης ενώ οι δεύτερες αποτελούν τις τελικές απαιτούμενες διαστάσεις για την εγκατάσταση του συστήματος. Συνεπώς πρέπει να ισχύει ότι $D_1 \leq DIM_1$ και $D_2 \leq DIM_2$.

Ο αριθμός των γραμμών n_{row} που χρειάζονται δίνονται από τη σχέση:

$$n_{row} = \frac{N_1}{n_t} \tag{5.2}$$

Οι τελικές διαστάσεις της έκτασης που απαιτείται υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$D_1 = device_length \cdot n_t \tag{5.3}$$

και:

$$D_2 = n_{row} \cdot device_width + (n_{row} - 1) \cdot space \tag{5.4}$$

Όπου space είναι η απόσταση μεταξύ των γραμμών των παραβολικών συλλεκτών (επιλέγεται από τον γενετικό αλγόριθμο).

5.3 Οι βάσεις στήριξης των Παραβολικών Συλλεκτών

Για τη στήριξη των παραβολικών συλλεκτών χρησιμοποιούνται βάσεις στήριξης φτιαγμένες από μέταλλο. Η βάσεις αυτές κρατούν τους καθρέφτες σε ακριβή ευθυγράμμιση ώστε να εκμεταλλεύονται όσο το δυνατόν περισσότερο την ηλιακή ακτινοβολία. Επίσης χρησιμεύουν και ως αντίσταση στις δυνάμεις που προκαλούνται από τον άνεμο και κυρίως από τις ριπές του ανέμου αφού είναι στερεωμένες βαθιά στο έδαφος με σκυρόδεμα και σίδερο. Αυτό εξηγεί και το ακριβό κόστος κατασκευής τους (μια τυπική τιμή η οποία χρησιμοποιήθηκε και στην συγκεκριμένη εργασία είναι 1100€/kW).

Σχήμα 5.4: Βάσεις στήριξης Παραβολικών Συλλεκτών (διακρίνονται τα 4 σημεία στήριξης)

Κάθε συλλέκτης υποστηρίζεται από τη βάση στήριξης σε τέσσερα σημεία στην πίσω πλευρά του, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4 που ακολουθεί. Αυτό επιτρέπει στο γυαλί να περιστρέφεται με ευελιξία χωρίς επίδραση στο σημείο εστίασης.

5.4 Ο αλγόριθμος SIM

Ο αλγόριθμος SIM αναπτύχθηκε με σκοπό να ελέγχονται οι διάφορες λύσεις που παράγονται από το γενετικό αλγόριθμο (αριθμός Παραβολικών Συλλεκτών και απόσταση μεταξύ των γραμμών (space) των συλλεκτών) ως προς την επάρκεια της διαθέσιμης έκτασης για τη διάταξη των N_1 συλλεκτών και ως προς το αν η απόσταση μεταξύ των γραμμών που επιλέχθηκε είναι μέσα στα επιθυμητά όρια.

Αρχικά ο αλγόριθμος SIM ελέγχει αν η απόσταση που επιλέχθηκε είναι μεγαλύτερη από μηδέν και μικρότερη ή ίση από τη μέγιστη απόσταση σκίασης. Η απόσταση αυτή πρέπει να είναι μεγαλύτερη από μηδέν γιατί αν συμβαίνει αυτό, σημαίνει ότι οι γραμμές των συλλεκτών είναι τοποθετημένες η μια πάνω στην άλλη γεγονός που είναι άτοπο. Το μέγεθος αυτό πρέπει να είναι μικρότερο από τη μέγιστη απόσταση σκίασης διότι σε περίπτωση που συμβαίνει το αντίθετο δεν εκμεταλλεύεται πλήρως/σωστά η διαθέσιμη έκταση. Αν η απόσταση των γραμμών μεταξύ των συλλεκτών είναι ίση με τη μέγιστη απόσταση σημαίνει ότι

δεν έχουμε σκίαση καθ' όλη τη διάρκεια της μέρας οπόταν δεν έχει νόημα να τοποθετηθούν οι γραμμές σε μεγαλύτερη απόσταση.

Σε περίπτωση που οι συνθήκες αυτές ικανοποιούνται τότε ο αλγόριθμος ελέγχει αν ο αριθμός των παραβολικών συλλεκτών μπορεί να εγκατασταθεί στη διαθέσιμη έκταση. Αρχικά υπολογίζεται ο μέγιστος αριθμός των συλλεκτών που μπορούν να τοποθετηθούν στην έκταση για την απόσταση μεταξύ των γραμμών που επιλέχθηκε και στη συνέχεια γίνεται έλεγχος αν ο αριθμός των συλλεκτών που υπολογίστηκε από το γενετικό είναι μικρότερος από το μέγιστο αριθμό που υπολογίστηκε προηγουμένως.

Οι σχέσεις που πρέπει να ισχύουν είναι οι εξής:

$$0 < \text{space} \leq \max\text{Dist} \tag{5.5}$$

όπου maxDist είναι η μέγιστη απόσταση που καλύπτει η σκίαση και είναι η μέγιστη τιμή που παίρνει η Εξ. 2.32.

και:

$$N_1 < \max\text{NoCollectors} \tag{5.6}$$

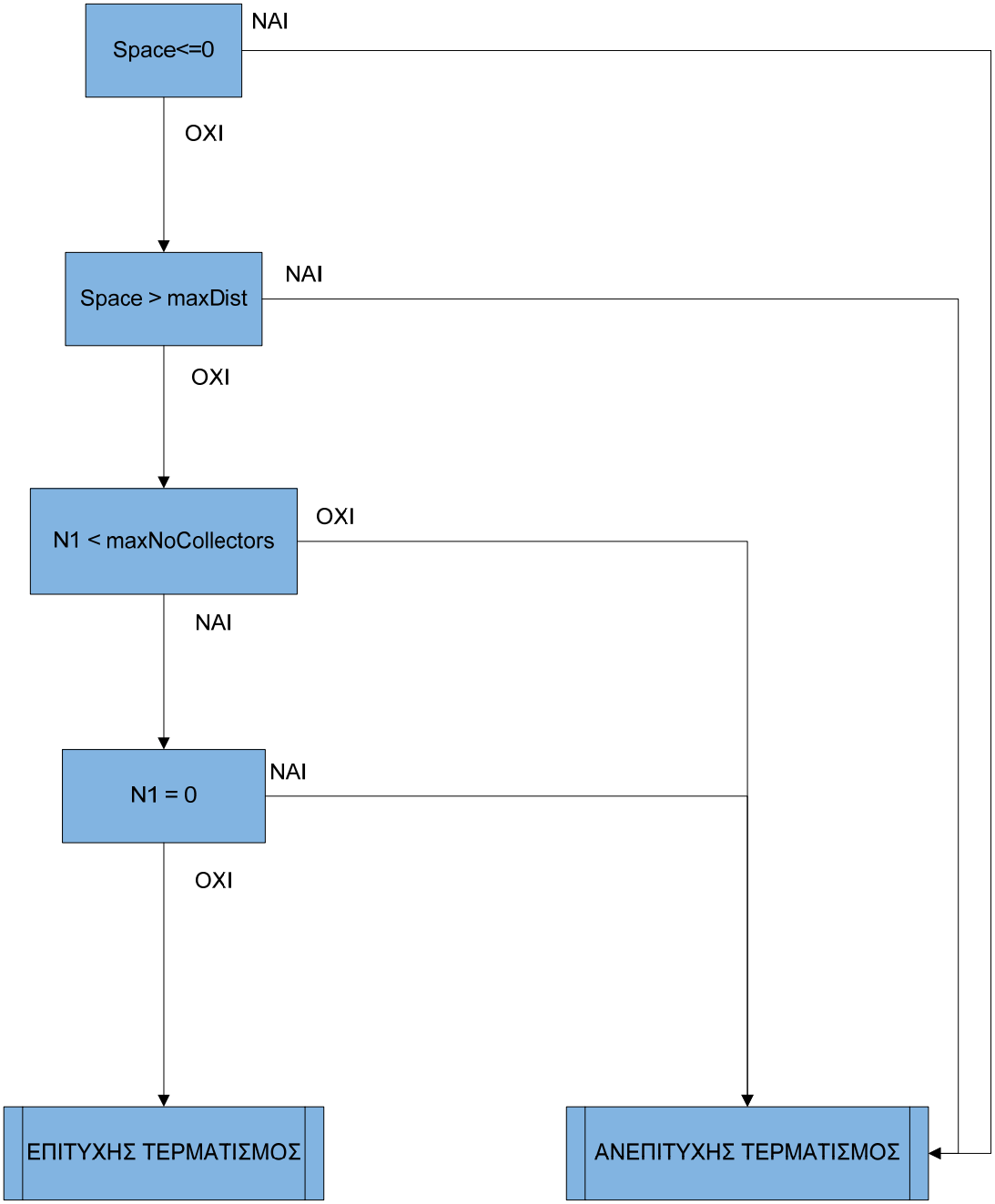
όπου maxNoCollectors είναι ο μέγιστος αριθμός συλλεκτών που μπορούν να τοποθετηθούν στη διαθέσιμη έκταση και υπολογίζεται ως εξής:

$$\max\text{NoCollectors} = n_{row1} \cdot n_t \tag{5.7}$$

όπου:

$$n_{row1} = \left(\text{DIM}_1 + \text{space}\right) \Big/ \left(\text{device_width} + \text{space}\right) \tag{5.8}$$

Ο αλγόριθμος τερματίζει επιτυχώς αν ικανοποιούνται τα κριτήρια που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η σειρά των ελέγχων που γίνονται στον αλγόριθμο SIM. Ο επιτυχής τερματισμός του αλγορίθμου SIM σημαίνει ότι η συγκεκριμένη λύση του γενετικού αλγορίθμου είναι αποδεκτή, ενώ κάθε λύση που οδηγεί σε ανεπιτυχή τερματισμό δεν είναι σύμφωνη με τις προϋποθέσεις που έχουν τεθεί οπότε θα πρέπει να διορθωθεί όπως θα περιγραφεί στο 6° κεφάλαιο.



Σχήμα 5.5: Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου SIM.

6. Η ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΟΝ ΓΕΝΕΤΙΚΟ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ

6.1 Εισαγωγή

Το πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι η βέλτιστη διαστασιολόγηση ενός συστήματος Παραβολικών Συλλεκτών συνδεδεμένου με το ηλεκτρικό δίκτυο, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1, με σκοπό την πώληση της παραγόμενης ενέργειας και τη μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους για ένα αριθμό ετών. Ο γενετικός αλγόριθμος απεικονίζεται συνοπτικά στο Σχήμα 6.1. Αρχικά υλοποιείται μια ρουτίνα αρχικοποίησης και στην συνέχεια ακολουθούν οι γενετικές πράξεις. Ο τερματισμός του αλγορίθμου συμβαίνει όταν ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο τερματισμού.

Σχήμα 6.1: Ο γενετικός αλγόριθμος

Η διαστασιολόγηση αφορά το συνολικό αριθμό των Παραβολικών Συλλεκτών και την απόσταση μεταξύ των γραμμών των συλλεκτών. Τα χρωμοσώματα περιλαμβάνουν δύο γονίδια και είναι της μορφής c_1 = [N_1|space], όπου N_1 είναι ο συνολικός αριθμός των Παραβολικών Συλλεκτών και space η απόσταση μεταξύ των γραμμών των συλλεκτών. Σημειώνεται επίσης ότι έμμεσα συμμετέχουν και άλλοι παράγοντες στον υπολογισμό του συνολικού κόστους, όπως το κόστος του ατμοστρόβιλου, της γεννήτριας, των εναλλακτών θερμότητας καθώς και οι τελικές διαστάσεις της έκτασης που θα εγκατασταθεί το σύστημα. Οι παραπάνω παράγοντες περιλαμβάνονται στον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης. Στην συγκεκριμένη εργασία γίνεται χρήση μιας αντικειμενικής συνάρτησης στην οποία περιλαμβάνεται το αρχικό κεφάλαιο, το κόστος συντήρησης των στοιχείων του συστήματος και τα κέρδη από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη το ετήσιο κόστος χρήματος και τον πληθωρισμό.

Αν ο χρήστης δώσει σαν είσοδο πολλούς τύπους Παραβολικών Συλλεκτών, ατμοστρόβιλου, γεννήτριας και εναλλακτών θερμότητας, ο γενετικός αλγόριθμος θα εκτελεστεί τόσες φορές όσες είναι οι δυνατοί συνδυασμοί όλων των τύπων. Για κάθε συνδυασμό τύπων που εκτελείται προκύπτει μια λύση η οποία αντιστοιχεί στη λύση ελάχιστου κόστους του συστήματος. Στο τέλος, από όλους του δυνατούς συνδυασμούς, επιλέγεται ο οικονομικότερος, αυτός δηλαδή με το μεγαλύτερο όφελος. Ο γενετικός αλγόριθμος χρησιμοποιείται για την εύρεση της οικονομικότερης λύσης μόνο για ένα συγκεκριμένο συνδυασμό κάθε φορά.

Παρακάτω γίνεται μια αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας αρχικοποίησης του αλγορίθμου και της μοντελοποίησης του προβλήματος. Επίσης περιγράφονται και οι τελεστές που χρησιμοποιούνται καθώς και η μέθοδος που επιλέχθηκε για την διαχείριση των διαφόρων περιορισμών που υπάρχουν.

6.2 Η αρχικοποίηση του αλγορίθμου

Πριν εφαρμοστεί ο γενετικός αλγόριθμος για ένα συγκεκριμένο συνδυασμό στοιχείων του συστήματος είναι απαραίτητο να διαβαστούν όλες οι είσοδοι – παράμετροι που απαιτούνται για την εκτέλεσή του και να γίνουν κάποιοι απαραίτητοι για τη συνέχεια υπολογισμοί όπως ο υπολογισμός της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια ενός παραβολικού συλλέκτη κάθε

χρόνο. Οι είσοδοι του αλγορίθμου διαβάζονται πάντα από αρχεία και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις παραμέτρους του γενετικού αλγορίθμου και κάποιες παραμέτρους του συστήματος και η δεύτερη κατηγορία έχει να κάνει με τις παραμέτρους των στοιχείων του συστήματος. Οι παράμετροι των στοιχείων του συστήματος έχουν σχέση με τα χαρακτηριστικά των Παραβολικών Συλλεκτών, τα χαρακτηριστικά των ατμοστρόβιλων, των γεννητριών και των εναλλακτών θερμότητας. Είσοδοι που επίσης σχετίζονται με τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας του συστήματος είναι οι ετήσιες χρονοσειρές μέσων ημερήσιων ή μηνιαίων τιμών της ακτινοβολίας, το γεωγραφικό πλάτος καθώς και ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους της υπό μελέτη έκτασης. Αφού διαβαστούν όλες οι είσοδοι γίνεται υπολογισμός της ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια ενός παραβολικού συλλέκτη για όλο το έτος ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί ο γενετικός αλγόριθμος. Ακολουθεί αναλυτικά η περιγραφή όλων των εισόδων:

1. Όλα τα είδη των Παραβολικών Συλλεκτών μαζί με τα χαρακτηριστικά τους βρίσκονται σε ένα αρχείο. Ανάλογα με το συλλέκτη του συνδυασμού εκείνου που έχει επιλεχθεί για τη διαδικασία της διαστασιολόγησης, διαβάζονται τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά. Αυτά είναι η ονομασία του, οι δύο διαστάσεις του, το εμβαδόν της έκτασης που καταλαμβάνει, η ικανότητα αντανάκλασης του κάτοπτρου (mirror reflectivity), η απορροφητικότητα του σωλήνα υποδοχής (receiver absorbance), η απόδοση του συλλέκτη, η απόσταση εστίασης (focal length), το κόστος αγοράς σε € και η ελάχιστη απόσταση από το έδαφος που θα τοποθετηθεί ο συλλέκτης. Το αρχείο που περιέχει τους τύπους των Παραβολικών Συλλεκτών έχει την παρακάτω μορφή:

```
1 Soponova 1.524 3.657 5.57 0.938 0.87 0.735 0.3048 0.529 100 0.1
2 IST 2.3 6.1 14.03 0.93 0.97 0.62 0.762 11.5 160 0.1
```

Σχήμα 6.2: Αρχείο με τους διάφορους τύπους Παραβολικών Συλλεκτών

2. Τα χαρακτηριστικά που περιλαμβάνονται στο αρχείο των ατμοστρόβιλων είναι το όνομα της συσκευής, η απόδοση σε ποσοστιαίες μονάδες και το κόστος αγοράς σε €. Το αρχείο που περιέχει τα χαρακτηριστικά τους έχει την πιο κάτω μορφή:

```
1 a_name 0.75 500
```

Σχήμα 6.3: Αρχείο με τους τύπους των Ατμοστρόβιλων

3. Όσον αφορά το αρχείο των γεννητριών, αυτό περιλαμβάνει το όνομα της συσκευής, η απόδοση σε ποσοστιαίες μονάδες και το κόστος αγοράς σε €. Το αρχείο έχει την πιο κάτω μορφή:

```
1 no_name 0.94 500
```

Σχήμα 6.4: Αρχείο με τους τύπους των Γεννητριών

4. Τα χαρακτηριστικά που περιλαμβάνονται στο αρχείο των εναλλακτών θερμότητας είναι η ονομασία τους, ο βαθμός απόδοσής τους ο οποίος αναφέρεται και στη απόδοση των εναλλακτών αλλά και των σωληνώσεων. Επίσης, στο αρχείο αυτό αναφέρεται και το κόστος αγοράς των συσκευών σε €. Η μορφή του αρχείο είναι ίδια με αυτήν των δύο προηγούμενων αρχείων που αναφέρθηκαν.

