



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μονοκριτηριακή και πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση
σύγχρονου κινητήρα επιφανειακών μονίμων μαγνητών για
εφαρμογή ηλεκτροκίνησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννα Π. Αρμούτη

Επιβλέπων: Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μονοκριτηριακή και πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση
σύγχρονου κινητήρα επιφανειακών μονίμων μαγνητών για
εφαρμογή ηλεκτροκίνησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννα Π. Αρμούτη

Επιβλέπων: Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ... Φεβρουαρίου 2016

.....
Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Στέφανος Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος 2016

.....
Ιωάννα Π. Αρμούτη

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Ιωάννα Π. Αρμούτη, 2016
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία επιχειρεί τη σχεδίαση ηλεκτρικού κινητήρα για εφαρμογή σε σύστημα ηλεκτρικής κίνησης οχήματος, χρησιμοποιώντας μονοκριτηριακή και πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση γεωμετρίας και θέτοντας ως κυρίαρχα κριτήρια εκτός από την επίτευξη της επίδοσης, τη μείωση των απωλειών, των συντελεστών ποιότητας ισχύος, του βάρους και του όγκου της μηχανής. Η εργασία σε ένα πρώτο βήμα προσδιορίζει τις προδιαγραφές των κύριων λειτουργικών χαρακτηριστικών του κινητήρα και σε ένα δεύτερο βήμα βελτιστοποιεί τη γεωμετρία σχεδίασης βάσει των εκάστοτε λειτουργικών χαρακτηριστικών του. Πιο συγκεκριμένα, επιχειρείται η σχεδίαση και βελτιστοποίηση ενός σύγχρονου κινητήρα επιφανειακών μονίμων μαγνητών, ο οποίος χαρακτηρίζεται από χαμηλή ισχύ (~220 W), χαμηλή ταχύτητα περιστροφής (~300 ΣΑΛ) και ταυτόχρονα υψηλή απόδοση (> 85%).

Αρχικά, πραγματοποιείται μια σύντομη παρουσίαση του ηλεκτροκίνητου οχήματος ως εφαρμογή αναφοράς και των διαφορετικών συστημάτων κίνησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Στη συνέχεια, περιγράφεται η θεωρητική ανάλυση των σύγχρονων μηχανών επιφανειακών μονίμων μαγνητών, καθώς και η μεθοδολογία προκαταρκτικής σχεδίασης μιας τέτοιας μηχανής. Σε επόμενη ενότητα, γίνεται η παρουσίαση όλων των αλγορίθμων βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία, οι οποίοι είναι μονοκριτηριακοί Τεχνητής Αποικίας Μελισσών ABC (Artificial Bee Colony algorithm) και Διαφορικής Εξέλιξης DE (Differential Evolution algorithm) καθώς και πολυκριτηριακοί Εξελικτικού Μετώπου Pareto SPEA-II (Strength Pareto Evolutionary Algorithm II), NSGA-II Αλγόριθμος Ταξινόμησης των Μη-κυριαρχούμενων λύσεων (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) και Επιλογής Ομαδικού Μετώπου Pareto PESA-II (Pareto Envelope-based Selection Algorithm II).

Στη συνέχεια αναπτύσσονται ειδικοί υβριδικοί αλγόριθμοι προσαρμοσμένοι για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, και συγκεκριμένα ο μονοκριτηριακός ABC-DE (Artificial Bee Colony algorithm-Differential Evolution) και ο πολυκριτηριακός αλγόριθμος ASMA (ABC SPEA-II Multi-objective Algorithm). Προκειμένου να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα και αποδοτικότητα των δύο αυτών αλγορίθμων, παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ αυτών και άλλων δημοφιλών μονοκριτηριακών και πολυκριτηριακών αλγορίθμων στην περίπτωση τυπικών δοκιμαστικών συναρτήσεων. Ιδιαίτερα για τον τροποποιημένο μονοκριτηριακό αλγόριθμο ABC-DE συγκρίνεται η σύγκλιση που παρουσιάζει προς τη βέλτιστη τιμή για διάφορες δοκιμαστικές συναρτήσεις, σε σχέση με τον κλασικό αλγόριθμο ABC. Αντιστοίχως, για τον πολυκριτηριακό ASMA πραγματοποιείται σύγκριση των χαρακτηριστικών του με εκείνα τριών δημοφιλών εξελικτικών αλγορίθμων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, του SPEA-II (Strength Pareto Evolutionary Algorithm II), του NSGA-II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II) και του PESA-II (Pareto Envelope-based Selection Algorithm II). Η σύγκριση αυτή πραγματοποιείται με τη βοήθεια επτά δοκιμαστικών συναρτήσεων, δύο και τριών κριτηρίων, της πλήρους ακολουθίας του Van Veldhuizen. Για να επιτευχθεί αντικειμενική σύγκριση των αλγορίθμων αυτών, επιλέχθηκαν πρόσφατες τεχνικές αξιολόγησης μετώπων Pareto, όπως ο δείκτης υπερόγκου μετώπου (Hypervolume) και ο δείκτης συνεισφοράς του (Contribution Rate, CR).

Σε επόμενο κεφάλαιο επιχειρείται η βελτιστοποίηση γεωμετρίας του κινητήρα του πρωτότυπου οχήματος «Πυρφόρου II». Η μεθοδολογία βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε βασίζεται στους δύο υβριδικούς αλγορίθμους που προαναφέρθηκαν και υλοποιήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος αριθμητικής ολοκλήρωσης διαφορικών εξισώσεων MATLAB, του προγράμματος πεδιακής ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων FEMM και των εντολών συνδυασμού τους σε γλώσσα Luascript.

Μετά τις βελτιστοποιήσεις παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτές, όπως επίσης γίνεται και παράθεση των σχεδίων των κινητήρων αλλά και των λειτουργικών χαρακτηριστικών τους. Γίνεται, τέλος, σύγκριση μεταξύ αυτών και του κινητήρα που σχεδιάστηκε στο αρχικό στάδιο αυτής της εργασίας. Η σύγκριση αυτή αναδεικνύει την καταλληλότητα της μεθόδου σε αυτή τη κατηγορία προβλημάτων, καθώς επιτεύχθηκε σημαντική αύξηση της απόδοσης του ηλεκτρικού κινητήρα χωρίς μεταβολή των ονομαστικών του προδιαγραφών.

Λέξεις-κλειδιά: Ηλεκτρικό όχημα, σχεδίαση ηλεκτρικού κινητήρα, δρομέας επιφανειακών μαγνητών, κινητήρες μονίμων μαγνητών, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, παραμετροποιημένη σχεδίαση, μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση, πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, αλγόριθμος ABC (Artificial Bee Colony algorithm), μέθοδος διαφορικής εξέλιξης, τοπικά ακρότατα, ολικά ακρότατα, μέτωπο Pareto, έννοια της κυριαρχίας, εξελικτικοί αλγόριθμοι, αλγόριθμος ASMA (ABC SPEA-II, Multi-objective Algorithm), SPEA-II, PESA-II, NSGA-II, ακολουθία δοκιμαστικών συναρτήσεων Van Veldhuizen, υπερόγκος, δείκτης συνεισφοράς μετώπου.

ABSTRACT

The present diploma thesis undertakes the design and optimization procedure of a permanent magnet motor, for an electric vehicle drive system application., The methodology developed uses single and multi-objective optimization methods and emphasizes on losses, torque ripple, back-electromotive force harmonic distortion and motor weight minimization. In a first step the specifications of the main operating characteristics of the electric motor are determined. In particular, a synchronous surface mounted permanent magnet motor configuration, which presents low nominal power (~ 220 W), low rotational speed (~ 300 rpm) and high efficiency (> 85%), has been considered. In a second step the motor geometry optimization is performed.

Initially, the main applications of electric vehicles are presented, as well as the different electric drive system configurations implemented. In addition, the basic theory of the permanent magnet synchronous motors is outlined along with the procedure of their preliminary design. The main concepts and fundamental relations of single and multi-objective optimization techniques are discussed. In a next section, the optimization algorithms implemented in this diploma thesis are described. More specifically the single objective ABC (Artificial Bee Colony algorithm) and DE (Differential Evolution algorithm) as well as the multi-objective SPEA-II (Strength Pareto Evolutionary Algorithm II), NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) and PESA-II (Pareto Envelope-based Selection Algorithm II) are explained.

Moreover, the hybrid algorithms developed in this diploma thesis are detailed that is: the single-objective hybrid algorithm ABC-DE (Artificial Bee Colony algorithm - Differential Evolution) and the multi-objective algorithm ASMA (ABC SPEA-II Multi-objective Algorithm). Subsequently, in order to illustrate the effectiveness and the efficiency of these optimization algorithms they have been compared to some of the most popular optimization algorithms. The single-objective ABC-DE has been compared to the simple ABC algorithm, by using benchmark test functions. The multi-criteria hybrid-algorithm ASMA has been compared to SPEA-II, NSGA-II and PESA-II by using the the Van Veldhuizen's test functions suite. In order to ensure an unbiased comparison between the algorithms, popular Pareto fronts evaluation techniques were implemented, such as the Hypervolume (HV) indicator and the recently proposed Contribution Rate (CR).

In the followings the optimization of "Pyrforos II" motor has been performed, based on its nominal characteristics. In a first step the preliminary design enabled the main geometrical parameters determination. In a second step the critical design has been undertaken by developing an optimization methodology based on the hybrid-algorithms mentioned previously, implemented by combining the numerical integration of differential equations program MATLAB, the field analysis software FEMM based on the finite element method coupled by using Luascript programming language.

After the optimization phase, the obtained motor results are analyzed and compared to the operating characteristics of the motor configuration defined at the preliminary design stage. This comparison illustrates the proposed methodology effectiveness in this class of problems, as the efficiency of the electric motor is significantly increased without changing its nominal specifications.

Keywords: Electric vehicle, electric motor design, surface mounted magnet motors, permanent magnet motors, finite element method, parametric design, single-objective

optimization, multi-objective optimization, ABC algorithm (Artificial Bee Colony Algorithm), differential evolution method, local optimum, global optimum, Pareto front, dominance, evolutionary algorithms, ASMA algorithm (ABC SPEA-II, Multi-objective Algorithm), SPEA-II, PESA-II, NSGA-II, Van Veldhuizen's test function suite, hypervolume, Contribution Rate CR.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου σε όσους με βοήθησαν κατά την εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά, τον καθηγητή μου κ. Αντώνιο Κλαδά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την άκρως ενδιαφέρουσα αυτή εργασία καθώς επίσης για την καθοδήγησή του και την άψογη συνεργασία κατά την περάτωσή της.

Ιδιαίτερος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Χρήστο Κρασόπουλο για την ανάπτυξη του πολυκριτηριακού αλγορίθμου που μελετήθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας καθώς και για τη καθοδήγηση του όλους αυτούς τους μήνες.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της ομάδας Eco-marathon για τις ευχάριστες στιγμές και εμπειρίες που έζησα μαζί τους τον τελευταίο χρόνο.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και την αδερφή μου για την αμέριστη συμπαράσταση και στήριξη, υλική και ηθική, που μου έδωσαν όλα αυτά τα χρόνια, καθώς όλα αυτά θα ήταν ανέφικτα χωρίς αυτούς. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους βρέθηκαν δίπλα μου όλο αυτό τον καιρό και μου προσέφεραν απλόχερα τη φιλία ή την αγάπη τους.

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	11
1.1 Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας	11
1.2 Δομή της εργασίας.....	12
Κεφάλαιο 2 Ηλεκτρικά Οχήματα	13
2.1 Παρουσίαση ηλεκτρικού οχήματος	13
2.2 Κινητήριο σύστημα ενός ηλεκτρικού οχήματος	14
2.2.1 Ηλεκτρικό όχημα (Electric Vehicle, EV)	14
2.2.2 Υβριδικό Όχημα	15
2.2.3 Κινητήρες για ηλεκτρικά οχήματα	16
Κεφάλαιο 3 Σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών	19
3.1 Σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών	19
3.2 Τεχνολογία μονίμων μαγνητών	20
3.2.1 Κινητήρες εσωτερικά επιφανειακών μαγνητών	21
3.2.2 Κινητήρες επιφανειακών μονίμων μαγνητών.....	22
3.3 Προκαταρκτική σχεδίαση κινητήρα.....	23
3.3.1 Διαστασιολόγηση διάκενου	23
3.3.1.1 Πάχος του διάκενου	23
3.3.1.2 Ειδική μαγνητική φόρτιση	23
3.3.1.3 Ειδική ηλεκτρική φόρτιση	24
3.3.1.4 Επιφάνεια διάκενου.....	25
3.3.1.5 Επιλογή αναλογίας διαστάσεων Dg και L	26
3.3.2 Προσδιορισμός χαρακτηριστικών στάτη.....	26
3.3.3 Επιλογή διαμόρφωσης τυλιγμάτων	27
3.3.4 Μελέτη χαρακτηριστικών δρομέα	27
3.4 Μαγνητοστατική ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	28
3.4.1 Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.....	29
3.4.2 Επίλυση μαγνητοστατικών προβλημάτων [7].....	29
3.4.3 Οριακές συνθήκες	31
3.4.4 Διαδικασία ανάλυσης με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και εξαγωγής αποτελεσμάτων.....	32

Κεφάλαιο 4 Αρχές της μονοκριτηριακής και της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης	33
4.1 Θεμελιώδεις έννοιες βελτιστοποίησης	33
4.1.1 Έννοια του συστήματος.....	33
4.1.2 Ορισμός βελτιστοποίησης.....	34
4.1.3 Τοπικά ακρότατα	34
4.2 Βελτιστοποίηση πραγματικών συναρτήσεων	34
4.3 Χώροι αναζήτησης και αποτίμησης.....	35
4.4 Μέθοδος των βαρών	36
4.5 Μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση	37
4.6 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση	37
4.6.1 Έννοια της κυριαρχίας.....	39
4.6.2 Βέλτιστο κατά Pareto, σύνολο και μέτωπο Pareto	40
4.6.3 Πρόβλημα επιλογής της βέλτιστης λύσης από το μέτωπο Pareto	41
4.7 Τεχνικές σύγκρισης πολυκριτηριακών αλγορίθμων.....	41
4.7.1 Μέθοδος σύγκρισης με τη χρήση δοκιμαστικών συναρτήσεων.....	41
4.7.1.1 Van Veldhuizen’s Test Suite	42
4.7.2 Υπερόγκος μετώπου Pareto (Hypervolume)	45
4.7.3 Δείκτης συνεισφοράς στο μέτωπο Pareto (Contribution Rate, CR).....	47

Κεφάλαιο 5 Μονοκριτηριακοί και πολυκριτηριακοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης	49
5.1 Μονοκριτηριακός αλγόριθμος μελισσών, (Artificial Bee Colony algorithm, ABC).....	49
5.1.1 Επεξήγηση του αλγορίθμου ABC.....	49
5.1.2 Λειτουργία του αλγορίθμου.....	50
5.2 Μονοκριτηριακός αλγόριθμος διαφορικής εξέλιξης (DE – Differential Evolution).....	52
5.2.1 Μέθοδος εύρεσης επόμενης λύσης με την μέθοδο της διαφορικής εξέλιξης ...	52
5.3 Πολυκριτηριακός αλγόριθμος βελτιστοποίησης SPEA-II (Strength Pareto Evolutionary Algorithm II).....	54
5.3.1 Επεξήγηση αλγορίθμου βελτιστοποίησης SPEA-II ή αλλιώς εξελικτικός αλγόριθμος Pareto ισχύος [17]	54
5.3.2 Λεπτομερής ανάλυση του αλγορίθμου SPEA-II	56
5.4 Αλγόριθμος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης NSGA-II (Non-Sorting Genetic Algorithm).....	57

5.5 Αλγόριθμος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης PESA-II (Pareto Envelope-based Selection Algorithm II) [20].....	61
---	----

Κεφάλαιο 6 Υβριδικοί αλγόριθμοι μονοκριτηριακής και πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, ABC-DE (Artificial Bee Colony algorithm – Differential Evolution) και ASMA (ABC SPEA-II Multi-objective Algorithm).....	65
6.1 Υβριδικός αλγόριθμος ABC – DE.....	65
6.1.1 Σύνδεση υβριδικού αλγορίθμου ABC-DE με τον κώδικα σχεδίασης και ανάλυσης ηλεκτρικού κινητήρα.....	66
6.1.2 Επιβεβαίωση γρηγορότερης σύγκλισης με την εφαρμογή της μεθόδου DE.....	66
6.2 ASMA (Abc Spea-II Multi-objective Algorithm).....	69
6.2.1 Επεξήγηση αλγορίθμου ASMA.....	69
6.3 Σύγκριση πολυκριτηριακών αλγορίθμων με βάση τον υπερόγκο και τον δείκτη συνεισφοράς.....	72
6.3.1 Καθορισμός παραμέτρων των αλγορίθμων και ανάλυση μεθόδου σύγκρισης.	72
6.3.2 Αποτελέσματα σύγκρισης αλγορίθμων και συμπεράσματα	73

Κεφάλαιο 7 Σχεδίαση κινητήρα επιφανειακών μονίμων μαγνητών και βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του.....	81
7.1 Μοντελοποίηση κινητήρα «Πυρφόρου II».....	81
7.1.1 Χαρακτηριστικά κινητήρα «Πυρφόρου II».....	81
7.1.2 Σχεδίαση κινητήρα και επεξεργασία αποτελεσμάτων.....	85
7.1.2.1 Υπολογισμός μέσης ροπής και κυμάτωσης ροπής	85
7.1.2.2 Υπολογισμός επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης (αντι-HEΔ)	87
7.1.2.3 Υπολογισμός απωλειών	90
7.1.2.4 Υπολογισμός απόδοσης.....	92
7.2 Καθορισμός παραμέτρων για τις βελτιστοποιήσεις.....	92
7.2.1 Παράμετροι αλγορίθμων	92
7.2.2 Κριτήρια επιλογής αντικειμενικής συνάρτησης.....	94
7.2.3 Πεδίο ορισμού μεταβλητών γεωμετρίας	95
7.3 Μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση γεωμετρίας κινητήρα με τον αλγόριθμο ABC-DE .	96
7.3.1 Σύνδεση μονοκριτηριακού αλγορίθμου ABC-DE με το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων FEMM.....	96
7.3.2 Επιλογή αντικειμενικής συνάρτησης για τη μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση ..	97
7.3.3 Αποτελέσματα μονοκριτηριακού αλγορίθμου ABC στην βελτιστοποίηση της γεωμετρίας σύγχρονου κινητήρα επιφανειακών μονίμων μαγνητών	98

7.3.3.1 Βελτιστοποίηση με πέντε παραμέτρους.....	98
7.3.3.2 Βελτιστοποίηση με επτά παραμέτρους.....	100
7.4 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση γεωμετρίας κινητήρα με τον αλγόριθμο ASMA ..	103
7.4.1 Επιλογή πολυκριτηριακής συνάρτησης	103
7.4.2 Αποτελέσματα του πολυκριτηριακού αλγορίθμου ASMA στην βελτιστοποίηση της γεωμετρίας σύγχρονου κινητήρα επιφανειακών μονίμων μαγνητών.....	104
7.4.2.1 Βελτιστοποίηση με πέντε παραμέτρους.....	104
7.4.2.2 Βελτιστοποίηση με επτά παραμέτρους.....	109
7.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βελτιστοποιήσεων	115
Κεφάλαιο 8 Συμπεράσματα	119
8.1 Κυριότερα συμπεράσματα	119
8.2 Επιστημονική συνεισφορά της εργασίας	120
8.3 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση	120
Βιβλιογραφία	121

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση ενός σύγχρονου ηλεκτρικού κινητήρα μονίμων μαγνητών για το πρωτότυπο ηλεκτρικό όχημα «Πυρφόρος II». Για τον λόγο αυτόν, αναπτύχθηκε μεθοδολογία βασισμένη στις αρχές της προκαταρκτικής σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών, και σε οριστική σχεδίαση μέσω τεχνικών βελτιστοποίησης γεωμετρίας με αλγορίθμους μονοκριτηριακής και πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Ο κινητήρας αποτελεί βασική συνιστώσα του συστήματος κίνησης ενός ηλεκτρικού οχήματος και ο συγκεκριμένος κινητήρας σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε με σκοπό την εφαρμογή του στο όχημα «Πυρφόρος II» για τη συμμετοχή του στους αγώνες «Shell Eco-marathon Europe».

Όλες οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία έχουν ως στόχο τη διαμόρφωση κατάλληλων αλγορίθμων βελτιστοποίησης και σύνδεσή τους με κώδικα σχεδίασης ηλεκτρικών κινητήρων, με σκοπό την εύρεση ενός αποδοτικού αλγορίθμου, ο οποίος θα είναι σε θέση να βρίσκει βέλτιστες γεωμετρίες για κάθε τιθέμενη προδιαγραφή. Οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν βασίστηκαν στον μονοκριτηριακό αλγόριθμο βελτιστοποίησης ABC (Artificial Bee colony Algorithm). Επίσης αναπτύχθηκε και κώδικας σύγκρισης διάφορων πολυκριτηριακών αλγορίθμων, με σκοπό την ανάδειξη της ταχύτητας σύγκλισης και αποδοτικότητας του πολυκριτηριακού αλγορίθμου που προτάθηκε.

Αποτέλεσμα της παρούσας διπλωματικής είναι η εύρεση ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης ηλεκτρικών μηχανών, ο οποίος είναι ευέλικτος και προσαρμόσιμος για τη βελτιστοποίηση οποιασδήποτε εφαρμογής.

1.2 Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία επιχειρεί τη σχεδίαση και ανάλυση των χαρακτηριστικών ενός κινητήρα επιφανειακών μονίμων μαγνητών για ένα πρωτότυπο ηλεκτρικό όχημα. Για τον σκοπό αυτόν αναπτύχθηκε ένας μονοκριτηριακός και ένας πολυκριτηριακός αλγόριθμος κατάλληλος για τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του προαναφερομένου κινητήρα, και συγκρίθηκε με άλλους τρεις δημοφιλείς πολυκριτηριακούς αλγορίθμους βελτιστοποίησης.

Ειδικότερα, στο κεφάλαιο 2 πραγματοποιείται μια παρουσίαση των ηλεκτρικών οχημάτων αλλά και των πιο δημοφιλών ηλεκτρικών συστημάτων κίνησης που χρησιμοποιούνται από κατασκευαστές αυτοκινήτων.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται οι θεωρητικές σχέσεις ανάλυσης των σύγχρονων μηχανών και πιο συγκεκριμένα των μηχανών μονίμων επιφανειακών μαγνητών, καθώς και οι τεχνικές προκαταρκτικής σχεδίασής τους.

Στο κεφάλαιο 4 εισάγονται οι θεμελιώδεις έννοιες και αρχές της μονοκριτηριακής και πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, καθώς επίσης παρουσιάζονται και διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης και σύγκρισης των αντιστοίχων αλγορίθμων.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται ο αλγόριθμος ABC (Artificial Bee Colony algorithm), ο οποίος αποτελεί τη βάση για τους αλγορίθμους που αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας σύγχρονου κινητήρα, καθώς επίσης και ο μονοκριτηριακός αλγόριθμος διαφορικής εξέλιξης DE. Επίσης παρουσιάζονται και τρεις πολυκριτηριακοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, ο SPEA-II, ο NSGA-II και ο PESA-II, αντίστοιχα.

Στο κεφάλαιο 6 πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση γεωμετρίας του κινητήρα του «Πυρφόρου II» με βάση τους αλγορίθμους βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκαν. Παρουσιάζεται και αναλύεται ο υβριδικός αλγόριθμος ABC-DE και συγκρίνεται με τον αρχικό αλγόριθμο ABC. Στη συνέχεια περιγράφεται ο πολυκριτηριακός αλγόριθμος ASMA (ABC SPEA-II Multi-Objective Algorithm), ο οποίος αναπτύχθηκε βασισμένος στον ABC. Τέλος στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται η σύγκριση του ASMA, με τους τρεις πολυκριτηριακούς αλγορίθμους του κεφαλαίου 5, με τη βοήθεια δοκιμαστικών συναρτήσεων και τις τεχνικές του υπερόγκου και του δείκτη συνεισφοράς μετώπου Pareto.

Στο κεφάλαιο 7 αναλύονται τα χαρακτηριστικά που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση του κινητήρα του «Πυρφόρου II» καθώς και ο παρατίθεται σχολιασμός τους.

Τέλος, στο κεφάλαιο 8 συγκεντρώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία και πιο συγκεκριμένα, από τη διαδικασία σχεδίασης και τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του κινητήρα επιφανειακών μονίμων μαγνητών για το όχημα «Πυρφόρος II». Επίσης παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη σύγκριση του νέου προτεινόμενου πολυκριτηριακού αλγορίθμου με άλλους της βιβλιογραφίας και το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

Κεφάλαιο 2: Ηλεκτρικά Οχήματα

2.1 Παρουσίαση ηλεκτρικού οχήματος

Την τελευταία δεκαετία πολλές είναι οι αυτοκινητοβιομηχανίες οι οποίες ασχολούνται δυναμικά με την ανάπτυξη και παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων. Οι εκπομπές ρύπων και συνεπώς το μεγάλο ποσοστό ρύπανσης που οφείλεται στα συμβατικά αυτοκίνητα, όπως επίσης και η τεράστια εξάρτηση του παγκόσμιου πληθυσμού από το πετρέλαιο επιφέρουν συνεχώς σημαντικές περιβαλλοντικές, πολιτικές και οικονομικές συνέπειες. Όλα αυτά τα μειονεκτήματα ώθησαν την παραγωγή στην ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης. Το ηλεκτρικό αυτοκίνητο έχει να προσφέρει πολλά, από έναν φιλικό προς το περιβάλλον και εναλλακτικό τρόπο μετακίνησης μέχρι τη μείωση του κόστους σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα εσωτερικής καύσης.

Τα ηλεκτρικά οχήματα έκαναν την εμφάνισή τους μόλις στα μέσα του 19^{ου} αιώνα, πριν ακόμα διαδοθούν τα οχήματα εσωτερικής καύσης. Όμως διάφοροι περιορισμοί στη χρήση τους και οι αυξανόμενες δυσκολίες στην παραγωγή τους τα έστειλαν στην αφάνεια για πάνω από οκτώ δεκαετίες. Το ενδιαφέρον στράφηκε ξανά στην ηλεκτροκίνηση τη δεκαετία του '60, οπότε και διαπυστώθηκαν τα μειονεκτήματα της ευρείας χρήσης μηχανών εσωτερικής καύσης για τη μετακίνηση. Από τότε ξεκίνησε η χρήση των ηλεκτροκινήτων σε μέσα μαζικής μεταφοράς αλλά ήταν ακόμα νωρίς να υιοθετηθεί και από τους ιδιώτες. Η συνάρτηση αυτονομίας-κόστους ήταν απαγορευτική τότε καθώς η τεχνολογία έθετε περιορισμούς ακόμα και στο μέγεθος των μέσων αποθήκευσης της ενέργειας.

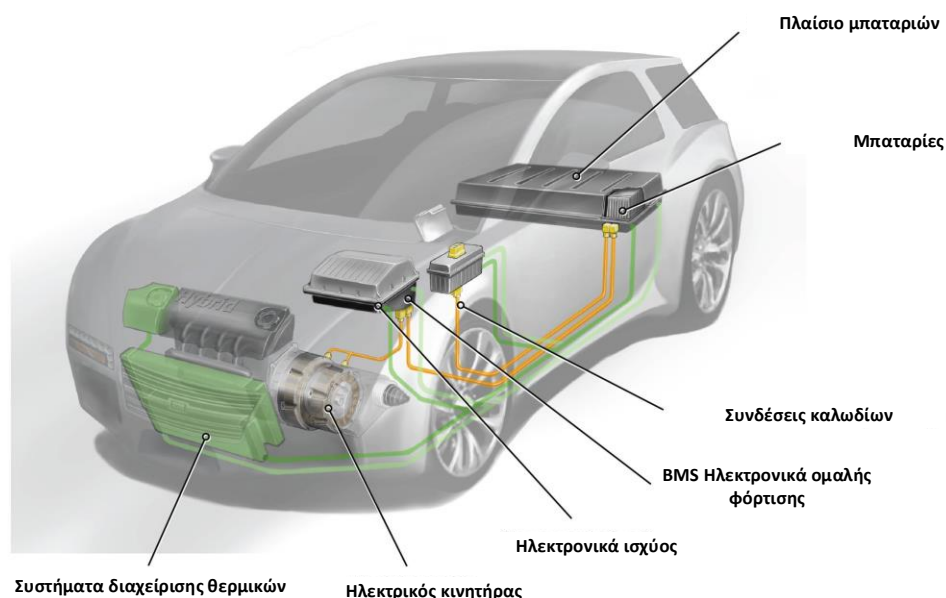
Η έρευνα όμως από τότε δεν σταμάτησε και τον 21^ο αιώνα η τεχνολογία έθεσε αυτούς τους περιορισμούς εκτός. Νέες τεχνολογίες στα μέσα αποθήκευσης επέφεραν τη μείωση και του κόστους αλλά και του βάρους τους, κάτι που έδωσε ώθηση στις αυτοκινητοβιομηχανίες να ασχοληθούν πλέον σοβαρά με τα ηλεκτρικά οχήματα.

2.2 Κινητήριο σύστημα ενός ηλεκτρικού οχήματος

Τα ηλεκτρικά οχήματα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα καθαρά ηλεκτρικά και τα υβριδικά οχήματα. Παρακάτω θα δούμε συνοπτικά τον τρόπο λειτουργίας των δύο αυτών τύπων αυτοκινήτων.

2.2.1 Ηλεκτρικό όχημα (Electric Vehicle, EV)

Στα καθαρά ηλεκτρικά οχήματα η απαραίτητη πρόωση για την κίνησή τους παρέχεται αποκλειστικά από έναν ή περισσότερους ηλεκτρικούς κινητήρες, ενώ η πηγή ενέργειας είναι φορητή, είτε χημικής είτε ηλεκτρομηχανικής φύσης.[1]



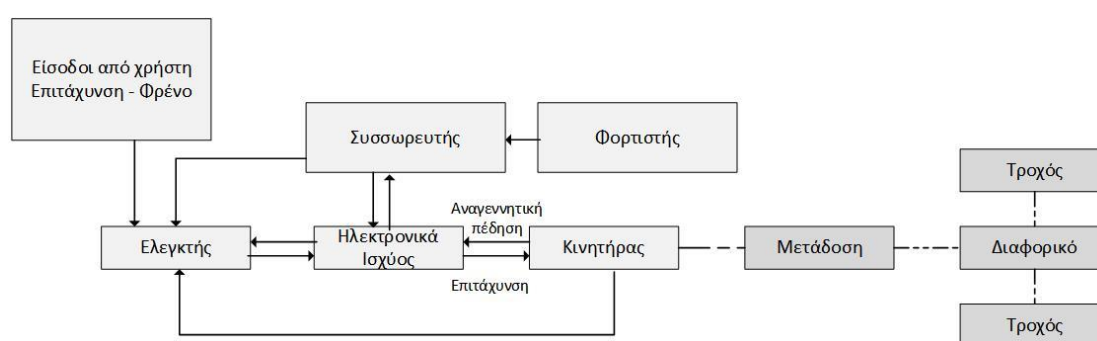
Σχήμα 2.1: Διαμόρφωση ηλεκτρικού αυτοκινήτου [2]

Στο σχήμα 2.1 απεικονίζεται το σύστημα κίνησης ενός κινητήριου ηλεκτρικού αυτοκινήτου, το οποίο τροφοδοτείται από μπαταρίες και έχει δυνατότητα αύξησης της αυτονομίας του μέσω του ηλιακού πάνελ στην οροφή. Ο ηλεκτρικός και μηχανικός εξοπλισμός που ευθύνεται για την ηλεκτρομηχανική μετατροπή της ενέργειας ονομάζεται σύστημα πρόωσης. Επίσης, στο σχήμα 2.1 φαίνονται τα υποσυστήματα ενός ηλεκτρικού οχήματος τα οποία είναι: ο ηλεκτρικός κινητήρας (Electric Engine), ο ελεγκτής και το σύστημα οδήγησης (Power Electronics), και η πηγή ενέργειας (Battery-Packs) μαζί με το σύστημα ομαλής φόρτισης και εκφόρτισης των μπαταριών (Battery Management System, BMS).

Η παραδοσιακή πηγή ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων ήταν οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές, με βασικό τύπο αυτό των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος που προτιμήθηκε

λόγω του χαμηλού κόστους και της ανεπτυγμένης τεχνολογίας. Η ανάγκη όμως για βελτιωμένα χαρακτηριστικά οδήγησε στην ανάπτυξη εξελιγμένων ειδών συσσωρευτών, με αρκετά υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας, μεγαλύτερη δυνατότητα παροχής ισχύος και περισσότερους κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης, όπως για παράδειγμα οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου (LiON).

Το μεγάλο μειονέκτημα των συσσωρευτών και συνάμα των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι πως χρειάζονται φόρτιση για να επανέλθουν στα επίπεδα ενέργειας που είχαν πριν την εξάντληση του φορτίου τους, για παράδειγμα λόγω κίνησης. Αυτό συνεπάγεται μικρή αυτονομία για τα ηλεκτρικά οχήματα και καθιστά το αντικείμενο των μπαταριών ως ένα πολύ μεγάλο πεδίο έρευνας ώσπου να καμφθούν αυτές οι δυσκολίες. Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει μεγάλη προσπάθεια από διάφορες εταιρείες για τον περιορισμό αυτών των δυσκολιών και φαίνεται πως υπάρχουν ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα συστατικά μέρη του συστήματος κίνησης ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου.



Σχήμα 2.2: Συστατικά μέρη συστήματος κίνησης ενός ηλεκτρικού οχήματος

Ο κινητήρας αποτελεί νευραλγικό κομμάτι του συστήματος κίνησης και πρέπει να απαιτεί συγκεκριμένες προδιαγραφές ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζεται. Οι προδιαγραφές αυτές ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί να έχουν σχέση με το βάρος, το μέγεθος, το κόστος, τη θερμοκρασιακή και μηχανική αντοχή κλπ. Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται συνήθως σε ηλεκτρικά οχήματα είναι κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC), ασύγχρονοι ή κινητήρες μονίμων μαγνητών. Σε κάθε περίπτωση η σχεδίασή τους είναι μια σύνθετη διαδικασία λόγω της αλληλεξάρτησης παραμέτρων, οι οποίες καθορίζουν την επίδοση, την απόδοση και το κόστος του κινητήρα και κατά συνέπεια ολόκληρου του οχήματος.

