

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ



***Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων
πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και
αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους***

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Άρης Κορνελάκης

Εξεταστική Επιτροπή:

Λέκτορας Ιωάννης Μαρινάκης (επιβλέπων)

Καθηγητής Ιωάννης Φίλης

Καθηγητής Βασίλειος Κουικόγλου

Χανιά 2009

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Λέκτορα κ. Ιωάννη Μαρινάκη για την ανάθεση και επίβλεψη
αυτής της εργασίας και τους Καθηγητές κ. Ιωάννη Φίλη και κ. Βασίλειο Κουικόγλου για τη
συμμετοχή τους στην επιτροπή αξιολόγησης.

Περίληψη

Η κρίση των συμβατικών πηγών ενέργειας τα τελευταία χρόνια έχει προκαλέσει έντονο ενδιαφέρον για την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Έτσι, όλο και περισσότερο αυξάνεται η ανάπτυξη ενεργειακών συστημάτων φωτοβολταϊκών στοιχείων με σκοπό την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε διασυνδεδεμένα δίκτυα.

Σκοπός της προτεινόμενης έρευνας είναι η ανάπτυξη κατάλληλων μεθόδων για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση τέτοιων συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, δηλαδή τη βέλτιστη επιλογή των διαφόρων παραμέτρων σχεδιασμού τους. Η βελτιστοποίηση γίνεται με στόχο τη μεγιστοποίηση των οικονομικών και περιβαλλοντικών οφελών των συστημάτων αυτών ενώ για τον εντοπισμό της βέλτιστης λύσης θα αναπτυχθούν και θα χρησιμοποιηθούν εξελικτικοί αλγόριθμοι και συγκεκριμένα γενετικοί αλγόριθμοι, αλγόριθμοι διαφορικής εξέλιξης και αλγόριθμοι νοημοσύνης σμήνους που εγγυώνται την αποδοτική παραγωγή των λύσεων των προβλημάτων αυτών σε σύντομο χρόνο.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	3
Περίληψη.....	4
Περιεχόμενα	5
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.1 Τα φωτοβολταϊκά συστήματα παραγωγής ενέργειας.....	9
1.2 Προηγούμενες σχετικές προσεγγίσεις.....	11
1.3 Η παρούσα μεθοδολογία	14
1.4 Η δομή της εργασίας	17
2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	19
2.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	19
2.1.1 Εισαγωγή	19
2.1.2 Συμβατική ηλιακή ακτινοβολία και ακτινοβολία ενός ήλιου	19
2.1.3 Η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους	21
2.1.4 Προσανατολισμός και κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων	21
2.1.5 Σύσταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στη γήινη επιφάνεια.....	23
2.1.6 Μέθοδος υπολογισμού της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο	24
2.1.7 Η φωτοβολταϊκή μετατροπή	29
2.1.8 Το μοντέλο του φωτοβολταϊκού στοιχείου.....	30
2.1.9 Φωτοβολταϊκά πλαίσια	33
2.1.9.1 Εισαγωγή.....	33
2.1.9.2 Χαρακτηριστικά λειτουργίας των Φ/Β πλαισίων	33
2.1.9.3 Υπολογισμός ισχύος πλαισίων σε οποιεσδήποτε συνθήκες	35
2.1.9.4 Το μοντέλο των Φ/Β πλαισίων για το σύστημα παραγωγής ενέργειας που μελετάται στην παρούσα εργασία.....	37

2.2	ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ DC/AC	38
2.2.1	Εισαγωγή	38
2.2.2	Μετατροπείς DC/AC διακοπτικού τύπου	39
2.2.3	Maximum Power Point Tracking.....	39
2.2.4	Βαθμός απόδοσης	40
3.	ΟΙ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ	42
3.1	Εισαγωγή.....	42
3.2	Η αντικειμενική συνάρτηση	42
3.3	Χειρισμός περιορισμών.....	42
3.4	Κωδικοποίηση μεταβλητών	44
3.5	Γενετικοί Αλγόριθμοι.....	44
3.5.1	Εισαγωγή	44
3.5.2	Ο βασικός Γενετικός Αλγόριθμος.....	46
3.5.3	Η συνάρτηση προσαρμογής.....	49
3.5.4	Μηχανισμοί επιλογής (selection mechanisms)	50
3.5.5	Πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης.....	51
3.5.6	Τελεστές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.....	51
3.6	Τεχνική Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization)	58
3.6.1	Εισαγωγή	58
3.6.2	Ο αλγόριθμος.....	58
3.7	Διαφορική Εξέλιξη.....	62
3.7.1	Εισαγωγή	62
3.7.2	Ο αλγόριθμος.....	63
4.	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ	66
4.1	Βελτιστοποίηση πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων.....	66
4.2	Βελτιστοποίηση πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων με Γενετικούς Αλγορίθμους	68

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

4.3 Προσεγγίσεις Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων.....	70
4.4 Ο προτεινόμενος αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων	74
4.5 Προσεγγίσεις βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων χρησιμοποιώντας Διαφορική Εξέλιξη.....	78
4.6 Ο προτεινόμενος αλγόριθμος Διαφορικής Εξέλιξης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων	80

5. ΜΕΘΟΔΟΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 83

5.1 Εισαγωγή.....	83
5.2 Οικονομικές παράμετροι.....	83
5.3 Ο χρόνος απόσβεσης.....	86
5.4 Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης.....	86
5.5 Μέθοδος προσδιορισμού του μεγέθους μείωσης των εκπομπών αερίων.....	87

6. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ 89

6.1 Εισαγωγή.....	89
6.2 Μοντελοποίηση σύνδεσης των Φ/Β πλαισίων με τους μετατροπείς.....	90
6.3 Μοντελοποίηση διάταξης των Φ/Β πλαισίων στην έκταση.....	92
6.4 Η μοντελοποίηση των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων	95
6.5 Ο αλγόριθμος προσομοίωσης του συστήματος.....	99

7. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ..... 101

7.1 Εισαγωγή.....	101
7.2 Η αρχικοποίηση του αλγορίθμου	101
7.3 Η αντικειμενική συνάρτηση των οικονομικών οφελών	103
7.4 Η αντικειμενική συνάρτηση των περιβαλλοντικών οφελών.....	106
7.5 Ο αλγόριθμος διόρθωσης των εσφαλμένων λύσεων.....	106
7.6 Σύγκλιση του αλγορίθμου	108

8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....109

- 8.1 Εισαγωγή..... 109
- 8.2 Αποτελέσματα και συγκρίσεις μεθόδων Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και Διαφορικής Εξέλιξης για μια αντικειμενική συνάρτηση..... 111
- 8.3 Αποτελέσματα αντικειμενικής συνάρτησης περιβαλλοντικών οφελών..... 120
- 8.4 Αποτελέσματα των αλγορίθμων βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων που αναπτύχθηκαν..... 123

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ 137

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ140

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Τα φωτοβολταϊκά συστήματα παραγωγής ενέργειας

Η ενέργεια θεωρείται ως μια από τις βασικότερες συνιστώσες της οικονομικής ανάπτυξης με την οποία συνδέεται άμεσα. Οι ενεργειακές απαιτήσεις παρατηρείται ότι αυξάνονται με ταχείς ρυθμούς οδηγώντας σε αύξηση του ανταγωνισμού για την εκμετάλλευση των φυσικών πόρων. Η ενέργεια που προέρχεται από ορυκτά καύσιμα προκαλεί εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Green House Gases, GHGs) οι οποίες απειλούν, αν δε μειωθούν δραστικά, τη σταθερότητα του κλίματος του πλανήτη. Σύμφωνα με τη Διεθνή Αντιπροσωπεία Ενέργειας (International Energy Agency, IEA) προβλέπεται ότι βάσει των πολιτικών που ενστερνίζονταν οι κυβερνήσεις μέχρι το 2006, από το 2004 έως το 2030 [1]:

- Οι συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις θα αυξηθούν κατά 53% προκαλώντας αύξηση κατά 55% στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) που σχετίζονται με την ενεργειακή παραγωγή.
- Τα ορυκτά καύσιμα θα παραμείνουν η κυρίαρχη πηγή ενέργειας παγκοσμίως αποτελώντας το 83% των ενεργειακών πόρων.
- Οι εκπομπές λόγω της ενεργειακής παραγωγής θα φτάσουν το 44% των συνολικών εκπομπών αερίων.
- Ο άνθρακας θα είναι η πηγή ενέργειας με την περισσότερο αυξανόμενη χρήση, κυρίως λόγω της χρήσης του στην Κίνα.
- Παραπάνω από το 70% της αύξησης των ενεργειακών αναγκών παγκοσμίως θα προέρχεται από τις αναπτυσσόμενες χώρες αντικατοπτρίζοντας έτσι τους ρυθμούς οικονομικής και πληθυσμιακής ανάπτυξης.
- Πάνω από 20 τρισεκατομμύρια δολάρια θα επενδυθούν στον τομέα της ενεργειακής παραγωγής.

Σύμφωνα με την IEA [1] βασική πρόκληση των επόμενων χρόνων είναι να καλυφθούν οι ενεργειακές απαιτήσεις με ταυτόχρονη μείωση της χρήσης του άνθρακα.

Ένα άλλο σημαντικό θέμα είναι η υπερθέρμανση του πλανήτη, η οποία σχετίζεται, εκτός των άλλων, και με θέματα ενεργειακής αυτονομίας και ισότητας των κρατών. Το συγκεκριμένο ζήτημα ήταν το βασικό αντικείμενο της διάσκεψης του Kyoto το Δεκέμβριο του 1997 μεταξύ 160 χωρών όπου, βάσει του αντίστοιχου πρωτοκόλλου, αποφασίστηκε ότι οι εκπομπές 6 αερίων του θερμοκηπίου πρέπει να μειωθούν τουλάχιστον κατά 5% σε σχέση με τις αντίστοιχες του 1990 κατά τη διάρκεια των ετών 2008 – 2012 [2].

Οι παραπάνω παράγοντες έχουν οδηγήσει στην εκμετάλλευση εναλλακτικών ηπιότερων μορφών ενέργειας, όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Αυτές οι πηγές ενέργειας, όπως είναι η αιολική, η ηλιακή και άλλες, έχουν ένα χαρακτηριστικό που τους δίνει την ονομασία αυτή, το ότι, δηλαδή, ανανεώνονται διαρκώς και προσφέρονται δωρεάν, ενώ είναι πολύ περισσότερο φιλικές προς το περιβάλλον σε σχέση με τις συμβατικές πηγές.

Ολοένα και περισσότερα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας χρησιμοποιούνται και καταλαμβάνουν ένα σημαντικό και διαρκώς αυξανόμενο μερίδιο από την παγκόσμια παραγωγή ενέργειας. Επίσης χρησιμοποιούνται τόσο ως αυτόνομα συστήματα (stand-alone systems) όσο και σε συνεργασία με το ηλεκτρικό δίκτυο. Τέτοιου είδους συστήματα είναι και τα διασυνδεδεμένα συστήματα φωτοβολταϊκών (Φ/Β) πλαισίων (photovoltaic grid-connected systems, PVGCSs). Τις τελευταίες δύο δεκαετίες τα συστήματα Φ/Β πλαισίων έχουν εξελιχθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό παγκοσμίως και ως υποσχόμενη πηγή ενέργειας υπάρχει σημαντική υποστήριξη τόσο σε ερευνητικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο εφαρμογών, κυρίως στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Αυτό έχει οδηγήσει σε σημαντική βελτίωση της απόδοσής τους και σε σημαντική μείωση του κόστους παραγωγής τους. Τα παραπάνω σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τέτοια συστήματα επιδοτούνται σημαντικά σε πολλές χώρες και μάλιστα η ενέργεια που παράγεται σε συστήματα συνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο πωλείται σε σχετικά υψηλές τιμές, έχουν δημιουργήσει, εκτός των άλλων, και επενδυτικό ενδιαφέρον για αυτά.

Ο σχεδιασμός ενός τέτοιου συστήματος για την παραγωγή ενέργειας απαιτεί την επίλυση ενός συνόλου προβλημάτων. Σκοπός της προτεινόμενης έρευνας είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση ενός τέτοιου συστήματος που συνδέεται με το ηλεκτρικό δίκτυο με κριτήρια τη μεγιστοποίηση των οικονομικών και περιβαλλοντικών οφελών από την ενέργεια που παράγεται. Επίσης λαμβάνεται υπόψη το ισχύον νομικό πλαίσιο στην Ελλάδα και τις υπόλοιπες χώρες της Ευρώπης για τα συστήματα ΑΠΕ το οποίο

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

προβλέπει επιδότηση του κόστους εγκατάστασης των συνδεδεμένων με το δίκτυο συστημάτων Φ/Β στοιχείων και πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγουν σε υψηλές τιμές (π.χ. βάσει της Ελληνικής νομοθεσίας, για συστήματα με εγκατεστημένη ισχύ μικρότερη ή ίση των εκατό kW_{peak} η τιμή πώλησης είναι 0,45€/kWh ενώ για συστήματα με εγκατεστημένη ισχύ μεγαλύτερη των εκατό kW_{peak} η τιμή πώλησης είναι 0,40€/kWh).

Η βελτιστοποίηση των προβλημάτων της προτεινόμενης έρευνας θα γίνει με χρήση μεθόδων εξελικτικής βελτιστοποίησης και συγκεκριμένα με μεθόδους Γενετικών Αλγορίθμων (Genetic Algorithms), Διαφορικής Εξέλιξης (Differential Evolution, DE) και Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization, PSO). Οι μέθοδοι αυτές πλεονεκτούν έναντι κλασσικών μεθόδων βελτιστοποίησης σε σύνθετα προβλήματα όπως αυτό της συγκεκριμένης έρευνας καθώς δεν αντιμετωπίζουν προβλήματα εγκλωβισμού σε τοπικά βέλτιστες λύσεις και έχουν τη δυνατότητα προσέγγισης της βέλτιστης λύσης με ακρίβεια ή με μικρές αποκλίσεις σε σχετικά σύντομο χρόνο. Η εφαρμογή αυτών των αλγορίθμων στο πρόβλημα που θα μελετηθεί θα οδηγήσει σε συμπεράσματα σχετικά με την απόδοση της κάθε μεθόδου στο υπό μελέτη πρόβλημα αλλά και σε αντίστοιχα προβλήματα βελτιστοποίησης.

1.2 Προηγούμενες σχετικές προσεγγίσεις

Οι Suri et al. (2007) εκπονούν μια γεωγραφική ανάλυση του δυναμικού της ηλιακής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση υπολογίζοντας με κατάλληλους αλγορίθμους προσομοίωσης για ένα σύστημα Φ/Β διατάξεων το ηθικό των ετησίως παραγόμενων kWh ανά kW_p εγκατεστημένης ισχύος του συστήματος. Από την ανάλυση αυτή προκύπτει έντονο ενδιαφέρον για τις χώρες της Μεσογείου κυρίως και ενδιαφέρουσες διαφορές μεταξύ των χωρών αλλά και μεταξύ περιοχών ίδιων χωρών. Επίσης, γίνεται ανάλυση της επίδρασης της κλίσης των Φ/Β διατάξεων δεδομένου ότι το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής της εγκατάστασης θεωρείται ως η βέλτιστη, σταθερή κατά τη συνολική διάρκεια του έτους, κλίση για τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας. Από την ανάλυση αυτή υπολογίζονται οι διαφορές απόδοσης που παρουσιάζονται από την εγκατάσταση των Φ/Β διατάξεων στη βέλτιστη κλίση, τόσο σε εγκατάστασή τους σε μηδενική κλίση όσο και σε εγκατάστασή τους σε κλίση 90°, ανά περιοχή. Έτσι π.χ. η εγκατάσταση των διατάξεων σε οριζόντιο επίπεδο στον ελλαδικό χώρο επηρεάζει την απόδοσή τους σε σχέση με την απόδοση στη βέλτιστη

κλίση στον ελάχιστο βαθμό, συγκριτικά με άλλες χώρες, και συγκεκριμένα οδηγεί σε μείωση 9-10% της ενεργειακής απόδοσης.

Οι Mondol et al. (2007) μελετούν με το λογισμικό προσομοίωσης TRNSYS την επίδραση της κλίσης και του προσανατολισμού των Φ/Β διατάξεων στην ενεργειακή απόδοσή τους για διάφορες περιπτώσεις περιοχών εγκατάστασης και εποχών. Έτσι, προκύπτουν διάφορα συμπεράσματα, όπως το ότι ενώ ο προσανατολισμός στο Νότο μεγιστοποιεί την ενεργειακή απόδοση για τη συνολική διάρκεια του έτους, σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους (π.χ. κατά τη διάρκεια της Άνοιξης) και υπό συγκεκριμένες συνθήκες (π.χ. συννεφιά) είναι αποδοτικότερος, αν και με μικρή διαφορά, ο προσανατολισμός των διατάξεων σε διαφορετικές κατευθύνσεις.

Οι James et al. (2006) εξετάζουν τη χρήση ενός ή πολλαπλών μετατροπέων ισχύος DC/AC σε σύστημα εγκατεστημένης ισχύος μέχρι 5kWp. Όπως αναφέρεται σε αυτή την εργασία, είναι δυνατόν τα πραγματικά χαρακτηριστικά τάσης και ρεύματος ενός Φ/Β πλαισίου να διαφέρουν σε μικρό βαθμό από αυτά που δηλώνει ο κατασκευαστής του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πολλαπλά Φ/Β πλαίσια ίδιου τύπου συνδεδεμένα σε ένα μετατροπέα ισχύος να παρουσιάζουν μεταξύ τους μικρές διαφορές ως προς τα χαρακτηριστικά τάσης και ρεύματος, γεγονός που οδηγεί στη μείωση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος. Λαμβάνοντας υπόψη το συγκεκριμένο φαινόμενο προκύπτει ότι η χρήση ενός μοναδικού μετατροπέα ισχύος DC/AC αποτελεί τη συνολικά οικονομικότερη λύση για αυτό το σύστημα.

Οι Bernal-Agustin and Dufo-Lopez (2006) εκπονούν οικονομική και περιβαλλοντική ανάλυση για ένα σύστημα Φ/Β διατάξεων, εγκατεστημένων στη βέλτιστη κλίση και στο βέλτιστο προσανατολισμό, το οποίο είναι διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο στην Ισπανία. Έτσι, για διατάξεις εγκατεστημένες στη βέλτιστη κλίση, με δεδομένη απόδοση ενέργειας και χωρίς να λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα σκίασης των διατάξεων γίνεται οικονομική ανάλυση βασισμένη στη μέθοδο της καθαρής παρούσας αξίας και του χρόνου απόσβεσης για διάφορα σενάρια επιδότησης. Επίσης γίνεται υπολογισμός της μείωσης των εκλυόμενων εκπομπών ρυπογόνων ουσιών από τις αντίστοιχες συμβατικές πηγές που θα χρειαζόνταν για την παραγωγή της ενέργειας του υπό μελέτη συστήματος.

Οι Fernando-Infantes et al. (2006) αναλύουν το σχεδιασμό ενός συστήματος Φ/Β διατάξεων εγκατεστημένου στην οροφή ενός σχολείου για την κάλυψη του φορτίου του

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

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

Οι Rehman et al. (2006) αναλύουν τόσο ενεργειακά όσο και οικονομικά την απόδοση διαφόρων Φ/Β συστημάτων εγκατεστημένων στη Σαουδική Αραβία με βάση μετρήσεις που ελήφθησαν από αυτά. Επίσης αναλύεται και η περιβαλλοντική επίδρασή τους με παρόμοιο τρόπο με τις προηγούμενες μεθόδους.

Από τους Gong and Kulkarni (2005) παρουσιάζεται η διαστασιολόγηση ενός συστήματος Φ/Β διατάξεων εγκατεστημένου στην οροφή ενός κτιρίου. Ειδικότερα δίνεται έμφαση στην έκταση που καταλαμβάνουν οι εγκατεστημένες Φ/Β διατάξεις και στην κλίση τους. Έτσι, επιλέγεται η καλύτερη θέση τους με οικονομικά κριτήρια, λαμβάνοντας υπόψη το ότι υπάρχουν ήδη εγκαταστάσεις βάσεων στήριξης από παλαιότερα εγκατεστημένους ηλιακούς συλλέκτες, και η κλίση τους επιλέγεται να είναι ίση με την κλίση της οροφής (42°). Χρησιμοποιώντας ένα λογισμικό υπολογισμού ενέργειας για τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής της εγκατάστασης αποδεικνύεται ότι η βέλτιστη κλίση ώστε να υπάρχει η μέγιστη δυνατή παραγωγή ενέργειας κατά τη διάρκεια του έτους είναι περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Τέλος, υπολογίζονται τα επιμέρους κόστη για την εγκατάσταση αυτού του συστήματος.

Οι Talavera et al. (2007) προτείνουν μια μέθοδο υπολογισμού του εσωτερικού βαθμού απόδοσης της επένδυσης σε ένα σύστημα Φ/Β διατάξεων συνδεδεμένων στο ηλεκτρικό δίκτυο. Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης αποτελεί μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδο αξιολόγησης επενδύσεων. Μέσω μιας σειράς αρκετών βημάτων με μαθηματικούς υπολογισμούς που περιγράφονται και χρησιμοποιώντας παράγοντες όπως ο πληθωρισμός, η ετήσια ενεργειακή παραγωγή, η εγκατεστημένη ισχύς και η τιμή πώλησης της ενέργειας μπορεί να υπολογιστεί ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης.

Μια μεθοδολογία σχεδιασμού συστημάτων για το βέλτιστο μέγεθος και τη χωρική κατανομή σε δίκτυα διανομής προτείνεται από τους Hernandez et al. (2007). Στην εργασία αυτή επιχειρείται η βέλτιστη ισορροπία μεταξύ τεχνικών και οικονομικών κριτηρίων μέσω πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις σχετίζονται με τη σταθερότητα της τάσης και την ποιότητα της ισχύος με την οποία τροφοδοτούνται τα δίκτυα διανομής, λόγω της στοχαστικής φύσης της παραγωγής ενέργειας από Φ/Β στοιχεία λόγω καιρικών συνθηκών. Τα οικονομικά κριτήρια σχετίζονται με τη βιωσιμότητα της επένδυσης σε αυτά τα συστήματα βάσει των οικονομικών απολαβών από την πώληση της ενέργειας, τα κόστη συντήρησης και τα κόστη των ενεργειακών απωλειών του δικτύου διανομής.

Μια μεθοδολογία επιλογής της βέλτιστης τοποθεσίας εγκατάστασης ενός συστήματος Φ/Β πλαισίων συνδεδεμένων με το ηλεκτρικό δίκτυο παρουσιάζεται από τους Carrion et al. (2008). Η βέλτιστη επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης καθορίζεται συνδυάζοντας πολυκριτήρια ανάλυση, τη μέθοδο analytic hierarchy process και γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (geographical information systems, GIS), βάσει κλιματικών, περιβαλλοντικών και τοπογραφικών παραγόντων.

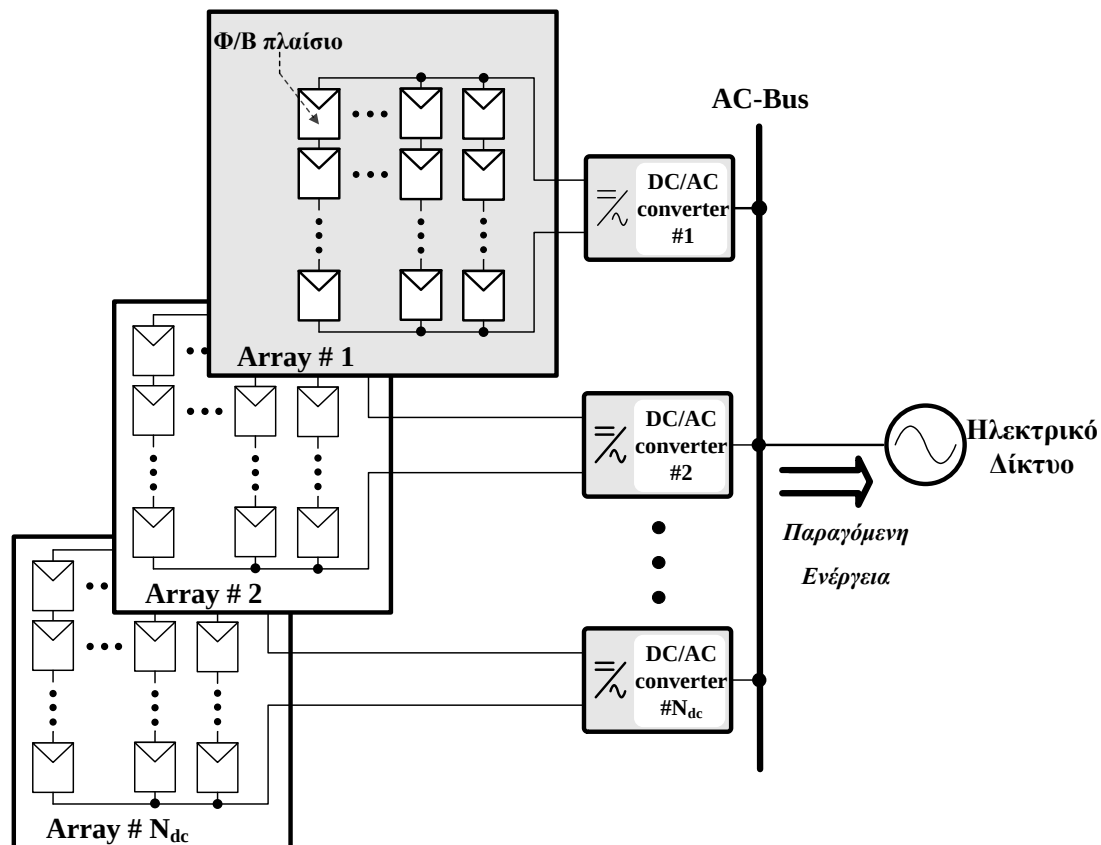
Οι Kornelakis and Koutroulis (2009) πρότειναν μια μεθοδολογία βέλτιστου σχεδιασμού και οικονομικής ανάλυσης συστημάτων Φ/Β πλαισίων συνδεδεμένων με το ηλεκτρικό δίκτυο. Από τη συγκεκριμένη εργασία προκύπτει ότι η οικονομική βιωσιμότητα και η επιλογή των παραμέτρων σχεδιασμού των συστημάτων αυτών επηρεάζεται σημαντικά από παράγοντες όπως το κόστος της διαθέσιμης έκτασης, η τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας και το ποσοστό της επιδότησης. Η αντικειμενική συνάρτηση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας αντιστοιχεί στην Καθαρή Παρούσα Αξία της επένδυσης, ενώ η βελτιστοποίηση γίνεται χρησιμοποιώντας Γενετικούς Αλγορίθμους.

1.3 Η παρούσα μεθοδολογία

Το σύστημα αποτελείται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1, από Φ/Β πλαίσια (PV modules) συνδεδεμένα σε συγκεκριμένες συνδεσμολογίες (arrays) (παράλληλες ομάδες με πλήθος συνδεδεμένων σε σειρά Φ/Β πλαισίων) με ένα αριθμό μετατροπέων ισχύος DC/AC (DC/AC converters) οι οποίοι μετατρέπουν το συνεχές (DC) ρεύμα των Φ/Β πλαισίων σε εναλλασσόμενο (AC) ρεύμα που παρέχεται στο ηλεκτρικό δίκτυο και οι οποίοι είναι

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

συνδεδεμένοι και συγχρονισμένοι με το ηλεκτρικό δίκτυο. Στο σύστημα που μελετάται δεν υπάρχουν αποθηκευτικά μέσα (π.χ. μπαταρίες). Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται το γενικό διάγραμμα που χρησιμοποιείται στη μοντελοποίηση του συστήματος παραγωγής ενέργειας που θα μελετάται στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 1.1: Το γενικό διάγραμμα του συστήματος παραγωγής ενέργειας από Φ/Β πλαίσια.

Η βελτιστοποίηση αναφέρεται στις εξής παραμέτρους:

- βέλτιστο πλήθος των Φ/Β πλαισίων,
- βέλτιστος αριθμός των γραμμών Φ/Β πλαισίων ανά διάταξη εντός της διαθέσιμης έκτασης και
- βέλτιστη κλίση των πλαισίων κατά τη διάρκεια του έτους.

Τα αντικειμενικά κριτήρια προς μεγιστοποίηση είναι το οικονομικό όφελος που προκύπτει από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας για τα έτη της μελέτης καθώς και το περιβαλλοντικό όφελος κατά τη λειτουργία του συστήματος.

Το οικονομικό όφελος περιλαμβάνει τόσο το κόστος αγοράς και εγκατάστασης των διαφόρων στοιχείων όσο και το κόστος συντήρησής τους. Οι παράμετροι κόστους που λαμβάνονται υπόψη στην αντικειμενική συνάρτηση της μεθοδολογίας που προτείνεται είναι οι εξής:

- κόστος αγοράς και συντήρησης των συσκευών του συστήματος (Φ/Β πλαίσια και μετατροπείς DC/AC)
- κόστος της έκτασης της εγκατάστασης
- κόστος των βάσεων στήριξης

Υποψήφιες λύσεις θεωρούνται αυτές που καλύπτουν πλήρως τους περιορισμούς που τίθενται και σχετίζονται με τη διασύνδεση των Φ/Β πλαισίων με τους μετατροπείς DC/AC και με τη διάταξη των Φ/Β πλαισίων εντός της έκτασης της εγκατάστασης. Για την αξιολόγηση μιας λύσης για τον αν μπορεί να είναι υποψήφια λύση του προβλήματος υλοποιείται προσομοίωση για τους παράγοντες της διαστασιολόγησης σε σχέση με τον τρόπο σύνδεσης των Φ/Β πλαισίων στους μετατροπείς ισχύος DC/AC και με τον τρόπο διάταξης των Φ/Β πλαισίων στην έκταση της εγκατάστασης. Ο υπολογισμός της παραγόμενης ενέργειας γίνεται χρησιμοποιώντας μετεωρολογικά δεδομένα που έχουν προκύψει ύστερα από τη λήψη μετρήσεων, οπότε υπολογίζεται η μέση ημερήσια ή η μέση μηνιαία τιμή τους. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στην παρούσα μέθοδο, όπως προαναφέρθηκε, γίνεται βελτιστοποίηση των οικονομικών οφελών βάσει της μεθόδου της Καθαρής Παρούσας Αξίας καθώς και των περιβαλλοντικών οφελών του συστήματος. Εξετάζεται η αποδοτικότητα των μεθόδων της τεχνικής Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και της Διαφορικής Εξέλιξης σε σχέση με τους Γενετικούς Αλγορίθμους που έχουν προταθεί (Kornelakis and Koutroulis) για την επίλυση του προβλήματος ενός αντικειμενικού κριτηρίου (οικονομικά οφέλη). Επίσης, εφαρμόζονται οι μέθοδοι της τεχνικής Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και της Διαφορικής Εξέλιξης για την επίλυση του συστήματος δύο κριτηρίων που αντιστοιχεί στην

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

βελτιστοποίηση πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων βάσει τόσο οικονομικών όσο και περιβαλλοντικών οφελών.

1.4 Η δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία είναι δομημένη ως εξής σε ενότητες:

Το 2^ο κεφάλαιο αναφέρεται στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Παρουσιάζονται αρχικά τα χαρακτηριστικά της ηλιακής ενέργειας, περιγράφεται η μέθοδος υπολογισμού της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο με βάση την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο και εν συνεχεία αναλύεται το μοντέλο ενός Φ/Β στοιχείου. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η επίδραση της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στην ισχύ εξόδου του Φ/Β στοιχείου και συνεπώς στην παραγόμενη ενέργειά του. Τέλος, γίνεται περιγραφή της λειτουργίας των μετατροπέων DC/AC.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εξελικτικοί αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή. Περιγράφονται οι τελεστές και τα βήματα των Γενετικών Αλγορίθμων, της τεχνικής Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και της Διαφορικής Εξέλιξης καθώς και οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση και την εύρεση της λύσης ενός προβλήματος.

Στο 4^ο κεφάλαιο περιγράφονται τα προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων και η επίλυσή τους με διάφορες παραλλαγές των αλγορίθμων που αναλύθηκαν στο 3^ο κεφάλαιο. Επίσης, προτείνονται σχήματα της τεχνικής Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και της Διαφορικής Εξέλιξης για την επίλυση των προβλημάτων αυτής της κατηγορίας.

Στο 5^ο κεφάλαιο περιγράφονται και αναλύονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την οικονομική και την περιβαλλοντική αξιολόγηση των συστημάτων.

Στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Συγκεκριμένα, περιγράφεται το μοντέλο διασύνδεσης των Φ/Β πλαισίων στους μετατροπείς ισχύος DC/AC, το μοντέλο διάταξης των Φ/Β πλαισίων στην έκταση της εγκατάστασης και η μοντελοποίηση των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων.

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

Στο 7^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του προβλήματος βελτιστοποίησης με τις αντικειμενικές συναρτήσεις (κριτήρια βελτιστοποίησης) του συστήματος που αναπτύχθηκαν τους περιορισμούς του προβλήματος και τους αλγορίθμους χειρισμού τους.

Στο 8^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται διάφορα αποτελέσματα με χρήση των μεθόδων που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία.

Τέλος, στο 9^ο κεφάλαιο περιγράφονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν και προτείνονται μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας εργασίας.

2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

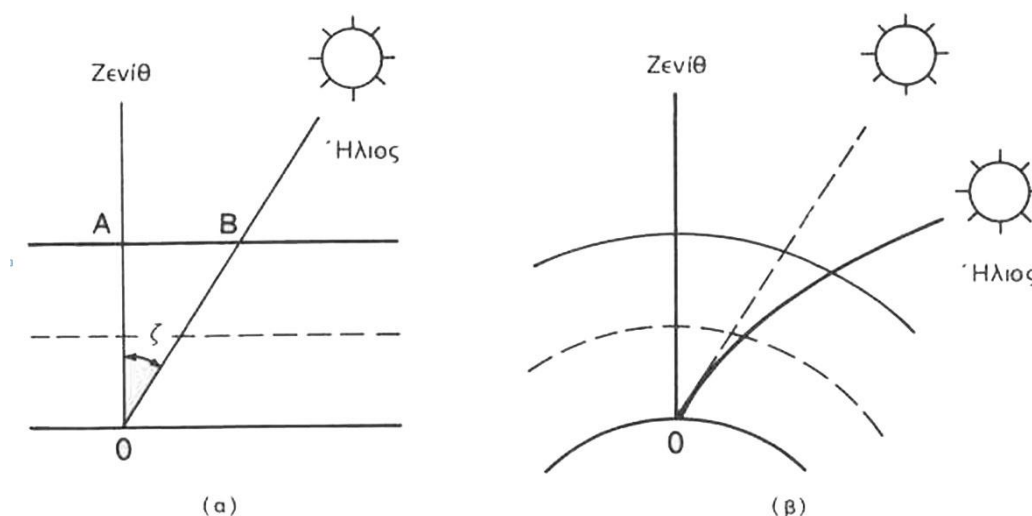
2.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

2.1.1 Εισαγωγή

Η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας (solar irradiation) προέρχεται από θερμοπυρηνικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό του Ήλιου. Σαν αποτέλεσμα των αντιδράσεων αυτών, μεγάλες ποσότητες υδρογόνου μετατρέπονται σε ήλιο με τη σύγχρονη απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας με συνέπεια την ελάττωση της μάζας του Ήλιου με ρυθμό 4.000.000 τόνων το δευτερόλεπτο [14]. Αν μελετήσει κανείς το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας θα δει ότι εκτείνεται σε όλα τα μήκη κύματος. Από το σύνολο μηκών κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας μόνο το 75% μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προκαλέσει ηλεκτρικό ρεύμα στα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Αυτό το ποσοστό περιλαμβάνει μικρά μήκη κύματος (μεγάλες συχνότητες) δηλαδή μεγάλες ενέργειες φωτονίων. Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγραφούν τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία σχετικά με την παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά στοιχεία.

2.1.2 Συμβατική ηλιακή ακτινοβολία και ακτινοβολία ενός ήλιου

Πέρα από τους παραπάνω παράγοντες που αναφέρθηκαν, η τελική μορφή και η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης, διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τη θέση του Ήλιου στον ουρανό. Συμβατικά, 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 AM (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 ουσιαστικά πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα, σε σύγκριση με την κατακόρυφη διαδρομή της.



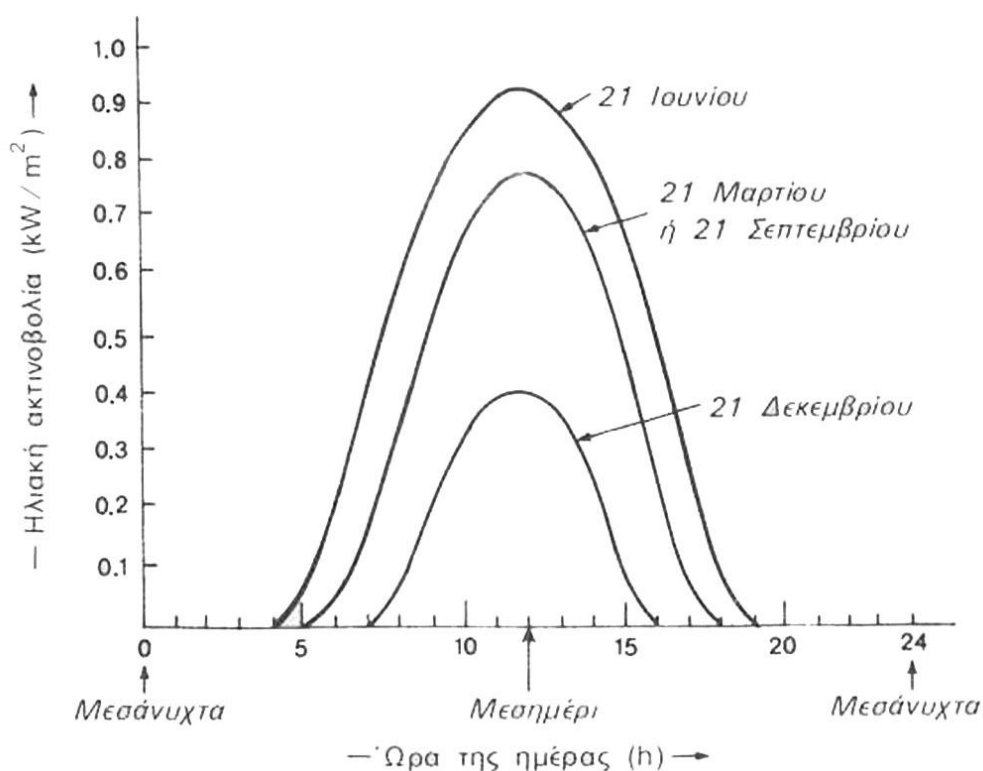
Σχήμα 2.1: Εξάρτηση AM από τη θέση του Ήλιου.

Στο Σχήμα 2.1(α) η ατμόσφαιρα θεωρείται επίπεδη και εκτείνεται έως το άπειρο. Εξ' ορισμού είναι $AM = OB/OA = 1/\cos\zeta$. Στο Σχήμα 2.1(β) φαίνεται η πραγματική διαμόρφωση της ατμόσφαιρας καθώς και η ατμοσφαιρική διάθλαση. Συγκεκριμένα, ως AM1 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 AM1.5 συμβολίζεται η διαδρομή της ακτινοβολίας με τον Ήλιο σε γωνία 45° από το ζενίθ, ως AM2 με τον Ήλιο σε γωνία 60° κ.λπ. Το μηδέν της κλίμακας (AM0) 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 AM1.5 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 δυνατές συνθήκες αιχμής (καλοκαίρι, μεσημέρι, καθαρός ουρανός κ.λπ.) ένα μεγάλο μέρος από τις περισσότερες κατοικημένες και αναπτυγμένες περιοχές της Γης. Για απλοποίηση, η παραπάνω πυκνότητα ισχύος στρογγυλοποιείται στα 1000W/m^2 , ονομάζεται συμβατικά ακτινοβολία ενός ήλιου (ή ενός πλήρους ήλιου) και θεωρείται συχνά ως η βάση σύγκρισης της ακτινοβολίας που δέχονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επίσης η ισχύς αιχμής των φωτοβολταϊκών διατάξεων καθορίζεται από τους κατασκευαστές για ακτινοβολία ενός ήλιου.

2.1.3 Η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις από εποχή σε εποχή λόγω της κίνησης της Γης γύρω από τον Ήλιο. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια μιας μέρας για τρεις διαφορετικές ημερομηνίες [15]. 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.

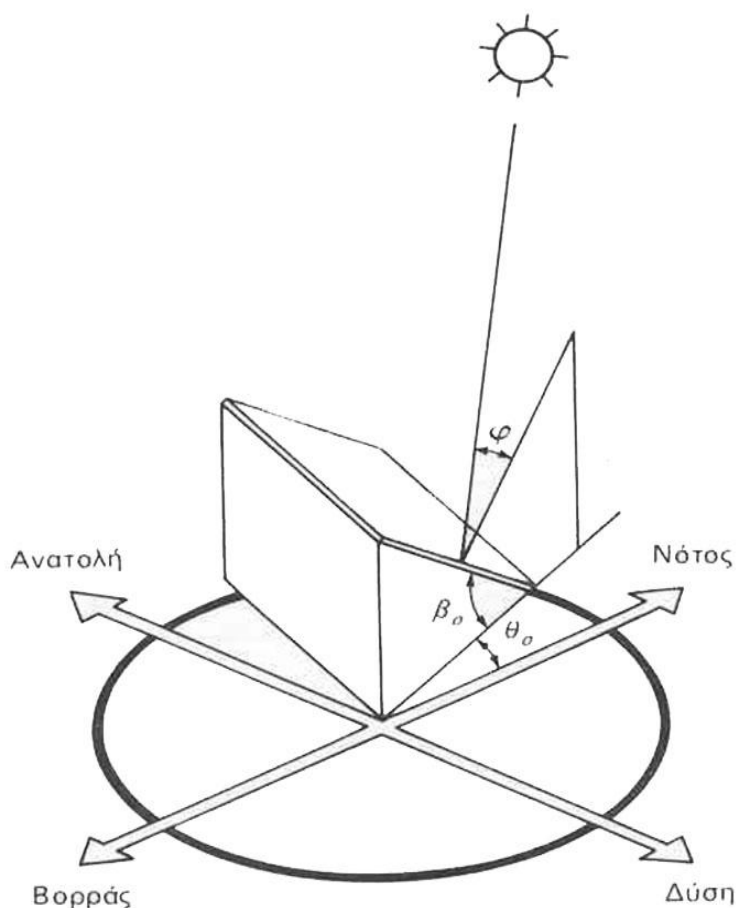


Σχήμα 2.2: Η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο κατά τη διάρκεια των φωτεινών ωρών για τρεις διαφορετικές ημερομηνίες του έτους.

2.1.4 Προσανατολισμός και κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Ο προσανατολισμός των Φ/Β πλαισίων καθώς και η κλίση τους ως προς το οριζόντιο επίπεδο είναι δύο πολύ κρίσιμες επιλογές για ένα σύστημα ενέργειας που εκμεταλλεύεται τη

Φ/Β μετατροπή. Τα δύο μεγέθη που περιγράφουν τον προσανατολισμό και την κλίση του συλλέκτη είναι η αζιμούθια γωνία θ_σ και η γωνία κλίσης β_σ . Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζονται αυτά τα μεγέθη.



Σχήμα 2.3: Η κλίση β_σ και η αζιμούθια γωνία ενός επίπεδου συλλέκτη.

Η κλίση του συλλέκτη (β_σ) είναι η διέδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και του οριζοντίου επιπέδου και μπορεί να πάρει τιμές από 0° μέχρι 180° . Για γωνίες $\beta_\sigma > 90^\circ$ το επίπεδο του συλλέκτη είναι στραμμένο προς το έδαφος.

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 από -180° μέχρι $+180^\circ$. Η γωνία -180° (που συμπίπτει με τη γωνία $+180^\circ$) αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του συλλέκτη προς τον Βορρά, η γωνία -90° προς την Ανατολή, η γωνία 0° προς τον Νότο και η γωνία $+90^\circ$ προς τη Δύση.

Η πυκνότερη ισχύς μιας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε έναν επίπεδο συλλέκτη θα πραγματοποιείται όταν η επιφάνεια του είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της ακτινοβολίας, δηλαδή όταν η γωνία πρόσπτωσης, ϕ , είναι 0° . Η συνθήκη όμως αυτή δεν είναι εύκολο να εξασφαλιστεί καθώς η Γη συνεχώς μετακινείται ως προς τον Ήλιο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Πρέπει, λοιπόν, να επιλεγεί μια σταθερή κλίση που να μειώνει όσο το δυνατό περισσότερο τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια ενός έτους. Η κλίση αυτή, για σταθερή κλίση σε όλη τη διάρκεια του έτους, θεωρείται ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου. Αν, όμως, επιλέγονται παραπάνω από μία κλίσεις ανά έτος τότε η βέλτιστη κλίση επιλέγεται διαφορετικά για κάθε εποχή. Έτσι αν επιδιώκεται το σύστημα να παράγει όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια επιλέγονται οι κατάλληλες κλίσεις για κάθε εποχή. Συνήθως, η μια κλίση επιλέγεται 10° με 15° μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου και χρησιμοποιείται το καλοκαίρι και μια άλλη 10° με 15° μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου και χρησιμοποιείται τον χειμώνα. Τέλος, για το βόρειο ημισφαίριο ο βέλτιστος προσανατολισμός των Φ/Β στοιχείων είναι προς το Νότο, δηλαδή η αζιμούθια γωνία λαμβάνεται ίση με 0° , ενώ για το νότιο ημισφαίριο ο βέλτιστος προσανατολισμός των Φ/Β στοιχείων είναι προς το Βορρά, δηλαδή η αζιμούθια γωνία λαμβάνεται ίση με 180° .

2.1.5 Σύσταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στη γήινη επιφάνεια

Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία διαπερνά το στρώμα της γήινης ατμόσφαιρας 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 τα σταγονίδια νερού ή μόρια σκόνης προκαλούν τη διασπορά της ακτινοβολίας, ενώ όταν τελικά η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στο έδαφος ένα μέρος της θα απορροφάται και το υπόλοιπο θα ανακλάται. Συνεπώς, το σύνολο των παραπάνω επιδράσεων αποσυνθέτει την ηλιακή ακτινοβολία σε διάφορες συνιστώσες: (1) η απευθείας ακτινοβολία (direct radiation) που είναι η ακτινοβολία που προέρχεται απευθείας από τον Ήλιο, (2) η διάχυτη ακτινοβολία (diffuse radiation) που είναι η ακτινοβολία που συνίσταται από ακτίνες που προέρχονται από τον ουρανό αλλά όχι απευθείας από τον Ήλιο (δεν περιλαμβάνονται δηλαδή ανακλάσεις από τη Γη) και (3) η albedo ακτινοβολία, δηλαδή η ακτινοβολία που προέρχεται από ανακλάσεις του φωτός στο έδαφος [14]. Η συνολική ακτινοβολία (global radiation) είναι το άθροισμα των τριών παραπάνω συνιστωσών.