5. Η ακτινοβολία δίνεται σε αρχείο με μέσες μηνιαίες ή μέσες ημερήσιες τιμές. Στην περίπτωση που οι τιμές είναι μηνιαίες γίνεται αναγωγή σε ημερήσιες. Στο αρχείο αυτό υπάρχει, επίσης, και το γεωγραφικό πλάτος της υπό μελέτη περιοχής καθώς και ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους σε αυτή την περιοχή.

Μετά την είσοδο των παραπάνω παραμέτρων γίνεται ο υπολογισμός της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια ενός Παραβολικού Συλλέκτη για ένα έτος.

6.3 Η αντικειμενική συνάρτηση για το υπό μελέτη σύστημα

Η αντικειμενική συνάρτηση για τη διαστασιολόγηση του συγκεκριμένου συστήματος Παραβολικών Συλλεκτών είναι της μορφής:

$$g(N_1, \text{space}) = IC_n + FC_n - R_n \tag{6.1}$$

Το συνολικό κόστος εγκατάστασης ανηγμένο στο n – οστό έτος είναι:

$$IC_n = (1-\gamma)\cdot IC_0 \cdot (1+i)^n \qquad (6.2)$$

όπου:

IC_0 είναι το αρχικά επενδυμένο κεφάλαιο (€),

γ το ύψος της επιδότησης (%),

i το ετήσιο κόστος χρήματος (%) και

n ο συνολικός χρόνος της μελέτης σε έτη.

Στο IC_0 περιλαμβάνεται το κόστος αγοράς των στοιχείων του συστήματος, το κόστος των βάσεων στήριξης των Παραβολικών Συλλεκτών καθώς και το κόστος αγοράς της έκτασης. Το IC_0 δίνεται από τη σχέση:

$$IC_0 = N_1 \cdot aperture_area \cdot C_c + np \cdot C_b + np \cdot C_{he} + np \cdot C_t + np \cdot C_g + land_cost \qquad (6.3)$$

όπου:

N_1 είναι ο αριθμός των εγκατεστημένων Παραβολικών Συλλεκτών,

aperture_area η έκταση που καλύπτει ένας Παραβολικός Συλλέκτης(m^2),

C_C το κόστος αγοράς των Παραβολικών Συλλεκτών (€/m^2),

np η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος (nominal power) (W),

C_b το κόστος αγοράς των βάσεων στήριξης (€/kW),

C_{he} το κόστος αγοράς των εναλλακτών θερμότητας (€),

C_t το κόστος αγοράς του ατμοστρόβιλου (€),

C_g το κόστος αγοράς της γεννήτριας (€) και

land_cost το κόστος αγοράς της απαιτούμενης έκτασης (€).

Για το κόστος αγοράς της έκτασης ισχύει η σχέση:

$$land_cost = D_1 \cdot D_2 \cdot C_L \qquad (6.4)$$

όπου:

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

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

C_L είναι το κόστος αγοράς της έκτασης ανά m^2 (€).

Σε περίπτωση που δεν χρειάζεται να λάβουμε υπόψη το κόστος αγοράς έκτασης δίνεται μηδενική τιμή στο κόστος C_L.

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

$$FC_n = \left(E_{tot} \cdot C_{mC} + C_{mHE} + C_{mT} + C_{mG}\right) \cdot \left(1+g\right) \cdot \left(1+i\right)^n \cdot \left[\frac{1-\left(\frac{1+g}{1+i}\right)^n}{i-g}\right] \qquad (6.5)$$

όπου:

E_{tot} η συνολική ενέργεια που παράγεται (kWh),

C_{mC} το κόστος συντήρησης των Παραβολικών Συλλεκτών (€/kWh),

C_{mHE} το κόστος συντήρησης των εναλλακτών θερμότητας (€),

C_{mT} το κόστος συντήρησης του ατμοστρόβιλου (€) και

C_{mG} το κόστος συντήρησης της γεννήτριας (€).

Η τιμή του ετήσιου κόστους συντήρησης των εναλλακτών θερμότητας, της γεννήτριας και του ατμοστρόβιλου (C_{mHE}, C_{mG}, C_{mT}) τίθεται ίση με 1% επί της τιμής αγοράς.

Η παραπάνω σχέση προκύπτει χρησιμοποιώντας τις Εξ. (4.3) και (4.4) για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους των ετήσιων δαπανών που επηρεάζονται από τον ετήσιο πληθωρισμό.

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

$$R_n = C_0 \cdot E_{tot} \cdot (1+i)^n \left[\frac{1-\left(\frac{1}{1+i}\right)^n}{i} \right] \tag{6.6}$$

όπου C_0 είναι η τιμή πώλησης της ενέργειας (€/kWh).

6.4 Μετασχηματισμός της αντικειμενικής συνάρτησης

Η αντικειμενική συνάρτηση που αναφέρθηκε πιο πάνω υπολογίζει το συνολικό κόστος του συστήματος. Επειδή πρόκειται για πρόβλημα ελαχιστοποίησης συνάρτησης λαμβάνουμε τον μετασχηματισμό της g(X) που δίνεται από τη σχέση:

$$f(X) = \begin{cases} C_{max} - g(X), & \text{αν } C_{max} - g(X) > 0 \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \tag{6.7}$$

Η συνάρτηση f(X) είναι η συνάρτηση προσαρμογής του γενετικού αλγορίθμου και χρησιμοποιείται από την πράξη της επιλογής για την επιλογή των χρωμοσωμάτων που θα συμμετάσχουν σε πράξεις διασταύρωσης και μετάλλαξης. Η ποσότητα C_{max} είναι η απόλυτη τιμή της ελάχιστης τιμής της g(X) και δε λαμβάνεται σταθερή αλλά υπολογίζεται σε κάθε γενεά.

Οι περιορισμοί του προβλήματος συνοψίζονται στις παρακάτω σχέσεις:

$$1 \le N_1 \le BND_1 \text{ και } 1 \le space \le BND_2 \tag{6.8}$$

και:

$$SIM(N_1, space) = 1 \tag{6.9}$$

όπου θεωρούμε ότι όταν ο αλγόριθμος SIM επιτυγχάνει, επιστρέφει μονάδα. Ο αλγόριθμος SIM, που αναλύεται στην παράγραφο 5.4, χρησιμοποιείται για να ελεγχθεί κατά πόσο μια λύση ικανοποιεί τους περιορισμούς που σχετίζονται με τον αριθμό των Παραβολικών Συλλεκτών και με την απόσταση μεταξύ των γραμμών τους. Τα BND_1 και BND_2 είναι τα άνω όρια των γονιδίων N_1 και space αντίστοιχα, και οι τιμές τους ορίζονται ανάλογα με την διαθέσιμη έκταση και το είδος του συλλέκτη που χρησιμοποιείται. Σαν μηχανισμός επιλογής στο συγκεκριμένο πρόβλημα που εξετάζεται χρησιμοποιείται η απλή μέθοδος του

τροχού της ρουλέτας. Μετά την επιλογή ακολουθούν οι πράξεις της διασταύρωσης και της μετάλλαξης.

6.5 Πράξεις Διασταύρωσης και Μετάλλαξης

Οι τελεστές διασταύρωσης και μετάλλαξης που χρησιμοποιούνται στην συγκεκριμένη εργασία προτείνονται για προβλήματα όπου οι μεταβλητές αναπαρίστανται χρησιμοποιώντας τη floating point μετατροπή. Οι τελεστές αυτοί έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικοί στην αναζήτηση βέλτιστων λύσεων και για αυτούς τους λόγους είναι διαφορετικοί από αυτούς που περιγράφηκαν στο 3^{ο} κεφάλαιο. Επίσης κάποιοι από αυτούς είναι ομοιόμορφοι, δηλαδή η δράση τους δεν αλλάζει όσο αυξάνεται ο αριθμός των γενεών, ενώ κάποιοι άλλοι χαρακτηρίζονται ως μη – ομοιόμορφοι καθώς ο τρόπος με τον οποίο δρουν στα χρωμοσώματα αλλάζει όσο εξελίσσεται ο αλγόριθμος.

6.5.1 Διασταύρωση

Για τη διασταύρωση των χρωμοσωμάτων χρησιμοποιούνται οι εξής τρεις τελεστές:

- Απλή διασταύρωση (Simple Crossover, SC): εφαρμόζεται η μέθοδος που έχει αναφερθεί στο 3^{ο} κεφάλαιο. Για το παρόν πρόβλημα θεωρούμε ότι η SC συμβαίνει μόνο σε ένα σημείο του χρωμοσώματος. Η πιθανότητα p_{sc}, κάποιο χρωμόσωμα από αυτά που έχουν προκύψει από την πράξη της επιλογής να συμμετάσχει σε απλή διασταύρωση, λαμβάνεται ως παράμετρος εισόδου. Η προεπιλεγμένη τιμή για πληθυσμό γενεών ίσο με 30 χρωμοσώματα είναι $p_{sc} = 10\%$ (τιμή που προτείνεται από τη βιβλιογραφία). Η επιλογή των χρωμοσωμάτων που θα διασταυρωθούν γίνεται με τη γέννηση ενός τυχαίου αριθμού r ($0 \leq r \leq 1$) για κάθε χρωμόσωμα. Αν για κάποιο χρωμόσωμα ισχύει $r \leq p_{sc}$ τότε αυτό το χρωμόσωμα επιλέγεται για διασταύρωση. Αν ο συνολικός αριθμός χρωμοσωμάτων που έχουν επιλεχθεί για SC δεν είναι άρτιος τότε επιλέγεται ακόμα ένα χρωμόσωμα. Αν θεωρήσουμε ότι τα χρωμοσώματα έχουν ένα αύξοντα αριθμό ανά γενεά, ο αλγόριθμος, ξεκινώντας από το χρωμόσωμα με αριθμό 1, επιλέγει το πρώτο χρωμόσωμα που δεν έχει επιλεχθεί για διασταύρωση. Η διασταύρωση εν συνεχεία λαμβάνει χώρα

ανάμεσα στα χρωμοσώματα με αύξουσα σειρά, δηλαδή θα διασταυρωθούν το πρώτο χρωμόσωμα που έχει επιλεγεί με το δεύτερο που έχει επιλεγέι, το τρίτο με το τέταρτο κ.ο.κ.

- Απλή αριθμητική διασταύρωση (Simple Arithmetical Crossover, SAC): αν τα χρωμοσώματα c1=[u1….um] και c2=[w1….wm] πρόκειται να πάρουν μέρος σε πράξη SAC τότε οι απόγονοί τους θα είναι c'1=[u1….uk'….um] και c'2=[w1….wk'….wm], όπου k∈[1,m], u'k=awk + (1 - a)uk και w'k = auk + (1 – a)wk. Η τιμή του k επιλέγεται τυχαία, ενώ το a είναι μια τυχαία επιλογή με τέτοιο τρόπο ώστε οι απόγονοι να βρίσκονται μέσα στο πεδίο εφικτών λύσεων (λύσεων δηλαδή που δεν παραβιάζουν τους περιορισμούς):

$$a = \begin{cases} [\max(\alpha,\beta),\min(\gamma,\delta), & \text{αν } u_k > w_k \\ [0,0], & \text{αν } u_k = w_k \\ [\max(\gamma,\delta),\min(\alpha,\beta), & \text{αν } u_k < w_k \end{cases} \tag{6.10}$$

όπου:

$$\alpha = \left(l_k^{c_2} - w_k\right) \Big/ \left(u_k - w_k\right) \tag{6.11}$$

$$\beta = \left(u_k^{c_1} - u_k\right) \Big/ \left(w_k - u_k\right) \tag{6.12}$$

$$\gamma = \left(l_k^{C_1} - u_k\right) \Big/ \left(w_k - u_k\right) \tag{6.13}$$

$$\delta = \left(u_k^{C_2} - w_k\right) \Big/ \left(u_k - w_k\right) \tag{6.14}$$

Οι ποσότητες $l_k^{C_1}$ και $u_k^{c_1}$ συμβολίζουν το κάτω και άνω φράγμα του γονιδίου k του χρωμοσώματος i. Τα $l_k^{C_1}$ και $u_k^{c_1}$ δεν λαμβάνονται σταθερά κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης αλλά υπολογίζονται με τη βοήθεια του αλγόριθμου dyn_bnd κάθε φορά που γίνεται απλή αριθμητική διασταύρωση. Ο αλγόριθμος dyn_bnd περιγράφεται στην παράγραφο 6.6. Η πιθανότητα για SAC, p_{sac}, λαμβάνεται ως παράμετρος εισόδου και η προεπιλεγμένη τιμή είναι 10% (τιμή που προτείνεται στη βιβλιογραφία). Η επιλογή και ο τρόπος για SAC γίνεται ακριβώς όπως και στην απλή διασταύρωση. Για κάθε χρωμόσωμα γεννιέται ένας αριθμός r (0 ≤ r ≤ 1). Αν $p_{sc} \le r \le p_{sac}$ τότε το χρωμόσωμα συμμετέχει σε SAC.

- Ολική αριθμητική διασταύρωση (Whole Arithmetical Crossover, WAC): αν τα χρωμοσώματα $c_1=[u_1….u_m]$ και $c_2=[w_1….w_m]$ πρόκειται να πάρουν μέρος σε πράξη WAC τότε οι απόγονοί τους θα είναι $c'_1 = ac_2 + (1 – a)c_2$ και $c'_2 = ac_1 + (1 – a)c_2$. Το a έχει σταθερή τιμή καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου και επιλέγεται μέσα από το διάστημα [0,1]. Η επιλογή του a μέσα από αυτό το διάστημα τιμών εγγυάται ότι οι απόγονοι θα βρίσκονται μέσα στο πεδίο των εφικτών λύσεων. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η τιμή a = 0,75. Η πιθανότητα WAC p_{wac} λαμβάνεται ως παράμετρος εισόδου και η προεπιλεγμένη τιμή της είναι 10%. Η επιλογή και ο τρόπος ολικής αριθμητικής διασταύρωσης γίνεται ακριβώς όπως και στην απλή διασταύρωση μόνο που εδώ ισχύει $p_{sac} \leq r \leq p_{wac}$.

Οι τελεστές διασταύρωσης εφαρμόζονται με τη σειρά που αναφέρθηκαν αμέσως μόλις λάβει χώρα η πράξη της επιλογής. Όσα χρωμοσώματα έλαβαν μέρος σε κάποιο από τα 3 είδη διασταύρωσης δεν μπορούν να συμμετέχουν σε άλλο είδος. Οι απόγονοι που δημιουργούνται από τον 2° και 3° τελεστή δεν παραβιάζουν κανένα από τους περιορισμούς του προβλήματος ενώ ο $1^{ος}$ τελεστής είναι πιθανόν να δώσει απογόνους που είναι εκτός του συνόλου των επιτρεπτών λύσεων. Για το λόγο αυτό κάθε φορά (για κάθε γενεά) εφαρμόζεται ο αλγόριθμος διόρθωσης όταν ολοκληρωθούν οι πράξεις της διασταύρωσης ο οποίος περιγράφεται στην παράγραφο 6.7.