Η οδήγηση του κινητήρα γίνεται μέσω μιας μονάδας ηλεκτρονικών ισχύος, ελεγχόμενων από μικροεπεξεργαστή ή έναν ψηφιακό επεξεργαστή σήματος. Ο ρόλος της μονάδας αυτής είναι η μετατροπή της συνεχούς τάσης, που προέρχεται από την πηγή ενέργειας, σε μεταβαλλόμενη επιθυμητής συχνότητας αναλόγως του σημείου λειτουργίας του οχήματος. Τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι καθοριστικής σημασίας για την εξέλιξη των συστημάτων κίνησης υψηλής επίδοσης και για τον λόγο αυτό τείνουν να γίνονται ταχύτερα, αποδοτικότερα και μικρότερα σε μέγεθος.

2.2.2 Υβριδικό Όχημα

Τα υβριδικά οχήματα ήρθαν για να ενώσουν τα οφέλη των ηλεκτρικών οχημάτων με την αυτονομία και αξιοπιστία της πετρελαιοκίνησης. Πρόκειται για οχήματα τα οποία περιέχουν τουλάχιστον μια πηγή ενέργειας και έναν μετατροπέα που μπορεί να μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια. Ανάλογα με τη λειτουργική κατάσταση, η πρόωση παρέχεται από δύο ή περισσότερα είδη πηγών ενέργειας και αποτελούν μια βραχυπρόθεσμη λύση έως ότου λυθούν

τα τεχνοοικονομικά προβλήματα που καθυστερούν τη μαζική παραγωγή και αποκλειστική χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων.

Τα σύγχρονα υβριδικά οχήματα χρησιμοποιούν τεχνολογίες που αυξάνουν την απόδοση, όπως είναι η αναγεννητική πέδηση, μέσω της οποίας η κινητική ενέργεια του οχήματος μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια στον συσσωρευτή. Κάποια από αυτά τα οχήματα χρησιμοποιούν τον κινητήρα εσωτερικής καύσης που διαθέτουν ως γεννήτρια, με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την επαναφόρτιση των συσσωρευτών ή για την απευθείας τροφοδοσία του ηλεκτρικού κινητήρα. Επίσης, ανάλογα με το αν η σύνδεση των κινητήριων συστημάτων είναι σε σειρά, παράλληλα ή σε συνδυασμό των δύο, τα υβριδικά αυτοκίνητα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Όταν έχουμε *σύνδεση σε σειρά*, ο κινητήρας εσωτερικής καύσης χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την κίνηση μιας ηλεκτρικής γεννήτριας και τη φόρτιση των συσσωρευτών. Ο ηλεκτρικός κινητήρας που τροφοδοτείται αποκλειστικά από τους συσσωρευτές είναι το μόνο σύστημα που συμμετέχει στην κίνηση του οχήματος.
- Στην *παράλληλη σύνδεση* υπάρχουν δύο κινητήρες που παρέχουν πρόωση: ο κινητήρας εσωτερικής καύσης αλλά και ο ηλεκτρικός. Η ισχύς των δύο αυτών κινητήρων συνδυάζεται κατάλληλα, ώστε να ικανοποιηθεί η απαίτηση ισχύος με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση σε καύσιμο.
- Στην τρίτη κατηγορία έχουμε *συνδυασμό* των πλεονεκτημάτων των δύο παραπάνω κατηγοριών.

2.2.3 Κινητήρες για ηλεκτρικά οχήματα

Οι προδιαγραφές που πρέπει να τηρούνται από του κινητήρες που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά οχήματα είναι η υψηλή ροπή σε μικρές ταχύτητες, η ευρεία περιοχή ταχυτήτων λειτουργίας υπό σταθερή ισχύ, η υψηλή πυκνότητα ισχύος, η μεγάλη απόδοση, το μικρό βάρος, το χαμηλό κόστος, η αξιοπιστία, η μεγάλη διάρκεια ζωής και οι μικρές οικονομικές και υλικές απαιτήσεις για τη συντήρηση συγκριτικά με το κόστος. Ανάλογα με την εφαρμογή επιλέγεται και ο κατάλληλος κινητήρας με επιλεγμένες τεχνικές και λειτουργικές προδιαγραφές.

Συνήθως, σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης χρησιμοποιούνται κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Αυτό γίνεται διότι παρέχουν τεχνολογική ωριμότητα και απλό έλεγχο, τα οποία υπερисχύουν συχνά έναντι της απαίτησης για συντήρηση και αντικατάσταση των ψυκτρών. Ωστόσο, η αξιοπιστία των κινητήρων στα ηλεκτρικά οχήματα και η ανάγκη εξάλειψης της απαιτούμενης συντήρησης είναι πρωτεύουσας σημασίας και για το λόγο αυτό έχουν έρθει στο προσκήνιο κινητήρες χωρίς σύστημα συλλέκτη και ψυκτρών, παρέχοντας μεγαλύτερη αξιοπιστία και χαμηλότερο λειτουργικό κόστος. Οι κινητήρες επαγωγής επίσης έχουν ευρεία εφαρμογή στα ηλεκτρικά οχήματα, με κύριες αιτίες το μικρό κόστος, τον εύκολο έλεγχο και τη μεγάλη αξιοπιστία που προσφέρουν. Για την οδήγησή τους απαιτείται μια διάταξη αντιστροφής με δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας για έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής.

Οι σύγχρονοι κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες στον δρομέα είναι μια εναλλακτική λύση η οποία αναπτύσσεται όλο και περισσότερο για την ηλεκτροκίνηση. Όπως θα δούμε και στην πορεία, η χρήση μόνιμων μαγνητών στον δρομέα της μηχανής μπορεί να αντικαταστήσει τα τυλίγματα πεδίου στον δρομέα, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση των απωλειών χαλκού και την αύξηση της αξιοπιστίας λόγω της αφαίρεσης των ψυκτρών. Οι κινητήρες αυτοί τροφοδοτούνται από ημιτονοειδή τάση, έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής και χαρακτηρίζονται από μεγάλη πυκνότητα ισχύος και υψηλή απόδοση.

Ένας άλλος τύπος μηχανής είναι αυτός των σύγχρονων κινητήρων μαγνητικής αντίδρασης, οι οποίοι δεν διαθέτουν σύστημα διέγερσης αλλά ούτε και μόνιμους μαγνήτες στον δρομέα: εκμεταλλεύονται αποκλειστικά τη ροπή εκτυπότητας. Αυτός ο τύπος μηχανής έχει το πλεονέκτημα της απλότητας στην κατασκευή και του χαμηλού κόστους, δεν έχει όμως τη δυνατότητα παροχής μεγάλης ισχύος εξόδου.

Τέλος, κινητήρες με μεγάλο βαθμό απόδοσης και υψηλή πυκνότητα ισχύος είναι οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψύκτρες και συλλέκτη (DC Brushless motors). Επίσης έχουν την ικανότητα παροχής μεγάλης ροπής λόγω της ορθογώνιας μορφής της μαγνητικής ροής και του ρεύματος. Ωστόσο, έχουν ένα σημαντικό μειονέκτημα αφού για την οδήγησή τους απαιτείται ακριβής γνώση της θέσης του δρομέα, κάτι που επιτυγχάνεται με αισθητήρες ή τεχνικές υπολογισμού της θέσης του δρομέα από μετρήσεις των ηλεκτρικών μεγεθών.

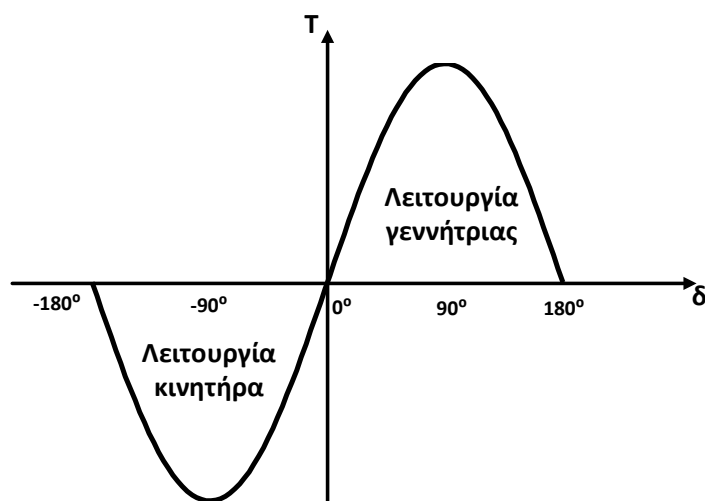
Κεφάλαιο 3: Σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών

3.1 Σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών

Στο σημείο αυτό θα δοθεί μια γενική περιγραφή των σύγχρονων μηχανών (ΣΜ) επιφανειακών μονίμων μαγνητών, ώστε να γίνει σαφής η σχεδίαση και η λειτουργία τους. Οι σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές αποτελούν μηχανές AC ρεύματος, στις οποίες το εναλλασσόμενο ρεύμα ρέει στο τύλιγμα του τυμπάνου ενώ στο τύλιγμα διέγερσης ρέει συνεχές ρεύμα. Εκτός από σπάνιες εφαρμογές, το τύλιγμα τυμπάνου των ΣΜ είναι τριφασικό, διανεμημένο στις αύλακες του στάτη, ενώ το τύλιγμα διέγερσης –ή αλλιώς το τύλιγμα πεδίου– βρίσκεται στον δρομέα και τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα από ένα σύστημα διέγερσης, συνήθως μέσω δακτυλίων και ψυκτρών. Όπως δηλώνει και το όνομά τους, στις ΣΜ η ηλεκτρομηχανική παραγωγή ενέργειας γίνεται σε μια ορισμένη ταχύτητα περιστροφής, τη σύγχρονη ταχύτητα, η οποία είναι ανάλογη με τη συχνότητα των εναλλασσόμενων ρευμάτων και τάσεων του τυμπάνου της μηχανής. Για την παραγωγή λοιπόν της ροπής τα δύο πεδία του στάτη και του δρομέα πρέπει να περιστρέφονται σε απόλυτο συγχρονισμό. Αυτό υποδηλώνεται και από τη σχέση:

$$T = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \Phi \cdot F \cdot \sin\delta \quad (\text{Εξ 3.1})$$

όπου T είναι η ροπή που παράγεται, P είναι ο αριθμός των πόλων, Φ είναι η μαγνητική ροή διάκενου ανά πόλο, F η ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΜΕΔ) και δ η γωνία ανάμεσα στους μαγνητικούς άξονες του Φ και του F .



Σχήμα 3.1 Τυπική χαρακτηριστική συνάρτηση ροπής γωνίας

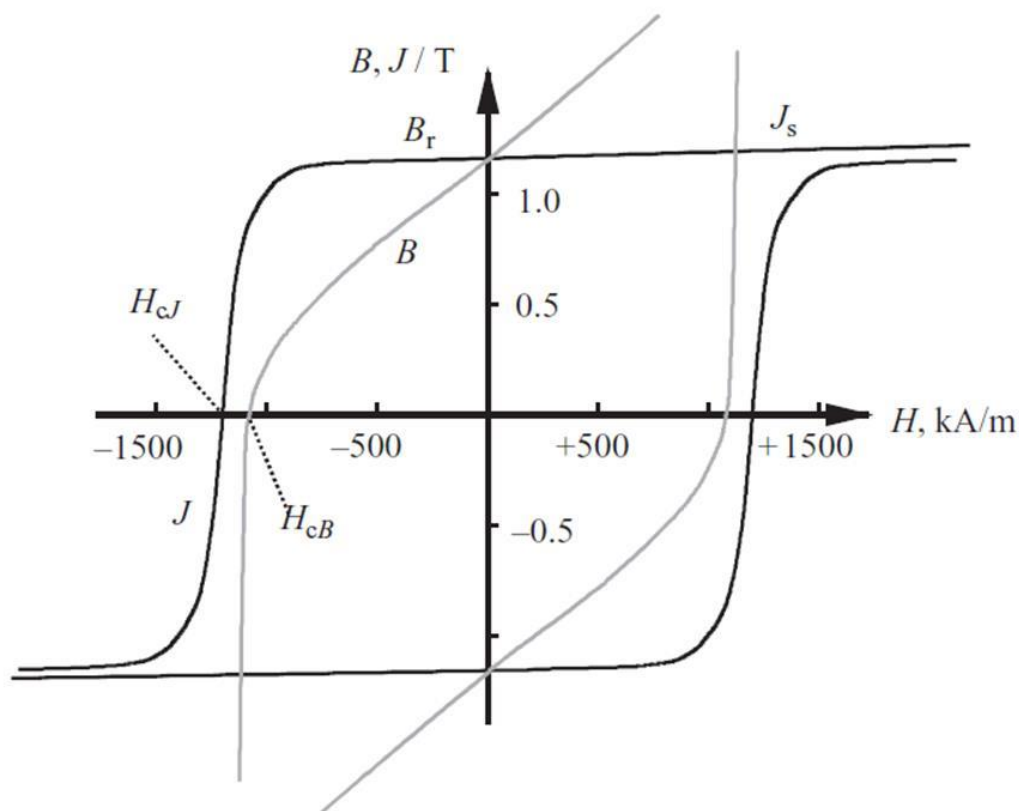
Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η τυπική χαρακτηριστική συνάρτηση ροπής και γωνίας δ , στο οποίο θεωρείται η σύμβαση πως αρνητική ροπή σημαίνει λειτουργία κινητήρα και θετική ροπή λειτουργία γεννήτριας. Καθώς η ροπή που ασκείται στον άξονα αυξάνεται, η γωνία ροπής αυξάνεται και αυτή μετά από μικρή επιτάχυνση του δρομέα, η οποία όμως παύει όταν επέλθει ξανά ισορροπία. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, η μέγιστη ροπή παράγεται σε γωνία δ ίση με 90° , οπότε και στο διάνυσμα της ΜΕΔ έχει τη μέγιστη απόσταση από το διάνυσμα της ροής στο διάκενο. Αν η ροπή όμως συνεχίζει να αυξάνεται πέρα από το σημείο αυτό, τότε η μηχανή δεν μπορεί να παράγει τη ροπή που απαιτείται και επέρχεται αποσυγχρονισμός. Με τον αποσυγχρονισμό η μηχανή δεν παράγει ροπή και δεν μπορεί να εκκινήσει, αφού κατά την εκκίνηση τα δύο πεδία πρέπει να είσαι σε συγχρονισμό. Αυτό το πρόβλημα στις μικρές μηχανές, οι οποίες έχουν και αρκετά μικρή αδράνεια, δεν εμφανίζεται καθώς μέσα σε λιγότερο από έναν κύκλο έχουν επιταχυνθεί σε σύγχρονη ταχύτητα. Όταν οι μηχανές είναι από την αρχή συνδεδεμένες με φορτίο ή στις περιπτώσεις που η αδράνεια του δρομέα είναι μεγάλη χρησιμοποιείται οδήγηση μέσω ηλεκτρονικών ισχύος για την εκκίνησή τους. Παράγεται αρχικά ένα ρεύμα πολύ χαμηλής συχνότητας, κοντά στο μηδέν, η οποία σταδιακά αυξάνεται μέχρι να φτάσει στο επιθυμητό επίπεδο, με τον κινητήρα να κινείται σε όλη τη διάρκεια της εκκίνησης με σύγχρονη ταχύτητα. [4] [5]

3.2 Τεχνολογία μονίμων μαγνητών

Στο δρομέα των ΣΜ, όπως ειπώθηκε και νωρίτερα, υπάρχει πεδίο διέγερσης. Το πεδίο αυτό στις περιπτώσεις των μονίμων μαγνητών δημιουργείται από τους ίδιους τους μαγνήτες. Χάρη σε αυτή την ιδιότητα των μαγνητών οι ΣΜ μονίμων μαγνητών επωφελούνται με αρκετά πλεονεκτήματα όπως είναι η σημαντική μείωση των απωλειών, καθώς δεν χρησιμοποιούνται πια ψύκτρες και συλλέκτες για την παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας στο δρομέα, και η μη ύπαρξη τυλίγματος στο δρομέα που καταργεί τις ωμικές απώλειες που εμφανίζονται στα τυλίγματα. Τέλος η κατασκευή αλλά και η συντήρηση μιας τέτοιας μηχανής είναι αρκετά απλή όπως επίσης και ο έλεγχός της.

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας αναπτύχθηκαν διάφοροι τύποι μονίμων μαγνητών με αποτέλεσμα την κατασκευή μαγνητών νεοδυμίου οι οποίοι έχουν, μέχρι σήμερα τουλάχιστον, το αποδεδειγμένα μεγαλύτερο ενεργειακό περιεχόμενο. Πλέον, αυτοί οι τύποι μαγνητών δεν

αντιμετωπίζουν προβλήματα απομαγνητισμού, όπως γινόταν παλαιότερα, και τα σύγχρονα μαγνητικά υλικά δεν επηρεάζονται από ισχυρά εξωτερικά μαγνητικά πεδία. Αυτά τα πλεονεκτήματα των σύγχρονων μαγνητικών υλικών μπορούν να φανούν σε ένα διάγραμμα βρόχου υστέρησης όπως είναι το ακόλουθο, στο οποίο φαίνεται πως για ένα μεγάλο εύρος τιμών, το πεδίο του μαγνήτη παραμένει σταθερό. Μόνο αν ο μαγνήτης τεθεί σε ένα πάρα πολύ ισχυρό πεδίο, το οποίο έχει ξεπεράσει το σημείο H_{cJ} , υπάρχει ο κίνδυνος απομαγνήτισης.



Σχήμα 3.2: Βρόχος υστέρησης μαγνήτη νεοδυμίου [6]

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται λεπτομερώς η διαδικασία που ακολουθείται για τη σχεδίαση ενός κινητήρα μονίμων μαγνητών. Από τις θεμελιώδεις σχέσεις προκαταρκτικής σχεδίασης, οι οποίες θα αποτελέσουν μια φόρμα προσδιορισμού των βασικών διαστάσεων του κινητήρα που θα μελετήσουμε, μέχρι τις ηλεκτρικές και μαγνητικές φορτίσεις. Η σχεδίαση του κινητήρα θα πραγματοποιηθεί σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, όπου θα γίνει και η θεώρηση των δυναμικών προβλημάτων που προκύπτουν κατά τη μαγνητοστατική ανάλυση της σχετικής κίνησης του δρομέα ως προς το στάτη καθώς και κατά την ημιτονοειδή μεταβολή των ρευμάτων τροφοδοσίας.

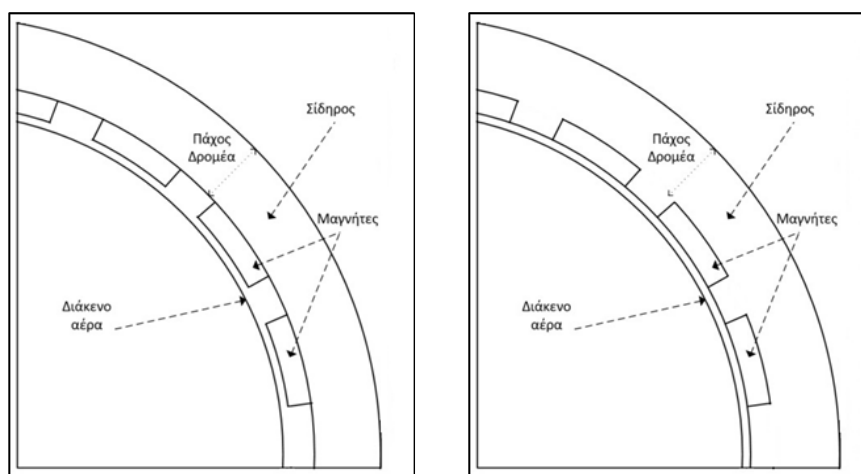
3.2.1 Κινητήρες εσωτερικά επιφανειακών μαγνητών

Οι κινητήρες εσωτερικά επιφανειακών μαγνητών αποτελούν μια διαμόρφωση ηλεκτρικής μηχανής κατά την οποία οι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του δρομέα, αλλά τα διάκενα που προκύπτουν μεταξύ τους είναι καλυμμένα με σίδηρο. Πρόκειται ουσιαστικά για μαγνήτες οι οποίοι είναι εγκλωβισμένοι μέσα σε μια μάζα σιδήρου

που συνιστά τον δρομέα της μηχανής. Αυτή η σχεδίαση παρουσιάζει το πλεονέκτημα της αυξημένης ροπής λόγω της εκτυπότητας που δημιουργείται από τον επιπλέον σίδηρο και σε σχέση με τις μηχανές επιφανειακών μαγνητών παρουσιάζουν μεγαλύτερη συγκράτηση των μαγνητών.

3.2.2 Κινητήρες επιφανειακών μονίμων μαγνητών

Αυτή η διαμόρφωση ηλεκτρικών κινητήρων τοποθετεί τους μαγνήτες στην επιφάνεια του δρομέα. Αυτό άμεσα καθιστά την κατασκευή απλούστερη από αυτούς με άλλες τοπολογίες αλλά και οικονομικότερη, καθώς δεν χρειάζονται ιδιαίτερα απαιτητικές κοπές στα υλικά. Η επίδοσή της, επιπλέον, αυξάνεται καθώς το πεδίο διέγερσης συγκεντρώνεται πρακτικά ως επί το πλείστον στο διάκενο της μηχανής. Σε αντίθεση με τις μηχανές εσωτερικά επιφανειακών επιφανειακών μαγνητών, οι φυγόκεντρες δυνάμεις στις οποίες υπόκεινται οι μαγνήτες αυξάνουν την πιθανότητα αποκόλλησής τους από τη θέση τους. Στη δική μας εφαρμογή, ο κινητήρας που κατασκευάστηκε και μελετάται περαιτέρω βασίζεται σε αυτή την τοπολογία, κυρίως λόγω του ότι η κατασκευή θα γινόταν στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος του ΕΜΠ, χωρίς να παρέχεται πρόσβαση σε εξειδικευμένα μηχανήματα μεγάλης ακρίβειας. Ένας άλλος λόγος επιλογής της συγκεκριμένης τοπολογίας ήταν φυσικά το χαμηλότερο κόστος.



Σχήμα 3.3: Αριστερά: Πρόχειρη τοπολογία σχεδίασης μηχανής επιφανειακών μαγνητών. Δεξιά: Πρόχειρη τοπολογία μηχανής εσωτερικών επιφανειακών μαγνητών. Και οι δύο σχεδιάσεις αφορούν μηχανή εξωτερικού δρομέα

Στην εφαρμογή που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένας κινητήρας επιφανειακών μονίμων μαγνητών εξωτερικού δρομέα. Ο εξωτερικός δρομέας σε έναν κινητήρα είναι συνήθης εφαρμογή στην ηλεκτροκίνηση, έχουμε δηλαδή να κάνουμε με έναν κινητήρα-τροχό, ο οποίος επιτρέπει την ένα προς ένα σχέση μετάδοσης της ισχύος από τον κινητήρα στον τροχό του οχήματος. Αυτή η πρακτική πλεονεκτεί σε περιπτώσεις κινητήρων επιφανειακών μονίμων μαγνητών, καθώς οι φυγόκεντρες δυνάμεις που αναπτύσσονται στον τροχό συγκρατούν τους μαγνήτες στη θέση τους.

3.3 Προκαταρκτική σχεδίαση κινητήρα

Βασική προϋπόθεση της βελτιστοποίησης της γεωμετρίας μιας ηλεκτρικής μηχανής, είναι η ύπαρξη μιας γεωμετρίας εκκίνησης, η οποία θα ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις και τις προδιαγραφές της εκάστοτε εφαρμογής. Η προκαταρκτική σχεδίαση της μηχανής περιλαμβάνει τη βασική διαστασιολόγηση της γεωμετρίας και τον καθορισμό του διάκενου, καθώς επίσης και μια γενικότερη διαμόρφωση του στάτη και του δρομέα, χωρίς αυτό να σημαίνει πως γίνεται λεπτομερής διαμόρφωση των μεγεθών αυτών. Για να δοθεί λοιπόν στη βελτιστοποίηση η ανάλογη γεωμετρία εκκίνησης πρέπει να καθοριστούν τα εξής:

- Η επιφάνεια του διάκενου, ώστε η μηχανή να έχει τη δυνατότητα να αναπτύξει την απαιτούμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή σε μόνιμη αλλά και μεταβατική κατάσταση, όπως ορίζουν οι προδιαγραφές.
- Η διαμόρφωση του στάτη και του δρομέα, ώστε να υπάρχει το επιθυμητό μαγνητικό πεδίο στο διάκενο της μηχανής.
- Έλεγχος της ειδικής ηλεκτρικής και μαγνητικής φόρτισης.
- Απαιτούμενη επίδοση και απόδοση της μηχανής.

Αυτά τα τέσσερα βήματα είναι και αυτά τα οποία ορίζουν τη γεωμετρία και τον τύπο του συνόλου της μηχανής ώστε να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα.

3.3.1 Διαστασιολόγηση διάκενου

Ως μέσο του διάκενου ορίζεται ο κύλινδρος που χωρίζει στη μέση το κενό μεταξύ δρομέα και στάτη μιας ηλεκτρικής μηχανής. Το κενό αυτό προσδιορίζεται βάσει των μεταβλητών D_g και L που αντιστοιχούν στη διάμετρο του δρομέα, αυξημένη κατά το πλάτος του διάκενου και το ενεργό μήκος της μηχανής. Η εφαρμογή μας αφορά έναν τριφασικό κινητήρα, συνεπώς οι παρακάτω σχέσεις υπολογισμού αντιστοιχούν σε αυτή την περίπτωση.

3.3.1.1 Πάχος του διάκενου

Το πάχος του διάκενου είναι ίσως το σημαντικότερο χαρακτηριστικό της διαστασιολόγησής του. Αυξημένο πάχος διάκενου σημαίνει αυτόματα μειωμένη απόδοση της μηχανής αλλά με μειωμένο αρμονικό περιεχόμενο και πιο ημιτονοειδή ΗΕΔ και αντίστροφα. Υπάρχουν πολλοί τύποι στη βιβλιογραφία που προσπαθούν να καθορίσουν την τιμή του πάχους του διάκενου και για μηχανές μικρής ισχύος, όπως στην περίπτωσή μας, οι τιμές αυτές κυμαίνονται μεταξύ 0.5mm και 1mm.

3.3.1.2 Ειδική μαγνητική φόρτιση

Ο τύπος της ειδικής μαγνητικής φόρτισης, συνδέει τον αριθμό των πόλων P με τη μαγνητική ροή Φ και δίνεται ως:

$$B_{av} = \frac{P \cdot \Phi}{\pi \cdot L \cdot D_g} \quad \text{Εξ 3.2}$$

Οι τιμές που παίρνει το μέγεθος αυτό συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 0.4 και 0.7 Tesla. Το άνω όριο τίθεται από το φαινόμενο του κορεσμού του σιδηρομαγνητικού υλικού στα δόντια του στάτη και μπορεί να ξεπεράσει και το 1 Tesla για ειδικές εφαρμογές ηλεκτρικών μηχανών. Όσο πιο μεγάλη τιμή ειδικής μαγνητικής φόρτισης έχουμε, τόσο μεγαλύτερη είναι και η

δυνατότητα παραγωγής ροπής και ισχύος, με αποτέλεσμα όμως τις αυξημένες απώλειες πυρήνα κυρίως όταν τα δόντια του στάτη βρίσκονται σε κορεσμό.

3.3.1.3 Ειδική ηλεκτρική φόρτιση

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση, ac , δίνεται από τον τύπο:

$$ac = \frac{3 \cdot N_i \cdot P \cdot I_{rms}}{\pi \cdot D_g} \quad \text{Εξ 3.3}$$

όπου N_i ο συνολικός αριθμός ελιγμάτων ανά φάση.

Προσδιορίζεται δηλαδή από την ενεργό τιμή των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο περιφέρειας του διάκενου. Στις σύγχρονες μηχανές η τυπική τιμή της ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης κυμαίνεται μεταξύ $15000 \text{AE}/\text{m}$ και $45000 \text{AE}/\text{m}$. Η ηλεκτρική μαζί με τη μαγνητική ειδική φόρτιση κοθορίζουν την ικανότητα παραγωγής ροπής μιας μηχανής. Όπως η ειδική μαγνητική φόρτιση συνδέεται με τις απώλειες σιδήρου της μηχανής έτσι και η ηλεκτρική έχει άμεση σχέση με τις απώλειες χαλκού.

Τα δύο μεγέθη που μόλις αναλύθηκαν συνδέονται με τη λεγόμενη σχέση εξόδου μιας ηλεκτρικής μηχανής, η οποία μας δίνει μια εκτίμηση της ροπής ή της ισχύος εξόδου που θα έχει. Η σχέση αυτή είναι η εξής:

$$S = 1.1 \cdot k_w \cdot \pi^2 \cdot B_{av} \cdot ac \cdot D_g^2 \cdot L \cdot n_s \quad \text{Εξ 3.4}$$

όπου k_w ο συντελεστής τυλίγματος και n_s είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα σε ΣΑΛ και δίνεται από τον τύπο:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{P} \quad \text{Εξ 3.5}$$

όπου f η ηλεκτρική συχνότητα της μηχανής.

Η ποσότητα S της παραπάνω εξίσωσης αποτελεί τη φαινόμενη ισχύ της μηχανής και δίνεται από τη σχέση:

$$S = 3 \cdot E_{rms} \cdot I_{rms} \quad \text{Εξ 3.6}$$

Τέλος το E_{rms} ισούται με:

$$E_{rms} = 4.44 \cdot f \cdot k_w \cdot N_i \cdot \Phi \quad \text{Εξ 3.7}$$

όπου Φ η πυκνότητα της μαγνητικής ροής ανά πόλο.

Όπως φαίνεται από τη σχέση εξόδου της μηχανής, η ισχύς εξόδου είναι ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου του διάκενου και ανάλογη του αξονικού μήκους του ενεργού μέρους του πυρήνα.

3.3.1.4 Επιφάνεια διάκενου

Η ροπή διάκενου T_e υπολογίζεται βάσει της μέσης εφαπτομενικής πίεσης των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο και της επιφάνειας του διάκενου A , κάτι το οποίο διακρίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$F_t = P_t \cdot A = P_t \cdot \pi \cdot L \cdot D_g \quad \text{Εξ 3.8}$$

$$T_{max} = \frac{D_g \cdot F_t}{2} \quad \text{Εξ 3.9}$$

$$T_{max} = \frac{\pi}{2} \cdot L \cdot D_g^2 \cdot P_t \quad \text{Εξ 3.10}$$

Η μέση μαγνητική δύναμη στο διάκενο, F_t υπολογίζεται ως:

$$F_t = \frac{L}{\mu_o} \oint_c B_n \cdot B_t dl \quad \text{Εξ 3.11}$$

Η μέση πίεση της εφαπτομενικής δύναμης στο διάκενο, P_t , ορίζεται ως:

$$P_t = \frac{F_t}{A} = \frac{1}{\pi \cdot D_g \cdot \mu_o} \oint_c B_n \cdot B_t dl \quad \text{Εξ 3.12}$$

Η μέση μαγνητική φόρτιση στο διάκενο B_{av} , επιλέγεται συνήθως ίση με 0.5T όπως είθισται σε εφαρμογές υψηλής απόδοσης. Θεωρώντας τη γωνία μεταξύ ακτινικής και εφαπτομενικής συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου ίση με $\theta = 45^\circ$ προκύπτει:

$$B_n = B_t = B_{av} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \quad \text{Εξ 3.13}$$

συνεπώς η εφαπτομενική πίεση προκύπτει ως εξής:

$$P_t = \frac{B_n \cdot B_t \cdot \pi \cdot D_g}{\pi \cdot D_g \cdot \mu_o} = \frac{B_{av}^2 \cdot \cos(2\theta)}{2 \cdot \mu_o} \quad \text{Εξ 3.14}$$

άρα,

$$D_g^2 \cdot L = \frac{2 \cdot T_{max}}{\pi \cdot P_t} \quad \text{Εξ 3.15}$$

3.3.1.5 Επιλογή αναλογίας διαστάσεων D_g και L

Η διαστασιολόγηση του διάκενου μιας μηχανής, όπως προείπαμε, είναι ουσιώδους σημασίας ως προς την απόδοση, επίδοση αλλά και ως προς τη μηχανική της αντοχή. Η διάμετρος του διάκενου και οι μεταβολές του συνδέονται ανάλογα με την ισχύ εξόδου της μηχανής, αντίθετα με τη μεταβολή του ενεργού της μήκους που δεν δίνει μεγάλες αλλαγές ως προς την ισχύ εξόδου της. Συνεπώς, σε εφαρμογές με μεγάλη δυνατότητα παραγόμενης ροπής εξετάζεται μια επιμήκης διάμετρος διάκενου. Όταν βέβαια η διάμετρος του διάκενου είναι αρκετά μεγάλη σε σχέση με το μήκος της μηχανής, το ποσοστό του χαλκού, δηλαδή των τυλιγμάτων που εξέχουν της ενεργής περιοχής του πυρήνα, γίνεται μεγαλύτερο και κατά συνέπεια έχουμε αυξημένες θερμικές απώλειες. Επίσης, έχοντας μια μηχανή με μεγάλη διάμετρο διάκενου, αυτόματα έχουμε και μεγάλη μάζα πυρήνα, κάτι που αυξάνει και τις απώλειες πυρήνα, με αποτέλεσμα η απόδοση της μηχανής να μειώνεται δραστικά. Κατ' αντιστοιχία μια τέτοια δυσαναλογία ως προς τα πλεονεκτήματα προσφέρει και η μεταβολή του αξονικού μήκους της μηχανής. Για εφαρμογές υψηλών στροφών προτιμάται μεγάλο αξονικό μήκος μηχανής και όχι αύξηση της διαμέτρου της με σκοπό την επίτευξη μεγαλύτερης ισχύος. Κατά αυτόν τον τρόπο έχουμε μια ταχύτητα δρομέα, η οποία δεν επιτρέπει την ανάπτυξη φυγόκεντρων δυνάμεων αλλά και τοπικών απωλειών σιδήρου. Αντίστοιχα, οι δρομείς με μεγάλο ενεργό μήκος εμφανίζουν έντονη ταλαντωτική συμπεριφορά με την αύξηση της ταχύτητας. Σε μικρές ταχύτητες περιστροφής προτιμάται και μικρός λόγος D_g/L , ενώ σε μεγάλες ταχύτητες η οριακή τάση του διάκενου περιορίζει τον δρομέα σε μικρή ακτίνα και για να επιτευχθεί η απαιτούμενη αύξηση της ισχύος αναγκαστικά πρέπει να αυξηθεί το αξονικό μήκος της μηχανής. Πάντοτε όμως υπάρχει ένα μηχανικό όριο το οποίο δεν μπορεί να ξεπεραστεί με την αύξηση του λόγου D_g/L και οφείλεται στην ακαμψία των υλικών αλλά και την αναγκαία διατήρηση του διάκενου.