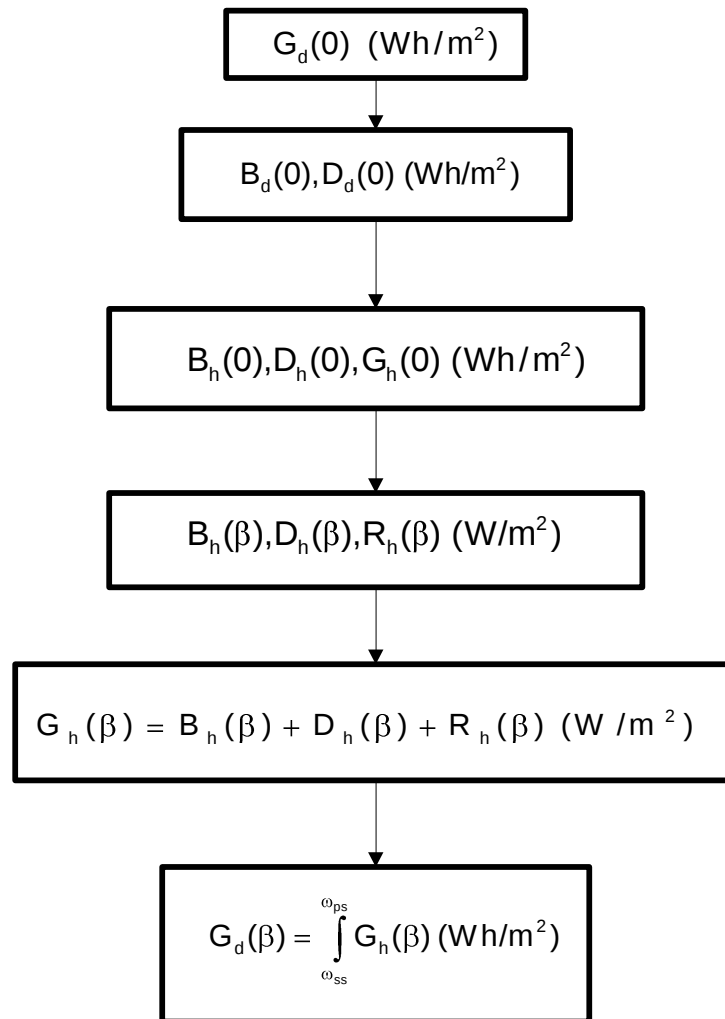
2.1.6 Μέθοδος υπολογισμού της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο

Όπως έχει ήδη αναφερθεί νωρίτερα, η μέθοδος διαστασιολόγησης που ακολουθείται στην παρούσα εργασία δίνει σαν αποτέλεσμα, εκτός των άλλων, και τη βέλτιστη κλίση των Φ/Β πλαισίων. Έτσι είναι απαραίτητο να υπολογίζεται η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε κάθε επιθυμητή κλίση των Φ/Β πλαισίων, αφού οι μετρήσεις που συνήθως είναι διαθέσιμες αφορούν στο οριζόντιο επίπεδο [14].

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

$$G_d(\beta) = R_d(\beta) + D_d(\beta) + B_d(\beta) \quad (2.1)$$

όπου $B_d(\beta)$ είναι η συνολική ημερήσια απευθείας ακτινοβολία, $D_d(\beta)$ είναι η συνολική ημερήσια διάχυτη ακτινοβολία και $R_d(\beta)$ η συνολική ημερήσια albedo ακτινοβολία. Πριν γίνει περαιτέρω ανάλυση πρέπει να γίνει διάκριση ανάμεσα στους όρους irradiation και irradiance οι οποίοι θα χρησιμοποιούνται στη συνέχεια. 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. Με άλλα λόγια, το irradiation είναι η ολοκλήρωση του irradiance στη περίοδο του χρόνου και μετριέται σε Wh/m^2 . Η μέθοδος που ακολουθείται για τον υπολογισμό του $G_d(\beta)$ φαίνεται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: Τα βήματα της μεθόδου υπολογισμού της ημερήσιας ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα επίπεδο κλίσης β° .

Όπως βλέπουμε 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° υπολογίζοντας ενδιάμεσα τις ωριαίες τιμές των συνιστωσών της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο και εν συνεχεία σε κεκλιμένο επίπεδο. 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.

Όταν εξετάζονται περιοχές του βόρειου ημισφαιρίου η αζιμούθια γωνία ηλιακού συλλέκτη είναι μηδέν. 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 επίπεδο η ανακλώμενη από τη Γη ακτινοβολία είναι μηδενική). Η τιμή του $B_d(0)$ δίνεται από τη σχέση:

$$B_d(0) = \frac{24}{\pi} B_o \epsilon_o (\cos\phi \cos\delta)(\omega_s \cos\omega_s - \sin\omega_s) \quad (2.2)$$

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

$$\epsilon_o = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{360d_n}{365}\right) \quad (2.3)$$

όπου d_n είναι η μέρα του χρόνου (1,2,...365), ϕ είναι το γεωγραφικό πλάτος του τόπου ($^\circ$) 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 ($^\circ$) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta(^\circ) = 23.45 \sin\left(\frac{360}{365}(d_n + 284)\right) \quad (2.4)$$

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

$$\omega_s = -\arccos(-\tan\delta \cdot \tan\phi) \quad (2.5)$$

ενώ παράλληλα ισχύει ότι:

$$\cos\omega_s = -\tan\delta \cdot \tan\phi \quad (2.6)$$

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:

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

$$K_T = \frac{G_d(0)}{B_d(0)} \text{ και } K_D = \frac{D_d(0)}{G_d(0)} \quad (2.7)$$

όπου:

$$K_D = 0.99 \text{ για } K_T \leq 0.17 \quad (2.8)$$

$$K_D = 1.188 - 2.272K_T + 9.473K_T^2 - 21.856K_T^3 + 14.648K_T^4 \text{ για } 0.17 \leq K_T \leq 0.8 \quad (2.9)$$

Έχοντας υπολογίσει για κάθε ημέρα 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:

$$D_h(0) = r_d D_d(0) \text{ και } G_h(0) = r_g G_d(0) \quad (2.10)$$

όπου:

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\omega_s \cos\omega_s - \sin\omega_s} \quad (2.11)$$

$$r_g = r_d (a + b \cos\omega) \quad (2.12)$$

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

$$a = 0.409 - 0.5016 \sin(\omega_s + 1.047) \quad (2.13)$$

$$b = 0.6609 + 0.4767 \sin(\omega_s + 1.047) \quad (2.14)$$

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

Με χρήση των παραπάνω εξισώσεων υπολογίζονται οι ωριαίες συνολικές ενέργειες $B_h(0)$, $G_h(0)$ και $D_h(0)$ αλλά πρέπει να υπολογιστούν οι αντίστοιχες ποσότητες σε κεκλιμένο επίπεδο β° . Οι Εξ. (2.15), (2.28) και (2.19) που σχετίζονται με αυτές τις ποσότητες εκφράζουν ισχύ. Για τον υπολογισμό, λοιπόν, της ενέργειας αρκεί να ολοκληρωθούν αυτές τις 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 απλούστεροι.

Έτσι λοιπόν για την ακτινοβολία $B_h(\beta)$ ισχύει:

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

$$B_h(\beta) = \left(\frac{G_h(0) - D_h(0)}{\cos\theta_{zs}} \right) \max(0, \cos\theta_s) \quad (W/m^2) \quad (2.15)$$

όπου:

$$\cos\theta_s = \sin\delta\sin(\varphi - \beta) + \cos\delta\cos(\varphi - \beta)\cos\omega \quad (2.16)$$

$$\cos\theta_{zs} = \sin\delta\sin\varphi + \cos\delta\cos\varphi\cos\omega \quad (2.17)$$

Για την ακτινοβολία από ανάκλαση από τη Γη ισχύει:

$$R_h(\beta) = G_h(\beta) (1 - \cos\beta) \rho / 2 \quad (W/m^2) \quad (2.18)$$

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:

$$D_h(\beta) = \frac{(1 + \kappa_1 \cos^2\theta_s \sin^3\theta_{zs})(1 + \kappa_1 \sin^3\frac{\beta}{2})D_h(0)(1 + \cos\beta)}{2} \quad (W/m^2) \quad (2.19)$$

όπου:

$$\kappa_1 = 1 - \left(\frac{D_h(0)}{G_h(0)} \right)^2 \quad (2.20)$$

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

$$G_h(\beta) = R_h(\beta) + D_h(\beta) + B_h(\beta) \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2.21)$$

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

$$G_d(\beta) = \int_{\omega_{ss}}^{\omega_{ps}} G_h(\beta) dt \text{ (Wh / m}^2\text{)} \quad (2.22)$$

όπου:

$$\omega_{ss} = -\omega_{ps} = \max\{\omega_s, -\arcsin(-\tan\delta \tan(\phi - \beta))\} \quad (2.23)$$

είναι η γωνία ανατολής και δύσης αντίστοιχα με το συλλέκτη σε κλίση β^0 , ενώ η σχέση που συνδέει τις ποσότητες ω και t είναι:

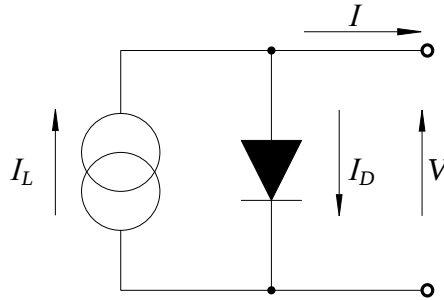
$$\omega(^{\circ}) = 15(t - 12) \quad (2.24)$$

2.1.7 Η φωτοβολταϊκή μετατροπή

Η μετατροπή της ενέργειας που μεταφέρεται από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον Ήλιο σε ηλεκτρική ενέργεια είναι ένα φυσικό φαινόμενο γνωστό ως φωτοβολταϊκή μετατροπή. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (solar cells) αποτελούν τον σημαντικότερο τύπο συσκευών που χρησιμοποιούνται για αυτή τη μετατροπή. Πρόκειται για διόδους ημιαγωγών σε μορφή δίσκου που καθώς δέχονται στην επιφάνειά τους το ηλιακό φως, αναπτύσσεται στα άκρα τους μια διαφορά δυναμικού. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους και την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μπορούν να παράγουν τάση από 0.5 έως 1 Volt και πυκνότητα ρεύματος από 20 έως 40 mA/cm². Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι υπό τη μορφή συνεχούς ρεύματος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτή τη μορφή ή να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο ρεύμα ή ακόμα και να αποθηκευτεί για να χρησιμοποιηθεί αργότερα.

2.1.8 Το μοντέλο του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Το κύκλωμα του ιδανικού Φ/Β στοιχείου.

Όπως φαίνεται, αποτελείται από μια πηγή ρεύματος I_L (το ρεύμα που δημιουργείται από το ηλιακό φως) και από μια δίοδο με ρεύμα I_D παράλληλα τοποθετημένη στην πηγή ρεύματος. Το ρεύμα I που παράγεται από το στοιχείο είναι:

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{eV}{mkT}} - 1 \right) \quad (2.25)$$

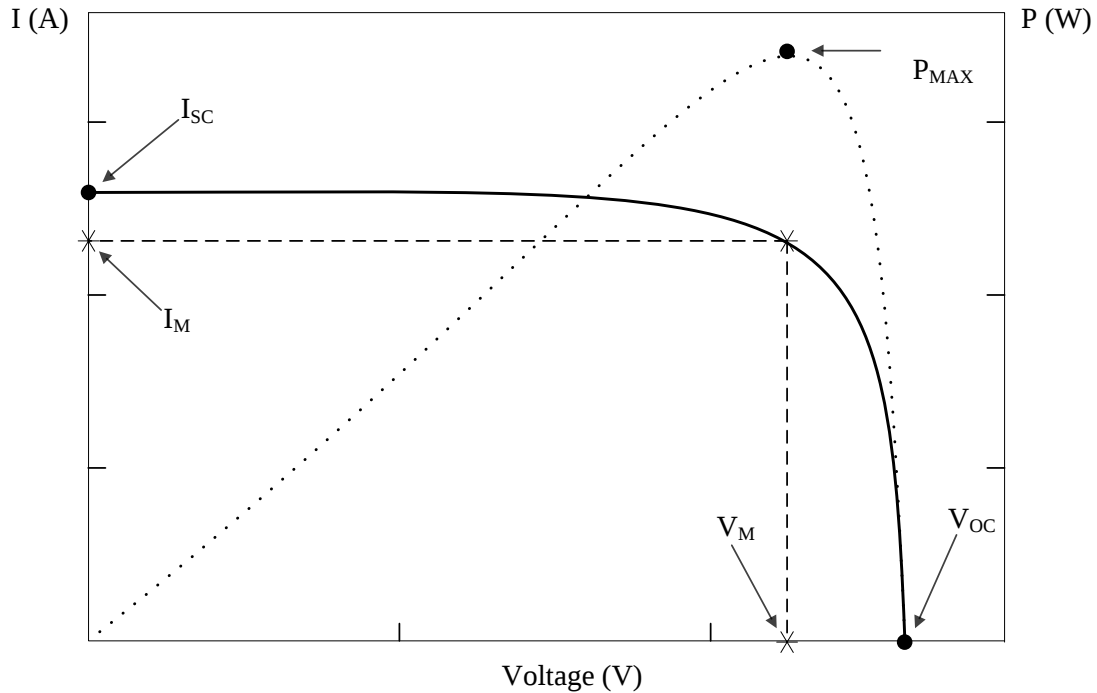
όπου I_0 είναι το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης, e το φορτίο του ηλεκτρονίου, V η τάση στα άκρα του στοιχείου, k η σταθερά του Boltzmann, T η θερμοκρασία του στοιχείου σε βαθμούς Kelvin και m ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου ($1 \leq m \leq 2$).

Η αντίστοιχη χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Το ρεύμα για το οποίο είναι $V=0$ ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης και είναι:

$$I_{sc} = I(V = 0) = I_L \quad (2.26)$$

Η τάση για την οποία ισχύει $I=0$ ονομάζεται τάση ανοιχτοκύκλωσης και δίνεται από τη σχέση :

$$V_{oc} = m \frac{kT}{e} \ln \left[\frac{I_L}{I_0} + 1 \right] \quad (2.27)$$



Σχήμα 2.6: Η χαρακτηριστική I-V του Φ/B στοιχείου.

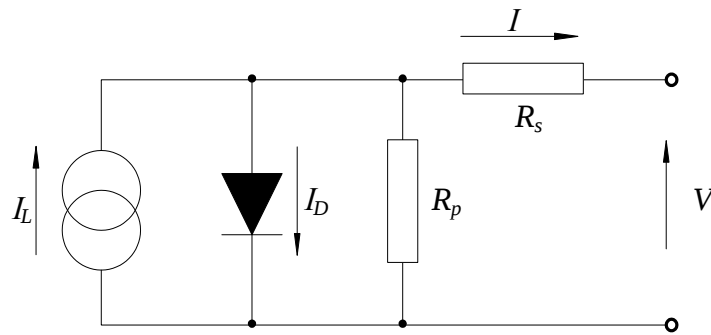
Στο Σχήμα 2.6 απεικονίζεται με διακεκομμένη γραμμή και η ισχύς του στοιχείου συναρτήσει της τάσης. Υπάρχει ένα σημείο (V_m, I_m) στο οποίο η ισχύς μεγιστοποιείται. Το σημείο αυτό ονομάζεται σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point, MPP). Ως συντελεστής πλήρωσης (Fill Factor) ορίζεται το πηλίκο :

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.28)$$

Όσο πιο απότομη είναι η χαρακτηριστική του στοιχείου τόσο πιο κοντά θα είναι το FF στη μονάδα. Τότε το εμβαδόν του ορθογώνιου που ισούται με $I_m V_m$ θα είναι πιο κοντά στο εμβαδόν του ορθογώνιου $I_{sc} V_{oc}$. Ο FF είναι ένα ποιοτικό μέτρο της μορφής της χαρακτηριστικής καμπύλης. Παίρνει τιμές συνήθως από 0.7 ως 0.8. Η ενεργειακή απόδοση ενός Φ/B στοιχείου ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ισχύος που μπορεί να μεταφερθεί στο φορτίο προς την ισχύ που παράγεται από το στοιχείο (την ισχύ δηλαδή που αντιστοιχεί στο ρεύμα I_L):

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_L} \quad (2.29)$$

Στην πραγματικότητα, το παραπάνω ιδανικό μοντέλο δε χρησιμοποιείται. Ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7. Ουσιαστικά είναι το ίδιο με το ιδανικό μοντέλο αλλά έχουν προστεθεί δύο αντιστάσεις, μία παράλληλα με τη δίοδο (R_p) και μία σε σειρά με το υπόλοιπο μοντέλο (R_s). Η χρήση αυτών των αντιστάσεων γίνεται για να καλυφθούν διάφορα εξωτερικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο στοιχείο σε επίπεδο ημιαγωγών. Συγκεκριμένα, η R_s συμβολίζει τις αντιστάσεις από την κίνηση των φορέων στον ημιαγωγό και στις επαφές στα ηλεκτρόδια και η R_p την αντίσταση διαμέσου της διόδου, η οποία δεν έχει άπειρη τιμή λόγω διαρροών που οφείλονται σε κατασκευαστικά ελαττώματα. Συνήθως στα εμπορικά διαθέσιμα Φ/Β στοιχεία η R_s είναι μικρότερη από 5Ω και η R_p μεγαλύτερη από 500Ω αλλά επηρεάζουν αισθητά την τάση V . Παρόλο που τα φαινόμενα αυτά είναι κατανοητά και δε μπορούν εν γένει να αναπαρασταθούν με αντιστάσεις σταθερής τιμής, η χρήση των σταθερών αντιστάσεων R_s και R_p είναι αποδεκτή από πρακτικής άποψης.



Σχήμα 2.7: Το κύκλωμα ενός πραγματικού Φ/Β στοιχείου.

Αν συμπεριληφθούν οι αντιστάσεις R_s και R_p στην Εξ. (2.25) τότε το ρεύμα εξόδου του στοιχείου θα δίνεται από τη σχέση :

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \frac{e(V + IR_s)}{mkT} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.30)$$

Κατά την εφαρμογή της Εξ. (2.33) γίνονται συνήθως οι παρακάτω παραδοχές: Η επίδραση της R_p είναι αμελητέα (η R_p είναι δηλαδή αρκετά μεγάλη), το ρεύμα I_L είναι ίσο με το ρεύμα βραχυκύκλωσης και πάντα ισχύει ότι $\exp(e(V + IR_s) / mkT) \gg 1$. Με αυτές τις παραδοχές το ρεύμα του στοιχείου υπολογίζεται ως εξής:

$$I = I_{sc} \left[1 - \exp \left(- \frac{V - V_{oc} + IR_s}{V_t} \right) \right] \quad (2.31)$$

όπου

$$V_t = \frac{mkT}{e} \quad (2.32)$$

Από την Εξ. (2.31) προκύπτει το εξής παράδοξο: αν θέσουμε $V = 0$ τότε δεν ισχύει $I = I_{sc}$ όπως θα ήταν αναμενόμενο. Όμως, για εμπορικά διαθέσιμα Φ/Β στοιχεία ισχύει ότι $V_{oc} \gg IR_s$ οπότε τελικά ισχύει $I = I_{sc}$, ενώ για $V = 0$ τελικά ισχύει $I \approx I_{sc}$.

2.1.9 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

2.1.9.1 Εισαγωγή

Λόγω του ότι τα Φ/Β στοιχεία παράγουν στην έξοδό τους μικρή τάση (0.5 – 1 Volt) οι κατασκευαστές παρέχουν Φ/Β στοιχεία σε διατάξεις με κοινή ηλεκτρική έξοδο. Αυτές οι διατάξεις ονομάζονται Φ/Β πλαίσια (modules) και περιλαμβάνουν κάποιο αριθμό Φ/Β στοιχείων συνδεδεμένων μεταξύ τους. Τα στοιχεία στερεώνονται με κολλητική ουσία επάνω σε ανθεκτικό φύλλο μετάλλου ή πλαστικού που αποτελεί την πλάτη του πλαισίου. Η εμπρός όψη καλύπτεται από ένα προστατευτικό φύλλο γυαλιού ή πλαστικού. Τα Φ/Β πλαίσια αποτελούν τα κύρια δομικά στοιχεία ενός Φ/Β συστήματος.

2.1.9.2 Χαρακτηριστικά λειτουργίας των Φ/Β πλαισίων

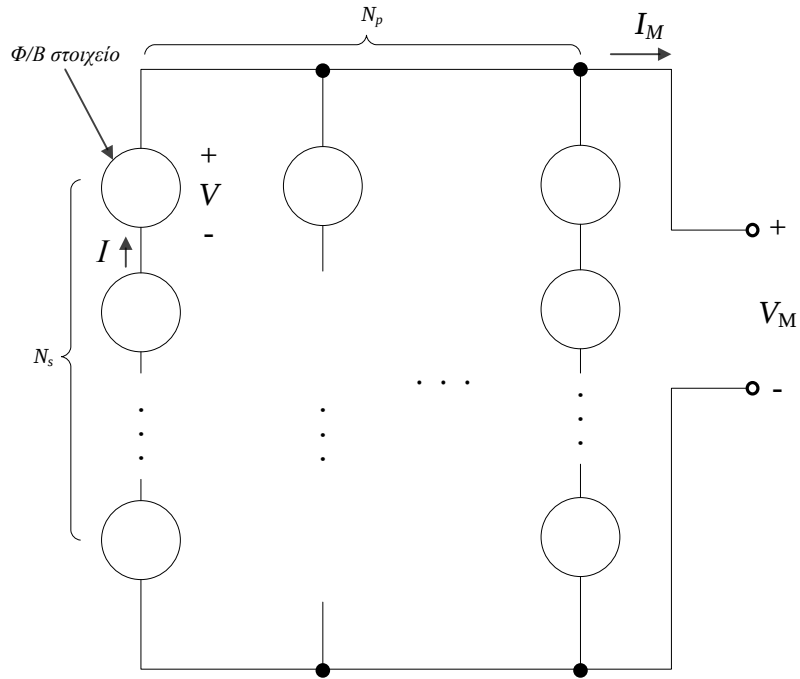
Θεωρούμε ότι ένα πλαίσιο αποτελείται από N_p ομάδες Φ/Β στοιχείων παράλληλα συνδεδεμένες μεταξύ τους. Έστω ότι κάθε τέτοια ομάδα αποτελείται από N_s στοιχεία τα οποία είναι συνδεδεμένα σε σειρά. Η συνολική τάση και το συνολικό ρεύμα εξόδου του πλαισίου δίνεται από τις σχέσεις:

$$I_M = IN_p \quad (2.33)$$

και

$$V_M = VN_s \quad (2.34)$$

όπου I είναι το ρεύμα που διαρρέει κάθε στοιχείο και V είναι η τάση κάθε στοιχείου. Στο σχήμα 2.8 παρουσιάζεται το γενικό διάγραμμα ενός Φ/Β πλαισίου αποτελούμενου από Φ/Β στοιχεία.



Σχήμα 2.8: Το Φ/Β πλαίσιο αποτελούμενο από Φ/Β στοιχεία.

Ακόμη το ρεύμα βραχυκύκλωσης, I_{SCM} , και η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{OCM} είναι:

$$I_{SCM} = I_{sc} \cdot N_p \quad (2.35)$$

$$V_{OCM} = V_{oc} \cdot N_s \quad (2.36)$$

όπου I_{sc} και V_{oc} είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοιχτοκύκλωσης κάθε στοιχείου του πλαισίου αντίστοιχα. Έτσι σύμφωνα με τις Εξ. (2.33), (2.34), (2.35), (2.36) και (2.29) το ρεύμα του πλαισίου δίνεται από τη σχέση:

$$I_M = I_{SCM} \cdot \left(1 - \exp \left(\frac{(V_M - V_{OCM} + I_M \cdot R_{SM})}{N_s \cdot V_t} \right) \right) \quad (2.37)$$

όπου:

$$R_{SM} = \frac{R_s N_s}{N_p} \quad (2.38)$$

Τόσο η Εξ. (2.38) όσο και η Εξ. (2.31) περιλαμβάνουν το ρεύμα και στα δυο μέλη. Η επίλυση μιας τέτοιας εξίσωσης είναι δύσκολη. Κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος μπορεί χωρίς σφάλμα το ρεύμα του δεύτερου μέλους να αντικατασταθεί με το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Η μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης I_M-V_M της Εξ.(2.37) είναι όμοια με αυτή του Σχήματος 2.6. Και εδώ υπάρχει ένα ζεύγος τιμών $[V_{Mm}, I_{Mm}]$ για το οποίο μεγιστοποιείται η ισχύς εξόδου του πλαισίου.

Ένα σημαντικό μέγεθος που χαρακτηρίζει τα Φ/Β πλαίσια είναι η “nominal cell operating temperature” (NCOT). Η NCOT εκφράζει τη θερμοκρασία των στοιχείων των πλαισίων υπό τις εξής συνθήκες: ακτινοβολία 800 W/m^2 , AM 1.5, θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C και ταχύτητα ανέμου 1 m/s . Όταν ο κατασκευαστής δε δίνει την τιμή της NCOT η τιμή που χρησιμοποιείται είναι 44°C .

Οι κατασκευαστές Φ/Β πλαισίων παρέχουν τις τιμές των παρακάτω μεγεθών: της μέγιστης ισχύος εξόδου, του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοιχτοκύκλωσης. Οι παραπάνω τιμές αντιστοιχούν σε ακτινοβολία 1000 W/m^2 , AM 1.5 και θερμοκρασία στοιχείων 25°C .

2.1.9.3 Υπολογισμός ισχύος πλαισίων σε οποιεσδήποτε συνθήκες

Πολύ συχνά είναι αναγκαίο να υπολογιστεί η ισχύς εξόδου ενός πλαισίου για συνθήκες διαφορετικές από αυτές που δίνει ο κατασκευαστής. Ειδικότερα είναι επιθυμητό να υπολογιστεί η μέγιστη ισχύς εξόδου ενός πλαισίου σε προκαθορισμένες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Για την επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος μπορούν να εφαρμοστούν οι παρακάτω απλοί αλλά ικανοποιητικά ακριβείς κανόνες.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης ενός στοιχείου στις εκάστοτε συνθήκες δίνεται από τη σχέση:

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

$$I_{sc} = C_1 G \quad (2.39)$$

όπου G είναι η προσπίπτουσα ακτινοβολία και η σταθερά C_1 δίνεται από τη σχέση:

$$C_1 = \frac{I_{sc}(1000 \text{ W / m}^2)}{1000} \quad (\text{Am}^2/\text{W}) \quad (2.40)$$

Η τάση ανοιχτοκύκλωσης μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία στοιχείων με ρυθμό:

$$\frac{dV_{oc}}{dT_c} = -2.3 \text{ mV / } ^\circ \text{C} \quad (2.41)$$

Η θερμοκρασία των στοιχείων του πλαισίου εξαρτάται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, T_a , σύμφωνα με τη σχέση:

$$T_c - T_a = C_2 G \quad (2.42)$$

όπου:

$$C_2 = \frac{NCOT - 20^\circ \text{C}}{800 \text{ W / m}^2} \quad (2.43)$$

Τέλος, θεωρείται ότι η αντίσταση, R_s , των στοιχείων των πλαισίων δεν επηρεάζεται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και δίνεται από τη σχέση:

$$R_s = \left(1 - \frac{FF}{FF_o} \right) \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad (2.44)$$

Τα FF και FF_o συνδέονται με τον εξής εμπειρικό τύπο:

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} = FF_o (1 - r_s) \quad (2.45)$$

Τα r_s και FF_o υπολογίζονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$r_s = \frac{R_s}{V_{oc} / I_{sc}} \quad (2.46)$$

$$FF_o = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{v_{oc} + 1} \quad (2.47)$$

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

Γνωρίζοντας τη μέγιστη ισχύ εξόδου), P_{Mm} , σε Standard Test Conditions (STC) συνθήκες (ακτινοβολία 1000 W/m^2 , AM 1.5 και θερμοκρασία στοιχείων 25°C που δίνουν οι κατασκευαστές, καθώς και τις τιμές των N_p και N_s προκύπτει εύκολα η μέγιστη ισχύς εξόδου ενός στοιχείου σε STC συνθήκες :

$$P_m = \frac{P_{Mm}}{N_s N_p} \quad (2.48)$$

Επίσης από τις Εξ. (2.38) και (2.39) μπορούν να υπολογιστούν τα I_{sc} και V_{oc} των στοιχείων καθώς και η εξής ποσότητα :

$$V_{oc} = \frac{eV_{oc}}{mkT} \quad (2.49)$$

Συνήθως χρησιμοποιείται η τιμή $m=1$. Πρέπει πάντα να ισχύει $v_{oc}>15$, διαφορετικά αυτή η μέθοδος δε μπορεί να εφαρμοστεί. Από την Εξ. (2.45) λύνουμε ως προς r_s . Το r_s πάντα πρέπει να είναι μικρότερο από 0.4 αλλιώς αυτή η μέθοδος δε μπορεί να εφαρμοστεί. Το R_s προκύπτει εύκολα από την Εξ. (2.44) και θεωρείται ότι δεν αλλάζει με τις συνθήκες. Εν συνεχεία εφαρμόζονται οι Εξ. (2.39), (2.40), (2.41), (2.42) και (2.43) από τις οποίες προκύπτουν οι νέες τιμές των I_{sc} και V_{sc} καθώς και η τιμή T_a . Το V_t υπολογίζεται εκ νέου σύμφωνα με την τιμή του T_a και κατόπιν μέσω των Εξ. (2.43), (2.44) και (2.45) προκύπτει εύκολα το γινόμενο $I_m \cdot V_m$ δηλαδή η ζητούμενη μέγιστη τιμή της ισχύος του στοιχείου, P_m , στις υπάρχουσες συνθήκες. Έχοντας υπολογίσει το P_m η μέγιστη ισχύς του πλαισίου (panel) υπολογίζεται με τη σχέση:

$$P_{Mm} = N_s N_p P_m \quad (2.50)$$

2.1.9.4 Το μοντέλο των Φ/B πλαισίων 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 Φ/B πλαίσιο είναι ένα σύστημα με ορισμένες εισόδους και εξόδους. Εκτός από την ημέρα του έτους για την οποία πρέπει να υπολογιστεί η παραγόμενη ενέργεια του Φ/B πλαισίου και την κλίση θ ως προς το οριζόντιο επίπεδο, οι υπόλοιπες είσοδοι μπορούν να διακριθούν σε δυο κατηγορίες. Σε αυτές που

αφορούν τα μετεωρολογικά δεδομένα του τόπου που εξετάζεται και σε αυτές που σχετίζονται με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαισίων.

Ειδικότερα τα μετεωρολογικά δεδομένα που λαμβάνονται ως είσοδοι είναι η μέση συνολική ημερήσια ή μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία G (Wh/m^2) σε οριζόντιο επίπεδο και η μέση ημερήσια ή μηνιαία θερμοκρασία T ($^{\circ}\text{C}$). Όσον αφορά στην ηλιακή ακτινοβολία αυτή είναι διαθέσιμη στο οριζόντιο επίπεδο. Ακολουθώντας όμως τη διαδικασία που ήδη έχει περιγραφεί [Σχήμα 2.4 και Εξ. (2.2) - (2.24)] μπορεί να υπολογιστεί η ακτινοβολία για όλες τις κλίσεις από 0° ως 90° .

Οι είσοδοι που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι ο αριθμός στοιχείων ανά πλαίσιο N_c , η μέγιστη τάση εξόδου V_m , το μέγιστο ρεύμα εξόδου I_m , η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} , το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} , η μέγιστη ισχύς P_m και η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας των στοιχείων, $NCOT$.

Η έξοδος του συστήματος υπολογισμού είναι η ενέργεια (σε Wh) για την επιθυμητή κλίση την ώρα και την ημέρα. Η ενέργεια υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις Εξ. (2.33) – (2.50). Η Εξ.(2.39) λαμβάνει ως είσοδο την μέση ωριαία ακτινοβολία που προκύπτει αν διαιρεθεί η συνολικά αποδιδόμενη ημερήσια ακτινοβολία [Εξ. (2.21)] με τις ώρες διαθεσιμότητας της ακτινοβολίας αυτής. Οι ώρες διαθεσιμότητας προκύπτουν από την εφαρμογή των Εξ. (2.23) και (2.24).

2.2 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ DC/AC

2.2.1 Εισαγωγή

Τα Φ/Β στοιχεία λειτουργούν με συνεχές ρεύμα (DC). Τα ηλεκτρικά δίκτυα, όμως, λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Οι μετατροπείς ισχύος DC/AC είναι συσκευές που μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο και είναι απαραίτητοι σε ένα σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για να τροφοδοτήσουν το φορτίο. Οι μετατροπείς ισχύος DC/AC των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: τους μετατροπείς που εγκαθίστανται σε αυτόνομα συστήματα και τους μετατροπείς που συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο. Στο σύστημα που μελετάται στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ο δεύτερος τύπος μετατροπέων DC/AC.

2.2.2 Μετατροπείς DC/AC διακοπτικού τύπου

Οι μετατροπείς DC/AC διακοπτικού τύπου χρησιμοποιούνται σε AC κινητήρια συστήματα και σε AC τροφοδοτικά αδιάλειπτης λειτουργίας (UPS) όπου απαιτείται η παραγωγή ημιτονοειδούς τάσης με ελεγχόμενη συχνότητα και πλάτος. Οι αντιστροφείς διακρίνονται σε αυτούς που η είσοδος τους είναι μια DC πηγή τάσης και σε αυτούς που η είσοδος τους είναι μια DC πηγή ρεύματος. Επίσης, διακρίνονται περαιτέρω σε:

- μονοφασικούς αντιστροφείς ημιγέφυρας,
- μονοφασικούς αντιστροφείς σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας και
- τριφασικούς αντιστροφείς.

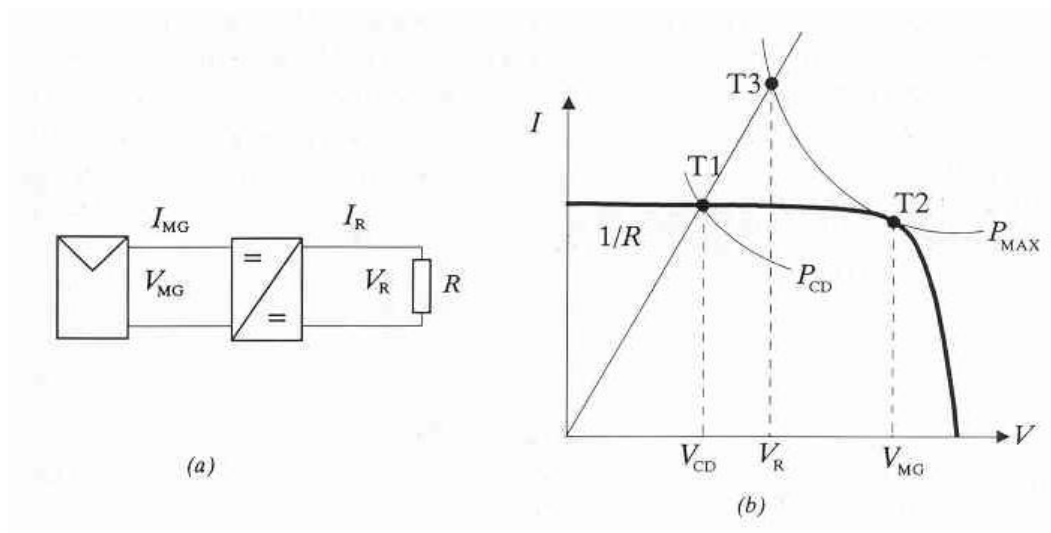
Οι αντιστροφείς πηγής τάσης διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Αντιστροφείς με διαμόρφωση εύρους παλμών: σε αυτούς τους αντιστροφείς η τάση εισόδου έχει σταθερό πλάτος και επομένως ο αντιστροφέας ελέγχει το πλάτος και τη συχνότητα της εξόδου. Αυτό γίνεται με τη διαμόρφωση του εύρους των παλμών εξόδου και γι' αυτό αυτοί οι αντιστροφείς ονομάζονται αντιστροφείς με διαμόρφωση εύρους παλμών.
- Αντιστροφείς με τετραγωνική κυματομορφή: σε αυτούς τους αντιστροφείς ελέγχεται το πλάτος της εισόδου για τον έλεγχο του πλάτους της εξόδου. Συνεπώς, ο αντιστροφέας πρέπει να ελέγξει τη συχνότητα της τάσης εξόδου. Η κυματομορφή της τάσης εξόδου μοιάζει με τετραγωνική και γι' αυτό οι συγκεκριμένοι αντιστροφείς λέγονται τετραγωνικοί.
- Αντιστροφείς με απαλοιφή τάσης: σε αυτούς τους αντιστροφείς ελέγχεται το πλάτος και η συχνότητα της τάσης εξόδου. Συνεπώς, συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά των δύο προηγούμενων κατηγοριών. Η τεχνική της απαλοιφής τάσης δε λειτουργεί στους τριφασικούς αντιστροφείς αλλά μόνο στους μονοφασικούς.

2.2.3 Maximum Power Point Tracking

Οι μετατροπείς ισχύος DC/AC με MPPT είναι μετατροπείς ισχύος και ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος που μπορούν να απορροφήσουν τη μέγιστη δυνατή ισχύ από τα Φ/Β

πλαίσια. Αυτές η διαδικασία ονομάζεται Maximum Power Point Tracking (MPPT). Η αρχή της λειτουργίας των συστημάτων MPPT φαίνεται στο Σχήμα 2.9 όπου θεωρούμε μια Φ/Β γεννήτρια, ένα μετατροπέα ισχύος με δυνατότητα MPPT και ένα αντιστάτη σαν φορτίο. Η χαρακτηριστική του φορτίου τέμνει την χαρακτηριστική της Φ/Β γεννήτριας στο σημείο T1 το οποίο βρίσκεται πολύ μακριά από το σημείο μέγιστης ισχύος T2. Έτσι ένα μεγάλο ποσοστό ενέργειας από αυτό που θα μπορούσε να παραχθεί χάνεται. Χρησιμοποιώντας τον μετατροπέα ισχύος με δυνατότητα MPPT, ο οποίος έχει την χαρακτηριστική καμπύλη που περνά από τα σημεία T2 και T3, το σημείο λειτουργίας του συστήματος μετατοπίζεται στο σημείο T2 το οποίο είναι το σημείο μέγιστης ισχύος της Φ/Β γεννήτριας. Έτσι απορροφάται από το φορτίο το μέγιστο δυνατό ποσό ενέργειας.



Σχήμα 2.9: (α) Το γενικό διάγραμμα και (β) η αρχή λειτουργίας των συστημάτων με δυνατότητα Maximum Power Point Tracking.

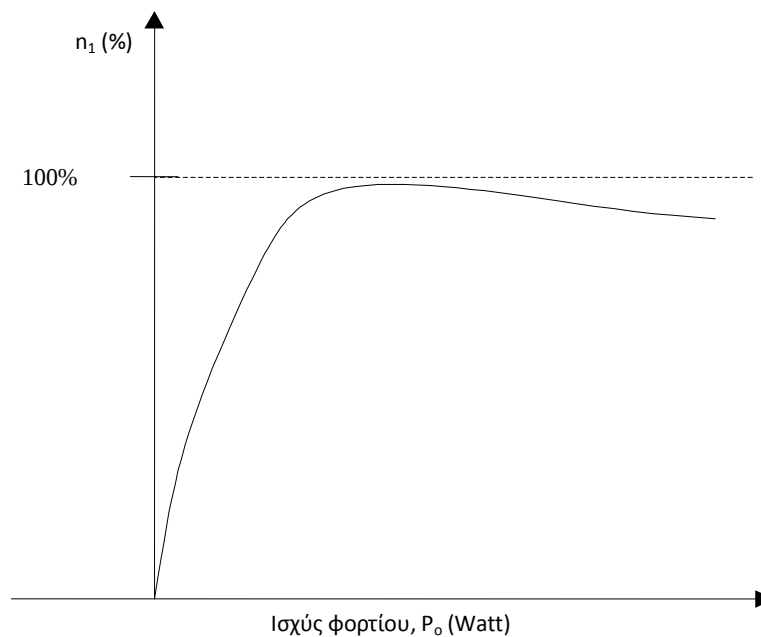
2.2.4 Βαθμός απόδοσης

Οι μετατροπείς ισχύος DC/AC έχουν βαθμό απόδοσης μετατροπής ισχύος η_1 , με τιμή της τάξης του 95% κατά τη λειτουργία στην ονομαστική τους ισχύ. Όταν λειτουργούν σε ισχύ διαφορετική από την ονομαστική τους τότε η απόδοσή τους είναι μειωμένη. Ο βαθμός απόδοσης, η_1 , των μετατροπέων ισχύος DC/AC ορίζεται ως εξής:

$$\eta_1(\%) = \frac{P_o}{P_{in}} 100\% \quad (2.51)$$

όπου P_o η ισχύς εξόδου του μετατροπέα ισχύος DC/AC (η ισχύς που παρέχεται στο φορτίο) και P_{in} η ισχύς εισόδου του μετατροπέα ισχύος DC/AC.

Στο Σχήμα 2.10 φαίνεται η καμπύλη του βαθμού απόδοσης ενός μετατροπέα ισχύος DC/AC σε συνάρτηση με την ισχύ του φορτίου του.



Σχήμα 2.10: Ο βαθμός απόδοσης ενός μετατροπέα συναρτήσει της ισχύος του φορτίου του.

Στην παρούσα εργασία θεωρείται ότι το σύστημα που μελετάται περιλαμβάνει μόνο μετατροπείς ισχύος DC/AC με δυνατότητα MPPT καθώς έχει αποδειχτεί ότι παρά το γεγονός ότι έχουν υψηλότερο κόστος σε σχέση με αυτούς χωρίς τη συγκεκριμένη δυνατότητα το συνολικό κόστος του Φ/Β συστήματος μειώνεται λόγω της καλύτερης εκμετάλλευσης της διαθέσιμης ενέργειας των Φ/Β στοιχείων. Με η_{MPPT} συμβολίζεται η ακρίβεια εκτέλεσης της λειτουργίας MPPT της εκάστοτε συσκευής και βρίσκεται, όπως και ο βαθμός απόδοσης της συσκευής n_1 , στα χαρακτηριστικά που δίνουν οι κατασκευαστές της συσκευής. Έτσι, ο συνολικός βαθμός απόδοσης, κατά τη μετατροπή της διαθέσιμης μέγιστης ισχύος των Φ/Β πλαισίων σε ισχύ που διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο, δίνεται από τη σχέση :

$$\eta_{inv} = n_1 \cdot \eta_{MPPT} \quad (2.52)$$

3. ΟΙ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

3.1 Εισαγωγή

Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι είναι στοχαστικές μέθοδοι αναζήτησης, οι οποίες έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς σε πολλά προβλήματα αναζήτησης, βελτιστοποίησης και μηχανικής μάθησης. Σε αντίθεση με τις περισσότερες τεχνικές βελτιστοποίησης, οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι χρησιμοποιούν έναν πληθυσμό λύσεων, τον οποίο διαχειρίζονται με ανταγωνιστικό τρόπο, εφαρμόζοντας κάποιους τελεστές διαφοροποίησης, για την εύρεση μιας αρκετά ικανοποιητικής, αν όχι ολικά βέλτιστης, λύσης. Θεωρείται ότι υπερτερούν άλλων ευρετικών μεθόδων που εμφανίζουν περιορισμένες δυνατότητες σε προβλήματα με πολύ μεγάλο χώρο αναζήτησης και έχουν αυξημένη πιθανότητα, από τη φύση τους, εγκλωβισμού σε τοπικά βέλτιστα. Παρακάτω περιγράφονται οι βασικές αρχές των μεθόδων Γενετικών Αλγορίθμων, Διαφορικής Εξέλιξης και Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων.

3.2 Η αντικειμενική συνάρτηση

Ως αντικειμενική συνάρτηση (objective function) ενός προβλήματος βελτιστοποίησης ορίζεται η συνάρτηση που αντιπροσωπεύει ένα πρόβλημα και την οποία επιθυμούμε να βελτιστοποιήσουμε. Αυτή μπορεί να εκφράζει, ανάλογα με το πρόβλημα, οικονομικό κόστος, χρονικό κόστος, ποσότητα κάποιου μεγέθους κ.τ.λ. Επίσης, μπορεί να λαμβάνει τόσο θετικές όσο και αρνητικές τιμές.

3.3 Χειρισμός περιορισμών

Πολύ συχνά ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πρέπει να λυθεί μέσα σε ένα σύνολο 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 έχουμε προβλήματα με περιορισμούς είναι συχνό το φαινόμενο να

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

γεννιούνται κάποιες λύσεις μέσα από τη διαδικασία του αλγορίθμου που παραβιάζουν έναν ή περισσότερους από τους περιορισμούς. Απαιτείται λοιπόν η ύπαρξη συγκεκριμένων μηχανισμών χειρισμού αυτών των μη εφικτών λύσεων.

Μια κατηγορία μηχανισμών για τη διαχείριση των περιορισμών είναι αυτή κατά την οποία γίνεται χρήση μιας ‘penalty function’. Ειδικότερα, το πρόβλημα λύνεται αρχικά σαν να μην υπάρχουν περιορισμοί. Εν συνεχεία, αν προκύψει κάποιο χρωμόσωμα το οποίο παραβιάζει τους περιορισμούς, τότε η πιθανότητα αυτού του χρωμοσώματος να επιλεγθεί μέσα από την πράξη της επιλογής πρέπει να μειωθεί. Ο περιορισμός της πιθανότητας αυτής γίνεται προσθέτοντας στην συνάρτηση προσαρμογής μια συνάρτηση penalty που ουσιαστικά μειώνει την τιμή προσαρμογής του συγκεκριμένου χρωμοσώματος. Υπάρχουν πολλές λύσεις για την επιλογή της ‘penalty function’. Μπορεί να είναι απλά μια σταθερά αλλά μπορεί και να εξαρτάται από το κατά πόσο ένα χρωμόσωμα παραβιάζει τους περιορισμούς. Όσο περισσότερο παραβιάζεται ένας περιορισμός τόσο μεγαλύτερη ποινή επιβάλλεται.

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

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

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

3.4 Κωδικοποίηση μεταβλητών

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

Έτσι, λοιπόν, σε ένα ευρύ σύνολο προβλημάτων χρησιμοποιείται η floating point αναπαράσταση. Σε μια τέτοια αναπαράσταση ένα χρωμόσωμα έχει τη μορφή $[a_1 a_2 a_3 \dots]$ όπου τα a_i είναι πραγματικοί αριθμοί που παίρνουν τιμές μέσα από ένα συγκεκριμένο εύρος $[\underline{a}_i, \bar{a}_i]$. Το $\underline{a}_i$ είναι το κάτω φράγμα και το $\bar{a}_i$ 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 λοιπόν όταν ένα γονίδιο επιλεγεί για μετάλλαξη τότε η νέα του τιμή θα επιλέγεται τυχαία μέσα από το επιτρεπτό εύρος τιμών του.