6.5.2 Μετάλλαξη

Κατά τη διαδικασία της μετάλλαξης θεωρούμε ότι πάντα σε ένα χρωμόσωμα μόνο ένα γονίδιο μεταλλάσσεται. Για τη μετάλλαξη χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τελεστές:

- Ομοιόμορφη μετάλλαξη (Uniform Mutation, UM): στην ομοιόμορφη μετάλλαξη επιλέγεται τυχαία ένα γονίδιο του χρωμοσώματος. Η νέα τιμή του γονιδίου λαμβάνεται τυχαία μέσα από το επιτρεπτό εύρος τιμών του, το οποίο υπολογίζεται με τη βοήθεια του αλγορίθμου dyn_bnd. Η πιθανότητα μετάλλαξης είναι παράμετρος εισόδου και η προεπιλεγμένη τιμή της είναι ίση με 10%. Η επιλογή των χρωμοσωμάτων τα οποία θα δώσουν κάποιο γονίδιο για UM γίνεται με τον ίδιο τρόπο που επιλέγεται κάποιο χρωμόσωμα προς

διασταύρωση (με γέννηση τυχαίου αριθμού r για κάθε χρωμόσωμα). Πρέπει να ισχύει $r \le p_{um}$.

- Boundary μετάλλαξη (Boundary Mutation, BM): το γονίδιο του χρωμοσώματος επιλέγεται τυχαία και λαμβάνει με ίση πιθανότητα τη μέγιστη ή την ελάχιστη τιμή από το επιτρεπτό εύρος τιμών που μπορεί να λάβει και το οποίο προκύπτει από τον αλγόριθμο dyn_bnd. Και εδώ η πιθανότητα μετάλλαξης είναι παράμετρος εισόδου και η προεπιλεγμένη τιμή της είναι 3%. Η επιλογή κάποιου χρωμοσώματος προς BM γίνεται όπως και στις προηγούμενες πράξεις. Εδώ πρέπει να ισχύει $p_{um} \le r \le p_{bm}$.

- Μη – ομοιόμορφη μετάλλαξη (Non – Uniform Mutation, NUM): όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο χαρακτηρισμός "μη – ομοιόμορφη" σχετίζεται με το γεγονός ότι η δράση ενός τελεστή δεν παραμένει σταθερή αλλά μεταβάλλεται κατά την εξέλιξη του αλγορίθμου. Οι γενετικοί αλγόριθμοι σε προβλήματα με μεταβλητές πραγματικών αριθμών και με μεγάλα πεδία επιτρεπτών τιμών αυτών των μεταβλητών αντιμετωπίζουν δυσκολίες στην τοπική αναζήτηση. Τοπική αναζήτηση είναι η αναζήτηση κοντά στη βέλτιστη λύση του προβλήματος. Ενώ, δηλαδή, μπορούν να φτάσουν εύκολα στην περιοχή της βέλτιστης λύσης παρουσιάζουν δυσκολίες στην τοπική αναζήτηση. Η δυνατότητα του αλγορίθμου να εκτελεί επιτυχώς και τοπική αναζήτηση ονομάζεται *"fine local tuning".* Η NUM, λοιπόν, χρησιμοποιείται για την ενίσχυση της ικανότητας του συστήματος για "fine local tuning". Αν σε ένα χρωμόσωμα έχει επιλεγεί (όπως πάντα με τυχαίο τρόπο) για μετάλλαξη το γονίδιο g_k τότε το νέο γονίδιο g'_k δίνεται από τη σχέση:

$$g'_k = \begin{cases} g_k + \rho\left(\overline{g}_k - g_k\right), & \text{με πιθανότητα ίση με 1/2} \\ g_k - \rho\left(g_k - \underline{g}_k\right), & \text{με πιθανότητα ίση με 1/2} \end{cases} \qquad (6.15)$$

όπου $[\underline{g}_k, \overline{g}_k]$ είναι το επιτρεπτό εύρος τιμών του γονιδίου g_k (υπολογίζεται από τον αλγόριθμο dyn_bnd) και ρ είναι η συνάρτηση:

$$\rho = u\left(1 - \frac{t}{T}\right)^B \qquad (6.16)$$

όπου u είναι ένας τυχαίος αριθμός από το διάστημα [0,1] (γεννιέται για κάθε γενεά, t είναι ο αριθμός της τρέχουσας γενεάς, T είναι ο συνολικός αριθμός γενεών και B είναι ένας συντελεστής ανομοιόμορφος που είναι σταθερός κατά τη διάρκεια του αλγορίθμου και παίρνει τιμές στο διάστημα [2,5].

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε B = 3.5. Όταν η τιμή του t είναι μικρή τότε ο τελεστής ψάχνει ομοιόμορφα όλο το πεδίο των λύσεων (ρ→u), ενώ όσο μεγαλώνει (ρ→0) ψάχνει πιο τοπικά. Όσο πιο μεγάλο είναι το B τόσο πιο γρήγορα θα αρχίσει η τοπική αναζήτηση. Η πιθανότητα για NUM, p_{um}, είναι παράμετρος εισόδου και η προεπιλεγμένη τιμή της είναι 35%. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε αρκετά μεγάλη ώστε να ενισχύεται η δυνατότητα “fine local tuning” του παρόντος αλγορίθμου. Η επιλογή χρωμοσώματος προς μη ομοιόμορφη μετάλλαξη γίνεται όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις αλλά με $p_{bm} \leq r \leq p_{um}$.

Οι τελεστές της μετάλλαξης εφαρμόζονται με τη σειρά που αναφέρθηκαν όταν ολοκληρωθούν οι πράξεις της διασταύρωσης. Τα χρωμοσώματα που συμμετείχαν σε ένα είδος μετάλλαξης δεν μπορούν να συμμετέχουν σε άλλου είδους μετάλλαξη. Και οι τρεις τελεστές που χρησιμοποιούνται είναι σίγουρο ότι θα δώσουν λύσεις οι οποίες εμπίπτουν στα όρια των επιτρεπτών λύσεων.

6.6 Ο αλγόριθμος εύρεσης του πεδίου τιμών μιας μεταβλητής

Ο αλγόριθμος εύρεσης του πεδίου τιμών (dyn_bnd) χρησιμοποιείται από κάποιους γενετικούς τελεστές (SAC, UM και BM) για την εύρεση του πεδίου επιτρεπτών τιμών μιας μεταβλητής σε ένα συγκεκριμένο χρωμόσωμα. Ένα τέτοιο πεδίο δεν παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου αλλά είναι συνάρτηση των τιμών των υπόλοιπων μεταβλητών του εξεταζόμενου χρωμοσώματος. Έστω ότι το γονίδιο είναι είτε το N_1 είτε το space. Ο αλγόριθμος εκτελεί τον αλγόριθμο SIM διαδοχικά μειώνοντας, όσο ο SIM τερματίζει επιτυχώς, την τιμή του εξεταζόμενου γονιδίου (κατά 1 για το γονίδιο N_1 και κατά 0,01 (m) για το γονίδιο space) μέχρι να αποτύχει. Η τελευταία τιμή του γονιδίου για την οποία ο αλγόριθμος SIM τερμάτισε επιτυχώς αποτελεί και το κάτω όριο του ζητούμενου πεδίου τιμών. Το άνω όριο επιλέγεται να παίρνει την ίδια τιμή με τα άνω όρια των

γονιδίων BND_1 ή BND_2 γιατί με αυτό τον τρόπο είναι βέβαιο ότι θα υπάρξει σύγκλιση του αλγορίθμου στη βέλτιστη λύση.

6.7 Ο αλγόριθμος διόρθωσης των εσφαλμένων λύσεων

Ο τελεστής της απλής διασταύρωσης που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να δώσει χρωμοσώματα εκτός του επιτρεπτού συνόλου λύσεων. Λανθασμένα χρωμοσώματα μπορούν να προκύψουν και εξαιτίας της επιλογής λανθασμένων γονέων. Ο αλγόριθμος διόρθωσης (repair algorithm) χρησιμοποιείται για να εξαλείψει αυτά τα χρωμοσώματα αντικαθιστώντας τα με άλλα που δεν παραβιάζουν το σύνολο των περιορισμών.

Ο σχεδιασμός ενός αλγορίθμου διόρθωσης εξαρτάται από το πρόβλημα που μελετάται και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή καθώς επηρεάζει άμεσα τη σύγκλιση του αλγορίθμου στη βέλτιστη τιμή. Η βασική ιδέα της διόρθωσης είναι το χρωμόσωμα να διορθωθεί έτσι ώστε να μη χάσει την ομοιότητα με τους γονείς του. Ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται όταν παραβιάζεται κάποιος περιορισμός και ελέγχει αρχικά αν η απόσταση μεταξύ των γραμμών Παραβολικών Συλλεκτών (space) είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη απόσταση που καλύπτει η σκίαση αφού με αυτό τον τρόπο δεν γίνεται σωστή εκμετάλλευση της διαθέσιμης έκτασης. Ακολούθως ελέγχει αν η απόσταση αυτή είναι μικρότερη ή ίση με το μηδέν κάτι το οποίο είναι άτοπο. Στην συνέχεια, αν ο αλγόριθμος SIM ολοκληρώνεται ανεπιτυχώς μειώνεται ο αριθμός των Παραβολικών Συλλεκτών μέχρι ο αλγόριθμος να τερματίσει επιτυχώς. Με αυτό τον τρόπο είναι βέβαιο ότι ο αλγόριθμος διόρθωσης θα βρει μια λύση με αριθμό Παραβολικών Συλλεκτών για τα οποία να αρκεί η διαθέσιμη έκταση και να μπορούν να εγκατασταθούν με τον τρόπο που έχει περιγραφεί στο προηγούμενο κεφάλαιο.

6.8 Σύγκλιση του αλγορίθμου

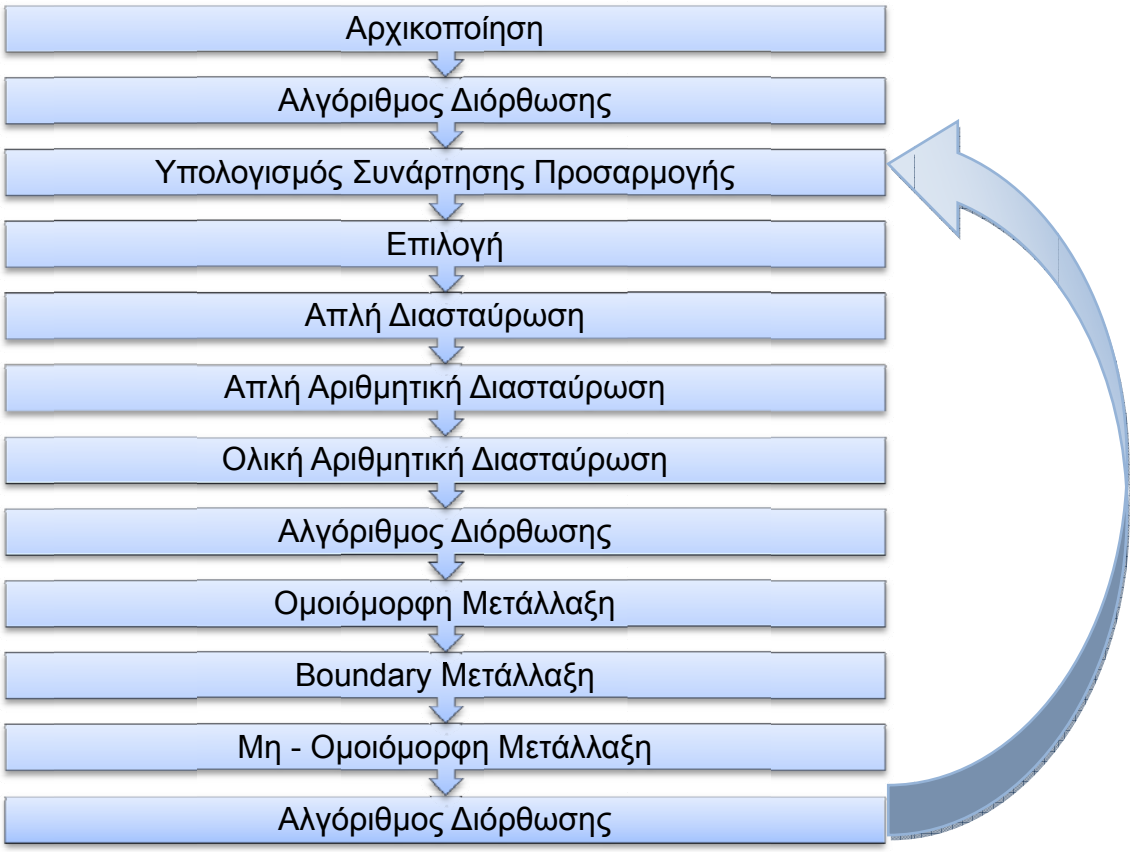
Ένα σημαντικό πρόβλημα που προκύπτει είναι το κριτήριο λήξης της εκτέλεσης του γενετικού αλγορίθμου ή διαφορετικά το πώς μπορεί να διαπιστωθεί αν η λύση που έχει προκύψει από την εφαρμογή του αλγορίθμου μετά από κάποιο αριθμό

επαναλήψεων είναι η βέλτιστη. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι γενετικοί αλγόριθμοι προσεγγίζουν την περιοχή της βέλτιστης λύσης και δεν παγιδεύονται σε τοπικά μέγιστα. Το πιο απλό κριτήριο σύγκλισης είναι η εκτέλεση του αλγορίθμου για ένα συγκεκριμένο πλήθος γενεών. Το ποιό είναι το κρίσιμο πλήθος γενεών πέρα από το οποίο είναι βέβαιο ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει στη βέλτιστη λύση προκύπτει μετά από την εξέταση ενός μεγάλου εύρους περιπτώσεων του προβλήματος. Αυτό είναι και το κριτήριο που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία, δηλαδή χρησιμοποιείται ένας μέγιστος αριθμός επαναλήψεων και ο αλγόριθμος εκτελείται μέχρι να ολοκληρωθούν όλες οι επαναλήψεις.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι οι τελεστές που χρησιμοποιήθηκαν, έχουν σχεδιαστεί ειδικά για προβλήματα που απαιτούν μεγάλη ακρίβεια λύσης, που έχουν πιο πολύπλοκες συναρτήσεις κόστους και πιο πολύπλοκους περιορισμούς. Έτσι με την εφαρμογή αυτών των τελεστών για ένα μεγάλο αριθμό επαναλήψεων είναι βέβαιο πως ο αλγόριθμος θα συγκλίνει στη βέλτιστη τιμή.

6.9 Ανακεφαλαίωση

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζονται τα διάφορα βήματα του γενετικού αλγορίθμου.



Σχήμα 6.5: Τα βήματα του γενετικού αλγορίθμου

Αρχικά εκτελείται μια συνάρτηση αρχικοποίησης η οποία παράγει τυχαία ένα σύνολο αρχικών λύσεων ($1^{η}$ γενεά). Στην συνέχεια εφαρμόζεται ο αλγόριθμος διόρθωσης αφού κάποιες από αυτές τις τυχαία παραγόμενες λύσεις μπορεί να παραβιάζουν τους περιορισμούς. Αμέσως μετά ακολουθεί η διαδικασία εκτίμησης της τιμής της συνάρτησης προσαρμογής για κάθε χρωμόσωμα – λύση (fitness function evaluation). Σε αυτή τη διαδικασία αντιστοιχίζεται η αντικειμενική συνάρτηση με τη συνάρτηση προσαρμογής. Ακολουθεί η πράξη της επιλογής με τον κανόνα του τροχού της ρουλέτας. Με αυτό τον τρόπο επιλέγονται τα χρωμοσώματα που θα έχουν τη δυνατότητα να δώσουν απογόνους στην επόμενη γενεά μέσα από τις πράξεις της διασταύρωσης και της μετάλλαξης. Ακολουθεί η εφαρμογή των τελεστών της διασταύρωσης και στην συνέχεια εκτελείται ο αλγόριθμος διόρθωσης ο οποίος διορθώνει τυχόν λανθασμένα χρωμοσώματα. Σειρά έχει η εφαρμογή των διαδικασιών της μετάλλαξης. Ο αλγόριθμος διόρθωσης που εκτελείται αμέσως μετά προβαίνει στις κατάλληλες διορθώσεις. Ο αλγόριθμος λήγει όταν ικανοποιηθεί η συνθήκη τερματισμού (αριθμός γενεών) που χρησιμοποιείται. Η συνθήκη τερματισμού εξετάζεται μέσα

στο τμήμα “Υπολογισμός Συνάρτησης Προσαρμογής” που φαίνεται στο σχήμα 6.5.