3.3.2 Προσδιορισμός χαρακτηριστικών στάτη

Ένα κύριο χαρακτηριστικό στη διαμόρφωση της γεωμετρίας του στάτη αποτελεί η συχνότητα λειτουργίας της μηχανής. Αυτή είναι που θα καθορίσει άμεσα τις απώλειες πυρήνα της μηχανής αλλά και τις αυτεπαγωγές της. Αύξηση της συχνότητας συνεπάγεται αύξηση των απωλειών του πυρήνα αλλά και των αυτεπαγωγών του κινητήρα. Για μια μηχανή με πολλούς πόλους το μαγνητικό κύκλωμα γίνεται ελαφρύετρο, καθώς η διαδρομή της μαγνητικής ροής Φ από τον έναν πόλο στον άλλο είναι αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού των πόλων. Αυτό σημαίνει μείωση του μεγέθους των δοντιών και του σώματος του στάτη, καθώς η μείωση της μαγνητικής ροής με την αύξηση των πόλων απομακρύνει την πιθανότητα να επέλθει κορεσμός στον σίδηρο. Ο λόγος πόλων-ηλεκτρικής συχνότητας έχει ως εξής:

$$\frac{P}{f} = \frac{4 \cdot \pi}{\omega_m} \quad \text{Εξ 3.16}$$

Από τον παραπάνω τύπο καθίσταται σαφές πως για χαμηλή ταχύτητα περιστροφής οι πόλοι της μηχανής μπορούν να αυξηθούν χωρίς να αυξηθεί πολύ η ηλεκτρική συχνότητα. Με τον τρόπο αυτό οι απώλειες σιδήρου διατηρούνται αρκετά χαμηλές σε σχέση με τις απώλειες χαλκού της μηχανής. Αυξάνοντας τον αριθμό των πόλων της μηχανής έχουμε αυτόματη μείωση του πάχους των δοντιών του στάτη και κατά συνέπεια τη μείωση του μήκους των τυλιγμάτων άρα και μείωση των απωλειών χαλκού.

3.3.3 Επιλογή διαμόρφωσης τυλιγμάτων

Υπάρχουν διάφορα είδη διαμόρφωσης των τυλιγμάτων σε μια μηχανή, μπορεί να είναι είτε κυματοειδή είτε βροχοειδή, πλήρους ή κλασματικού βήματος κλπ. Οι συνηθέστερες περιπτώσεις είναι *i*) τα επικαλυπτόμενα, διανεμημένα με 1 ή 2 αυλάκια ανά πόλο και φάση και *ii*) τα μη επικαλυπτόμενα συγκεντρωμένα, μονής ή διπλής στρώσης.

Τα διανεμημένα επικαλυπτόμενα τυλίγματα δίνουν πιο ημιτονοειδή μορφή ΜΕΔ στο διάκενο και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται εκτεταμένα σε μηχανές μόνιμου μαγνήτη χωρίς συλλέκτη (brushless AC PM machines). Όμως τα συγκεντρωμένα τυλίγματα κλασματικού βήματος είναι αυτά που χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο στις εφαρμογές. (Fractional Slot Concentrated Windings). Αυτό γιατί παρέχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος, απόδοση αλλά και κοντά άκρα τυλιγμάτων. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα χαρακτηριστικά των δύο αυτών διαμορφώσεων των τυλιγμάτων.

Χαρακτηριστικό	Διανεμημένα τυλίγματα	Συγκεντρωμένα τυλίγματα
Συντελεστής πληρότητας χαλκού στις αυλάκες	35% - 45%	50% - 66%
Κατασκευή στάτη	Συνεχή ελάσματα	Συνεχή ελάσματα ή τμηματικές κατασκευές
Τυλίγματα τερματικών συνδέσεων	Μακρά επικαλυπτόμενα	Κοντά μη επικαλυπτόμενα
Αρμονικό περιεχόμενο παραγόμενης ροπής	Θεμελιώδης μόνο	Στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχουν αρμονικές υψηλότερης τάξης

Πίνακας 3.1: Κύρια χαρακτηριστικά συγκεντρωμένων και διανεμημένων τυλιγμάτων [7]

Για την κατασκευή του κινητήρα του «Πυρφόρου II» επιλέχθηκε η διαμόρφωση των συγκεντρωμένων τυλιγμάτων διότι παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα διανεμημένα τυλίγματα κυρίως ως προς την ευκολία κατά την κατασκευή. Έπειτα έχουμε μεγάλο συντελεστή πληρότητας στην αυλάκα και συνάμα μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος, έχουμε κοντύτερα άκρα τυλιγμάτων συνεπώς μειωμένες απώλειες χαλκού καθώς και υψηλότερη ανοχή στα σφάλματα και καλύτερη συμπεριφορά στις μεταβατικές καταστάσεις καθώς εξαλείφεται το φαινόμενο των αμοιβαίων επαγωγών ανάμεσα στις φάσεις.

Τα τυλίγματα στα οποία ο αριθμός των αυλάκων ανά φάση και πόλο δεν είναι ακέραιος αλλά κλασματικός ονομάζονται τυλίγματα κλασματικού βήματος και αυτό πρακτικά σημαίνει ότι τα πηνία είναι τοποθετημένα με τέτοιο τρόπο ώστε το μήκος των φάσεων να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο συγκριτικά με τυλίγματα πλήρους βήματος.

3.3.4 Μελέτη χαρακτηριστικών δρομέα

Η χρήση μόνιμων μαγνητών δίνει τη δυνατότητα χρήσης τους σε σημείο λειτουργίας το οποίο βρίσκεται στην περιοχή μέγιστης ενέργειας στην καμπύλη απομαγνήτισης. Η

καμπύλη αυτή αποτελεί πρακτικά μια ευθεία γραμμή, διευκολύνοντας έτσι τον υπολογισμό του σημείου στο οποίο θα αποδίδουν μεγαλύτερη ενέργεια. Βασική προϋπόθεση για αυτό είναι να είναι γνωστά η παραμένουσα μαγνήτιση B_r , καθώς και το μαγνητικό πεδίο επαναφοράς, H_C . Η καμπύλη απομαγνήτισης μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση:

$$H(B) = \frac{H_C}{B_r} \cdot B - H_C \quad \text{Eξ 3.17}$$

με την ένταση του μαγνητικού πεδίου να H να υπολογίζεται σε kA/m .

Η μείωση της πυκνότητας μαγνητικής ροής κατά την ονομαστική φόρτιση στην επιφάνεια του μαγνήτη δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta B = \frac{B_r}{H_C} \cdot ac \quad \text{Eξ 3.18}$$

Ενώ στην περίπτωση επιφανειακού μαγνήτη, θεωρώντας σταθερή τη ΜΕΔ κατά μήκος του διάκενου που αντιστοιχεί στο μαγνήτη, έχουμε:

$$B_g = B_r \cdot \frac{L_m}{L_m + L_g} \quad \text{Eξ 3.19}$$

όπου B_g είναι η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο, B_r , είναι η παραμένουσα μαγνήτιση, L_m , το πάχος του μαγνήτη και L_g το μήκος του διάκενου. Το ελάχιστο περιφερειακό μήκος μαγνήτη δίνεται από τη σχέση:

$$L_{magnet} = \frac{\Phi}{B_g \cdot L} \quad \text{Eξ 3.20}$$

Η ακτίνα του δρομέα από τη σχέση:

$$R_r = \frac{D_g - L_g}{2} - L_m \quad \text{Eξ 3.21}$$

Το τόξο του μαγνήτη ή αλλιώς η γωνία του μαγνήτη σε μοίρες δίνεται ως:

$$\theta_{magnet} = \frac{L_{magnet}}{R_r} \cdot \frac{180}{\pi} \quad \text{Eξ 3.22}$$

3.4 Μαγνητοστατική ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Ο κώδικας σχεδίασης του κινητήρα αναπτύχθηκε σε περιβάλλον matlab καθώς αυτό είναι ένα πρόγραμμα που μπορεί να συνεργαστεί με το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων FEMM. Η σύνδεση αυτή γίνεται μέσω της γλώσσας προγραμματισμού luascript ,όπου κομμάτια κώδικα εμπεριέχονται πίσω από την εκτέλεση μιας και μόνο εντολής. Οι

εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για την ηλεκτρομαγνητική ανάλυση του κινητήρα είναι αυτές που δίνονται από τον Meeker [7].

3.4.1 Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Το προσχέδιο της μηχανής που προέκυψε από την προκαταρκτική σχεδίαση του κινητήρα πρέπει να εισαχθεί σε ένα πρόγραμμα ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται σε αυτή. Για την ανάλυση αυτή απαιτείται η επίλυση εξισώσεων του μαγνητικού πεδίου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η ανάλυση μας δίνει τη δυνατότητα μιας πολύ καλής προσέγγισης της κατανομής του μαγνητικού πεδίου και με την κατάλληλη επεξεργασία των αποτελεσμάτων αυτής της κατανομής μπορούμε να έχουμε ακριβή στοιχεία για τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μηχανής, όπως είναι οι απώλειες, η ροπή, η ισχύς κλπ.

Η επίλυση του μαγνητικού πεδίου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων μετατρέπει μια αρκετά πολύπλοκη ανάλυση με γεωμετρίες που περιλαμβάνουν μη γραμμικά υλικά, σε έναν συνδυασμό μεγάλου αριθμού απλών γεωμετρικών χώρων. Ουσιαστικά γίνεται μετατροπή των πολύπλοκων διαφορικών εξισώσεων που εκφράζουν τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα, σε αλγεβρικές εξισώσεις που αφορούν ένα πάρα πολύ μικρό ποσοστό της συνολικής γεωμετρίας της μηχανής. Αυτή η διακριτοποίηση του χώρου πραγματοποιείται με τη βοήθεια τριγώνων, στην περίπτωση του προγράμματος που θα χρησιμοποιήσουμε. Έτσι, λοιπόν, έχουμε ένα φυσικό πρόβλημα το οποίο για λόγους ανάλυσης μετατρέπεται σε διακριτό. Το πρόβλημα που προκύπτει με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι ένα αλγεβρικό πια πρόβλημα όπου οι τιμές των πεδίων στο εσωτερικό των τριγώνων μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας τις τιμές των κορυφών τους.

3.4.2 Επίλυση μαγνητοστατικών προβλημάτων [7]

Μαγνητοστατικά προβλήματα ονομάζονται τα προβλήματα τα οποία είναι αμετάβλητα ως προς το χρόνο. Σε αυτή την περίπτωση η ένταση του μαγνητικού πεδίου (field intensity, H) και η μαγνητική επαγωγή (flux density, B) πρέπει να ικανοποιούν τις παρακάτω εξισώσεις του Maxwell:

$$\nabla \times \bar{E} = -(\partial \bar{B})/\partial t \quad \text{Εξ 3.26}$$

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + (\partial \bar{D})/\partial t \quad \text{Εξ 3.27}$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho \quad \text{Εξ 3.28}$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad \text{Εξ 3.29}$$

Όπου D το πεδίο μετατόπισης και ρ η συνολική πυκνότητα φορτίου.

Σύμφωνα με το νόμο του Ampere και θεωρώντας χαμηλές συχνότητες λειτουργίας έχουμε:

$$\partial D/\partial t = 0 \quad \text{Εξ 3.30}$$

συνεπώς:

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} \quad \text{Εξ 3.31}$$

Όπου J πυκνότητα ρεύματος.

Επίσης για κάθε υλικό, σύμφωνα με τη θεμελιώδη καταστατική σχέση μεταξύ των μεγεθών B και H , προκύπτει:

$$\bar{B} = \mu \bar{H} \quad \text{Εξ 3.32}$$

Η οποία σχέση στην περίπτωση των μονίμων μαγνητών έχει τη μορφή:

$$\bar{B} = \mu_0 \bar{H} + \bar{M} \quad \text{Εξ 3.33}$$

Όπου μ η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού, μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού και M η μαγνήτιση του υλικού του μόνιμου μαγνήτη. Αν το υλικό είναι μη γραμμικό, όπως για παράδειγμα ο κορεσμένος σίδηρος, τότε η μαγνητική διαπερατότητα μ , είναι μια συνάρτηση του μέτρου B :

$$\mu(B) = \frac{B}{H(B)} \quad \text{Εξ 3.34}$$

Η εύρεση του μαγνητικού πεδίου σε κάθε διακριτό τρίγωνο του χώρου υπολογίζεται από το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό A , καθώς το μαγνητικό πεδίο γράφεται και ως συνάρτηση του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού ως εξής:

$$\bar{B} = \nabla \times \bar{A} \quad \text{Εξ 3.35}$$

Συνεπώς από τις 3.35 και 3.29 έχουμε:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{(\mu B)} \nabla \times \bar{A} \right) = \bar{J} \quad \text{Εξ 3.36}$$

Με $\nabla \cdot A = 0$ από τη συνθήκη του Coulomb, έχουμε:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \times \bar{A} = -\bar{J} \quad \text{Εξ 3.37}$$

Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιείται καρτεσιανή γεωμετρία δύο διαστάσεων και για το λόγο αυτό, από τις συνιστώσες του διανυσματικού δυναμικού A , θεωρούμε πως

μεταβάλλεται μόνο η συνιστώσα A_z ενώ οι άλλες δύο μπορούν να μηδενισθούν. Η χρήση του διανυσματικού δυναμικού στην ανάλυση που θα κάνουμε, παρέχει το πλεονέκτημα ότι όλες οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται στο μαγνητοστατικό πεδίο συνδυάζονται στην εξίσωση μιας απλής μεταβλητής. Με δεδομένο το A , η ένταση του μαγνητικού πεδίου H , και η μαγνητική επαγωγή B , προκύπτουν από την κατάλληλη επεξεργασία του. Άρα:

$$\vec{A} = A_z \vec{t}_z \quad \text{Εξ 3.38}$$

Για την πυκνότητα ρεύματος J ισχύει:

$$\vec{J} = J_z \vec{t}_z \quad \text{Εξ 3.39}$$

Ενώ για την πυκνότητα της μαγνητικής ροής η ανάλυση περιορίζεται στις δύο διαστάσεις:

$$\vec{B} = B_x \vec{t}_x + B_y \vec{t}_y \quad \text{Εξ 3.40}$$

Για τη δική μας ανάλυση όλα τα προβλήματα θεωρούνται μαγνητοστατικά και επιλύονται με βάση την εξίσωση *Poisson*, ενώ τα δυναμικά φαινόμενα, που προϋποθέτουν περιστροφή του δρομέα όπως είναι η εύρεση της ΗΕΔ, θεωρούνται διακριτές μαγνητοστατικές καταστάσεις, με αμετάβλητο πεδίο ανα χρονική στιγμή.

3.4.3 Οριακές συνθήκες

Η επίλυση ενός μαγνητοστατικού προβλήματος ανάγεται, όπως αναφέραμε νωρίτερα, σε επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων. Για να έχουμε μοναδική λύση, λοιπόν, πρέπει να οριστούν οριακές συνθήκες στο πρόβλημά μας, ώστε να έχουμε ένα καλώς τοποθετημένο πρόβλημα. Σύμφωνα με τον Bianchi [8] οι οριακές συνθήκες κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- *Dirichlet*: Σε αυτόν τον τύπο οριακής συνθήκης, η τιμή του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού A δηλώνεται στο πάνω όριο. Αν ισχύει $A = 0$, τότε πρόκειται για την ομογενή συνθήκη *Dirichlet*, αλλιώς για τη μη ομογενή. Η συνθήκη $A = 0$ απαντάται συχνά σε προβλήματα ηλεκτρικών μηχανών. Θέτουμε σε ένα γεωμετρικό όριο μαγνητικού προβλήματος το δυναμικό αυτό ίσο με μηδέν και έτσι περιορίζεται η μαγνητική ροή εντός των ορίων της μηχανής. Οι γραμμές της μαγνητικής ροής θα είναι παράλληλες ως προς το σύνορο. Σε περιπτώσεις μοντελοποίησης ολόκληρης της μηχανής η συνθήκη αυτή κρίνεται επαρκής.
- *Neumann*: Η οριακή συνθήκη *Neumann* ορίζει την κάθετη παράγωγο του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού κατά μήκος του ορίου. Συνήθως χρησιμοποιείται η ομογενής συνθήκη *Neumann*, δηλαδή η $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$. Στα μαγνητικά προβλήματα χρησιμοποιείται συνήθως όταν έχουμε να κάνουμε περιπτώσεις διεπιφάνειας μεγάλης διαπερατότητας. Η χρήση της συνθήκης αυτής επιβάλλει στις μαγνητικές γραμμές να τέμνουν το σύνορο κάθετα.
- *Robin*: Αυτή η συνθήκη είναι ένα είδος συνδυασμού των *Dirichlet* και *Neumann*, καθώς καθορίζει μια σχέση μεταξύ των σταθμισμένων τιμών της A και της παραγώγου του. Η συνθήκη αυτή χρησιμοποιείται συχνά σε προβλήματα διάδοσης θερμότητας ως οριακή συνθήκη σε μονωτικές επιφάνειες.

- *Περιοδική*: Μια περιοδική συνθήκη συνδέει δύο όρια, με τις οριακές τιμές στα αντίστοιχα σημεία των δύο ορίων να είναι ίσες.
- *Αντιπεριοδική*: Επίσης, συνδέει δύο όρια, μόνο που εδώ οι οριακές τιμές έχουν ίσα μέτρα αλλά αντίθετα πρόσημα.

Οι οριακές και αντιπεριοδικές συνθήκες χρησιμοποιούνται κυρίως όταν μοντελοποιείται τμήμα της μηχανής.

Στη δική μας περίπτωση στην οποία μοντελοποιείται ολόκληρη η μηχανή, χρησιμοποιούμε την ομογενή συνθήκη *Dirichlet*.

3.4.4 Διαδικασία ανάλυσης με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και εξαγωγής αποτελεσμάτων

Η διαδικασία ανάλυσης ενός μαγνητικού προβλήματος με πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων έχει τα εξής βήματα:

- Σχεδίαση της γεωμετρίας, ορισμός των οριακών και περιοδικών συνθηκών και καθορισμός των υλικών.
- Πλεγματοποίηση του δισδιάστατου προβλήματος με τον επιθυμητό αριθμό τριγώνων.
- Επίλυση προβλήματος γραμμικής άλγεβρας και εύρεση του διανυσματικού δυναμικού.
- Απεικόνιση και επεξεργασία αποτελεσμάτων

Κεφάλαιο 4: Αρχές της μονοκριτηριακής και της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το απαραίτητο υπόβαθρο της θεωρίας της βελτιστοποίησης. Δίνονται οι απαραίτητοι ορισμοί αλλά και οι θεμελιώδεις έννοιες που αφορούν την αναζήτηση των ακρότατων. Διατυπώνονται οι γενικευμένες μορφές των μονοκριτηριακών και πολυκριτηριακών προβλημάτων αλλά και κάποιες τεχνικές αναζήτησης που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάπτυξη των αλγορίθμων στα επόμενα κεφάλαια.

4.1 Θεμελιώδεις έννοιες βελτιστοποίησης

4.1.1 Έννοια του συστήματος

Η έννοια του συστήματος είναι θεμελιώδης για τη διατύπωση των προβλημάτων της μονοκριτηριακής και πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Ένας ορισμός που δόθηκε από τους Mays and Tung [9] είναι ο εξής:

«Ως σύστημα νοείται ένα σύνολο ανεξάρτητων μεταξύ τους στοιχείων που αλληλεπιδρούν, το οποίο χαρακτηρίζεται από: (α) ένα σύνολο που καθορίζει αν το στοιχείο ανήκει στο σύστημα ή στο περιβάλλον, (β) αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον (είσοδοι-έξοδοι), και (γ) σχέσεις μεταξύ των στοιχείων του και των εισόδων-εξόδων»

Από τον ορισμό αυτό βλέπουμε ότι εισάγονται κάποιες έννοιες οι οποίες ορίζονται ως:

- Είσοδος (input): ενός συστήματος καλείται κάθε σύνολο δράσεων που προέρχονται από το εξωτερικό περιβάλλον και επιφέρουν μεταβολές στην κατάσταση του συστήματος.
- Έξοδος (output) ή απόκριση (response): ενός συστήματος καλείται κάθε αντίδραση που παράγεται από το σύστημα και γίνεται αντιληπτή από το περιβάλλον.
- Μεταβλητές κατάστασης (state variables): είναι οι εσωτερικές ιδιότητες που περιγράφουν το τρέχον καθεστώς του συστήματος και μεταβάλλονται ως συνέπεια των εξόδων.

Στο δικό μας αντικείμενο, οι αναλύσεις που αφορούν τα διάφορα συστήματα δεν γίνονται πάνω στα πολύπλοκα φυσικά συστήματα αλλά σε μαθηματικά μοντέλα, τα οποία αποτελούν απλοποιήσεις αυτών.

4.1.2 Ορισμός βελτιστοποίησης

Σύμφωνα με τον ορισμό που δόθηκε από τον Pierre [10] «Ένα σύστημα είναι βέλτιστο ως προς ένα δεδομένο μέτρο επίδοσης και ένα δεδομένο σύνολο περιορισμών, εφόσον λειτουργεί ή αλλιώς αποδίδει τουλάχιστον ίσα αν όχι καλύτερα από κάθε άλλο σύστημα που ικανοποιεί τους ίδιους περιορισμούς». Η επίλυση ενός συστήματος βασίζεται σε ένα σύνολο εναλλακτικών αποφάσεων (decisions) και αποτιμήσεων (evaluations) των επιπτώσεων κάθε απόφασης. Ως βέλτιστη θεωρείται, λοιπόν, η απόφαση που μεγιστοποιεί το μέτρο της επίδοσης, αρκεί να δύναται να περιγραφεί από ένα σύνολο (x_1, x_2, \dots, x_n) και αν για κάθε τέτοια περιγραφή μπορεί να αντιστοιχιστεί ένα πραγματικό μέτρο επίδοσης.

4.1.3 Τοπικά ακρότατα

Κάθε πραγματική συνάρτηση $f(x)$ ορισμένη στο πεδίο ορισμού $D \subseteq R^n$ παρουσιάζει τοπικό ελάχιστο (local minimum) στο σημείο $x^* \in D$ όταν υπάρχει περιοχή $D_0 \subset D$ του x^* τέτοια ώστε για κάθε $x \in D_0$ να ισχύει:

$$f(x^*) \leq f(x) \quad \text{Εξ 4.1}$$

Αντίστοιχα ορίζεται και το τοπικό μέγιστο της συνάρτησης (local maximum). Κάθε σημείο τοπικού ελαχίστου ή μεγίστου καλείται τοπικό ακρότατο (local extreme), ενώ, όταν επιπλέον ισχύει πως $D_0 \equiv D$, χαρακτηρίζεται ως απόλυτο ή, συνηθέστερα, ολικό (global) ακρότατο. Συνεπώς, το ολικό ελάχιστο (global minimum), για παράδειγμα, μιας συνάρτησης δεν είναι τίποτα περισσότερο από το μικρότερο σημείο των τοπικών ελαχίστων που ανήκουν στο πεδίο ορισμού της. Αντίστοιχα, ορίζεται και το ολικό μέγιστο (global maximum) της συνάρτησης.

4.2 Βελτιστοποίηση πραγματικών συναρτήσεων

Οι αλγόριθμοι που θα δοθούν στη συνέχεια έχουν ως αντικείμενο βελτιστοποίησης τη γεωμετρία των ηλεκτρικών κινητήρων με βάση τις μεταβολές σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της ανάλυσης. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται πραγματικές συναρτήσεις σύμφωνα με τις οποίες εξελίσσεται η διαδικασία της βελτιστοποίησης. Έστω λοιπόν $P = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ το βαθμωτό μέτρο επίδοσης ενός συστήματος, όπου $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ είναι μια πραγματική συνάρτηση με πεδίο ορισμού $D \subseteq R^n$ και $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ το διάνυσμα στήλη των ανεξάρτητων μεταβλητών. Το f είναι η στοχική ή αντικειμενική συνάρτηση (objective function), ενώ οι συνιστώσες του x ορίζονται ως οι μεταβλητές απόφασης (decision variables) του συστήματος. Το πεδίο ορισμού καλείται

εφικτή περιοχή (feasible region or space) ή χώρος αναζήτησης (search space) και συμβολίζεται, όπως είπαμε και νωρίτερα, με το σύμβολο D . Το πεδίο τιμών που έχουμε σαν έξοδο του συστήματός μας ονομάζεται χώρος αποτίμησης (evaluation space) ή αντικειμενικός χώρος και συμβολίζεται με F .

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θεωρούμε το μέτρο της επίδοσης ως βαθμωτό μέγεθος, συνεπώς σε κάθε διάνυσμα x αντιστοιχεί μια πραγματική τιμή $P = f(x)$. Η τιμή αυτή είναι η έξοδος του συστήματος, το οποίο βρίσκεται υπό μελέτη, ως προς τις μεταβλητές που δόθηκαν ως είσοδος. Συνεπώς, με βάση τα παραπάνω το πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται ως εξής:

$$\min P = f(x), x \in D \quad \text{Εξ 4.2}$$

Θα μπορούσαμε να θέσουμε στην παραπάνω σχέση και τον τελεστή μεγιστοποίησης «max» αλλά η φύση του προβλήματος που θα εξετάσουμε στη συνέχεια μας οδηγεί αποκλειστικά σε συναρτήσεις ελαχιστοποίησης των τιμών στον χώρο αναζήτησης.

4.3 Χώροι αναζήτησης και αποτίμησης

Πεδίο ορισμού ή αλλιώς πεδίο αναζήτησης, $D \equiv R^n$, ονομάζεται ο χώρος ο οποίος ταυτίζεται με τον n -διάστατο ευκλείδειο χώρο. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης άνευ περιορισμών. Συνήθως, βέβαια, στα προβλήματα βελτιστοποίησης υπάρχουν περιορισμοί. Σε αυτές τις περιπτώσεις το πεδίο ορισμού D περιγράφεται από ένα σύνολο μαθηματικών εκφράσεων της μορφής:

$$c(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq, =, \geq 0 \quad \text{Εξ 4.3}$$

Στα προβλήματα βελτιστοποίησης οι περιορισμοί αυτοί εκφράζονται με τη μορφή της διπλής ανισότητας, καθώς υπάρχουν ανώτατα και κατώτατα όρια τιμών που προσδιορίζουν τα όρια διακύμανσης των μεταβλητών. Αυτοί οι περιορισμοί δίνονται στη μορφή:

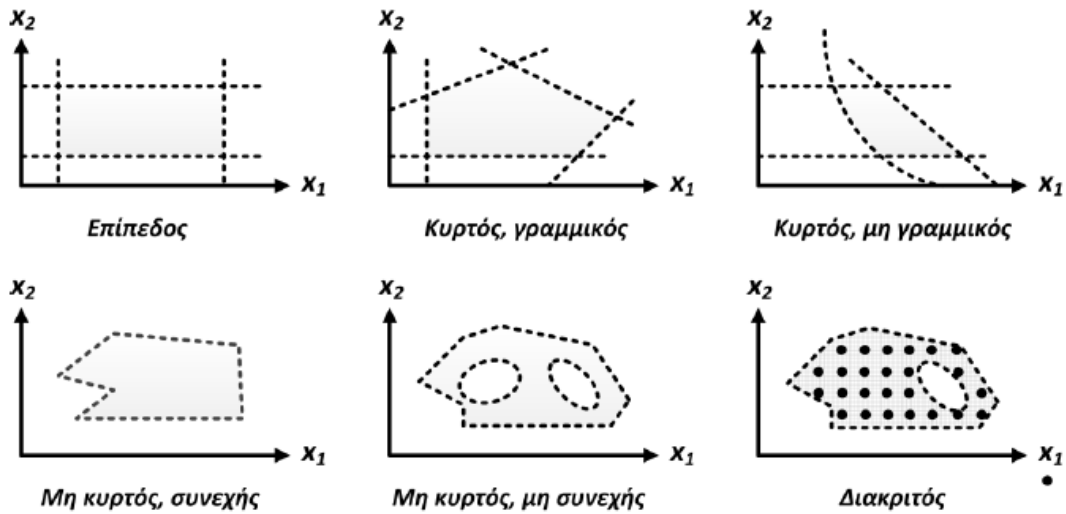
$$\text{lower boundary}_j \leq \text{variable}_j \leq \text{upper boundary}_j \quad \text{Εξ 4.4}$$

Μια άλλη πολύ βασική έννοια είναι η εφικτότητα στον χώρο αποτίμησης. Κάθε διάνυσμα μεταβλητών $x \in R^n$ που δεν ικανοποιεί τους εκάστοτε περιορισμούς του προβλήματος βελτιστοποίησης καλείται μη-εφικτό. Συνήθως, η υπό περιορισμούς βέλτιστη λύση βρίσκεται στο όριο του εφικτού χώρου, βρίσκεται δηλαδή στην τομή κάποιων από τους περιορισμούς του προβλήματος. Η ύπαρξη αυτών των περιορισμών ουσιαστικά εισάγει στη διαδικασία της βελτιστοποίησης την απαίτηση εφικτών αποκλειστικά λύσεων. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η αναζήτηση βέλτιστης λύσης πρέπει να βρεθεί έπειτα από αναζήτηση και διερεύνηση μόνο εφικτών περιοχών.

Ανάλογα με τον τύπο των περιορισμών, διαφοροποιείται και η γεωμετρία του πεδίου αναζήτησης και φυσικά η στρατηγική αναζήτησης λύσεων. Μπορούμε να διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες πεδίων:

- συνεχή και διακριτά
- γραμμικά και μη-γραμμικά

- ο κυρτά και μη-κυρτά



Σχήμα 4.1: Τυπικές μορφές διδιάστατων χώρων αναζήτησης [11]

4.4 Μέθοδος των βαρών

Οι αντικειμενικές συναρτήσεις αποτελούν το κυριότερο τμήμα της βελτιστοποίησης σε έναν αλγόριθμο, καθώς μέσω αυτών καθορίζεται το τελικό αποτέλεσμα και συνάμα η εύρεση της καλύτερης ή βέλτιστης λύσης. Σε έναν μονοκριτηριακό αλγόριθμο η αντικειμενική συνάρτηση μας περιορίζει ως προς τα αντικείμενα που τίθενται προς βελτιστοποίηση καθώς, όπως δηλώνει και το όνομά της, ο αλγόριθμος θα προχωρήσει στη βελτιστοποίηση ενός μόνο κριτηρίου. Αυτό το πρόβλημα στη μονοκριτηριακή –και όχι μόνο– βελτιστοποίηση έρχεται να λύσει η μέθοδος των βαρών. Με τη μέθοδο αυτή έχουμε τη δυνατότητα να προσαρμόσουμε την αντικειμενική συνάρτηση έτσι, ώστε να λαμβάνει υπόψη της περισσότερα από ένα κριτήρια, μετατρέποντάς τη σε πολυκριτηριακή υπό προϋποθέσεις.

Η μέθοδος των βαρών είναι μια απλή μέθοδος, καθώς το μόνο που απαιτεί είναι η ένωση των επιθυμητών κριτηρίων σε μία μόνο συνάρτηση, πολλαπλασιάζοντας το καθένα από αυτά με έναν αριθμό, το λεγόμενο βάρος του κριτηρίου (w_i), όπου i το αντίστοιχο κριτήριο. Με τον τρόπο αυτό ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης μετατρέπεται σε μονοκριτηριακό, εφόσον υπάρχει πια ένα μόνο κριτήριο προς βελτιστοποίηση. Η μέθοδος των βαρών με βάση τα παραπάνω ορίζει την αντικειμενική συνάρτηση ως εξής:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot g_i(x) \quad \text{Εξ 4.5}$$

όπου f η νέα αντικειμενική συνάρτηση και g_i οι επιμέρους συναρτήσεις. Κατά κανόνα ορίζεται ότι:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad \text{Εξ 4.6}$$

Για να έχουν οι συντελεστές βάρους πραγματικό νόημα και για να μην προκύψουν προβλήματα κλίμακας, απαιτείται μετασχηματισμός των επιμέρους συναρτήσεων g , ώστε το εύρος διακύμανσης των κριτηρίων να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους.

Αυτή η μέθοδος θα χρησιμοποιηθεί στην μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση με τον υβριδικό ABC, που θα αναλυθεί στη συνέχεια, αλλά και στον πολυκριτηριακό ASMA, του οποίου η μία συνάρτηση θα ορίζεται με βάση τη μέθοδο των βαρών. Η ευρεία χρήση αυτής της μεθόδου, βέβαια, φέρει και μειονεκτήματα, καθώς εισάγει στην αντικειμενική συνάρτηση ένα ποσοστό υποκειμενικότητας από τον χρήστη κατά τον ορισμό των βαρών κάθε επιμέρους συνάρτησης. Επίσης, υπάρχει ο κίνδυνος η μέθοδος αυτή να οδηγήσει τον αλγόριθμο σε τοπικό ακρότατο ή αλλιώς υπο-βέλτιστο, και να απαιτείται επιπλέον επίλυση του προβλήματος για να βρεθεί το νέο πιθανό βέλτιστο.