3.5 Γενετικοί Αλγόριθμοι

3.5.1 Εισαγωγή

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι επινοήθηκαν από τον John Holland τη δεκαετία του '60 και αναπτύχθηκαν από τον ίδιο και τους φοιτητές του τις δεκαετίες του '60 και του '70. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι του Holland είναι μια μέθοδος μετακίνησης από ένα πληθυσμό

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

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

Η εισαγωγή από τον Holland ενός αλγορίθμου βασισμένου στον πληθυσμό με διασταύρωση, αντιστροφή και μετάλλαξη ήταν μια μεγάλη καινοτομία. Οι στρατηγικές εξέλιξης του Rechenberg ξεκίνησαν με έναν "πληθυσμό" δύο ατόμων, ενός γονέα και ενός απογόνου, όπου ο απόγονος είναι μια μεταλλαγμένη παραλλαγή του γονέα. Πληθυσμοί πολλών ατόμων με διασταύρωση συμπεριλήφθησαν αργότερα. Αντίστοιχα, ο εξελικτικός προγραμματισμός του Walsh χρησιμοποιούσε μόνο μετάλλαξη για να προκαλέσει ποικιλία. Ο Holland ήταν αυτός ο οποίος προσπάθησε πρώτος να θέσει την υπολογιστική εξέλιξη σε μια σταθερή θεωρητική βάση (Holland 1975). Μέχρι πρόσφατα, η θεωρητική αυτή θεμελίωση, βασιζόμενη στη θεωρία των "σχημάτων" (schemas), ήταν το θεμέλιο όλων των μεταγενέστερων θεωρητικών μελετών επάνω στους γενετικούς αλγορίθμους.

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

3.5.2 Ο βασικός Γενετικός Αλγόριθμος

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

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

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

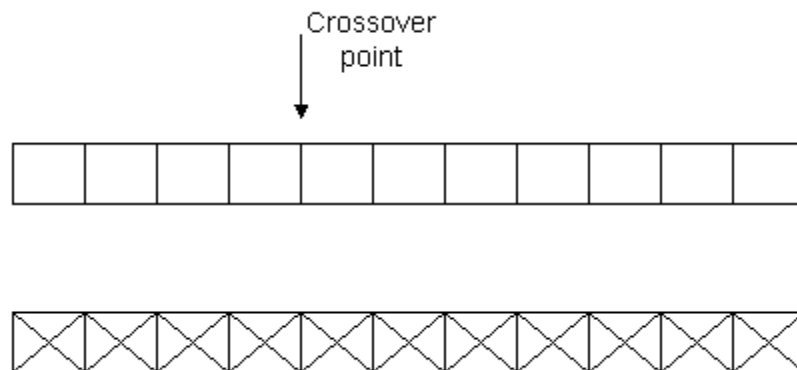
Ειδικότερα, οι τρεις πράξεις του βασικού γενετικού αλγόριθμου είναι η επιλογή, η διασταύρωση και η μετάλλαξη.

Ο μηχανισμός της επιλογής (selection), το κριτήριο δηλαδή με βάση το οποίο κάποια χρωμοσώματα θα επιλεγθούν και κάποια θα απορριφθούν από τις επόμενες γενεές είναι ένα από τα σημαντικότερα σημεία των Γενετικών Αλγορίθμων. Για τους μηχανισμούς επιλογής που χρησιμοποιούνται θα γίνει λόγος στην παράγραφο 3.3.5.

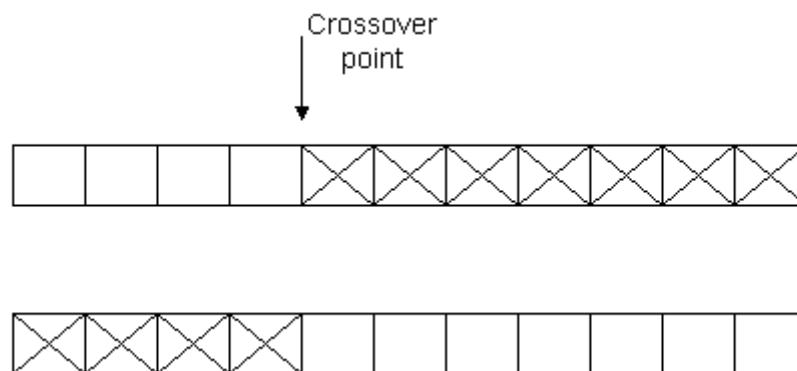
Ο τελεστής της διασταύρωσης (crossover) λαμβάνει χώρα ανάμεσα σε δυο χρωμοσώματα. Αφού επιλεγθεί ένα τυχαίο σημείο ανάμεσα στα γονίδια, οι υποακολουθίες

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

γονιδίων ανταλλάσσονται για να δημιουργηθούν έτσι δυο νέοι απόγονοι. Η πράξη της διασταύρωσης παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.1 – 3.3.



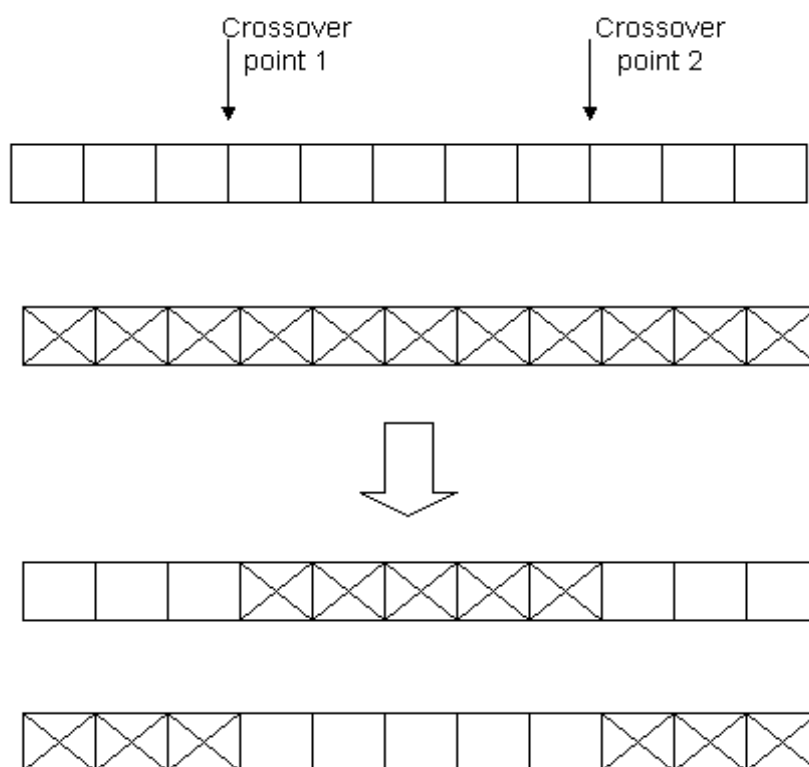
Σχήμα 3.1: Χρωμοσώματα πριν τη διασταύρωση.



Σχήμα 3.2: Χρωμοσώματα μετά τη διασταύρωση.

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

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

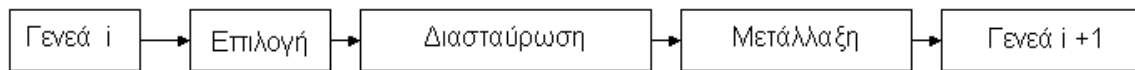


Σχήμα 3.3: Διασταύρωση δυο σημείων.

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

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

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.

3.5.3 Η συνάρτηση προσαρμογής

Συνάρτηση προσαρμογής (fitness function) ενός γενετικού αλγορίθμου είναι η συνάρτηση εκείνη 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 τη πράξη της επιλογής παρουσιάζονται στην παράγραφο 3.3.5. Αυτό που πρέπει να διευκρινιστεί είναι με ποιο τρόπο γίνεται η αντιστοίχιση μεταξύ της αντικειμενικής συνάρτησης και της συνάρτησης προσαρμογής.

Αρχικά πρέπει να διακρίνουμε δυο 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 έχουμε 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:

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

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 έχουμε πρόβλημα ελαχιστοποίησης η αντιστοίχιση μεταξύ αντικειμενικής και συνάρτησης προσαρμογής βασίζεται στην εξής μετατροπή:

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

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

3.5.4 Μηχανισμοί επιλογής (selection mechanisms)

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

Ο πιο διαδεδομένος μηχανισμός επιλογής χρωμοσωμάτων είναι ο μηχανισμός του τροχού της ρουλέτας. 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:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^N f_i} \quad (3.3)$$

Αφού έχουν υπολογιστεί οι 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

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

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:

$$n_i = \frac{f_i}{\bar{f}} = N \cdot p_i \quad (3.4)$$

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

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

3.5.5 Πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης

Οι πιθανότητες διασταύρωσης p_c και μετάλλαξης p_m σχετίζονται με το πλήθος των χρωμοσωμάτων μιας γενεάς που εμπλέκονται στις διαδικασίες της διασταύρωσης και της μετάλλαξης. Αν π.χ. έχουμε ένα πληθυσμό 20 χρωμοσωμάτων και η πιθανότητα διασταύρωσης είναι 50% τότε αναμένονται 10 χρωμοσώματα να συμμετάσχουν σε πράξεις διασταύρωσης για να δώσουν απογόνους.

Η επιλογή των πιθανοτήτων διασταύρωσης και μετάλλαξης έχει να κάνει με το εκάστοτε πρόβλημα. Πάντως, στη βιβλιογραφία υπάρχουν ενδεικτικές τιμές οι οποίες είναι οι εξής:

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

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

3.5.6 Τελεστές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία

Οι τελεστές της διασταύρωσης και της μετάλλαξης που χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα της παρούσας εργασίας είναι λίγο διαφορετικοί από αυτούς που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους λόγω της αποτελεσματικότητας που απαιτείται στην παρούσα βελτιστοποίηση, δηλαδή στη βέβαιη σύγκλιση στο ολικά βέλτιστο σημείο. Κάποιοι από αυτούς είναι ομοιόμορφοι με την έννοια ότι η δράση τους δεν αλλάζει κατά την εξέλιξη των γενεών και κάποιοι άλλοι είναι μη ομοιόμορφοι καθώς αλλάζει ο τρόπος δράσης τους όσο εξελίσσεται ο αλγόριθμος. Όλοι αυτοί οι τελεστές που χρησιμοποιούνται ενδείκνυνται για

προβλήματα με αναπαράσταση κινητής υποδιαστολής (floating point) και έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικοί στην αναζήτηση των βέλτιστων λύσεων.

Για τη διασταύρωση των χρωμοσωμάτων χρησιμοποιούνται οι εξής τρεις τελεστές:

Απλή διασταύρωση (Simple Crossover, SC): εφαρμόζεται η μέθοδος που έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 4. 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 επιλεγεί για SC δεν είναι άρτιος τότε επιλέγεται ένα ακόμα 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 επιλεγεί 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 επιλεγεί, το τρίτο με το τέταρτο κ.ο.κ.

Απλή αριθμητική διασταύρωση (Simple Arithmetical Crossover, SAC): αν τα χρωμοσώματα $c_1=[u_1 \dots u_m]$ και $c_2=[w_1 \dots w_m]$ πρόκειται να πάρουν μέρος σε πράξη S.A.C τότε οι απόγονοί τους θα είναι $c'_1=[u_1 \dots u'_k \dots u_m]$ και $c'_2=[w_1 \dots w'_k \dots w_m]$, όπου $k \in [1, m]$, $u'_k = \alpha w_k + (1-\alpha)u_k$ και $w'_k = \alpha u_k + (1-\alpha)w_k$. Η τιμή του k επιλέγεται τυχαία, ενώ το α είναι μια τυχαία επιλογή με τέτοιο τρόπο ώστε οι απόγονοι να βρίσκονται μέσα στο πεδίο εφικτών λύσεων (λύσεων δηλαδή που δεν παραβιάζουν τους περιορισμούς):

$$\alpha \in \begin{cases} [\max(\alpha, \beta), \min(\gamma, \delta)] & \text{αν } u_k > w_k \\ [0, 0] & \text{αν } u_k = w_k \\ [\max(\gamma, \delta), \min(\alpha, \beta)] & \text{αν } u_k < w_k \end{cases} \quad (3.5)$$

όπου:

$$\alpha = (l_k^{c_2} - w_k) / (u_k - w_k) \quad (3.6)$$

$$\beta = (u_k^{c_1} - u_k) / (w_k - u_k) \quad (3.7)$$

$$\gamma = (l_k^{c_1} - u_k) / (w_k - u_k) \quad (3.8)$$

$$\delta = (u_k^{c_2} - w_k) / (u_k - w_k) \quad (3.9)$$

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 ενός αλγορίθμου εύρεσης του πεδίου τιμών κάθε φορά που γίνεται απλή αριθμητική διασταύρωση. 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 ($0 \leq r \leq 1$). Αν $p_{sc} \leq r \leq p_{sac}$ τότε το χρωμόσωμα συμμετέχει σε SAC.

Ολική αριθμητική διασταύρωση (Whole Arithmetical Crossover, WAC): αν τα χρωμοσώματα $c_1=[u_1 \dots u_m]$ και $c_2=[w_1 \dots w_m]$ πρόκειται να πάρουν μέρος σε πράξη WAC τότε οι απόγονοί τους θα είναι $c'_1 = ac_2 + (1-a)c_1$ 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 για 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 τρεις παραπάνω τελεστές διασταύρωσης εφαρμόζονται με τη σειρά που παρουσιάστηκαν αμέσως μετά την πράξη της επιλογής. Τα χρωμοσώματα που επιλέγονται για κάποιο είδος διασταύρωσης δε μπορούν να συμμετέχουν σε άλλο είδος διασταύρωσης. Από τους τρεις τελεστές που αναφέρθηκαν μόνο ο δεύτερος και ο τρίτος εγγυώνται ότι οι απόγονοι που θα προκύψουν με την εφαρμογή τους δε θα παραβιάζουν το σύνολο των περιορισμών. Ο πρώτος τελεστής μπορεί να δώσει λύσεις που να βρίσκονται εκτός του συνόλου των επιτρεπτών λύσεων. Για την εξάλειψη αυτών των λύσεων απαιτείται η χρήση αλγορίθμου διόρθωσης.

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 ενός αλγορίθμου εύρεσης του πεδίου τιμών. 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 $r \leq p_{um}$.

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 εύρεσης του πεδίου τιμών. 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 $p_{um} \leq r \leq p_{bm}$.

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:

$$g'_k = \begin{cases} g_k + \rho \cdot (g_k^U - g_k) & \text{με πιθανότητα ίση με } 1/2 \\ g_k - \rho \cdot (g_k - g_k^L) & \text{με πιθανότητα ίση με } 1/2 \end{cases} \quad (3.10)$$

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

όπου $[g_k^L, g_k^U]$ είναι το επιτρεπτό εύρος τιμών του γονιδίου g_k (υπολογίζεται από τον αλγόριθμο εύρεσης του πεδίου τιμών) και ρ είναι η συνάρτηση:

$$\rho = u(1 - \frac{t}{T})^B \quad (3.11)$$

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 ανομοιομορφίας 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 μετάλλαξης ψάχνει ομοιόμορφα όλο το πεδίο των λύσεων ($\rho \rightarrow u$), ενώ όσο μεγαλώνει ($\rho \rightarrow 0$) ψάχνει πιο τοπικά. Όσο πιο μεγάλο είναι το B τόσο πιο γρήγορα θα αρχίσει η τοπική αναζήτηση. Η πιθανότητα για NUM, p_{num} , 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 $p_{bm} \leq r \leq p_{num}$.

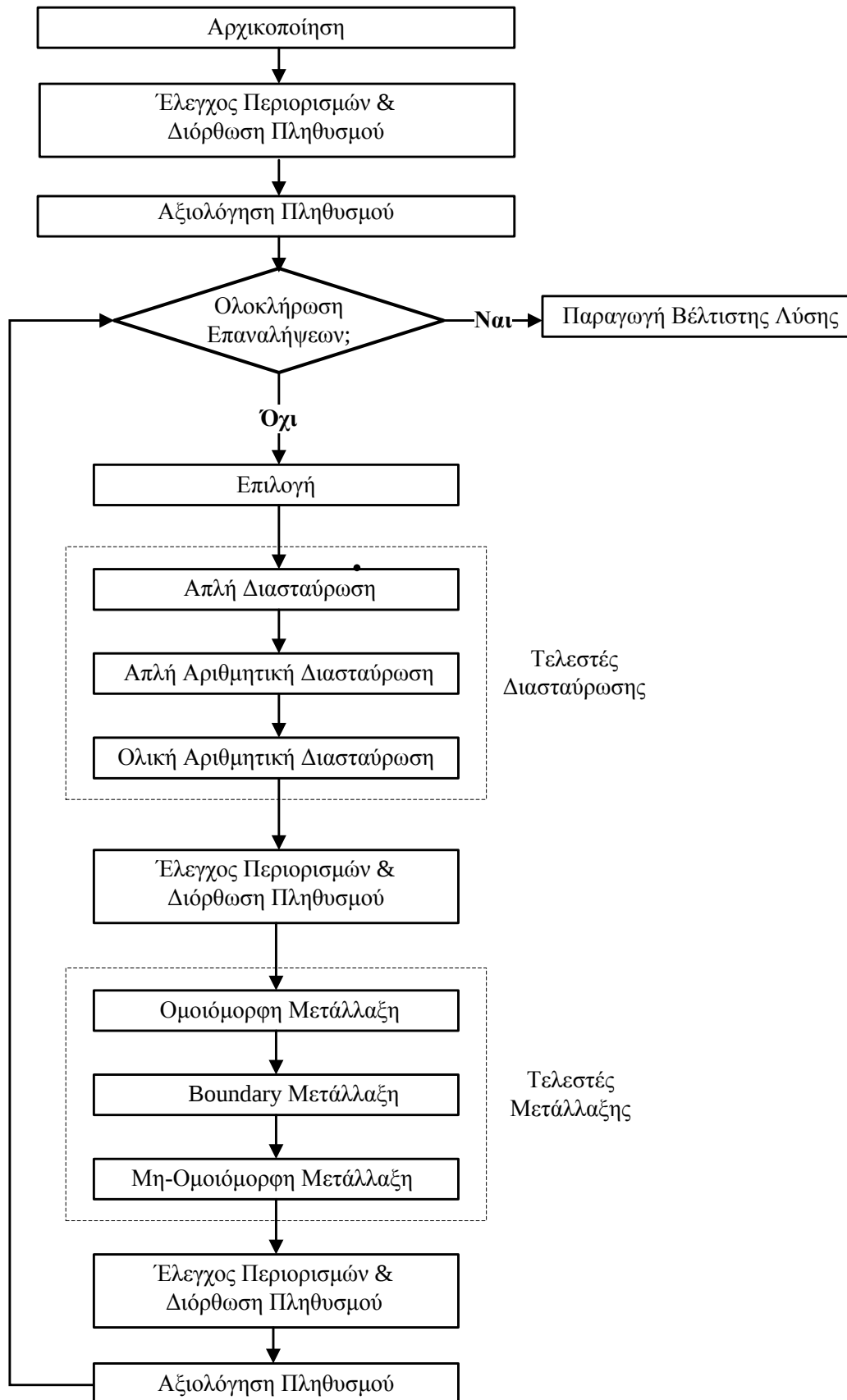
Οι τελεστές της μετάλλαξης εφαρμόζονται αμέσως μετά τις πράξεις της διασταύρωσης με τη σειρά που παρουσιάστηκαν. Τα χρωμοσώματα των οποίων κάποιο γονίδιο μεταλλάσσεται με κάποιον από τους τρεις τρόπους δε μπορούν να συμμετέχουν σε άλλου είδους μετάλλαξη. Τέλος και οι τρεις τελεστές που αναλύθηκαν εγγυώνται ότι τα χρωμοσώματα που παράγουν ανήκουν στο σύνολο των επιτρεπτών λύσεων.

Ο αλγόριθμος εύρεσης του πεδίου τιμών χρησιμοποιείται από κάποιους από τους γενετικούς τελεστές (SAC, UM και BM) που περιγράφηκαν για την εύρεση του πεδίου επιτρεπτών τιμών μιας μεταβλητής σε ένα συγκεκριμένο χρωμόσωμα. Ένα τέτοιο πεδίο δεν παραμένει σταθερό κατά την διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου αλλά είναι συνάρτηση των τιμών των υπόλοιπων μεταβλητών του εξεταζόμενου χρωμοσώματος.

Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται η ροή των τελεστών των Γενετικών Αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Όπως φαίνεται, αρχικά δημιουργείται με τυχαίο τρόπο η πρώτη γενεά και ο πληθυσμός διορθώνεται ώστε να μην παραβιάζονται οι περιορισμοί του προβλήματος. Αμέσως μετά αξιολογούνται τα χρωμοσώματα του πληθυσμού

με χρήση της συνάρτησης προσαρμογής και στη συνέχεια μέχρι να ολοκληρωθούν οι προκαθορισμένες επαναλήψεις εφαρμόζονται οι τελεστές που περιγράφηκαν παραπάνω. Έτσι, σε κάθε επανάληψη εφαρμόζεται η μέθοδος επιλογής του τροχού της ρουλέτας, οι τελεστές διασταύρωσης και μετάλλαξης με τον αλγόριθμο διόρθωσης του πληθυσμού ενδιάμεσα και στο τέλος της εφαρμογής τους και, τέλος, η αξιολόγηση των χρωμοσωμάτων με χρήση της συνάρτησης προσαρμογής.

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους



Σχήμα 3.5: Ροή των τελεστών των Γενετικών Αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν.

3.6 Τεχνική Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization)

3.6.1 Εισαγωγή

Μια νέα εξελικτική μέθοδος βελτιστοποίησης είναι η τεχνική Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization, PSO). Η PSO είναι μια στοχαστική τεχνική βελτιστοποίησης βασισμένη σε πληθυσμό που αναπτύχθηκε από τους Eberhart and Kennedy (1995), σαν ένα εναλλακτικό εργαλείο στους γενετικούς αλγορίθμους, εμπνευσμένη από την κοινωνική συμπεριφορά που έχουν τα σμήνη πουλιών.

Η PSO έχει πολλές ομοιότητες με εξελικτικές υπολογιστικές τεχνικές όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι. Το σύστημα αρχικοποιείται με ένα πληθυσμό τυχαίων λύσεων και αναζητά βέλτιστα ενημερώνοντας (updating) γενιές. Σε αντίθεση με τους γενετικούς αλγορίθμους, η PSO δεν έχει εξελικτικές διαδικασίες όπως η διασταύρωση και η μετάλλαξη. Στην PSO, οι ενδεχόμενες λύσεις, που λέγονται σωματίδια (particles), κινούνται στο χώρο των λύσεων ακολουθώντας το ρεύμα των βέλτιστων σωματιδίων. Το πλεονέκτημα της PSO συγκρινόμενη με τους Γενετικούς Αλγορίθμους είναι ότι είναι εύκολο να υλοποιηθεί και υπάρχουν λίγες παράμετροι προς ρύθμιση ενώ θεωρείται ιδιαίτερος αποδοτική σε προβλήματα πραγματικών μεταβλητών.

3.6.2 Ο αλγόριθμος

Η PSO προσομοιώνει τη συμπεριφορά ενός σμήνους πουλιών ή ψαριών. Έστω ότι έχουμε ένα σμήνος πουλιών ή ψαριών που ψάχνουν τυχαία για τροφή. Κανένα μέλος δεν ξέρει που είναι η τροφή αλλά όλα ξέρουν πόσο μακριά είναι η τροφή σε κάθε χρονικό σημείο. Η πιο αποτελεσματική τακτική είναι να ακολουθείται το μέλος που είναι πιο κοντά στην τροφή. Στην PSO κάθε λύση είναι ένα μέλος του σμήνους στο χώρο αναζήτησης, που καλείται σωματίδιο. Όλα τα σωματίδια έχουν τιμές καταλληλότητας (fitness values) με τις οποίες αξιολογούνται από την αντικειμενική συνάρτηση που πρέπει να βελτιστοποιηθεί και έχουν ταχύτητες που κατευθύνουν την κίνησή τους. Τα σωματίδια κινούνται στο χώρο των λύσεων ακολουθώντας το ρεύμα των καλύτερων σωματιδίων.

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

Η PSO αρχικοποιείται με μια ομάδα τυχαίων σωματιδίων (λύσεων) και μετά αναζητά βέλτιστα ενημερώνοντας τις γενιές. Σε κάθε επανάληψη, κάθε σωματίδιο ενημερώνεται ακολουθώντας δύο τιμές. Η μία είναι η καλύτερη λύση (fitness) που έχει επιτύχει ως τώρα το ίδιο το σωματίδιο (η τιμή καταλληλότητας είναι αποθηκευμένη επίσης) και καλείται ατομικό βέλτιστο (personal best, pbest). Η άλλη τιμή είναι η καλύτερη που έχει επιτευχθεί από οποιοδήποτε σωματίδιο στον πληθυσμό μέχρι εκείνη τη στιγμή (επανάληψη) και καλείται ολικό βέλτιστο (global best, gbest).

Ο βασικός αλγόριθμος PSO για την ενημέρωση της θέσης του κάθε σωματιδίου περιγράφεται από τις επόμενες σχέσεις:

$$v_{i+1}(j) = v_i(j) + c_1 \cdot r_{1,i}(j) \cdot pbest(j) - x_i(j) + c_2 \cdot r_{2,i}(j) \cdot gbest(j) - x_i(j) \quad (3.12)$$

$$x_{i+1}(j) = v_{i+1}(j) + x_i(j) \quad (3.13)$$

όπου i είναι ο αριθμός της τρέχουσας επανάληψης, j είναι ο αριθμός της μεταβλητής του διανύσματος βελτιστοποίησης (1^{η} , 2^{η} κ.ο.κ), $pbest(j)$ είναι η τιμή της μεταβλητής j της καλύτερης λύσης που έχει επιτύχει το συγκεκριμένο σωματίδιο μέχρι την επανάληψη i , $gbest(j)$ είναι η τιμή της μεταβλητής j της καλύτερης λύσης που έχει εντοπιστεί από ολόκληρο τον πληθυσμό μέχρι την επανάληψη i , $r_{1,i}$ και $r_{2,i}$ είναι μεταβλητές που δημιουργούνται τυχαία στο διάστημα $[0,1]$ σε κάθε εφαρμογή του αλγορίθμου PSO, $x_i(j)$ είναι η τιμή της μεταβλητής j κατά την επανάληψη i , $v_i(j)$ είναι η ταχύτητα της μεταβλητής j κατά την επανάληψη i , c_1 και c_2 σταθερές μεταβλητές με τιμή, συνήθως, ίση με 2, $r_{1,i}$ και $r_{2,i}$ είναι μεταβλητές που δημιουργούνται τυχαία στο διάστημα $[0,1]$ σε κάθε εφαρμογή του αλγορίθμου PSO.

Οι Eberhart et al. (1996) πρότειναν τον περιορισμό της ταχύτητας σε ένα εύρος $-v_{max}, v_{max}$ ώστε να μειωθεί η πιθανότητα κινήσεων εκτός του επιτρεπτού χώρου αναζήτησης. Οι Shi και Eberhart [1998] παρατήρησαν ότι η έλλειψη της συνιστώσας μνήμης της προηγούμενης ταχύτητας (όρος $v_i(j)$ στην Εξ. 3.12) έχει ως αποτέλεσμα την παγίδευση του σμήνους στην καλύτερη λύση που έχει βρεθεί από τον αρχικό, τυχαία ορισμένο, πληθυσμό. Αντιθέτως, ο μηχανισμός «μνήμης» της ταχύτητας συμβάλλει σε μια διευρυμένη κίνηση στο χώρο αναζήτησης. Προκειμένου να επιτευχθεί μια καλύτερη ισορροπία μεταξύ εξερεύνησης και εκμετάλλευσης των αποτελεσμάτων της, προτείνεται η χρήση ενός

συντελεστή αδράνειας (inertia weight), w , ώστε η βασική εξίσωση του αλγορίθμου PSO να διαμορφώνεται ως εξής:

$$v_{i+1}(j) = w \cdot v_i(j) + c_1 \cdot r_{1,i}(j) \cdot pbest(j) - x_i(j) + c_2 \cdot r_{2,i}(j) \cdot gbest(j) - x_i(j) \quad (3.14)$$

Ο συντελεστής αδράνειας παίζει σημαντικό ρόλο στη σύγκλιση της βέλτιστης λύσης σε μια βέλτιστη τιμή καθώς και στη διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης. Ελέγχει την επίδραση των προηγούμενων ταχυτήτων στην παρούσα, όπως και τις τοπικές και ολικές ικανότητες αναζήτησης της PSO. Γενικά, σε μεθόδους βελτιστοποίησης που βασίζονται σε πληθυσμούς, είναι επιθυμητό να «ενθαρρύνονται» τα άτομα να περιπλανιούνται σε όλο το χώρο αναζήτησης, χωρίς να εγκλωβίζονται γύρω από τοπικά βέλτιστα κατά τη διάρκεια των πρώτων σταδίων βελτιστοποίησης. Από την άλλη μεριά, κατά τα τελευταία στάδια είναι πολύ σημαντικό να ευνοείται η σύγκλιση προς το ολικό βέλτιστο, για να βρεθεί η βέλτιστη λύση αποδοτικά. Μεγάλοι συντελεστές αδράνειας βοηθάνε την PSO να εξερευνά ολικά και μικροί συντελεστές αδράνειας τοπικά.

Οι Eberhart and Shi (2000) προτείνουν τη γραμμική μείωση του βάρους αυτού ανάλογα με τις επαναλήψεις της διαδικασίας βελτιστοποίησης από 0.9 (1^η επανάληψη) σε 0.4 (τελευταία επανάληψη).

Ένας τρόπος ελέγχου της συμπεριφοράς του σμήνους, εναλλακτικός στη χρήση inertia weight, είναι η Constriction PSO (CPSO) που προτείνεται από τους Clerc and Kennedy (2002). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή ένας συντελεστής περιορισμού (constriction factor), χ , εφαρμόζεται ως εξής:

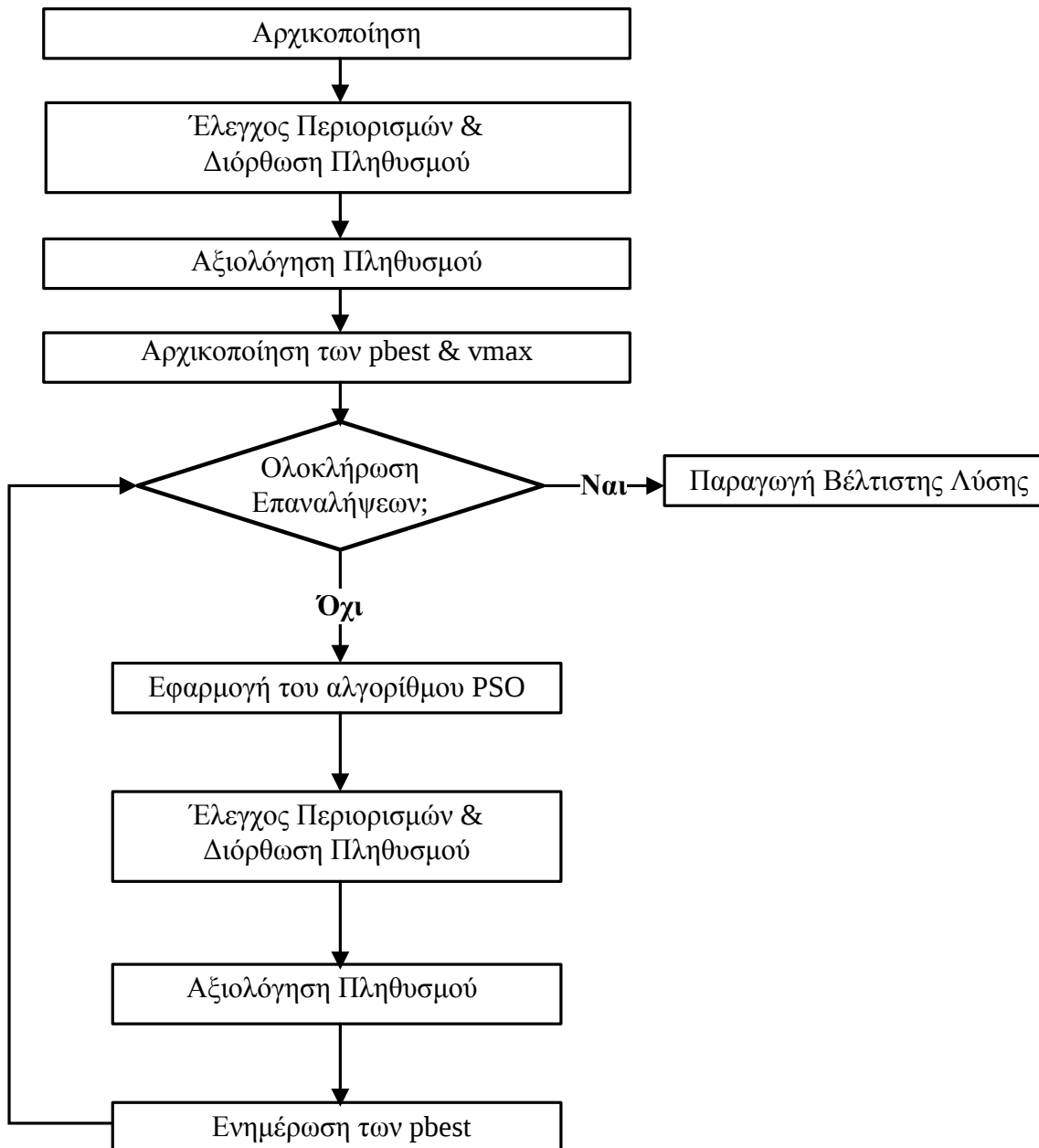
$$v_{i+1}(j) = \chi \cdot [v_i(j) + c_1 \cdot r_{1,i}(j) \cdot pbest(j) - x_i(j) + c_2 \cdot r_{2,i}(j) \cdot gbest(j) - x_i(j)] \quad (3.15)$$

όπου

$$\chi = \frac{2}{|2 - c - \sqrt{c^2 - 4 \cdot c}|} \quad (3.16)$$

και το c είναι ίσο με $c = c_1 + c_2$, $c > 4$.

Στην περίπτωση της μεθόδου CPSO τα c_1 και c_2 συνήθως τίθενται ίσα με 2,05.



Σχήμα 3.6: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου PSO.

Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου PSO. Κατά την έναρξη του αλγορίθμου δημιουργείται ο αρχικός πληθυσμός με τυχαίο τρόπο και στη συνέχεια ελέγχεται για τυχόν παραβιάσεις των περιορισμών και διορθώνεται. Στη συνέχεια όλα τα μέλη του πληθυσμού αξιολογούνται με την αντικειμενική συνάρτηση και αρχικοποιούνται τα διανύσματα $pbest$ και $vmax$. Αμέσως μετά ακολουθεί η επαναληπτική διαδικασία του αλγορίθμου όπου σε κάθε επανάληψη εφαρμόζεται ο αλγόριθμος PSO σε κάθε μέλος του πληθυσμού, διορθώνονται οι προκύπτουσες λύσεις ώστε να μην παραβιάζονται οι περιορισμοί, αξιολογείται ο πληθυσμός με χρήση της αντικειμενικής συνάρτησης και ενημερώνονται τα διανύσματα $pbest$.

3.7 Διαφορική Εξέλιξη

3.7.1 Εισαγωγή

Η Διαφορική Εξέλιξη προτάθηκε από τους Storm and Price (1997). Είναι ένας στοχαστικός, βασισμένος σε πληθυσμό αλγόριθμος. Η Διαφορική Εξέλιξη έχει τα βασικά χαρακτηριστικά των εξελικτικών αλγορίθμων αλλά και ένα αριθμό από διαφορές όπως το γεγονός ότι εστιάζει στην απόσταση μεταξύ των μελών του πληθυσμού και στις διαφορετικές κατευθύνσεις που μπορεί να κινηθεί κάποιο μέλος του πληθυσμού. Για να εφαρμοστεί η διαφορική εξέλιξη θα πρέπει να έχουμε κωδικοποιήσει τις λύσεις με αναπαράσταση πραγματικού αριθμού ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν οι τελεστές μετάλλαξης. Στους εξελικτικούς αλγορίθμους όταν χρησιμοποιείται ο τελεστής διασταύρωσης εφαρμόζεται αρχικά πάνω σε δύο ή περισσότερους γονείς και στην συνέχεια στον απόγονο ή στους απογόνους που θα δημιουργηθούν εφαρμόζεται ένας τελεστής μετάλλαξης ο οποίος συνήθως μετακινεί τη λύση από ένα σημείο σε κάποιο άλλο με την χρήση κάποιου βήματος που στηρίζεται σε κάποια κατανομή πιθανότητας. Υπάρχουν δύο βασικές διαφορές στη Διαφορική Εξέλιξη:

- ο τελεστής μετάλλαξης χρησιμοποιείται αρχικά για να παραχθεί ένα δοκιμαστικό διάνυσμα, το οποίο στην συνέχεια χρησιμοποιείται με κάποιο τελεστή διασταύρωσης για την δημιουργία ενός απογόνου, και
- τα βήματα που γίνονται με τον τελεστή μετάλλαξης δεν υπόκεινται σε κάποια γνωστή κατανομή πιθανοτήτων αλλά επηρεάζονται από τις διαφορετικές τιμές στα γονίδια ανάμεσα σε μέλη του πληθυσμού.

Ο τελεστής μετάλλαξης παράγει ένα δοκιμαστικό διάνυσμα για κάθε μέλος του πληθυσμού με μετάλλαξη ενός διανύσματος στόχου στο οποίο προστίθεται η διαφορά ανάμεσα στις τιμές των γονιδίων δύο ή περισσότερων ατόμων του πληθυσμού πολλαπλασιασμένων με κάποιο βάρος. Το δοκιμαστικό διάνυσμα τότε θα χρησιμοποιηθεί από τον τελεστή διασταύρωσης για να δημιουργηθεί ο απόγονος. Μετά την ολοκλήρωση της φάσης της μετάλλαξης εφαρμόζεται ένας τελεστής διασταύρωσης. Μετά τον τελεστή διασταύρωσης, η συνάρτησης ποιότητας του απογόνου υπολογίζεται και εάν είναι καλύτερη από την συνάρτηση καταλληλότητας του γονέα τότε επιλέγεται για την επόμενη γενιά αλλιώς ο γονέας επιβιώνει για μία ακόμα γενιά.

3.7.2 Ο αλγόριθμος

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στη Διαφορική Εξέλιξη η μετάλλαξη εφαρμόζεται για τη δημιουργία ενός προσωρινού διανύσματος, στο οποίο εφαρμόζεται η διασταύρωση ώστε να προκύψει ο τελικός πληθυσμός σε κάθε επανάληψη, ενώ ο τελεστής μετάλλαξης δε βασίζεται σε κάποια κατανομή πιθανότητας αλλά στις αποστάσεις μεταξύ των μελών στο χώρο της αναζήτησης. Έτσι σε κάθε επανάληψη εφαρμόζονται τα εξής βήματα: Καταρχήν, επιλέγονται τρία μέλη, $r_{1,2,3}$, του υπάρχοντος πληθυσμού με τυχαίο τρόπο ώστε να είναι μεταξύ τους διαφορετικά όπως επίσης διαφορετικά και από το τρέχον μέλος, k :

$$r_{1,2,3} \in [1, N], \quad r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq k \quad (3.17)$$

όπου N το μέγεθος του πληθυσμού. Τα προσωρινά μέλη (trial individuals) δημιουργούνται σύμφωνα με την εξής σχέση:

$$x_{t,j,k} = \begin{cases} x_{j,r_3} + F \cdot x_{j,r_1} - x_{j,r_2} & \text{αν } \text{rand}[0,1) < Cr \vee Rnd = j \\ x_{j,k} & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.18)$$

όπου x_t είναι το διάνυσμα των προσωρινών – δοκιμαστικών μελών, j είναι ο αριθμός της μεταβλητής του διανύσματος βελτιστοποίησης ($1^{\eta}, 2^{\eta}$ κ.ο.κ), $x_{j,k}$ είναι η τιμή του μέλους k για τη μεταβλητή j στον υπάρχοντα πληθυσμό, F είναι ο συντελεστής μετάλλαξης (differentiation constant), Cr είναι ο συντελεστής διασταύρωσης (crossover constant), $\text{rand}[0,1)$ είναι ένας τυχαίος αριθμός στο διάστημα $[0,1)$ και Rnd είναι μια τυχαία μεταβλητή στο διάστημα $[1, Dx]$ όπου Dx είναι το πλήθος των μεταβλητών απόφασης του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Οι μεταβλητές $\text{rand}[0,1)$ και Rnd δημιουργούνται εκ νέου σε κάθε εφαρμογή του αλγορίθμου για κάθε επανάληψη, μέλος και μεταβλητή του προβλήματος. Τελικά, επιλέγεται η καλύτερη λύση μεταξύ της ήδη υπάρχουσας και της προσωρινής, όπως ακολουθεί:

$$x_{j,k} = \begin{cases} x_{t,j,k} & \text{αν } f(x_{t,j,k}) \geq f(x_{j,k}) \\ x_{j,k} & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.19)$$

όπου $f \cdot$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση προς μεγιστοποίηση. Ο αλγόριθμος που περιγράφηκε είναι γνωστός ως DE/Rand/1 (Feoktistov, 1996). Εκτός από αυτή την εκδοχή υπάρχουν τα σχήματα DE/Rand/2, DE/Best/1 και DE/Best/2 τα οποία και εξετάζονται στην

παρούσα εργασία. Η διαφορά του αλγορίθμου DE/Rand/2 από το βασικό αλγόριθμο είναι ότι επιλέγονται πέντε μέλη από τον πληθυσμό αντί τριών, ως εξής:

$$r_{1,2,3,4,5} \in [1, N], r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq r_4 \neq r_5 \neq k \quad (3.20)$$

$$xt_{j,k} = \begin{cases} x_{j,r_5} + F \cdot x_{j,r_1} + x_{j,r_2} - x_{j,r_3} - x_{j,r_4} & \text{αν } \text{rand}[0,1) < Cr \vee Rnd = j \\ x_{j,k} & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.21)$$

Ο αλγόριθμος DE/Best/1 χρησιμοποιεί την τιμή της μεταβλητής της ολικά καλύτερης λύσης που έχει ως εκείνη τη στιγμή εντοπιστεί και τις τιμές δύο τυχαία επιλεγμένων μελών:

$$r_{1,2} \in [1, N], r_1 \neq r_2 \neq k \quad (3.22)$$

$$xt_{j,k} = \begin{cases} gbest_{ij} + F \cdot x_{j,r_1} - x_{j,r_2} & \text{αν } \text{rand}[0,1) < Cr \vee Rnd = j \\ x_{j,k} & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.23)$$

όπου με $gbest_{ij}$ συμβολίζεται η τιμή της μεταβλητής j της ολικά καλύτερης λύσης που εντοπιστεί μέχρι την επανάληψη i .

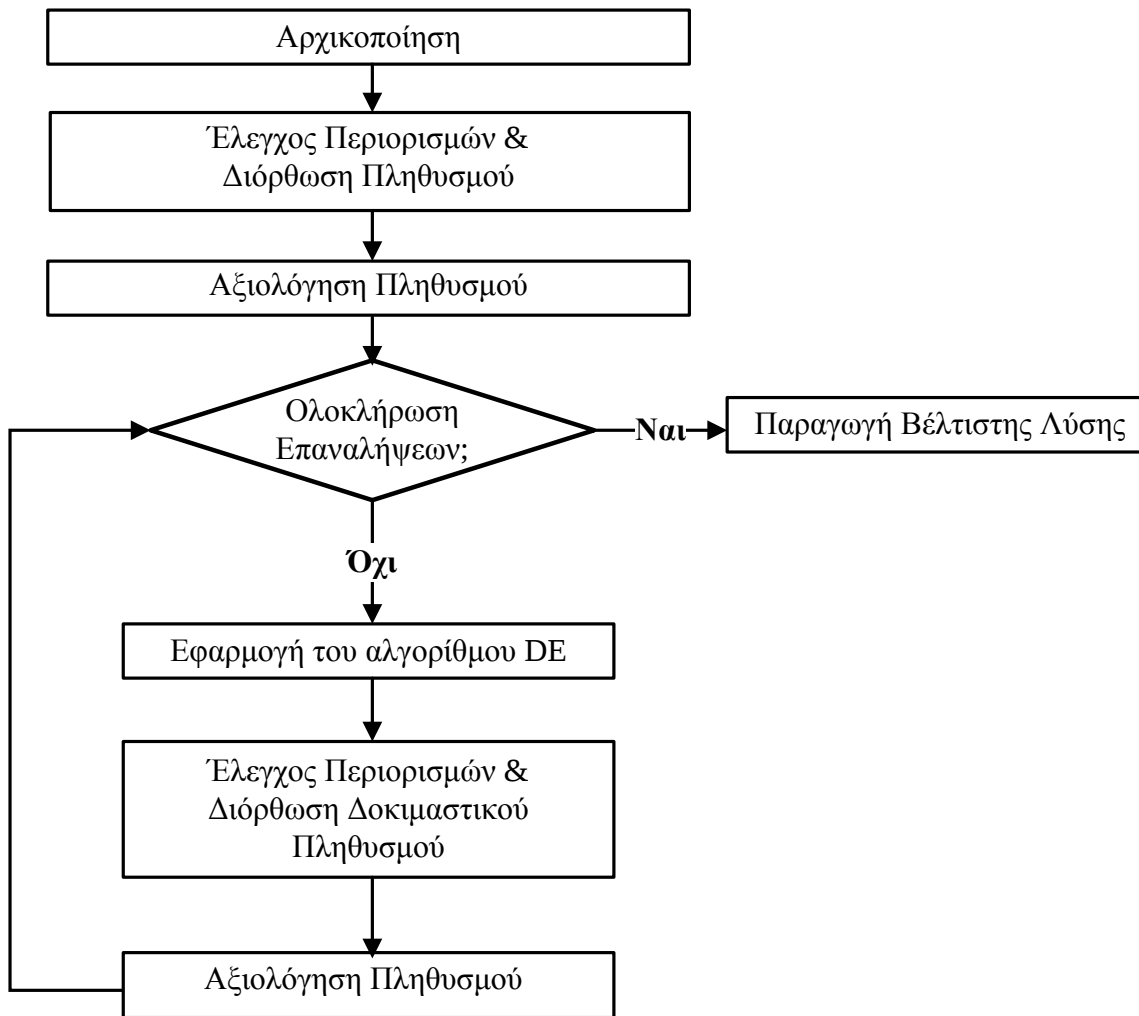
Ο αλγόριθμος DE/Best/2 επίσης χρησιμοποιεί την τιμή της μεταβλητής της ολικά καλύτερης λύσης που έχει ως βρεθεί καθώς και τις τιμές τεσσάρων τυχαία επιλεγμένων μελών:

$$r_{1,2,3,4} \in [1, N], r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq r_4 \neq k \quad (3.24)$$

$$xt_{j,k} = \begin{cases} gbest_{ij} + F \cdot x_{j,r_1} + x_{j,r_2} - x_{j,r_3} - x_{j,r_4} & \text{αν } \text{rand}[0,1) < Cr \vee Rnd = j \\ x_{j,k} & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.25)$$

Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Διαφορικής Εξέλιξης. Αρχικά δημιουργείται ο πρώτος πληθυσμός τυχαία και στη συνέχεια ελέγχεται για τυχόν παραβιάσεις των περιορισμών και διορθώνεται. Στη συνέχεια όλα τα μέλη του πληθυσμού αξιολογούνται με την αντικειμενική συνάρτηση. Αμέσως μετά ακολουθεί η επαναληπτική διαδικασία του αλγορίθμου όπου σε κάθε επανάληψη εφαρμόζεται ο αλγόριθμος Διαφορικής Εξέλιξης, διορθώνονται οι προκύπτουσες λύσεις του δοκιμαστικού πληθυσμού ώστε να μην παραβιάζονται οι περιορισμοί και αξιολογείται ο δοκιμαστικός πληθυσμός με χρήση της αντικειμενικής συνάρτησης όποτε προκύπτει και ο νέος πληθυσμός.

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους



Σχήμα 3.7: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Διαφορικής Εξέλιξης.

4. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

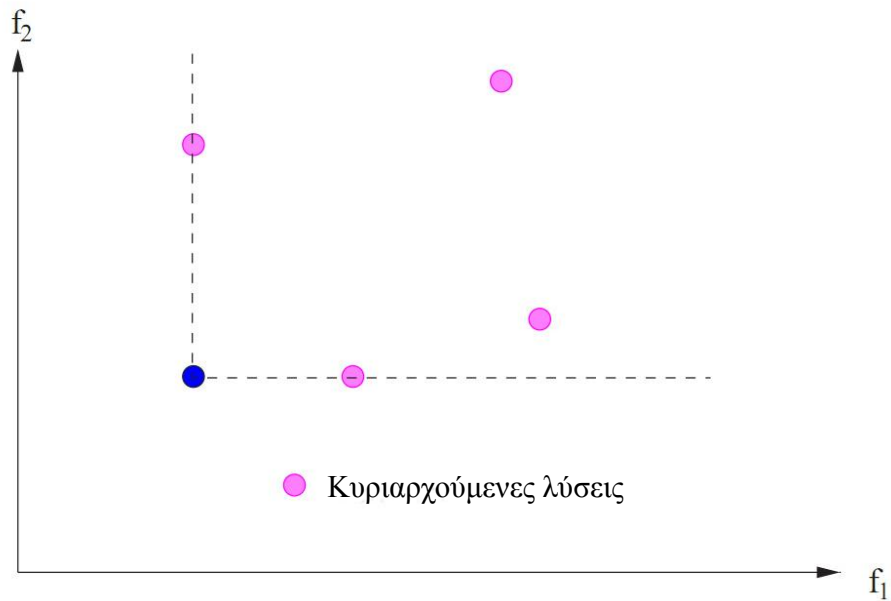
4.1 Βελτιστοποίηση πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων

Η βελτιστοποίηση πολλών αντικειμενικών συναρτήσεων (multiobjective optimization) αποτελεί ένα πρόβλημα σχεδιασμού ενός μοντέλου το οποίο χαρακτηρίζεται από περισσότερες από μια συναρτήσεις ή κριτήρια. Αν οι συναρτήσεις δεν έχουν κάποιο κοινό χαρακτηριστικό τότε το πρόβλημα που προκύπτει είναι η εύρεση εκείνου του μοντέλου που ικανοποιεί όλες τις αντικρουόμενες συναρτήσεις. Σκοπός είναι η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης που υπόκειται σε συγκεκριμένες συναρτήσεις και περιορισμούς. Το πρόβλημα αυτό καλείται πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων.

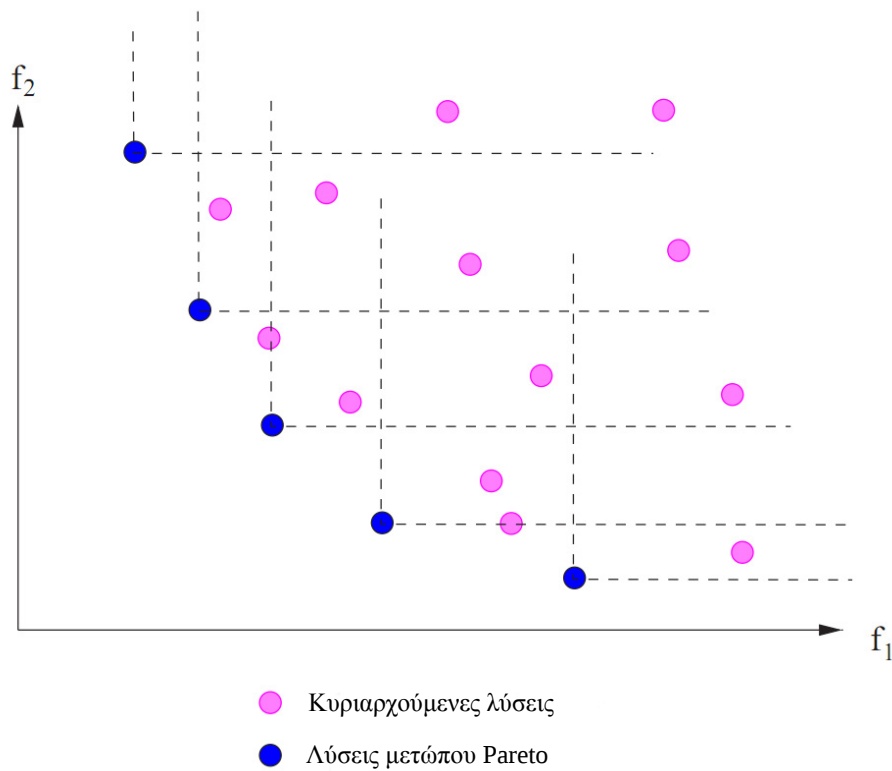
Η ιδανική λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων είναι η εύρεση των κατάλληλων παραμέτρων σχεδίασης οι οποίες βελτιστοποιούν τις συναρτήσεις ταυτόχρονα. Με αυτό τον τρόπο η λύση επιλέγεται από ένα σύνολο τιμών που καλείται βέλτιστο σύνολο κατά Pareto. Ο όρος δημιουργήθηκε από τον Ιταλό οικονομολόγο Vilfredo Pareto (1848-1923) και χρησιμοποιείται συστηματικά από τότε. Γενικότερα στα προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων οι βέλτιστες λύσεις που προκύπτουν με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε συνάρτηση να βελτιστοποιείται ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες, δεν είναι εφικτές.

Δεδομένων δύο διανυσμάτων $\mathbf{x}^*$, $\mathbf{y}^*$ όπου $\mathbf{x}^* = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ και $\mathbf{y}^* = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ με n το πλήθος των αντικειμενικών συναρτήσεων - κριτηρίων του προβλήματος και x_i και y_i τις τιμές των $\mathbf{x}^*$ και $\mathbf{y}^*$ αντίστοιχα στο κριτήριο i , θεωρούμε ότι $\mathbf{x}^* \leq \mathbf{y}^*$ αν οι αντικειμενικές συναρτήσεις είναι προς ελαχιστοποίηση και ισχύει ότι $x_i \leq y_i \quad \forall i \in [1, n]$. Σε αυτή την περίπτωση λέγεται ότι το $\mathbf{x}^*$ κυριαρχεί επί του $\mathbf{y}^*$ ($\mathbf{x}^* \succ \mathbf{y}^*$). Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται μια περίπτωση κυριαρχίας σε ένα πρόβλημα δύο κριτηρίων. Ένα διάνυσμα $\mathbf{x}^*$ ονομάζεται μη κυριαρχούμενη λύση αν δεν υπάρχει κανένα άλλο διάνυσμα $\mathbf{y}^*$ το οποίο να κυριαρχεί επί του $\mathbf{x}^*$. Ένα διάνυσμα $\mathbf{x}^*$ καλείται βέλτιστο κατά Pareto αν δεν κυριαρχείται. Βέλτιστο μέτωπο Pareto (Pareto front) ονομάζεται το σύνολο των λύσεων που αποτελούν βέλτιστα κατά Pareto

σημεία. Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται μια περίπτωση ενός μετώπου Pareto σε ένα πρόβλημα δύο κριτηρίων.



Σχήμα 4.1: Η κυριαρχία σε ένα πρόβλημα δύο κριτηρίων.



Σχήμα 4.2: Το μέτωπο Pareto σε ένα πρόβλημα δύο κριτηρίων.

4.2 Βελτιστοποίηση πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων με Γενετικούς Αλγορίθμους

Διάφορες μέθοδοι προσαρμογής των Γενετικών Αλγορίθμων έχουν προταθεί ώστε να μπορούν να αντιμετωπίσουν προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων. Σε γενικές γραμμές αυτές οι μέθοδοι βασίζονται στην έννοια της κυριαρχίας κατά Pareto. Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυριότεροι από αυτούς τους αλγορίθμους.

Ο vector evaluated genetic algorithm (VEGA) προτάθηκε από τον Schaffer (1984), και χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα, κυρίως ως μέτρο σύγκρισης για τις νέες μεθοδολογίες που αναπτύσσονται. Στην πραγματικότητα, η παρέμβαση αφορά στον τρόπο εφαρμογής του τελεστή επιλογής. Ο εν λόγω τελεστής προσαρμόστηκε ώστε σε κάθε γενιά να δημιουργούνται υποπληθυσμοί, όπου η διαμόρφωση κάθε υποπληθυσμού γίνεται μέσω αναλογικής επιλογής (proportional selection) και βάσει του αντίστοιχου κριτηρίου. Συνεπώς, θεωρώντας έναν πληθυσμό p ατόμων σε ένα πρόβλημα m κριτηρίων, δημιουργούνται m ισομεγέθεις υποπληθυσμοί, με αριθμό μελών p/m . Στη συνέχεια, το δείγμα αναμιγνύεται και προκύπτει ένας νέος πληθυσμός μεγέθους p , στον οποίο εφαρμόζονται οι τελεστές διασταύρωσης και μετάλλαξης κατά το συνήθη τρόπο.

Ο multiple objective genetic algorithm (MOGA) αναπτύχθηκε από τους Fonseca and Fleming (1993), ως συνιστώσα ενός συστήματος ανάλυσης προβλημάτων πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων. Στην μέθοδο MOGA, η τάξη r κάθε ατόμου i ισούται με το πλήθος των κυρίαρχων μελών του πληθυσμού, $n_d(i)$, αυξημένο κατά ένα. Στην περίπτωση ταξινόμησης των μελών ενός πληθυσμού σε ένα πρόβλημα πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων μέσω της μεθόδου MOGA, κάθε λύση εξετάζεται χωριστά, εντοπίζοντας το πλήθος των ατόμων σε σχέση με τα οποία είναι κατώτερη. Τα μη κατώτερα μέλη του πληθυσμού και μόνο αυτά λαμβάνουν τάξη ίση με 1. Προφανώς, η μέγιστη δυνατή τιμή ταξινόμησης είναι ίση με το μέγεθος του πληθυσμού, p , και αντιστοιχεί σε ένα άτομο που κυριαρχείται από όλα τα υπόλοιπα. Στην επιθυμητή περίπτωση, όλα τα μέλη έχουν μοναδιαία τιμή, που σημαίνει ότι δεν υπάρχει λύση που να μην είναι Pareto βέλτιστη, τουλάχιστον κατά την τοπική έννοια. Επειδή η διαδικασία αυτή ενδέχεται να επιβάλει ισχυρή επιλεκτική πίεση, με συνέπεια την πρόωρη σύγκλιση σε περιορισμένο τμήμα του μετώπου Pareto, εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος, με στόχο την διασπορά του πληθυσμού στο πεδίο αποτίμησης. Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίζεται ομοιόμορφη κατανομή του πληθυσμού στο μέτωπο Pareto.

Ο αλγόριθμος non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA) αναπτύχθηκε από τους Srinivas and Deb (1993). Αργότερα, οι Deb et al. (2000) ανέπτυξαν μια βελτιωμένη εκδοχή του. Χρησιμοποιείται μια μέθοδος κατάταξης, που συμβάλλει στην επιλογή καλών λύσεων, και ενός αλγορίθμου διασποράς. Όπως υποδηλώνει η ονομασία της, η μέθοδος NSGA υλοποιεί τη διαδικασία μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης. Ως προς τους τελεστές διασταύρωσης και μετάλλαξης, ακολουθείται η τυπική στρατηγική, με τις καινοτομίες να αφορούν αποκλειστικά στον τελεστή επιλογής. Συγκεκριμένα, σε κάθε γενεά, εντοπίζονται τα μη κυριαρχούμενα άτομα του πληθυσμού που διαμορφώνουν ένα πρώτο μέτωπο, η τάξη του οποίου αντιστοιχεί σε μια μεγάλη εικονική τιμή, ίση με το μέγεθος του πληθυσμού, p . Η εν λόγω τιμή είναι κοινή για τα μέλη του ίδιου μετώπου, ώστε να έχουν όλα παρόμοια πιθανότητα επιβίωσης. Επιπλέον, για τη διατήρηση της διασποράς του πληθυσμού, ο βαθμός καταλληλότητας κάθε ατόμου προκύπτει με βάση μια μέθοδο διασποράς όπως και στον MOGA. Μετά την ολοκλήρωση των υπολογισμών που αφορούν στις τιμές καταλληλότητας των μελών του πρώτου μετώπου, εντοπίζονται οι μη κατώτερες λύσεις του υπόλοιπου πληθυσμού, που συνιστούν το δεύτερο μέτωπο. Η τάξη του δεύτερου μετώπου είναι πάντα μικρότερη από την ελάχιστη τελική τιμή καταλληλότητας του πρώτου μετώπου. Στη συνέχεια, η εν λόγω τιμή διαιρείται με την αντίστοιχη συνάρτηση διασποράς κάθε μέλους του μετώπου, κτλ. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ολοκληρωθεί η ταξινόμηση όλου του πληθυσμού. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ένας τελεστής στοχαστικής αναλογικής επιλογής (stochastic remainder proportionate selection). Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίζεται ότι όλα σημεία του πρώτου μετώπου, δηλαδή τα μη κατώτερα μέλη στον τρέχοντα πληθυσμό, στα οποία ορίζεται το μεγαλύτερο μέτρο καταλληλότητας, θα αντιγραφούν περισσότερες φορές σε σχέση με κάθε άλλο μέλος του υπόλοιπου πληθυσμού. Σύμφωνα με τους Srinivas and Deb (1994), το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ο μετασχηματισμός οποιουδήποτε προβλήματος βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων σε μονοκριτηριακό, ανεξαρτήτως του πλήθους των κριτηρίων, και χωρίς διάκριση μεταξύ του τελεστή ελαχιστοποίησης και μεγιστοποίησης. Ο αλγόριθμος εξασφαλίζει αφενός ταχεία σύγκλιση της διαδικασίας αναζήτησης προς τις περιοχές των μη κατωτέρων λύσεων, δηλαδή το σύνολο Pareto, και αφετέρου την εύρεση λύσεων που είναι ομοιόμορφα διεσπαρμένες στον χώρο αναζήτησης.

Ο αλγόριθμος niched Pareto genetic algorithm (NPGA) αναπτύχθηκε από τους Horn and Nafpliotis (1993), και δημοσιεύτηκε από τους Horn et al. (1994). Στην πρωτότυπη εκδοχή, οι Horn and Nafpliotis ανέπτυξαν ένα σχήμα επιλογής, το οποίο ονόμασαν Pareto dominance tournament. Η διαφορά με τους αλγορίθμους που παρουσιάστηκαν έως τώρα

έγκειται στο γεγονός ότι η κυριαρχία κάθε ατόμου δεν ελέγχεται εφ' όλου του πληθυσμού, αλλά με βάση ένα δείγμα τυχαία επιλεγμένων μελών του. Το πλεονέκτημα του αλγορίθμου NPGA είναι η αποδοτικότητά του σε σχέση με τον υπολογιστικό φόρτο άλλων σχημάτων, καθώς τόσο κατά την διαδικασία ταξινόμησης όσο και κατά τον υπολογισμό των συναρτήσεων διασποράς δεν χρησιμοποιείται το σύνολο του πληθυσμού αλλά ένα τμήμα αυτού.

Οι Valenzuela-Rendón and Uresti-Charre (1997) ανέπτυξαν έναν γενετικό αλγόριθμο που εφαρμόζει μη παραγωγική (non-generational) επιλογή, όπου το μέτρο καταλληλότητας κάθε ατόμου αυξάνει καθώς αυτό εξελίσσεται. Η κεντρική ιδέα είναι ότι η απλή αντικατάσταση της χειρότερης τρέχουσας λύσης, με ταυτόχρονη αναπροσαρμογή των τιμών καταλληλότητας των μελών του υπόλοιπου πληθυσμού, αποδίδει καλύτερα σε σχέση με τη διαδικασία επιλογής που εφαρμόζει ένας τυπικός (παραγωγικός) γενετικός αλγόριθμος.

4.3 Προσεγγίσεις Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων

Οι Parsopoulos and Vrahatis (2002) προτείνουν ένα αλγόριθμο με συνάθροιση όλων των αντικειμενικών σε μία με τρεις διαφορετικούς τρόπους: (1) ένα κοινό γραμμικό συνδυασμό με βάρη – συντελεστές που καθορίζονται κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου, (2) μια δυναμική συνάρτηση συνδυασμού με βάρη που μεταβάλλονται βαθμιαία και (3) μια συνάρτηση όπου τα βάρη μεταβάλλονται με αιφνίδιο τρόπο (bang bang aggregation approach).

Οι Baumgartner et al. (2004) προτείνουν τον διαμοιρασμό των μελών του πληθυσμού σε ισομεγέθεις υποπληθυσμούς σε κάθε ένα από τους οποίους χρησιμοποιείται ένας γραμμικός συνδυασμός των αντικειμενικών συναρτήσεων με διαφορετικά βάρη και εξελίσσεται σύμφωνα με την καλύτερη λύση που προκύπτει σε αυτόν.

Οι Hu and Eberhart (2002 και 2003) εφάρμοσαν ένα αλγόριθμο βελτιστοποίησης μιας αντικειμενικής συνάρτησης κάθε φορά και με τη σειρά που καθορίζει η σημαντικότητα των κριτηρίων.

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

Οι Parsopoulos et al. (2004) εφαρμόζουν παράλληλη βελτιστοποίηση των αντικειμενικών συναρτήσεων σε αντίστοιχο αριθμό πληθυσμών οι οποίοι ανταλλάσσουν πληροφορίες σχετικά με τις καλύτερες λύσεις που εντοπίζονται. Ο αλγόριθμος αυτός ονομάζεται VEPSO και, όπως αναφέρεται, είναι εμπνευσμένος από τον αλγόριθμο VEGA. Σύμφωνα με τους ερευνητές, η διαδικασία αυτή είναι ικανή να οδηγήσει στην εύρεση του μετώπου Pareto.

Οι Chow and Tsui (2004) ανέπτυξαν τον αλγόριθμο “Multi-Species PSO” όπου το πρόβλημα πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων αποσυντίθεται σε πρόβλημα ξεχωριστών αντικειμενικών συναρτήσεων με καθεμιά να αντιστοιχεί και σε ένα σμήνος. Τα γειτονικά σμήνη επικοινωνούν μεταξύ τους αποστέλλοντας τα χαρακτηριστικά των καλύτερων σωματιδίων βελτιώνοντας έτσι την απόδοσή τους.

Οι Moore and Chapman (1997) πρότειναν ένα σχήμα βασισμένο στη θεωρία της κυριαρχίας κατά Pareto. Σε αυτή την προσέγγιση, οι ερευνητές δίνουν έμφαση στη σημασία συνδυασμού των προσωπικών βέλτιστων (personal best) των σωματιδίων με την αναζήτηση του σμήνους. Το προσωπικό βέλτιστο (pbest) ενός σωματιδίου θεωρείται ως η λίστα με όλες τις μη-κυριαρχούμενες λύσεις που έχει εντοπίσει και επιλέγεται ένα pbest διαλέγοντας τυχαία από τη λίστα αυτή.

Οι Fieldsend and Singh (2002) παρουσίασαν μια προσέγγιση κατά την οποία χρησιμοποιείται μια δομή όπου εισάγονται οι μη-κυριαρχούμενες λύσεις και από την οποία επιλέγεται η κοντινότερη σε κάθε σωματίδιο, υπό την έννοια των τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων, ως η καλύτερη λύση (global best) για την εφαρμογή σε αυτό της PSO. Επίσης, για κάθε σωματίδιο αποθηκεύονται ως οι καλύτερες προσωπικές λύσεις οι μη κυριαρχούμενες λύσεις που έχουν βρεθεί από αυτό. Τέλος, χρησιμοποιείται ένας τελεστής στροβιλισμού (turbulence), ο οποίος είναι ουσιαστικά ένας τελεστής μετάλλαξης που επηρεάζει την ταχύτητα της PSO.

Οι Coello et al. (2002 και 2004) πρότειναν ένα μηχανισμό διαχωρισμού του χώρου αναζήτησης σε υπερκύβους με τιμή καταλληλότητας βάσει του πλήθους των σωματιδίων που περιέχει. Έτσι, η επιλογή της βέλτιστης λύσης που ακολουθεί ένα σμήνος γίνεται εφαρμόζοντας το μηχανισμό επιλογής του τροχού της ρουλέτας επιλέγοντας τον υπερκύβο που την περιέχει. Στη συνέχεια, επιλέγεται τυχαία μια λύση εντός του υπερκύβου αυτού.

Οι Toscano and Coello (2004) χρησιμοποιούν την ιδέα της κυριαρχίας ώστε να επηρεάσουν τις κατευθύνσεις των σωματιδίων. Οι ερευνητές χρησιμοποιούν τεχνικές ομαδοποίησης (clustering) ώστε να χωρίσουν το σμήνος σε υποπληθυσμούς υποβοηθώντας, έτσι, τη διασπορά του στο χώρο αναζήτησης.

Ο αλγόριθμος “Particle Swarm Inspired Evolutionary Algorithm” (PS-EA) αναπτύχθηκε από τους Srinivasan and Hou (2003) ως ένα υβριδικό σχήμα αλγορίθμου PSO και εξελικτικού αλγορίθμου, βασιζόμενο στον ανταγωνισμό μεταξύ των τελεστών των δύο μεθόδων. Γίνεται χρήση τελεστών μετάλλαξης και επιλογής βάσει κατάταξης κατά Pareto ώστε ο τελικός πληθυσμός να αντιστοιχεί στο μέτωπο Pareto.

Οι Mostaghim and Teich (2003) προτείνουν μια σιγμοειδή μέθοδο ώστε η καλύτερη λύση για κάθε σωματίδιο να επιλέγεται με τρόπο που να βελτιώνει τη σύγκλιση και τη διασπορά του πληθυσμού. Κάθε σωματίδιο επιλέγει την καλύτερη λύση από το σύνολο των μη-κυριαρχούμενων λύσεων που έχουν εντοπιστεί. Για να αντιμετωπίσουν φαινόμενα ισχυρής επιλεκτικής πίεσης και πρόωρης σύγκλισης, οι ερευνητές πρότειναν τη χρήση ενός τελεστή μετάλλαξης που εφαρμόζεται στο χώρο αναζήτησης. Επεκτείνοντας την παραπάνω εργασία, οι Mostaghim and Teich (2003) ανέπτυξαν τον αλγόριθμο coveringMOPSO (cvMOPSO) που λειτουργεί σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση γίνεται ένας καλός αρχικός προσδιορισμός του μετώπου Pareto χρησιμοποιώντας έναν περιορισμό στο πλήθος των λύσεων του. Στη δεύτερη φάση τα σωματίδια του πληθυσμού διαχωρίζονται σε ομάδες γύρω από κάθε λύση του μετώπου που έχει βρεθεί στην πρώτη φάση. Με αυτό τον τρόπο οι ερευνητές υποστηρίζουν ότι γίνεται καλύτερη εξερεύνηση του μετώπου Pareto αφήνοντας λιγότερα κενά μεταξύ των λύσεων του.

Οι Bartz et al. (2003) προτείνουν την εφαρμογή της PSO με ταυτόχρονη χρήση διαφόρων μεθόδων για την εισαγωγή ή τη διαγραφή λύσεων από το μέτωπο Pareto. Οι μέθοδοι που προτείνουν βασίζονται στη συνεισφορά των σωματιδίων στην αύξηση της ποικιλίας των λύσεων εντός του μετώπου. Επίσης, μέσω στατιστικής ανάλυσης, οι ερευνητές μελετούν την αποτελεσματικότητα των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται από αυτή την προσέγγιση.

Οι βασικοί μηχανισμοί του αλγορίθμου NSGA ενσωματώνονται από την προσέγγιση του Li (2003). Σε κάθε επανάληψη όλα τα μέλη του πληθυσμού μαζί με τα προσωπικά βέλτιστά τους (pbest) συνδυάζονται σε ένα ενιαίο πληθυσμό από τον οποίο προκύπτει το

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

επόμενο σμήνος περιέχοντας τις μη-κυριαρχούμενες λύσεις. Επίσης, η καλύτερη λύση για κάθε σωματίδιο προκύπτει με τυχαίο τρόπο μέσα από το αρχείο των λύσεων Pareto που έχουν βρεθεί.

Οι Reyes and Coello (2005) χρησιμοποιούν δύο διαφορετικά αρχεία αποθήκευσης μη-κυριαρχούμενων λύσεων. Στο ένα εισάγονται όλες οι βέλτιστες λύσεις κατά Pareto, ενώ στο δεύτερο οι λύσεις φιλτράρονται με μηχανισμούς ελέγχου της πυκνότητας στην περιοχή τους και αυτές που τελικά απομένουν επιλέγονται ως οι βέλτιστες λύσεις για τα διάφορα σωματίδια. Επιπλέον, οι συγκεκριμένοι ερευνητές προτείνουν το διαχωρισμό του πληθυσμού σε τρία υποσύνολα στα οποία εφαρμόζονται διαφορετικοί τελεστές μετάλλαξης.

Μέθοδοι επιλογής των βέλτιστων λύσεων των σωματιδίων αποκλειστικά βάσει κυριαρχίας κατά Pareto με χρήση ενός αρχείου λύσεων χωρίς περιορισμούς μεγέθους, προτείνονται από τους Alvarez-Benitez et al. (2005). Στην εργασία τους προτείνονται τρεις διαφορετικές μέθοδοι επιλογής: (1) μια τεχνική συμβολής στην αύξηση της ποικιλομορφίας του μετώπου, (2) μια τεχνική συμβολής στην αύξηση της σύγκλισης στο μέτωπο και (3) μια τεχνική που συνδυάζει τις προηγούμενες δυο μέσω μιας σταθμισμένης στοχαστικής μεθόδου. Σύμφωνα με τους ερευνητές, η τυχαία επιλογή των «ηγετών» του σμήνους συμβάλλει στην καλύτερη και πληρέστερη προσέγγιση του μετώπου Pareto, ενώ χρησιμοποιείται και ένας τελεστής μετάλλαξης ώστε να γίνεται εξερεύνηση στις ακραίες περιοχές του χώρου αναζήτησης, βελτιώνοντας ακόμα περισσότερο τη σύγκλιση.

Οι Ho et al. (2005) προτείνουν διαφοροποιήσεις σχετικά με τον αλγόριθμο PSO. Συγκεκριμένα, προτείνουν την εξάρτηση των τυχαίων συντελεστών r_1 , r_2 , και την εφαρμογή ενός όρου στάθμισης στο δεύτερο και στον τρίτο παράγοντα της βασικής εξίσωσης της PSO. Επίσης, θεωρούν ότι ο πρώτος όρος της εξίσωσης πρέπει να είναι αρνητικός με πιθανότητα 50% επιτρέποντας στο σωματίδιο να κινείται συχνά προς τα πίσω. Για το λόγο αυτό εισάγουν και ένα τελεστή μετάλλαξης ο οποίος εφαρμόζεται στο διάνυσμα ταχύτητας. Τέλος, προτείνεται η αποθήκευση όλων των μη-κυριαρχούμενων λύσεων ανά σωματίδιο.

Όπως και σε προηγούμενη προσέγγιση, οι Raquel and Naval (2005) προτείνουν τη χρήση συνάρτησης πυκνότητας πληθυσμού για τη διαγραφή λύσεων από το αρχείο Pareto και για την επιλογή της ολικά καλύτερης για κάθε σωματίδιο. Το σύνολο των λύσεων Pareto ταξινομείται κατά φθίνουσα σειρά βάσει πυκνότητας και η καλύτερη λύση επιλέγεται τυχαία

από την κορυφή του συνόλου. Όταν το πλήθος των λύσεων Pareto υπερβεί ένα όριο τότε διαγράφονται λύσεις από τη βάση του συνόλου.

Οι Janson and Merkle (2005) ανέπτυξαν το αλγόριθμο clustMPSO ο οποίος συνδυάζει τεχνικές clustering με αλγορίθμους PSO. Ο πληθυσμός διαχωρίζεται σε υποσύνολα με ξεχωριστά μέτωπα Pareto ενώ το ολικό μέτωπο ορίζεται ως η ένωση των επιμέρους μετώπων. Ένα υποσύνολο θεωρείται ότι κυριαρχείται αν καμία λύση του δεν ανήκει στο ολικό μέτωπο. Σε αυτή την περίπτωση το συγκεκριμένο υποσύνολο αρχικοποιείται ξανά. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε ένα πραγματικό πρόβλημα πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων βιοχημείας.

Οι Zhang et al. (2003) προσεγγίζουν την βελτιστοποίηση πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων εστιάζοντας στην ποιότητα επιλογής των pbest και gbest. Συγκεκριμένα για κάθε αντικειμενική συνάρτηση διατηρείται και μια gbest λύση ενώ για κάθε σωματίδιο και κάθε αντικειμενική συνάρτηση διατηρείται και μια pbest λύση. Η ολικά καλύτερη λύση του αλγορίθμου PSO επιλέγεται ως ο μέσος όρος όλων των gbest λύσεων, ενώ για το pbest του αλγορίθμου PSO επιλέγεται είτε μια από τις αντίστοιχες λύσεις τυχαία είτε ο μέσος όρος τους.

4.4 Ο προτεινόμενος αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων

Στην παράγραφο αυτή προτείνεται μια εκδοχή του αλγορίθμου PSO με σκοπό την επίλυση του προβλήματος πολλαπλών συναρτήσεων της εργασίας. Ο αλγόριθμος που προτείνεται ξεκινάει με την αρχικοποίηση του πληθυσμού, όπως ακριβώς γίνεται και στην κλασσική μέθοδο PSO. Στη συνέχεια εφαρμόζεται ο αλγόριθμος διόρθωσης του πληθυσμού, ο οποίος, όπως και στην PSO ενός κριτηρίου, ελέγχει τον πληθυσμό για πιθανές παραβιάσεις των περιορισμών του προβλήματος και αν υπάρχουν τις διορθώνει. Μετά τη διόρθωση του σμήνους αξιολογούνται όλα τα μέλη του ξεχωριστά για κάθε αντικειμενική συνάρτηση και αποθηκεύεται η αντίστοιχη τιμή, ενώ προκύπτει και μια ολικά βέλτιστη λύση $gbest_k$ για κάθε αντικειμενική συνάρτηση k . Στη συνέχεια αρχικοποιείται το διάνυσμα $pbest_k$ για κάθε αντικειμενική συνάρτηση, το διάνυσμα $vmax$ με τις μέγιστες επιτρεπτές τιμές ταχυτήτων για

κάθε μεταβλητή απόφασης και ακολουθεί η αρχικοποίηση του συνόλου των Pareto λύσεων. Η αρχικοποίηση του συνόλου αυτή γίνεται με την εισαγωγή όλων των λύσεων του αρχικού πληθυσμού σε αυτό και με τη διαγραφή, έπειτα, όσων από αυτές κυριαρχούνται από άλλες λύσεις του συνόλου. Οι διαγραφές των λύσεων γίνονται αφού το σύνολο ταξινομείται ως προς μια από τις αντικειμενικές συναρτήσεις και στη συνέχεια εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος ελέγχου της κυριαρχίας των λύσεων. Με τον τρόπο αυτό στο αρχικό σύνολο των Pareto λύσεων θα υπάρχουν όλες οι μη-κυριαρχούμενες λύσεις του αρχικού πληθυσμού και μόνο αυτές. Αφού ολοκληρωθούν όλες οι παραπάνω διαδικασίες ακολουθεί η εφαρμογή της επαναληπτικής διαδικασίας του αλγορίθμου PSO, όπου σε κάθε επανάληψη ακολουθούνται τα εξής τα βήματα: Αρχικά, εφαρμόζεται το σχήμα πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων PSO το οποίο μπορεί να είναι παραλλαγή είτε της απλής μεθόδου PSO (M-PSO), είτε της inertia PSO (M-iPSO), είτε της CPSO (M-CPSO). Οι αντίστοιχες σχέσεις είναι οι εξής:

$$v_{i+1}(j) = v_i(j) + c_1 \cdot r_{1,i}(j) \cdot \frac{\sum_k pbest_k(j) - x_i(j)}{k} + c_2 \cdot r_{2,i}(j) \cdot \frac{\sum_k gbest_k(j) - x_i(j)}{k} \quad (4.1)$$

$$v_{i+1}(j) = w \cdot v_i(j) + c_1 \cdot r_{1,i}(j) \cdot \frac{\sum_k pbest_k(j) - x_i(j)}{k} + c_2 \cdot r_{2,i}(j) \cdot \frac{\sum_k gbest_k(j) - x_i(j)}{k} \quad (4.2)$$

$$v_{i+1}(j) = \chi \cdot \left[v_i(j) + c_1 \cdot r_{1,i}(j) \cdot \frac{\sum_k pbest_k(j) - x_i(j)}{k} + c_2 \cdot r_{2,i}(j) \cdot \frac{\sum_k gbest_k(j) - x_i(j)}{k} \right] \quad (4.3)$$

όπου i είναι ο αριθμός της τρέχουσας επανάληψης, j είναι ο αριθμός της μεταβλητής του διανύσματος βελτιστοποίησης (1^{η} , 2^{η} κ.ο.κ), $pbest_k(j)$ είναι η τιμή της μεταβλητής j της καλύτερης λύσης που έχει επιτύχει το συγκεκριμένο σωματίδιο μέχρι την επανάληψη i για την αντικειμενική συνάρτηση k , $gbest_k(j)$ είναι η τιμή της μεταβλητής j της καλύτερης λύσης που έχει εντοπιστεί από ολόκληρο τον πληθυσμό μέχρι την επανάληψη i για την αντικειμενική συνάρτηση k , $r_{1,i}$ και $r_{2,i}$ είναι μεταβλητές που δημιουργούνται τυχαία στο διάστημα $[0,1]$ σε κάθε εφαρμογή του αλγορίθμου PSO, $x_i(j)$ είναι η τιμή της μεταβλητής j κατά την επανάληψη i , $v_i(j)$ είναι η ταχύτητα της μεταβλητής j κατά την επανάληψη i , c_1 και c_2 σταθερές μεταβλητές με τιμή, συνήθως, ίση με 2, $r_{1,i}$ και $r_{2,i}$ είναι μεταβλητές που δημιουργούνται τυχαία στο διάστημα $[0,1]$ σε κάθε εφαρμογή του αλγορίθμου PSO, w ο συντελεστής αδράνειας (inertia weight) της inertia PSO και χ ο συντελεστής περιορισμού (Εξ.

(3.16)) της CPSO. Τα νέα μέλη προκύπτουν με την εφαρμογή της Εξ. (3.13). Μια εναλλακτική μέθοδος PSO πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων που αναπτύχθηκε και προτείνεται στην παρούσα εργασία σχετίζεται με τη χρήση των λύσεων Pareto που προκύπτουν κατά τη διάρκεια εφαρμογής της. Συγκεκριμένα, η διαφοροποίηση σε σχέση με τη μέθοδο που περιγράφηκε παραπάνω έγκειται στην επιλογή των τιμών της τρίτης συνιστώσας του αλγορίθμου PSO, δηλαδή στην επιλογή του $gbest$. Έτσι, στη θέση του $gbest$ προτείνεται η χρήση των τιμών ενός τυχαία επιλεγόμενου μέλους του υπάρχοντος συνόλου Pareto κάθε φορά. Συνεπώς, κάθε φορά που εφαρμόζεται ο προτεινόμενος αλγόριθμος επιλέγεται τυχαία μια λύση $gbest_r$ του συνόλου Pareto από την οποία προκύπτουν οι αντίστοιχες μεταβλητές απόφασης, $gbest_r(j)$. Στη συνέχεια εφαρμόζεται το σχήμα PSO πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων το οποίο μπορεί να είναι παραλλαγή είτε της απλής μεθόδου PSO (MP-PSO), είτε της inertia PSO (MP-iPSO), είτε της CPSO (MP-CPSO). Οι αντίστοιχες σχέσεις είναι οι εξής:

$$v_{i+1}(j) = v_i(j) + c_1 \cdot r_{1,i}(j) \cdot \frac{\sum_k pbest_k(j) - x_i(j)}{k} + c_2 \cdot r_{2,i}(j) \cdot gbest_r(j) - x_i(j) \quad (4.4)$$

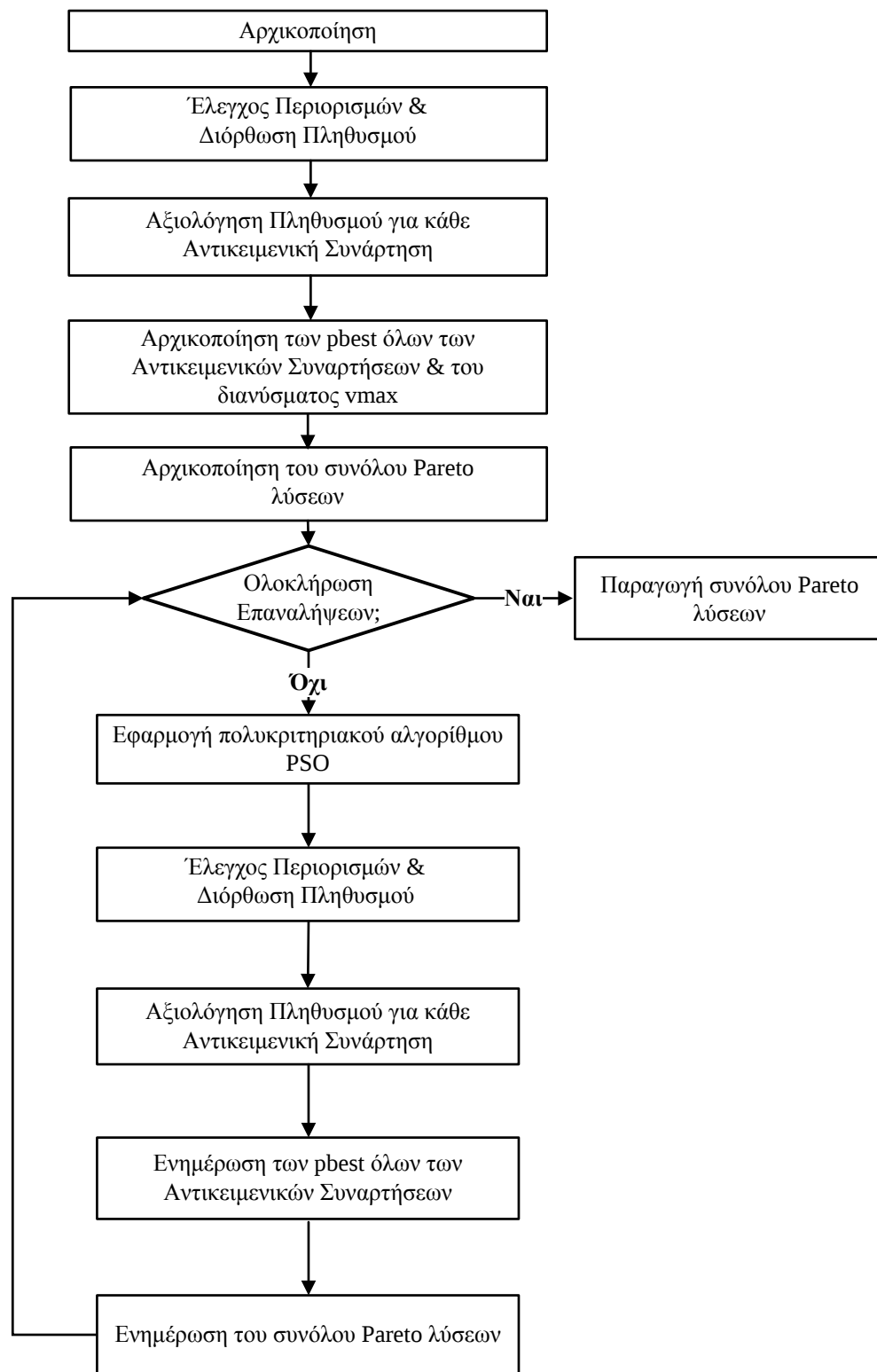
$$v_{i+1}(j) = w \cdot v_i(j) + c_1 \cdot r_{1,i}(j) \cdot \frac{\sum_k pbest_k(j) - x_i(j)}{k} + c_2 \cdot r_{2,i}(j) \cdot gbest_r(j) - x_i(j) \quad (4.5)$$

$$v_{i+1}(j) = \chi \cdot \left[v_i(j) + c_1 \cdot r_{1,i}(j) \cdot \frac{\sum_k pbest_k(j) - x_i(j)}{k} + c_2 \cdot r_{2,i}(j) \cdot gbest_r(j) - x_i(j) \right] \quad (4.6)$$

Μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου PSO πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος διόρθωσης, αξιολογούνται τα μέλη του πληθυσμού για κάθε αντικειμενική συνάρτηση και ενημερώνονται τα διανύσματα $pbest_k$. Στο τέλος της κάθε επανάληψης εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος ενημέρωσης του συνόλου των Pareto λύσεων, ο οποίος εισάγει νέες μη κυριαρχούμενες που μπορεί να προκύπτουν ή διαγράφει λύσεις από τις ήδη υπάρχουσες αν βρεθούν άλλες που κυριαρχούν επί αυτών. Η συγκεκριμένη διαδικασία ακολουθείται για ένα συγκεκριμένο προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων. Πρέπει να τονιστεί ότι το σύνολο των Pareto λύσεων είναι ξεχωριστό από το σύνολο των μελών του εκάστοτε πληθυσμού, το οποίο διατηρεί σταθερό μέγεθος σε αντίθεση με το πρώτο σύνολο το οποίο έχει μέγεθος ίσο με το πλήθος των μη-κυριαρχούμενων λύσεων που έχουν εντοπιστεί.

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται ένα γενικό διάγραμμα ροής της εκδοχής της μεθόδου PSO πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων που προτείνεται.



Σχήμα 4.3: Γενικό διάγραμμα ροής της εκδοχής της μεθόδου PSO πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων που προτείνεται.

4.5 Προσεγγίσεις βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων χρησιμοποιώντας Διαφορική Εξέλιξη

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυριότερες μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων με χρήση αλγορίθμων οι οποίοι βασίζονται σε μεθόδους Διαφορικής Εξέλιξης.

Οι Chang et al. (1999) εφάρμοσαν διαφορική εξέλιξη για την επίλυση ενός προβλήματος αυτόματης λειτουργίας τραινών, πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο DE/Rand/1. Η διαφοροποίηση του εν λόγω αλγορίθμου έγκειται στον τελεστή επιλογής και συγκεκριμένα στην τροποποίησή του ώστε τα μέλη της νέας γενιάς να είναι μη-κυριαρχούμενα, ελέγχοντας ταυτόχρονα και τις αποστάσεις τους από τις προηγούμενες εντοπισμένες μη-κυριαρχούμενες λύσεις ώστε να απέχουν κατά ένα όριο τουλάχιστον.

Οι Abbass et al. (2001a, 2002a και 2002b) ανέπτυξαν τον Pareto Differential Evolution (PDE) αλγόριθμο. Ο αρχικός πληθυσμός δημιουργείται με χρήση μιας Gaussian κατανομής και τελικώς απομένουν σε αυτόν μόνο οι κυρίαρχες λύσεις. Επιλέγονται τρεις πατρικές λύσεις για τη δημιουργία ενός απογόνου, ο οποίος εισάγεται στον πληθυσμό μόνο αν δεν κυριαρχείται από τη βασική πατρική λύση. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται για τη δημιουργία ολόκληρου του πληθυσμού, ενώ αν οι λύσεις που είναι κυρίαρχες ξεπεράσουν ένα συγκεκριμένο όριο, εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος ελέγχου πυκνότητας ο οποίος αφαιρεί κοντινές λύσεις. Στην προσέγγιση αυτή η παράμετρος F του αλγορίθμου DE επιλέγεται μέσω μιας Gaussian κατανομής στο (0,1).

Οι Abbass et al. (2001b) προτείνουν μια νεότερη εκδοχή του PDE που καλείται Self-adaptive Pareto Differential Evolution (SPDE). Σε αυτό τον αλγόριθμο οι ρυθμοί διασταύρωσης και μετάλλαξης αυτοπροσαρμόζονται.

Οι Abbass et al. (2001c) πρότειναν, επίσης, ένα αλγόριθμο συνδυασμού Διαφορικής Εξέλιξης και Νευρωνικών Δικτύων. Ο εν λόγω αλγόριθμος καλείται Memetic Pareto Artificial Neural Networks (MPANN). Σε αυτή την εκδοχή ο PDE συνεργάζεται με ένα αλγόριθμο Back-Propagation για την επίτευξη καλύτερης σύγκλισης.

Οι Kukkonen and Lampinen (2004) ανέπτυξαν τον αλγόριθμο Generalized Differential Evolution (GDE) για την επίλυση προβλημάτων πολλαπλών αντικειμενικών

συναρτήσεων όπου η έννοια της κυριαρχίας εισάγεται κατά την επιλογή εισαγωγής ενός δοκιμαστικού μέλους στον πληθυσμό. Οι ίδιοι συγγραφείς ανέπτυξαν τον GDE2 εισάγοντας μια συνάρτηση ελέγχου πυκνότητας στην περίπτωση που το προηγούμενο και το νέο μέλος είναι μη-κυριαρχούμενα μέλη, οπότε επιλέγεται αυτό με τα λιγότερα μέλη κοντά του.

Ο αλγόριθμος ε-MyDE προτάθηκε από τους Santana-Quintero and Coello (2005). Ο αλγόριθμος αυτός δεν επιτρέπει τη συνύπαρξη στο μέτωπο Pareto δύο κυρίαρχων λύσεων για τις οποίες υπάρχει μια διαφορά μικρότερη από ένα κατώφλι ϵ_i στο αντικειμενικό κριτήριο i . Με αυτό τον τρόπο υποστηρίζουν ότι υπάρχει καλύτερη διασπορά του πληθυσμού στο μέτωπο.

Οι Xue et al. (2003 και 2004) πρότειναν τον αλγόριθμο Multi-Objective Differential Evolution (MODE) όπου αν το δοκιμαστικό μέλος είναι κυριαρχούμενο τότε αντικαθίσταται με μια από τις λύσεις Pareto που έχουν εντοπιστεί, διαφορετικά εισάγεται στον πληθυσμό. Επίσης, οι ερευνητές χρησιμοποιούν αλγορίθμους ελέγχου πυκνότητας του πληθυσμού ώστε να υπάρχει καλύτερη διασπορά μελών στο μέτωπο Pareto.

Οι Iorio and Li (2004) ανέπτυξαν τον αλγόριθμο Nondominated Sorting Differential Evolution (NSDE). Ο αλγόριθμος αυτός είναι μια απλή τροποποίηση του αλγορίθμου NSGA αντικαθιστώντας, απλά, τους γενετικούς τελεστές με τους αντίστοιχους της Διαφορικής Εξέλιξης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο NSDE έχει καλύτερη απόδοση γενικώς από τον NSGA.

Οι Robic and Filipic (2005) πρότειναν τον αλγόριθμο Differential Evolution for Multiobjective Optimization (DEMO) ο οποίος επίσης βασίζεται στην έννοια της κυριαρχίας Pareto. Όταν το δοκιμαστικό μέλος κυριαρχεί επί του πατρικού τότε το αντικαθιστά, ενώ διαφορετικά απορρίπτεται. Προκειμένου να υπάρξει ταχεία και ορθή σύγκλιση στο μέτωπο Pareto εφαρμόζεται ένας μηχανισμός μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης ώστε να διαγραφούν κάποια μέλη του πληθυσμού και το μέγεθός του να παραμένει σταθερό σε κάθε επανάληψη.