7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται διάφορα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της παρούσας μεθόδου για διάφορα σενάρια διαστασιολόγησης. Αρχικά παρουσιάζονται οι λύσεις όλων των δυνατών συνδυασμών των συσκευών και η ανάλυση κάθε βέλτιστου συνδυασμού για διάφορους συνδυασμούς ύψους επιδότησης (0%, 20%, 40%), κόστους αγοράς έκτασης ανά τετραγωνικό μέτρο (0€/m^2, 30€/m^2, 50€/m^2) και φορολογία εσόδων (0%, 18%, 25%).

Σε όλες τις περιπτώσεις ο γενετικός αλγόριθμος εκτελέστηκε με τα εξής χαρακτηριστικά: πλήθος χρωμοσωμάτων ανά γενεά N=30, πιθανότητα SC p_{sc}=0.1, πιθανότητα SAC p_{sac}=0.1, πιθανότητα WAC p_{wac}=0.1, πιθανότητα UM p_{um}=0.1, πιθανότητα BM p_{bm}=0.03, πιθανότητα NUM p_{num}=0.35.

Οι τύποι και τα άλλα κόστα των δομικών μονάδων του συστήματος που χρησιμοποιήθηκαν (Παραβολικοί Συλλέκτες, γεννήτρια, ατμοστρόβιλος, εναλλάκτες θερμότητας) παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1. 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. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την ακτινοβολία (σε οριζόντιο επίπεδο) παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.2.

Όλες οι τιμές (κόστος) αναφέρονται σε παρούσα αξία (στο χρόνο 0). Οι τιμές των παραμέτρων που έχουν υπολογιστεί στο 6° κεφάλαιο και αναφέρονται σε μελλοντική αξία στο τελευταίο έτος (n – οστό) της μελέτης ανήχθησαν στο έτος 0, μέσω της διαίρεσής τους με $(1+i)^n$ όπως έχει περιγραφεί στο 4° κεφάλαιο, όπου i είναι το ετήσιο κόστος χρήματος. Επίσης, στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης αντιστρέφεται το πρόσημο ώστε να προκύψει η τιμή της καθαρής παρούσας αξίας (NPV) όπως αυτή έχει οριστεί στην παράγραφο 4.1. 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 4.4% και 7.54% αντίστοιχα, όπως έχουν περιγραφεί στο 4° κεφάλαιο. Στον Πίνακα 7.1

φαίνονται οι εμπορικές τιμές για τα διάφορα κόστη για όλες τις συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Τα επιμέρους χαρακτηριστικά των συσκευών του Πίνακα 8.1 φαίνονται στα Σχήματα 6.2 – 6.4.

Πίνακας 7.1: Τύποι και κόστη των στοιχείων του συστήματος			
Είδος	**Όνομα**	**Κόστος αγοράς**	**Κόστος Συντήρησης**
Παραβολικός Συλλέκτης	1. Soponova	100 €/m2	0.02 €/kWh
	2. IST	160 €/m2	0.02 €/kWh
Γεννήτρια & Ατμοστρόβιλος	1. no_name	500 €/kW	1% στο κόστος αγοράς
Εναλλάκτες Θερμότητας	1. no_name	100 €/kW	1% στο κόστος αγοράς

Η μορφή των αρχείων εξόδου του αλγορίθμου (αρχεία.txt) που δημιουργούνται μετά την εκτέλεσή του φαίνονται στο Σχήμα 7.1.

Ο αλγόριθμος αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού C++, χρησιμοποιώντας το λογισμικό Microsoft Visual Studio 2008 σε περιβάλλον Microsoft Windows XP SP3 και έχει δοκιμαστεί σε υπολογιστή με επεξεργαστή Core 2 Duo @ 3.0GHz και 2GB μνήμης RAM.

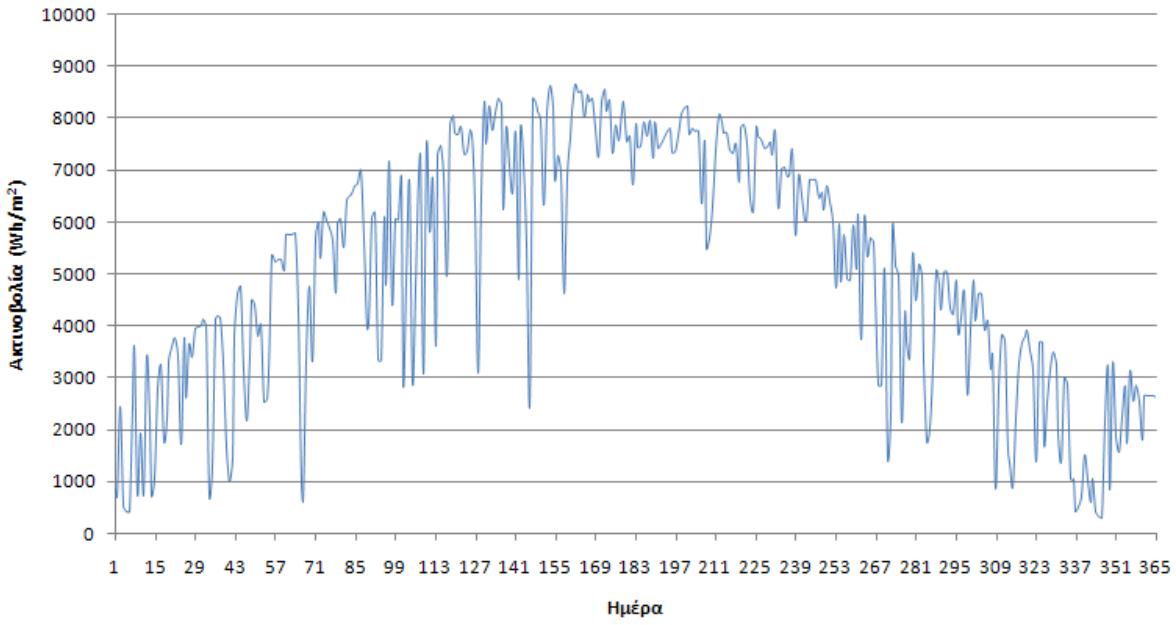
Στο Σχήμα 7.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα της χρονοσειράς των ημερήσιων τιμών ακτινοβολίας για την περιοχή του Πολυτεχνείου Κρήτης κατά τη διάρκεια του έτους 2003. Η χρονοσειρά αυτή προέκυψε με κατάλληλες μετρήσεις που είχαν πραγματοποιηθεί στη περιοχή αυτή.

```
**********************INPUT DATA**********************
PTSC module: number 1 in parab_specs.txt
Generator: number 1 in generators.txt
Turbine: number 1 in turbines.txt
Heat Exchanger: number 1 in heat_exchangers.txt

**********************Genetic Algorithm Input Data**********************
Rand Seed: 85438752
Population Number: 30
psc: 0.10
psac: 0.10
pwac: 0.10
pum: 0.10
pbm: 0.03
pnm: 0.35
Generations number 4

**********************OUTPUT DATA**********************
Number of parabolic trough collectors: 54
Arrangement of parabolic trough collectors in the given land:
Number of rows: 2
Distance Between Rows: 6.00 meters
Number of parabolic trough collectors in a row: 27
Southern dimension of land: 9.048000 meters
Western dimension of land: 98.739000 meters
Cost: -88675.85 Euros
Total runtime of the algorithm: 0 seconds
==================================================================
Subsidization percent: 40.00
Price per MWh: 270.00
Years: 20
Installation Cost: 28330.56 euros
Maintenance Cost: 15280.55 euros
Total Energy produced every year: 42.82 MWh
Energy Profits: 117508.31
Payback period: 3.20 years
Internal Rate of Return: 0.364420
====================================================================
```

Σχήμα 7.1: Παράδειγμα αρχείου εξόδου του αλγορίθμου



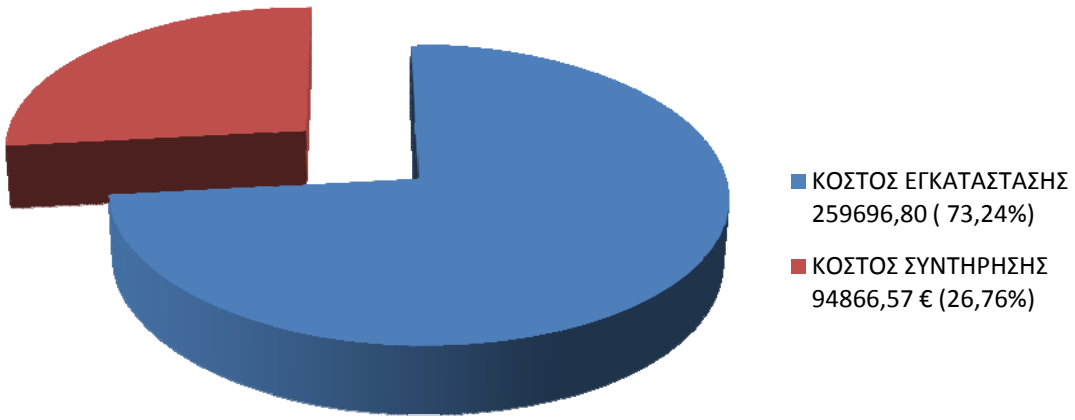
Σχήμα 7.2: Η μέση ημερήσια ακτινοβολία κατά τη διάρκεια του έτους 2003 στην περιοχή του Πολυτεχνείου Κρήτης.

7.2 Αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου για διάφορες τιμές επιδότησης, αγοράς έκτασης και φορολογίας εσόδων.

Ο αλγόριθμος εκτελέστηκε για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των συσκευών που φαίνονται στον Πίνακα 7.1 καθώς και για διάφορες τιμές επιδότησης (0%, 20%, 40%), αγοράς έκτασης ανά τετραγωνικό μέτρο (0€/m^2, 30€/m^2, 50€/m^2) και για διάφορες τιμές φορολογίας των εσόδων (0%, 18%, 25%) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω. Για ένα συνδυασμό επιδότησης, αγοράς έκτασης και φορολογίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς συσκευών ενώ για τις υπόλοιπες περιπτώσεις παρουσιάζεται μόνο η λύση του βέλτιστου συνδυασμού συσκευών. Για όλα τα παρακάτω αποτελέσματα έχουν επιλεγεί ως άνω όρια διαστάσεων της έκτασης 100m x 100m. Όλες οι τιμές που αναφέρονται είναι σε παρούσα αξία (στο έτος 0), ενώ το καθαρό κέρδος ταυτίζεται με την καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης. Επίσης, ο χρονικός ορίζοντας της επένδυσης τέθηκε ίσος με 20 χρόνια ώστε να είναι μικρότερος ή ίσος από τη συνήθη διάρκεια ζωής των παραβολικών συλλεκτών. Ακολουθούν τα αποτελέσματα για κάθε δυνατό συνδυασμό τύπων συσκευών και για επιδότηση 0%, κόστος αγοράς 0€/m^2 και για φορολογία εσόδων 0%. Λόγω

του ότι οι τιμές των χαρακτηριστικών που χρησιμοποιήθηκαν για την γεννήτρια, τον ατμοστρόβιλο και τους εναλλάκτες θερμότητας δεν αφορούν κάποιο συγκεκριμένο μοντέλο της αγοράς αλλά είναι ενδεικτικές, σε όλα τα αποτελέσματα που ακολουθούν χρησιμοποιήθηκαν ο τύπος γεννήτριας #1, ο ατμοστρόβιλος #1 και οι εναλλάκτες θερμότητας #1.

Πίνακας 7.2 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για τον Παραβολικό Συλλέκτη #1
Αριθμός Παραβολικών Συλλεκτών: 297
<u>Διάταξη στην έκταση της εγκατάστασης:</u> Αριθμός γραμμών: 11 Απόσταση μεταξύ των γραμμών(m): 8 Νότια πλευρά έκτασης(m): 96,76 Ανατολική πλευρά έκτασης(m): 98,73
Ύψος επιδότησης (%): 0 Ύψος φορολογίας εσόδων(%): 0
Τιμή πώλησης kWh (€): 0.27
Αριθμός ετών μελέτης: 20
Καθαρό κέρδος (€): 520966.50
Κόστος εγκατάστασης (€): 259696.80 Κόστος συντήρησης (€): 94866.57 Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (MWh): 319.05 Συνολικά κέρδη από την πώληση της ενέργειας (€): 875529.87
Χρόνος απόσβεσης (έτη): 4
Εσωτερικός βαθμός απόδοσης: 0.30

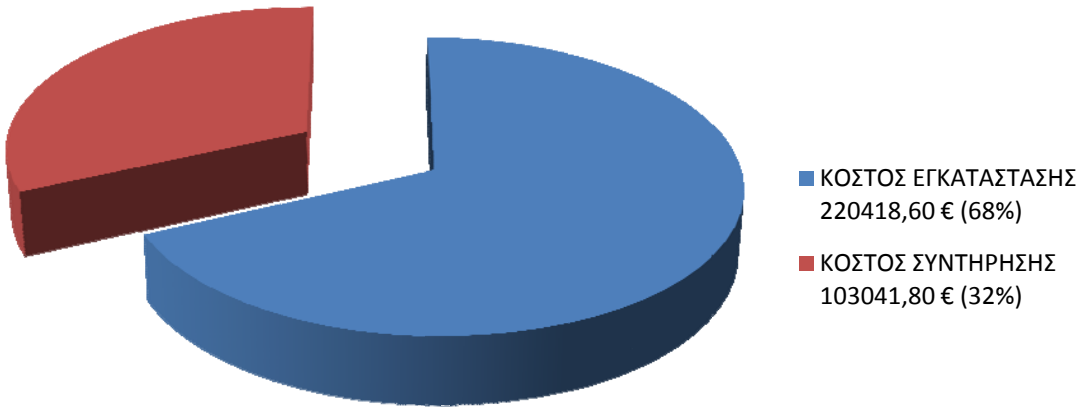


Σχήμα 7.3: Επιμερισμός της συμμετοχής (%) του κόστους εγκατάστασης και του κόστους συντήρησης στο συνολικό κόστος για τον Πίνακα 7.2

Πίνακας 7.3 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για τον Παραβολικό Συλλέκτη #2
Αριθμός Παραβολικών Συλλεκτών: 96
<u>Διάταξη στην έκταση της εγκατάστασης:</u> Αριθμός γραμμών: 6 Απόσταση μεταξύ των γραμμών(m): 11.59 Νότια πλευρά έκτασης(m): 71.75 Ανατολική πλευρά έκτασης(m): 97.6
Ύψος επιδότησης (%): 0 Ύψος φορολογίας εσόδων(%): 0
Τιμή πώλησης kWh (€): 0.27
Αριθμός ετών μελέτης: 20
Καθαρό κέρδος (€): 58685.23
Κόστος εγκατάστασης (€): 601900.80 Κόστος συντήρησης (€): 80274.73 Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (MWh): 269.98 Συνολικά κέρδη από την πώληση της ενέργειας (€): 740860.76
Χρόνος απόσβεσης (έτη): 16.3
Εσωτερικός βαθμός απόδοσης: 0.088

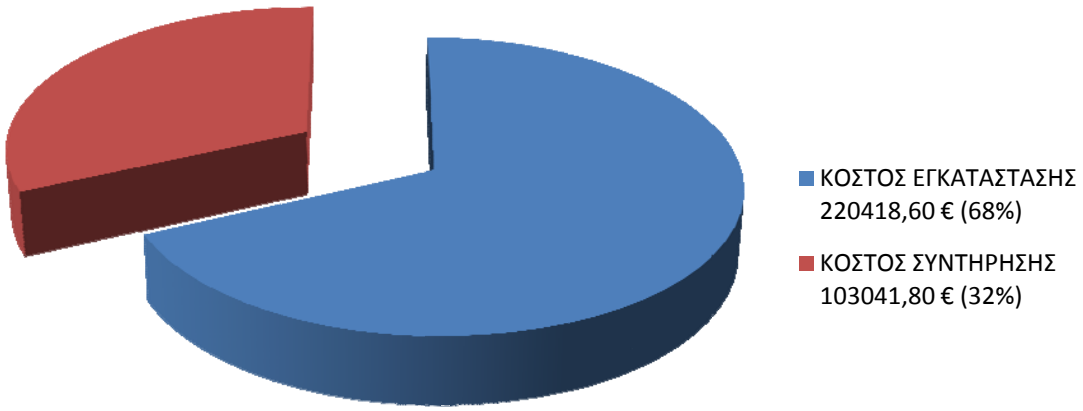
Ο συνδυασμός συσκευών που παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.2 αποτελεί τη βέλτιστη λύση για ύψος επιδότησης 0%, κόστος αγοράς έκτασης 0€/m^2 και φόρο εσόδων 0%. Ο συγκεκριμένος συνδυασμός αποτελεί επίσης τη βέλτιστη λύση σε όλα τα αποτελέσματα που εξήχθησαν (για άλλα ύψη επιδότησης, κόστος εγκατάστασης και φόρο εσόδων και φαίνονται στους Πίνακες 7.4 - 7.14) γι' αυτό από εδώ και στο εξής τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αναφέρονται σε χρήση του Παραβολικού Συλλέκτη #1 και, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, της γεννήτριας #1, του ατμοστρόβιλου #1 και των εναλλακτών θερμότητας #1 όπως αυτά έχουν κωδικοποιηθεί στον Πίνακα 7.1. Επίσης για τους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα επιμερισμού της συμμετοχής του κόστους εγκατάστασης και του κόστους συντήρησης στο συνολικό κόστος του συστήματος.