4.5 Μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση

Κάθε πρόβλημα διατυπώνεται έχοντας δύο βασικά μέρη, τη συνάρτηση $f(x)$ καθώς και τους περιορισμούς της. Αν η συνάρτηση στόχου $f(x)$ είναι απλή, τότε ορίζεται το πρόβλημα της κλασικής βελτιστοποίησης ή αλλιώς της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης. Σε αυτή την περίπτωση η συνάρτηση στόχου είναι ένα βαθμωτό μέγεθος και το πρόβλημά μας ανάγεται στην εύρεση τιμών οι οποίες είτε θα μεγιστοποιούν είτε θα ελαχιστοποιούν αυτή τη συνάρτηση. Οι τιμές αυτές, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, ονομάζονται μεταβλητές απόφασης (decision variables) και δίνονται ως το διάνυσμα-στήλη ως εξής:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad \text{Εξ 4.7}$$

όπου ο εκθέτης δηλώνει την ανάστροφη μήτρα. Η μαθηματική έκφραση του προβλήματος δίνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \max(\min) f(x) & \text{υποκειμένο σε:} \\ g_i(x) \otimes b_i & \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad \text{Εξ 4.8}$$

Στα μονοκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης, το σύνολο x καλείται να λύσει τη συνάρτηση στόχου και να μεταβάλλεται με τρόπο ώστε η $f(x)$ να ελαχιστοποιείται ή το αντίθετο. Συνεπώς, ο κύριος στόχος αυτού του τρόπου βελτιστοποίησης είναι ο εντοπισμός μιας μονοσήμαντης λύσης του προβλήματος. Ωστόσο, όταν η φύση των προβλημάτων είναι πιο περίπλοκη από μια απλή συνάρτηση, εγείρονται διάφορα εμπόδια με αποτέλεσμα την εύρεση λύσεων οι οποίες είναι συχνά μεροληπτικές. Η χρήση λοιπόν ενός μόνο κριτηρίου είναι συχνά μη ρεαλιστική και η προσέγγιση του προβλήματος γίνεται σε μεγάλο βαθμό υποκειμενική. Στις επόμενες ενότητες θα περιγραφεί αναλυτικά ο μονοκριτηριακός αλγόριθμος βελτιστοποίησης ABC (Artificial Bee Colony algorithm) και η εφαρμογή του σε πρόβλημα εύρεσης βέλτιστης γεωμετρίας μιας ηλεκτρικής μηχανής.

4.6 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση

[12] Όπως δίνεται και από το όνομά της, η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση έχει να κάνει με περισσότερες από μια αντικειμενικές συναρτήσεις. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, στη μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση στόχος είναι να βρεθεί η βέλτιστη λύση (είτε ελάχιστη είτε μέγιστη) μιας και μόνο αντικειμενικής συνάρτησης. Στην πολυκριτηριακή μέθοδο,

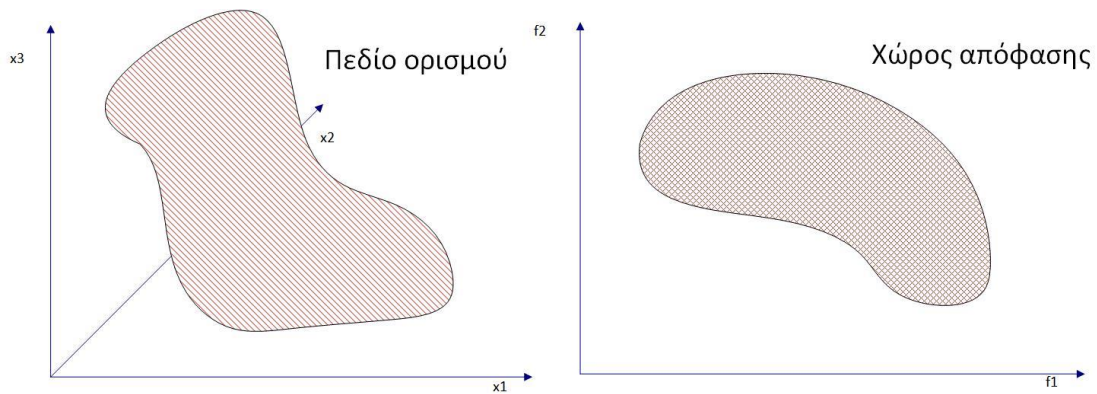
ωστόσο, συχνά και λανθασμένα πολλές φορές συμπεραίνεται το ότι στόχος είναι να βρεθεί η βέλτιστη λύση κάθε αντικειμενικής συνάρτησης που μελετάται. Αυτό όμως θα αποσαφηνιστεί στην πορεία.

Κάθε πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει έναν αριθμό αντικειμενικών συναρτήσεων οι οποίες είναι προς ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση. Όπως και στη μονοκριτηριακή μέθοδο έτσι και εδώ, το πρόβλημα περιέχει κάποιους περιορισμούς, τους οποίους κάθε λύση πρέπει να ικανοποιεί. Παρακάτω δίνεται στη γενική του μορφή το πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης.

$$\begin{array}{lll}
 \text{Ελαχιστοποίηση /Μεγιστοποίηση} & f_m(x), & m = 1,2, \dots, M; \\
 \text{Υποκείμενο σε} & g_j(x) \geq 0, & j = 1,2, \dots, J; \\
 & h_k(x) = 0, & k = 1,2, \dots, K; \\
 & x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)}, & i = 1,2, \dots, n. \quad \text{Εξ 4.9}
 \end{array}$$

Η λύση x είναι το διάνυσμα των n μεταβλητών απόφασης, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$. Η τελευταία σειρά αντιστοιχεί στο σύνολο των περιορισμών που πρέπει να ικανοποιούνται από τα σύνολα x και λέγονται όρια, τα οποία καθορίζουν τις τιμές των x . Κάθε μεταβλητή δεν πρέπει να είναι μικρότερη από την τιμή που ορίζει το κατώτατο όριο $x_i^{(L)}$ και αντίστοιχα δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το $x_i^{(U)}$ το οποίο είναι και το ανώτατο όριο. Αυτά τα όρια καθορίζουν και το πεδίο ορισμού D του προβλήματος. Οι $g_j(x)$ και $h_k(x)$ αποτελούν τις συναρτήσεις περιορισμού του προβλήματος και οι $f_m(x)$ αποτελούν τις αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος.

Αν το κάθε κριτήριο έχει τη δυνατότητα να ελαχιστοποιηθεί ολικά και ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα, τότε το πρόβλημα μετασχηματίζεται σε επίλυση m μονοκριτηριακών προβλημάτων. Φυσικά, αυτό είναι σπάνιο και κατά συνέπεια το διάνυσμα των μεταβλητών το οποίο αντιστοιχεί στα ελάχιστα κάθε κριτηρίου είναι σχεδόν πάντα μη εφικτό. Αν τα κριτήρια όμως είναι αντικρουόμενα (το οποίο συμβαίνει στις περισσότερες περιπτώσεις), κάθε σημείο του πεδίου αποτίμησης είναι υποβέλτιστο για τουλάχιστον ένα κριτήριο. Με τον όρο «υποβέλτιστο» ορίζεται κάθε σημείο που ανήκει στο πεδίο ορισμού και δεν επαληθεύει τους δεσμευτικούς περιορισμούς. Για τον λόγο αυτό δεν υπάρχει μια μονοσήμαντα βέλτιστη λύση. Στο σημείο αυτό εισέρχεται η έννοια της κυριαρχίας η οποία θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα.



Σχήμα 4.2: Απεικόνιση πεδίου ορισμού και χώρου απόφασης ή αποτίμησης ενός προβλήματος

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται μια αναπαράσταση του πεδίου ορισμού των μεταβλητών ενός προβλήματος και ο χώρος απόφασης δύο αντικειμενικών συναρτήσεων.

4.6.1 Έννοια της κυριαρχίας

Σε κάθε μονοκριτηριακό πρόβλημα η έννοια της βέλτιστης λύσης ορίζεται εύκολα και μονοσήμαντα, καθώς αρκεί να είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από το σύνολο των λύσεων που έχουν αναπτυχθεί, αν είναι πρόβλημα ελαχιστοποίησης ή μεγιστοποίησης αντίστοιχα. Στα πολυκριτηριακά, όμως, προβλήματα η βέλτιστη λύση παίρνει άλλη έννοια, καθώς δεν μπορούμε να αποφανθούμε τόσο εύκολα για την υπεροχή της μιας λύσης έναντι μιας άλλης. Σε αυτού του είδους τα προβλήματα αναφερόμαστε συχνά σε διανύσματα και χώρους με περισσότερες διαστάσεις από μία. Συνεπώς, κρίνεται αναγκαίο να ορίσουμε την έννοια της μερικής διάταξης των διανυσμάτων συγκρίνοντας τις συνιστώσες τους. Έστω ότι έχουμε δύο διανύσματα u και w . ορίζουμε λοιπόν τις παρακάτω σχέσεις μερικής διάταξης:

$$u = w \text{ αν } u_i = w_i \text{ για κάθε } i$$

$$u \leq w \text{ αν } u_i \leq w_i \text{ για κάθε } i$$

$$u < w \text{ αν } u_i \leq w_i \text{ για κάθε } i$$

$$u \sim w \text{ αν δεν ισχύει κάτι από τα παραπάνω}$$

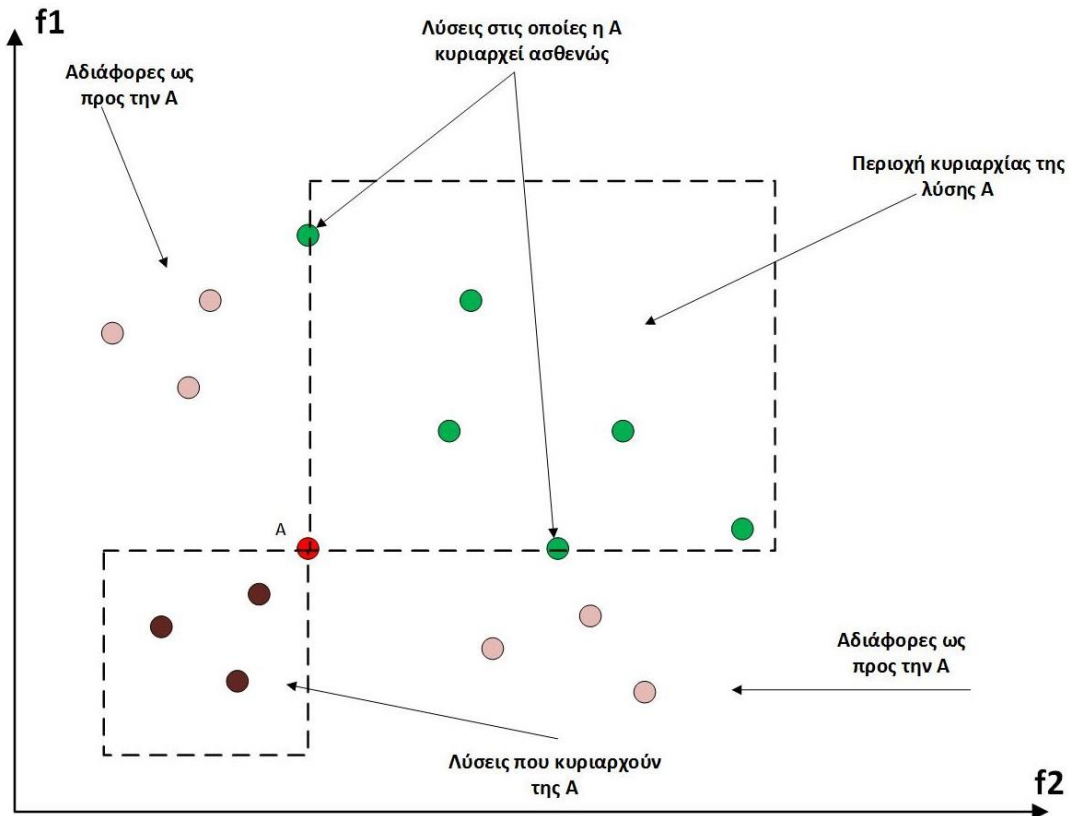
Εξ 4.10

Αν δεν ικανοποιείται καμία από τις πρώτες τρεις σχέσεις, τότε τα διανύσματα καλούνται αδιάφορα (indifferent) μεταξύ τους. Η έννοια της αδιαφορίας μεταξύ δύο διανυσμάτων υποδηλώνει την ύπαρξη της ανταγωνιστικότητας μεταξύ τους. Εδώ εισάγεται πια και η έννοια της κυριαρχίας. Για δύο διανύσματα λύσεων τα οποία προέκυψαν από ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα για δύο σύνολα μεταβλητών απόφασης $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, θα προσπαθήσουμε να δώσουμε αναλυτικά την έννοια της κυριαρχίας και της αδιαφορίας. Έστω λοιπόν το σύνολο τιμών f το οποίο προέκυψε από την αντικειμενική συνάρτηση του πολυκριτηριακού προβλήματος, το οποίο βρίσκεται υπό εξέταση. Για κάθε σύνολο μεταβλητών x παίρνουμε και τις αντίστοιχες τιμές f . Για δύο λύσεις x , έστω a και b , ισχύουν τα ακόλουθα:

$$\text{Η λύση } a \text{ κυριαρχεί πλήρως της } b \text{ αν } f(a) < f(b)$$

$$\text{Η } a \text{ κυριαρχεί ασθενώς της } b \text{ αν } f(a) \leq f(b)$$

Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι, αν μια λύση είναι καλύτερη ως προς μια άλλη για όλα τα κόστη που προκύπτουν από την αντικειμενική συνάρτηση, ορίζεται ως κυρίαρχη. Η ασθενής κυρίαρχία συνεπάγεται και την ισότητα μεταξύ των κόστων και η αδιαφορία δίνει τη δυσκολία εύρεσης βέλτιστης λύσης. Στο παρακάτω σχήμα δίνονται παραστατικά οι τρεις αυτές περιπτώσεις σε σχέση με ένα σημείο A το οποίο τίθεται ως αναφορά.



Σχήμα 4.3: Γεωμετρική απεικόνιση των συνατών σχέσεων κυριαρχίας ως προς ένα σημείο A του χώρου αποτίμησης σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο κριτηρίων

4.6.2 Βέλτιστο κατά Pareto, σύνολο και μέτωπο Pareto

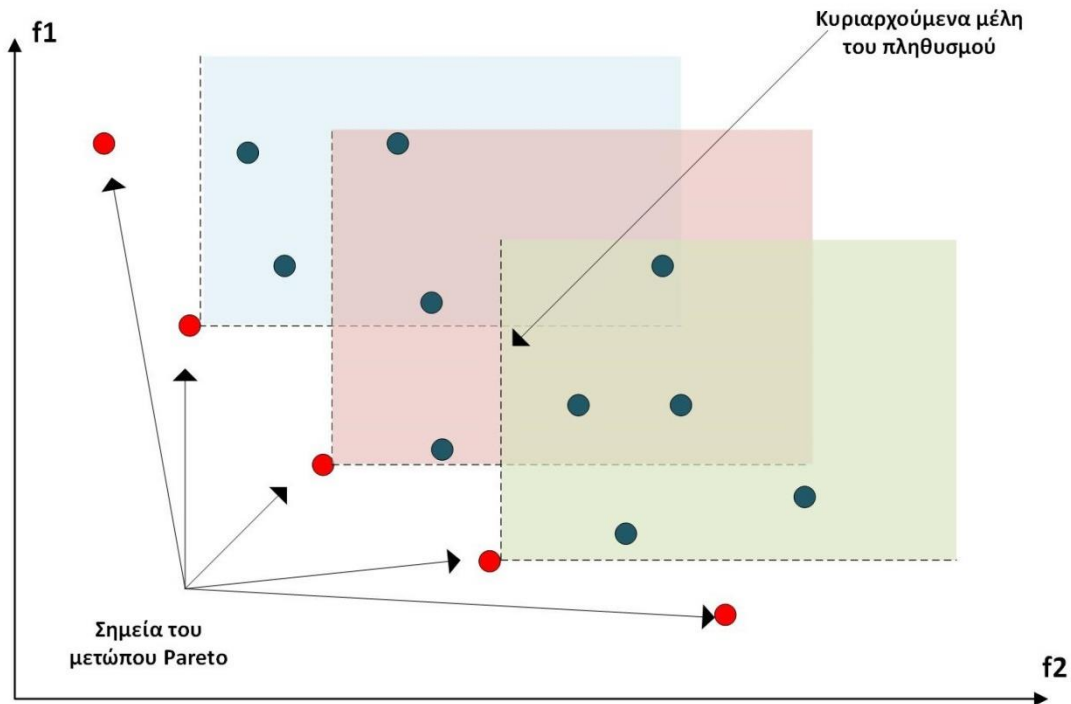
Σύμφωνα με τον ορισμό του βέλτιστου κατά Pareto έχουμε:

Ένα σημείο $x^ \in D$ είναι βέλτιστο, αν και μόνο αν, δεν υπάρχει άλλο σημείο $x \in D$, το οποίο μπορεί να βελτιώσει κάποιο κριτήριο f_i χωρίς ταυτόχρονα να χειροτερέψει τουλάχιστον ένα άλλο κριτήριο f_j .*

Με αυτόν τον τρόπο μας δίνεται η δυνατότητα να ξεπεράσουμε το πρόβλημα του ορισμού της βέλτιστης λύσης και στα πολυκριτηριακά προβλήματα.

Στις προηγούμενες ενότητες αναφέρθηκε πως συχνά δημιουργείται μια σύγχυση στα προβλήματα της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, ότι και αυτά οδηγούν στην εύρεση μοναδικής λύσης. Από τον ορισμό του βέλτιστου κατά Pareto γίνεται κατανοητό πως οι ικανές και αναγκαίες συνθήκες περί βέλτιστου μπορούν να ισχύουν για περισσότερα του ενός σημεία, τα οποία καλούνται βέλτιστα Pareto ή μη-κυριαρχούμενα. Το σύνολο των μη-

κυριαρχούμενων σημείων συμβολίζεται με X^* και είναι γνωστό ως σύνολο Pareto (Pareto set). Η απεικόνιση $f(x^*)$ των μη-κυριαρχούμενων σημείων $x^* \in D$ στο m -διάστατο πεδίο αποτίμησης ορίζει ένα υποσύνολο του πεδίου, το οποίο ονομάζεται μέτωπο Pareto (Pareto front). Στο μέτωπο Pareto περιλαμβάνονται σημεία τα οποία είτε κυριαρχούν είτε είναι αδιάφορα ως προς κάθε άλλο σημείο του χώρου αποτίμησης.



Σχήμα 4.4: Απεικόνιση μετώπου Pareto σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο κριτηρίων

4.6.3 Πρόβλημα επιλογής της βέλτιστης λύσης από το μέτωπο Pareto

Αφού ξεκαθαρίσαμε την έννοια της κυριαρχίας και του βέλτιστου στα πολυκριτηριακά προβλήματα, ήρθε η ώρα να θίξουμε ένα μεγάλο πρόβλημα το οποίο έχει να κάνει με την επιλογή της βέλτιστης λύσης. Το μέτωπο Pareto είναι ένα σύνολο μη-κυριαρχούμενων αποδεκτών λύσεων, όπως αναφέραμε και πριν, για το πρόβλημά μας. Ποια λύση όμως θα επιλεγεί ως κατάλληλη για την επίλυση του προβλήματος; Αυτό είναι και το ερώτημα που καλείται να απαντήσει κανείς όταν τίθεται θέμα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Η απάντηση στην ερώτηση αυτή είναι κάθε άλλο παρά αντικειμενική και εξαρτάται άμεσα από τη φύση του προβλήματος. Στην παρούσα διπλωματική εξετάζεται, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας ενός κινητήρα μονίμων μαγνητών. Τα κριτήρια με βάση τα οποία αναπτύχθηκε η βελτιστοποίηση θα αναλυθούν στη συνέχεια αλλά είναι αναγκαίο να πούμε πως η βέλτιστη λύση θα αποτελέσει έναν συμβιβασμό μεταξύ των κριτηρίων.

4.7 Τεχνικές σύγκρισης πολυκριτηριακών αλγορίθμων

4.7.1 Μέθοδος σύγκρισης με τη χρήση δοκιμαστικών συναρτήσεων

[13] [23] Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι έχουν αναδειχθεί ως πολύ χρήσιμα εργαλεία στην επίλυση πολυκριτηριακών προβλημάτων, εκ των οποίων και προβλημάτων του πραγματικού

κόσμου όπως για παράδειγμα η βέλτιστη μέθοδος διανομής λαδιού μέσα σε τεράστια δίκτυα αγωγών, ο σχεδιασμός τηλεπικοινωνιακών δικτύων, η διαχείριση πυρηνικών καυσίμων και πολλά άλλα. Από τη στιγμή που τα προβλήματα είναι πολλά και αρκετά πολύπλοκα δημιουργήθηκε η ανάγκη για την εύρεση αποτελεσματικών και καθοριστικών αλγορίθμων επίλυσης. Η ανάπτυξη μιας τόσο μεγάλης ποικιλίας αλγορίθμων οδήγησε, όπως ήταν φυσικό, σε πλήθος συγκρίσεων μεταξύ τους, που ως στόχο έχουν την ανάδειξη της υπεροχής τους ως προς τους υπόλοιπους. Αυτή η σύγκριση υποστηρίζεται μέσω δύο μεθόδων: η πρώτη είναι η εύρεση ενός μεγάλου συνόλου πολύπλοκων προβλημάτων προς επίλυση (test problems) για πολυκριτηριακούς αλγορίθμους και η δεύτερη είναι ένα ευρύ πλαίσιο μετρήσεων και αποτελεσμάτων με βάση τα οποία οι αλγόριθμοι θα μπορούν να συγκριθούν. Το τυπικό σενάριο σύγκρισης πολυκριτηριακών εξελικτικών αλγορίθμων έχει ως εξής:

- Επιλογή αλγορίθμων προς σύγκριση
- Επιλογή ενός συνόλου προβλημάτων αναφοράς ή η δημιουργία ενός νέου συνόλου
- Επιλογή ενός συνόλου μετρήσεων προς σύγκριση
- Ανάκτηση αποτελεσμάτων από τους αλγορίθμους
- Έλεγχος των αποτελεσμάτων και σύγκριση
- Συμπεράσματα

Για να είναι τα συμπεράσματα της σύγκρισης ακριβή, θεωρείται αναγκαία η πλήρης και σε βάθος κατανόηση των test problems, η ορθή λήψη των μετρήσεων από τους αλγορίθμους και φυσικά η εφαρμογή των κατάλληλων στατιστικών εργαλείων για την εξαγωγή των συμπερασμάτων. Εφόσον ο δικός μας αλγόριθμος είναι μια μέθοδος βελτιστοποίησης πραγματικών τιμών και όχι δυαδικών, η σουίτα προβλημάτων που επιλέχθηκε είναι για πραγματικές παραμέτρους, χωρίς να έχει πλευρικούς μαθηματικούς περιορισμούς και περιέχει καλώς ορισμένες μαθηματικές συναρτήσεις. Είναι, λοιπόν, μια σουίτα προβλημάτων αναφοράς με κύρια χαρακτηριστικά της την ευκολία στη σχεδίαση και στην προσαρμογή τους στους αλγορίθμους, την ευκολία στην απεικόνιση των αποτελεσμάτων και την κατανόησή τους. Τέτοιου είδους προβλήματα είναι εύκολα στην ανάλυση αλλά και στην προσαρμογή τους και για τον λόγο αυτό είναι και αρκετά δημοφιλή.

4.7.1.1 Van Veldhuizen's Test Suite

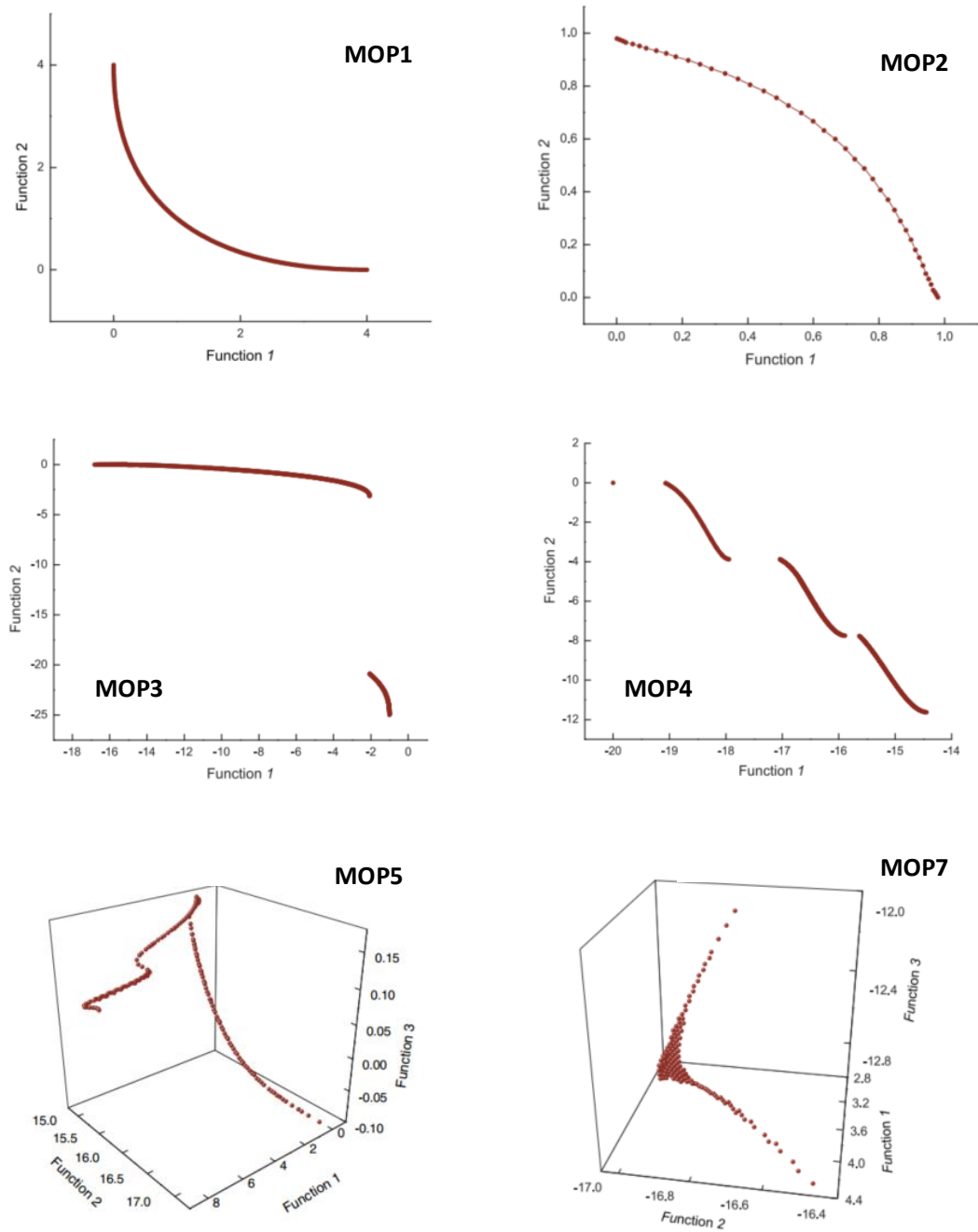
Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλά προβλήματα ελέγχου για πολυκριτηριακούς αλγορίθμους βελτιστοποίησης και είναι σύνηθες το να συγκεντρώνονται κάποια από αυτά σε ένα υποσύνολο προβλημάτων το οποίο ονομάζεται σουίτα. Ένα αρκετά αντιπροσωπευτικό παράδειγμα υποσυνόλου προβλημάτων ελέγχου είναι η σουίτα Van Veldhuizen [23]. Τα προβλήματα τα οποία συγκέντρωσε ο Van Veldhuizen είναι αντιπροσωπευτικά των τύπων προβλημάτων που κυκλοφορούσαν στη βιβλιογραφία πριν από τις δημοσιεύσεις του Deb και τα προβλήματα ZDT. Πολλά από τα προβλήματα αυτά είναι λιγότερο μεθοδικά, κατασκευασμένα ως προς την ευκολία στην ανάλυση, ωστόσο περιέχουν κάποιες ιδιότητες που δεν εισάγονται στον έλεγχο των αλγορίθμων από άλλες test suites. Τα προβλήματα της σουίτας Van Veldhuizen ονομάζονται MOP [13] [23] και φαίνονται στον πίνακα 2.1.

Τα επτά προβλήματα ελέγχου των αλγορίθμων που δίνονται παρακάτω είναι δισδιάστατα αλλά και τρισδιάστατα, αυξάνοντας έτσι την πολυπλοκότητα εύρεσης του βέλτιστου μετώπου Pareto από κάθε αλγόριθμο υπό εξέταση. Έχουμε για κάθε μια εξίσωση συγκεκριμένα πεδία ορισμού που πρέπει να τηρούνται από τις παραμέτρους του κάθε αλγορίθμου

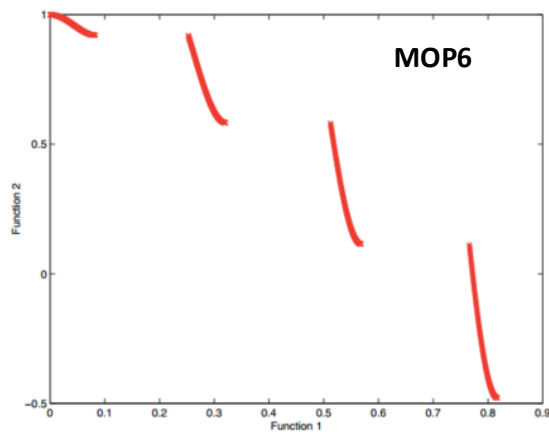
Όνομα	Πρόβλημα	Πεδίο ορισμού
MOP1	$f_1(x) = x^2 f_2(x) = (x - 2)^2$	$[-10^5, 10^5]$
MOP2	$f_1(x_1, \dots, x_n) = 1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^n \left(x_i - \frac{1}{\sqrt{n}}\right)^2\right)$ $f_2(x_1, \dots, x_n) = 1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^n \left(x_i + \frac{1}{\sqrt{n}}\right)^2\right)$	$[-4, 4]$
MOP3	Max. $f_1(x_1, x_2) = -1 - (A_1 - B_1)^2 - (A_2 - B_2)^2$ Max. $f_2(x_1, x_2) = -(x_1 + 3)^2 - (x_2 + 1)^2$ $A_1 = 0.5 \sin 1 - 2 \cos 1 + \sin 2 - 1.5 \cos 2$ $A_2 = 1.5 \sin 1 - \cos 1 + 2 \sin 2 - 0.5 \cos 2$ $B_1 = 0.5 \sin x_1 - 2 \cos x_1 + \sin x_2 - 1.5 \cos x_2$ $B_2 = 1.5 \sin x_1 - \cos x_1 + 2 \sin x_2 - 0.5 \cos x_2$	$[-\pi, \pi]$
MOP4	$f_1(x_1, x_2, x_3) = \sum_{i=1}^2 -10 \exp(-0.2 \sqrt{x_i^2 + x_{i+1}^2})$ $f_2(x_1, x_2, x_3) = \sum_{i=1}^3 x_i ^{0.8} + 5 \sin(x_i^3)$	$[-5, 5]$
MOP5	$f_1(x_1, x_2) = 0.5(x_1^2 + x_2^2) + \sin(x_1^2 + x_2^2)$ $f_2(x_1, x_2) = \frac{(3x_1 - 2x_2 + 4)^2}{8} + \frac{(x_1 - x_2 + 1)^2}{27} + 15$ $f_3(x_1, x_2) = \frac{1}{x_1^2 + x_2^2 + 1} - 1.1 \exp(-x_1^2 - x_2^2)$	$[-30, 30]$
MOP6	$f_1(x_1) = x_1$ $f_2(x_1, x_2) = (1 + 10x_2)\left(1 - \left(\frac{x_1}{1 + 10x_2}\right)^2\right) - \frac{x_1}{1 + 10x_2} \sin(8\pi x_1)$	$[0, 1]$
MOP7	$f_1(x_1, x_2) = \frac{(x_1 - 2)^2}{2} + \frac{(x_2 + 1)^2}{13} + 3$ $f_2(x_1, x_2) = \frac{(x_1 + x_2 - 3)^2}{36} + \frac{(-x_1 + x_2 + 2)^2}{8} - 17$ $f_3(x_1, x_2) = \frac{(x_1 + 2x_2 - 1)^2}{175} + \frac{(-x_1 + 2x_2)^2}{17} - 13$	$[-400, 400]$

Πίνακας 1.1: Εξισώσεις των πολυκριτηριακών δοκιμαστικών συναρτήσεων MOP, της σουίτας του Van Veldhuizen

Η σύγκριση των αλγορίθμων μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Στην παρούσα εργασία επικεντρωνόμαστε στην ανάδειξη του βέλτιστου μετώπου κατά Pareto για κάθε δοκιμαστική συνάρτηση, το οποίο αφορά όχι μόνο τη μορφή του μετώπου αλλά και τη διασπορά των λύσεων στον αντικειμενικό χώρο.



Σχήμα 4.5: Επιθυμητά μέτωπα Pareto από τις δοκιμαστικές συναρτήσεις της σουίτας του Van Veldhuizen. Δίνονται τα Pareto για τις MOP 1 έως 5 και 7 [23]



Σχήμα 4.6: Μέτωπο Pareto από τη δοκιμαστική συνάρτηση MOP 6 της σουτίτας του Van Veldhuizen. Η συνάρτηση MOP 6 δίνεται και στην ενότητα 7.6.2 ως παράδειγμα σύγκλισης στο μέτωπο αυτό, των τεσσάρων αλγορίθμων που θα συγκρίνουμε [23]

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για να αξιολογηθεί και να παρουσιαστεί η σύγκριση των αλγορίθμων που θα μας απασχολήσουν σε αυτή την εργασία, είναι η μέθοδος εύρεσης του υπερόγκου του μετώπου Pareto (Hypervolume) και η μέθοδος αξιολόγησής του, που προτάθηκε από τους Cao et al [14], και είναι ο δείκτης συνεισφοράς του υπερόγκου για τη σύγκριση των μετώπων (Contribution Rate indicator, CR). Οι έννοιες αυτές θα εξηγηθούν στην πορεία.