4.6 Ο προτεινόμενος αλγόριθμος Διαφορικής Εξέλιξης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων

Στην παρούσα εργασία προτείνεται επίσης ένα σχήμα της μεθόδου Διαφορικής Εξέλιξης για τη βελτιστοποίηση πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων. Ο αλγόριθμος που προτείνεται ξεκινάει με την αρχικοποίηση του πληθυσμού, όπως ακριβώς γίνεται και στην κλασσική μέθοδο Διαφορικής Εξέλιξης. Στη συνέχεια εφαρμόζεται ο αλγόριθμος διόρθωσης του πληθυσμού, ο οποίος ελέγχει τον πληθυσμό για παραβιάσεις των περιορισμών του προβλήματος και αν υπάρχουν τις διορθώνει. Μετά τη διόρθωση του πληθυσμού αξιολογούνται όλα τα μέλη του ξεχωριστά για κάθε αντικειμενική συνάρτηση και αποθηκεύεται η αντίστοιχη τιμή. Στη συνέχεια ακολουθεί η αρχικοποίηση του συνόλου των Pareto λύσεων. Η αρχικοποίηση του συνόλου γίνεται με την εισαγωγή όλων των λύσεων του αρχικού πληθυσμού σε αυτό και έπειτα με τη διαγραφή όσων από αυτές κυριαρχούνται από άλλες λύσεις του συνόλου. Η διαγραφή των λύσεων γίνεται αφού το σύνολο έχει πρώτα ταξινομηθεί ως προς μια από τις αντικειμενικές και στη συνέχεια εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος ελέγχου της κυριαρχίας των λύσεων. Με τον τρόπο αυτό στο αρχικό σύνολο των Pareto λύσεων θα υπάρχουν όλες οι μη-κυριαρχούμενες λύσεις του αρχικού πληθυσμού. Αφού ολοκληρωθούν όλες οι παραπάνω διαδικασίες ακολουθεί η εφαρμογή της επαναληπτικής διαδικασίας του αλγορίθμου Διαφορικής Εξέλιξης, όπου σε κάθε επανάληψη ακολουθούνται τα εξής τα βήματα: Αρχικά, εφαρμόζεται το σχήμα Διαφορικής Εξέλιξης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων το οποίο μπορεί να είναι παραλλαγή των τεσσάρων βασικών μεθόδων που παρουσιάστηκαν στο 3^ο κεφάλαιο, και είναι τα σχήματα M-DErand1, M-DErand2, M-DEbest1 και M-DEbest2 βασισμένα στις μεθόδους DE/Rand/1, DE/Rand/2, DE/Best/1 και DE/Best/2, αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες σχέσεις για τη δημιουργία των προσωρινών μελών (trial individuals) είναι:

$$xt_{j,k} = \begin{cases} x_{j,r_3} + F \cdot x_{j,r_1} - x_{j,r_2} & \text{αν } \text{rand}[0,1) < Cr \vee Rnd = j \\ x_{j,k} & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.7)$$

$$xt_{j,k} = \begin{cases} x_{j,r_5} + F \cdot x_{j,r_1} + x_{j,r_2} - x_{j,r_3} - x_{j,r_4} & \text{αν } \text{rand}[0,1) < Cr \vee Rnd = j \\ x_{j,k} & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.8)$$

$$xt_{j,k} = \begin{cases} gbest_r(j) + F \cdot x_{j,r_1} - x_{j,r_2} & \text{αν } \text{rand}[0,1) < Cr \vee Rnd = j \\ x_{j,k} & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.9)$$

$$xt_{j,k} = \begin{cases} gbest_r(j) + F \cdot x_{j,r_1} + x_{j,r_2} - x_{j,r_3} - x_{j,r_4} & \text{αν } rand[0,1) < Cr \vee Rnd = j \\ x_{j,k} & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.10)$$

όπου: $r_{1,2,3,4,5} \in [1, N]$, $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq r_4 \neq r_5 \neq k$, 5 μέλη του υπάρχοντος πληθυσμού επιλεγμένα με τυχαίο τρόπο ώστε να είναι μεταξύ τους διαφορετικά όπως επίσης διαφορετικά και από το τρέχον μέλος, k , NP το μέγεθος του πληθυσμού, xt είναι το διάνυσμα των προσωρινών – δοκιμαστικών μελών, j είναι ο αριθμός της μεταβλητής του διανύσματος βελτιστοποίησης ($1^{\text{η}}, 2^{\text{η}}$ κ.ο.κ), $x_{j,k}$ είναι η τιμή του μέλους k για τη μεταβλητή j στον υπάρχοντα πληθυσμό, F είναι ο συντελεστής μετάλλαξης (differentiation constant), Cr είναι ο συντελεστής διασταύρωσης (crossover constant), $rand[0,1)$ είναι ένας τυχαίος αριθμός στο διάστημα $[0,1)$, Rnd είναι μια τυχαία μεταβλητή στο διάστημα $[1, Dx]$ όπου Dx είναι το πλήθος των μεταβλητών απόφασης του προβλήματος βελτιστοποίησης και $gbest_j$ η τιμή ενός τυχαίου επιλεγμένου μέλους του συνόλου Pareto για τη μεταβλητή j . Στην περίπτωση των μεθόδων M-DEbest1 και M-DEbest2, κάθε φορά που εφαρμόζεται ο προτεινόμενος αλγόριθμος επιλέγεται τυχαία μια λύση $gbest_r$ του συνόλου Pareto από την οποία προκύπτουν οι αντίστοιχες μεταβλητές απόφασης, $gbest_r(j)$. Οι μεταβλητές $rand[0,1)$ και Rnd δημιουργούνται εκ νέου σε κάθε εφαρμογή του αλγορίθμου για κάθε επανάληψη, μέλος και μεταβλητή του προβλήματος. Αφού, προκύψει ο δοκιμαστικός πληθυσμός, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος διόρθωσης σε αυτόν για τη διόρθωση των λύσεων που παραβιάζουν τους περιορισμούς του προβλήματος.

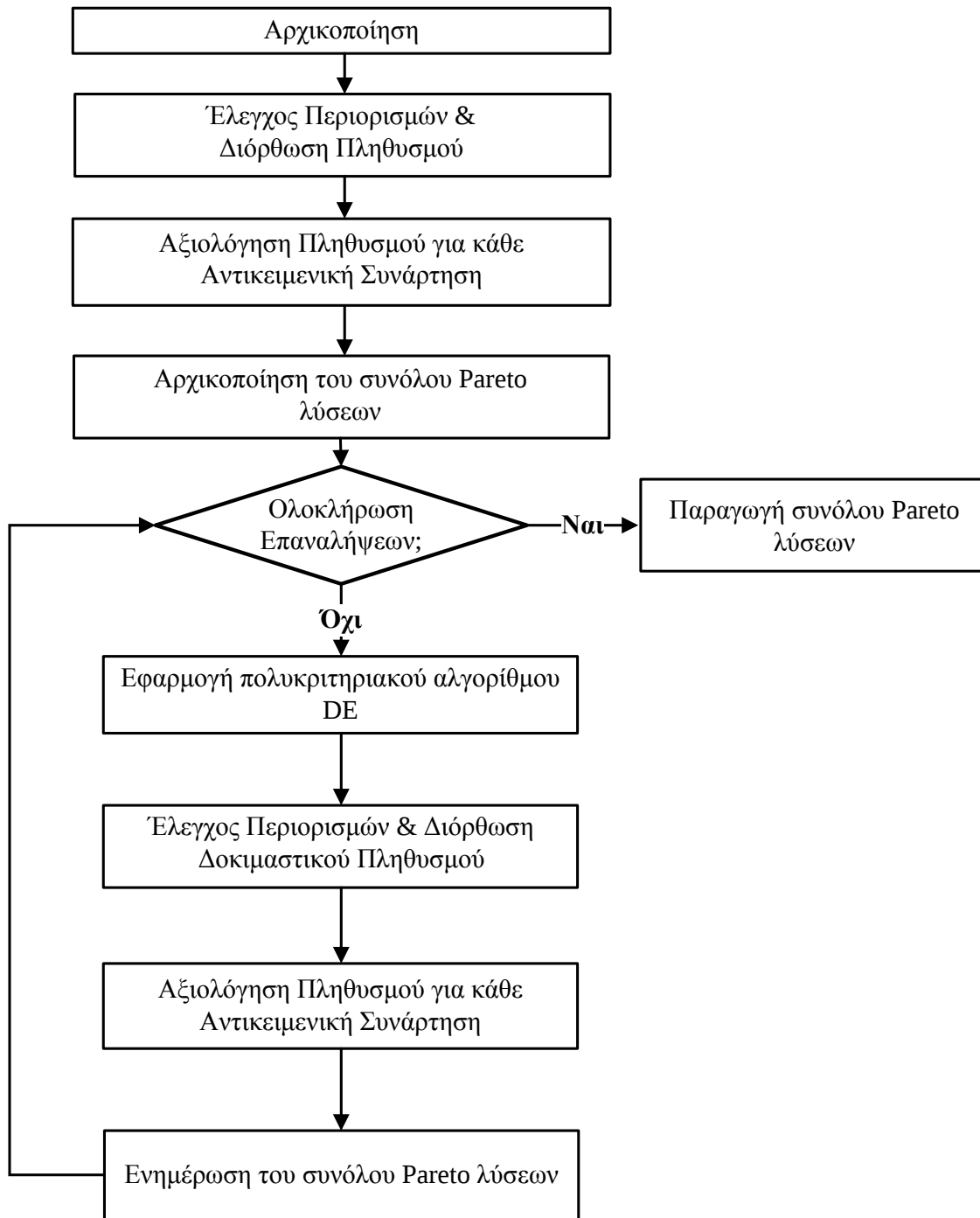
Τελικά, η καινούρια δοκιμαστική λύση εισάγεται στον νέο πληθυσμό μόνο αν κυριαρχεί της ήδη υπάρχουσας, όπως ακολουθεί:

$$x_{j,k} = \begin{cases} xt_{j,k} & \text{αν } xt_k \succ x_k \text{ ή } xt_k \sim x_k \\ x_{j,k} & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.11)$$

όπου x_s είναι η ήδη υπάρχουσα λύση.

Μετά τη δημιουργία του νέου πληθυσμού και την εφαρμογή του αλγορίθμου διόρθωσης, εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος ενημέρωσης του συνόλου των Pareto λύσεων, ο οποίος εισάγει νέες μη κυριαρχούμενες που μπορεί να προκύπτουν ή διαγράφει λύσεις από τις ήδη υπάρχουσες αν βρεθούν άλλες που κυριαρχούν επί αυτών, ενώ η συγκεκριμένη διαδικασία ακολουθείται μέχρι να ολοκληρωθεί ένας προκαθορισμένος αριθμός

επαναλήψεων. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται ένα γενικό διάγραμμα ροής της εκδοχής της Διαφορικής Εξέλιξης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων που προτείνεται.



Σχήμα 4.4: Γενικό διάγραμμα ροής της εκδοχής της Διαφορικής Εξέλιξης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων που προτείνεται.

5. ΜΕΘΟΔΟΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση του κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment, LCA) ενός ενεργειακού συστήματος Φ/Β στοιχείων περιλαμβάνει την ανάλυση των οικονομικών και των περιβαλλοντικών οφελών από τη λειτουργία του. Η οικονομική ανάλυση της βιωσιμότητας της επένδυσης στα συστήματα που μελετώνται βασίζεται σε τρεις από τις πλέον καθιερωμένες διεθνώς μεθόδους. Συγκεκριμένα βασίζεται στον προσδιορισμό της Καθαρής Παρούσας Αξίας (Net Present Value, NPV), του σύνθετου χρόνου απόσβεσης (Pay-Back Time, PBT) και του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (Internal Rate of Return, IRR) της επένδυσης. Τα περιβαλλοντικά οφέλη αξιολογούνται με χρήση ενός δείκτη μείωσης των εκπομπών αερίων λόγω της χρήσης του συστήματος ΑΠΕ. Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται ο τρόπος υπολογισμού των παραπάνω μεγεθών, αφού πρώτα οριστούν κάποιες οικονομικές παράμετροι και ο τρόπος που επηρεάζουν τους διάφορους υπολογισμούς.

5.2 Οικονομικές παράμετροι

Για την περιγραφή των μεθόδων οικονομικής αξιολόγησης μιας επένδυσης απαιτείται η ανάλυση κάποιων σημαντικών παραμέτρων [87]:

Ο χρονικός ορίζοντας επένδυσης ταυτίζεται με το χρόνο ζωής των Φ/Β πλαισίων και είναι συνήθως από 20 έως 30 χρόνια, ενώ πέρα από αυτόν οι κατασκευαστές δεν εγγυώνται την ορθή λειτουργία των συσκευών. Αντιθέτως, για τους μετατροπείς ισχύος ορίζεται ένας μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών που κυμαίνεται γύρω στα 25 χρόνια (219000 ώρες λειτουργίας). Συνεπώς ο χρονικός ορίζοντας της αξιολόγησης της επένδυσης δε μπορεί να υπερβαίνει το όριο ζωής των συσκευών του συστήματος.

Ένα μέγεθος που επηρεάζει σημαντικά την παρούσα ανάλυση είναι ο πληθωρισμός g (%). Πληθωρισμός ονομάζεται 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 στη συμπεριφορά των οικονομικών δεικτών κατά τη διάρκεια της παρούσας ανάλυσης ο μέσος ετήσιος πληθωρισμός επιλέγεται ίσος με 4%. Εξίσου σημαντική παράμετρος είναι και το ετήσιο προεξοφλητικό επιτόκιο (ή επιτόκιο αναγωγής ή το κόστος ευκαιρίας), *i*. Χρησιμοποιώντας το επιτόκιο αυτό, ανάγουμε τις μελλοντικές καθαρές ταμειακές ροές σε σημερινές αξίες ώστε να είναι συγκρίσιμες με το κόστος εγκατάστασης που εκφράζεται σε σημερινές τιμές και αντίστροφα. Ο υπολογισμός του επιτοκίου προεξοφλησης είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό της καθαρής παρούσας αξίας. Ο υπολογισμός αυτής της παραμέτρου είναι σχετικά σύνθετος λόγω της ιδιότητας του χρήματος να μην διατηρεί σταθερή την αξία του. Για αυτό το λόγο η παρούσα αξία μίας καθυστερημένης απολαβής μπορεί να βρεθεί πολλαπλασιάζοντας την απολαβή με έναν προεξοφλητικό παράγοντα ο οποίος είναι μικρότερος του 1. Όμοια η παρούσα αξία μίας μελλοντικής απολαβής μπορεί να βρεθεί πολλαπλασιάζοντας την απολαβή με τον ίδιο προεξοφλητικό παράγοντα προσθέτοντας επιπλέον την αξία της απολαβής. Για να υπολογίσουμε την καθαρά παρούσα αξία, προεξοφλούμε τις προσδοκώμενες απολαβές στην αναλογία της προσφερόμενης επιστροφής από ισοδύναμες εναλλακτικές της επένδυσης στην κεφαλαιαγορά. Αυτή η αναλογία επιστροφής συχνά αναφέρεται ως προεξοφλητικό επιτόκιο ή κόστος ευκαιρίας του κεφαλαίου και υπολογίζεται ως ο αριθμητικός μέσος όρος των σταθερών επιτοκίων που μπορεί να δώσει το σύνολο των τραπεζών. Χρησιμοποιώντας το κόστος ευκαιρίας, ανάγουμε τις μελλοντικές καθαρές ταμειακές ροές σε σημερινές αξίες ώστε να είναι συγκρίσιμες με το κόστος εγκατάστασης που εκφράζεται σε σημερινές τιμές και αντίστροφα.

Τα συστήματα παραγωγής ενέργειας που μελετώνται αποτελούν εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τέτοιου είδους εφαρμογές, λόγω της ωφελιμότητάς τους ως προς το περιβάλλον, τυγχάνουν επιδότησης όπως ορίζεται στο ισχύον νομικό πλαίσιο.

Βάσει των θεσμικών πλαισίων των περισσότερων χωρών τα καθαρά κέρδη των ανανεώσιμων συστημάτων από την πώληση της παραγόμενης ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο φορολογούνται.

Η μέθοδος της παρούσας αξίας μετατρέπει το σύνολο των χρηματοροών που αναμένεται να εμφανιστούν σε ένα χρονικό ορίζοντα σε μια μοναδική παρούσα αξία σε σταθερό χρόνο μηδέν. Αυτό το χρηματικό ποσό αναφέρεται ως παρούσα αξία. Φυσικά, αυτό μπορεί να γίνει μόνο βάσει κάποιας υπόθεσης εργασίας για το προεξοφλητικό επιτόκιο *i*. Με

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

αυτήν την προσέγγιση εάν σήμερα επενδυθεί ποσό P , το άθροισμα κεφαλαίου και τόκων (γενικότερα, απόδοσης κεφαλαίου) μετά από n έτη θα είναι:

$$F = P \cdot (1 + i)^n \quad (5.1)$$

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

$$P = \frac{F}{(1 + i)^n} \quad (5.2)$$

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:

$$P = \sum_{t=1}^n P_t = A \cdot PWF \quad (5.3)$$

όπου A το ποσό της πρώτης πληρωμής και PWF ο συντελεστής παρούσας αξίας (Present Worth Factor) που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$PWF = \sum_{t=1}^n \frac{(1 + g)^{t-1}}{(1 + i)^t} = \frac{1 - \left(\frac{1 + g}{1 + i} \right)^n}{i - g} \quad (5.4)$$

Καθαρή παρούσα αξία (Net Present Value, NPV) 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 περίπτωση μας προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$NPV = \frac{R_n - IC_n - FC_n}{(1 + i)^n} \quad (5.5)$$

όπου IC_0 το αρχικά επενδεδυμένο 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_0 , FC_n και R_n περιγράφεται στο 7^ο κεφάλαιο.

5.3 Ο χρόνος απόσβεσης

Ο χρόνος απόσβεσης (payback period), PBT, 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:

$$NPV = 0, \text{ για } n = PBT \quad (5.6)$$

Συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία επιλέγεται το μεγαλύτερο δυνατό PBT, δηλαδή η τελευταία φορά στα n χρόνια της μελέτης που ισχύει η Εξ. (5.6). Αυτό γίνεται επειδή είναι δυνατόν, π.χ. λόγω επισκευής των συσκευών και συνεπώς λόγω μεγάλης αύξησης των συνολικών εξόδων σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή μεταγενέστερη ενός χρονικού σημείου PBT, να προκύπτουν περισσότερα του ενός σημεία PBT για τα οποία ισχύει η Εξ. (5.6). Επίσης, στην παρούσα εργασία ο χρόνος απόσβεσης υπολογίζεται με ακρίβεια ενός δεκάτου του έτους.

5.4 Ο εσωτερικός βαθμός 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:

$$NPV = 0, \text{ για } i = IRR \quad (5.7)$$

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.

5.5 Μέθοδος προσδιορισμού του μεγέθους μείωσης των εκπομπών αερίων

Σύμφωνα με την Ανάλυση του Κύκλου Ζωής ενός συστήματος ΑΠΕ, τα περιβαλλοντικά οφέλη από τη λειτουργία του μπορούν να εκφραστούν ως το σύνολο των εκπομπών των αερίων που αποφεύγονται εξαιτίας της χρήσης του [84]. Το μέγεθος αυτό θεωρείται ίσο με τις εκπομπές αερίων που θα εκλυόταν από μια συμβατική πηγή ενέργειας για την παραγωγή του συνόλου της ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από το σύστημα ΑΠΕ αφαιρούμενων των εκπομπών του ίδιου του συστήματος ΑΠΕ κατά την παραγωγή αυτού του ενεργειακού ποσού και αφαιρουμένων των συνολικών εκπομπών κατά την κατασκευή και εγκατάσταση των δομικών στοιχείων του συστήματος. Έτσι, το σύνολο των αποφυγόμενων εκπομπών αερίων, E_B (kg), για ένα σύστημα Φ/Β πλαισίων μπορεί να εκφραστεί με βάση τη σχέση:

$$E_B = n \cdot E_a \cdot (f_{conv} - f_{pv}) - P_{peak} \cdot f_{prod} \quad (5.8)$$

όπου n ο χρονικός ορίζοντας του συστήματος σε έτη, E_a η ετήσια παραγωγή ενέργειας του συστήματος (KWh / έτος), f_{conv} ο παράγοντας που περιγράφει τις εκπομπές αερίων μιας συμβατικής πηγής ανά μονάδα ενέργειας (kg/ KWh), f_{pv} ο παράγοντας που περιγράφει τις εκπομπές αερίων ενός συστήματος Φ/Β πλαισίων ανά μονάδα ενέργειας (kg/ KWh), P_{peak} η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος (KWp) και f_{prod} ο παράγοντας που περιγράφει τις συνολικές εκπομπές αερίων για την κατασκευή ενός συστήματος Φ/Β πλαισίων ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος (kg/ KWp). Γενικότερα ισχύει ότι $f_{pv} \ll f_{conv}$.

Τα κυριότερα αέρια του θερμοκηπίου είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το διοξείδιο του θείου (SO_2) και τα οξείδια του αζώτου (NO_x) τα οποία ευθύνονται για το φαινόμενο της όξινης βροχής. Η αύξηση των εκπομπών τους από ένα ενεργειακό σύστημα θεωρείται γενικότερα ανάλογη της αύξησης της ενεργειακής παραγωγής. Συνεπώς, στην Εξ. (5.8) μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι αντίστοιχες τιμές για τους παράγοντες f_{conv} , f_{pv} και

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

f_{prod} για κάθε στοιχείο. Στον Πίνακα 5.1 φαίνονται οι εκπομπές αερίων για διάφορες πηγές ενέργειας [85].

Πίνακας 5.1: Εκπομπές αερίων από διάφορες πηγές ενέργειας			
Ενεργειακή Πηγή	Εκπομπές CO ₂ (g/ KWh)	Εκπομπές SO ₂ (g/ KWh)	Εκπομπές NO _x (g/ KWh)
Άνθρακας	955	11,8	4,3
Πετρέλαιο	818	14,2	4,0
Φυσικό Αέριο	430	–	0.5
Diesel	772	1,6	12,3
Μικρό Υδροηλεκτρικό Σύστημα	9	0,03	0,07
Μεγάλο Υδροηλεκτρικό Σύστημα	3,6–11,6	0,009–0,024	0,003–0,006
Αιολικό Σύστημα	7–9	0,02–0,09	0,02–0,06
Σύστημα Φ/Β στοιχείων	98–167	0,2–0,34	0,18–0,30
Ηλιοθερμικό Σύστημα	26–38	0,13–0,27	0,06–0,13
Γεωθερμικό Σύστημα	7–9	0,02	0,28

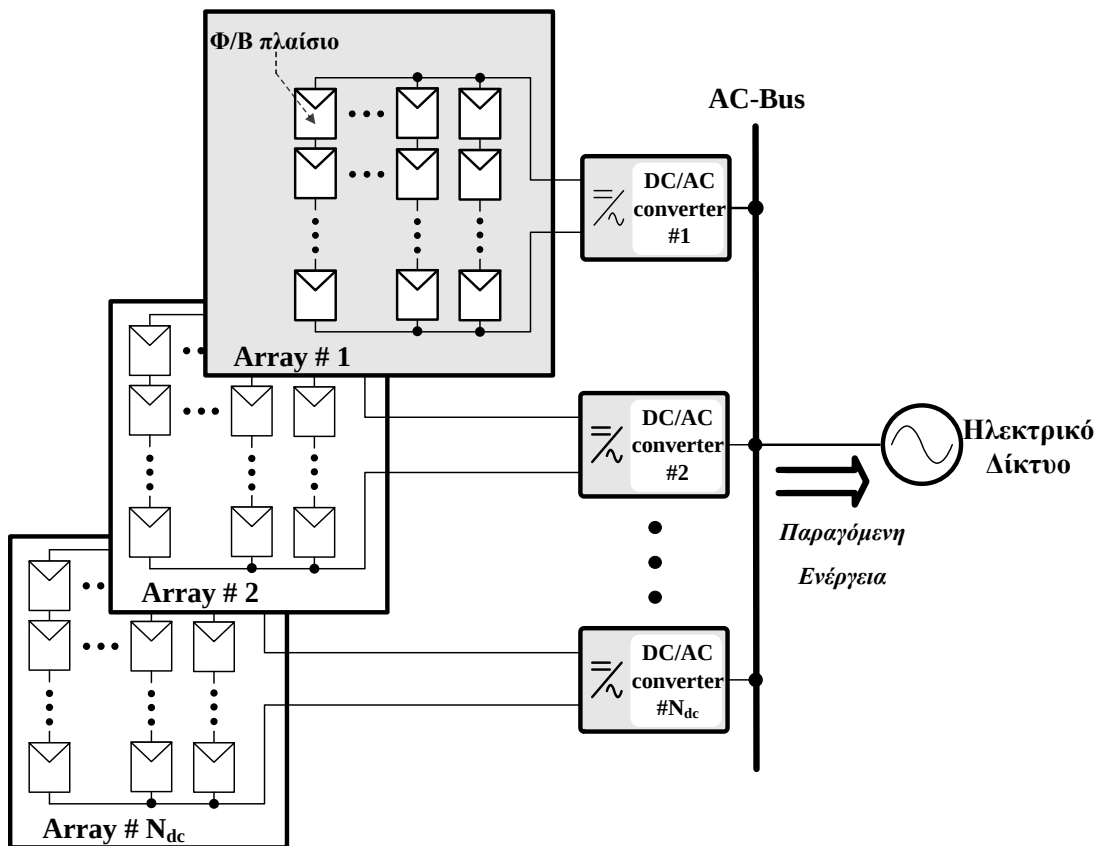
Στον Πίνακα 5.2 φαίνονται οι εκπομπές διαφόρων αερίων για την παραγωγή ενός Φ/Β συστήματος ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος (Bernal-Agustin and Dufo-Lopez, 2006).

Πίνακας 5.2: Εκπομπές αερίων για την παραγωγή ενός Φ/Β συστήματος		
Εκπομπές CO ₂ (kg/ KWp)	Εκπομπές SO ₂ (kg/ KWp)	Εκπομπές NO _x (kg/ KWp)
1392,1	18,1	4,6

6. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

6.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία μελετώνται συστήματα φωτοβολταϊκών πλαισίων με σκοπό την παραγωγή ενέργειας και την προμήθειά της στο ηλεκτρικό δίκτυο. Τα δομικά στοιχεία ενός τέτοιου συστήματος έχουν περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια και είναι τα Φ/Β πλαίσια και οι μετατροπείς ισχύος DC/AC. Το μοντέλο του συστήματος που μελετάται παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1: Το γενικό διάγραμμα ενός συστήματος παραγωγής ενέργειας από Φ/Β πλαίσια.

Τα συστήματα που μελετώνται αποτελούνται από μετατροπείς ισχύος DC/AC (inverters) οι οποίοι συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο και σε κάθε έναν από αυτούς συνδέονται Φ/Β πλαίσια με τον τρόπο που περιγράφεται στην παράγραφο 6.2.

6.2 Μοντελοποίηση σύνδεσης των Φ/B πλαισίων με τους μετατροπείς

Όπως προαναφέρθηκε, το σύστημα αποτελείται από N_{dc} μετατροπείς DC/AC διασυνδεδεμένους με το ηλεκτρικό δίκτυο, σε κάθε έναν από τους οποίους συνδέεται ένας αριθμός από Φ/B πλαίσια [87]. Συγκεκριμένα, τα πλαίσια αυτά συνδέονται σε σειρά και παράλληλα στους μετατροπείς DC/AC. Συμβολίζουμε με N_s τον αριθμό των πλαισίων που συνδέονται σε σειρά σε ένα μετατροπέα DC/AC και με N_p τον αριθμό των παράλληλων τέτοιων κλάδων με N_s συνδεδεμένα σε σειρά στοιχεία. Με N_{smin} συμβολίζουμε τον ελάχιστο αριθμό πλαισίων που μπορούν να συνδεθούν σε ένα μετατροπέα σε σειρά και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$N_{smin} = \text{round_up} \left(\frac{V_{imin}}{V_M} \right) \quad (6.1)$$

όπου round_up η συνάρτηση στρογγυλοποίησης στον πλησιέστερο ακέραιο αριθμό προς τα πάνω, V_{imin} η ελάχιστη τάση εισόδου του μετατροπέα (V) και V_M η τάση του Φ/B πλαισίου (V) στο σημείο μέγιστης ισχύος του (σημείο λειτουργίας Φ/B πλαισίου).

Με N_{smax} συμβολίζουμε το μέγιστο αριθμό πλαισίων που μπορούν να συνδεθούν σε ένα μετατροπέα σε σειρά και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$N_{smax} = \text{round_down} \left(\frac{V_{imax}}{V_{oc}} \right) \quad (6.2)$$

όπου round_down η συνάρτηση στρογγυλοποίησης στον πλησιέστερο ακέραιο αριθμό προς τα κάτω, V_{imax} η μέγιστη τάση εισόδου (V) του μετατροπέα (δίνεται από τον κατασκευαστή) και V_{oc} η τάση ανοιχτοκύκλωσης (V) του Φ/B πλαισίου.

Εδώ χρησιμοποιείται η V_{oc} επειδή είναι η μέγιστη δυνατή τάση εξόδου του πλαισίου (ισχύει η σχέση $V_{oc} > V_M$) και πρέπει να εξασφαλιστεί ότι για οποιεσδήποτε συνθήκες θα ισχύουν οι περιορισμοί λειτουργίας του μετατροπέα σε σχέση με το εύρος της τάσης εισόδου του.

Με N_{pmax} συμβολίζουμε το μέγιστο αριθμό κλάδων που μπορούν να συνδεθούν παράλληλα στην είσοδο ενός μετατροπέα και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$N_{pmax} = \text{round_down} \left(\frac{P_{max}}{P_M} \right) \quad (6.3)$$

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

όπου $P_{\max}$ η μέγιστη ισχύς (W) εισόδου του μετατροπέα (δίνεται από τον κατασκευαστή) και P_M η μέγιστη ισχύς (W) του Φ/B πλαισίου σε STC.

Υπάρχει περίπτωση, όταν υπάρχει μόνο ένας κλάδος, η συνολική ισχύς εξόδου του πλήθους των $N_{\max}$ συνδεδεμένων πλαισίων, όπως αυτό προκύπτει από τη Εξ. (6.2), να είναι μεγαλύτερη από την ισχύ εισόδου του μετατροπέα το οποίο είναι ανεπιθύμητο. Τότε το $N_{\max}$ μειώνεται με βήμα μιας μονάδας μέχρι να μην ισχύει η παραπάνω περίπτωση.

Οι στρογγυλοποιήσεις στις Εξ. (6.1) - (6.3) γίνονται ώστε τα αντίστοιχα μεγέθη που προκύπτουν να είναι ακέραιοι αριθμοί καθώς αναφέρονται σε πλήθος Φ/B πλαισίων.

Σε κάθε μετατροπέα συνδέονται όσο το δυνατόν περισσότερα Φ/B πλαίσια για την ελαχιστοποίηση του συνολικού αριθμού των απαιτούμενων μετατροπέων DC/AC και επομένως την ελαχιστοποίηση του κόστους αγοράς τους. Ο μέγιστος συνολικός αριθμός Φ/B πλαισίων που μπορούν να συνδεθούν σε ένα μετατροπέα συμβολίζεται με N_{block} και ισχύει:

$$N_{\text{block}} = N_{\text{pmax}} \cdot N_{\text{smax}} \quad (6.4)$$

Ο συνολικός αριθμός των εγκατεστημένων Φ/B πλαισίων συμβολίζεται με N_1 .

Έτσι, ισχύει:

$$N_1 = x \cdot N_{\text{block}} + y \quad (6.5)$$

όπου x ο αριθμός των μετατροπέων DC/AC, στους οποίους συνδέονται N_{block} Φ/B πλαίσια στον καθένα, και y ο αριθμός των πλαισίων που περισσεύουν από το σύνολο των πλαισίων (αν σε κάποια εγκατάσταση προκύπτει κάτι τέτοιο) και τα οποία συνδέονται σε ένα μόνο μετατροπέα DC/AC. Ισχύει η σχέση $0 \leq y < N_{\text{block}}$.

Στο μετατροπέα αυτό, αν υπάρχει (δηλαδή αν $y > 0$), συνδέονται N_{s1} πλαίσια σε σειρά και N_{p1} παράλληλα με τέτοιο τρόπο ώστε να συνδέονται όσο το δυνατόν περισσότερα σε σειρά. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή τάση εισόδου για αυτή τη διάταξη και συνεπώς το ελάχιστο ρεύμα εισόδου με σκοπό τη μείωση των ωμικών απωλειών. Πρέπει πάντα να ισχύει:

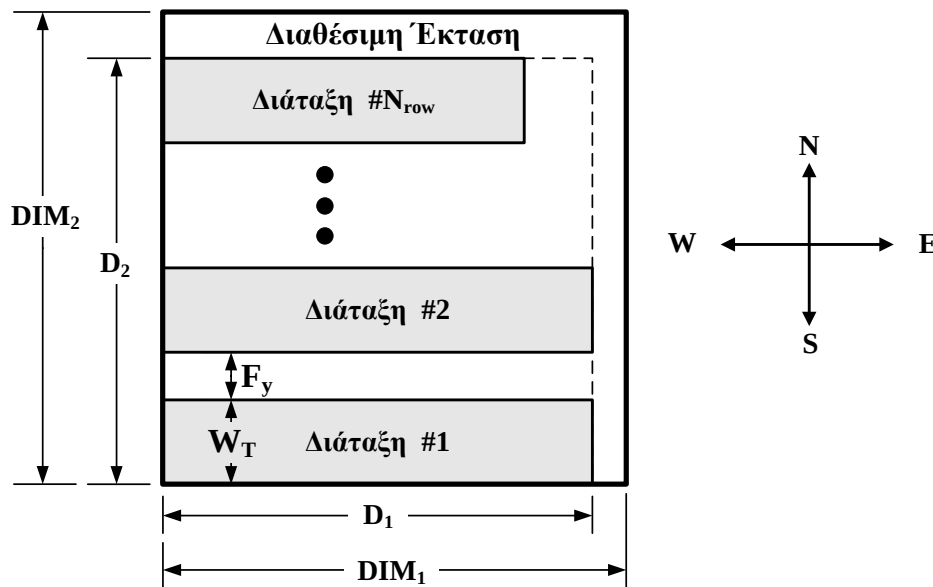
$$y = N_{p1} \cdot N_{s1} \quad (6.6)$$

Ο τελικός αριθμός των μετατροπέων DC/AC που απαιτούνται θα είναι:

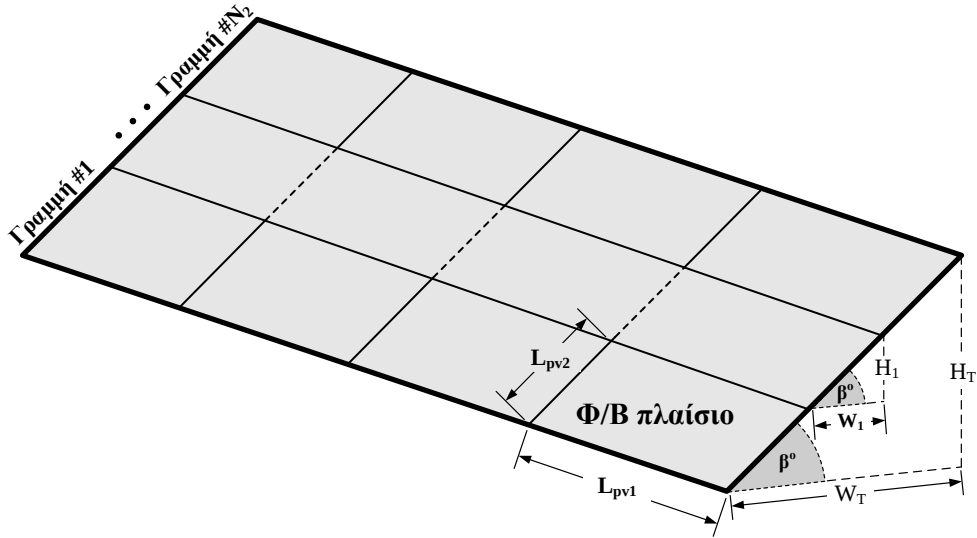
$$N_{dc} = \begin{cases} x+1, & \text{για } y > 0 \\ x, & \text{για } y = 0 \end{cases} \quad (6.7)$$

6.3 Μοντελοποίηση διάταξης των Φ/Β πλαισίων στην έκταση

Η δεδομένη έκταση για την οποία γίνεται η μελέτη έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς δημιουργεί απαιτήσεις σχετικές με την τοποθέτηση των Φ/Β πλαισίων εντός αυτής. Γι' αυτό το λόγο στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται μοντέλο του τρόπου αυτής της τοποθέτησης [87]. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2, τα Φ/Β πλαίσια διατάσσονται σε στήλες. Το διάγραμμα της στήλης φαίνεται στο Σχήμα 6.3. Με W_T συμβολίζεται το πλάτος της έκτασης που καταλαμβάνει η κάθε στήλη στο οριζόντιο επίπεδο. Επίσης D_1 και D_2 είναι οι διαστάσεις της έκτασης που απαιτείται για την εγκατάσταση του συνολικού αριθμού των Φ/Β πλαισίων. Η D_1 είναι η διάσταση της νότια πλευράς. Τέλος, με F_y συμβολίζεται η απόσταση που πρέπει να υπάρχει μεταξύ των στηλών προκειμένου να μην υπάρχει σκίαση μεταξύ των Φ/Β πλαισίων.



Σχήμα 6.2: Διάταξη των Φ/Β πλαισίων σε στήλες εντός της έκτασης.



Σχήμα 6.3: Η διάταξη των Φ/Β πλαισίων σε πολλαπλές γραμμές σε μία στήλη.

Το Σχήμα 6.3 απεικονίζει ένα παράδειγμα στήλης με τρεις γραμμές πλαισίων τα οποία τοποθετούνται σε κλίση θ° . Όπως φαίνεται, σε μια στήλη μπορούν να τοποθετηθούν περισσότερες της μίας γραμμές Φ/Β πλαισίων. Το πλάτος της έκτασης της στήλης W_T δίνεται από τη σχέση:

$$W_T = W_1 \cdot N_2 \quad (6.8)$$

όπου N_2 ο συνολικός αριθμός γραμμών που υπάρχουν σε μια στήλη και W_1 το πλάτος (m) της έκτασης που καταλαμβάνει ένα πλαίσιο υπό κλίση θ° και δίνεται από τη σχέση:

$$W_1 = L_{pv2} \cdot \cos\theta \quad (6.9)$$

όπου L_{pv2} η μία διάσταση (m) του Φ/Β πλαισίου.

Με L_{pv1} συμβολίζεται η διάσταση της πλευράς του εγκατεστημένου πλασίου που είναι στραμμένη προς το Νότο και με L_{pv2} συμβολίζεται η διάσταση της άλλης πλευράς. Οι τιμές των δύο διαστάσεων των Φ/Β πλαισίων δίνονται από τους κατασκευαστές τους.

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

$$H_T = H_1 \cdot N_2 \quad (6.10)$$

όπου H_1 το ύψος (m) ενός Φ/Β πλαισίου εγκατεστημένου υπό κλίση θ° και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$H_1 = L_{pv2} \cdot \sin\theta \quad (6.11)$$

Η τιμή του ύψους H_T είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ των στηλών η οποία προκύπτει ως εξής:

$$F_y = H_T \cdot \frac{\sin\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega - \cos\phi \cdot \sin\delta}{\sin\phi \cdot \sin\delta + \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega} \quad (6.12)$$

όπου ϕ το γεωγραφικό πλάτος του τόπου ($^\circ$), δ η γωνία ηλιακής απόκλισης ($^\circ$) η οποία υπολογίζεται από την Εξ. (2.4) και ω η γωνία ηλιακού χρόνου ($^\circ$) η οποία υπολογίζεται από την Εξ. (2.24).

Συγκεκριμένα επιλέγεται η μέγιστη απόσταση F_y , υπολογίζοντας την τιμή της για κάθε ημέρα και ώρα του έτους, ώστε οι στήλες να μη σκιάζονται ποτέ στη διάρκεια του έτους.

Ο υπολογισμός του τρόπου διάταξης των Φ/Β πλαισίων σε μία σειρά γίνεται ως εξής: αρχικά υπολογίζεται ο μέγιστος αριθμός πλαισίων n_i που μπορούν να τοποθετηθούν σε μία γραμμή:

$$n_i = \text{round_down } DIM_1 / L_{pv1} \quad (6.13)$$

όπου DIM_1 το μήκος (m) της νότιας πλευράς της δεδομένης από το χρήστη έκτασης.

Η προς τα κάτω στρογγυλοποίηση στην Εξ. (6.13) γίνεται ώστε το n_i που προκύπτει να είναι ακέραιος αριθμός καθώς αναφέρεται σε πλήθος Φ/Β πλαισίων.

Με DIM_2 συμβολίζεται το μήκος της άλλης πλευράς (κάθετης προς αυτή, με μήκος DIM_1) της δεδομένης έκτασης. Προσοχή πρέπει να δοθεί στο διαχωρισμό αυτών των αποστάσεων από τις D_1 και D_2 . Οι πρώτες αναφέρονται στις διαστάσεις της προς μελέτη

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

έκτασης και δίνονται από το χρήστη, ενώ οι δεύτερες είναι οι τελικές διαστάσεις που απαιτούνται για την εγκατάσταση N_1 Φ/Β πλαισίων και προκύπτουν με τον τρόπο που περιγράφεται παρακάτω. 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 Φ/Β πλαισίων που συνδέονται σε μια γραμμή, N_{sermin} , υπολογίζεται ως εξής:

$$N_{sermin} = \begin{cases} n_t, & \text{αν } N_1 / N_2 > n_t \\ \text{round_up}(N_1 / N_2), & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (6.14)$$

Ο αριθμός των Φ/Β πλαισίων που υπάρχουν συνολικά σε μια στήλη, N_{ser} , και υπολογίζεται ως εξής:

$$N_{ser} = N_{sermin} \cdot N_2 \quad (6.15)$$

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

$$N_{row} = \text{round_up } N_1 / N_{ser} \quad (6.16)$$

Η προς τα πάνω στρογγυλοποίηση στις Εξ. (6.14) και (6.16) γίνεται ώστε τα μεγέθη N_{sermin} και N_{row} που προκύπτουν να είναι ακέραιοι αριθμοί καθώς αναφέρονται σε πλήθος στοιχείων και στηλών, αντίστοιχα.

Από τα παραπάνω μεγέθη προκύπτουν οι τελικές διαστάσεις ως εξής:

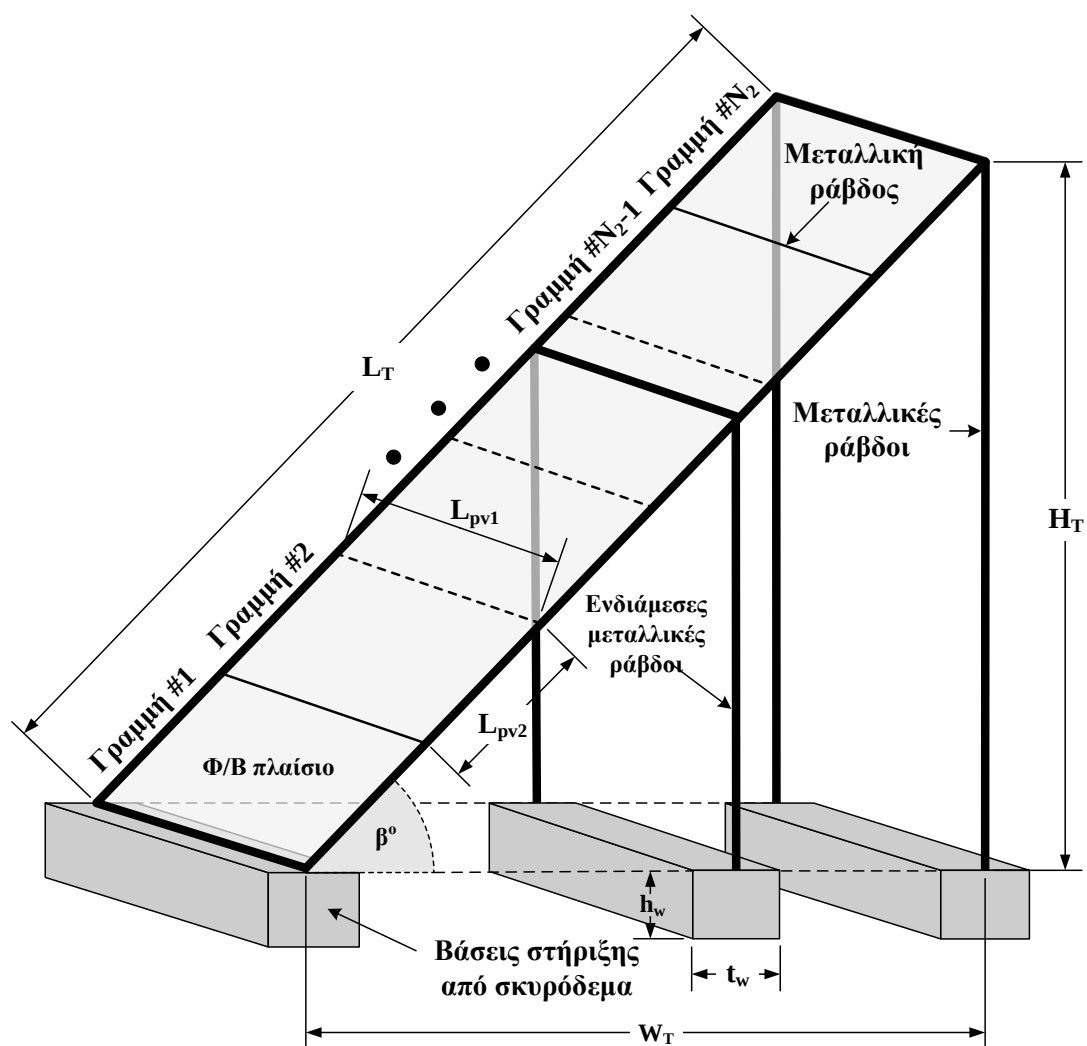
$$D_1 = N_{sermin} \cdot L_{pv1} \quad (6.17)$$

$$D_2 = N_{row} \cdot W_T + (N_{row} - 1) \cdot F_y \quad (6.18)$$

6.4 Η μοντελοποίηση των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων

Για τη στήριξη των Φ/Β πλαισίων χρησιμοποιούνται βάσεις στήριξης κατασκευασμένες από μεταλλικές ράβδους (συνήθως από αλουμίνιο ή γαλβανισμένο σίδηρο). Η μοντελοποίηση του συνολικού μήκους τους είναι σημαντική διαδικασία καθώς βάσει αυτής εξάγεται το

κόστος κατασκευής τους το οποίο συνυπολογίζεται στο κόστος εγκατάστασης του συστήματος που περιγράφεται στο 7^ο κεφάλαιο. Η μοντελοποίηση που παρουσιάζεται εδώ βασίζεται στον υπολογισμό του συνολικού ποσού πρώτης ύλης για την κατασκευή τους, δηλαδή του μήκους των ράβδων που απαιτούνται για τη στήριξη των Φ/Β πλαισίων της διάταξης στην έκταση της εγκατάστασης όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο καθώς και του όγκου των βάσεων από σκυρόδεμα που απαιτούνται για τη στήριξη των μεταλλικών δομών [87]. Αυτά τα ποσά θα πολλαπλασιαστούν στη συνέχεια με τα αντίστοιχα εγκατεστημένα κόστη ανά μονάδα ώστε να υπολογιστεί το ζητούμενο συνολικό κόστος. Στο Σχήμα 6.4 απεικονίζεται το γενικό διάγραμμα των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων και στη συνέχεια αναλύεται το μοντέλο υπολογισμού του μήκους των ράβδων που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 6.4 Διάγραμμα περιγραφής του μοντέλου βάσεων στήριξης των Φ/B πλαισίων.

Στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζονται με έντονες γραμμές οι μεταλλικές ράβδοι που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των βάσεων στήριξης σε μια κάθετη γραμμή Φ/B πλαισίων εντός μιας στήλης. Θα υπολογιστεί αρχικά το μήκος των ράβδων για μία κάθετη γραμμή και στη συνέχεια το συνολικό μήκος για n_b κάθετες γραμμές, όπου

$$n_b = \text{round_up}(N_1 / N_2) \quad (6.19)$$

Η στρογγυλοποίηση στην Εξ. (6.19) γίνεται ώστε να προκύψει ακέραιος αριθμός. Οι κάθετες ράβδοι στο Σχήμα 6.4 απεικονίζουν ενδιάμεσα υποστυλώματα που απαιτούνται για τη στήριξη μιας στήλης. Θεωρούμε ότι απαιτούνται τέτοιοι ενδιάμεσοι στύλοι για κάθε 2 μέτρα αυξανόμενου συνολικού ύψους H_T της στήλης και συνεπώς μόνο για $H_T > 2$. Ο αριθμός τέτοιων υποστυλωμάτων για κάθε πλευρά της κάθετης γραμμής συμβολίζεται με B_2 και θα είναι ίσος με:

$$B_2 = \text{round_down}(H_T / 2) \quad (6.20)$$

Η στρογγυλοποίηση στην Εξ. (6.20) γίνεται ώστε να προκύψει ακέραιος αριθμός. Το συνολικό μήκος B_{tot} των υποστυλωμάτων αυτών για κάθε πλευρά της κάθετης γραμμής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$B_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^{B_2} i \cdot 2 \quad (6.21)$$

Το μήκος των ράβδων για κάθε κάθετη γραμμή θα ισούται με το άθροισμα των κάθετων υποστυλωμάτων επιπλέον του μήκους των δύο πλευρών και των μεταξύ τους ενώσεων μήκους L_{pv1} η κάθε μια. Το σύνολο αυτών των ενώσεων θα είναι το άθροισμα των ενδιάμεσων υποστυλωμάτων και των δύο ενώσεων που υπάρχουν στα δύο άκρα της κάθε κάθετης γραμμής, όπως φαίνεται και στο σχήμα, δηλαδή B_2+2 . Πριν υπολογιστεί το συνολικό μήκος θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι ράβδοι που χρησιμοποιούνται υπάρχουν ως πρώτη ύλη σε συγκεκριμένες διαστάσεις μήκους. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι για να γίνουν οι βάσεις στήριξης σύμφωνα με τις προδιαγραφές του μοντέλου που έχει περιγραφεί παραπάνω θα υπάρχει πάντα ένα ποσό υλικού που περισσεύει αλλά επιβαρύνει το συνολικό κόστος, οπότε πρέπει να ληφθεί υπόψη. Συνήθως αυτό το ποσό είναι γύρω στο 10% επί του απαιτούμενου μήκους του υλικού επιπλέον, οπότε αυτή η τιμή επιλέγεται και στην παρούσα εργασία. Άρα,

το μήκος B_1 των ράβδων που απαιτείται σε μια κάθετη γραμμή συμπεριλαμβανομένου του παραπάνω ποσοστού θα δίνεται από τη σχέση:

$$B_1 = (2 \cdot (B_{tot} + H_T + L_T) + (B_2 + 2) \cdot L_{pv2}) \cdot 110\% \quad (6.22)$$

όπου L_T το κεκλιμένο πλάτος (m) της στήλης όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4 το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$L_T = N_2 \cdot L_{pv2} \quad (6.23)$$

Έτσι, το συνολικό μήκος (m) των ράβδων, B , για ολόκληρη την εγκατάσταση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$B = B_1 \cdot n_b \quad (6.24)$$

Να σημειωθεί ότι το είδος των ράβδων που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή των βάσεων στήριξης θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν το βάρος των Φ/Β πλαισίων. Έτσι, ο χρήστης θα πρέπει να εκτιμήσει την αντοχή των ράβδων στο βάρος των χρησιμοποιούμενων Φ/Β πλαισίων και να επιλέξει τέτοιες διαστάσεις και πάχος ράβδων ώστε να εξασφαλίζεται σε κάθε περίπτωση η καταλληλότητα των βάσεων στήριξης. Στη συνέχεια, θα πρέπει να εκτιμηθεί το εγκατεστημένο κόστος κατασκευής των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων ανά μέτρο μήκους, για τον επιλεγμένο τύπο ράβδων, ώστε να υπολογιστεί το συνολικό κόστος κατασκευής των βάσεων όπως θα περιγραφεί και στο 7^ο κεφάλαιο.

Επιπλέον, στα δύο άκρα της κάθε κάθετης γραμμής, δηλαδή στην πλευρά που στηρίζεται στο έδαφος και εκεί που τοποθετούνται τα τελευταία υποστυλώματα ύψους H_T , θεωρούμε ότι υπάρχουν τοιχία στήριξης στο έδαφος κατασκευασμένα από σκυρόδεμα ύψους 0.25m, πάχους 0.3m και μήκους όσο και το μήκος L_{pv1} του κάθε Φ/Β πλαισίου. Το κόστος κατασκευής των τοιχίων αυτών συμπεριλαμβάνεται στο κόστος κατασκευής των βάσεων στήριξης και ο υπολογισμός του κόστους τέτοιου είδους κατασκευών γίνεται βάσει του όγκου τους. Έτσι, για να υπολογιστεί το κόστος αυτών πρέπει να υπολογιστεί ο συνολικός όγκος τους, B_B , που ισούται με τον όγκο της κάθε τέτοιας κάθετης γραμμής επί τον αριθμό αυτών των γραμμών (n_b) και δίνεται από τη σχέση:

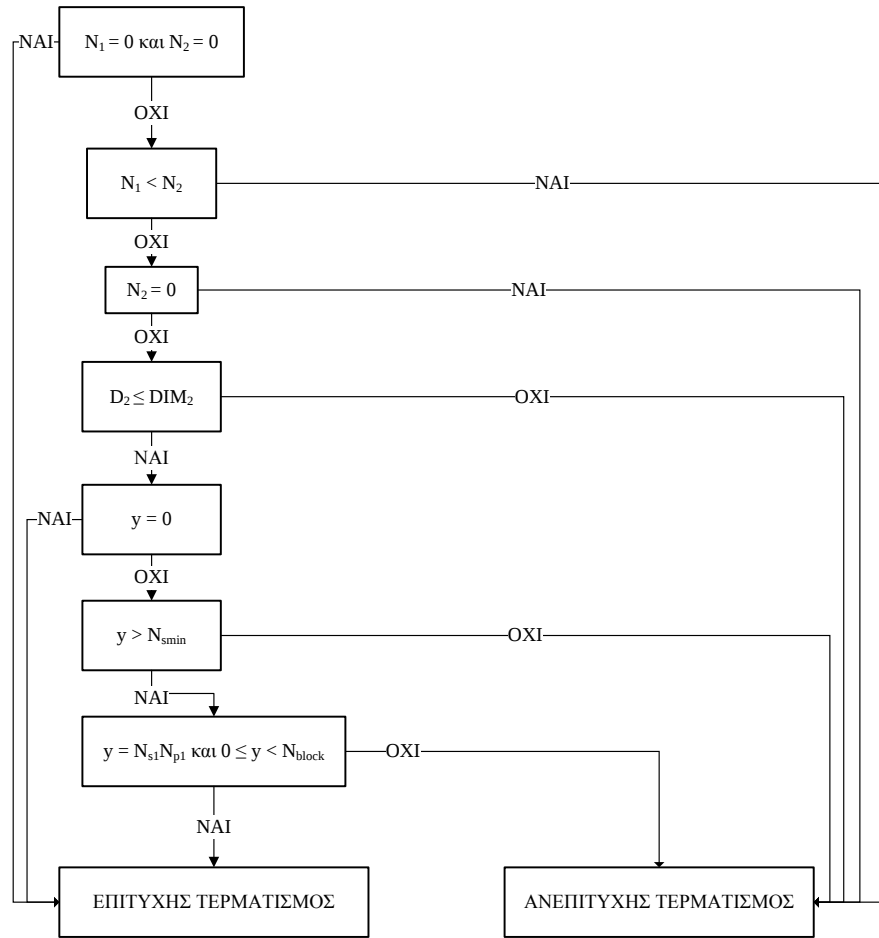
$$B_B = 2 \cdot 0.5 \cdot 0.15 \cdot L_{pv1} \cdot n_b \quad (6.25)$$

Το τελικό κόστος κατασκευής των βάσεων υπολογίζεται από το άθροισμα του κόστους των μεταλλικών βάσεων και του κόστους των στηριγμάτων από σκυρόδεμα.

6.5 Ο αλγόριθμος προσομοίωσης του συστήματος

Ο αλγόριθμος προσομοίωσης αναπτύχθηκε προκειμένου να ελέγχονται οι διάφορες λύσεις που παράγονται (αριθμός πλαισίων N_1 , αριθμός γραμμών N_2 και κλίση πλαισίων) ως προς την επάρκεια της διαθέσιμης έκτασης για τη διάταξη των N_1 πλαισίων σε στήλες των N_2 γραμμών και ως προς τον τρόπο σύνδεσης των N_1 πλαισίων με κατάλληλο τρόπο με τους μετατροπείς DC/AC. Αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος ουσιαστικά ελέγχει όσα περιγράφηκαν στις παραγράφους 6.3 και 6.2 και με αυτή τη σειρά. Ο υπολογισμός γίνεται με αυτή τη σειρά λόγω μεγαλύτερης πολυπλοκότητας των πράξεων που έχουν σχέση με τη διάταξη των Φ/Β πλαισίων στους μετατροπείς DC/AC. Η πολυπλοκότητα αυτή προκύπτει από τη χρήση περισσότερων ελέγχων και βρόχων (loops) που πρέπει να χρησιμοποιούνται για την εύρεση της διάταξης των Φ/Β πλαισίων στους μετατροπείς DC/AC. Ακόμα, ο αλγόριθμος προσομοίωσης πριν ελέγξει τα παραπάνω, ελέγχει από τις τιμές που προκύπτουν από το γενετικό αλγόριθμο αν ο αριθμός N_2 των γραμμών είναι μεγαλύτερος από τον συνολικό αριθμό N_1 των πλαισίων, το οποίο είναι άτοπο, καθώς και για το αν ο αριθμός N_2 είναι ίσος με 0 ενώ ο αριθμός N_1 όχι, το οποίο είναι επίσης άτοπο. Στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζεται η σειρά των ελέγχων που γίνονται στον αλγόριθμο προσομοίωσης. Ο επιτυχής τερματισμός του αλγορίθμου σημαίνει ότι η συγκεκριμένη λύση είναι αποδεκτή βάσει των περιορισμών έχουν περιγραφεί σε αυτό το κεφάλαιο, 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 7^ο κεφάλαιο.

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους



Σχήμα 6.5: Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου προσομοίωσης της σύνδεσης των Φ/B πλαισίων με τους μετατροπείς ισχύος DC/AC και της διάταξής τους στην έκταση της εγκατάστασης.

7. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

7.1 Εισαγωγή

Το πρόβλημα της παρούσας εργασίας είναι η βέλτιστη διαστασιολόγηση συστημάτων Φ/Β πλαισίων συνδεδεμένων με το ηλεκτρικό δίκτυο, των οποίων το γενικό διάγραμμα απεικονίζεται στο Σχήμα 6.1, με σκοπό την πώληση της παραγόμενης ενέργειας και τη μεγιστοποίηση των οικονομικών και των περιβαλλοντικών οφελών για ένα αριθμό ετών λειτουργίας. Η διαστασιολόγηση αφορά στο συνολικό αριθμό των Φ/Β πλαισίων, των γραμμών σε μία στήλη Φ/Β πλαισίων και της κλίσης των Φ/Β πλαισίων. Έτσι, μια λύση του προβλήματος περιλαμβάνει τρεις μεταβλητές και είναι της μορφής $c_1 = [N_1|N_2|\theta]$, όπου N_1 είναι ο συνολικός αριθμός των Φ/Β πλαισίων, N_2 ο αριθμός των γραμμών ανά στήλη και θ η κλίση των πλαισίων. Με τις μεταβλητές αυτές μπορεί να περιγραφεί πλήρως ένα σύστημα όπως παρουσιάστηκε στα μοντέλα του 6^{ου} κεφαλαίου. Στη συγκεκριμένη εργασία γίνεται χρήση δύο διαφορετικών αντικειμενικών συναρτήσεων. Η πρώτη είναι η αντικειμενική συνάρτηση που αντιπροσωπεύει το οικονομικό όφελος 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 ετήσιο πληθωρισμό. Η δεύτερη είναι η αντικειμενική συνάρτηση που αντιπροσωπεύει το περιβαλλοντικό όφελος και περιλαμβάνει τις εκπομπές αερίων που απαιτούνται για την παραγωγή και εγκατάσταση των δομικών στοιχείων του συστήματος και τις εκπομπές αερίων που αποφεύγονται λόγω χρήσης του συστήματος ΑΠΕ.

7.2 Η αρχικοποίηση του αλγορίθμου

Πριν εφαρμοστεί ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης για ένα συγκεκριμένο συνδυασμό στοιχείων του συστήματος είναι απαραίτητο να διαβαστούν όλες οι είσοδοι - παράμετροι που απαιτούνται για την εκτέλεση του καθώς και να γίνουν κάποιοι απαραίτητοι για τη συνέχεια υπολογισμοί όπως ο υπολογισμός της παραγόμενης ενέργειας κάθε Φ/Β πλαισίου για κάθε δυνατή ημέρα και κλίση. Οι είσοδοι του αλγορίθμου που διαβάζονται πάντα από αρχεία διακρίνονται σε δυο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά στις παραμέτρους των εξελικτικών αλγορίθμων και η δεύτερη κατηγορία αφορά στις παραμέτρους των δομικών

στοιχείων συστήματος και σε άλλες παραμέτρους του. Οι παράμετροι των στοιχείων του συστήματος έχουν σχέση με τα χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαισίων και τα χαρακτηριστικά των μετατροπέων DC/AC. Είσοδοι, επίσης, που σχετίζονται με τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας του συστήματος είναι οι ετήσιες χρονοσειρές μέσων ημερησίων ή μηνιαίων τιμών της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας, καθώς και το γεωγραφικό πλάτος και ο συντελεστής ανάκλασης του τόπου της μελέτης. Αφού διαβαστούν όλες οι είσοδοι γίνονται οι υπολογισμοί της ενέργειας που παράγουν τα Φ/Β πλαίσια για κάθε ημέρα και ώρα του έτους και για κάθε δυνατή κλίση ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης. Ακολουθεί η περιγραφή όλων των εισόδων που απαιτούνται για τους ενεργειακούς υπολογισμούς:

1. Όλα τα είδη των Φ/Β πλαισίων μαζί με τα χαρακτηριστικά τους βρίσκονται σε ένα αρχείο. Ανάλογα με το Φ/Β πλαίσιο του συνδυασμού εκείνου που έχει επιλεγεί για τη διαδικασία της διαστασιολόγησης, διαβάζονται τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά. Αυτά είναι η ονομασία του, ο αριθμός των στοιχείων που περιλαμβάνει σε σειρά και παράλληλα, η τάση ανοιχτοκύκλωσης σε Volts, το ρεύμα βραχυκύκλωσης σε Amperes, η τάση μέγιστης ισχύος σε Volts, το ρεύμα μέγιστης ισχύος σε Amperes, η ισχύ αιχμής του σε Watts, το NCOT σε $^{\circ}\text{C}$, το κόστος αγοράς του σε €, το κόστος συντήρησής του σε €/έτος, οι δύο διαστάσεις του πλαισίου (η πρώτη είναι αυτή της πλευράς που θα εγκατασταθεί προς το Νότο) σε μέτρα, τα έτη ορθής λειτουργίας που δίνει ο κατασκευαστής και ο συντελεστής εξάρτησης της τάσης από τη θερμοκρασία ανά $^{\circ}\text{C}$ πάνω από τους 25°C . Ο συντελεστής αυτός έχει αρνητικό πρόσημο που σημαίνει ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας η τάση του Φ/Β πλαισίου μειώνεται. Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται για την εύρεση της μέγιστης δυνατής τάσης ανοιχτοκύκλωσης και της ελάχιστης δυνατής τάσης μέγιστης ισχύος για όλη τη διάρκεια του έτους, για την ετησίως ελάχιστη και μέγιστη αντίστοιχα θερμοκρασία από αυτές που εισάγονται. Οι τιμές αυτών των τάσεων χρησιμοποιούνται στις Εξ. (6.2) και Εξ. (6.1), αντίστοιχα.

2. Τα χαρακτηριστικά που περιλαμβάνονται στο αρχείο των μετατροπέων DC/AC είναι η ονομασία τους, ο βαθμός απόδοσής τους, η ακρίβεια του αλγορίθμου MPPT που περιλαμβάνουν, η μέγιστη ισχύς εισόδου τους σε Watts, ο μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών, MTBF, σε ώρες, το κόστος εγκατάστασής τους σε €, το ετήσιο κόστος συντήρησής τους σε €/έτος, η ελάχιστη και η μέγιστη τάση εισόδου τους σε Volts και το κόστος επισκευής τους σε περίπτωση βλαβών σε €/επισκευή. Αν ο κατασκευαστής δε δίνει το μέσο χρόνο μεταξύ

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

βλαβών τότε αυτός παίρνει την τιμή των 25 χρόνων, δηλαδή 219000 ωρών, μια τιμή που ισχύει γενικότερα για αυτού του τύπου τις συσκευές.

3. Η ακτινοβολία και η θερμοκρασία δίνονται σε αρχεία με μέσες μηνιαίες ή μέσες ημερήσιες τιμές. Στην περίπτωση που οι εισοδοί είναι μηνιαίες τιμές γίνεται αναγωγή τους σε ημερήσιες. Επίσης στο αρχείο με την ακτινοβολία υπάρχει το γεωγραφικό πλάτος της υπό μελέτη περιοχής καθώς και ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους σε αυτή την περιοχή.

Μετά την είσοδο των παραπάνω παραμέτρων στον αλγόριθμο της παρούσας εργασίας γίνεται ο υπολογισμός της ενέργειας που παράγει ένα Φ/Β πλαίσιο κάθε ημέρα του έτους για όλες τις δυνατές κλίσεις των Φ/Β πλαισίων ($0 \leq \theta \leq 90$).

7.3 Η αντικειμενική συνάρτηση των οικονομικών οφελών

Η αντικειμενική συνάρτηση των οικονομικών οφελών του συστήματος είναι της μορφής:

$$g_1(N_1, N_2, \theta) = \frac{R_n - IC_n + FC_n}{(1+i)^n} \quad (7.1)$$

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

$$IC_n = IC_0 \cdot (1+i)^n \quad (7.2)$$

όπου IC_0 είναι το αρχικά επενδεδυμένο κεφάλαιο (€), i είναι 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 κατασκευής των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων καθώς και το κόστος αγοράς της έκτασης. Το IC_0 δίνεται από τη σχέση:

$$IC_0 = (1-\gamma) \cdot N_1 \cdot C_1 + N_{dc} \cdot C_2 + C_L + C_B \quad (7.3)$$

όπου γ είναι το ύψος της επιδότησης, N_1 είναι ο συνολικός αριθμός των εγκατεστημένων Φ/Β πλαισίων, C_1 το κόστος εγκατάστασης κάθε Φ/Β πλαισίου(€), N_{dc} είναι ο αριθμός των εγκατεστημένων μετατροπέων DC/AC, C_2 είναι το κόστος εγκατάστασης του μετατροπέα(€), C_L είναι το κόστος αγοράς της έκτασης (€) και C_B το κόστος κατασκευής των βάσεων (€).

Για το κόστος αγοράς της έκτασης ισχύει η σχέση:

$$C_L = D_1 \cdot D_2 \cdot C_3 \quad (7.4)$$

όπου D_1 είναι το μήκος της νότιας πλευράς της έκτασης που απαιτείται (m), D_2 είναι το μήκος της δεύτερης πλευράς της έκτασης που απαιτείται (m) και C_3 είναι το κόστος αγοράς της έκτασης ανά m^3 (€).

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

$$C_B = B \cdot C_4 + B_B \cdot C_5 \quad (7.5)$$

όπου B είναι το συνολικό μήκος (m) των ράβδων που απαιτούνται για την κατασκευή των βάσεων και δίνεται από την Εξ. (6.24), C_4 είναι το εγκατεστημένο κόστος (€) των παραπάνω ράβδων ανά μέτρο, B_B είναι ο συνολικός όγκος σε m^3 του σκυροδέματος που απαιτείται για την κατασκευή των βάσεων και υπολογίζεται από την Εξ. (6.25) και C_5 είναι το εγκατεστημένο κόστος (€) του σκυροδέματος ανά m^3 .

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

$$FC_n = (N_1 \cdot C_{m1} + N_{dc} \cdot C_{m2}) \cdot (1+g) \cdot (1+i)^n \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{1+g}{1+i} \right)^n}{i-g} \right] + IN_C \quad (7.6)$$

όπου C_{m1} είναι το ετήσιο κόστος συντήρησης των Φ/Β πλαισίων (€/Φ/Β πλαίσιο), C_{m2} είναι το ετήσιο κόστος συντήρησης των μετατροπέων (€/μετατροπέα), g είναι ο ετήσιος πληθωρισμός και IN_C είναι το κόστος επισκευής (€) των μετατροπέων DC/AC.

Η παραπάνω σχέση προκύπτει χρησιμοποιώντας τις Εξ. (5.3) και Εξ. (5.4) για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους των ετήσιων δαπανών που επηρεάζονται από τον ετήσιο πληθωρισμό.

Το IN_C δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$IN_C = N_{dc} \cdot R_{cost} \cdot \left[\sum_{j=k^*}^n \frac{1+g^j}{1+i^j} \right] \cdot (1+i)^n \quad (7.7)$$

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

όπου R_{cost} είναι το κόστος επισκευής των μετατροπέων (€/επισκευή) και k^* είναι οι χρονιές που απαιτείται επισκευή.

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

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

$$R_n = 1 - \text{tax} \cdot C_0 \cdot N_1 \cdot E_{\text{tot}} \cdot (1+i)^n \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{1}{1+i} \right)^n}{i} \right] \quad (7.8)$$

όπου tax είναι το ποσοστό φορολογίας επί των κερδών από την πώληση της παραγόμενης ενέργειας, C_0 είναι τιμή πώλησης της ενέργειας (€) ανά kWh και E_{tot} είναι η συνολική ενέργεια (kWh) που παράγει ένα Φ/Β πλαίσιο σε ένα χρόνο.

Η παραπάνω σχέση προκύπτει από τις Εξ. (5.3) και Εξ. (5.4) όπως και η σχέση για τον υπολογισμό του κόστους συντήρησης της εγκατάστασης με τη διαφορά ότι η ετήσια ανατίμηση της ενέργειας [σε αντιστοιχία με τον πληθωρισμό της Εξ. (7.6) για το κόστος συντήρησης] θεωρείται μηδενική. Αυτό συμβαίνει επειδή βάσει της ισχύουσας Ελληνικής νομοθεσίας για εκμετάλλευση της ενέργειας από Φ/Β συστήματα η τιμή πώλησης της ενέργειας είναι σταθερή για όλα τα χρόνια της μελέτης. Σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία στην Ελλάδα η τιμή πώλησης C_0 της παραγόμενης ενέργειας από Φ/Β στοιχεία ορίζεται στα 0,50€/kWh για συστήματα με εγκατεστημένη ισχύ έως 100kWp και στα 0,45€/kWh για συστήματα με εγκατεστημένη ισχύ μεγαλύτερη από 100kWp για τα μη διασυνδεδεμένα νησιά. Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται η τελική τιμή πώλησης της ενέργειας χρησιμοποιώντας τις δύο παραπάνω τιμές πώλησης που δίνονται ως εισοδοί από το χρήστη. Η εγκατεστημένη ισχύς υπολογίζεται ως το γινόμενο του πλήθους των εγκατεστημένων πλαισίων N_1 επί τη μέγιστη ισχύ του κάθε πλαισίου.

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

$$E_{\text{tot}} = \frac{n_1 \cdot n_{\text{MPPT}} \cdot E_{\text{PV}}}{1000} \quad (7.9)$$

όπου n_1 είναι ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα DC/AC, n_{MPPT} είναι ο βαθμός ακρίβειας της λειτουργίας MPPT του μετατροπέα και E_{PV} είναι το άθροισμα για ένα έτος της ημερήσιας ενέργειας που παράγουν τα Φ/Β πλαίσια (ο τρόπος υπολογισμού της ενέργειας περιγράφεται στο 2^ο κεφάλαιο) για τη δεδομένη κλίση τους και δίνεται σε Wh. Η διαίρεση με 1000 γίνεται για την αναγωγή της ενέργειας σε kWh.

7.4 Η αντικειμενική συνάρτηση των περιβαλλοντικών οφελών

Η αντικειμενική συνάρτηση των περιβαλλοντικών οφελών, όπως περιγράφεται από την Εξ. (5.8) του συστήματος Φ/Β πλαισίων είναι της μορφής:

$$g_2(N_1, N_2, \theta) = n \cdot N_1 \cdot E_{\text{tot}} \cdot (f_{\text{conv}} - f_{\text{pv}}) - P_{\text{peak}} \cdot f_{\text{prod}} \quad (7.10)$$

όπου f_{conv} ο παράγοντας που περιγράφει τις εκπομπές αερίων μιας συμβατικής πηγής ανά μονάδα ενέργειας (kg/ KWh), f_{pv} ο παράγοντας που περιγράφει τις εκπομπές αερίων ενός συστήματος Φ/Β πλαισίων ανά μονάδα ενέργειας (kg/ KWh), P_{peak} η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος (KWp) και f_{prod} ο παράγοντας που περιγράφει τις συνολικές εκπομπές αερίων για την κατασκευή ενός συστήματος Φ/Β πλαισίων ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος (kg/ KWp). Η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος Φ/Β πλαισίων δίνεται από τη σχέση:

$$P_{\text{peak}} = N_1 \cdot P_M / 1000 \quad (7.11)$$

όπου P_M είναι η ονομαστική ισχύς του κάθε Φ/Β πλαισίου (W).

7.5 Ο αλγόριθμος διόρθωσης των εσφαλμένων λύσεων

Οι περιορισμοί του προβλήματος συνοψίζονται στις παρακάτω σχέσεις:

$$0 \leq N_1 \leq \text{BND}_1 \quad (7.12)$$

$$0 \leq N_2 \leq \text{BND}_2 \quad (7.13)$$

$$0 \leq \theta \leq 90 \quad (7.14)$$

$$\text{Προσομοίωση}(N_1, N_2, \theta) = \text{Επιτυχής} \quad (7.15)$$

Ο αλγόριθμος προσομοίωσης, που αναλύεται στην παράγραφο 6.5, χρησιμοποιείται για να ελεγχθεί κατά πόσο μια λύση ικανοποιεί τους περιορισμούς που έχουν περιγραφεί στις παραγράφους 6.2 και 6.3 και σχετίζονται με την διάταξη των Φ/Β πλαισίων τόσο στους μετατροπείς DC/AC, όσο και στην έκταση της εγκατάστασης. Τα BND_1 & BND_2 είναι τα άνω όρια των γονιδίων N_1 και N_2 , αντίστοιχα, και οι τιμές τους ορίζονται από το χρήστη.

Οι τελεστές των εξελικτικών αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται μπορεί να δώσουν λύσεις εκτός του επιτρεπτού συνόλου. Ο αλγόριθμος διόρθωσης (repair algorithm) χρησιμοποιείται για να εξαλείψει αυτές τις λύσεις αντικαθιστώντας τις με άλλες που δεν παραβιάζουν το σύνολο των περιορισμών.

Ο σχεδιασμός ενός αλγορίθμου διόρθωσης εξαρτάται από το εκάστοτε πρόβλημα και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή καθώς επηρεάζει άμεσα τη σύγκλιση του αλγορίθμου στη βέλτιστη τιμή. Ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται όταν παραβιάζεται κάποιος περιορισμός και ελέγχει καταρχήν αν ισχύει $N_1 < N_2$, κάτι το οποίο είναι άτοπο, όπως έχει αναφερθεί και στην περιγραφή του αλγορίθμου SIM. Σε αυτή την περίπτωση μειώνει την τιμή του N_2 τόσο ώστε να ισχύει $N_1 \geq N_2$. Στη συνέχεια, αν ο αλγόριθμος προσομοίωσης ολοκληρώνεται ανεπιτυχώς μειώνεται ο αριθμός των Φ/Β πλαισίων (N_1) κάνοντας παράλληλα και τον προηγούμενο έλεγχο ($N_1 \geq N_2$), μέχρι ο αλγόριθμος προσομοίωσης να τερματίσει επιτυχώς. Με αυτόν τον τρόπο είναι βέβαιο ότι ο αλγόριθμος διόρθωσης θα βρει μια λύση με αριθμό Φ/Β πλαισίων για τα οποία να αρκεί η διαθέσιμη έκταση και να μπορούν να εγκατασταθούν σε αυτή με τον τρόπο που έχει περιγραφεί στο 6^ο κεφάλαιο αλλά και να μπορούν να συνδεθούν κατάλληλα στους μετατροπείς DC/AC της εγκατάστασης, όπως επίσης έχει περιγραφεί στο 6^ο κεφάλαιο.

Πριν, όμως, τη διόρθωση του πληθυσμού με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω, είναι αναγκαίο να εξεταστούν οι περιορισμοί που περιγράφονται από τις Εξ. (7.12) – (7.14), καθώς είναι πιθανόν να προκύπτουν λύσεις εκτός των ορίων του επιτρεπτού χώρου αναζήτησης. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία εξετάζονται τρεις τρόποι διόρθωσης

των περιπτώσεων αυτών. Ο πρώτη μέθοδος διόρθωσης αυτών των περιπτώσεων (Repair Algorithm 1) θέτει τις τιμές των μελών που παραβιάζουν κάποιο όριο ίσες με το αντίστοιχο όριο. Έτσι, σε όλες τις περιπτώσεις των μεταβλητών, αν σε μια λύση παραβιαστεί το κάτω όριο, τότε η αντίστοιχη τιμή τίθεται ίση με 0, όσο είναι τα κάτω όρια των τριών μεταβλητών απόφασης. Αν παραβιαστεί πάνω όριο μιας μεταβλητής, τότε η τιμή της συγκεκριμένης λύσης τίθεται ίση με το όριο αυτό. Ο δεύτερος αλγόριθμος (Repair Algorithm 2) θέτει τις τιμές των λύσεων που παραβιάζουν τους περιορισμούς αυτούς, τυχαία μέσα στο εύρος τιμών της αντίστοιχης μεταβλητής. Τέλος, η τρίτη μέθοδος (Repair Algorithm 3) συνδυάζει τη λειτουργία των δύο παραπάνω αλγορίθμων. Συγκεκριμένα, για τα κάτω όρια που στο πρόβλημα της παρούσας εργασίας είναι πάντα μηδενικά, όταν παραβιάζονται οι τιμές των αντίστοιχων λύσεων τίθενται ίσες με τα όρια αυτές, δηλαδή μηδενικές, ενώ για τα πάνω όρια εφαρμόζεται η δεύτερη μέθοδος τυχαίου ορισμού των λύσεων στο πεδίο ορισμού των μεταβλητών.

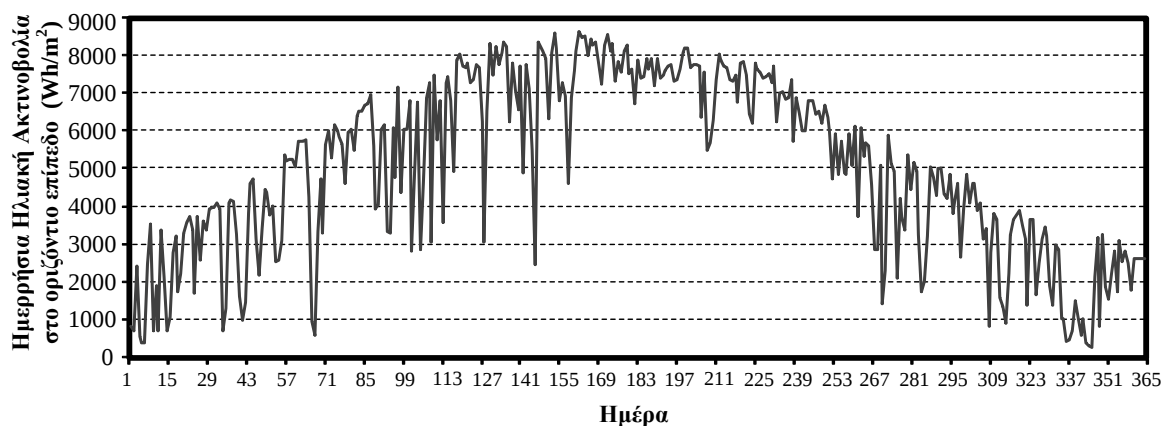
7.6 Σύγκλιση του αλγορίθμου

Ένα σημαντικό πρόβλημα που προκύπτει είναι το κριτήριο λήξης της εκτέλεσης ενός εξελικτικού 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 εξελικτικοί αλγόριθμοι προσεγγίζουν την περιοχή της βέλτιστης λύσης και δεν παγιδεύονται σε τοπικά βέλτιστες λύσεις. Το πιο απλό κριτήριο σύγκλισης, το οποίο και χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, είναι η εκτέλεση του αλγορίθμου για ένα συγκεκριμένο πλήθος επαναλήψεων.

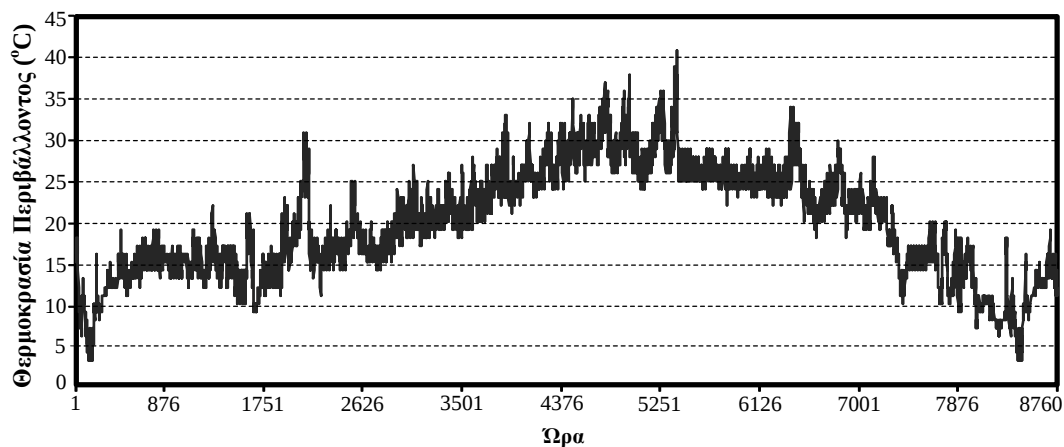
8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

8.1 Εισαγωγή

Οι μεθοδολογίες που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια εφαρμόστηκαν για το βέλτιστο σχεδιασμό διαφόρων περιπτώσεων συστημάτων συνδεδεμένων στο ηλεκτρικό δίκτυο της Ελλάδας. Η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (Σχήμα 8.1) και η μέση ωριαία θερμοκρασία (Σχήμα 8.2) αφορούν στα Χανιά Κρήτης και προέκυψαν μέσω μετρήσεων στο Πολυτεχνείο Κρήτης (γεωγραφικό πλάτος 35°).



Σχήμα 8.1: Η ημερήσια ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο για τα Χανιά Κρήτης.



Σχήμα 8.2: Η μέση ωριαία θερμοκρασία περιβάλλοντος για τα Χανιά Κρήτης.

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση
γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

Στον Πίνακα 8.1 παρουσιάζονται τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των συσκευών που επιλέχθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό. Οι συσκευές επιλέχθηκαν από ένα σύνολο ως ο συνδυασμός με τα βέλτιστα αποτελέσματα από πλευράς οικονομικής βιωσιμότητας. Για το επιλεγμένο Φ/Β πλαίσιο παρουσιάζεται η τάση ανοιχτοκύκλωσής του και το ρεύμα βραχυκύκλωσής του, $V_{OC,STC}$ και $I_{SC,STC}$ αντίστοιχα, η τάση και το ρεύμα του στο σημείο μέγιστης ισχύος του, V_M και I_M αντίστοιχα, η ονομαστική του ισχύς, η θερμοκρασία NCOT, το κόστος αγοράς του, C_{PV} , το κόστος συντήρησής του, M_{PV} , και οι διαστάσεις του, L_{pv1} και L_{pv2} . Για τον μετατροπέα ισχύος DC/AC παρουσιάζεται η απόδοσή του, η_{INV} , η ακρίβεια της λειτουργίας MPPT που περιλαμβάνει, η_{MPPT} , η ισχύς εισόδου του, P_{max} , ο μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών, MTBF, το κόστος αγοράς του, C_{INV} , το κόστος συντήρησής του, M_{INV} , το κόστος επισκευής του, R_{cost} , καθώς και η ελάχιστη και μέγιστη τάση εισόδου του, V_{imin} και V_{imax} αντίστοιχα.

Πίνακας 8.1 Χαρακτηριστικά των συσκευών που επιλέχθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων										
Χαρακτηριστικά Φ/Β πλαισίου										
$V_{OC,STC}$ (V)	$I_{SC,STC}$ (A)	V_M (V)	I_M (A)	Ονομαστική Ισχύς σε STC (W)	NCOT (°C)	C_{PV} (€)	M_{PV} (€/έτος)	L_{pv1} (m)	L_{pv2} (m)	
29	8	23,4	7,27	170	47	515	5,15	1,29	0,99	
Χαρακτηριστικά μετατροπέα ισχύος DC/AC										
η_{INV} (%)	η_{MPPT} (%)	P_{max} (W)	MTBF (ώρες)	C_{INV} (€)	M_{INV} (€/έτος)	V_{imin} (V)	V_{imax} (V)	R_{cost} (€)		
95,3	100	7000	219000	3008	45	335	560	30		

Στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται, το κόστος κατασκευής των μεταλλικών δομών των βάσεων στήριξης τέθηκε ίσο με 33 €/m και το κόστος κατασκευής των βάσεων από σκυρόδεμα ίσο με 230 €/m³, βάσει τιμών που ισχύουν στην αγορά κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Επίσης, σύμφωνα με τις συνθήκες της τοπικής αγοράς το ποσοστό του ετήσιου πληθωρισμού τέθηκε ίσο με 4%, ενώ το ποσοστό του ετήσιου επιτοκίου προεξόφλησης τέθηκε ίσο με 8%. Σύμφωνα με την ισχύουσα Ελληνική Νομοθεσία, κατά τη διεξαγωγή της παρούσας εργασίας, η παραγόμενη ενέργεια από Φ/Β συστήματα μη

διασυνδεδεμένων νησιών, όπως είναι η Κρήτη, πωλείται στο ηλεκτρικό δίκτυο της χώρας προς 0,5 €/KWh για συστήματα με εγκατεστημένη ισχύ έως 100KWp και προς 0,45 €/KWh για μεγαλύτερα συστήματα. Επίσης, ο χρόνος λειτουργίας του συστήματος τέθηκε ίσος με 25 χρόνια, όσος είναι και ο εγγυημένος χρόνος απόδοσης του Φ/Β πλαισίου που επιλέχθηκε. Στην παράγραφο 8.2 παρουσιάζονται διάφορα αποτελέσματα για τις μεθόδους PSO και Διαφορικής Εξέλιξης για ένα αντικειμενικό κριτήριο, της μεγιστοποίησης των οικονομικών οφελών, καθώς και συγκρίσεις μεταξύ τους και σε σχέση με τους Γενετικούς Αλγορίθμους. Στην παράγραφο 8.3 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα για τη δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση περιγραφής των περιβαλλοντικών οφελών και στην παράγραφο 8.4 παρουσιάζονται διάφορα αποτελέσματα και συγκρίσεις μεταξύ των αλγορίθμων βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων βασισμένων στις μεθόδους PSO και Διαφορικής Εξέλιξης που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία, για τη βελτιστοποίηση βάσει οικονομικών και περιβαλλοντικών οφελών του συστήματος.

8.2 Αποτελέσματα και συγκρίσεις μεθόδων Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και Διαφορικής Εξέλιξης για μια αντικειμενική συνάρτηση

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται διάφορα αποτελέσματα για τις μεθόδους PSO και Διαφορικής Εξέλιξης και προκύπτουν συγκρίσεις μεταξύ τους καθώς και σε σχέση με τους Γενετικούς Αλγορίθμους όσον αφορά στην αποδοτικότητα και την ταχύτητα σύγκλισης στη βέλτιστη λύση. Στους Πίνακες 8.2 και 8.3 παρουσιάζονται τα βέλτιστα αποτελέσματα σχεδιασμού, βάσει οικονομικών οφελών, ενός συστήματος με διαστάσεις έκτασης $DIM_1=10m$ (νότια πλευρά της έκτασης) και $DIM_2=100m$, για επιδότηση ύψους 0%, φορολογία ύψους 0% και μηδενικό κόστος έκτασης. Επίσης, για τα βελτιστοποίηση τα άνω όρια των δύο μεταβλητών απόφασης τέθηκαν ίσα με $BND_1=5000$ και $BND_2=100$ (Εξ. (7.12) – (7.13)). Η βέλτιστες τιμές των μεταβλητών απόφασης του προβλήματος μαζί με τη βέλτιστη δομή του συστήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.2, ενώ στον Πίνακα 8.3 παρουσιάζονται τα οικονομικά μεγέθη της επένδυσης στο συγκεκριμένο σύστημα Φ/Β πλαισίων.

Πίνακας 8.2 Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης βάσει οικονομικών οφελών στην περίπτωση μηδενικής φορολογίας και επιδότησης, μηδενικού κόστους έκτασης και διαστάσεων $DIM_1=10m$, $DIM_2=100m$.

Πλήθος Φ/Β πλαισίων	576
Αριθμός Γραμμών σε κάθε Στήλη	12
Κλίση Φ/Β πλαισίων	8°
Πλήθος μετατροπών DC/AC	16
Αριθμός Στηλών	7
Απόσταση μεταξύ Στηλών	2.70m
Αριθμός Φ/Β πλαισίων σε κάθε Γραμμή	7
Διάταξη Φ/Β πλαισίων σε μετατροπείς DC/AC	Σε 16 μετατροπείς: 2 παράλληλοι κλάδοι με 18 πλαίσια σε σειρά.

Πίνακας 8.3 Τα οικονομικά μεγέθη της επένδυσης στο σύστημα που περιγράφεται στον Πίνακα 8.2.

Καθαρή Παρούσα Αξία	544565,07€
Αρχικό Κεφάλαιο Επένδυσης	396433,79€
Κόστος Συντήρησης	65982,35€
Συνολικά Έσοδα	1006981,21€
Χρόνος Απόσβεσης	5,7 έτη
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης	22%

Η κλίση των Φ/Β πλαισίων που υπολογίζεται είναι σχετική μικρή, λόγω του προφίλ της ακτινοβολίας στην περιοχή της εγκατάστασης στην οποία παρουσιάζονται μεγάλα διαστήματα συννεφιάς κατά τη διάρκεια του Χειμώνα. Έτσι, η χαμηλή κλίση οδηγεί σε μεγιστοποίηση της διάχυτης ακτινοβολίας που απορροφάται, η οποία είναι η βασική συνιστώσα της ακτινοβολίας σε συνθήκες συννεφιάς, ενώ οδηγεί σε ταυτόχρονη μείωση του κόστους των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων, λόγω χαμηλότερου ύψους της κάθε στήλης. Επίσης, το χαμηλότερο ύψος των στηλών συμβάλλει στην καλύτερη αξιοποίηση της διαθέσιμης έκτασης, καθώς είναι ανάλογο της απόστασης που διατηρείται μεταξύ διαδοχικών στηλών. Οι παρούσες αξίες των συνιστωσών κόστους εγκατάστασης (αρχικό κεφάλαιο) και

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

συντήρησης αποτελούν το 39% και το 6,5%, αντίστοιχα, της παρούσας αξίας των συνολικών εσόδων της επένδυσης από την πώληση της παραγόμενης ενέργειας. Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στους Πίνακες 8.2 και 8.3 προέκυψαν με εφαρμογή της μεθόδου CPSO για ένα σμήνος 40 μελών και για μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα (v_{max}) για κάθε μεταβλητή ίση με το 20% του αντίστοιχου εύρους τιμών, το οποίο ορίζεται ίσο με τη διαφορά των δύο ορίων του. Η συγκεκριμένη λύση αποτελεί το ολικό βέλτιστο για το συγκεκριμένο πρόβλημα όπως προέκυψε και μέσω ελέγχου με χρήση ενός αλγορίθμου εξαντλητικής αναζήτησης. Ο συνολικός χρόνος για τον υπολογισμό της βέλτιστης λύσης με τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι περίπου ίσος με 15 δευτερόλεπτα, ενώ η αντίστοιχη επίλυσή του με εξαντλητική αναζήτηση υπερβαίνει τα 18 λεπτά.

Στους Πίνακες 8.4 – 8.6 παρουσιάζεται ο αριθμός των επαναλήψεων που απαιτούνται για τη σύγκλιση του αλγορίθμου PSO στην ολικά βέλτιστη λύση για το παραπάνω σύστημα, για διάφορα μεγέθη πληθυσμού (20 – 50 μέλη) και για τους τρεις διαφορετικούς τύπους αλγορίθμους PSO που περιγράφηκαν στο 3^ο κεφάλαιο, την απλή μέθοδο PSO, την inertia PSO και τη CPSO. Στα αποτελέσματα η μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα (v_{max}) για κάθε μεταβλητή τέθηκε ίση με το 20% του αντίστοιχου εύρους τιμών και στην περίπτωση της inertia PSO, το πλήθος των συνολικών επαναλήψεων τέθηκε ίσο με 400 ενώ η αρχική τιμή του συντελεστή αδράνειας ορίστηκε ίση με 0,9 και μειώνεται γραμμικά ως την τελική του τιμή, η οποία ορίστηκε ίση με 0,4. Σε όλες τις περιπτώσεις ο αλγόριθμος PSO συγκλίνει στη βέλτιστη λύση που παρουσιάζεται στους Πίνακες 8.2 και 8.3. Στους Πίνακες 8.4 – 8.6 εμφανίζονται με έντονα γράμματα οι περιπτώσεις για τις οποίες υπάρχει ταχύτερη σύγκλιση.

Πίνακας 8.4 Αριθμός επαναλήψεων για τη σύγκλιση του απλού αλγορίθμου PSO στη βέλτιστη λύση για διάφορα μεγέθη πληθυσμού.

<i>Μέγεθος Πληθυσμού:</i>	20	30	40	50
<i>Επαναλήψεις:</i>	62	45	11	53

Πίνακας 8.5 Αριθμός επαναλήψεων για τη σύγκλιση του απλού αλγορίθμου inertia PSO στη βέλτιστη λύση για διάφορα μεγέθη πληθυσμού.