Πίνακας 7.4 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για ύψος επιδότησης 0%, κόστος έκτασης 0€/m^2 και φόρο εσόδων 25%
Αριθμός Παραβολικών Συλλεκτών: 297
<u>Διάταξη στην έκταση της εγκατάστασης:</u> Αριθμός γραμμών: 11 Απόσταση μεταξύ των γραμμών(m): 8 Νότια πλευρά έκτασης(m): 96.76 Ανατολική πλευρά έκτασης(m): 98.73
Ύψος επιδότησης (%): 0 Ύψος φορολογίας εσόδων(%): 25
Τιμή πώλησης kWh (€): 0.27
Αριθμός ετών μελέτης: 20
Καθαρό κέρδος (€): 333187.01
Κόστος εγκατάστασης (€): 220418.55 Κόστος συντήρησης (€): 103041.84 Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (MWh): 319.05 Συνολικά κέρδη από την πώληση της ενέργειας (€): 656647.40
Χρόνος απόσβεσης (έτη): 4.8
Εσωτερικός βαθμός απόδοσης: 0.25



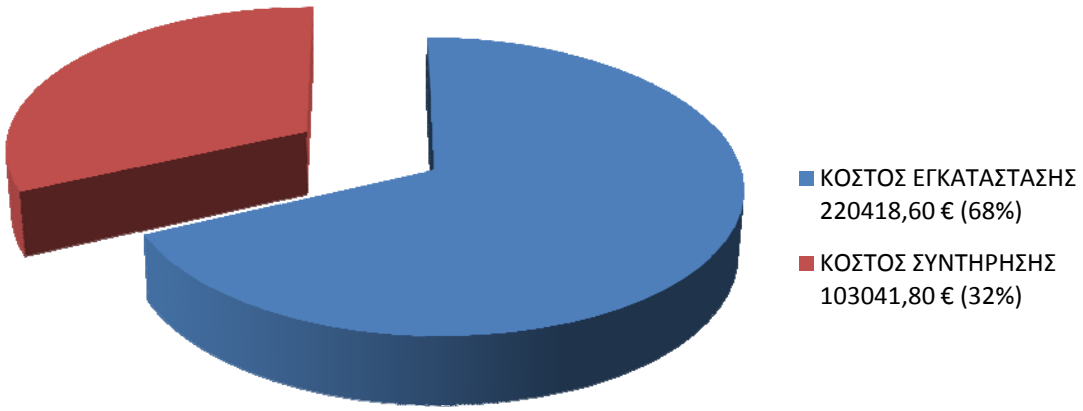
Σχήμα 7.4: Επιμερισμός της συμμετοχής (%) του κόστους εγκατάστασης και του κόστους συντήρησης στο συνολικό κόστος για τον Πίνακα 7.4

Πίνακας 7.5 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για ύψος επιδότησης 0%, κόστος έκτασης 0€/m^2 και φόρο εσόδων 18%
Αριθμός Παραβολικών Συλλεκτών: 297
<u>Διάταξη στην έκταση της εγκατάστασης:</u> Αριθμός γραμμών: 11 Απόσταση μεταξύ των γραμμών(m): 8 Νότια πλευρά έκτασης(m): 96.76 Ανατολική πλευρά έκτασης(m): 98.73
Ύψος επιδότησης (%): 0 Ύψος φορολογίας εσόδων(%): 18
Τιμή πώλησης kWh (€): 0.27
Αριθμός ετών μελέτης: 20
Καθαρό κέρδος (€): 394474.41
Κόστος εγκατάστασης (€): 220418.55 Κόστος συντήρησης (€): 103041.84 Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (MWh): 319.05 Συνολικά κέρδη από την πώληση της ενέργειας (€): 717934.49
Χρόνος απόσβεσης (έτη): 4.3
Εσωτερικός βαθμός απόδοσης: 0.27



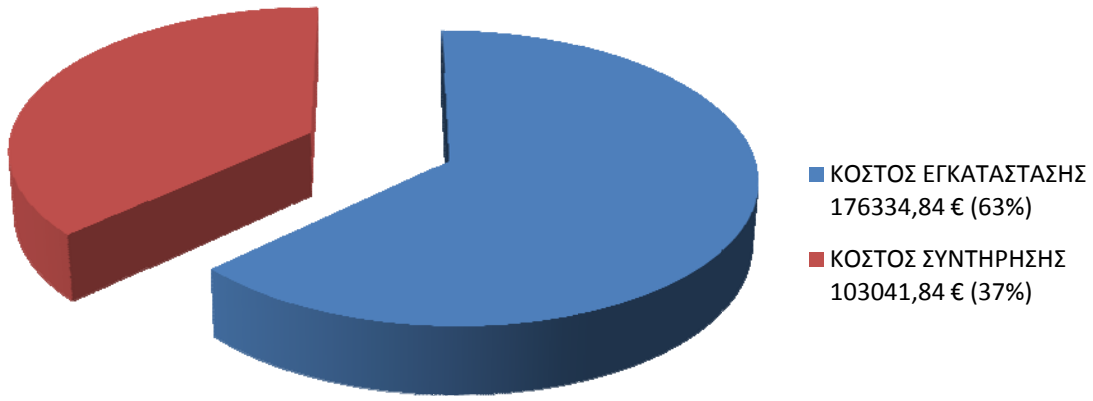
Σχήμα 7.5: Επιμερισμός της συμμετοχής (%) του κόστους εγκατάστασης και του κόστους συντήρησης στο συνολικό κόστος για τον Πίνακα 7.5

Πίνακας 7.6 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για ύψος επιδότησης 0%, κόστος έκτασης 0€/m^2 και φόρο εσόδων 0%
Αριθμός Παραβολικών Συλλεκτών: 297
<u>Διάταξη στην έκταση της εγκατάστασης:</u> Αριθμός γραμμών: 11 Απόσταση μεταξύ των γραμμών(m): 8 Νότια πλευρά έκτασης(m): 96.76 Ανατολική πλευρά έκτασης(m): 98.73
Ύψος επιδότησης (%): 0 Ύψος φορολογίας εσόδων(%): 0
Τιμή πώλησης kWh (€): 0.27
Αριθμός ετών μελέτης: 20
Καθαρό κέρδος (€): 552069.48
Κόστος εγκατάστασης (€): 220418.55 Κόστος συντήρησης (€): 103041.84 Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (MWh): 319.05 Συνολικά κέρδη από την πώληση της ενέργειας (€): 875529.87
Χρόνος απόσβεσης (έτη): 3.3
Εσωτερικός βαθμός απόδοσης: 0.35



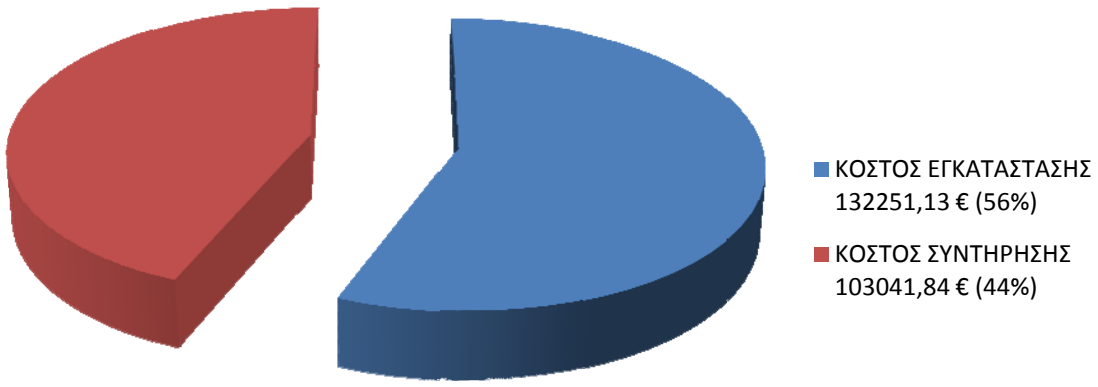
Σχήμα 7.6: Επιμερισμός της συμμετοχής (%) του κόστους εγκατάστασης και του κόστους συντήρησης στο συνολικό κόστος για τον Πίνακα 7.6

Πίνακας 7.7 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για ύψος επιδότησης 20%, κόστος έκτασης 0€/m^2 και φόρο εσόδων 0%
Αριθμός Παραβολικών Συλλεκτών: 297
<u>Διάταξη στην έκταση της εγκατάστασης:</u> Αριθμός γραμμών: 11 Απόσταση μεταξύ των γραμμών(m): 8 Νότια πλευρά έκτασης(m): 96.76 Ανατολική πλευρά έκτασης(m): 98.73
Ύψος επιδότησης (%): 20 Ύψος φορολογίας εσόδων(%): 0
Τιμή πώλησης kWh (€): 0.27
Αριθμός ετών μελέτης: 20
Καθαρό κέρδος (€): 596153.19
Κόστος εγκατάστασης (€): 176334.84 Κόστος συντήρησης (€): 103041.84 Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (MWh): 319.05 Συνολικά κέρδη από την πώληση της ενέργειας (€): 875529.87
Χρόνος απόσβεσης (έτη): 2.6
Εσωτερικός βαθμός απόδοσης: 0.44



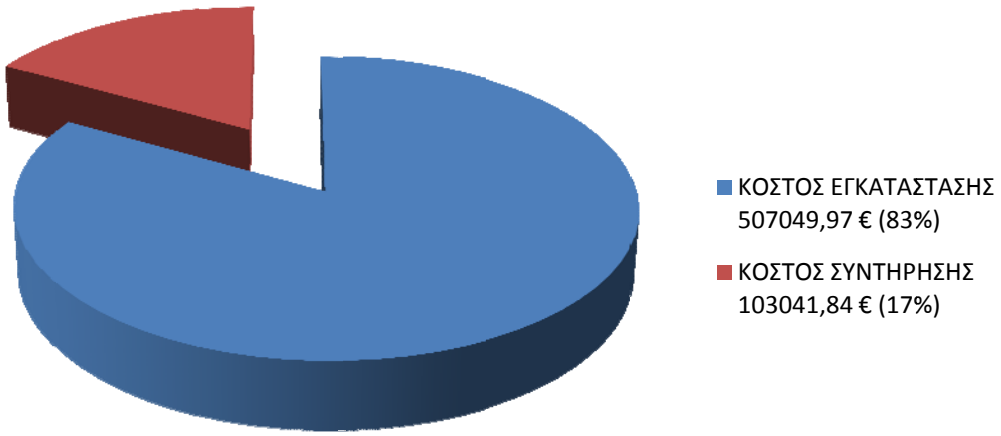
Σχήμα 7.7: Επιμερισμός της συμμετοχής (%) του κόστους εγκατάστασης και του κόστους συντήρησης στο συνολικό κόστος για τον Πίνακα 7.7

Πίνακας 7.8 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για ύψος επιδότησης 40%, κόστος έκτασης 0€/m^2 και φόρο εσόδων 0%
Αριθμός Παραβολικών Συλλεκτών: 297
<u>Διάταξη στην έκταση της εγκατάστασης:</u> Αριθμός γραμμών: 11 Απόσταση μεταξύ των γραμμών(m): 8 Νότια πλευρά έκτασης(m): 96.76 Ανατολική πλευρά έκτασης(m): 98.73
Ύψος επιδότησης (%): 40 Ύψος φορολογίας εσόδων(%): 0
Τιμή πώλησης kWh (€): 0.27
Αριθμός ετών μελέτης: 20
Καθαρό κέρδος (€): 640236.90
Κόστος εγκατάστασης (€): 132251.13 Κόστος συντήρησης (€): 103041.84 Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (MWh): 319.05 Συνολικά κέρδη από την πώληση της ενέργειας (€): 875529.87
Χρόνος απόσβεσης (έτη): 1.9
Εσωτερικός βαθμός απόδοσης: 0.59



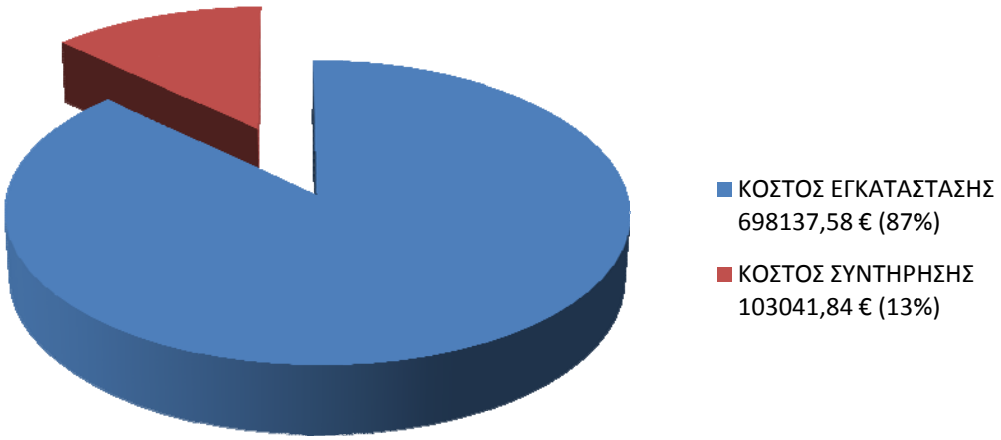
Σχήμα 7.8: Επιμερισμός της συμμετοχής (%) του κόστους εγκατάστασης και του κόστους συντήρησης στο συνολικό κόστος για τον Πίνακα 7.8

Πίνακας 7.9 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για ύψος επιδότησης 0%, κόστος έκτασης 30€/m^2 και φόρο εσόδων 0%
Αριθμός Παραβολικών Συλλεκτών: 297
<u>Διάταξη στην έκταση της εγκατάστασης:</u> Αριθμός γραμμών: 11 Απόσταση μεταξύ των γραμμών(m): 8 Νότια πλευρά έκτασης(m): 96.76 Ανατολική πλευρά έκτασης(m): 98.73
Ύψος επιδότησης (%): 0 Ύψος φορολογίας εσόδων(%): 0
Τιμή πώλησης kWh (€): 0.27
Αριθμός ετών μελέτης: 20
Καθαρό κέρδος (€): 265538.06
Κόστος εγκατάστασης (€): 507049.97 Κόστος συντήρησης (€): 103041.84 Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (MWh): 319.05 Συνολικά κέρδη από την πώληση της ενέργειας (€): 875529.87
Χρόνος απόσβεσης (έτη): 9.4
Εσωτερικός βαθμός απόδοσης: 0.14