4.7.2 Υπερόγκος μετώπου Pareto (Hypervolume)

[14] Οι πολυκριτηριακοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης είναι, όπως έχουμε ήδη επισημάνει, ίσως ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για την εύρεση βέλτιστων λύσεων σε κάθε πρόβλημα, το οποίο εμφανίζεται στις διάφορες επιστήμες που απασχολούν την καθημερινότητα. Το μεγάλο πλεονέκτημα των αλγορίθμων αυτών είναι ότι δεν αρκούνται στην εξέταση και τη βελτίωση μιας μόνο τιμής, αλλά ταλαντεύονται μεταξύ πολλών παραγόντων που καθορίζουν τη βέλτιστη ή μη λύση. Οι αλγόριθμοι αυτοί παρουσιάζουν μία μεγάλη ποικιλία λύσεων, οι οποίες υπόκεινται στο δίλημμα του βέλτιστου κριτηρίου. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, δεν υπάρχει μόνο ένα κριτήριο το οποίο τίθεται προς βελτιστοποίηση και για τον λόγο αυτό δεν μπορεί να υπάρξει και μία μοναδική λύση. Το ερώτημα είναι ποιο σύνολο λύσεων θεωρούμε βέλτιστο και γιατί, ενώ το δεύτερο ερώτημα, δηλαδή το ποια λύση θα επιλεγεί ως βέλτιστη μεταξύ των υπολοίπων του συνόλου, εξαρτάται από το πρόβλημα και θα εξεταστεί στην πορεία.

Για να απαντήσουμε στο πρώτο από τα ερωτήματα που θέσαμε παραπάνω, κάνουμε χρήση των μεθόδων του υπερόγκου αλλά και του δείκτη συνεισφοράς του κάθε μετώπου στον υπερόγκο. Δύο έννοιες οι οποίες είναι απόλυτα συνυφασμένες, καθώς η δεύτερη εξαρτάται από την ουσία της πρώτης.

Ο υπερόγκος (hypervolume) είναι μία τιμή η οποία αναδεικνύει το πόσο καλά είναι καταναμημένο το μέτωπο Pareto σε έναν n -διάστατο χώρο. Είναι ένα μέσο μέτρησης της ποιότητας του μετώπου, καθώς μας ενδιαφέρει τόσο η μορφή του όσο και η κατανομή του στον χώρο. Αυτή η μέτρηση πάνω στο μέτωπο αναδείχθηκε ως αρκετά δημοφιλής τα τελευταία χρόνια και αυτή η επιτυχία οφείλεται στο ότι ο υπερόγκος του μετώπου αξιολογεί ταυτόχρονα την εγγύτητα στην επιθυμητή μορφή αλλά και την ποικιλία των λύσεων του μετώπου. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως όταν ένα μέτωπο Pareto κυριαρχεί σε ένα άλλο, τότε αυτόματα και ο υπερόγκος του πρώτου θα είναι μεγαλύτερος από αυτόν του δεύτερου. Για τη

μέτρηση του υπερόγκου, όπως θα γίνει σαφές και από το σχήμα 4.10, πρέπει να οριστεί ένα σημείο αναφοράς με βάση το οποίο θα μετράται η τιμή του και θα συγκρίνονται τα διαφορετικά μέτωπα.

Εξαιτίας της πολύ πρόσφατης ουσιαστικής εισαγωγής του στη βιβλιογραφία για την αξιολόγηση των πολυκριτηριακών αλγορίθμων, πρέπει πριν προχωρήσουμε στη σύγκριση των δικών μας προς εξέταση αλγορίθμων, να καταστήσουμε σαφείς κάποιες παρανοήσεις που θα αποτρέψουν μια λανθασμένη ή άδικη σύγκριση μεταξύ των αλγορίθμων. Πρέπει, λοιπόν, να τονιστεί, όπως είπαμε και λίγο νωρίτερα, πως είναι πολύ σημαντικό και ουσιώδες να θεσπιστεί ένα σημείο αναφοράς τέτοιο, ώστε οι αλγόριθμοι να αξιολογηθούν επί ίσοις όροις. Σε κάθε ένα από τα επτά δοκιμαστικά προβλήματα που θα εισάγουμε στους αλγορίθμους, έχει επιλεγεί και ένα διαφορετικό σημείο αναφοράς που περικλείει ολόκληρη την επιθυμητή μορφή των μετώπων κάθε φορά. Τα σημεία αυτά θα δοθούν αναλυτικά στη συνέχεια.

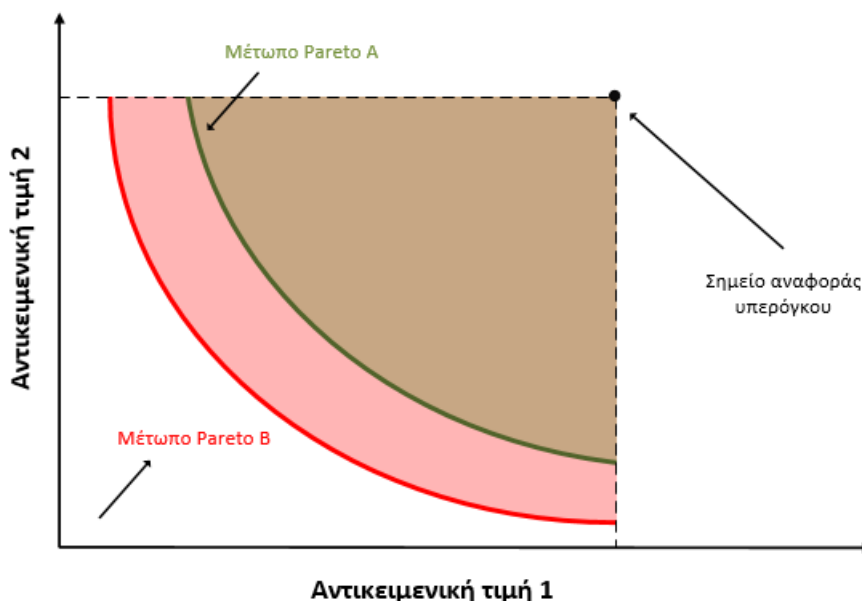
Όπως δηλώνει και το όνομά του, λοιπόν, ο υπερόγκος ενός δοθέντος μετώπου Pareto, υπολογίζει τον όγκο του αντικειμενικού χώρου που κυριαρχείται ασθενώς από τα σημεία του βέλτιστου μετώπου. Με σκοπό να προσδιοριστεί αυτός ο δείκτης του υπερόγκου πρέπει πρώτα να οριστεί σαφώς και με ακρίβεια μια καλά ορισμένη περιοχή του αντικειμενικού χώρου και να δοθεί και ένα αποδεκτό σημείο αναφοράς, ώστε να πραγματοποιηθεί η απαιτούμενη μέτρηση. Ο υπερόγκος ενός μετώπου Pareto, όπως δόθηκε από τους Zitzler και Thiele το 1998, για $PF \in R^C$, συμβολίζεται με $I_H(PF)$, εξαρτάται από το σημείο αναφοράς $r = (r_1, r_2, \dots, r_C)' \in R^C$ και δίνεται από τον τύπο:

$$I_H(PF, r) = \lambda \left(\bigcup_{s \in PF} space(s, r) \right) \quad \text{Εξ 4.12}$$

με το $space(s, r) = \{v \in R^C \mid r < v \leq s\}$ να αποτελεί τον αντικειμενικό χώρο, όπου παίρνει τη μορφή τετραγώνου, αν τα αντικειμενικά κριτήρια είναι δύο, αλλιώς μιλάμε για έναν χώρο περισσότερων διαστάσεων. Ο αντικειμενικός αυτός χώρος αποτελεί την περιοχή στην οποία ανήκουν όλα τα διανύσματα του προβλήματος $v \in R^C$, τα οποία κυριαρχούνται ασθενώς από τα στοιχεία $s \in PF$ και όλα αυτά κυριαρχούν στο $r = (r_1, r_2, \dots, r_C)'$ όπου r_i είναι η i -οστή συντεταγμένη του σημείου αναφοράς και το λ είναι η μέτρηση Lebesgue (Lebesgue measure). Η τιμή αυτή είναι ο όγκος ενός n -διάστατου ευκλείδειου χώρου.

Όταν έχουμε πολλούς αλγορίθμους τους οποίους πρέπει να συγκρίνουμε με βάση το μέτωπο Pareto που δημιουργούν, προκύπτει ένα σημαντικό ερώτημα: με ποιον τρόπο θα πραγματοποιηθεί η σύγκριση. Αυτό είναι ιδιαίτερα δύσκολο, κυρίως όταν το σχήμα και ο πληθάρημος του πραγματικού μετώπου είναι άγνωστα. Αυτό δυσκολεύει πολύ τον ορισμό του σημείου αναφοράς με βάση το οποίο θα μετρηθεί ο υπερόγκος του κάθε μετώπου. Ο υπερόγκος του μετώπου Pareto εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από αυτό το σημείο αναφοράς και όταν το βέλτιστο μέτωπο που θέλουμε να προσεγγίσουμε είναι άγνωστο, τότε δεν μπορεί να οριστεί ένα τέτοιο αντικειμενικό σημείο. Όταν το βέλτιστο Pareto είναι άγνωστο, λοιπόν, αυτό που προτείνεται από τους Zitzler et al (2007) και τους Lu και Anderson-Cook (2012) είναι να ορίζεται ως σημείο αναφοράς το σημείο ναδίρ του εξεταζόμενου μετώπου ή αλλιώς, όπως παρουσιάζουν οι Zitzler et al (2012), ο Brockhoff (2010) και οι Friedrich et al (2013), ένα σημείο λίγο χειρότερο από το σημείο ναδίρ του μετώπου. Σημείο ναδίρ σε αυτές τις περιπτώσεις ορίζεται ως το διάνυσμα του μετώπου με τις χειρότερες τιμές σε όλα τα κριτήρια που τίθενται προς βελτιστοποίηση –σχήμα 4.7-. Στη δική μας μελέτη ωστόσο επειδή το σχήμα –όχι η πληθικότητα– του μετώπου αναφοράς ήταν γνωστό επιλέξαμε ένα σημείο λίγο χειρότερο από τη συνισταμένη των δύο ακραίων σημείων του μετώπου. Για κάθε πρόβλημα που εξετάσαμε τρέξαμε τους αλγορίθμους χωριστά, εντοπίσαμε αυτά τα σημεία και για κάθε αλγόριθμο και επιλέξαμε το χειρότερο σημείο από

τα αυτά. Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίσαμε πως όλοι οι αλγόριθμοι θα μπορούν να εξάγουν τιμή στον υπερόγκο τους χωρίς να δώσουμε σε κάποιον από αυτούς πλεονέκτημα.



Σχήμα 4.7: Υπερόγκος δύο μετώπων Pareto σε σχέση με ένα σημείο αναφοράς

Στο Σχήμα 4.7 φαίνεται παραστατικά ο χώρος που ορίζει τον υπερόγκο ενός μετώπου Pareto. Στο σχήμα αυτό τα δύο κριτήρια δόθηκαν στη βελτιστοποίηση προς ελαχιστοποίηση και αυτό υποδηλώνει πως όσο πιο κοντά βρίσκεται το μέτωπο στην αρχή στον αξόνων τόσο μεγαλύτερος θα είναι και ο υπερόγκος του μετώπου. Στο σχήμα 4.7 καλύτερη κατανομή στο χώρο έχει το μέτωπο B, καθώς ο χώρος μεταξύ της καμπύλης και του σημείου αναφοράς είναι μεγαλύτερος απ'ότι του μετώπου A. Φυσικά ο υπερόγκος εξετάζει και την απόσταση των σημείων του μετώπου αλλά και τη διασπορά τους στο μέτωπο κάτι που δεν απεικονίζεται στο παραπάνω σχήμα. Όσο καλύτερη είναι η διασπορά του μετώπου και όσο πιο κοντά βρίσκονται τα σημεία του τόσο μεγαλύτερος και ο δείκτης του υπερόγκου του.

4.7.3 Δείκτης συνεισφοράς στο μέτωπο Pareto (Contribution Rate, CR)

Η εύρεση ωστόσο του υπερόγκου των αλγορίθμων μας ήταν μια διαδικασία που απέφερε νούμερα σε μια αρκετά ευρεία κλίμακα τιμών. Για τον λόγο αυτό και θεωρώντας πως κανονικοποιημένες τιμές αποτελεσμάτων βοηθούν στην καλύτερη αξιολόγηση του αποτελέσματος της σύγκρισης, βρήκαμε έναν τρόπο αξιολόγησης των τιμών του υπερόγκου σε κάθε αλγόριθμο. Αυτός ο τρόπος έχει να κάνει με την εύρεση του δείκτη συνεισφοράς (Contribution Rate, CR) των αλγορίθμων σε ένα βέλτιστο μέτωπο Pareto, το οποίο δημιουργείται συνδυάζοντας τα καλύτερα σημεία από τα τέσσερα κάθε φορά μέτωπα.

Αυτή η μέθοδος σύγκρισης ανταγωνιζόμενων μετώπων προτάθηκε από τους Cao et al (2015) [14] και αξιολογεί το CR κάθε αλγορίθμου. Για ένα δεδομένο πολυκριτηριακό πρόβλημα υποθέτουμε πως το πραγματικό βέλτιστο μέτωπο Pareto υπάρχει αλλά είναι άγνωστο. Από n ανταγωνιζόμενους αλγορίθμους εξάγουμε n διαφορετικά βέλτιστα μέτωπα Pareto, $\{PF_1, PF_2, \dots, PF_n\}$. Η σύγκριση των μετώπων θα γίνει με βάση την ακόλουθη διαδικασία:

- Συνδυάζουμε όλα τα μέτωπα Pareto PF_1, PF_2, \dots, PF_n που προέκυψαν από τους αλγορίθμους, σύμφωνα με τον ορισμό της κυριαρχίας κατά Pareto, σε ένα μοναδικό σύνολο μη-κυριαρχούμενων διανυσμάτων, το οποίο συμβολίζεται ως PF_S . Από τη στιγμή που το πραγματικό μέτωπο Pareto είναι γενικά άγνωστο και το PF_S είναι η καλύτερη δυνατή προσέγγισή του, το PF_S θεωρείται ως ο εκπρόσωπος πραγματικού μετώπου. Έπειτα, ανακτούμε τα $PF'_1, PF'_2, \dots, PF'_n$ από την τομή των PF_1, PF_2, \dots, PF_n με το PF_S , $PF_i \cap PF_S$. Το μέτωπο PF'_i περιέχει μόνο εκείνα τα διανύσματα τα οποία δεν κυριαρχούνται από τα μέλη του PF_S .
- Κανονικοποιούμε τα PF'_i και το PF_S με βάση την παρακάτω σχέση:

$$f_j(\xi)^* = \left| \frac{f_j(\xi) - f_j(\xi)_{worst}}{f_j(\xi)_{best} - f_j(\xi)_{worst}} \right|, j = 1, 2, \dots, C \quad \text{Εξ 4.13}$$

όπου η τιμή $f_j(\xi)_{worst}$ αντιστοιχεί στη μέγιστη (ή στην ελάχιστη αν έχουμε να κάνουμε με πρόβλημα μεγιστοποίησης) παρατηρούμενη τιμή του κριτηρίου j μέσα στο PF_S και η τιμή $f_j(\xi)_{best}$ την ελάχιστη (ή μέγιστη αντίστοιχα) τιμή του κριτηρίου j στο μέτωπο. Εδώ ουσιαστικά γίνεται κανονικοποίηση όλων των τιμών σε όλα τα εμπλεκόμενα μέτωπα μέσα στο διάστημα $[0, 1] \in R^C$.

- Υπολογίζουμε τον δείκτη υπερόγκου για κάθε ένα κανονικοποιημένο μέτωπο PF'_i ξεχωριστά και τον συμβολίζουμε με $I_H(PF'_i, \mathbf{r})$, όπως επίσης και του κανονικοποιημένου πια μετώπου PF_S και το συμβολίζουμε με $I_H(PF_S, \mathbf{r})$. Θυμίζουμε εδώ πως το διάνυσμα \mathbf{r} είναι το διάνυσμα αναφοράς που θέσαμε για κάθε πρόβλημα.
- Υπολογίζουμε τον δείκτη συνεισφοράς CR που σχετίζεται με κάθε ένα από τα εξεταζόμενα μέτωπα ως εξής:

$$CR(PF_i, PF_S) = \frac{I_H(PF'_i, \mathbf{r})}{I_H(PF_S, \mathbf{r})} \quad \text{Εξ 4.14}$$

Πρέπει να τονίσουμε σε αυτό το σημείο πως η τιμή $CR(PF_i, PF_S)$ η οποία βρίσκεται πλησιέστερα του ενός υποδεικνύει πως το i -οστό μέτωπο Pareto είναι πολύ κοντά στο αντιπροσωπευτικό μέτωπο PF_S του πραγματικού μετώπου. Συνεπώς, όπως προκύπτει από τα προηγούμενα, το καλύτερο μέτωπο Pareto άρα και ο καλύτερος αλγόριθμος προσέγγισης αυτού, είναι όποιο προέκυψε να έχει το μεγαλύτερο δείκτη συνεισφοράς από τη διαδικασία που προηγήθηκε. Τέλος, πρέπει να αναφέρουμε πως ο δείκτης συνεισφοράς του κάθε μετώπου είναι απλά μια πολύ καλή προσέγγιση, δεδομένου ότι το PF_S δεν είναι απαραίτητα το βέλτιστο πραγματικό μέτωπο.

Κεφάλαιο 5: Μονοκριτηριακοί και πολυκριτηριακοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης

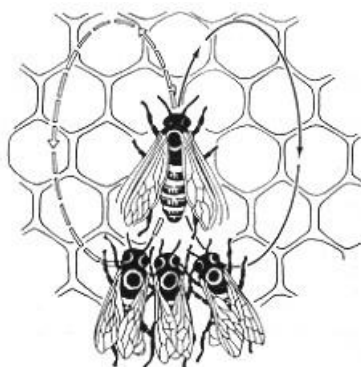
5.1 Μονοκριτηριακός αλγόριθμος μελισσών, (Artificial Bee Colony algorithm, ABC)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, κύριο αντικείμενο είναι η παρουσίαση, τροποποίηση και περαιτέρω ανάπτυξη του αλγορίθμου ABC. [15] Ο αλγόριθμος αυτός βασίστηκε πάνω στη νοημοσύνη του σμήνους, όπως χαρακτηριστικά αναφέρει ο συγγραφέας του. Η νοημοσύνη του σμήνους αναφέρεται στην ικανότητα που έχει ένας πληθυσμός στο να αυτο-οργανώνεται ως προς τη διαδικασία της αναζήτησης τροφής. Σε αυτή την περίπτωση εμείς θα εξετάσουμε την ικανότητα οργάνωσης ενός σμήνους μελισσών που ανήκουν σε μια κυψέλη.

5.1.1 Επεξήγηση του αλγορίθμου ABC

Οι αποικίες των μελισσών χαρακτηρίζονται ως αυτές με τη μεγαλύτερη προσήλωση και οργάνωση ως προς τη διαδικασία αναζήτησης τροφής και την ιεραρχία που ακολουθείται μέσα στην κυψέλη. Αυτή η αλληλεπίδραση μεταξύ των μελισσών συνέβαλε ενεργά στην προσήλωση του ενδιαφέροντος σε αυτές τις αποικίες με σκοπό την ανάπτυξη ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης που θα βασίζεται καθαρά σε αυτή. Οι μέλισσες επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός χορού, του χορού της κυψέλης (waggle dance). Κατά την εκτέλεση του χορού αυτού οι μέλισσες έχουν μια συγκεκριμένη συμπεριφορά. Η συμπεριφορά αυτή κυρίως εκφράζεται με την κατεύθυνση που έχουν κατά τη διάρκεια του χορού, την έντασή του αλλά και τη διάρκεια. Ο προσανατολισμός τους κατά τη διάρκεια του waggle dance υποδηλώνει και την κατεύθυνση –σύμφωνα με τον ήλιο– κατά την οποία βρίσκεται η τροφή, η ένταση του χορού υποδηλώνει το πόσο μακριά είναι από την κυψέλη και τέλος η διάρκεια του υποδεικνύει την ποσότητα του νέκταρ που βρίσκεται στο σημείο. Οι μέλισσες οι οποίες

ακολουθούν τον χορό είναι σωστά προσανατολισμένες ως προς την τροφή, ακόμα και αν η γωνία του χορού σε σχέση με τον ήλιο έχει αλλάξει.



Σχήμα 5.1: Χορός της κυψέλης (Waggle dance)

Σύμφωνα με τη μορφολογία μιας αποικίας μελισσών, βλέπουμε πως υπάρχει ένας διαχωρισμός των εντόμων σε ομάδες οι οποίες αναλαμβάνουν συγκεκριμένα καθήκοντα. Έχουμε λοιπόν τρεις κατηγορίες μελισσών οι οποίες αντιστοιχούν στον αλγόριθμο ως εξής:

- Εργάτριες (Employed bees)
- Θεατές (Onlooker bees)
- Πρόσκοποι (Scout bees)

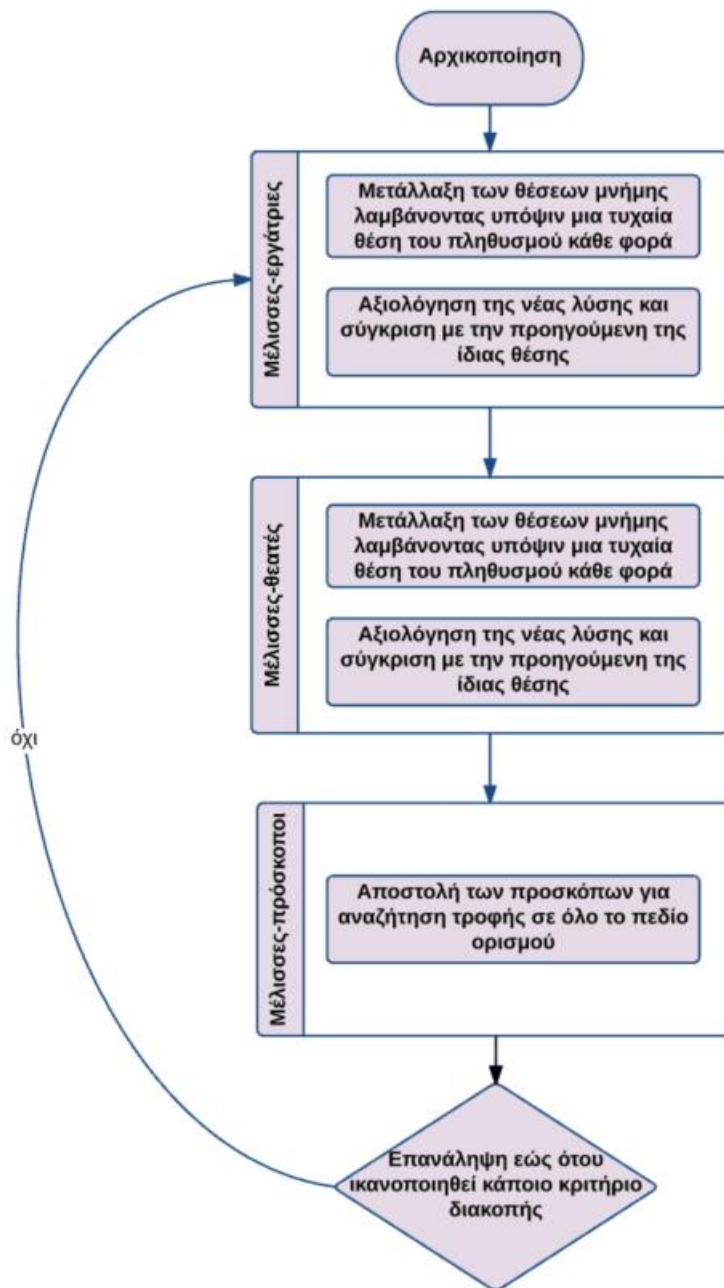
Η μέλισσα-θεατής είναι αυτή που περιμένει στο σημείο που πραγματοποιείται ο χορός για να αποφασίσει προς ποια τροφή θα κατευθυνθεί, ενώ η εργάτρια είναι αυτή που πηγαίνει στο σημείο της τροφής το οποίο έχει επισκεφτεί ξανά. Τέλος, η μέλισσα η οποία αναζητά με τυχαίο τρόπο την τροφή της ονομάζεται πρόσκοπος. Στον ABC το μισό του πληθυσμού της κυψέλης είναι οι εργάτριες και το δεύτερο μισό είναι οι θεατές. Η εργάτρια ή η θεατής, της οποίας η τροφή εξαντλήθηκε, μετατρέπεται σε πρόσκοπο. Κάπως έτσι χωρίζεται το σύνολο του πληθυσμού της κυψέλης στον αλγόριθμό μας.

5.1.2 Λειτουργία του αλγορίθμου

Ο Artificial Bee Colony algorithm έχει στο κύριο μέρος του, όπως διαφαίνεται από την προηγούμενη ενότητα, τρεις βασικές φάσεις οι οποίες αντιστοιχούν στις τρεις κατηγορίες μελισσών. Στο παρακάτω διάγραμμα δίνεται συνοπτικά η ροή του αλγορίθμου.

Κάθε κύκλος του παρακάτω διαγράμματος αποτελείται από αυτά τα τρία βήματα: αποστολή των εργατριών στις τροφές και μέτρηση της ποσότητας του νέκταρ που περιέχουν, επιλογή των τροφών από τους θεατές αφού πρώτα η πιο πάνω πληροφορία δοθεί στην κυψέλη μέσω του χορού, καθορισμός των προσκόπων και αποστολή τους σε τυχαίες θέσεις για αναζήτηση τροφής. Στο στάδιο της αρχικοποίησης, ένα σύνολο θέσεων τροφών επιλέγονται τυχαία από τις μέλισσες και καθορίζεται έτσι η ποσότητα του νέκταρ που περιέχουν. Έπειτα, οι μέλισσες αυτές μπαίνουν στην κυψέλη και μοιράζονται την πληροφορία αυτή με τις μέλισσες που περιμένουν στην περιοχή του χορού. Όταν οι εργάτριες μοιραστούν αυτή την πληροφορία, τότε ξαναβγαίνουν από την κυψέλη και κατευθύνονται προς την τροφή που επισκέφτηκαν μόλις πριν, αφού υπάρχει ήδη στη μνήμη, και επιλέγουν μια άλλη τροφή από την ίδια περιοχή. Στην επόμενη φάση, οι μέλισσες-θεατές επιλέγουν μια περιοχή τροφής αξιολογώντας τις πληροφορίες που ήδη έχουν δώσει οι εργάτριες. Με λίγα λόγια οι μέλισσες θεατές πηγαίνουν στις περιοχές με τη μεγαλύτερη ποσότητα νέκταρ. Όταν

για μια περιοχή τροφών εγκαταλείπεται από τις μέλισσες, τότε μια μέλισσα πρόσκοπος βγαίνει από την κυνέλη προς αναζήτηση μια άλλης τυχαίας θέσης τροφής, η οποία με τη σειρά της παίρνει τη θέση της εγκαταλειμμένης στη μνήμη.



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα ροής ABC

Στον αλγόριθμό μας η θέση κάθε τροφής αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης που εξετάζουμε και η ποσότητα του νέκταρ δίνει την ποιότητα της λύσης αυτής. Στο πρώτο βήμα, ο ABC παράγει έναν τυχαία διανεμημένο αρχικό πληθυσμό $P(G = 0)$ από τροφές, του οποίου το μέγεθος (SN) είναι ίσο με τον αριθμό των εργατριών αλλά και των μελισσών-θεατών. Κάθε λύση x_i όπου $i = 1, 2, \dots, SN$ είναι ένα D-διάστατο διάνυσμα, με τον αριθμό D να αντιπροσωπεύει τον αριθμό των παραμέτρων βελτιστοποίησης. Μετά την

αρχικοποίηση του πληθυσμού, οι τροφές που βρίσκονται στη μνήμη γίνονται αντικείμενο αναζήτησης των εργατριών, των θεατών αλλά και των προσκόπων.

Μέχρι αυτό το σημείο παρατηρούμε πως έχουμε έναν αλγόριθμο ο οποίος αρχικοποιεί τον πληθυσμό του, αξιολογεί τα αποτελέσματα και συνεχίζει την αναζήτηση τροφής γύρω από αυτά τα αποτελέσματα. Η καινοτομία του αλγορίθμου αυτού έγκειται στην ταχύτητα σύγκλισης που παρουσιάζει κατά τη διάρκεια επίλυσης ενός προβλήματος. Αυτό οφείλεται στις μέλισσες-θεατές, καθώς, όπως αναφέραμε και νωρίτερα, είναι οι μέλισσες που παίρνουν την πληροφορία από τον χορό της κυνέλης που εκτελούν οι εργάτριες μετά από κάθε αναζήτηση τροφής. Οι θεατές έχουν ως βασική τους αποστολή να αναζητούν νέες θέσεις τροφής αποκλειστικά και μόνο γύρω από τις ήδη υπάρχουσες τροφές της μνήμης που περιέχουν τη μεγαλύτερη ποσότητα νέκταρ. Αυτό γίνεται με βάση την πιθανολογική λογική, όπου κάθε τροφή που αξιολογείται στη φάση των εργατριών εισέρχεται ως υποψήφια για μετάλλαξη στη φάση των θεατών μόνο αν η πιθανότητα που αντιστοιχεί στην ποσότητα του νέκταρ που περιέχει ξεπερνάει ένα τυχαίο νούμερο μεγαλύτερο του 0,5.

5.2 Μονοκριτηριακός αλγόριθμος διαφορικής εξέλιξης (DE – Differential Evolution)

[11],[16] Η μέθοδος της Διαφορικής Εξέλιξης αναπτύχθηκε σχετικά πρόσφατα και είναι αποδεδειγμένη η ικανότητά της στο να προσεγγίζει εύκολα και γρήγορα τη βέλτιστη λύση. Σύμφωνα με τους Storn και Price η μέθοδος της διαφορικής εξέλιξης παρουσιάζει τρία πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα:

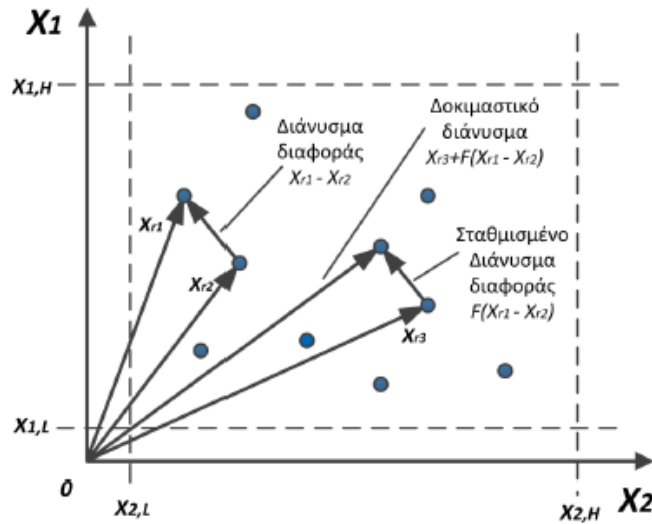
- Προσεγγίζει το πραγματικό ελάχιστο της αντικειμενικής συνάρτησης ανεξάρτητα από τις τιμές των αρχικών παραμέτρων
- Εμπλέκει τη χρήση όσο το δυνατόν λιγότερων παραμέτρων ελέγχου
- Παρουσιάζει πολύ γρήγορη σύγκλιση

5.2.1 Μέθοδος εύρεσης επόμενης λύσης με την μέθοδο της διαφορικής εξέλιξης

Ο πληθυσμός του αλγορίθμου που εξετάζουμε είναι σε μορφή πίνακα και κάθε σημείο τροφής περιγράφεται από ένα διάνυσμα. Η επιλογή της επόμενης λύσης γίνεται σύμφωνα με ένα διάνυσμα βάσης (base vector) $x_{r1,G}$ -δηλαδή μια θέση που ήδη υπάρχει στη μνήμη-, και την διαταραχή αυτού σύμφωνα με ένα σταθμισμένο διάνυσμα διαφοράς (weighted difference vector) $x_{r2,G} - x_{r3,G}$ ως εξής:

$$v_{i,G} = x_{r1,G} + F(x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad \text{Εξ 5.1}$$

όπου $x_{r1,G}$, $x_{r2,G}$ και $x_{r3,G}$ είναι τρία τυχαία διανύσματα του τρέχοντος πληθυσμού, διαφορετικά μεταξύ τους και F ένας πραγματικός σταθερός συντελεστής που λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0,2]$.



Σχήμα 5.3: Μηχανισμός παραγωγής των διαφορικών διανυσμάτων [11]

Η διαφορική εξέλιξη χρησιμοποιεί έναν μηχανισμό επιλογής σύμφωνα με τον οποίο το νέο διάνυσμα ανταγωνίζεται τα ήδη υπάρχοντα στον πληθυσμό. Στον πληθυσμό της επόμενης γενιάς επιλέγεται και εισάγεται αυτό με τη μικρότερη δυνατή τιμή αντικειμενικής συνάρτησης. Η μέθοδος αυτή περιγράφεται από τη σύμβαση DE/x/y/z, όπου το x αντιπροσωπεύει μια συμβολοσειρά που καθορίζει τον τρόπο επιλογής του διανύσματος βάσης. Έτσι λοιπόν έχουμε «rand» όταν το διάνυσμα βάσης επιλέγεται τυχαία και «best» όταν επιλέγεται το καλύτερο διάνυσμα από τον πληθυσμό της τρέχουσας γενιάς. Το y δίνει τον αριθμό των διανυσμάτων αναφοράς που προστίθενται στο διάνυσμα βάσης και το z προσδιορίζει τον τύπο διασταύρωσης που χρησιμοποιείται. Το z επιλέγεται μεταξύ «bin» όταν χρησιμοποιείται διωνυμική διασταύρωση και «exp» όταν χρησιμοποιείται εκθετική. Παρακάτω δίνονται κάποια παραδείγματα μετάλλαξης:

- DE/best/1

$$v_{i,G} = x_{best,G} + F(x_{r1,G} - x_{r2,G}) \quad \text{Εξ 5.2}$$

- DE/best/2

$$v_{i,G} = x_{best,G} + F(x_{r1,G} - x_{r2,G}) + F(x_{r3,G} - x_{r4,G}) \quad \text{Εξ 5.3}$$

- DE/rand/2

$$v_{i,G} = x_{r1,G} + F(x_{r2,G} - x_{r3,G}) + F(x_{r4,G} - x_{r5,G}) \quad \text{Εξ 5.4}$$

Οι δείκτες των επιμέρους διανυσμάτων είναι φυσικοί αριθμοί μεταξύ του 1 και της τιμής του πληθυσμού και διάφοροι του i . Στα παραπάνω παραδείγματα δεν φαίνεται η μεταβλητή z της διαφορικής εξέλιξης, καθώς αναφέραμε μόνο διωνυμικά παραδείγματα και όχι εκθετικά.