<i>Μέγεθος Πληθυσμού:</i>	20	30	40	50
<i>Επαναλήψεις:</i>	160	248	286	200

Πίνακας 8.6 Αριθμός επαναλήψεων για τη σύγκλιση του απλού αλγορίθμου CPSO στη βέλτιστη λύση για διάφορα μεγέθη πληθυσμού.

<i>Μέγεθος Πληθυσμού:</i>	20	30	40	50
<i>Επαναλήψεις:</i>	22	16	8	9

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους Πίνακες 8.4 – 8.6, η ταχύτερη σύγκλιση επιτυγχάνεται με χρήση του αλγορίθμου CPSO και για σμήνος 40 σωματιδίων.

Η αποδοτικότητα του αλγορίθμου inertia PSO επηρεάζεται σημαντικά από την τελική τιμή του συντελεστή αδράνειας. Οι επαναλήψεις που απαιτούνται για τη σύγκλιση του αλγορίθμου για διάφορες τελικές τιμές του συντελεστή αδράνειας παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.7. Το πλήθος των μελών του πληθυσμού ορίστηκε ίσο με 20 καθώς για αυτό το μέγεθος σμήνους ο αλγόριθμος παρουσιάζει ταχύτερη σύγκλιση, όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.5. Σε όλες τις περιπτώσεις η αρχική τιμή του συντελεστή αδράνειας τέθηκε ίση με 0,9.

Πίνακας 8.7 Αριθμός επαναλήψεων για τη σύγκλιση του αλγορίθμου inertia PSO για διάφορες τελικές τιμές του συντελεστή αδράνειας.				
<i>Τελική τιμή του συντελεστή αδράνειας:</i>	0,4	0,2	0,1	0,01
<i>Επαναλήψεις:</i>	160	203	143	168

Από τον Πίνακα 8.7 προκύπτει ότι η ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου inertia PSO επηρεάζεται από την τελική τιμή του συντελεστή αδράνειας σημαντικά. Επίσης, προκύπτει ότι η ταχύτερη σύγκλιση επιτυγχάνεται για τελική τιμή ίση με 0,1.

Στον Πίνακα 8.8 παρουσιάζεται η επίδραση της μέγιστης επιτρεπτής ταχύτητας στην ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου CPSO. Συγκεκριμένα, η μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα, v_{max} , της κάθε μεταβλητής ορίζεται ως ποσοστό επί το εύρος τιμών της.

Πίνακας 8.8 Σύγκλιση του αλγορίθμου CPSO για διάφορες τιμές του v_{max}.					
<i>Ποσοστό v_{max}:</i>	50%	30%	20%	10%	1%
<i>Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης:</i>	544565,07	544565,07	544565,07	544565,07	534614,45
<i>Επαναλήψεις:</i>	17	16	8	25	8

Από τον Πίνακα 8.8 προκύπτει ότι η καλύτερη σύγκλιση επιτυγχάνεται για ποσοστό v_{max} ίσο με 20% ενώ για πολύ μικρά ποσοστά παρατηρείται αδυναμία σύγκλισης στο ολικό βέλτιστο και εγκλωβισμός σε υποδεέστερη λύση.

Τα αποτελέσματα των Πινάκων 8.4 – 8.8 προέκυψαν με εφαρμογή του πρώτου αλγορίθμου διόρθωσης (Repair Algorithm 1) που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 7.5. Στον Πίνακα 8.9 παρουσιάζονται οι επαναλήψεις που απαιτούνται από τον αλγόριθμο CPSO για τη σύγκλιση στη βέλτιστη λύση με χρήση σμήνους 40 σωματιδίων και για τους τρεις διαφορετικούς αλγορίθμους διόρθωσης που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 7.5.

Πίνακας 8.9 Αριθμός επαναλήψεις για τη σύγκλιση της CPSO στο ολικό βέλτιστο για διάφορες μεθόδους διόρθωσης			
<i>Μέθοδος Διόρθωσης:</i>	Repair Algorithm 1	Repair Algorithm 2	Repair Algorithm 3
<i>Επαναλήψεις:</i>	8	420	11

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 8.9 δείχνουν ότι ο πρώτος αλγόριθμος διόρθωσης οδηγεί σε ταχύτερη σύγκλιση, ενώ η χειρότερη επίδοση είναι αυτή της δεύτερης μεθόδου, με τυχαίο ορισμό των νέων λύσεων, με μεγάλη διαφορά από τις άλλες δύο.

Στους Πίνακες 8.10 – 8.13 παρουσιάζεται ο αριθμός των επαναλήψεων που απαιτούνται για τη σύγκλιση του αλγορίθμου Διαφορικής Εξέλιξης στη λύση που παρουσιάζεται στους Πίνακες 8.2 και 8.3, για διάφορα μεγέθη πληθυσμού (20 – 80 μέλη) και για τους τέσσερις διαφορετικούς τύπους αλγορίθμους Διαφορικής Εξέλιξης που περιγράφηκαν στο 3^ο κεφάλαιο, τους αλγορίθμους DE/Rand/1, DE/Rand/2, DE/Best/1 και DE/Best/2. Στους Πίνακες 8.10 – 8.13 εμφανίζονται με έντονα γράμματα οι περιπτώσεις για τις οποίες υπάρχει ταχύτερη σύγκλιση.

Πίνακας 8.10 Πλήθος Επαναλήψεων για τη σύγκλιση του αλγορίθμου DE/Rand/1 για διάφορα μεγέθη πληθυσμού.							
<i>Μέγεθος Πληθυσμού:</i>	20	30	40	50	60	70	80
<i>Επαναλήψεις:</i>	52	44	41	32	53	23	29

Πίνακας 8.11 Πλήθος Επαναλήψεων για τη σύγκλιση του αλγορίθμου DE/Rand/2 για διάφορα μεγέθη πληθυσμού.							
<i>Μέγεθος Πληθυσμού:</i>	20	30	40	50	60	70	80
<i>Επαναλήψεις:</i>	29	40	106	38	43	59	53

Πίνακας 8.12 Πλήθος Επαναλήψεων για τη σύγκλιση του αλγορίθμου DE/ Best /1 για διάφορα μεγέθη πληθυσμού.							
<i>Μέγεθος Πληθυσμού:</i>	20	30	40	50	60	70	80
<i>Επαναλήψεις:</i>	15	31	28	21	21	32	12

Πίνακας 8.13 Πλήθος Επαναλήψεων για τη σύγκλιση του αλγορίθμου DE/Best/2 για διάφορα μεγέθη πληθυσμού.							
<i>Μέγεθος Πληθυσμού:</i>	20	30	40	50	60	70	80
<i>Επαναλήψεις:</i>	21	10	27	25	54	50	5

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις ο αλγόριθμος Διαφορικής Εξέλιξης συγκλίνει στην ολικά βέλτιστη λύση με Καθαρή Παρούσα Αξία ίση με 544565,07 €, εκτός στις περιπτώσεις εφαρμογής των μεθόδων DE/Best/1 και DE/Best/2 για 20 μέλη πληθυσμού. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο αλγόριθμος Διαφορικής Εξέλιξης συγκλίνει σε μια υπο-βέλτιστη λύση με Καθαρή Παρούσα Αξία ίση με 534149,18 €. Από τα αποτελέσματα των Πινάκων 8.10 – 8.13 προκύπτει ότι η ταχύτερη σύγκλιση επιτυγχάνεται με τον αλγόριθμο DE/Best/2 για 80 μέλη

πληθυσμού. Ο χρόνος που απαιτείται για τη σύγκλιση του αλγορίθμου Διαφορικής Εξέλιξης είναι της τάξης μόλις των δέκα δευτερολέπτων.

Τα αποτελέσματα των Πινάκων 8.10 – 8.13 προέκυψαν με εφαρμογή του πρώτου αλγορίθμου διόρθωσης (Repair Algorithm 1) που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 7.5. Στον Πίνακα 8.14 παρουσιάζονται οι επαναλήψεις που απαιτούνται για κάθε ένα από τους τέσσερις αλγορίθμους Διαφορικής Εξέλιξης για τη σύγκλιση στη βέλτιστη λύση με χρήση των βέλτιστων μελών ανά πληθυσμό που προκύπτουν από τους Πίνακες 8.10 – 8.13, και για τους τρεις διαφορετικούς αλγορίθμους διόρθωσης που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 7.5.

Πίνακας 8.14 Αριθμός Επαναλήψεων για τους 4 τύπους Διαφορικής Εξέλιξης με χρήση διαφορετικών μεθόδων διόρθωσης			
<i>Μέθοδος Διόρθωσης:</i>	Repair Algorithm 1	Repair Algorithm 2	Repair Algorithm 3
<i>Επαναλήψεις με χρήση του DE/Rand/1:</i>	23	58	13
<i>Επαναλήψεις με χρήση του DE/Rand/2:</i>	29	61	85
<i>Επαναλήψεις με χρήση του DE/Best/1:</i>	12	25	21
<i>Επαναλήψεις με χρήση του DE/Best/2:</i>	5	20	26

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 8.14 προκύπτει ότι ο πρώτος αλγόριθμος διόρθωσης λειτουργεί γενικά καλύτερα.

Στον Πίνακα 8.15 συγκρίνονται οι αλγόριθμοι PSO, Διαφορικής Εξέλιξης καθώς και οι Γενετικοί Αλγόριθμοι για το βέλτιστο σχεδιασμό διαφόρων συστημάτων. Η πρώτη περίπτωση (Σύστημα 1) αφορά στο σύστημα που παρουσιάστηκε στους Πίνακες 8.2 και 8.3. Οι άλλες δύο περιπτώσεις αφορούν σε συστήματα μεγαλύτερης κλίμακας και συγκεκριμένα σε διαστάσεις έκτασης ίσες με $DIM_1=40m$ (νότια πλευρά της έκτασης) και $DIM_2=100m$ (Σύστημα 2) και $DIM_1=100m$ και $DIM_2=40m$ (Σύστημα 3). Επίσης, για τα βελτιστοποιήσιμα άνω όρια των δύο μεταβλητών απόφασης για το Σύστημα 1 και το Σύστημα 2 τέθηκαν ίσα με $BND_1=5000$ και $BND_2=100$ (Εξ. (7.12) – (7.13)).

Πίνακας 8.15 Σύγκριση των μεθόδων PSO, Διαφορικής Εξέλιξης (DE) και Γενετικών Αλγορίθμων (GAs) για το σχεδιασμό διαφόρων συστημάτων				
		Σύστημα 1	Σύστημα 2	Σύστημα 3
CPSO	Βέλτιστη Λύση:	544565,07	2341771,12	2387486,65
	Επαναλήψεις:	8	71	23
DE	Βέλτιστη Λύση:	544 565,07	2341771,12	2387486,65
	Επαναλήψεις:	5	15	16
GAs	Βέλτιστη Λύση:	534614,45	2341771,12	2387486,65
	Επαναλήψεις:	50	1369	2322

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.15, οι Γενετικοί Αλγόριθμοι δεν κατορθώνουν σε μια περίπτωση (Σύστημα 1) να εντοπίσουν το ολικό βέλτιστο. Οι άλλες δύο μέθοδοι βρίσκουν τα ολικά βέλτιστα σε κάθε περίπτωση, όπως προκύπτει μέσω ελέγχου και με κατάλληλο αλγόριθμο εξαντλητικής αναζήτησης. Η ταχύτερη σύγκλιση επιτυγχάνεται με χρήση του αλγορίθμου Διαφορικής Εξέλιξης. Ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου εξαντλητικής αναζήτησης για τα 2 μεγαλύτερα συστήματα αγγίζει τις 3,5 ώρες, των Γενετικών Αλγορίθμων περίπου τα 2 – 3 λεπτά, ενώ οι αλγόριθμοι PSO και Διαφορικής Εξέλιξης χρειάζονται μόλις 10 – 15 δευτερόλεπτα.

Η χρήση διαφορετικών οικονομικών παραμέτρων οδηγεί ουσιαστικά στη διαμόρφωση μιας διαφορετικής αντικειμενικής συνάρτησης. Στον Πίνακα 8.16 παρουσιάζεται το πλήθος των επαναλήψεων που απαιτούνται από τις μεθόδους PSO, Διαφορικής Εξέλιξης καθώς και Γενετικών Αλγορίθμων για το σύστημα που παρουσιάστηκε στους Πίνακες 8.2 και 8.3 στην περίπτωση που ο ετήσιος πληθωρισμός μειώνεται στο 3%, το ετήσιο προεξοφλητικό επιτόκιο στο 4,5% και οι τιμές πώλησης της ενέργειας που παράγεται μειώνεται κατά 0,05€/KWh.

Πίνακας 8.16 Η σύγκλιση των μεθόδων CPSO, Διαφορικής Εξέλιξης (DE) και Γενετικών Αλγορίθμων (GAs) για το σύστημα που παρουσιάζεται στους Πίνακες 8.2 και 8.3 και με χρήση διαφορετικών οικονομικών παραμέτρων			
	DE	CPSO	GAs
Βέλτιστη Λύση:	778472,44	778472,44	777798,87
Επαναλήψεις:	26	56	23643

Στον Πίνακα 8.16 φαίνεται οι Γενετικοί Αλγόριθμοι αδυνατούν να εντοπίσουν το ολικό βέλτιστο αλλά εγκλωβίζονται σε μια κατώτερη λύση, ενώ το πλήθος των απαιτούμενων επαναλήψεων για τη σύγκλιση στην τελική λύση επηρεάζεται σημαντικά από τις οικονομικές παραμέτρους της αντικειμενικής συνάρτησης και αυξάνεται δραματικά. Για τις συγκεκριμένες εισόδους, το πλήθος των απαιτούμενων επαναλήψεων αυξάνεται και για τις άλλες δύο μεθόδους αλλά σε μικρό και μάλλον ασήμαντο βαθμό.

8.3 Αποτελέσματα αντικειμενικής συνάρτησης περιβαλλοντικών οφελών

Με χρήση των ίδιων εισόδων που περιγράφονται στην παράγραφο 8.2 και για τις οποίες προέκυψε το σύστημα που περιγράφεται στους Πίνακες 8.2 και 8.3 εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος CPSO, με χρήση 40 σωματιδίων, για το βέλτιστο σχεδιασμό του συστήματος Φ/Β πλαισίων βάσει περιβαλλοντικών οφελών. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.17. Οι εισοδοί που σχετίζονται με την περιβαλλοντική ανάλυση του συστήματος προέρχονται από τους Πίνακες 5.1 και 5.2. Έτσι, για το Φ/Β σύστημα χρησιμοποιήθηκε η τιμή των 98 gr/KWh για την περιγραφή των εκπομπών CO₂ κατά τη λειτουργία του και η τιμή των 1392,1 kg/KWp για την περιγραφή των εκπομπών CO₂ που απαιτούνται που απαιτούνται για την κατασκευή και εγκατάστασή του. Επίσης, ως συμβατική πηγή αναφοράς για τα περιβαλλοντικά οφέλη θεωρείται το πετρέλαιο, για την οποία η αντίστοιχη τιμή περιγραφής των εκπομπών CO₂ κατά τη λειτουργία του αντίστοιχου συστήματος παραγωγής ενέργειας θεωρείται ίση με 818 gr/KWh.

Πίνακας 8.17 Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης βάσει περιβαλλοντικών οφελών για τις ίδιες εισόδους για τις οποίες προέκυψε το σύστημα που περιγράφεται στον Πίνακα 8.2 και στον Πίνακα 8.3.	
Πλήθος Φ/Β πλαισίων	684
Αριθμός Γραμμών σε κάθε Στήλη	100
Κλίση Φ/Β πλαισίων	27°
Πλήθος μετατροπών DC/AC	19
Αριθμός Στηλών	1
Απόσταση μεταξύ Στηλών	-
Αριθμός Φ/Β πλαισίων σε κάθε Γραμμή	7
Διάταξη Φ/Β πλαισίων σε μετατροπείς DC/AC	Σε 19 μετατροπείς: 2 παράλληλοι κλάδοι με 18 πλαίσια σε σειρά.
Καθαρή Παρούσα Αξία	288270,77€
Αρχικό Κεφάλαιο Επένδυσης	747597,27€
Κόστος Συντήρησης	69512,96€
Συνολικά Έσοδα	1105381€
Χρόνος Απόσβεσης	12,3έτη
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης	13%
Συνολικό Περιβαλλοντικό Όφελος	3980155,97 kg CO ₂
Εκπομπές αερίων που αποφεύγονται κατά τη λειτουργία του συστήματος	4142029,36 kg CO ₂
Εκπομπές αερίων που απαιτούνται για την κατασκευή του συστήματος	161873,39 kg CO ₂

Η λύση που παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.17 είναι η ολικά βέλτιστη βάσει του αντικειμενικού κριτηρίου των περιβαλλοντικών οφελών όπως προέκυψε και με χρήση ενός κατάλληλου αλγορίθμου εξαντλητικής αναζήτησης. Στον Πίνακα 8.17 παρουσιάζονται εκτός των άλλων και τα στοιχεία της περιβαλλοντικής ανάλυσης του συστήματος. Από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει ότι οι εκπομπές αερίων που εκλύονται κατά την κατασκευή

και εγκατάσταση του συγκεκριμένου συστήματος αντιστοιχούν μόλις στο 4% περίπου των συνολικών εκπομπών αερίων που αποφεύγονται εξαιτίας της χρήσης του για όλη τη διάρκεια ζωής του και που θα εκλύονταν με χρήση ενός ενεργειακού συστήματος βασισμένου στο πετρέλαιο για την παραγωγή του ίδιας ποσότητας ενέργειας. Παρατηρείται ότι επιλέγεται η κλίση των 27° για την οποία ένα Φ/Β πλαίσιο εγκατεστημένο στα Χανιά Κρήτης έχει τη μέγιστη δυνατή ενεργειακή παραγωγή κατά τη διάρκεια ενός έτους, βάσει των μοντέλων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία. Αυτό έχει ως συνέπεια, σε συνδυασμό με τη χρήση του μέγιστου δυνατού πλήθους Φ/Β πλαισίων που μπορούν να τοποθετηθούν στη διαθέσιμη έκταση και με την εγκατάστασή τους σε μία μόνο στήλη, τη μέγιστη δυνατή ενεργειακή παραγωγή του συστήματος και συνεπώς το μέγιστο δυνατό περιβαλλοντικό όφελος, το οποίο είναι ανάλογο της ενέργειας που παράγεται. Η συγκεκριμένη λύση, όπως είναι αναμενόμενο, είναι σημαντικά υποδεέστερη αυτής που παρουσιάστηκε στους Πίνακες 8.2 και 8.3 όσον αφορά στο οικονομικό όφελος του συστήματος. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο συστημάτων προκύπτει ότι η Καθαρή Παρούσα Αξία του δεύτερου συστήματος είναι περίπου η μισή σε σχέση με το πρώτο σύστημα, όπως ισχύει περίπου και με τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης της επένδυσης (περίπου μειωμένος κατά 41%), ενώ ο χρόνος απόσβεσης του συστήματος αυξάνεται σημαντικά κατά περίπου 115%. Ο κύριος λόγος για την υποβάθμιση αυτών των οικονομικών μεγεθών είναι η σημαντική αύξηση του αρχικού κεφαλαίου που απαιτείται για την εγκατάσταση του συστήματος, η οποία οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη διαφορετική δομή του δεύτερου συστήματος και στο αυξημένο κόστος κατασκευής των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων. Ένα σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει από τη σύγκριση των δύο συστημάτων είναι το γεγονός ότι η βελτιστοποίηση βάσει των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων οδηγεί σε δύο εντελώς διαφορετικά συστήματα. Αυτό ουσιαστικά σημαίνει ότι τα δύο κριτήρια χαρακτηρίζονται από αμοιβαίο ανταγωνισμό και επομένως η ανάλυση της βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων βάσει αυτών είναι ιδιαίτερης σημασίας.

Στον Πίνακα 8.18 συγκρίνονται οι αλγόριθμοι PSO, Διαφορικής Εξέλιξης καθώς και οι Γενετικοί Αλγόριθμοι για το βέλτιστο σχεδιασμό διαφόρων συστημάτων βάσει της αντικειμενικής συνάρτησης των περιβαλλοντικών οφελών. Η πρώτη περίπτωση (Σύστημα 1) αφορά στο σύστημα που παρουσιάστηκε στον Πίνακα 8.17. Οι άλλες δύο περιπτώσεις αφορούν σε συστήματα μεγαλύτερης κλίμακας και συγκεκριμένα σε διαστάσεις έκτασης ίσες με $DIM_1=40m$ (νότια πλευρά της έκτασης) και $DIM_2=100m$ (Σύστημα 2) και $DIM_1=100m$

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

και $DIM_2=40m$ (Σύστημα 3). Επίσης, για τα βελτιστοποίηση τα άνω όρια των δύο μεταβλητών απόφασης για το Σύστημα 1 και το Σύστημα 2 τέθηκαν ίσα με $BND_1=5000$ και $BND_2=100$ (Εξ. (7.12) – (7.13)).

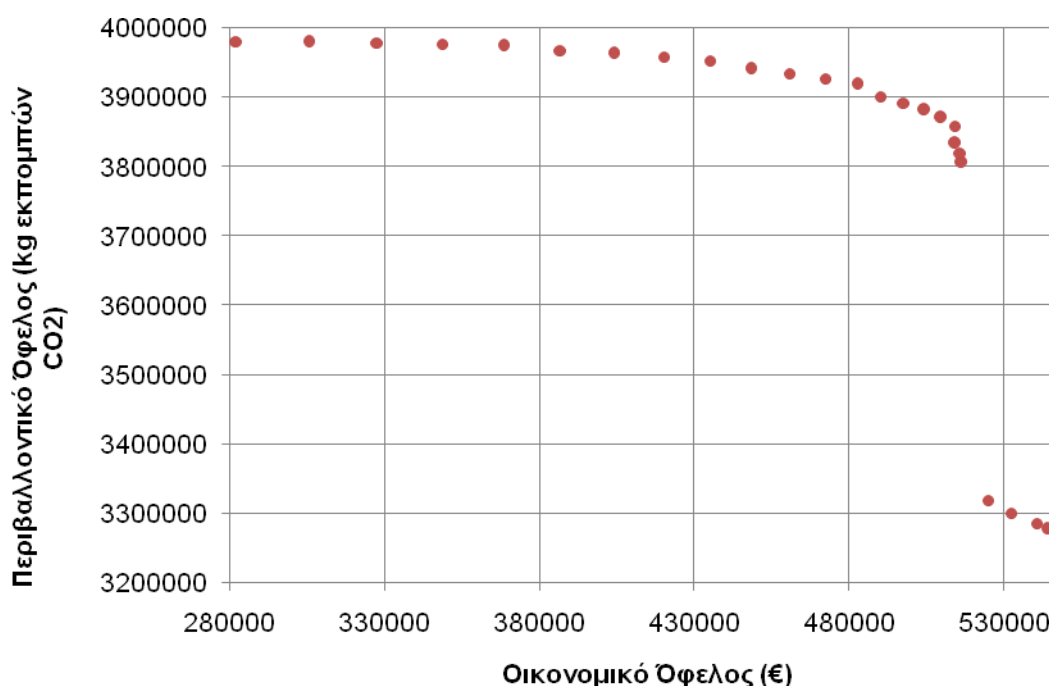
Πίνακας 8.18 Σύγκριση των μεθόδων PSO, Διαφορικής Εξέλιξης (DE) και Γενετικών Αλγορίθμων (GAs) για το σχεδιασμό διαφόρων συστημάτων βάσει της αντικειμενικής συνάρτησης των περιβαλλοντικών οφελών				
		Σύστημα 1	Σύστημα 2	Σύστημα 3
CPSO	Βέλτιστη Λύση:	3980155,97	18015442,8	7652239,9
	Επαναλήψεις:	4	4	26
DE	Βέλτιστη Λύση:	3980155,97	18015442,8	7652239,9
	Επαναλήψεις:	9	6	34
GAs	Βέλτιστη Λύση:	3980155,97	18015442,8	7652239,9
	Επαναλήψεις:	35	64	176

Από τον Πίνακα 8.18 προκύπτει ότι και οι τρεις αλγόριθμοι συγκλίνουν στις βέλτιστες λύσεις. Ωστόσο, η ταχύτερη σύγκλιση επιτυγχάνεται με χρήση της μεθόδου CPSO, ενώ η διαφορά με τον αλγόριθμο Διαφορικής Εξέλιξης είναι της τάξης των ms.

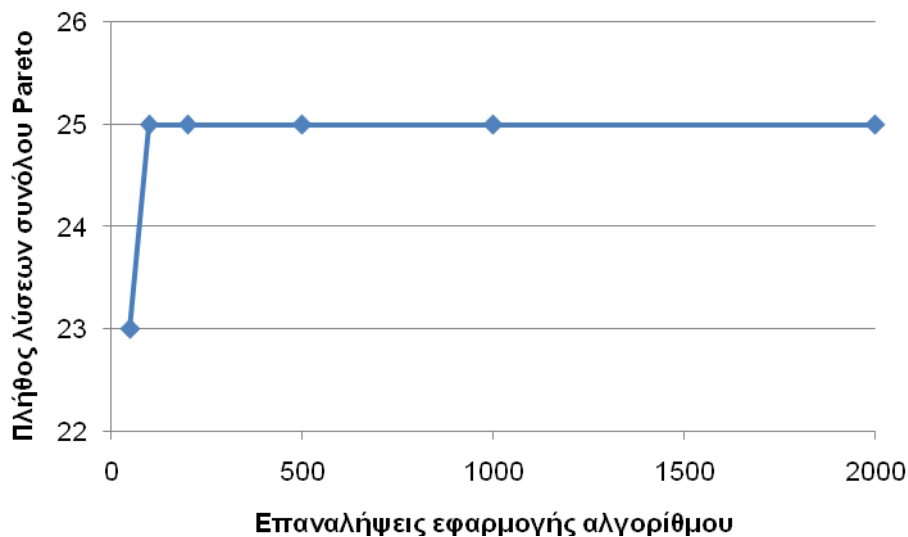
8.4 Αποτελέσματα των αλγορίθμων βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων που αναπτύχθηκαν

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης με βάση τις αντικειμενικές συναρτήσεις των οικονομικών και των περιβαλλοντικών οφελών των συστημάτων Φ/Β πλαισίων που περιγράφονται στο 7^ο Κεφάλαιο. Για την βελτιστοποίηση

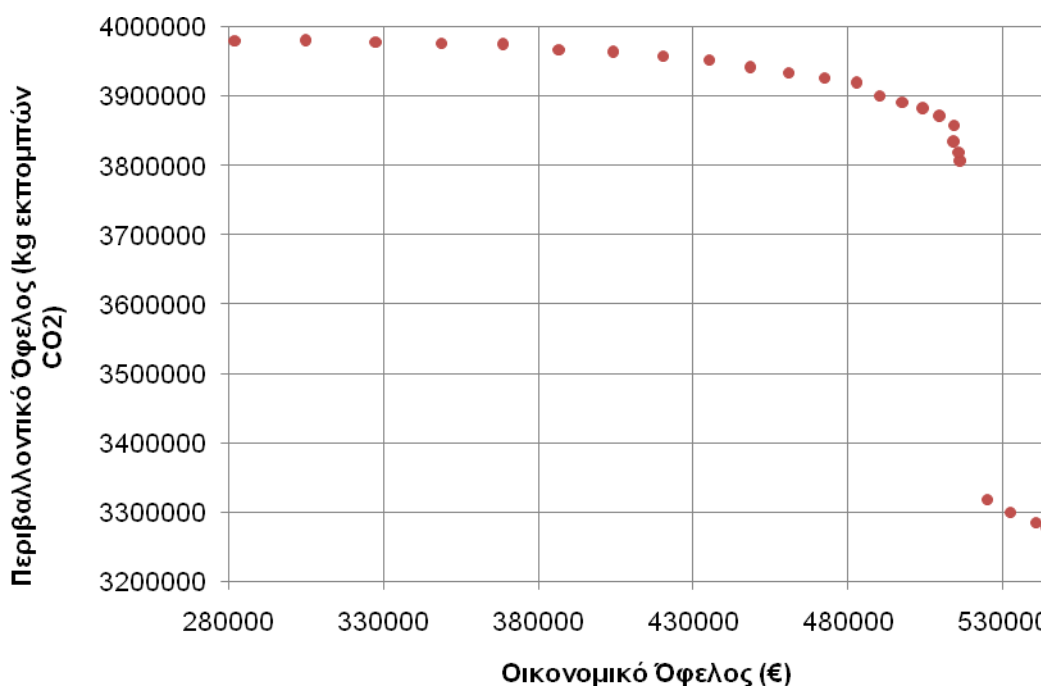
πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων χρησιμοποιούνται οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία και παρουσιάζονται στο 4^ο Κεφάλαιο (μέθοδοι M-PSO, M-iPSO, M-CPSO, MP-PSO, MP-iPSO, MP-CPSO, MP-DErand1, MP-DErand2, MP-DEbest1 και MP-DEbest2). Στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω χρησιμοποιούνται οι ίδιες παράμετροι εισόδου με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την επιμέρους βελτιστοποίηση των συστημάτων που παρουσιάζονται στους Πίνακες 8.2, 8.3 και 8.17 και αναφέρονται σε ένα σύστημα με διαστάσεις έκτασης $DIM_1=10m$ (νότια πλευρά της έκτασης) και $DIM_2=100m$, επιδότηση ύψους 0%, φορολογία ύψους 0% και μηδενικό κόστος έκτασης. Επίσης, για τα βελτιστοποιήσιμα τα άνω όρια των δύο μεταβλητών απόφασης τέθηκαν ίσα με $BND_1=5000$ και $BND_2=100$ (Εξ. (7.12) – (7.13)). Στα Σχήματα 8.18 – 8.37 παρουσιάζονται οι λύσεις του μετώπου Pareto για την εφαρμογή 2000 επαναλήψεων ως προς τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις και το πλήθος των λύσεων του μετώπου Pareto ανάλογα με τις επαναλήψεις εφαρμογής του αλγορίθμου για κάθε έναν από τους αλγορίθμους που αναπτύχθηκαν.



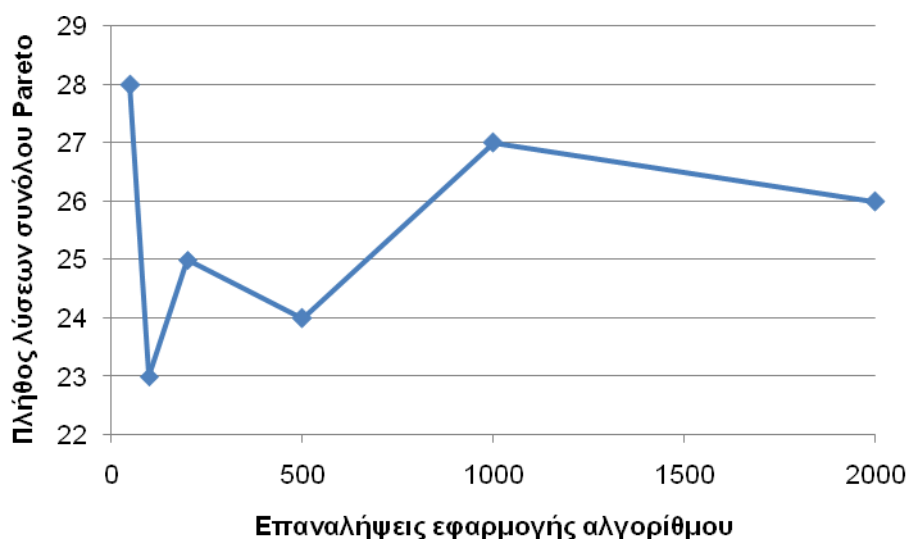
Σχήμα 8.18: Το σύνολο των λύσεων του μετώπου Pareto μετά από την εφαρμογή 2000 επαναλήψεων του αλγορίθμου M-PSO.



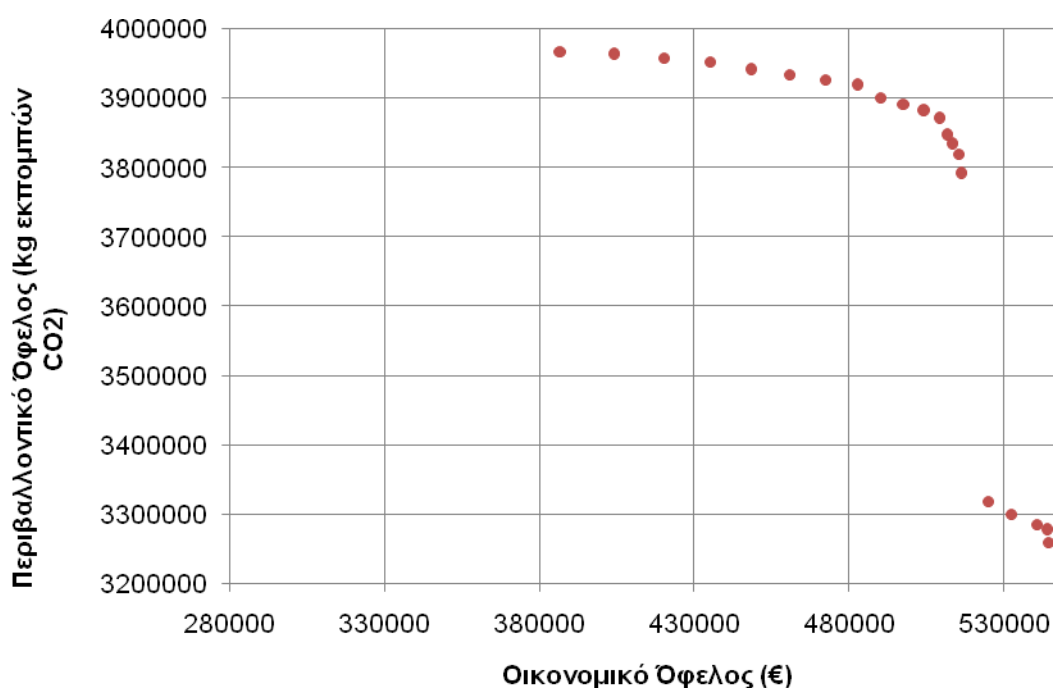
Σχήμα 8.19: Το πλήθος των λύσεων του μετώπου Pareto για διάφορες επαναλήψεις του αλγορίθμου M-PSO.



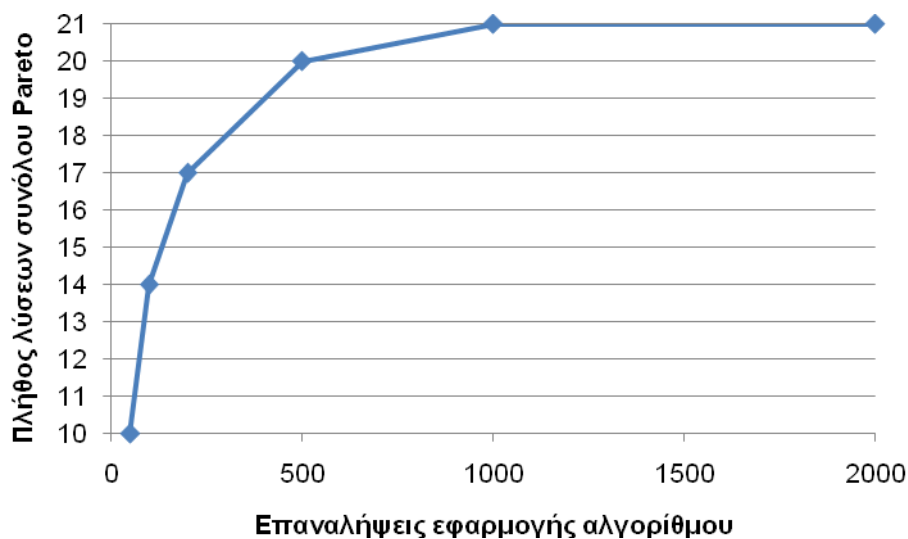
Σχήμα 8.20: Το σύνολο των λύσεων του μετώπου Pareto μετά από την εφαρμογή 2000 επαναλήψεων του αλγορίθμου M-iPSO.



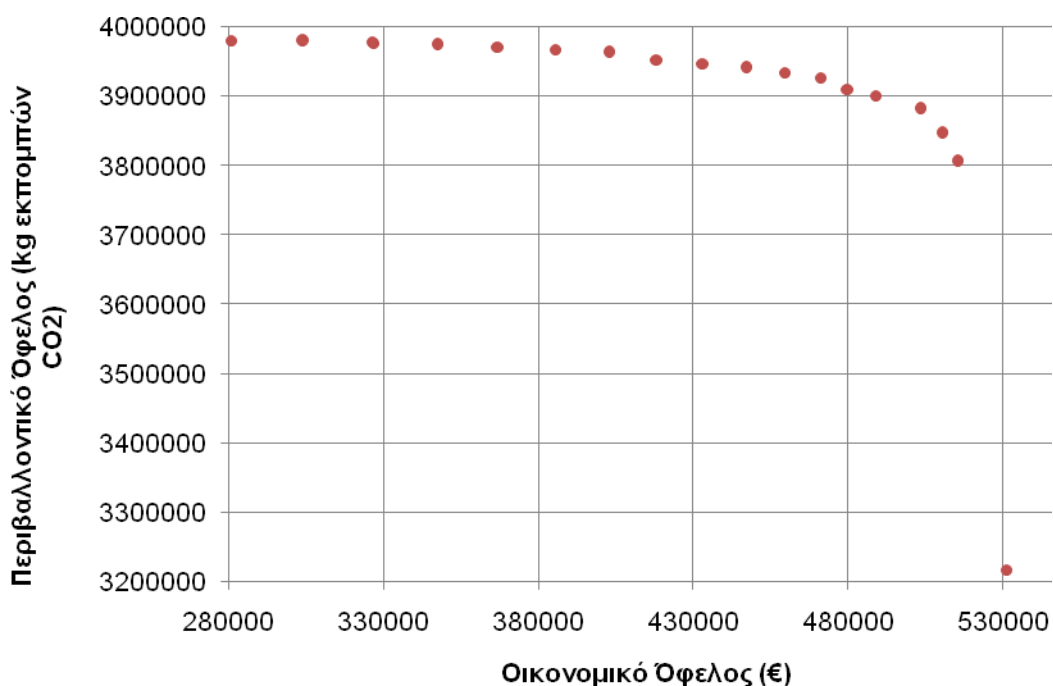
Σχήμα 8.21: Το πλήθος των λύσεων του μετώπου Pareto για διάφορες επαναλήψεις του αλγορίθμου M-iPSO.



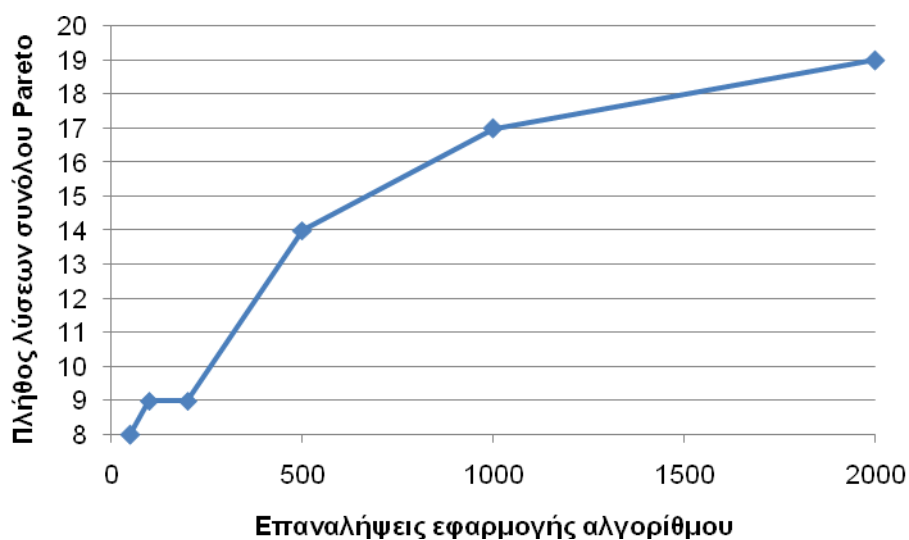
Σχήμα 8.22: Το σύνολο των λύσεων του μετώπου Pareto μετά από την εφαρμογή 2000 επαναλήψεων του αλγορίθμου M-CPSO.



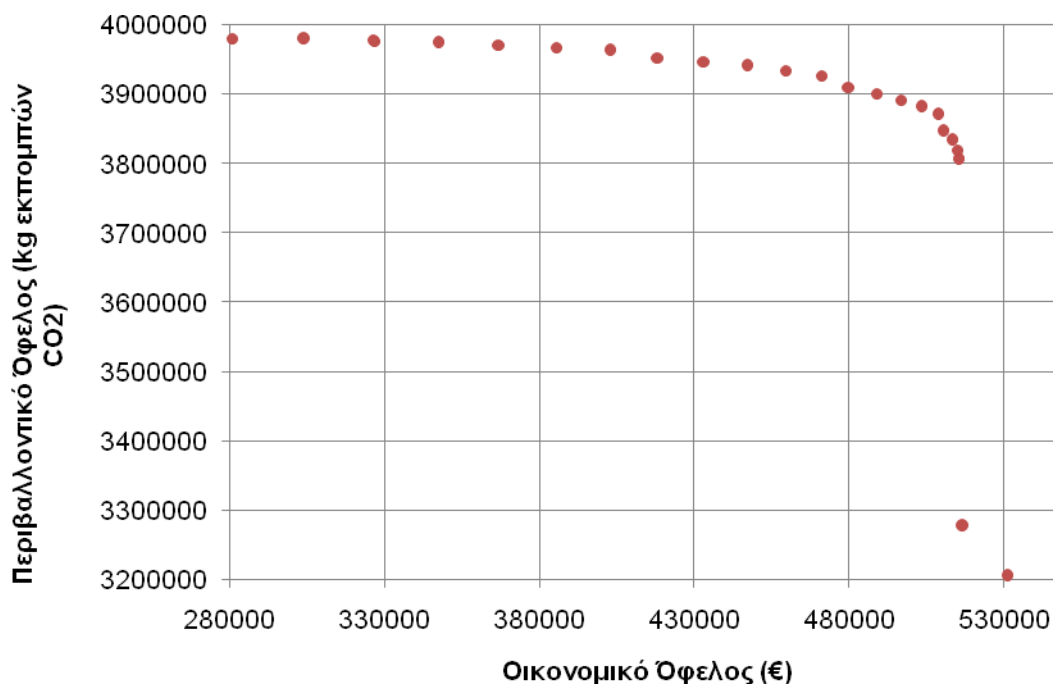
Σχήμα 8.23: Το πλήθος των λύσεων του μετώπου Pareto για διάφορες επαναλήψεις του αλγορίθμου M-CPSO.



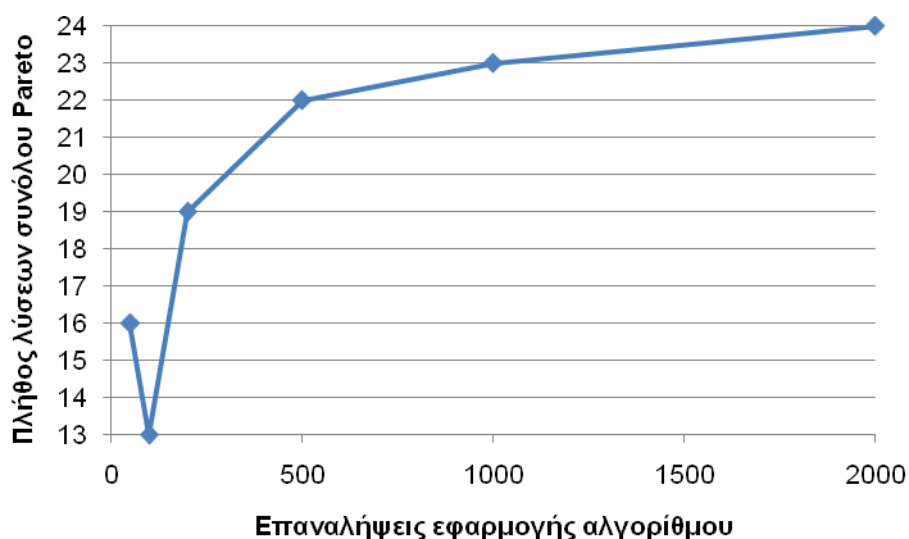
Σχήμα 8.24: Το σύνολο των λύσεων του μετώπου Pareto μετά από την εφαρμογή 2000 επαναλήψεων του αλγορίθμου MP-PSO.



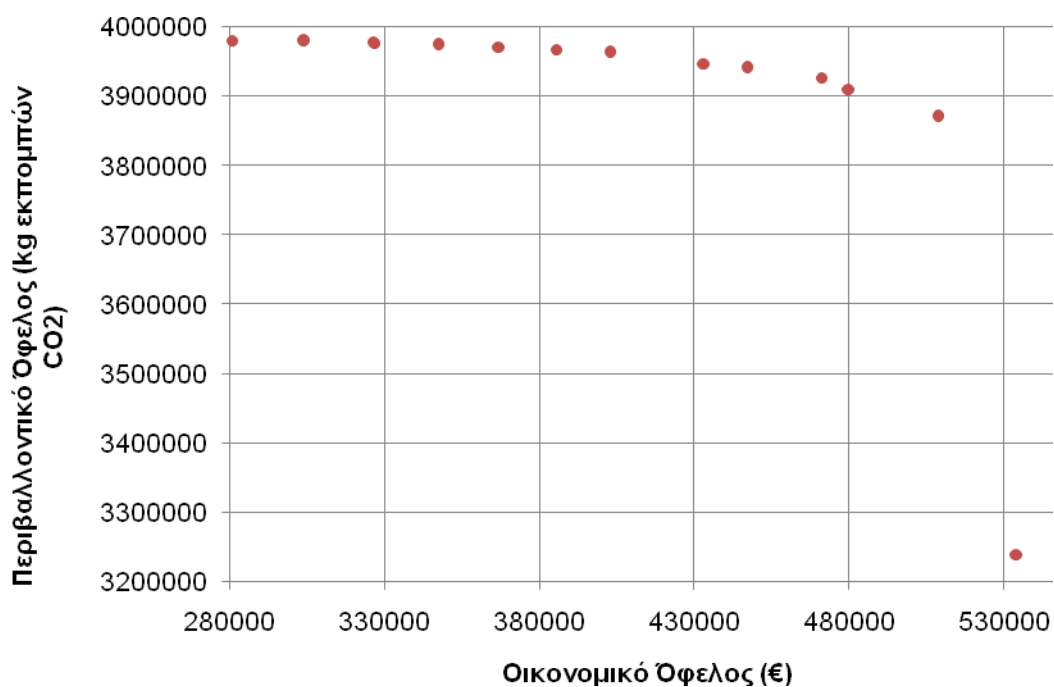
Σχήμα 8.25: Το πλήθος των λύσεων του μετώπου Pareto για διάφορες επαναλήψεις του αλγορίθμου MP-PSO.