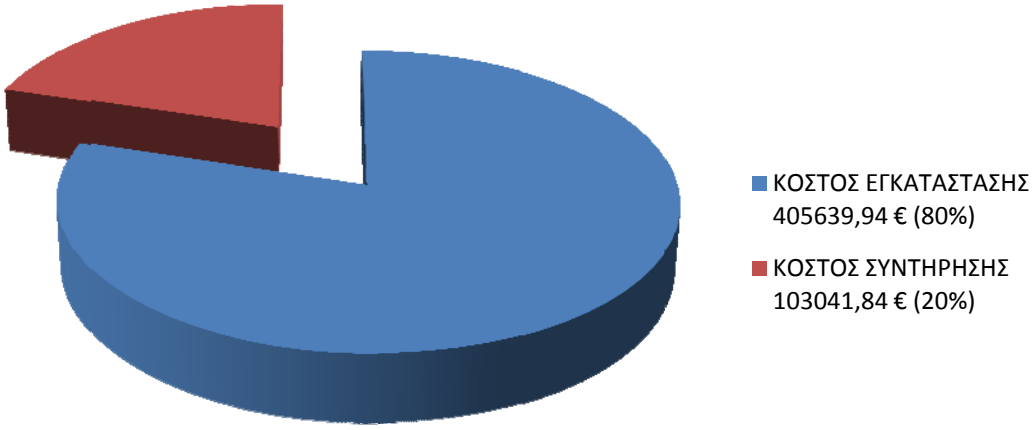
Σχήμα 7.9: Επιμερισμός της συμμετοχής (%) του κόστους εγκατάστασης και του κόστους συντήρησης στο συνολικό κόστος για τον Πίνακα 7.9

Πίνακας 7.10 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για ύψος επιδότησης 0%, κόστος έκτασης 50€/m^2 και φόρο εσόδων 0%
Αριθμός Παραβολικών Συλλεκτών: 297
<u>Διάταξη στην έκταση της εγκατάστασης:</u> Αριθμός γραμμών: 11 Απόσταση μεταξύ των γραμμών(m): 8 Νότια πλευρά έκτασης(m): 96.76 Ανατολική πλευρά έκτασης(m): 98.73
Ύψος επιδότησης (%): 0 Ύψος φορολογίας εσόδων(%): 0
Τιμή πώλησης kWh (€): 0.27
Αριθμός ετών μελέτης: 20
Καθαρό κέρδος (€): 74350.45
Κόστος εγκατάστασης (€): 698137.58 Κόστος συντήρησης (€): 103041.84 Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (MWh): 319.05 Συνολικά κέρδη από την πώληση της ενέργειας (€): 875529.87
Χρόνος απόσβεσης (έτη): 16
Εσωτερικός βαθμός απόδοσης: 0.089



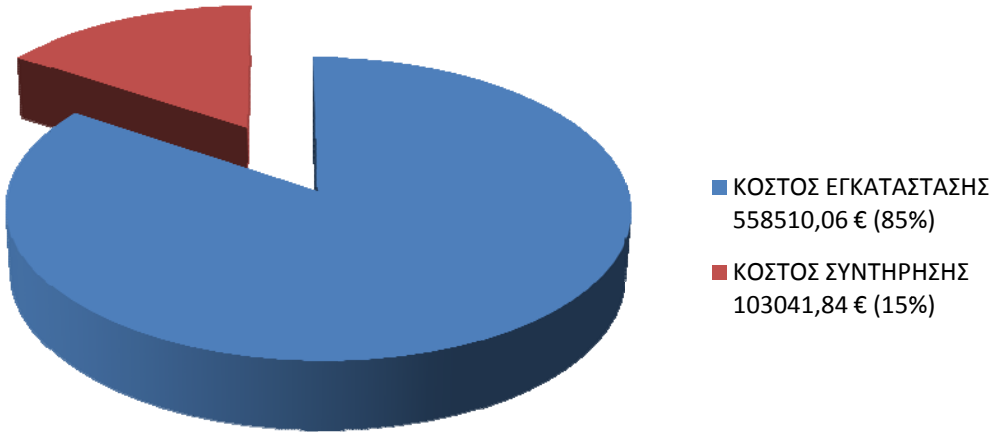
Σχήμα 7.10: Επιμερισμός της συμμετοχής (%) του κόστους εγκατάστασης και του κόστους συντήρησης στο συνολικό κόστος για τον Πίνακα 7.10

Πίνακας 7.11 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για ύψος επιδότησης 20%, κόστος έκτασης 30€/m^2 και φόρο εσόδων 0%
Αριθμός Παραβολικών Συλλεκτών: 297
<u>Διάταξη στην έκταση της εγκατάστασης:</u> Αριθμός γραμμών: 11 Απόσταση μεταξύ των γραμμών(m): 8 Νότια πλευρά έκτασης(m): 96.76 Ανατολική πλευρά έκτασης(m): 98.73
Ύψος επιδότησης (%): 20 Ύψος φορολογίας εσόδων(%): 0
Τιμή πώλησης kWh (€): 0.27
Αριθμός ετών μελέτης: 20
Καθαρό κέρδος (€): 366848.06
Κόστος εγκατάστασης (€): 405639.97 Κόστος συντήρησης (€): 103041.84 Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (MWh): 319.05 Συνολικά κέρδη από την πώληση της ενέργειας (€): 875529.87
Χρόνος απόσβεσης (έτη): 6.9
Εσωτερικός βαθμός απόδοσης: 0.18



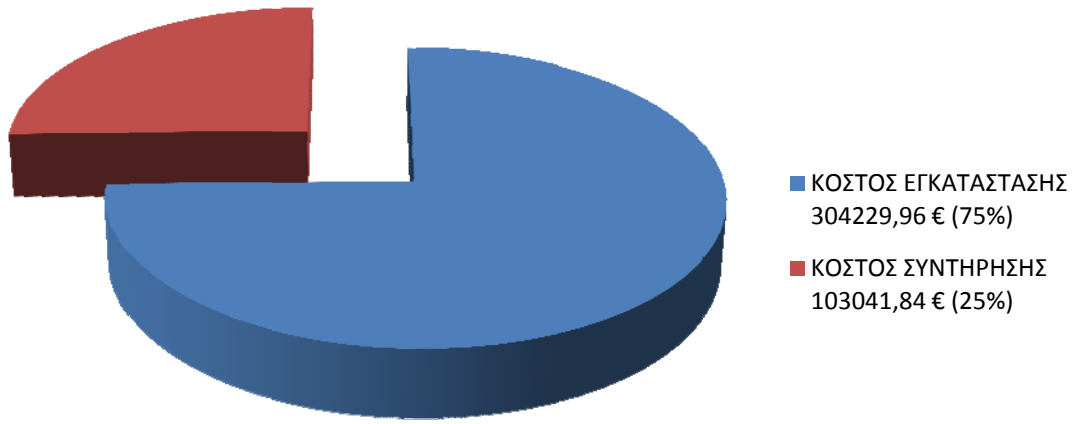
Σχήμα 7.11: Επιμερισμός της συμμετοχής (%) του κόστους εγκατάστασης και του κόστους συντήρησης στο συνολικό κόστος για τον Πίνακα 7.11

Πίνακας 7.12 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για ύψος επιδότησης 20%, κόστος έκτασης 50€/m^2 και φόρο εσόδων 0%
Αριθμός Παραβολικών Συλλεκτών: 297
<u>Διάταξη στην έκταση της εγκατάστασης:</u> Αριθμός γραμμών: 11 Απόσταση μεταξύ των γραμμών(m): 8 Νότια πλευρά έκτασης(m): 96.76 Ανατολική πλευρά έκτασης(m): 98.73
Ύψος επιδότησης (%): 20 Ύψος φορολογίας εσόδων(%): 0
Τιμή πώλησης kWh (€): 0.27
Αριθμός ετών μελέτης: 20
Καθαρό κέρδος (€): 213977.97
Κόστος εγκατάστασης (€): 558510.06 Κόστος συντήρησης (€): 103041.84 Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (MWh): 319.05 Συνολικά κέρδη από την πώληση της ενέργειας (€): 875529.87
Χρόνος απόσβεσης (έτη): 10.9
Εσωτερικός βαθμός απόδοσης: 0.12



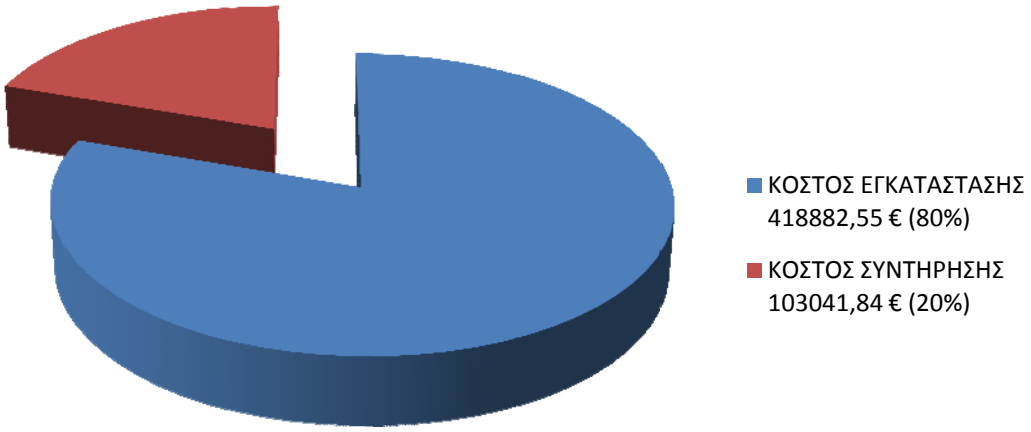
Σχήμα 7.12: Επιμερισμός της συμμετοχής (%) του κόστους εγκατάστασης και του κόστους συντήρησης στο συνολικό κόστος για τον Πίνακα 7.12

Πίνακας 7.13 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για ύψος επιδότησης 40%, κόστος έκτασης 30€/m^2 και φόρο εσόδων 0%
Αριθμός Παραβολικών Συλλεκτών: 297
<u>Διάταξη στην έκταση της εγκατάστασης:</u> Αριθμός γραμμών: 11 Απόσταση μεταξύ των γραμμών(m): 8 Νότια πλευρά έκτασης(m): 96.76 Ανατολική πλευρά έκτασης(m): 98.73
Ύψος επιδότησης (%): 40 Ύψος φορολογίας εσόδων(%): 0
Τιμή πώλησης kWh (€): 0.27
Αριθμός ετών μελέτης: 20
Καθαρό κέρδος (€): 450258.07
Κόστος εγκατάστασης (€): 304229.96 Κόστος συντήρησης (€): 103041.84 Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (MWh): 319.05 Συνολικά κέρδη από την πώληση της ενέργειας (€): 875529.87
Χρόνος απόσβεσης (έτη): 4.8
Εσωτερικός βαθμός απόδοσης: 0.25



Σχήμα 7.13: Επιμερισμός της συμμετοχής (%) του κόστους εγκατάστασης και του κόστους συντήρησης στο συνολικό κόστος για τον Πίνακα 7.13

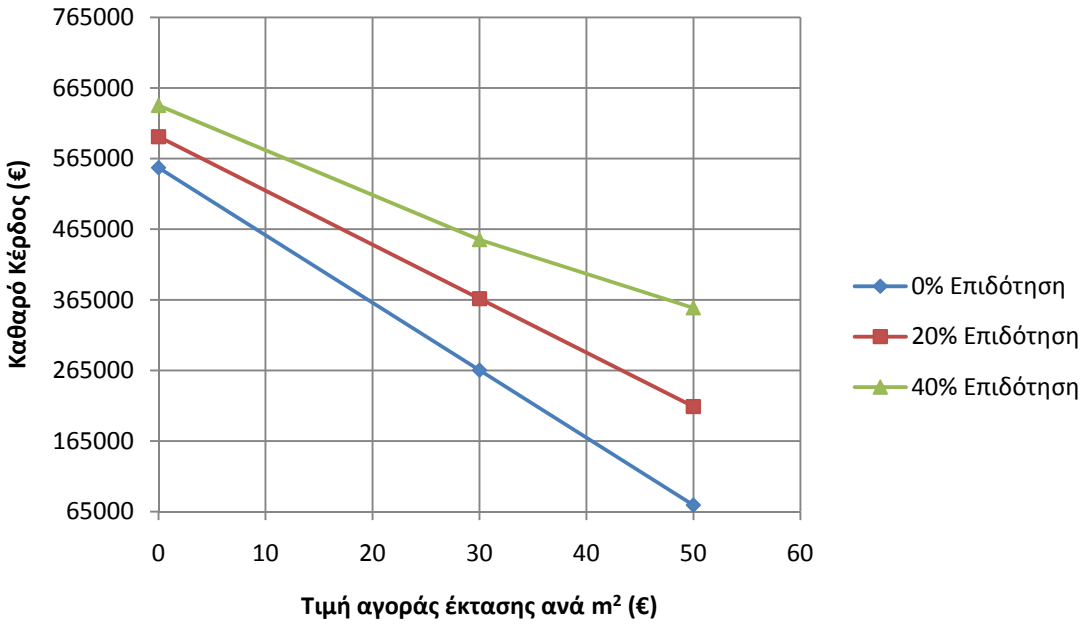
Πίνακας 7.14 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για ύψος επιδότησης 40%, κόστος έκτασης 50€/m^2 και φόρο εσόδων 0%
Αριθμός Παραβολικών Συλλεκτών: 297
<u>Διάταξη στην έκταση της εγκατάστασης:</u> Αριθμός γραμμών: 11 Απόσταση μεταξύ των γραμμών(m): 8 Νότια πλευρά έκτασης(m): 96.76 Ανατολική πλευρά έκτασης(m): 98.73
Ύψος επιδότησης (%): 40 Ύψος φορολογίας εσόδων(%): 0
Τιμή πώλησης kWh (€): 0.27
Αριθμός ετών μελέτης: 20
Καθαρό κέρδος (€): 353605.48
Κόστος εγκατάστασης (€): 418882.55 Κόστος συντήρησης (€): 103041.84 Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (MWh): 319.05 Συνολικά κέρδη από την πώληση της ενέργειας (€): 875529.87
Χρόνος απόσβεσης (έτη): 7.2
Εσωτερικός βαθμός απόδοσης: 0.17



Σχήμα 7.14: Επιμερισμός της συμμετοχής (%) του κόστους εγκατάστασης και του κόστους συντήρησης στο συνολικό κόστος για τον Πίνακα 7.14

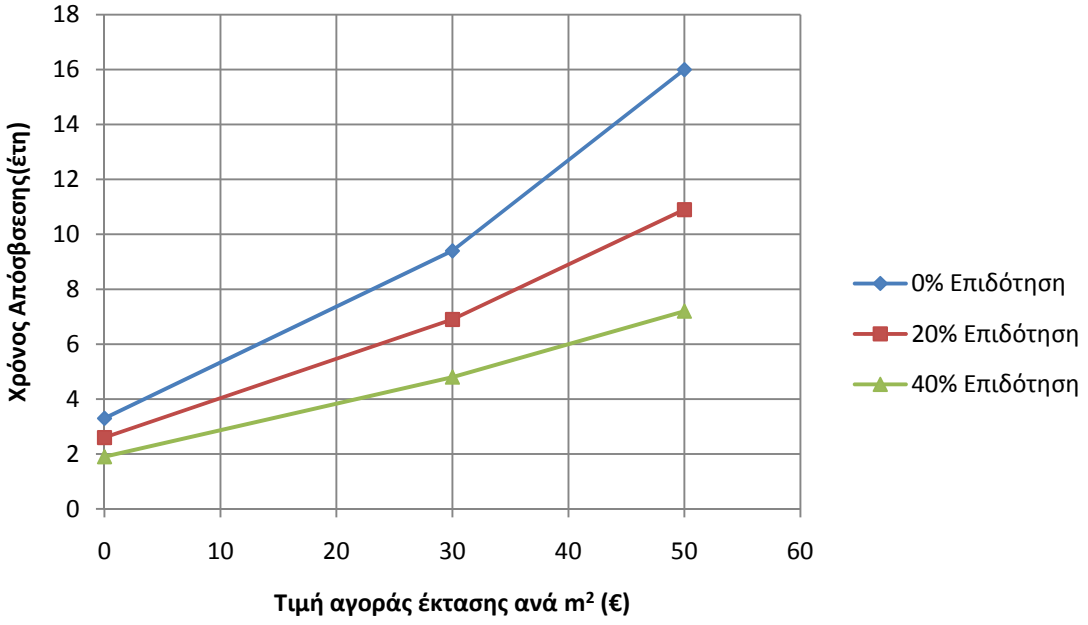
Παρατηρούμε ότι χρησιμοποιείται σχεδόν ολόκληρη η διαθέσιμη έκταση για την εγκατάσταση των Παραβολικών Συλλεκτών. Επίσης στα αντίστοιχα διαγράμματα επιμερισμού του συνολικού κόστους φαίνεται ότι το μεγαλύτερο μερίδιο κατέχει το κόστος εγκατάστασης (56% - 87%) έναντι του κόστους συντήρησης (44% - 13%).