Στον αλγόριθμο που εξετάζουμε η διαδικασία παραγωγής της επόμενης λύσης αποτελεί τη βάση της μεθόδου της διαφορικής εξέλιξης με κάποιες προσθήκες. Η φύση του

αλγορίθμου ABC, όπως θα δούμε στη συνέχεια, επιβάλλει την αλλαγή μιας παραμέτρου του διανύσματος λύσης κάθε φορά. Έστω λοιπόν πληθυσμός μεγέθους NP με διανύσματα μεγέθους D. Μετά το στάδιο της τυχαίας αρχικοποίησης του πληθυσμού, όλες οι θέσεις του πληθυσμού αξιολογούνται και ως βέλτιστη επιλέγεται αυτή με τη μικρότερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (η εφαρμογή που θα εξετάσουμε είναι ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης). Κατά τις φάσεις λειτουργίας στο κύριο κομμάτι του αλγορίθμου, επιλέγεται μια θέση του πληθυσμού και με τυχαία επιλογή ενός φυσικού αριθμού στο διάστημα $[1, D]$, γίνεται και η τροποποίηση της τροφής σε αυτή την τυχαία παράμετρο. Αυτή η μεταβολή υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο, ο οποίος αποτελεί κομμάτι της διαφορικής εξέλιξης:

$$v_i(j) = Foods_{i,j} + F(Foods_{best,j} - Foods_{i,j}) + F(Foods_{n_1,j} - Foods_{n_2,j}) \quad \text{Εξ 5.5}$$

όπου i η θέση της τροφής που βρίσκεται προς αλλοίωση, j η παράμετρος μεταξύ των $[1, D]$ της τροφής που αλλάζει, n_1 και n_2 δύο γειτονικές τυχαίες θέσεις τροφής του πληθυσμού που βρίσκεται στη μνήμη και ο δείκτης best δηλώνει τη θέση της καλύτερης τροφής που υπάρχει αυτή τη στιγμή στη μνήμη. Μετά τη διαδικασία παραγωγής της επόμενης λύσης, σειρά έχει η διαδικασία της αξιολόγησής της ως προς την αντικειμενική της τιμή.

Αυτή η διαδικασία παραγωγής της επόμενης λύσης θα επιλεγεί και στον μονοκριτηριακό αλλά και στον πολυκριτηριακό αλγόριθμο που θα εξετάσουμε.

5.3 Πολυκριτηριακός αλγορίθμος βελτιστοποίησης SPEA-II (Strength Pareto Evolutionary Algorithm II)

5.3.1 Επεξήγηση αλγορίθμου βελτιστοποίησης SPEA-II ή αλλιώς εξελικτικός αλγόριθμος Pareto ισχύος [17]

Ο εξελικτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης SPEA είναι μία από τις πιο δημοφιλείς πια μεθοδολογικές προσεγγίσεις στην εύρεση βέλτιστου συνόλου κατά Pareto και δόθηκε για πρώτη φορά από τους Zitzler και Thiele. Λίγο καιρό αργότερα, αφού εντοπίστηκαν κάποια μειονεκτήματα της μεθόδου, ανέπτυξαν μια βελτιωμένη έκδοση του αλγορίθμου που ονομάζεται SPEA-II.

Ο αλγόριθμος SPEA-II καλείται να καλύψει πλήρως δύο θεμελιώδη ζητήματα κατά τη διαδικασία της σχεδιάσής του. Αυτά είναι η διαδικασία επιλογής ζευγαρώματος (mating selection) των δύο λύσεων και η περιβαλλοντική (environmental selection) επιλογή λύσεων για την εύρεση της επόμενης λύσης. Το πρώτο ζήτημα συνδέεται άμεσα με το πώς θα οδηγήσει ο αλγόριθμος την αναζήτηση ώστε να φτάσει στο επιθυμητό μέτωπο Pareto.

- Environmental selection: Εκτός του πληθυσμού, στον αλγόριθμο διατηρείται και ένα εξωτερικό αρχείο (archive) το οποίο ουσιαστικά μας δίνει το μη-κυριαρχούμενο μέτωπο μεταξύ όλων των λύσεων που έχουν αξιολογηθεί. Ένα μέλος του αρχείου διαγράφεται μόνο όταν i) βρίσκεται μια λύση η οποία το κυριαρχεί ή ii) το μέγεθος του αρχείου έχει φτάσει στο μέγιστο και σε αυτή την περίπτωση αποβάλλεται από το αρχείο ένα μέλος το οποίο βρίσκεται σε μια πολυπληθή περιοχή του μετώπου. Το να μεταφερθεί ένα μέλος στο αρχείο, είναι συνήθως ο πιο σίγουρος τρόπος ώστε να επιβιώσει κατά τη διάρκεια της εξέλιξης του αλγορίθμου. Η τεχνική του εξωτερικού αρχείου υιοθετήθηκε από τους εξελικτικούς αλγορίθμους βελτιστοποίησης με σκοπό

να μη χαθούν μέλη του μη-κυριαρχούμενου πληθυσμού από διάφορα τυχαία γεγονότα.

- ο *Mating selection*: Η ομάδα των ατόμων που δημιουργείται σε κάθε γενιά αξιολογείται μέσω μιας διαδικασίας δύο φάσεων. Στην αρχή, κάθε άτομο συγκρίνεται με βάση τις σχέσεις κυριαρχίας κατά Pareto με όλα τα υπόλοιπα μέλη του μετώπου, το οποίο ορίζει και μια μορφή κατάταξης μέσα στο μέτωπο. Η πληροφορία του ποιο μέλος κυριαρχεί σε ποιο, κυριαρχείται από ποιο ή είναι αδιάφορο ως προς ποια άλλα μέλη είναι αυτή που καθορίζει τη σειρά μέσα στο μέτωπο. Στη συνέχεια, αυτή η κατάταξη επαναπροσδιορίζεται με βάση και την πυκνότητα του μετώπου πια.

Οι δύο παραπάνω μέθοδοι επιλογής είναι πλήρως ανεξάρτητες μεταξύ τους. Σε πολλούς εξελικτικούς αλγορίθμους αυτές οι δύο μέθοδοι είναι παρόμοιες.

Η SPEA-II λοιπόν χρησιμοποιεί έναν πληθυσμό και ένα εξωτερικό αρχείο (archive). Ξεκινά με έναν αρχικό πληθυσμό, ο οποίος παράγεται τυχαία, και ένα άδειο αρχείο, ενώ όλα τα υπόλοιπα βήματα λαμβάνουν χώρα στο κύριο μέρος του αλγορίθμου. Καταρχάς, όλα τα μη-κυριαρχούμενα μέλη του πληθυσμού αντιγράφονται στο αρχείο. Κάθε κυριαρχούμενη λύση αλλά και κάθε λύση που υπάρχει περισσότερες από μια φορές διαγράφονται από το αρχείο κατά τη διάρκεια της ενημέρωσής του. Αν το μέγεθος του ενημερωμένου αρχείου ξεπερνά το προκαθορισμένο όριο, διαγράφονται και άλλα μέλη από αυτό σύμφωνα με μια συγκεκριμένη τεχνική, η οποία διατηρεί τα χαρακτηριστικά του μη-κυριαρχούμενου μετώπου Pareto. Μετά από αυτά, σε κάθε μέλος του αρχείου αλλά και του πληθυσμού ανατίθεται μια τιμή Fitness.

Σε κάθε άτομο i του αρχείου ανατίθεται μια τιμή ισχύος της λύσης (Strength value) $S(i) \in [0,1]$, η οποία ταυτόχρονα αντιπροσωπεύει και την τιμή Fitness $F(i)$ της λύσης. Το $S(i)$ αντιπροσωπεύει τον αριθμό των μελών του πληθυσμού j τα οποία κυριαρχούνται από το μέλος i σύμφωνα με την αντικειμενική συνάρτηση, διαιρούμενο με τον αριθμό του πληθυσμού συν ένα. Η τιμή Fitness $F(j)$ ενός μέλους j του πληθυσμού υπολογίζεται αθροίζοντας τις τιμές ισχύος $S(i)$ όλων των μελών του αρχείου i που κυριαρχούν ή είναι ίσες με το j , προσθέτοντας το $D(j) = \frac{1}{\sigma_j^k + 2}$ όπου το σ_j^k είναι η απόσταση του k -σημείου από το πλησιέστερο γείτονά του στο αρχείο.

Το επόμενο βήμα έχει να κάνει με τη φάση Mating Selection, όπου τα άτομα από την ένωση του αρχείου με τον πληθυσμό, επιλέγονται με τη μέθοδο του διαγωνισμού μεταξύ δύο μελών (binary tournaments). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή δύο μέλη επιλεγονται τυχαία και το ισχυρότερο εξ αυτών αντιγράφεται στο βοηθητικό σύνολο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου συμπληρωθεί το μέγεθος του πληθυσμού. Τέλος, μετά τους συνδυασμούς αυτούς και τη μετάλλαξη των μελών, ο παλιός πληθυσμός αντικαθίσταται με τους απογόνους των προηγούμενων μελών.

Αναθεση τιμής Fitness: Τα άτομα που κυριαρχούνται από τα ίδια μέλη του εξωτερικού αρχείου, έχουν πανομοιότυπες τιμές Fitness. Αυτό σημαίνει ότι στην περίπτωση που το εξωτερικό αρχείο περιέχει μόνο ένα μέλος, όλα τα μέλη του πληθυσμού έχουν την ίδια κατάταξη, ανεξάρτητα από το ποιο κυριαρχεί σε ποιο.

Εκτίμηση πυκνότητας: Αν πολλά μέλη της παρούσας γενιάς είναι αδιάφορα μεταξύ τους, για παράδειγμα, δεν μπορούμε να αντλήσουμε πολλές πληροφορίες για την κυριαρχία που επικρατεί μεταξύ τους και την κατάταξή τους με βάση τις σχέσεις κυριαρχίας. Σε αυτή την περίπτωση, που είναι αρκετά συχνή ειδικά αν έχουμε περισσότερες από μία τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τα δεδομένα πυκνότητας λύσεων, ώστε να οδηγήσουμε την περαιτέρω έρευνα βέλτιστου μετώπου πιο αποτελεσματικά. Αυτή η διαδικασία γίνεται μόνο στο εξωτερικό αρχείο και όχι στον πληθυσμό.

Περικοπή εξωτερικού αρχείου: Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στη SPEA είναι ικανές να μειώσουν το σύνολο των μη-κυριαρχούμενων λύσεων χωρίς να καταστρέψουν τα χαρακτηριστικά τους. Όμως μπορεί να χαθούν έτσι λύσεις οι οποίες βρίσκονται πιο μακριά από το αναμενόμενο τελικό μέτωπο. Αυτές οι λύσεις πρέπει να διατηρηθούν ωστόσο στο αρχείο διότι πρέπει να διατηρηθεί μια καλή διασπορά του μετώπου.

5.3.2 Λεπτομερής ανάλυση του αλγορίθμου SPEA-II

Ο αλγόριθμος SPEA-II παίρνει σαν είσοδο το μέγεθος του πληθυσμού (N), το μέγεθος του εξωτερικού αρχείου (\bar{N}) και τον μέγιστο αριθμό γενεών (T) που θα παραχθούν και δίνει ως έξοδο το σύνολο των μη κυριαρχούμενων λύσεων (A).

Βήμα 1: Αρχικοποίηση: Παραγωγή ενός αρχικού πληθυσμού P_0 και δημιουργία ενός άδειου αρχείου $\bar{P}_0 = \emptyset$, για $t = 0$.

Βήμα 2: Ανάθεση τιμών Fitness: Υπολογισμός Fitness των ατόμων στα \bar{P}_t και P_t .

Βήμα 3: Environmental selection: Αντιγραφή όλων των μη-κυριαρχούμενων σημείων από τα \bar{P}_t και P_t στο P_{t+1} . Αν το μέγεθος του P_{t+1} ξεπερνά το μέγεθος του εξωτερικού αρχείου, τότε το P_{t+1} μειώνεται με βάση τις τεχνικές περικοπής του αρχείου. Στην άλλη περίπτωση, που το μέγεθος του P_{t+1} είναι μικρότερο από το μέγεθος του αρχείου, τότε το P_{t+1} γεμίζει με κυριαρχούμενες λύσεις των \bar{P}_t και P_t .

Βήμα 4: Τερματισμός: Αν $t \geq T$ ή ικανοποιείται κάποιο άλλο κριτήριο τερματισμού, τότε το A αντιπροσωπεύει το σύνολο των διανυσμάτων απόφασης από τα μη-κυριαρχούμενα μέλη του P_{t+1} .

Βήμα 5: Mating selection: Δυαδικοί διαγωνισμοί με αντικαταστάσεις στο P_{t+1} με σκοπό να γεμίσει η mating pool.

Βήμα 6: Μεταλλάξεις: Εφαρμογή συνδυασμών και δεικτών ζευγαρώματος στην πισίνα ζευγαρώματος και καθορισμός του P_{t+1} . Αύξηση μετρητή γενεών ($t = t + 1$) και επιστροφή στο βήμα 2.

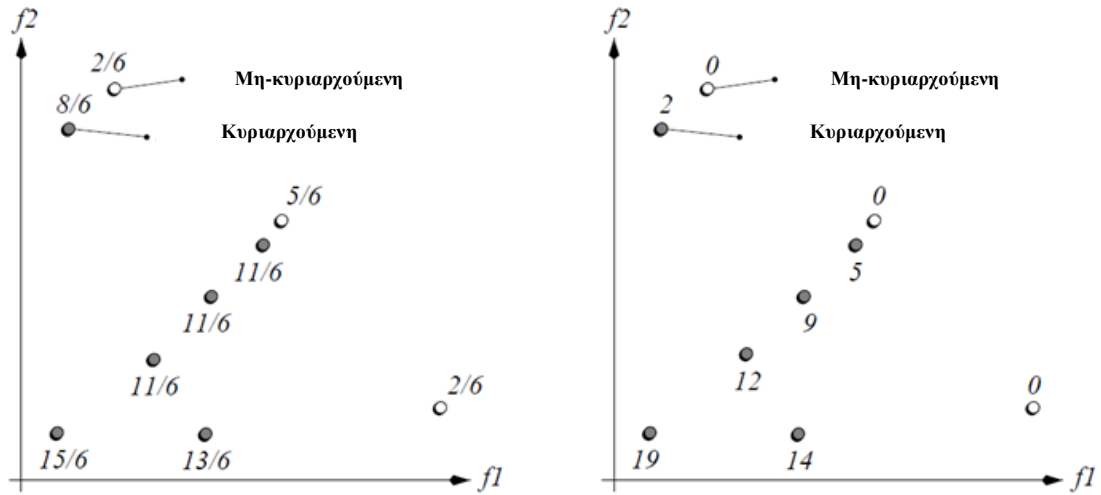
Για να αποφύγουμε την περίπτωση όπου κάποια μέλη κυριαρχούνται από τα ίδια μέλη του εξωτερικού αρχείου με κάποια άλλα και συνεπώς έχουν και τις ίδιες τιμές Fitness, στη SPEA-II λαμβάνεται υπόψιν και ο αριθμός των μελών στα οποία κυριαρχεί η λύση που εξετάζουμε. Για να γίνει περισσότερο κατανοητό, σε κάθε μέλος i του αρχείου \bar{P}_t και του πληθυσμού P_t έχει εκχωρηθεί μια τιμή strength $S(i)$, η οποία αντιπροσωπεύει τον αριθμό των λύσεων στις οποίες η i κυριαρχεί:

$$S(i) = |\{j | j \in P_t + \bar{P}_t \wedge i \succ j\}| \quad \text{Εξ 5.6}$$

Όπου τα $|\cdot|$ δηλώνουν τον πληθάρημο του συνόλου, το $+$ δηλώνει την ένωση πολλαπλών συνόλων και το σύμβολο \succ δίνει τις σχέσεις κυριαρχίας κατά Pareto. Σύμφωνα με τη σχέση ισχύος $S(i)$ ενός μέλους η καθαρή τιμή Fitness υπολογίζεται ως:

$$R(i) = \sum_{j \in P_t + \bar{P}_t, j > i} S(j) \quad \text{Εξ 5.7}$$

Αυτός είναι ο τύπος που δίνει την τιμή Fitness των μελών υπολογίζοντας τις σχέσεις ισχύος που έχουν τα μέλη μεταξύ τους στο εξωτερικό αρχείο αλλά και στον πληθυσμό. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να τονιστεί πως η τιμή Fitness είναι προς ελαχιστοποίηση εδώ. Για παράδειγμα το $R(i) = 0$ αντιστοιχεί σε μια μη-κυριαρχούμενη λύση και μια υψηλή τιμή $R(i)$ υποδηλώνει πως το μέλος i κυριαρχείται από αρκετά άλλα μέλη.



Σχήμα 5.4: Σύγκριση μεταξύ ανάθεσης τιμής Fitness μεταξύ SPEA και SPEA II για ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης με δύο αντικειμενικές συναρτήσεις. Αριστερά ανάθεση Fitness στη SPEA και δεξιά στη SPEA II [17]

Επομένως, για να γίνει η διάκριση μεταξύ των μελών τα οποία έχουν πανομοιότυπα Fitness χρησιμοποιείται επιπλέον πληροφορία, η οποία έχει να κάνει με την πυκνότητα των λύσεων. Για κάθε άτομο i υπολογίζονται οι αποστάσεις στον χώρο των λύσεων, με κάθε άτομο j του πληθυσμού και του αρχείου και έπειτα αυτές ταξινομούνται και αποθηκεύονται σε μια λίστα. Η ταξινόμηση γίνεται σε αύξουσα σειρά και ο δείκτης της απόστασης συμβολίζεται ως σ_i^k , όπου το στοιχείο k είναι μια κοινή ρύθμιση και υπολογίζεται ως η τετραγωνική ρίζα του μεγέθους του πληθυσμού συν του μεγέθους του εξωτερικού αρχείου, $k = \sqrt{N + \bar{N}}$. Έπειτα, η πυκνότητα $D(i)$ του στοιχείου i ορίζεται ως:

$$D(i) = \frac{1}{\sigma_i^k + 2} \quad \text{Εξ 5.8}$$

Στον παρονομαστή, το 2 αθροίζεται για να εξασφαλιστεί ότι η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη του μηδενός και μικρότερη του 1. Έτσι, τέλος, υπολογίζεται η τιμή Fitness προσθέτοντας την πυκνότητα D του στοιχείου i και η τιμή Fitness που προέκυψε από την ισχύ των λύσεων, R . Συνεπώς έχουμε:

$$F(i) = D(i) + R(i) \quad \text{Εξ 5.9}$$

5.4 Αλγόριθμος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης NSGA-II (Non-Sorting Genetic Algorithm)

Ο αλγόριθμος NSGA που προτάθηκε αρχικά από τους Srinivas και Deb [19] είναι από τους πρώτους εξελικτικούς αλγορίθμους που βασίστηκαν στη λογική της ταξινόμησης

των μη κυριαρχούμενων λύσεων (non-dominated sorting algorithms). Ο αλγόριθμος αυτός διαφέρει από τους υπόλοιπους απλούς εξελικτικούς αλγορίθμους, μόνο ως προς τη διαδικασία επιλογής ενώ οι φάσεις της διασταύρωσης και της μετάλλαξης παραμένουν ως έχουν. Ο αλγόριθμος NSGA δέχτηκε αρκετές επικρίσεις για τη μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα που εισάγει η ταξινόμηση των μη-κυριαρχούμενων λύσεων, ειδικά όταν το μέγεθος του πληθυσμού είναι μεγάλο για την έλλειψη ελιτισμού, δεδομένου πως για τους αλγορίθμους βελτιστοποίησης είναι μια έννοια που μπορεί κατά πολύ να αυξήσει την απόδοση των γενετικών αλγορίθμων και να τους αποτρέψει από το να χάνουν «καλές» λύσεις αφού τις βρουν και τέλος επικρίθηκε έντονα διότι οι παράμετροι εισόδου της δεν της επέτρεπαν να διατηρεί την απαιτούμενη ποικιλία λύσεων. Για τους λόγους αυτούς λίγα χρόνια αργότερα, προτάθηκε από τον Deb [20] μια βελτιωμένη εκδοχή του αλγορίθμου που ονομάστηκε NSGA-II.

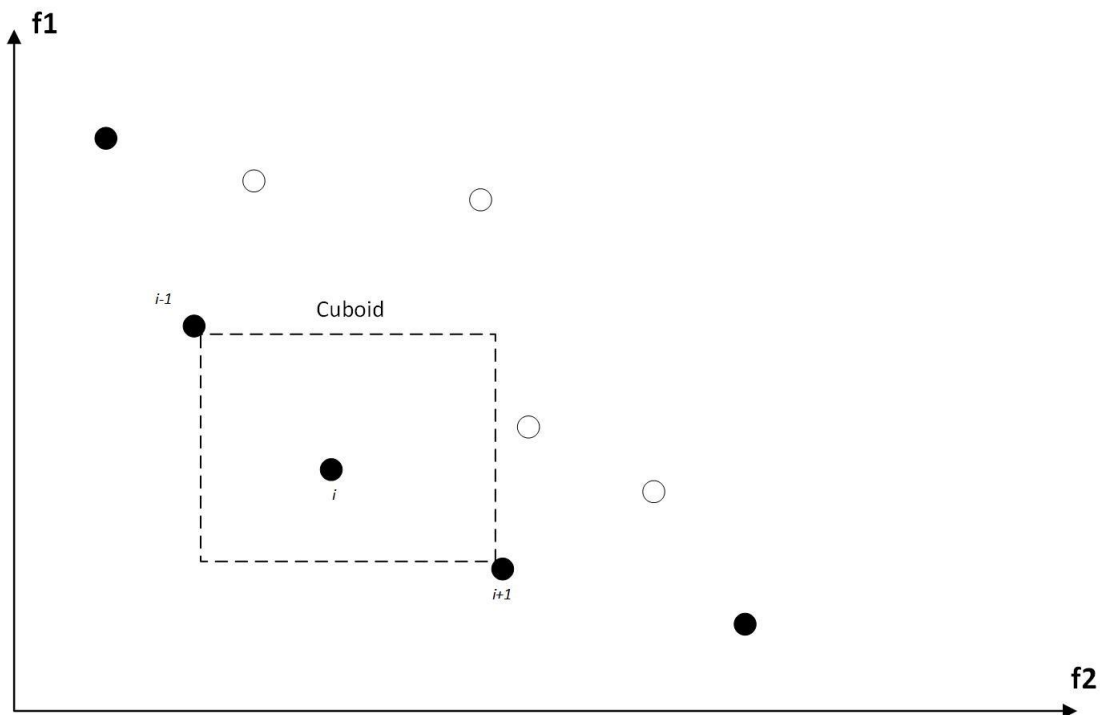
Ο NSGA-II λοιπόν αποτελεί έναν εξελικτικό αλγόριθμο, ο οποίος βασίζεται στη λογική της ταξινόμησης των μη-κυριαρχούμενων λύσεων σε επίπεδα κυριαρχίας ή αλλιώς σε διαφορετικά μέτωπα λύσεων. Για λόγους απλότητας αρχικά θα περιγραφεί μια απλή και αργή εκδοχή της διαδικασίας ταξινόμησης των λύσεων σε επίπεδα. Με σκοπό να βρεθούν οι μη-κυριαρχούμενες λύσεις ενός πληθυσμού N , που θα αντιστοιχούν στο πρώτο μέτωπο, κάθε λύση πρέπει να συγκριθεί με όλες τις υπόλοιπες του πληθυσμού για να ελεγχθεί το αν αυτή κυριαρχείται. Αυτό απαιτεί $O(MN)$ συγκρίσεις για κάθε λύση, όπου M είναι ο αριθμός των αντικειμενικών τιμών. Όταν η διαδικασία αυτή συνεχιστεί για να βρεθούν όλες οι λύσεις του πληθυσμού που αντιστοιχούν στο πρώτο μέτωπο, η συνολική πολυπλοκότητα αυξάνεται σε $O(MN^2)$. Σε αυτό το στάδιο όλα τα άτομα του πληθυσμού που αντιστοιχούν στο πρώτο μέτωπο μη-κυριαρχίας έχουν βρεθεί. Για να γίνει σαφές, κάθε επίπεδο κυριαρχίας ή μέτωπο κυριαρχίας υποδηλώνει το αν ή κατά πόσο οι λύσεις που βρίσκονται μέσα σε αυτά κυριαρχούνται από άλλες. Για παράδειγμα, το πρώτο μέτωπο κυριαρχίας περιέχει λύσεις οι οποίες δεν κυριαρχούνται από άλλες του πληθυσμού.

Στη συνέχεια, για να βρούμε τις λύσεις του επόμενου μετώπου μη-κυριαρχούμενων λύσεων ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία. Στη χειρότερη περίπτωση, η διαδικασία εύρεσης του δεύτερου μετώπου απαιτεί επίσης $O(MN^2)$ αριθμό υπολογισμών, ιδιαίτερα όταν $O(N)$ λύσεις ανήκουν στο δεύτερο ή παραπάνω επίπεδο κυριαρχίας. Συνεπώς, η χειρότερη περίπτωση είναι όταν υπάρχουν $O(N)$ μέτωπα και κάθε ένα από αυτά περιέχει μόνο μία λύση. Αυτό απαιτεί ένα σύνολο πράξεων που φτάνει το $O(MN^3)$. Παρακάτω δίνεται μια ακριβής περιγραφή μιας γρήγορης προσέγγισης της ταξινόμησης των μη-κυριαρχούμενων λύσεων που απαιτεί μόλις $O(MN^2)$ πράξεις.

Καταρχάς, για κάθε λύση υπολογίζονται δύο ποσότητες: 1) ο μετρητής κυριαρχίας n_p , που δίνει τον αριθμό των λύσεων τις οποίες κυριαρχεί η λύση p , και 2) S_p , το οποίο είναι το σύνολο των λύσεων στις οποίες η p κυριαρχεί. Αυτό απαιτεί $O(MN^2)$ συγκρίσεις. Όπως καθίσταται σαφές, ο μετρητής κυριαρχίας των λύσεων που βρίσκονται στο πρώτο μέτωπο είναι ίσος με μηδέν. Για κάθε λύση p με $n_p = 0$, παίρνουμε όλες τις λύσεις (q) που βρίσκονται στο σύνολο S_p και μειώνουμε τον μετρητή κατά ένα. Τώρα οι λύσεις του συνόλου που μετά τη μείωση ο μετρητής τους έφτασε να ισούται με μηδέν μπαίνουν σε μια ξεχωριστή λίστα Q . Η λίστα αυτή αποτελεί το δεύτερο επίπεδο μη κυριαρχίας ή αλλιώς το δεύτερο κατά σειρά μέτωπο. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε μέλος της λίστας Q ώστε να βρεθούν και τα υπόλοιπα κατά σειρά μέτωπα. Για κάθε λύση p του δεύτερου ή μεγαλύτερου μετώπου, ο μετρητής μπορεί να ισούται με το πολύ $N - 1$. Αυτό υποδηλώνει ότι κάθε λύση p θα προσπελαστεί το πολύ $N - 1$ φορές μέχρι ο μετρητής της να φτάσει στο μηδέν. Στο σημείο αυτό κάθε λύση που αντιστοιχείται σε κάποιο μέτωπο δεν προσπελαύνεται ξανά. Με αυτό τον τρόπο η πολυπλοκότητα του προβλήματός μας και της όλης διαδικασίας δεν ξεπερνά τις $O(MN^2)$ πράξεις.

Ένα άλλο πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των εξελικτικών αλγορίθμων είναι η ικανότητά τους να διατηρούν μια πολύ καλή διασπορά και ποικιλία λύσεων. Σε αντίθεση με τον αρχικό αλγόριθμο NSGA, ο οποίος έλεγχε μόνο την απόσταση μεταξύ των λύσεων στο μέτωπο, ο εξελιγμένος NSGA II εισάγει την έννοια του συνωστισμού των λύσεων. Για να γίνει κατανοητή αυτή η προσέγγιση, πρέπει να οριστούν δύο έννοιες, η έννοια της εκτίμησης πυκνότητας των λύσεων και η έννοια του τελεστή σύγκρισης του συνωστισμού.

Η εκτίμηση της πυκνότητας μιας λύσης έγκειται στον υπολογισμό του αριθμού των λύσεων που περιβάλλουν μια συγκεκριμένη λύση του πληθυσμού. Υπολογίζεται, λοιπόν, η μέση απόσταση μεταξύ δύο σημείων σε κάθε πλευρά της λύσης και προς την κατεύθυνση όλων των διαστάσεων που ορίζουν οι αντικειμενικές τιμές του προβλήματος. Αυτή η ποσότητα αποτελεί μια εκτίμηση της περιμέτρου κυβοειδούς μορφής, που σχηματίζεται σύμφωνα με τις θέσεις των κοντινότερων γειτόνων της λύσης. Στο παρακάτω σχήμα γίνεται μια προσπάθεια οπτικοποίησης αυτής της έννοιας χρησιμοποιώντας έναν αντικειμενικό χώρο δύο διαστάσεων.



Σχήμα 5.5: Αναπαράσταση της απόστασης μεταξύ των λύσεων στο μέτωπο. Τα σημεία που προσδιορίζονται με τους συμπαγείς κύκλους ανήκουν στο μέτωπο που είναι προς εξέταση ενώ τα υπόλοιπα ανήκουν σε διαφορετικό μέτωπο.

Εφόσον η τιμή που προσδιορίζεται από αυτή την απόσταση έχει καθοριστεί για όλα τα μέλη του πληθυσμού, δίνεται η δυνατότητα όλες οι λύσεις να αξιολογηθούν και να συγκριθούν ανά δύο με βάση την εγγύτητά τους με άλλες λύσεις. Μια λύση με μικρή τιμή απόστασης θεωρείται ότι βρίσκεται σε σημείο πιο συνωστισμένο από κάποια άλλη με μεγαλύτερη τιμή. Φυσικά, η δυνατότητα μέτρησης της τιμής αυτής επεκτείνεται και σε αντικειμενικούς χώρους μεγαλύτερους των δύο διαστάσεων.

Ο τελεστής σύγκρισης συνωστισμού των λύσεων (\prec_n) καθοδηγεί τη διαδικασία επιλογής στα ποικίλα στάδια του αλγορίθμου, με σκοπό τη δημιουργία ομοιόμορφα κατανομημένων λύσεων στο βέλτιστο μέτωπο Pareto. Έστω ότι κάθε λύση έχει δύο χαρακτηριστικά γνωρίσματα: 1) τη σειρά στην κατάταξη της μη κυριαρχίας ή αλλιώς i_{rank} και 2) την απόσταση συνωστισμού, $i_{distance}$. Ορίζουμε μια μερική διάταξη \prec_n ως:

$$i \prec_n j \text{ if } (i_{rank} < j_{rank}) \quad \text{Eξ 5.10}$$

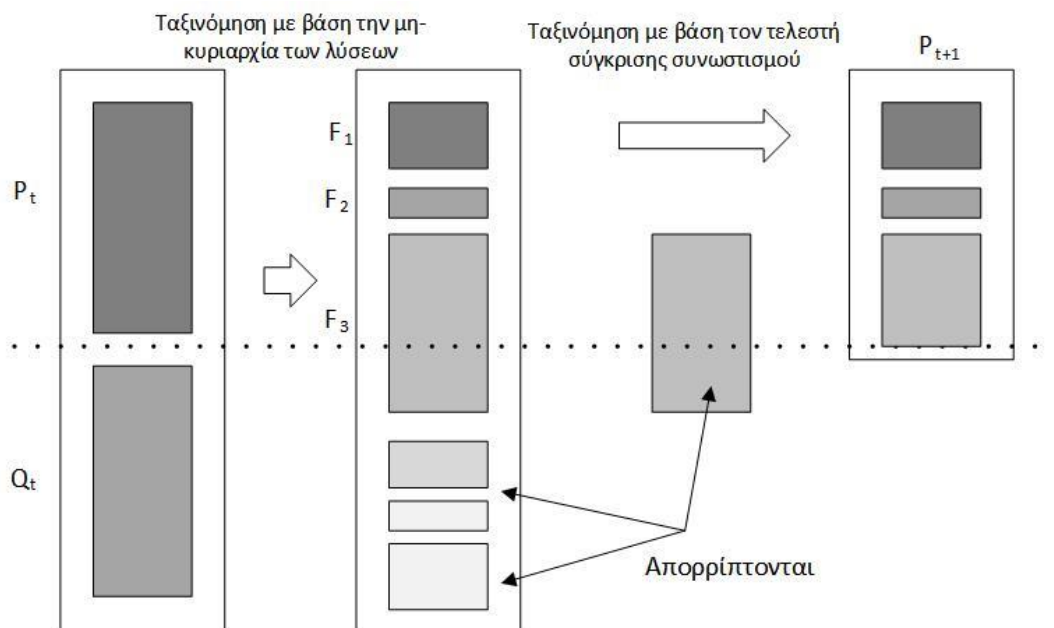
$$\text{or } ((i_{rank} = j_{rank}) \text{ and } (i_{distance} > j_{distance})) \quad \text{Eξ 5.11}$$

Αυτό ισχύει για δύο λύσεις που ανήκουν σε διαφορετικά επίπεδα μη κυριαρχίας. Αλλιώς, αν και οι δύο λύσεις ανήκουν στο ίδιο μέτωπο, τότε προτιμούμε τη λύση που εντοπίζεται σε ένα σημείο λιγότερο συνωστισμένο.