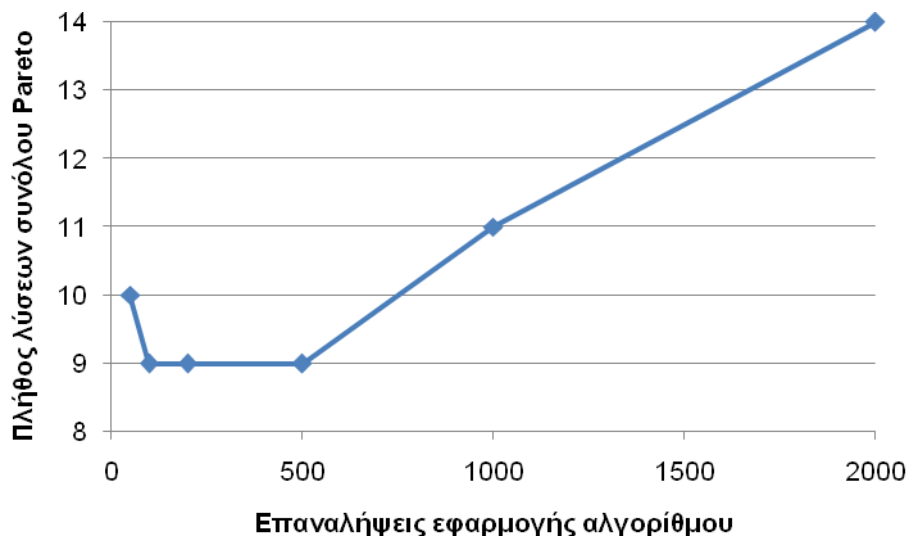
Σχήμα 8.26: Το σύνολο των λύσεων του μετώπου Pareto μετά από την εφαρμογή 2000 επαναλήψεων του αλγορίθμου MP-iPSO.



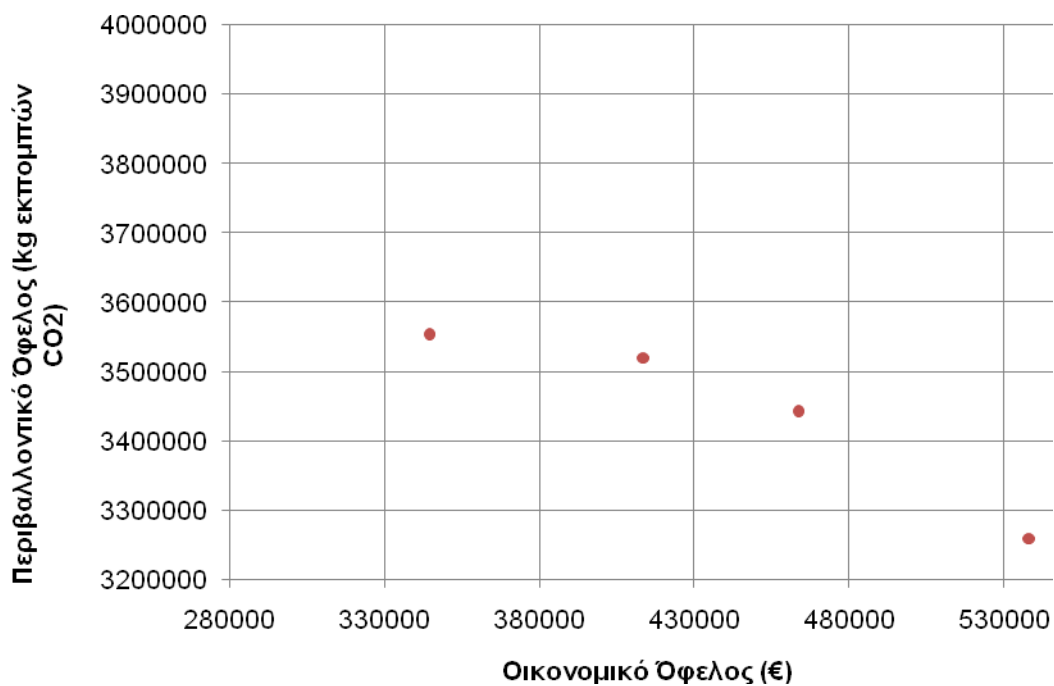
Σχήμα 8.27: Το πλήθος των λύσεων του μετώπου Pareto για διάφορες επαναλήψεις του αλγορίθμου MP-iPSO.



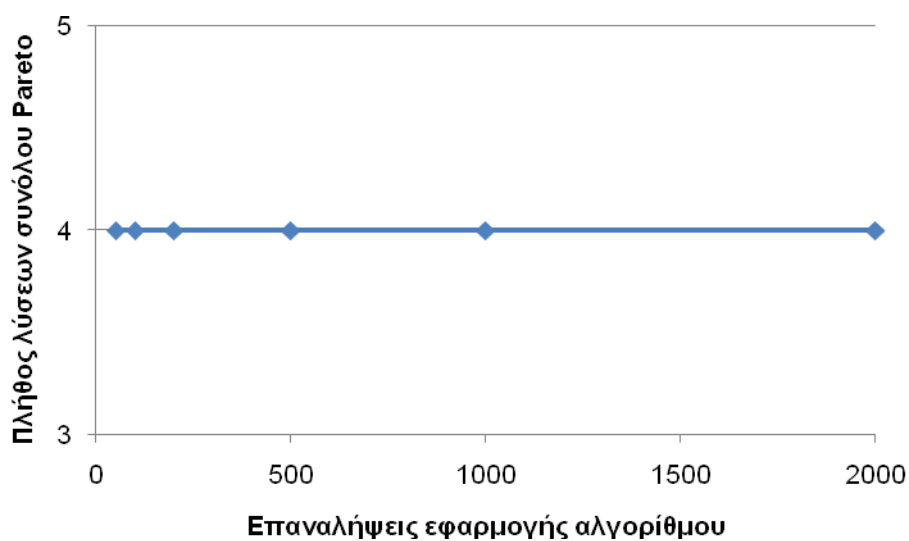
Σχήμα 8.28: Το σύνολο των λύσεων του μετώπου Pareto μετά από την εφαρμογή 2000 επαναλήψεων του αλγορίθμου MP-CPSO.



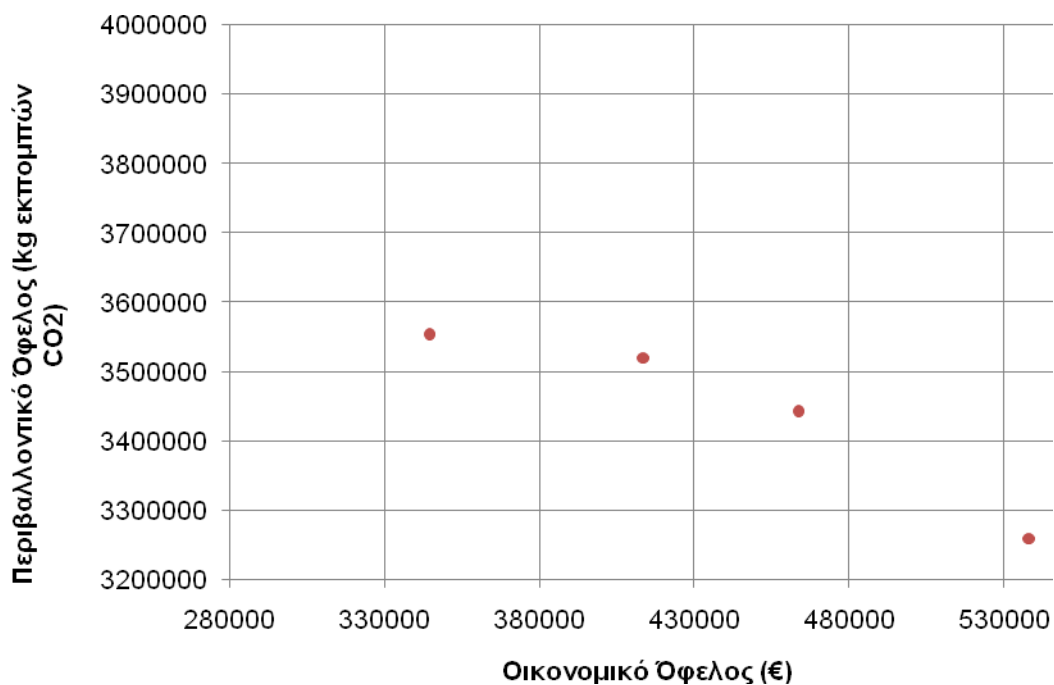
Σχήμα 8.29: Το πλήθος των λύσεων του μετώπου Pareto για διάφορες επαναλήψεις του αλγορίθμου MP-CPSO.



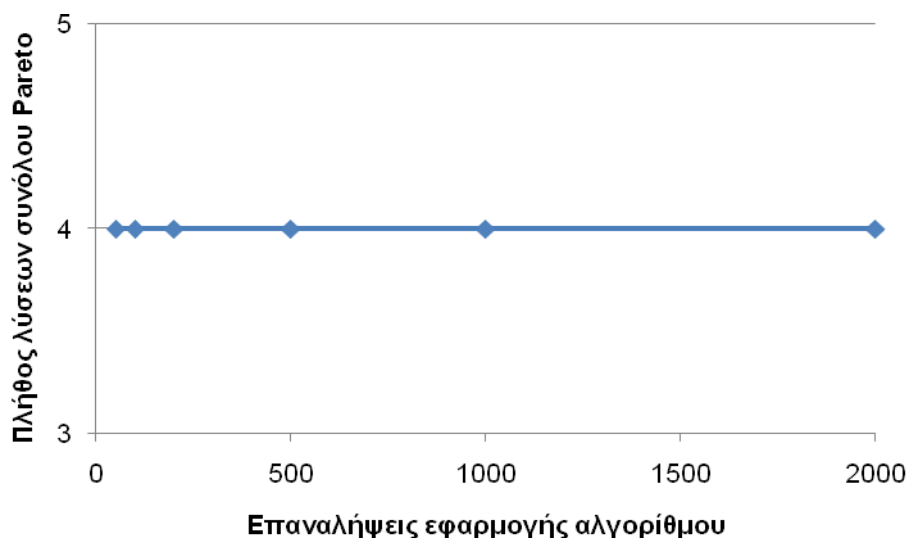
Σχήμα 8.30: Το σύνολο των λύσεων του μετώπου Pareto μετά από την εφαρμογή 2000 επαναλήψεων του αλγορίθμου MP-DErand1.



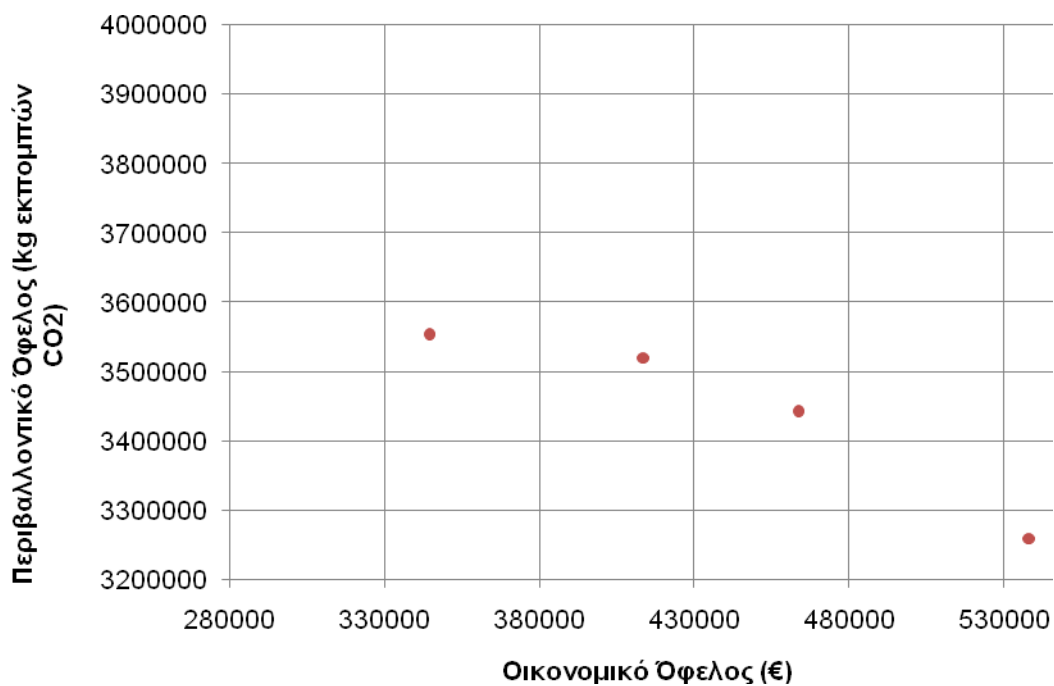
Σχήμα 8.31: Το πλήθος των λύσεων του μετώπου Pareto για διάφορες επαναλήψεις του αλγορίθμου MP-DErand1.



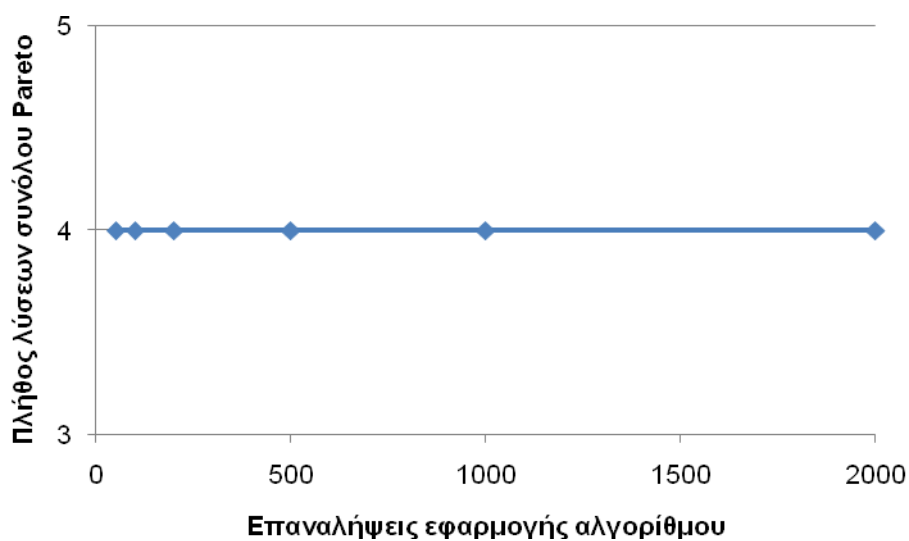
Σχήμα 8.32: Το σύνολο των λύσεων του μετώπου Pareto μετά από την εφαρμογή 2000 επαναλήψεων του αλγορίθμου MP-DErand2.



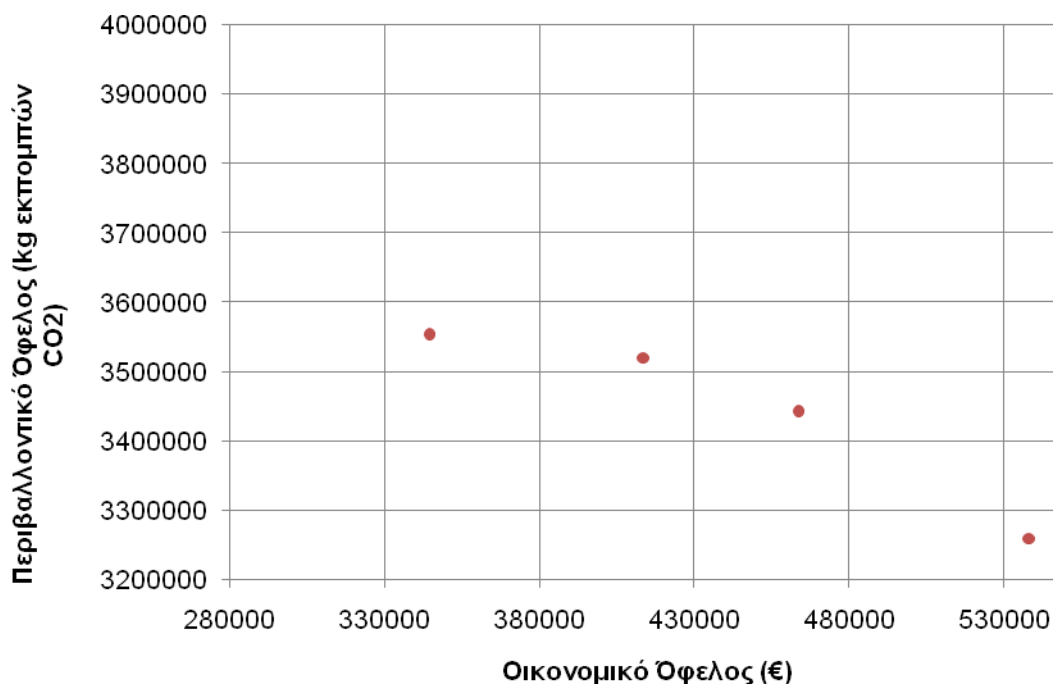
Σχήμα 8.33: Το πλήθος των λύσεων του μετώπου Pareto για διάφορες επαναλήψεις του αλγορίθμου MP-DErand2.



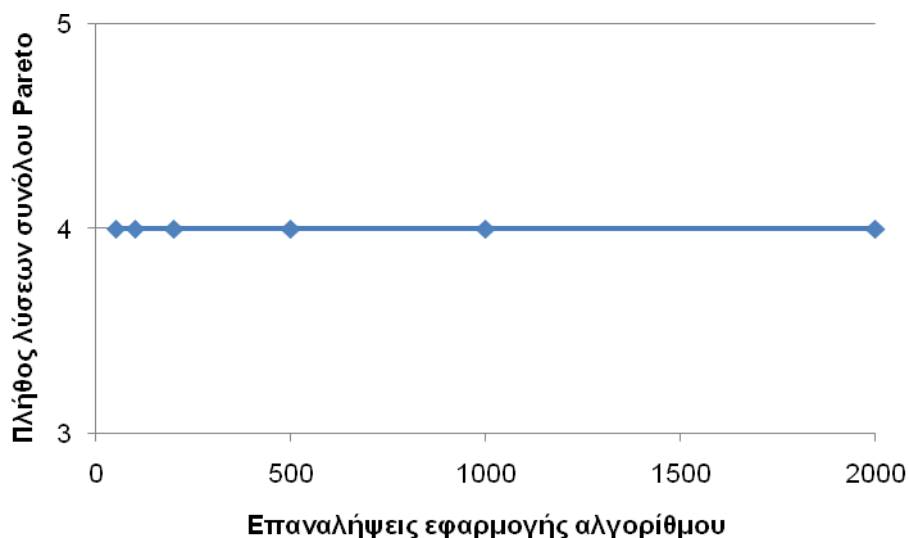
Σχήμα 8.34: Το σύνολο των λύσεων του μετώπου Pareto μετά από την εφαρμογή 2000 επαναλήψεων του αλγορίθμου MP-Debest1.



Σχήμα 8.35: Το πλήθος των λύσεων του μετώπου Pareto για διάφορες επαναλήψεις του αλγορίθμου MP-Debest1.



Σχήμα 8.36: Το σύνολο των λύσεων του μετώπου Pareto μετά από την εφαρμογή 2000 επαναλήψεων του αλγορίθμου MP-Debest2.



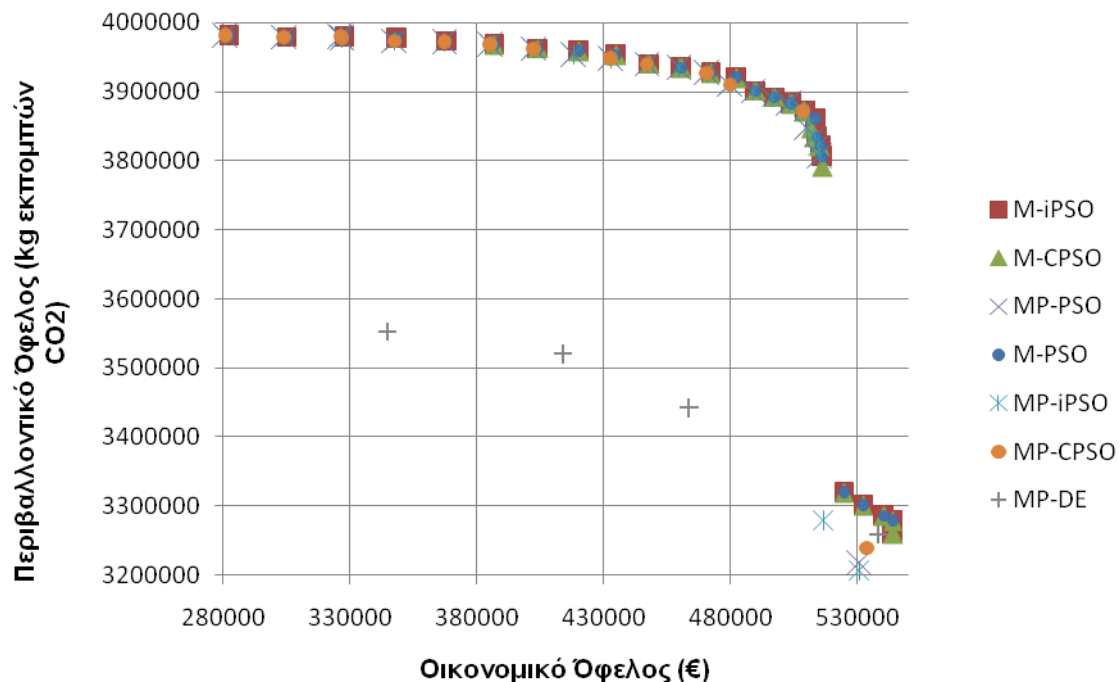
Σχήμα 8.37: Το πλήθος των λύσεων του μετώπου Pareto για διάφορες επαναλήψεις του αλγορίθμου MP-Debest2.

Από τα Σχήματα 8.19 – 8.37 παρατηρούμε καταρχήν ότι οι μέθοδοι που βασίζονται στον αλγόριθμο PSO έχουν παρόμοια συμπεριφορά. Ωστόσο, παρατηρείται ότι οι μέθοδοι MP-PSO, MP-iPSO και MP-CPSO, που βασίζονται στην τυχαία αξιοποίηση των λύσεων Pareto, αδυνατούν να εντοπίσουν μερικές ιδιομορφίες του μετώπου στην περιοχή με τα μεγαλύτερα οικονομικά οφέλη, σε σχέση με τις μεθόδους M-PSO, M-iPSO και M-CPSO που βασίζονται στην αξιοποίηση των καλύτερων λύσεων ως προς τα επιμέρους αντικειμενικά κριτήρια. Επίσης, στις μεθόδους PSO που χρησιμοποιούν συντελεστή αδράνειας (inertia weight), δηλαδή στις μεθόδους M-iPSO και MP-iPSO παρατηρείται ότι στις αρχικές επαναλήψεις υπάρχουν διάφορες αυξομειώσεις του μετώπου Pareto. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι σε όλες τις μεθόδους PSO παρατηρείται ότι από τις πρώτες επαναλήψεις υπάρχει στο σύνολο ένα μεγάλο μέρος των λύσεων του μετώπου. Σχετικά με τις μεθόδους βασισμένες σε αλγορίθμους Διαφορικής Εξέλιξης, παρατηρείται ότι υστερούν σημαντικά στην προσέγγιση του μετώπου σε σχέση με τις μεθόδους βασισμένες σε αλγορίθμους PSO. Επίσης, από τις πρώτες επαναλήψεις προκύπτει ένα πλήθος λύσεων το οποίο διατηρείται σταθερό στο εξής. Τέλος, όλες οι μέθοδοι βασισμένες σε αλγορίθμους Διαφορικής Εξέλιξης παρουσιάζουν ακριβώς την ίδια συμπεριφορά χωρίς να παρατηρείται η παραμικρή διαφορά

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

στα αποτελέσματά τους. Η χαμηλή επίδοση των μεθόδων αυτών μπορεί να αποδοθεί στο μηχανισμό ανανέωσης του πληθυσμού, βάσει κυριαρχίας, ο οποίος έχει ως αποτέλεσμα ο πληθυσμός των λύσεων να μην ανανεώνεται διαρκώς και συνεπώς, να μην προκύπτουν νέες λύσεις στο μέτωπο.

Στο Σχήμα 8.38 παρουσιάζεται το μέτωπο Pareto, όπως προκύπτει με την εφαρμογή όλων των παραπάνω μεθόδων για πλήθος επαναλήψεων ίσο με 2000.



Σχήμα 8.38: Το μέτωπο Pareto, όπως προκύπτει για όλες τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν και για 2000 επαναλήψεις εφαρμογής τους.

Από το Σχήμα 8.38 προκύπτει η υπεροχή κυρίως των μεθόδων M-iPSO και M-CPSO. Επίσης παρατηρείται η υπεροχή των M-PSO, M-iPSO και M-CPSO έναντι των MP-PSO, MP-iPSO και MP-CPSO, αντίστοιχα, ενώ είναι έντονα εμφανής η υπεροχή όλων των μεθόδων βασισμένων σε αλγορίθμους PSO έναντι των μεθόδων Διαφορικής Εξέλιξης. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι στο μέτωπο που προκύπτει με τις μεθόδους βασισμένες σε PSO αλγορίθμους, δεν συμπεριλαμβάνονται οι βέλτιστες λύσεις ως προς τις επιμέρους αντικειμενικές συναρτήσεις, εκτός από τα μέτωπα που προκύπτουν με τους αλγορίθμους MP-PSO, MP-iPSO και MP-CPSO όπου συνήθως υπάρχει η βέλτιστη λύση ως προς την αντικειμενική συνάρτηση των περιβαλλοντικών οφελών.

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

Οι αλγόριθμοι της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκαν σε γλώσσα C++ σε περιβάλλον Microsoft Visual Studio 2005. Για την εύρεση του μετώπου Pareto με χρήση των μεθόδων PSO που παρουσιάστηκαν, απαιτούνται περίπου 1 – 2 λεπτά για την εκτέλεση 2000 επαναλήψεων σε Η/Υ με επεξεργαστή Intel Dual Core E2200 (2,2 GHz), ενώ οι αντίστοιχοι χρόνοι των μεθόδων Διαφορικής Εξέλιξης κυμαίνονται στα 15-20 δευτερόλεπτα.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Η διαρκής αύξηση των ενεργειακών αναγκών της ανθρωπότητας σε συνδυασμό με τη δραστικό περιορισμό των αποθεμάτων των ορυκτών συμβατικών καυσίμων και τη μόλυνση του περιβάλλοντος που οφείλεται στις θερμικές πηγές ενέργειας αποτελούν την αιτία της διευρυμένης χρήσης των συστημάτων Φ/Β πλαισίων με σκοπό την παροχή και πώληση της ενέργειας που παράγουν στο ηλεκτρικό δίκτυο. Σε πολλές χώρες η ιδιωτική επένδυση σε συστήματα Φ/Β πλαισίων διασυνδεδεμένων με ηλεκτρικά δίκτυα υποστηρίζεται υπό τη μορφή επιδότησης του αρχικού κεφαλαίου, το οποίο είναι συνήθως αρκετά υψηλό και υπό τη μορφή υψηλών τιμών πώλησης της παραγόμενης ενέργειας.

Κατά το σχεδιασμό τέτοιου είδους συστημάτων η μεγιστοποίηση των οφελών από αυτά είναι ζητούμενη. Τα οφέλη αυτά διαχωρίζονται σε οικονομικά και σε περιβαλλοντικά οφέλη. Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία βέλτιστου σχεδιασμού και ανάλυσης Φ/Β συστημάτων διασυνδεδεμένων με το ηλεκτρικό δίκτυο. Στόχος είναι η βέλτιστη επιλογή του αριθμού των Φ/Β πλαισίων και των μετατροπέων ισχύος DC/AC του συστήματος, της κλίσης των Φ/Β πλαισίων, της διανομής τους σε μετατροπείς ισχύος DC/AC και της διάταξης στη διαθέσιμη έκταση προς εγκατάσταση. Η βελτιστοποίηση γίνεται είτε για τη μεγιστοποίηση των οικονομικών οφελών από την επένδυση σε αυτού του είδους τα συστήματα, είτε για τη μεγιστοποίηση των περιβαλλοντικών οφελών από τη λειτουργία τους, είτε για τη βελτιστοποίηση και των δύο αντικειμενικών κριτηρίων του προβλήματος ταυτόχρονα.

Για τη βελτιστοποίηση των επιμέρους αντικειμενικών κριτηρίων χρησιμοποιήθηκαν τόσο οι Γενετικοί Αλγόριθμοι, που έχουν προταθεί σε προηγούμενες προσεγγίσεις, όσο και οι νεότερες εξελικτικές τεχνικές της Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization) και της Διαφορικής Εξέλιξης. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα οι δύο αυτές μέθοδοι υπερτερούν σημαντικά έναντι των Γενετικών Αλγορίθμων τόσο στην ταχύτητα σύγκλισης όσο και στη δυνατότητα εντοπισμού της ολικά βέλτιστης λύσης. Επίσης, προκύπτει ότι η μέθοδος της Διαφορικής Εξέλιξης συγκλίνει εν γένει λίγο ταχύτερα σε σχέση με την τεχνική Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων αλλά απαιτείται περισσότερο προσεκτική ρύθμιση των παραμέτρων της μεθόδου.

Για τη βελτιστοποίηση των δύο αντικειμενικών κριτηρίων ταυτόχρονα έγινε η μοντελοποίηση του προβλήματος σαν πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων. Επίσης αναπτύχθηκαν και προτείνονται κατάλληλες μέθοδοι, βασισμένες στις τεχνικές Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και της Διαφορικής Εξέλιξης, έτσι ώστε να μπορούν να επιλύσουν προβλήματα με ανταγωνιστικές αντικειμενικές συναρτήσεις και να οδηγούν στην εύρεση των Pareto βέλτιστων λύσεων. Όπως προκύπτει από τις δοκιμές των μεθόδων αυτών στο πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων που προτείνεται στην παρούσα εργασία, οι μέθοδοι που βασίζονται στην Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων υπερτερούν σημαντικά των αντίστοιχων μεθόδων Διαφορικής Εξέλιξης και προσεγγίζουν το μέτωπο Pareto σε αρκετά σύντομο χρόνο, δίνοντας στον τελικό αποφασίζοντα ένα σύνολο αρκετών υποψηφίων βέλτιστων κατά Pareto λύσεων για το υπό σχεδιασμό σύστημα. Στα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο 8^ο κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκαν εμπορικά διαθέσιμα επιμέρους δομικά στοιχεία με τιμές κόστους που βρέθηκαν στην αγορά κατά τη διεξαγωγή αυτής της εργασίας. Από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει ότι, βάσει αυτών των τιμών κόστους, τέτοιου είδους συστήματα έχουν επενδυτικό ενδιαφέρον γενικότερα, σύμφωνα με τις μεθόδους της Καθαρής Παρούσας Αξίας και του εσωτερικού βαθμού απόδοσης της επένδυσης, ενώ ο χρόνος απόσβεσης κυμαίνεται από 5 – 12 χρόνια.

Μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας εργασίας θα μπορούσαν να σχετίζονται με την αναζήτηση και μοντελοποίηση επιπλέον κριτηρίων, με την ανάπτυξη αντίστοιχων μεθοδολογιών για άλλου είδους συστήματα Φ/Β στοιχείων, όπως είναι τα αυτόνομα συστήματα (stand-alone PV systems), στα οποία το οικονομικό όφελος σχετίζεται με την ελαχιστοποίηση του κόστους, ενώ παράλληλα απαιτείται να καλύπτουν συγκεκριμένες απαιτήσεις φορτίου, ή τα συστήματα διασυνδεδεμένα με κτίρια (Building-Integrated PV Systems, BIPVSs) στα οποία απαιτείται το σύστημα των Φ/Β στοιχείων να υποστηρίζει από κοινού με το ηλεκτρικό δίκτυο συγκεκριμένες ανάγκες φορτίου, ενώ στο τελευταίο παρέχεται η όποια περίσσεια ενέργειας μπορεί να προκύπτει από το πρώτο. Αντίστοιχες μέθοδοι θα μπορούσαν να αναπτυχθούν και για άλλες πηγές ενέργειας (π.χ. συστήματα Ανεμογεννητριών ή Παραβολικών Συλλεκτών) ή ακόμα και για άλλου είδους συστήματα τα οποία ενσωματώνουν εφαρμογές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (π.χ. συστήματα αφαλάτωσης με παροχή ενέργειας από Φ/Β πλαίσια). Επίσης, ιδιαίτερος ενδιαφέρονσα είναι η εφαρμογή διαφόρων άλλων εξελικτικών μεθόδων στη βελτιστοποίηση τόσο των προβλημάτων των επιμέρους αντικειμενικών συναρτήσεων όσο και των αντίστοιχων

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση γενετικών αλγορίθμων και αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους

πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων, καθώς και η ανάπτυξη νέων σχημάτων αυτού του είδους. Τέλος, διάφορες επεκτάσεις θα μπορούσαν να αφορούν στην ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού και διασύνδεση των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν με κάποια διεπαφή χρήστη με σκοπό την ευχρηστία των μεθοδολογιών και των αλγορίθμων που υλοποιήθηκαν.

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] International Energy Agency (IEA), World energy outlook 2006, Paris: OECD/IEA, 2006.
- [2] International Energy Agency (IEA), Beyond Kyoto: energy dynamics and climate stabilization. Paris: OECD/IEA, 2002.
- [3] M. Suri, T. Huld, E. Dunlop, H. Ossenbrink, Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries, Solar Energy, 81, 1295-1305, 2007.
- [4] J. Mondol, Y. Yohanis, B. Norton, The impact of array inclination and orientation on the performance of a grid-connected photovoltaic system, Renewable Energy, 32, 118-140, 2007.
- [5] P.A.B. James, A.S. Bahaj, R.M. Braid, PV array < 5 kWp + single inverter = grid connected PV system: Are multiple inverter alternatives economic?, Solar Energy, 80, 1179-1188, 2006.
- [6] J. Bernal-Agustin, R. Dufo-Lopez, Economic and environmental analysis of grid-connected photovoltaic systems in Spain, Renewable Energy, 31, 1107-1128, 2006.
- [7] A. Fernando-Infantes, J. Contreras, J. Bernal-Agustin, Design of grid-connected PV systems considering electrical, economical and environmental aspects: A practical case, Renewable Energy, 31, 2042-2062, 2006.
- [8] S. Rehman, M. Bader, S. Al-Moallem, Cost of solar energy generated using PV panels, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11, 1843-1857, 2007.
- [9] X. Gong, M. Kulkarni, Design optimization of a large scale rooftop photovoltaic system, Solar Energy, 78, 362-374, 2005.
- [10] D. Talavera, G. Nofuentes, J. Aguilera, M. Fuentes, Tables for the estimation of the internal rate of return of photovoltaic grid-connected systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11, 447-466, 2007.

- [11] J.C. Hernandez, A. Medina, F. Jurado, Optimal placement and sizing procedure for PV systems on radial distribution feeders, IEEE International Conference on Power System Technology, 2006.
- [12] J.A. Carrion, A.E. Estrella, F.A. Dols, M.Z. Toro, M. Rodriguez, A.R. Rida, Environmental decision-support systems for evaluating the carrying capacity of land areas: Optimal site selection for grid-connected photovoltaic power plants, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12, 2358-2380, 2008.
- [13] A. Kornelakis, E. Koutroulis, Methodology for design optimization and economic analysis of grid-connected photovoltaic systems using genetic algorithms, IET Renewable Power Generation, in press.
- [14] E. Lorenzo, Solar Electricity - Engineering of photovoltaic Systems, Progensa, 1994.
- [15] Κ. Καγκαράκη, Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία, Εκδόσεις Συμμετρία, 1992.
- [16] Z. Michalewicz, Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution programs, 3rd ed., Springer Verlag, 1992.
- [17] J. Kennedy, R.C. Eberhart, Particle swarm optimization, Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, 1942–1948, 1995.
- [18] R.C. Eberhart, P. Simpson, R. Dobbins, Computational intelligence PC tools, AP Professional, 212–226, 1996.
- [19] Y. Shi, R.C. Eberhart, A modified particle swarm optimizer, Proceedings of the IEEE international conference on evolutionary computation, 69–73, 1998.
- [20] R.C. Eberhart, Y. Shi, Comparing Inertia Weights and Constriction Factors in Particle Swarm Optimization, Proceedings of IEEE congress evolutionary computation, 84–88, 2000.
- [21] M. Clerc, J. Kennedy, The particle swarm: explosion, stability and convergence in a multi-dimensional complex space, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 58–73, 2002.
- [22] R. Storn, K. Price, Differential evolution - A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces, Journal of Global Optimization, 11, 341-359, 1997.
- [23] V. Feoktistov, Differential Evolution - In Search of Solutions, 1st ed., Springer, 2006.

- [24] J. Schaffer, Some experiments in machine learning using vector evaluated genetic algorithms, PhD thesis, Vanderbilt University, 1984.
- [25] C. M. Fonseca, P. J. Fleming, Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization, Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms, 416-423, Morgan Kauffman, 1993.
- [26] N. Srinivas, K. Deb, Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms, Technical Report, Indian Institute of Technology, 1993.
- [27] K. Deb, S. Agarwal, A. Pratap, T. Meyarivan, A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II, Kanpur Genetic Algorithm Laboratory (KanGAL) Report, No 200001, Indian Institute of Technology, 2000.
- [28] N. Srinivas, K. Deb, Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms, Evolutionary Computation, 2, 221-248, 1994.
- [29] J. Horn, N. Nafpliotis, Multiobjective optimization using the niched Pareto genetic algorithm, IlliGAL Report 91011, Illinois Genetic Algorithms Laboratory, University of Illinois, 1993.
- [30] J. Horn, N. Nafpliotis, D.E. Goldberg, A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization, Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence, 1, 82-87, 1994.
- [31] M. Valenzuela-Rendón, , E. Uresti-Charre, A non-generational genetic algorithm for multiobjective optimization, Proceedings of the Seventh International Conference on Genetic Algorithms, 658-665, Michigan State University, 1997.
- [32] M. Reyes-Sierra, C. A. Coello Coello, Multi-Objective Particle Swarm Optimizers: A Survey of the State-of-the-Art, International Journal of Computational Intelligence Research, 2, 287–308, 2006.
- [33] K.E. Parsopoulos, M.N. Vrahatis, Particle swarm optimization method in multiobjective problems, Proceedings of the 2002 ACM Symposium on Applied Computing (SAC'2002), 603–607, 2002.
- [34] U. Baumgartner, Ch. Magele, W. Renhart, Pareto optimality and particle swarm optimization, IEEE Transactions on Magnetics, 40, 1172–1175, 2004.

- [35] X. Hu, R.C. Eberhart, Multiobjective optimization using dynamic neighborhood particle swarm optimization, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2002), volume 2, 1677–1681, 2002.
- [36] X. Hu, R.C. Eberhart, Y. Shi, Particle swarm with extended memory for multiobjective optimization, Proceedings of the 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium, 193–197, 2003.
- [37] K. E. Parsopoulos, D. K. Tasoulis, M. N. Vrahatis, Multiobjective optimization using parallel vector evaluated particle swarm optimization, Proceedings of the IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications (AIA 2004), 2, 823–828, 2004.
- [38] C. Chow, H. Tsui, Autonomous agent response learning by a multi-species particle swarm optimization, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2004), 1, 778–785, 2004.
- [39] J. Moore, Richard Chapman, Application of particle swarm to multiobjective optimization, Department of Computer Science and Software Engineering, Auburn University, 1999.
- [40] T. Ray, K.M. Liew, A swarm metaphor for multiobjective design optimization, Engineering Optimization, 34, 141–153, 2002.
- [41] J. E. Fieldsend, S. Singh, A multiobjective algorithm based upon particle swarm optimisation, an efficient data structure and turbulence, Proceedings of the 2002 U.K. Workshop on Computational Intelligence, 37–44, 2002.
- [42] C. A. Coello Coello, M. Salazar Lechuga, MOPSO: A proposal for multiple objective particle swarm optimization, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2002), 2, 1051–1056, 2002.
- [43] C. A. Coello Coello, G. Toscano Pulido, M. Salazar Lechuga, Handling multiple objectives with particle swarm optimization, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 8, 256–279, 2004.
- [44] G. Toscano Pulido, C. A. Coello Coello, Using clustering techniques to improve the performance of a particle swarm optimizer, Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'2004), 225–237, June 2004.

- [45] D. Srinivasan, T. Hou Seow, Particle swarm inspired evolutionary algorithm (PS-EA) for multiobjective optimization problem, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2003), 3, 2292–2297, 2003.
- [46] S. Mostaghim, J. Teich, Strategies for finding good local guides in multi-objective particle swarm optimization (MOPSO), Proceedings of the 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium, 26–33, 2003.
- [47] S. Mostaghim, M. Hoffmann, P.H. Konig, Th. Frauenheim, J. Teich. Molecular force field parametrization using multi-objective evolutionary algorithms, IEEE 2004 Congress on Evolutionary Computation (CEC'2004), 1, 212–219, 2004.
- [48] S. Mostaghim, J. Teich, The role of ϵ -dominance in multi objective particle swarm optimization methods, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2003), 3, 1764–1771, 2003.
- [49] M. Laumanns, L. Thiele, K. Deb, E. Zitzler, Combining convergence and diversity in evolutionary multi-objective optimization, Evolutionary Computation, 10, 263–282, 2002.
- [50] S. Mostaghim, J. Teich, Covering pareto-optimal fronts by subswarms in multi-objective particle swarm optimization, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2004), 2, 1404–1411, 2004.
- [51] T. Bartz-Beielstein, P. Limbourg, K. E. Parsopoulos, M. N. Vrahatis, J. Mehnen, K. Schmitt, Particle swarm optimizers for pareto optimization with enhanced archiving techniques, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2003), 3, 1780–1787, 2003.
- [52] X. Li, A non-dominated sorting particle swarm optimizer for multiobjective optimization, Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'2003), 37–48, 2003.
- [53] M. Reyes Sierra, C. A. Coello Coello, Improving PSO-based multi-objective optimization using crowding, mutation and ϵ -dominance, Third International Conference on Evolutionary Multicriterion Optimization, EMO 2005, 505–519, 2005.

- [54] J. E. Alvarez-Benitez, R. M. Everson, J. E. Fieldsend, A MOPSO algorithm based exclusively on pareto dominance concepts, Third International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, EMO 2005, 459–473, 2005.
- [55] S.L. Ho, Y. Shiyong, N. Guangzheng, E.W.C. Lo, H.C. Wong, A particle swarm optimization-based method for multiobjective design optimizations, IEEE Transactions on Magnetics, 41, 1756–1759, 2005.
- [56] M. Alberto Villalobos-Arias, G. Toscano Pulido, C. A. Coello Coello, A proposal to use stripes to maintain diversity in a multi-objective particle swarm optimizer, Proceedings of the 2005 IEEE Swarm Intelligence Symposium, 22–29, 2005.
- [57] M. Salazar-Lechuga, J. Rowe, Particle swarm optimization and fitness sharing to solve multi-objective optimization problems, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2005), 1204–1211, 2005.
- [58] C. R. Raquel, Jr. Prospero, C. Naval, An effective use of crowding distance in multiobjective particle swarm optimization, Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO-2005), 257–264, 2005.
- [59] B. Zhao, Y. Cao, Multiple objective particle swarm optimization technique for economic load dispatch, Journal of Zhejiang University SCIENCE, 6A, 420–427, 2005.
- [60] S. Janson, D. Merkle, A new multiobjective particle swarm optimization algorithm using clustering applied to automated docking, Hybrid Metaheuristics, Second International Workshop, HM 2005, 128–142, 2005.
- [61] M. Mahfouf, M. Chen, D. A. Linkens, Adaptive weighted particle swarm optimisation for multi-objective optimal design of alloy steels, Parallel Problem Solving from Nature - PPSN VIII, 762–771, 2004.
- [62] Z. Xiao-hua, M. Hong-yun, J. Li-cheng, Intelligent particle swarm optimization in multiobjective optimization, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2005), 714–719, 2005.
- [63] X. Li, Better spread and convergence: Particle swarm multiobjective optimization using the maximin fitness function, Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'2004), 117–128, 2004.

- [64] L.B. Zhang, C.G. Zhou, X.H. Liu, Z.Q. Ma, Y.C. Liang, Solving multi objective optimization problems using particle swarm optimization, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2003), 3, 2400–2405, 2003.
- [65] C.S. Chang, D.Y. Xu, H.B. Quek, Pareto-optimal set based multiobjective tuning of fuzzy automatic train operation for mass transit system, IEE Proceedings on Electric Power Applications, 146, 577–583, 1999.
- [66] H. A. Abbass, R. Sarker, The Pareto Differential Evolution Algorithm, International Journal on Artificial Intelligence Tools, 11, 531–552, 2002.
- [67] H. A. Abbass, R. Sarker, C. Newton, PDE: A Pareto-frontier Differential Evolution Approach for Multi-objective Optimization Problems, IEEE Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation 2001 (CEC'2001), 2, 971–978, 2001.
- [68] R. Sarker, H. Abbass, C. Newton, Solving Two Multi-objective Optimization Problems using Evolutionary Algorithm, Computational Intelligence in Control, Idea Group Publishing, 2002.
- [69] H. A. Abbass, The Self-Adaptive Pareto Differential Evolution Algorithm, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2002), 1, 831–836, 2002.
- [70] H. A. Abbass, A Memetic Pareto Evolutionary Approach to Artificial Neural Networks, The Australian Joint Conference on Artificial Intelligence, 1–12, 2001.
- [71] J. Lampinen, De's selection rule for multiobjective optimization, Technical report, Lappeenranta University of Technology, 2001.
- [72] S. Kukkonen, J. Lampinen, An Extension of Generalized Differential Evolution for Multi-objective Optimization with Constraints, Parallel Problem Solving from Nature - PPSN VIII, 752–761, 2004. Springer-Verlag.
- [73] L. V. Santana-Quintero, C. A. Coello Coello, An Algorithm Based on Differential Evolution for Multi-Objective Problems, International Journal of Computational Intelligence Research, 1, 151–169, 2005.
- [74] E. A. Portilla Flores, Integracion Simultanea de Aspectos Estructurales y Dinamicos para el Diseno Optimo de un Sistema de Transmision de Variacion Continua, PhD thesis, Departamento de Ingenieria Electrica, Mexico, 2006.

- [75] N. K. Madavan, Multiobjective Optimization Using a Pareto Differential Evolution Approach, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2002), 2, 1145–1150, 2002.
- [76] F. Xue, Multi-Objective Differential Evolution: Theory and Applications, PhD thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, New York, 2004.
- [77] F. Xue, A. C. Sanderson, R. J. Graves, Pareto-based MultiObjective Differential Evolution, IEEE Proceedings of the 2003 Congress on Evolutionary Computation (CEC'2003), 2, 862–869, 2003.
- [78] A. W. Iorio, X. Li, Solving rotated multi-objective optimization problems using differential evolution, In AI 2004: Advances in Artificial Intelligence, Proceedings, 861–872, 2004.
- [79] T. Robic, B. Filipic, DEMO: Differential Evolution for Multiobjective Optimization, Evolutionary Multi-Criterion Optimization, Third International Conference, EMO 2005, 520–533, 2005.
- [80] S. Kukkonen, J. Lampinen, GDE3: The third Evolution Step of Generalized Differential Evolution, In 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2005), 1, 443–450, 2005.
- [81] Δ. Λαμπρίδη, Π. Ντοκόπουλου, Γ. Παπαγιάννη, Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Ζήτη, 2007.
- [82] Α. Παπαδόπουλου, Σημειώσεις του μαθήματος “Οικονομική Ανάλυση Ενεργειακών Συστημάτων”, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2002.
- [83] Κ. Κυρηττόπουλου, Σημειώσεις του μαθήματος “Παίγνιο Επιχειρήσεων - Επιχειρηματικά Σχέδια”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2007.
- [84] A.K. Akella, R.P. Saini, M.P. Sharma, Social, economical and environmental impacts of renewable energy systems, Renewable Energy, 34, 390–396, 2009.
- [85] International Energy Agency, Benign energy? The environmental implications of renewables, Paris: OECD, 1998.
- [86] J. Appelbaum, J. Bany, Shadow Effect of Adjacent Solar Collectors in Large Scale Systems, Solar Energy, 23, 497-507, 1979.

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