Στα Σχήματα 7.15 – 7.17 απεικονίζεται η διακύμανση του καθαρού κέρδους, του χρόνου απόσβεσης και του εσωτερικού βαθμού απόδοσης, αντίστοιχα, σε σχέση με την τιμή αγοράς της έκτασης ανά τετραγωνικό μέτρο και για διάφορα ποσοστά επιδότησης.



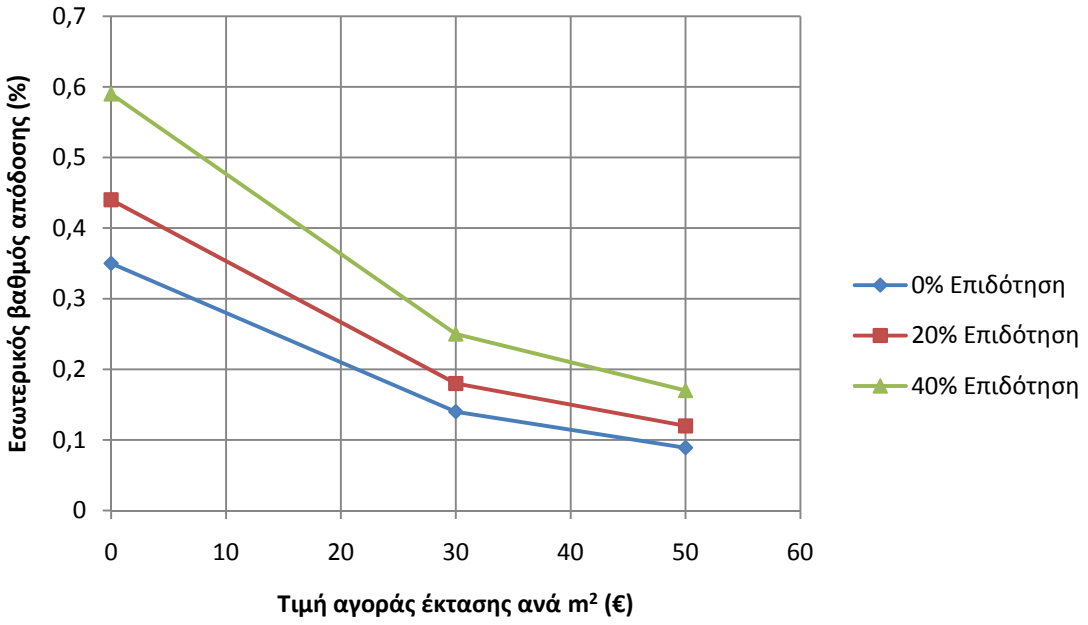
Σχήμα 7.15: Διακύμανση του καθαρού κέρδους σε σχέση με την τιμή αγοράς της έκτασης ανά m^2 για διάφορα ποσοστά επιχορήγησης

Στο Σχήμα 7.11 παρατηρείται ότι η αύξηση του καθαρού κέρδους είναι ανάλογη της αύξησης του ποσοστού επιδότησης, ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογη της αύξησης του κόστους αγοράς της έκτασης.



Σχήμα 7.16: Διακύμανση του χρόνου απόσβεσης σε σχέση με την τιμή αγοράς της έκτασης ανά m2 για διάφορα ποσοστά επιδότησης

Στο Σχήμα 7.16 παρατηρείται ότι η αύξηση του χρόνου απόσβεσης είναι ανάλογη της αύξησης του κόστους αγοράς της έκτασης, ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογη της αύξησης του ποσοστού επιδότησης.



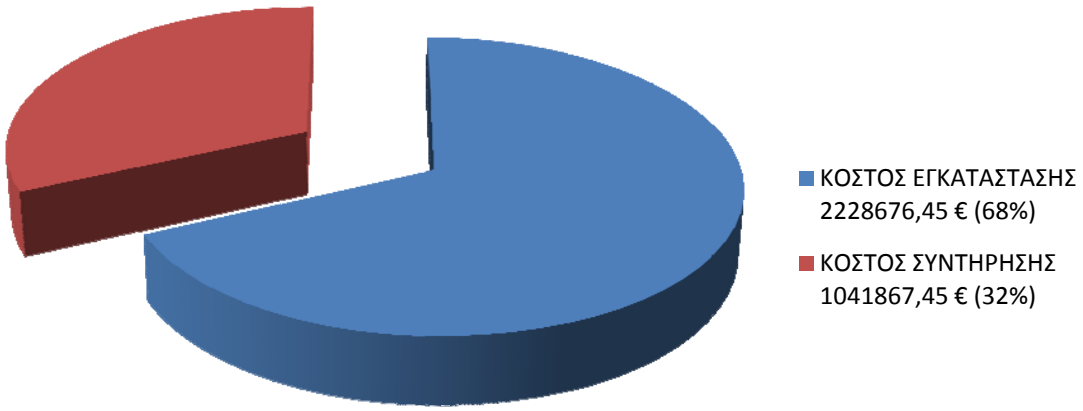
Σχήμα 7.17: Διακύμανση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (%) σε σχέση με την τιμή αγοράς της έκτασης ανά m2 για διάφορα ποσοστά επιδότησης.

Στο Σχήμα 7.17 παρατηρείται ότι η αύξηση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης είναι ανάλογη της αύξησης του ποσοστού επιδότησης, ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογη της αύξησης του κόστους αγοράς της έκτασης. Επίσης, από τα αποτελέσματα των Πινάκων 7.2 – 7.14 παρατηρείται ότι καλύπτεται το κριτήριο για τη βιωσιμότητα της επένδυσης που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.3 και προϋποθέτει η τιμή του εσωτερικού βαθμού απόδοσης της επένδυσης να είναι μεγαλύτερη από την επιλεγμένη τιμή του ετήσιου κόστους χρήματος και η τιμής της καθαρής παρούσας αξίας να είναι θετική. Όπως παρατηρείται, αυτές οι δύο προϋποθέσεις καλύπτονται σε όλα τα παραπάνω αποτελέσματα καθώς ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης είναι πάντα μεγαλύτερος από 7.54%, που είναι η επιλεγμένη τιμή του ετήσιου κόστους χρήματος, και η τιμή της καθαρής παρούσας αξίας (καθαρό κέρδος) είναι πάντα θετική.

7.3 Αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου για εκτάσεις μεγαλύτερες των δέκα στρεμμάτων

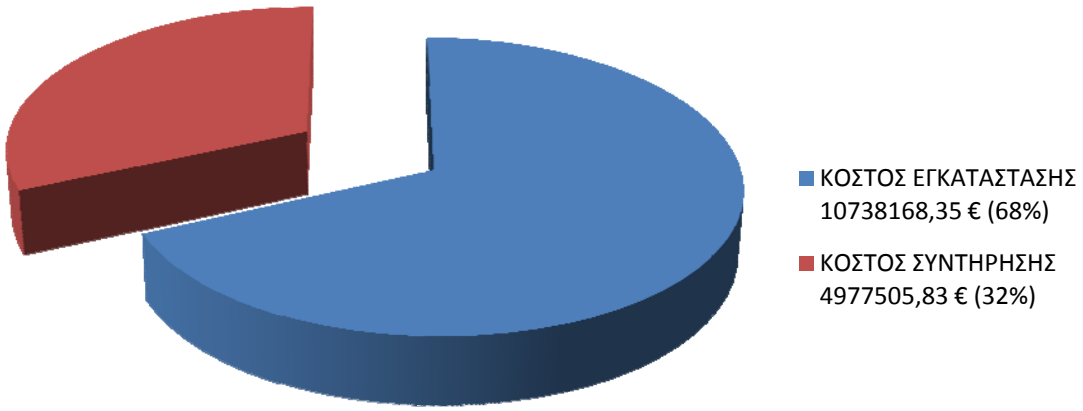
Στους Πίνακες 7.15 – 7.19 Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για διαστάσεις διαφορετικές των δέκα στρεμμάτων (15000m^2, 20000m^2, 100000m^2, 500000m^2 και 2000000m^2) για 0% επιδότηση και κόστος αγοράς έκτασης 0€/m^2. Τα αποτελέσματα έχουν προκύψει για τα δεδομένα ακτινοβολίας της περιοχής του Πολυτεχνείου Κρήτης και αναφέρονται στο συνδυασμό του τύπου του Παραβολικού Συλλέκτη #1, του τύπου της γεννήτριας #1, του ατμοστρόβιλου #1 και των εναλλακτών θερμότητας #1. Στα Σχήματα 7.18 – 7.22 παρουσιάζονται τα διαγράμματα επιμερισμού της συμμετοχής (%) του κόστους εγκατάστασης και του κόστους συντήρησης στο συνολικό κόστος του συστήματος, για τους Πίνακες 7.15 – 7.19, αντίστοιχα.

Πίνακας 7.15 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για εμβαδόν έκτασης 100000m^2
Αριθμός Παραβολικών Συλλεκτών: 3003
<u>Διάταξη στην έκταση της εγκατάστασης:</u> Αριθμός γραμμών: 11 Απόσταση μεταξύ των γραμμών(m): 8 Νότια πλευρά έκτασης(m): 96.76 Ανατολική πλευρά έκτασης(m): 998.36
Ύψος επιδότησης (%): 0 Ύψος φορολογίας εσόδων(%): 0
Τιμή πώλησης kWh (€): 0.27
Αριθμός ετών μελέτης: 20
Καθαρό κέρδος (€): 5582035.86
Κόστος εγκατάστασης (€): 2228676.45 Κόστος συντήρησης (€): 1041867.45 Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (MWh): 3225.97 Συνολικά κέρδη από την πώληση της ενέργειας (€): 8852579.76
Χρόνος απόσβεσης (έτη): 3.3
Εσωτερικός βαθμός απόδοσης: 0.35



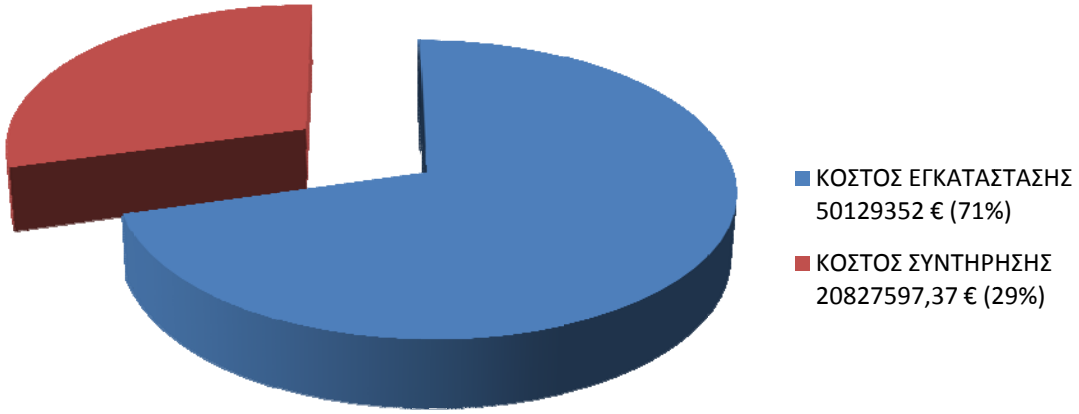
Σχήμα 7.18: Επιμερισμός της συμμετοχής (%) του κόστους εγκατάστασης και του κόστους συντήρησης στο συνολικό κόστος για τον Πίνακα 7.15

Πίνακας 7.16 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για εμβαδόν έκτασης 500000m^2
Αριθμός Παραβολικών Συλλεκτών: 14469
<u>Διάταξη στην έκταση της εγκατάστασης:</u> Αριθμός γραμμών: 53 Απόσταση μεταξύ των γραμμών(m): 8 Νότια πλευρά έκτασης(m): 496.77 Ανατολική πλευρά έκτασης(m): 998.36
Ύψος επιδότησης (%): 0 Ύψος φορολογίας εσόδων(%): 0
Τιμή πώλησης kWh (€): 0.27
Αριθμός ετών μελέτης: 20
Καθαρό κέρδος (€): 23415823.76
Κόστος εγκατάστασης (€): 10738168.35 Κόστος συντήρησης (€): 4977505.83 Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (MWh): 15400.71 Συνολικά κέρδη από την πώληση της ενέργειας (€): 39131497.59
Χρόνος απόσβεσης (έτη): 3.7
Εσωτερικός βαθμός απόδοσης: 0.31



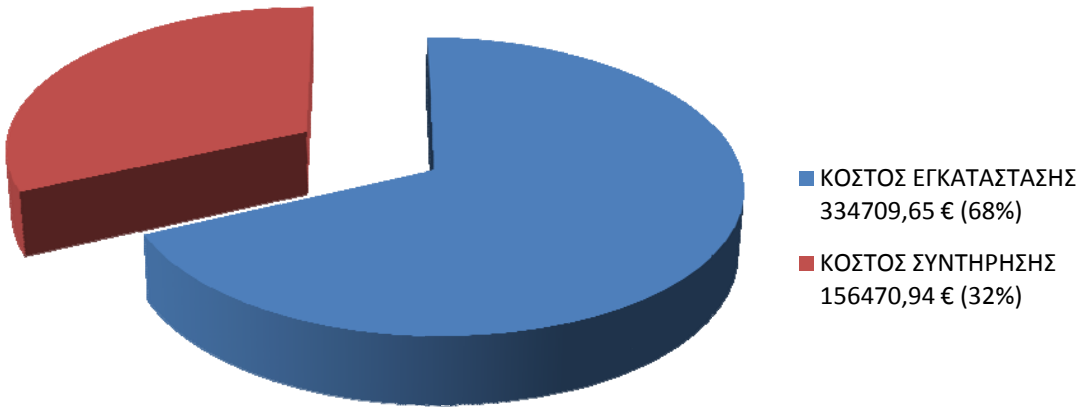
Σχήμα 7.19: Επιμερισμός της συμμετοχής (%) του κόστους εγκατάστασης και του κόστους συντήρησης στο συνολικό κόστος για τον Πίνακα 7.16

Πίνακας 7.17 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για εμβαδόν έκτασης 2000000m^2
Αριθμός Παραβολικών Συλλεκτών: 57330
<u>Διάταξη στην έκταση της εγκατάστασης:</u> Αριθμός γραμμών: 105 Απόσταση μεταξύ των γραμμών(m): 8 Νότια πλευρά έκτασης(m): 992.02 Ανατολική πλευρά έκτασης(m): 1996.72
Ύψος επιδότησης (%): 0 Ύψος φορολογίας εσόδων(%): 0
Τιμή πώλησης kWh (€): 0.27
Αριθμός ετών μελέτης: 20
Καθαρό κέρδος (€): 92615255.32
Κόστος εγκατάστασης (€): 42547459,50 Κόστος συντήρησης (€): 19700401.95 Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (MWh): 60948.41 Συνολικά κέρδη από την πώληση της ενέργειας (€): 154863116.77
Χρόνος απόσβεσης (έτη): 3.7
Εσωτερικός βαθμός απόδοσης: 0.31



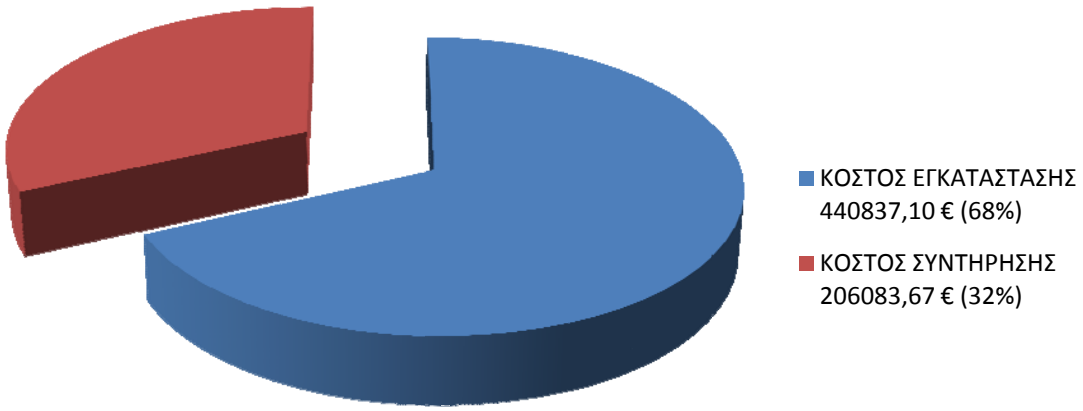
Σχήμα 7.20: Επιμερισμός της συμμετοχής (%) του κόστους εγκατάστασης και του κόστους συντήρησης στο συνολικό κόστος για τον Πίνακα 7.17