Αυτές είναι οι καινοτομίες που εισάγει ο NSGA-II στο πλαίσιο των πολυκριτηριακών βελτιστοποιήσεων με εξελικτικούς αλγορίθμους. Το κύριο μέρος του αλγορίθμου αυτού έχει ως εξής:

Αρχικά, όπως και στους άλλους αλγορίθμους, δημιουργείται ένας τυχαίος αρχικός πληθυσμός μέσα στα προκαθορισμένα όρια του προβλήματός μας. Σε κάθε λύση αντιστοιχίζεται μια τιμή fitness, η οποία έχει να κάνει με την κατάταξή της σε κάποιο μέτωπο, με βάση τις μεθόδους που περιγράψαμε μόλις – η καλύτερη κατάταξη που μπορεί να πάρει η λύση είναι η τιμή 1 και από την τιμή 2 και πέρα μειώνεται και η ποιότητα της λύσης. Στην αρχή χρησιμοποιούνται οι ήδη γνωστές μέθοδοι δημιουργίας του επόμενου πληθυσμού όπως είναι ο δυαδικός διαγωνισμός (binary tournaments), η μετάλλαξη κλπ. Μετά την αρχικοποίηση του πληθυσμού η διαδικασία διαφέρει, καθώς στον NSGA-II συγκρίνεται ο υπάρχων πληθυσμός με τις καλύτερες μη-κυριαρχούμενες λύσεις οι οποίες έχουν βρεθεί προηγουμένως. Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία εξέλιξης της t th γενιάς του πληθυσμού.

Έχουμε δύο λίστες οι οποίες αντιστοιχούν στην t th γενιά του πληθυσμού P_t και στα ήδη ταξινομημένα μέτωπα μη-κυριαρχούμενων λύσεων Q_t . Οι λίστες αυτές ενώνονται σε μια κοινή λίστα $R_t = P_t \cup Q_t$. Έπειτα η λίστα R_t , η οποία έχει μέγεθος $2N$, ταξινομείται με βάση τη μέθοδο της μη-κυριαρχίας. Στη λίστα αυτή περιέχονται και οι λύσεις του υπάρχοντος πληθυσμού αλλά και οι καλύτερες παλιότερες λύσεις. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η ύπαρξη ελιτισμού του αλγορίθμου καθώς δεν χάνονται παλιότερες, φαινομενικά «καλές» λύσεις. Μετά τη διαδικασία της ταξινόμησης έχουν δημιουργηθεί μέτωπα, με καλύτερο το πρώτο μέτωπο F_1 , στο οποίο περιέχονται οι καλύτερες λύσεις από τις δύο λίστες. Αν το μέγεθος του πρώτου μετώπου είναι μικρότερο από αυτό του πληθυσμού, τότε επιλέγονται όλες οι λύσεις του μετώπου αυτού για να εισαχθούν στην επόμενη γενιά P_{t+1} . Τα υπόλοιπα μέλη της γενιάς P_{t+1} εισέρχονται σε αυτή από τα μέτωπα F_2, F_3 κλπ κατά προτεραιότητα. Σε περίπτωση που το μέτωπο F_1 έχει μεγαλύτερο μέγεθος από ό,τι ο πληθυσμός, στην επόμενη γενιά εισέρχονται τα μέλη με βάση τον τελεστή σύγκρισης συνωστισμού \prec_n με φθίνουσα σειρά, επιλέγοντας με αυτόν τον τρόπο τις καλύτερες λύσεις από το πρώτο μέτωπο. Στο επόμενο σχήμα δίνεται παραστατικά όλη η διαδικασία που εκτελεί ο NSGA-II.



Σχήμα 5.6: Η διαδικασία που ακολουθείται κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου NSGA-II

Ο αλγόριθμος NSGA-II έχει την ικανότητα μέσα σε λίγους μόνο κύκλους να δημιουργεί ένα μέτωπο Pareto το οποίο είναι πολύ κοντά στο επιθυμητό. Βέβαια, λόγω της πολυπλοκότητας που εισάγει μέσω των υπεράριθμων συγκρίσεων υστερεί ως προς την αποτελεσματικότητα συγκριτικά με τους άλλους αλγορίθμους που θα εξετάσουμε. Αργότερα, τα αποτελέσματα από τη σύγκριση των αλγορίθμων θα αναλυθούν εκτενώς.

5.5 Αλγόριθμος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης PESA-II (Pareto Envelope-based Selection Algorithm II) [21]

Ο PESA-II είναι ένας γενετικός πολυκριτηριακός αλγόριθμος βελτιστοποίησης που βασίζεται σε περισσότερες τεχνικές εξέλιξης από ό,τι οι άλλοι αλγόριθμοι της κατηγορίας του. Εκτός λοιπόν από τις παραμέτρους διασταύρωσης και μετάλλαξης των ατόμων του πληθυσμού, στον αλγόριθμο αυτό εισάγονται και δύο νέες έννοιες, εκ των οποίων η πρώτη αφορά το μέγεθος του πληθυσμού και η δεύτερη τη στρατηγική συνωστισμού του υπερπλέγματος (hyper-grid crowding strategy). Μια περιγραφή του αλγορίθμου PESA-II φαίνεται παρακάτω:

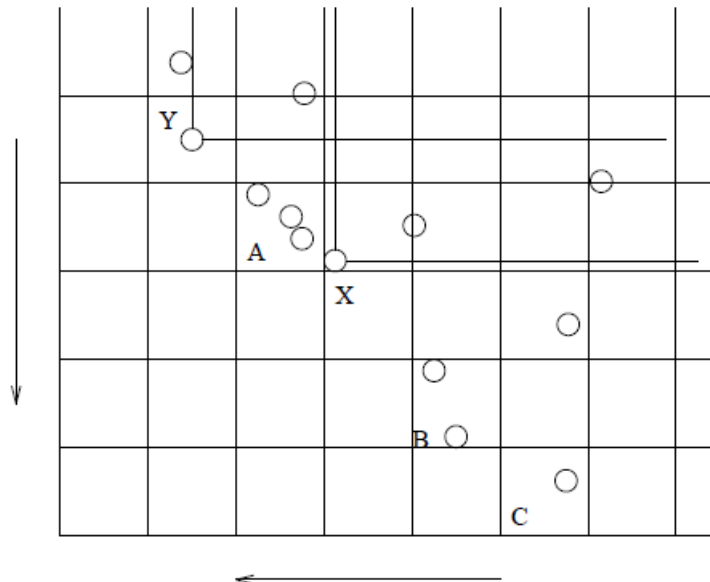
- Δημιουργία και αξιολόγηση κάθε αρχικού «εσωτερικού» πληθυσμού (IP, Internal Population) P_I χρωμοσωμάτων και αρχικοποίηση του «εξωτερικού» πληθυσμού (EP, External Population) στο κενό σύνολο.
- Ενσωμάτωση των μη-κυριαρχούμενων μελών του IP στο EP.
- Αν κάποιο κριτήριο τερματισμού επαληθευτεί, τότε σταματάει ο αλγόριθμος, επιστρέφοντας το σύνολο των χρωμοσωμάτων στο EP σαν αποτέλεσμα. Αλλιώς, διαγράφεται το περιεχόμενο του IP και επαναλαμβάνεται το ακόλουθο μέχρις ότου παραχθούν ξανά P_I χρωμοσώματα.
- Με πιθανότητα ίση με p_c , επιλέγονται δύο γονείς από τον εξωτερικό πληθυσμό EP, παράγεται ένας απόγονος μέσω της διαδικασίας της διασταύρωσης και ο απόγονος

μεταλλάσσεται. Με πιθανότητα $(1 - p_c)$, επιλέγεται ένας γονιός και μεταλλάσσεται για τη δημιουργία του απογόνου.

- ο Επιστροφή στο βήμα 2.

Στο βήμα ενσωμάτωσης του αρχείου (archive), δηλαδή στο βήμα 2, από το παρόν σύνολο των υποψήφιων λύσεων (IP) ενσωματώνονται τα μέλη στο αρχείο ένα προς ένα. Ένα μέλος-υποψήφιος εισέρχεται στο αρχείο μόνο αν δεν αποτελεί μη κυριαρχούμενο μέλος εσωτερικά του IP και αν δεν κυριαρχείται από κανένα μέλος του αρχείου. Μόλις ένα καινούριο μέλος εισέλθει στο αρχείο, ελέγχεται αν κάποιο άλλο μέλος του κυριαρχείται από αυτό και διαγράφεται. Αν ένα μέλος πληροί τα κριτήρια εισόδου στο αρχείο αλλά παρ' όλα αυτά το αρχείο είναι γεμάτο, τότε το μέγεθός του αυξάνεται προσωρινά κατά ένα $(PE + 1)$ και ένα ήδη υπάρχον μέλος του διαγράφεται. Η επιλογή του μέλους που τίθεται προς διαγραφή είναι μια διαδικασία που θα αναλυθεί στην πορεία.

Κάθε τεχνική επιλογής ενός μέλους προς εξέλιξη, προσανατολίζεται ως προς τη διατήρηση της ανάπτυξης ενός μετώπου Pareto, με πολύ καλή διασπορά των μελών του. Ο PESA-II έχει ως σκοπό να δημιουργήσει μια ακόμα μεγαλύτερη διασπορά, προσανατολίζοντας την έρευνα στις σχετικά απομονωμένες περιοχές του μετώπου Pareto κάθε επανάληψης. Οι άλλοι πολυκριτηριακοί αλγόριθμοι, όπως είναι ο NSGA-II και ο SPEA, χρησιμοποιούν αυτή την πληροφορία του συνωστισμού των λύσεων για να συνεχίσουν την εξέλιξη και εν τέλει τη δημιουργία του βέλτιστου μετώπου Pareto. Αυτοί οι αλγόριθμοι χρησιμοποιούν ως σημείο αναφοράς για τον υπολογισμό και την αξιολογία αυτής της πληροφορίας ένα μοναδικό σημείο του μετώπου κάθε φορά. Αυτό είναι και το όριο που ξεπερνάει ο PESA-II. Στον αλγόριθμο αυτό βλέπουμε πως σημείο αναφοράς δεν είναι πια ένα μοναδικό σημείο αλλά μια ολόκληρη περιοχή του αντικειμενικού χώρου (Region-based Selection). Αυτή η τεχνική παρέχει μια εναλλακτική, με την οποία ο απώτερος στόχος των αλγορίθμων βελτιστοποίησης, η ευρεία κατανομή των λύσεων δηλαδή, επιτυγχάνεται πολύ πιο άμεσα. Για να γίνει η έννοια αυτή πιο κατανοητή παρατίθεται το ακόλουθο σχήμα, το οποίο είναι χωρισμένο σε περιοχές που ονομάζονται «hyperboxes» σύμφωνα με τους Corne et al.



Σχήμα 5.7: Αναπαράσταση των μεθόδων επιλογής των σύγχρονων πολυκριτηριακών εξελικτικών αλγορίθμων [20]

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, ο αντικειμενικός χώρος είναι χωρισμένος σε περιοχές (hyperboxes). Τα σημεία του μετώπου είναι διασκορπισμένα στον χώρο και κάποια από αυτά βρίσκονται στο ίδιο hyperbox. Για κάθε μία τέτοια περιοχή παράγεται μία τιμή καταλληλότητας (fitness). Στο παραπάνω σχήμα το hyperbox C θα είχε καλύτερη τιμή καταλληλότητας απ' ό,τι το B και αυτό με τη σειρά του καλύτερη τιμή απ' ό,τι το A. Βάσει του [21] υποδεικνύεται πως η μέθοδος επιλογής με βάση τον διαχωρισμό περιοχών στον αντικειμενικό χώρο, είναι πολύ πιο αποτελεσματική από τη μέθοδο που στηρίζεται αποκλειστικά σε ένα σημείο κάθε φορά. Έστω ότι η επιλογή γίνεται με βάση τη μέθοδο του δυαδικού διαγωνισμού (binary tournaments) χωρίς αντικατάσταση της προηγούμενης τιμής. Η επιλογή μέσω του διαγωνισμού χρησιμοποιείται για να αναδείξει ένα άτομο με βάση την τιμή καταλληλότητας που έχει αποδοθεί είτε σε ένα άτομο του πληθυσμού είτε σε μια περιοχή του αντικειμενικού χώρου. Η διαφορά, σύμφωνα με τους Corne et al, είναι ότι σε έναν αλγόριθμο που βασίζεται σε ένα άτομο η πιθανότητα να επιλεγεί μια λύση από μια λιγότερο πολυσύχναστη περιοχή είναι τρεις φορές μικρότερη από την πιθανότητα που δίνει η μέθοδος που βασίζεται στην καταλληλότητα ολόκληρων περιοχών. Θεωρούμε μια προσέγγιση μετώπου Pareto η οποία χωρίζεται σε b περιοχές με n_i άτομα στην περιοχή i και P άτομα συνολικά, τα οποία καταλαμβάνουν όλες τις περιοχές, δηλαδή $\sum_{i=1}^b n_i = P$. Υποθέτουμε, τώρα, με ελαφριά απώλεια της γενικότητας, πως μία και μόνο περιοχή j έχει το μεγαλύτερο n_i και ακόμα μία μοναδική περιοχή έχει το μικρότερο n_i . Τα μέλη του μετώπου που ανήκουν σε αυτές τις δύο περιοχές είναι αντίστοιχα l και m .

Όταν η μέθοδος που ακολουθείται βασίζεται στα άτομα, τότε η πιθανότητα να πετύχουν τα binary tournaments ένα άτομο το οποίο προέρχεται από τη λιγότερο συνωστισμένη περιοχή ισούται με $1 - ((P - l)/P)^2$. Η αντίστοιχη τιμή της πιθανότητας για την πιο πολυσύχναστη περιοχή είναι $(2Pl - l^2)/m^2$. Όταν το m είναι μεγάλο σε σχέση με το l , η σχετική δυνατότητα του να επιλεγεί ένα απομονωμένο άτομο από το να επιλεγεί ένα συνωστισμένο άτομο μειώνεται δραματικά και τείνει να σπρώξει τον αλγόριθμο να επιλέγει άτομα για τον δυαδικό διαγωνισμό από τις πολυπληθείς περιοχές. Σε αντίθεση με αυτό, η αντίστοιχη αναλογία επιλογής όταν ο αλγόριθμος βασίζεται στις διαχωρισμένες περιοχές αποδεικνύεται ότι είναι ίση με $2b - 1$.

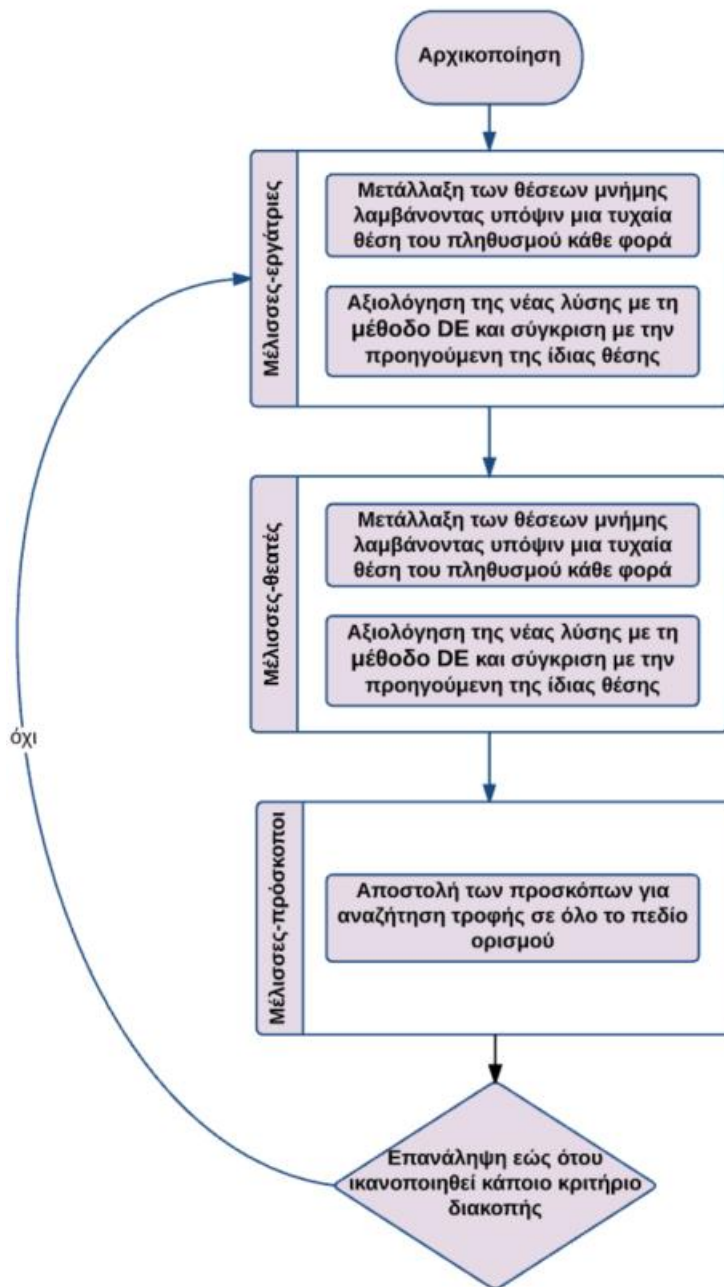
Εν κατακλείδι, ο αλγόριθμος PESA-II φαίνεται να δίνει τη δυνατότητα της γρήγορης σύγκλισης σε βέλτιστο μέτωπο Pareto, το οποίο θα είναι κατανομημένο ομοιόμορφα στον αντικειμενικό χώρο. Η μέθοδος που τον ξεχωρίζει από τους άλλους αλγόριθμους είναι η ικανότητα επιλογής λύσεων προς εξέλιξη, οι οποίες είναι απομονωμένες στο μέτωπο σε σχέση με τις υπόλοιπες, καθώς χρησιμοποιεί τιμές καταλληλότητας περιοχών του αντικειμενικού χώρου και όχι μεμονωμένων λύσεων. Αυτό του δίνει το πλεονέκτημα της πολύ γρήγορης σύγκλισης στη βέλτιστη μορφή του μετώπου αλλά επίσης το κάνει πολύ ευάλωτο στον εγκλωβισμό του σε συγκεκριμένα τοπικά ακρότατα, όπως θα δούμε και στη συνέχεια.

Κεφάλαιο 6: Υβριδικοί αλγόριθμοι μονοκριτηριακής και πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, ABC-DE (Artificial Bee Colony algorithm – Differential Evolution) και ASMA (ABC SPEA-II Multi-objective Algorithm)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία υλοποιήθηκαν δύο νέοι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, βάσει του αλγορίθμου των μελισσών, ABC και διάσημων τεχνικών εύρεσης της βέλτιστης λύσης. Ο πρώτος αλγόριθμος που θα δούμε είναι ο μονοκριτηριακός ABC-DE και ο δεύτερος είναι ο πολυκριτηριακός ASM Algorithm.

6.1 Υβριδικός αλγόριθμος ABC – DE

Στον αλγόριθμο αυτό προσαρμόστηκε η μέθοδος εύρεσης επόμενης λύσης της διαφορικής εξέλιξης που περιγράφηκε στην ενότητα 5.2. Πιο συγκεκριμένα στον αλγόριθμο ABC αντικαταστήσαμε τη μέθοδο με την οποία επιλέγεται η επόμενη λύση προς έλεγχο με τη μέθοδο που προτείνεται στην Εξ 5.2. Η διαφορά των δύο εξισώσεων έγκειται στο ότι η Εξ 5.2 περιέχει την καλύτερη λύση που ο αλγόριθμος έχει εντοπίσει εκείνη τη στιγμή, την συνδυάζει με τη λύση που μεταλλάσσεται και λαμβάνει υπόψιν της και δύο τυχαίες άλλες λύσεις του πληθυσμού. Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται ταχύτερη σύγκλιση του αλγορίθμου στη βέλτιστη λύση. Στο παρακάτω διάγραμμα ροής φαίνεται η προσθήκη της μεθόδου DE στον αλγόριθμό μας σε σχέση με το σχήμα 5.2.



Σχήμα 6.1: Διάγραμμα ροής υβριδικού αλγορίθμου ABC-DE

6.1.1 Σύνδεση υβριδικού αλγορίθμου ABC-DE με τον κώδικα σχεδίασης και ανάλυσης ηλεκτρικού κινητήρα

Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του τροποποιημένου αλγορίθμου βελτιστοποίησης ABC παρακάτω δίνονται αναλυτικά οι φάσεις της αρχικοποίησης, των μελισσών-εργατριών και θεατών και τέλος η φάση των προσκόπων-μελισσών.

- Αρχικοποίηση: Αρχικά έχουμε την αρχικοποίηση ενός τυχαίου πίνακα τροφών με παραμέτρους που σέβονται τα εκάστοτε όρια. Για κάθε διάνυσμα τροφής γίνεται κλήση του προγράμματος FEMM και λαμβάνονται τα δεδομένα προς αξιολόγηση. Τα μεγέθη που μπαίνουν στην Cost Function δίνονται στην επόμενη ενότητα. Κλήση

της αντικειμενικής συνάρτησης και δημιουργία πίνακα τιμών με την τιμή κόστους που αντιστοιχεί σε κάθε τροφή. Αξιολόγηση αυτών με βάση τη συνάρτηση Calculate Fitness του αρχικού αλγορίθμου. Ο αλγόριθμος ABC προσπαθεί να βρει θέσεις τροφών με όσο το δυνατόν μεγαλύτερο Fitness, δηλαδή όσο περισσότερο νέκταρ, ελαχιστοποιώντας τα αποτελέσματα της Cost Function.

- Είσοδος στο κύριο κομμάτι του αλγορίθμου:

Μέλισσες-εργάτριες: Στη φάση αυτή γίνεται μετάλλαξη της τροφής i σύμφωνα με τη μέθοδο της διαφορικής εξέλιξης (DE) που περιγράψαμε. Για κάθε μεταλλαγμένη τροφή γίνεται κλήση του FEMM και λήψη έπειτα των δεδομένων που θα εισέλθουν στην αντικειμενική συνάρτηση. Υπολογισμός Fitness της τιμής κόστους για την τροφή i και σύγκριση αυτής με τις τιμές των άλλων τροφών. Αν η τιμή Fitness της νέας μεταλλαγμένης λύσης είναι καλύτερη από την τιμή της τροφής που υπήρχε πριν στη θέση αυτή, τότε η νέα τροφή παίρνει τη θέση της παλιάς στον πίνακα. Αν είναι χειρότερη από την προηγούμενη λύση, τότε δεν γίνεται κάποια αντικατάσταση αλλά αυξάνεται ο δείκτης trial της τροφής ο οποίος καθορίζει το ποια τροφή θα εγκαταλειφθεί από τις μέλισσες. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου όλες οι τροφές του πίνακα μεταλλαχθούν και ελεγχθούν.

Μέλισσες-θεατές: Πριν ο αλγόριθμος εισέλθει στη φάση αυτή γίνεται μια κανονικοποίηση στις τιμές Fitness των τροφών με βάση τη μεγαλύτερη τιμή του. Με τον τρόπο αυτό σε κάθε τροφή αντιστοιχίζεται μια πιθανότητα, η οποία αφορά το κατά πόσο η κάθε θέση τροφής είναι πιθανό να έχει το περισσότερο νέκταρ. Μόνο οι τροφές με υψηλή πιθανότητα Fitness μπαίνουν στη φάση αυτή. Όταν οι επιλεγμένες τροφές εισέλθουν στη φάση των μελισσών θεατών ακολουθείται η διαδικασία με τη φάση των εργατριών. Δηλαδή, μετάλλαξη τροφής με βάση τη μέθοδο DE, κλήση του FEMM και λήψη δεδομένων που θα εισέλθουν στη συνάρτηση κόστους, υπολογισμός Fitness και επιλογή καλύτερης τροφής και τέλος επανάληψη της διαδικασίας μέχρις ότου η φάση των θεατών τρέξει ίσες φορές με τον αριθμό του πληθυσμού της κυψέλης.

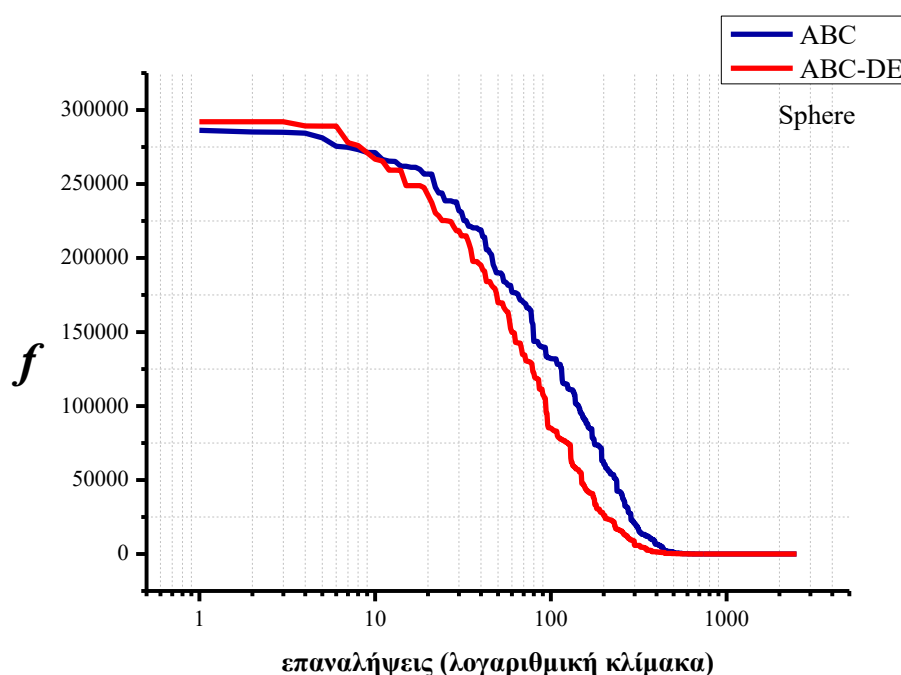
Μέλισσες-πρόσκοποι: Ο δείκτης trial που αυξάνεται κάθε φορά που μια μεταλλαγμένη λύση δεν είναι καλύτερη από τη γονική της είναι και αυτός που θα ορίσει το πότε μια μέλισσα θα γίνει πρόσκοπος. Στη φάση λοιπόν αυτή εντοπίζεται κάποια τροφή της οποίας ο δείκτης trial έχει φτάσει στο όριο και χρειάζεται να εγκαταλειφθεί από τις μέλισσες. Έτσι λοιπόν η μέλισσα που αντιστοιχεί στην τροφή αυτή μετατρέπεται προσωρινά σε μέλισσα πρόσκοπο και βγαίνει από την κυψέλη προς αναζήτηση μιας εντελώς τυχαίας θέσης τροφής. Για τη νέα τυχαία τροφή έχουμε πάλι κλήση του FEMM και της αντικειμενικής συνάρτησης. Υπολογίζεται έπειτα το Fitness της τροφής και αντικαθίσταται η παλιά τροφή με την τυχαία.

Ύστερα από αυτές τις τρεις φάσεις εντοπίζεται η τροφή με τη μικρότερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και αποθηκεύεται ως η καλύτερη του κύκλου. Η τιμή αυτή θεωρείται προσωρινά η βέλτιστη τιμή του αλγορίθμου και η τροφή που της αντιστοιχεί ως η προσωρινή βέλτιστη λύση. Σε μια πιθανή εύρεση καλύτερης τιμής σε άλλο κύκλο οι θέσεις αυτές αντικαθίστανται με τη νέα.

- Επανάληψη του κύριου μέρους του αλγορίθμου μέχρι να ενεργοποιηθεί κάποια συνθήκη τερματισμού.

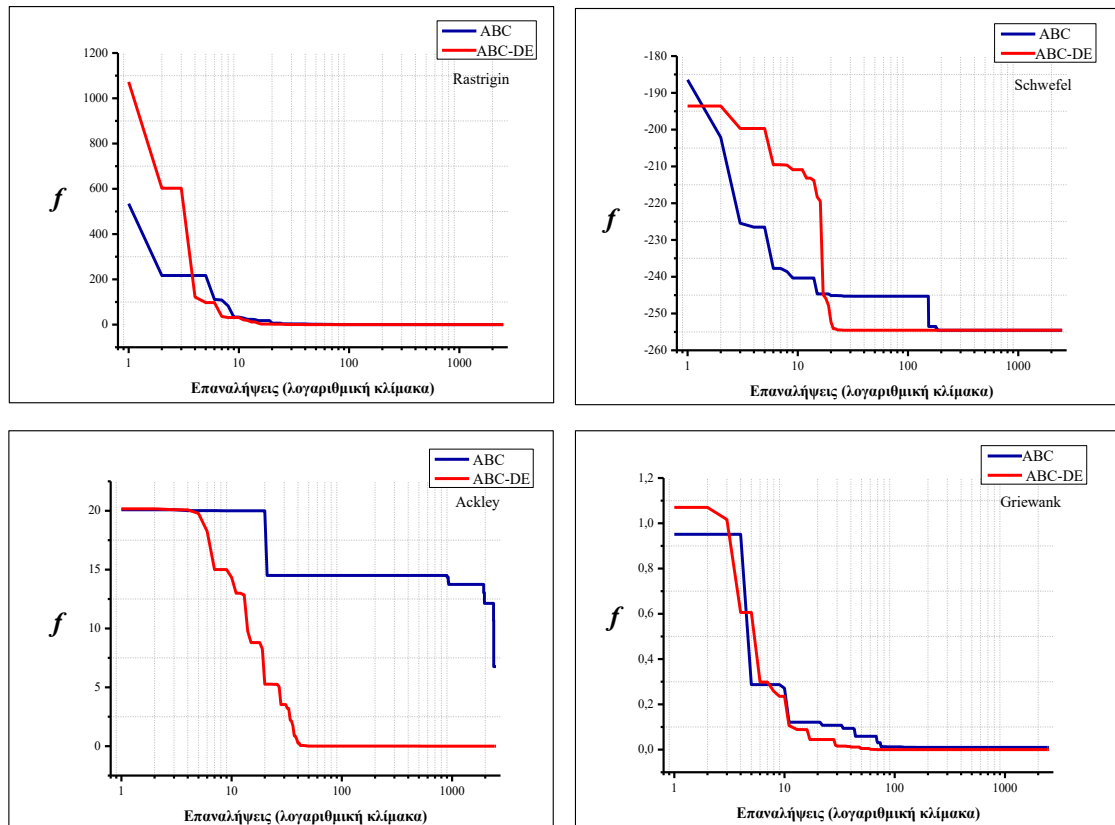
6.1.2 Επιβεβαίωση γρηγορότερης σύγκλισης με την εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου

Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστεί ένα διάγραμμα το οποίο προέκυψε με τη χρήση του αλγορίθμου ABC, στο οποίο θα φαίνεται η σύγκλιση του αλγορίθμου με δύο διαφορετικές τεχνικές σύγκλισης. Στο διάγραμμα αυτό θα φανεί η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής της εύρεσης επόμενης λύσης με τη μέθοδο της διαφορικής εξέλιξης, ως προς τη γρήγορη σύγκλιση του αλγορίθμου σε βέλτιστο. Θέσαμε προς βελτιστοποίηση την δοκιμαστική συνάρτηση Sphere, με 100 παραμέτρους προς βελτιστοποίηση και για 2500 επαναλήψεις. Η μπλε γραμμή δίνει τη σύγκλιση του αλγορίθμου ABC, ενώ η κόκκινη γραμμή δίνει τη σύγκλιση του υβριδικού ABC-DE, στον οποίο έγινε προσθήκη της μεθόδου της διαφορικής εξέλιξης για την εύρεση της επόμενης λύσης.



Σχήμα 6.2: Σύγκριση σύγκλισης αλγορίθμου ABC με τον υβριδικό ABC στον οποίο έχει προσαρμοστεί η μέθοδος DE

Παρατηρούμε πως ο υβριδικός αλγόριθμος έχει γρηγορότερη σύγκλιση προς το ακρότατο που ορίζει τη βέλτιστη λύση, ακόμα και αν ξεκίνησε από χειρότερη θέση σε σχέση με τον ABC. Τονίζουμε πως τα αποτελέσματα δόθηκαν σε λογαριθμική κλίμακα για να είναι εμφανής η βηματική μείωση των αντικειμενικών τιμών σε κάθε περίπτωση αλλά και επειδή οι τελευταίες επαναλήψεις κρίνονται αδιάφορες αφού οι αλγόριθμοι έχουν συγκλίνει αρκετά νωρίς. Για το λόγο αυτό η μέθοδος της διαφορικής εξέλιξης θα προσαρμοστεί και στην μονοκριτηριακή αλλά και στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση. Στο σχήμα 6.3 παραθέτουμε τη σύγκριση των δύο αλγορίθμων με τη βοήθεια τέσσερων άλλων δημοφιλών test functions, την Rastrigin, την Schwefel, την Ackley και την Griewank. Και σε αυτές τις συναρτήσεις εκτελέστηκαν 2500 επαναλήψεις με 100 παραμέτρους προς βελτιστοποίηση.