Πίνακας 7.18 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για εμβαδόν έκτασης 15000m^2
Αριθμός Παραβολικών Συλλεκτών: 451
<u>Διάταξη στην έκταση της εγκατάστασης:</u> Αριθμός γραμμών: 11 Απόσταση μεταξύ των γραμμών(m): 8 Νότια πλευρά έκτασης(m): 96.76 Ανατολική πλευρά έκτασης(m): 149.93
Ύψος επιδότησης (%): 0 Ύψος φορολογίας εσόδων(%): 0
Τιμή πώλησης kWh (€): 0.27
Αριθμός ετών μελέτης: 20
Καθαρό κέρδος (€): 838327.72
Κόστος εγκατάστασης (€): 334709.65 Κόστος συντήρησης (€): 156470.94 Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (MWh): 484.49 Συνολικά κέρδη από την πώληση της ενέργειας (€): 1329508.31
Χρόνος απόσβεσης (έτη): 3.3
Εσωτερικός βαθμός απόδοσης: 0.35



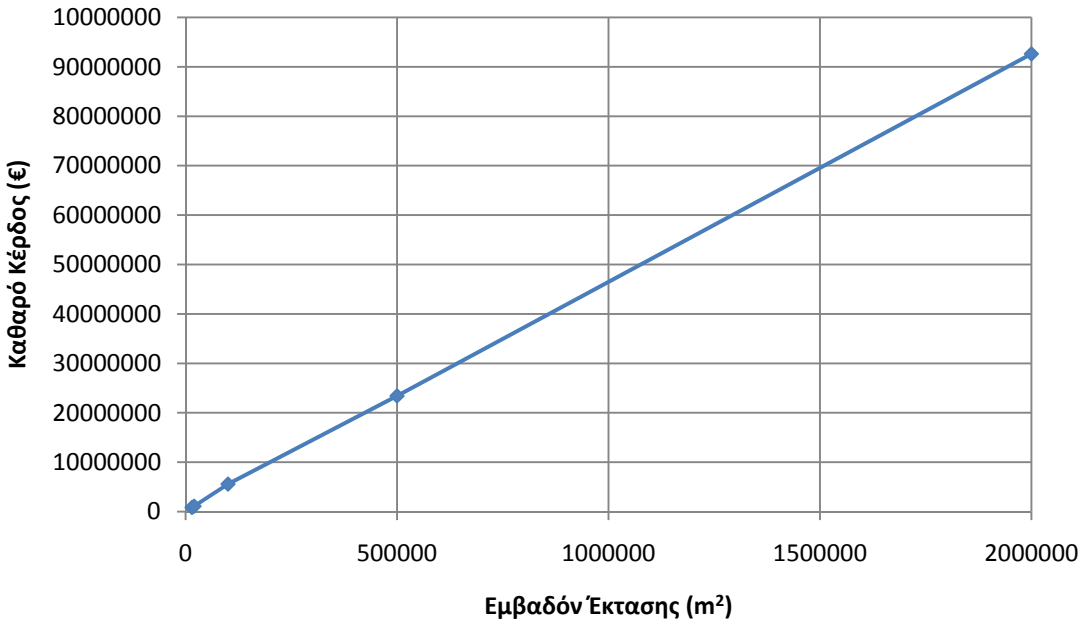
Σχήμα 7.21: Επιμερισμός της συμμετοχής (%) του κόστους εγκατάστασης και του κόστους συντήρησης στο συνολικό κόστος για τον Πίνακα 7.18

Πίνακας 7.19 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για εμβαδόν έκτασης 20000m^2
Αριθμός Παραβολικών Συλλεκτών: 594
<u>Διάταξη στην έκταση της εγκατάστασης:</u> Αριθμός γραμμών: 11 Απόσταση μεταξύ των γραμμών(m): 8 Νότια πλευρά έκτασης(m): 96.76 Ανατολική πλευρά έκτασης(m): 197.47
Ύψος επιδότησης (%): 0 Ύψος φορολογίας εσόδων(%): 0
Τιμή πώλησης kWh (€): 0.27
Αριθμός ετών μελέτης: 20
Καθαρό κέρδος (€): 1104138.96
Κόστος εγκατάστασης (€): 440837.10 Κόστος συντήρησης (€): 206083.67 Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (MWh): 638.10 Συνολικά κέρδη από την πώληση της ενέργειας (€): 1751059.73
Χρόνος απόσβεσης (έτη): 3.3
Εσωτερικός βαθμός απόδοσης: 0.35



Σχήμα 7.22: Επιμερισμός της συμμετοχής (%) του κόστους εγκατάστασης και του κόστους συντήρησης στο συνολικό κόστος για τον Πίνακα 7.19

Όπως φαίνεται στους Πίνακες 7.15 – 7.19 αξιοποιείται σχεδόν πλήρως η διαθέσιμη έκταση για την εγκατάσταση των παραβολικών συλλεκτών. Στα Σχήματα 7.18 – 7.22 που φαίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα επιμερισμού του συνολικού κόστους παρατηρείται ότι η σχέση κόστους εγκατάστασης – κόστους συντήρησης παραμένει σχεδόν σταθερή. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των Πινάκων 7.15 – 7.19, καθώς και του Πίνακα 7.6 που περιλαμβάνει τα αντίστοιχα αποτελέσματα για εμβαδόν διαθέσιμης έκτασης 10000m^2, έχει σχεδιαστεί το διάγραμμα που φαίνεται στο Σχήμα 7.23.



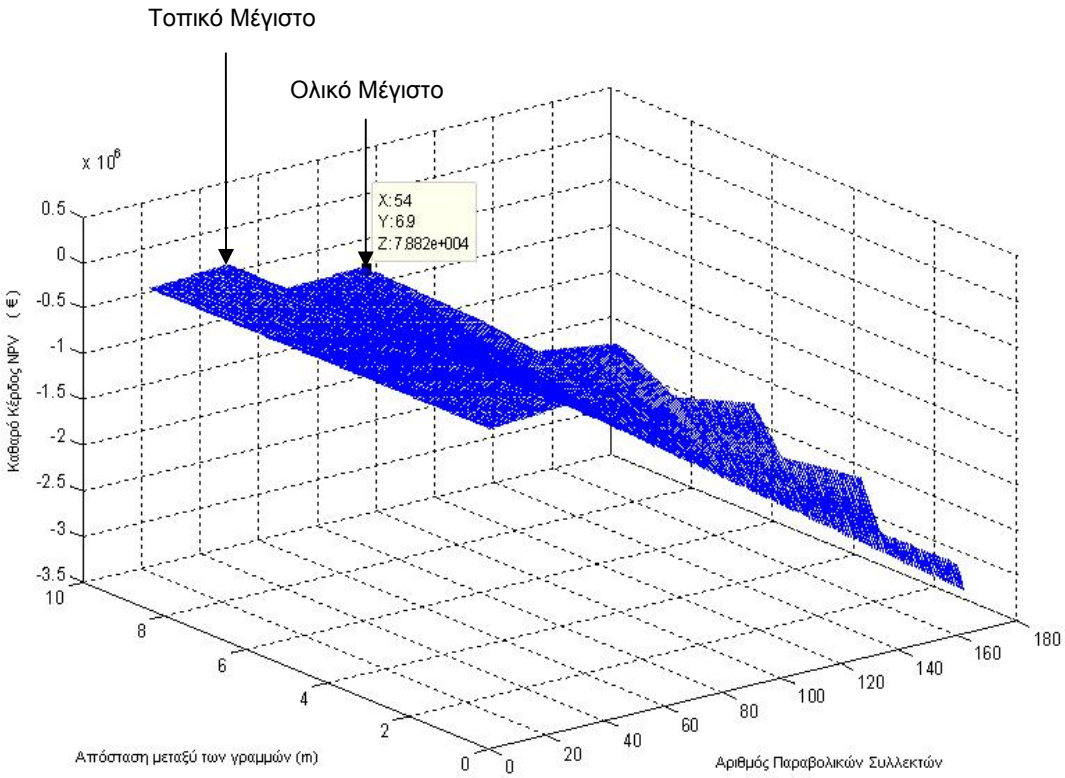
Σχήμα 7.23: Διάγραμμα του καθαρού κέρδους σε σχέση με το εμβαδόν της διαθέσιμης έκτασης

Παρατηρείται ότι η αύξηση του καθαρού κέρδους είναι σχεδόν ανάλογη της αύξησης του εμβαδού της έκτασης. Από το παραπάνω σχήμα προκύπτει μια μέση τιμή οφέλους ανά στρέμμα ίση με 51041.63 €. Στην εργασία [14] η αντίστοιχη μέση τιμή για τα Φ/Β ισούται με 516682.5 €. Η μεγάλη αυτή διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι η τιμή πώλησης της ενέργειας που παρέχεται από τα Φ/Β στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι διπλάσια από την τιμή πώλησης της ενέργειας που παρέχεται από τους παραβολικός συλλέκτες. Σημαντικό ρόλο παίζει και το μεγάλο κόστος εγκατάστασης των παραβολικών συλλεκτών αλλά και των υπόλοιπων συσκευών που χρησιμοποιούνται.

7.4 Αποτελεσματικότητα εφαρμογής των γενετικών αλγορίθμων στο πρόβλημα διαστασιολόγησης που μελετάται

Όπως έχει περιγραφεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι τελεστές των γενετικών αλγορίθμων που υλοποιήθηκαν χρησιμοποιούνται για επίλυση δύσκολων προβλημάτων. Διαπιστώθηκε ότι στο πρόβλημα της παρούσας εργασίας βρίσκουν τη βέλτιστη λύση χωρίς να εγκλωβίζονται σε τοπικά βέλτιστα. Στο Σχήμα 7.33 παρουσιάζεται ένα τρισδιάστατο διάγραμμα που απεικονίζει τις τιμές του κέρδους σε σχέση με τον αριθμό των παραβολικών συλλεκτών και σε σχέση με την απόσταση μεταξύ των γραμμών τους.

Όπως έχει περιγραφεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι τελεστές των γενετικών αλγορίθμων που υλοποιήθηκαν χρησιμοποιούνται για επίλυση δύσκολων προβλημάτων. Διαπιστώθηκε ότι στο πρόβλημα της παρούσας εργασίας βρίσκουν τη βέλτιστη λύση χωρίς να εγκλωβίζονται σε τοπικά βέλτιστα. Στο Σχήμα 7.24 παρουσιάζεται ένα τρισδιάστατο διάγραμμα που απεικονίζει τις τιμές του κέρδους σε σχέση με τον αριθμό των παραβολικών συλλεκτών και σε σχέση με την απόσταση μεταξύ των γραμμών τους.



Σχήμα 7.24: Διάγραμμα του καθαρού κέρδους (€) σε σχέση με τον αριθμό των παραβολικών συλλεκτών και σε σχέση με την απόσταση μεταξύ των γραμμών τους

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Το ολοένα αυξανόμενο ενδιαφέρον γύρω από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και το προσεχές ενεργειακό αδιέξοδο, οδήγησε στην αύξηση του ενδιαφέροντος που υπάρχει γύρω από το θέμα της διαστασιολόγησης συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μια μέθοδος διαστασιολόγησης συστήματος Παραβολικών Συλλεκτών για την παραγωγή ενέργειας και την παροχή της σε ηλεκτρικά δίκτυα. Για την μέθοδο που αναπτύχθηκε έγινε και μια οικονομική ανάλυση ως προς τον χρόνο απόσβεσης και τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης.

Στα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο 7^{ο} κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκαν εν μέρει υλικά που υπάρχουν στο εμπόριο με τιμές κόστους που βρέθηκαν σε μελέτες και δημοσιεύσεις. Από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει ότι, βάσει αυτών των τιμών κόστους, τέτοιου είδους συστήματα έχουν επενδυτικό ενδιαφέρον, όχι όμως πάντοτε. Περιπτώσεις όπου το κόστος εγκατάστασης είναι πολύ αυξημένο λόγω κόστους έκτασης ή λόγω κόστους των συσκευών δεν παρουσιάζουν επενδυτικό ενδιαφέρον αφού σύμφωνα με την οικονομική ανάλυση που έγινε, ένα τέτοιο σύστημα δεν αποσβένει ποτέ τα έξοδά του.

Ο χρόνος απόσβεσης για τις βέλτιστες λύσεις και για μηδενική επιδότηση κυμαίνεται γύρω από τα 3 έως τα 16 χρόνια, ανάλογα με το κόστος έκτασης. Ο χρόνος απόσβεσης μειώνεται ανάλογα με το ποσοστό επιδότησης. Αυτό οφείλεται περισσότερο στο κόστος εγκατάστασης και λιγότερο στο κόστος συντήρησης, όπως προκύπτει από τα αντίστοιχα διαγράμματα επιμερισμού του συνολικού κόστους του συστήματος για κάθε πίνακα αποτελεσμάτων στο 7^{ο} κεφάλαιο. Ο χρόνος απόσβεσης θα μπορούσε να μειωθεί με υψηλότερα ποσοστά επιδότησης (στην παρούσα εργασία η μέγιστη επιδότηση είναι ίση με 40%) ή με ψηλότερες τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Η αύξηση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης είναι επίσης ανάλογη της αύξησης του ποσοστού επιδότησης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.17.

Μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας εργασίας θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν διάφορες επιμέρους βελτιώσεις. Τέτοιες βελτιώσεις θα μπορούσαν να σχετίζονται με τον προσανατολισμό των συσκευών, να

τοποθετούνται δηλαδή με άξονα περιστροφής Βορρά – Νότο και όχι Ανατολή – Δύση όπως θεωρείται στην παρούσα εργασία. Επίσης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και διαφορετικοί τύποι σχημάτων της έκτασης πέραν του ορθογωνίου που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Χρήσιμο θα ήταν ο αλγόριθμος της παρούσας εργασίας να συνδεθεί με κάποια διεπαφή χρήστη για ευκολότερη χρήση καθώς και με κάποια βάση δεδομένων των χαρακτηριστικών των συσκευών. Επιπρόσθετα, η χρήση του αλγορίθμου για εφαρμογές με συνδυασμένη χρήση και άλλων τύπων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (υβριδικών συστημάτων) θα ήταν μια πολύ σημαντική βελτίωση.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Eduardo Lorenzo, Solar Electricity – Engineering of photovoltaic Systems, Progensa, 1994.

[2] Zbigniew Michalewicz, Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, 3rd ed., Springer Veriag, 1992.

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

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

[5] Κ. Κυρηττόπουλου, Σημειώσεις του μαθήματος "Παίγνιο Επιχειρήσεων – Επιχειρηματικά Σχέδια", Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, 2007.

[6] J. Appelbaum, J. Bany, Shadow Effect of Adjacen Solar Collectors in Large Scale Systems, Solar Energy, 23, 497 – 507, 1979.

[7] Hank Price and Vahab Hassani (National Renewable Energy Laboratory), Modular Trough Power Plant Cycle and Systems Analysis, 3 – 6, 25 – 28, 2002.

[8] Ευστράτιος Φ. Γεωργόπουλος, Σπυρίδων Δ. Λυκοθανάσης, Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγορίθμους, Πανεπιστήμιο Πατρών Πολυτεχνική Σχολή, Πάτρα 1999.

[9] H. Price (National Renewable Energy Laboratory), A Parabolic Trough Solar Power Plant Simulation Model: Preprint, 2003.

[10] G. Egbo, I.S. Sintali, H. Dandakouta, Analysis of Rim Angle Effect on the Geometric Dimensions of Solar Parabolic – Trough Collector In Bauchi, Nigeria, Int. Jor. P. App. Scs., 2(3), 11-20, 2008.

[11] Νικόλαος Π. Βασσιλάκος, Οικονομικοί Μηχανισμοί Υποστήριξης των ΑΠΕ στην Ελλάδα: Οδηγίες για τους Επενδυτές.

[12] Θάνος Ν. Στασινόπουλος, Σημειώσεις για το μεταπτυχιακό μάθημα “Βιοκλιματικός Σχεδιασμός”, Ηλιακή Γεωμετρία, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, 2001.

[13] Γιάννης Καντάρης, Ανάπτυξη συστήματος Sun – Tracking για μεγιστοποίηση της ενέργειας που παράγεται από φωτοβολταϊκά στοιχεία, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 3, 60 – 76, 2005.

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