Σχήμα 6.3: Σύγκριση ABC και ABC-DE με τη βοήθεια των test functions Rastrigin, Schwefel, Ackley και Griewank

6.2 Αλγόριθμος ASMA (ABC SPEA-II Multi-objective Algorithm)

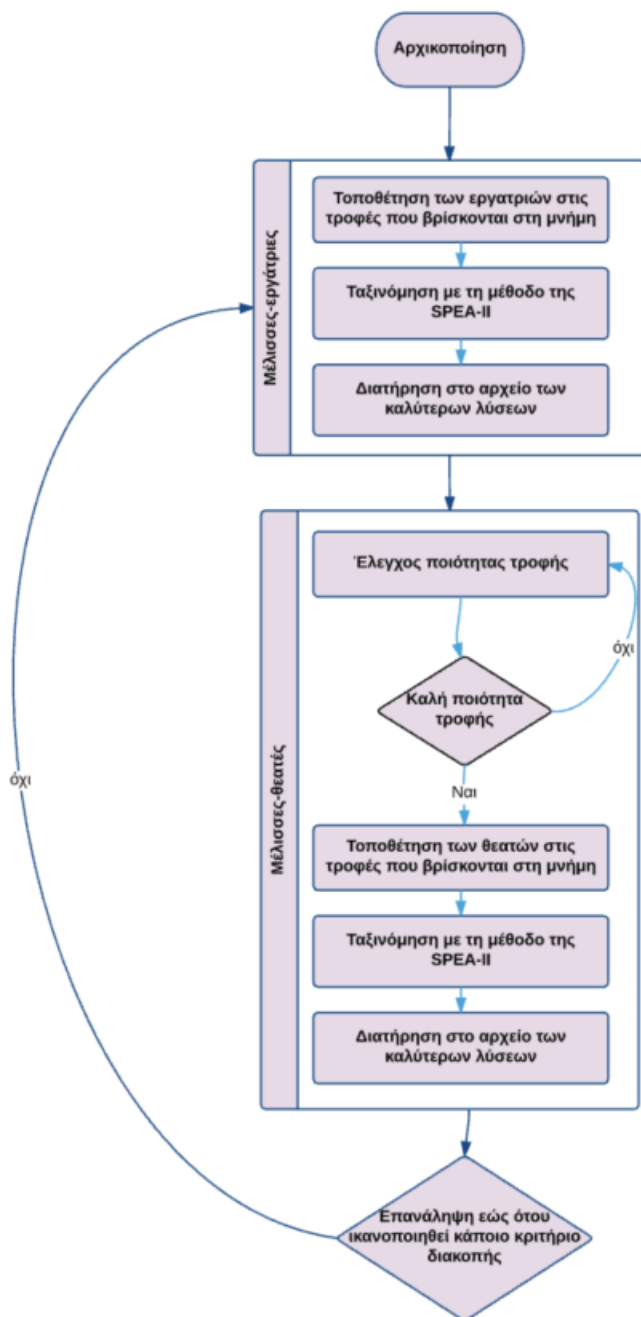
Ο αλγόριθμος ABC που περιγράφηκε νωρίτερα αποτέλεσε τη βάση για να την ανάπτυξη ενός νέου πολυκριτηριακού αλγορίθμου με την ικανότητα πολύ γρήγορης σύγκλισης στο βέλτιστο μέτωπο Pareto που καθορίζει η εκάστοτε αντικειμενική συνάρτηση. Ο ASMA βασίστηκε στη λογική του μονοκριτηριακού αλγορίθμου των μελισσών και μετατράπηκε σε πολυκριτηριακό αλγόριθμο με βάση τη λογική ταξινόμησης που δίνει ο αλγόριθμος SPEA-II. Για τον λόγο αυτό έγινε και η ανάλυση πάνω στον αλγόριθμο της SPEA-II.

6.2.1 Επεξήγηση αλγορίθμου ASMA

Στον νέο αυτό αλγόριθμο, έχει διατηρηθεί η έννοια των εργατριών-μελισσών αλλά και των θεατών-μελισσών, έχει όμως απορριφθεί η μέλισσα-πρόσκοπος καθώς οι «κακές» λύσεις φεύγουν από το μέτωπο Pareto με τη βοήθεια της ταξινόμησης κατά SPEA-II. Έχουμε λοιπόν έναν αλγόριθμο με 3 φάσεις: την αρχικοποίηση του πληθυσμού, τη φάση των εργατριών και τη φάση των θεατών-μελισσών.

- Στην **αρχικοποίηση του πληθυσμού** γेमίζει η δομή του πληθυσμού με τυχαία σημεία, τα οποία σέβονται τα όρια που έχουν δοθεί για τον χώρο απόφασης. Γίνεται η αξιολόγηση των λύσεων με βάση την αντίστοιχη αντικειμενική συνάρτηση που έχουμε δώσει και έπειτα αυτά τα στοιχεία ταξινομούνται με βάση τις τεχνικές του αλγορίθμου SPEA-II. Έπειτα, γेमίζουμε το αρχικά κενό εξωτερικό μας αρχείο με τα μέλη που έχουν διατηρηθεί στον πληθυσμό μετά το την ταξινόμηση κατά SPEA-II.

- Στη συνέχεια, η δεύτερη φάση έχει να κάνει με την εύρεση νέων λύσεων στη φάση των **εργατριών-μελισσών**. Εκεί, ακολουθώντας τα ίδια πρότυπα με τον μονοκριτηριακό ABC και την τεχνική εύρεσης επόμενης λύσης με τη μέθοδο της διαφορικής εξέλιξης, γίνεται αναζήτηση της επόμενης λύσης για κάθε μέλος του πληθυσμού. Η επόμενη λύση αξιολογείται σύμφωνα με την αντικειμενική συνάρτηση που έχουμε ορίσει και εισέρχεται σε μια καινούρια δομή, την *erop*(*employed population*). Στο τέλος της φάσης των εργατριών το εξωτερικό αρχείο μαζί με τη δομή *erop* συγχωνεύονται και μπαίνουν εκ νέου στη συνάρτηση ταξινόμησης της SPEA-II. Μετά το πέρας αυτής της φάσης, τα πρώτα \bar{N} μέλη της συγχώνευσης μπαίνουν στο εξωτερικό αρχείο και συνεχίζουν στην επόμενη φάση.
- Στη φάση των **μελισσών-θεατών** έχουμε μια διαφοροποίηση ως προς τον τρόπο εισόδου των μελών σε αυτή. Στον μονοκριτηριακό ABC ορίζαμε πριν από τη φάση αυτή, έναν πίνακα πιθανοτήτων που κάθε σημείο του αντιστοιχούσε και σε ένα σημείο από τον πίνακα τροφών. Αυτός ο πίνακας πιθανοτήτων προέκυπτε με βάση την τιμή Fitness που αποδιδόταν σε κάθε μέλος τροφής από μία συγκεκριμένη συνάρτηση του αλγορίθμου, η οποία τώρα δεν χρησιμοποιείται. Όμως, όπως έχουμε εξηγήσει και παραπάνω, το σημείο αυτό του αλγορίθμου των μελισσών είναι ίσως το πιο νευραλγικό όσον αφορά τη γρήγορη σύγκλιση στη βέλτιστη λύση. Έτσι λοιπόν για τη φάση αυτή χρησιμοποιήσαμε την τιμή Fitness που ορίζεται στον αλγόριθμο της SPEA-II. Ο πίνακας της τιμής Fitness κανονικοποιείται, όπως και στον μονοκριτηριακό αλγόριθμο ABC, και στη φάση των μελισσών-θεατών μεταλλάσσονται μόνο οι τροφές αυτές που έχουν τη μεγαλύτερη πιθανότητα. Έτσι, λοιπόν, για επαναλήψεις που είναι ίσες με το μέγεθος του πληθυσμού N , μια καινούρια λύση προτείνεται με βάση τη μέθοδο DE, για κάθε υπάρχουσα λύση του αρχείου.
Η καινούρια αυτή λύση συγχωνεύεται με το αρχείο και εισάγεται στη μέθοδο ταξινόμησης κατά SPEA-II όπου και κατατάσσεται ανάμεσα στις άλλες.
- Επανάληψη μέχρι να ενεργοποιηθεί κάποιο κριτήριο τερματισμού.



Σχήμα 6.4: Διάγραμμα ροής ASMA

Αυτή η μίξη των αλγορίθμων έγινε με σκοπό να συνδυαστούν τα πλεονεκτήματα του ABC και της SPEA-II σε έναν πολυκριτηριακό αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Συνδυάστηκαν οι δύο αυτές τεχνικές μαζί με την επιλογή επόμενης λύσης της διαφορικής εξέλιξης (DE-Differential Evolution). Πήραμε λοιπόν έναν καθαρά μονοκριτηριακό αλγόριθμο βελτιστοποίησης και σχεδιάσαμε ένα πολυκριτηριακό βελτιστοποιημένο υβρίδιο, το οποίο έχει την ικανότητα πολύ γρήγορης σύγκλισης στο βέλτιστο μέτωπο Pareto. Στη συνέχεια θα προχωρήσουμε σε μια σύγκριση του πολυκριτηριακού αυτού αλγορίθμου με τρεις από τους δημοφιλέστερους εξελικτικούς πολυκριτηριακούς αλγορίθμους, όπου και θα αναδειχθεί αυτή η ταχύτητα στην εύρεση του βέλτιστου μετώπου Pareto.

6.3 Σύγκριση πολυκριτηριακών αλγορίθμων με βάση τον υπερόγκο και τον δείκτη συνεισφοράς

Στο σημείο αυτό θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της σύγκρισης τριων εξελικτικών πολυκριτηριακών αλγορίθμων, με τον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη ενότητα, τον ASMA. Οι αλγόριθμοι αυτοί είναι οι εξής:

- SPEA-II (Strength Pareto Evolutionary Algorithm II)
- NSGA-II (Non-Sorting Genetic Algorithm)
- PESA-II (Pareto Envelope-based Selection Algorithm II)

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η ανάδειξη της σπουδαιότητας και αποδοτικότητας του νέου αυτού αλγορίθμου αλλά και της υπεροχής του έναντι άλλων δημοφιλών πολυκριτηριακών αλγορίθμων. Η σύγκριση θα γίνει πάνω στη δοκιμαστική σουίτα συναρτήσεων Van Veldhuizen, με τη βοήθεια της μεθόδου του υπερόγκου (Hypervolume) [18] και του δείκτη συνεισφοράς (CR) [14].

6.3.1 Καθορισμός παραμέτρων των αλγορίθμων και ανάλυση μεθόδου σύγκρισης

Ο ASMA τέθηκε υπό εξέταση και σύγκριση με τους τρεις, ίσως, πιο δημοφιλείς πολυκριτηριακούς αλγορίθμους βελτιστοποίησης των τελευταίων ετών. Αυτοί είναι ο SPEA-II, ο NSGA-II και ο PESA-II, οι οποίοι αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 5. Ο σκοπός της σύγκρισης αυτής είναι να επισημάνει την ικανότητα του αλγορίθμου ASMA να συγκλίνει στο βέλτιστο μέτωπο Pareto με πολύ λιγότερες κλήσεις της συνάρτησης κόστους (function calls) απ' ό,τι οι υπόλοιποι αλγόριθμοι. Για τον λόγο αυτό η διαδικασία της σύγκρισης ξεκίνησε με έλεγχο αρχικά μόνο του αλγορίθμου ASMA, με σκοπό να καταμετρηθούν τα function calls που χρειάστηκαν, ώστε ο αλγόριθμος να προσεγγίσει το βέλτιστο μέτωπο Pareto που υποδεικνύεται από κάθε ένα από τα επτά προβλήματα αναφοράς MOP. Στη συνέχεια, οι υπόλοιποι αλγόριθμοι προσαρμόστηκαν έτσι ώστε να τρέξουν για τόσους κύκλους όσους θα χρειαστούν για να φτάσουν τις κλήσεις της συνάρτησης κόστους που τέθηκε ως κατώτατο όριο από τον αλγόριθμο ASMA.

Οι παράμετροι που καθορίστηκαν για κάθε έναν από τους αλγορίθμους φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Παράμετρος\Αλγόριθμος	ASMA	SPEA-II	NSGA-II	PESA-II
Μέγεθος πληθυσμού	35	35	100	35
Μέγεθος αρχείου	100	100	-	100

Πίνακας 6.1: Μέγεθος πληθυσμού και αρχείου για κάθε πολυκριτηριακό αλγόριθμο που μελετάται

Όπως φαίνεται και στον πίνακα 6.1, ο αλγόριθμος NSGA-II έχει μέγεθος πληθυσμού ίσο με το μέγεθος των αρχείων των υπόλοιπων αλγορίθμων. Αυτό γίνεται λόγω της φύσης του αλγορίθμου NSGA-II, καθώς δεν περιέχει κάποιο εξωτερικό αρχείο στο οποίο διατηρεί τις μη-κυριαρχούμενες λύσεις αλλά ανανεώνει συνεχώς μια λίστα, η οποία περιέχει ταξινομημένα τα επίπεδα μη-κυριαρχίας, όπως εξηγείται αναλυτικά στην ενότητα 5.4. Για τον λόγο αυτό δεν μπορέσαμε να πετύχουμε ακριβώς ίδιο αριθμό function calls με τους υπόλοιπους αλγορίθμους και έτσι αφήσαμε τον NSGA-II να κάνει περισσότερες κλήσεις από όσες καθορίστηκαν με βάση τον ASMA. Αυτό δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, καθώς η απόδοση του συγκεκριμένου αλγορίθμου για τις παραμέτρους αυτές είναι αρκετά μικρή. Ο αριθμός των κύκλων που εκτελούν οι SPEA-II και PESA-II είναι διπλάσιος από τους κύκλους που εκτελεί ο ASMA, καθώς εσωτερικά του

αλγορίθμοι υπάρχουν δύο φάσεις ελέγχου και αναζήτησης νέων λύσεων. Αν είχαμε τους ίδιους κύκλους σε αυτούς τους τρεις αλγορίθμους τότε ο αριθμός των function calls του ASMA θα ήταν διπλάσιος από των υπόλοιπων. Δεδομένου ότι η σύγκριση βασίζεται στον ίδιο αριθμό αυτών των κλήσεων έπρεπε να καθοριστούν διαφορετικές παράμετροι σε αυτό το σημείο, όπως έγινε και με την NSGA-II.

Οι υπόλοιπες παράμετροι που αποδόθηκαν στους υπόλοιπους αλγορίθμους είναι αυτές που προτείνονται από τις αρχικές μελέτες, όπως περιγράφεται στα [17], [20] και [21]. Συνεπώς, σε όλους τους αλγορίθμους χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά διανύσματα, όχι δυαδικά, και οι πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης (crossover and mutation probabilities) τέθηκαν ως 0.7 και 0.3 αντίστοιχα. Όπως δόθηκε και νωρίτερα, οι συντελεστές της εξίσωσης εύρεσης επόμενης της διαφορικής εξέλιξης, F_1 και F_2 ορίστηκαν ως 0.5 και 0.5 αντίστοιχα.

6.3.2 Αποτελέσματα σύγκρισης αλγορίθμων και συμπεράσματα

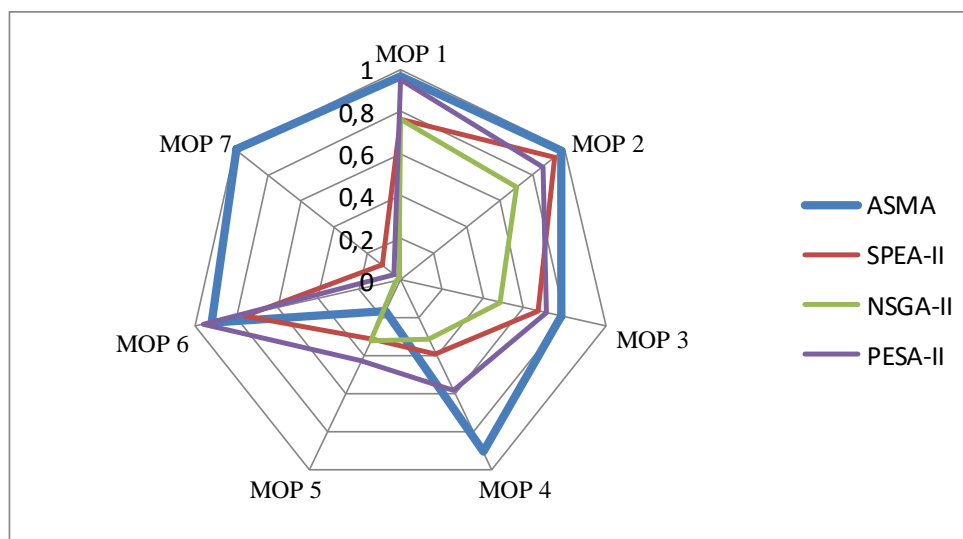
Όπως είδαμε και νωρίτερα, ο ASMA περιέχει στη φάση των μελισσών-θεατών την ταξινόμηση κατά SPEA, όπως αυτή δίνεται από τον αλγόριθμο του SPEA-II. Αυτό σημαίνει πως η ταξινόμηση κατά SPEA-II αυξάνει την πολυπλοκότητα και τον χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου, καθώς καλείται όσες φορές εκτελείται και η φάση των μελισσών-θεατών, δηλαδή φορές ίσες με τον πληθυσμό του αλγορίθμου. Αυτό καθιστά σαφές πως ο ASMA δεν εστίασε στη μείωση της πολυπλοκότητας ή του χρόνου εκτέλεσης αλλά στη δημιουργία του βέλτιστου μετώπου Pareto. Αυτό στην εφαρμογή που εξετάζουμε είναι πλήρως αποδεκτό, καθώς η κλήση της συνάρτησης κόστους, κάθε φορά μέσα στον αλγόριθμο, προϋποθέτει την κλήση του προγράμματος ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων FEMM, κάτι που από μόνο του αυξάνει κατά πολύ τον χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου. Η κλήση του FEMM λοιπόν υπερκαλύπτει τον χρόνο εκτέλεσης, συγκριτικά με τον χρόνο εκτέλεσης NP ταξινομήσεων κατά SPEA. Η εξέταση των αλγορίθμων γίνεται βάσει της λογικής εύρεσης βέλτιστης γεωμετρίας κινητήρα, κάτι που από μόνο του είναι μια χρονοβόρα διαδικασία, συνεπώς δεν θα σταθούμε καθόλου ούτε στην πολυπλοκότητα αλλά ούτε και στον χρόνο εκτέλεσης των αλγορίθμων.

Για να καθοριστεί μέσω του υπερόγκου ο δείκτης συνεισφοράς κάθε αλγορίθμου στο τελικό βέλτιστο Pareto, οι αλγόριθμοι εκτελέστηκαν τριάντα φορές για κάθε δοκιμαστική συνάρτηση. Τα τελικά μέτωπα αποθηκεύονταν κάθε φορά και υπολογίστηκε για κάθε ένα ο υπερόγκος τους. Για κάθε μία από τις τριάντα εκτελέσεις και για κάθε έναν από τους αλγορίθμους που εξετάζουμε, υπολογίστηκε ο δείκτης συνεισφοράς. Στον παρακάτω πίνακα δίνεται ο μέσος όρος των δεικτών συνεισφοράς από τις τριάντα εκτελέσεις για κάθε έναν από τους τέσσερις ανταγωνιζόμενους αλγορίθμους.

	ASMA	SPEA-II	NSGA-II	PESA-II
MOP 1	0.97	0.76	0.76	0.95
	315	315	430	315
MOP 2	0.98	0.93	0.70	0.86
	595	595	650	595
MOP 3	0.78	0.67	0.48	0.71
	385	385	430	385
MOP 4	0.91	0.39	0.31	0.58
	735	735	760	735
MOP 5	0.17	0.31	0.32	0.43
	1435	1435	1530	1435
MOP 6	0.92	0.76	0.02	0.96
	385	385	430	385
MOP 7	0.99	0.11	0.01	0.04
	735	735	980	735

Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα σύγκρισης αλγορίθμων με βάση τον δείκτη συνεισφοράς, CR. Σε κάθε κελί δίνεται πάνω ο δείκτης CR και κάτω ο αριθμός των call functions που εκτελέστηκαν.

Όπως φαίνεται και από τον πίνακα των αποτελεσμάτων, ο αλγόριθμος που εξετάζουμε έχει την καλύτερη απόδοση σε πέντε από τις επτά δοκιμαστικές συναρτήσεις, στην MOP 6 έρχεται λίγο πίσω σε απόδοση απ' ό,τι η PESA-II ενώ μόνο σε μία φαίνεται να έχει τη χειρότερη απόδοση. Η MOP 5 και η MOP 7 είναι δύο τρισδιάστατες συναρτήσεις, αρκετά πολύπλοκες σε σχέση με τις πρώτες, ενώ η MOP 6 είναι μία επίσης πολύπλοκη συνάρτηση δύο, όμως, διαστάσεων. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται παραστατικά η απόδοση των αλγορίθμων σε κάθε test function. Βλέπουμε πως στο μεγαλύτερο κομμάτι του διαγράμματος ο ASMA υπερισχύει των υπόλοιπων αλγορίθμων εκτός της συνάρτησης MOP5 που καταλαμβάνει την τελευταία θέση στη σύγκριση.



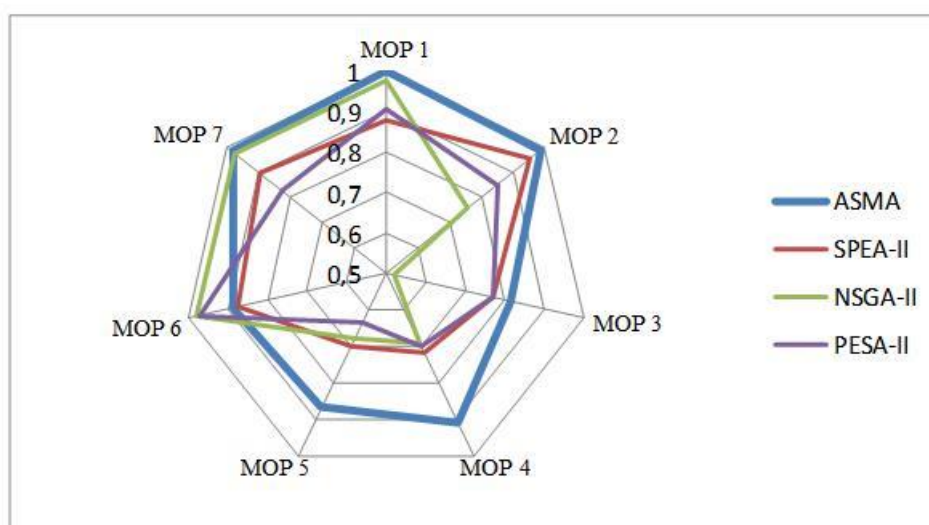
Σχήμα 6.5: Συγκριτικό διάγραμμα απόδοσης των αλγορίθμων σε κάθε test function της σουίτας Van Veldhuizen

Αυτό που παρατηρήσαμε κατά τη σύγκριση των αλγορίθμων είναι πως ο ASMA έχει την ικανότητα να συγκλίνει πολύ γρήγορα στην περιοχή των σημείων του τελικού μετώπου, και για τον λόγο αυτό βελτιστοποιεί πολύ γρήγορα και τη μορφή αλλά και την ποικιλία των σημείων του. Δεν σπαταλώνται λοιπόν πολύτιμοι κύκλοι για την εύρεση της περιοχής του

μετώπου, γίνεται καλύτερη αναζήτηση σημείων γύρω από τα ήδη υπάρχοντα και φτάνουμε σε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα.

	ASMA	SPEA-II	NSGA-II	PESA-II
MOP 1	0.0027	0.1222	0.0229	0.0954
MOP 2	0.0126	0.0494	0.2445	0.1504
MOP 3	0.1871	0.2300	0.48	0.2307
MOP 4	0.0923	0.2806	0.31	0.3009
MOP 5	0.1319	0.2975	0.32	0.3659
MOP 6	0.1130	0.1243	0.02	0.0292
MOP 7	0.0156	0.1013	0.0249	0.1723

Πίνακας 6.3: Τυπική απόκλιση του δείκτη συνεισφοράς για τις 30 δοκιμές των αλγορίθμων

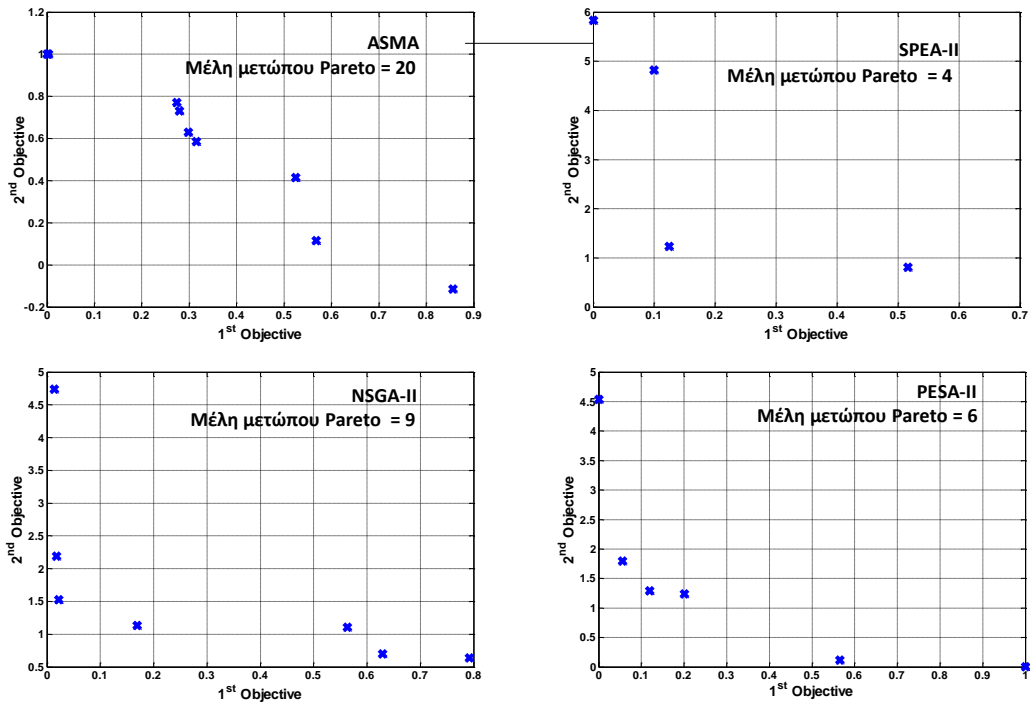


Σχήμα 6.6: Συγκριτικό διάγραμμα της τυπικής απόκλισης του CR των αλγορίθμων για κάθε test function της σουίτας Van Veldhuizen

Στον πίνακα 6.3 δίνεται η τυπική απόκλιση του δείκτη συνεισφοράς για το δείγμα των τριάντα επαναλήψεων που εκτελέστηκαν για την εξαγωγή του. Βλέπουμε πως ο ASMA έχει μικρότερη τυπική απόκλιση σε έξι από τις επτά δοκιμαστικές συναρτήσεις, το οποίο αναδεικνύει πως ο ASMA είναι ένας αλγόριθμος με σταθερή απόδοση σε σχέση με άλλους τρεις. Η μικρή τυπική απόκλιση πρακτικά σημαίνει πως σε κάθε επανάληψη από τις τριάντα ο δείκτης συνεισφοράς είναι πολύ κοντά στο μέσο όρο του δείγματος, δίνοντας έτσι μια πολύ καλή προσέγγιση της πραγματικής τιμής του CR. Παραστατικό διάγραμμα των τυπικών αποκλίσεων των αλγορίθμων δίνεται στο σχήμα 6.6¹.

Στα παρακάτω σχήματα γίνεται μια προσπάθεια απεικόνισης αυτού που μόλις ειπώθηκε. Ότι δηλαδή το μεγάλο πλεονέκτημα του ASMA είναι ότι βρίσκει άμεσα τη θέση του βέλτιστου μετώπου.

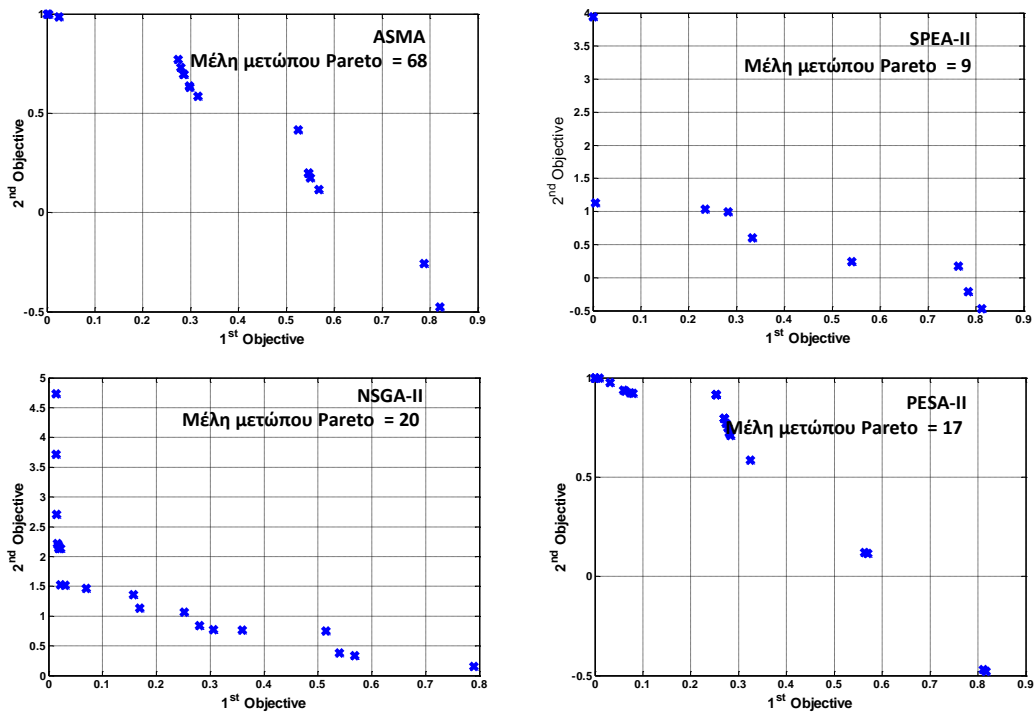
¹ Στο σχήμα 6.6 οι τιμές του διαγράμματος είναι δείκτες της τυπικής απόκλισης και όχι οι τυπικές αποκλίσεις των



Σχήμα 6.7: Μέτωπο Pareto από τον πρώτο κύκλο λειτουργίας του ASMA και τον δεύτερο κύκλο λειτουργίας των άλλων αλγορίθμων για τη δοκιμαστική συνάρτηση MOP 6.

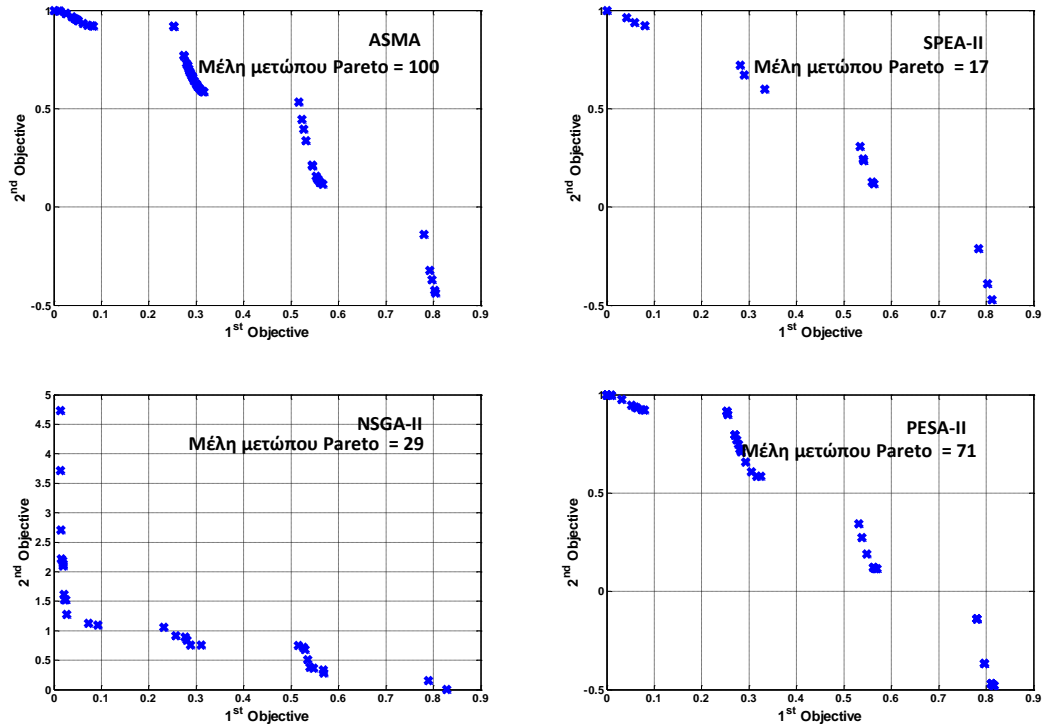
Στο παραπάνω σχήμα δίνονται οι πρώτες επαναλήψεις των αλγορίθμων για τη δοκιμαστική συνάρτηση MOP 6. Όπως έχουμε αναφέρει και νωρίτερα, ο αριθμός των κύκλων που κάνει κάθε αλγόριθμος εξαρτάται από τις κλήσεις της συνάρτησης κόστους που γίνονται σε κάθε επανάληψη. Λόγω του ότι ο ASMA περιέχει δύο φάσεις αναζήτησης, εκτελεί τις μισές επαναλήψεις απ' ό,τι ο SPEA-II και ο PESA-II, ενώ ο NSGA-II εκτελεί τόσες επαναλήψεις όσες χρειάζονται για να ξεπεράσει τις κλήσεις της συνάρτησης κόστους των άλλων τριών. Για τον λόγο αυτό σαν αρχική επανάληψη δίνεται η πρώτη από τους ASMA και NSGA-II και η δεύτερη από τους SPEA-II και PESA-II.

Όπως παρατηρούμε και στο σχήμα, ο ASMA στην πρώτη επανάληψη έχει μεγαλύτερο πλήθος ατόμων στο μέτωπο Pareto σε σύγκριση με τους άλλους τρεις. Επίσης, παρατηρούμε πως δεδομένης της συνάρτησης που προσπαθούμε να βελτιστοποιήσουμε μόνο ο ASMA και ο SPEA-II έχουν από την αρχή εστιάσει στη σωστή περιοχή. Θα δούμε βέβαια και στην πορεία ότι ο SPEA-II δεν θα βελτιώσει κατά πολύ το μέτωπο αυτό.



Σχήμα 6.8: Τρίτη επανάληψη αλγορίθμου ASMA και πέμπτη επανάληψη των υπολοίπων για την δοκιμαστική συνάρτηση MOP6

Στο σχήμα 6.8 φαίνεται λίγο πιο ξεκάθαρα η κυριαρχία του ASMA. Έχουμε σαφώς περισσότερα μέλη στο μέτωπο Pareto και πολύ πιο ξεκάθαρη μορφή σε σχέση με τους άλλους αλγορίθμους. Ο SPEA-II και ο NSGA-II δεν έχουν καταφέρει ακόμα να βρουν αρκετά μη-κυριαρχούμενα σημεία στο μέτωπό τους, ώστε να μπορούν να συναγωνιστούν τους άλλους δύο. Και τέλος, στο σχήμα 6.9 έχουμε το τελικό μέτωπο που δίνει ως έξοδο ο κάθε αλγόριθμος.



Σχήμα 6.9: Έξοδος αλγορίθμων. Τελικά μέτωπα για τη συνάρτηση MOP 6.

Καθίσταται λοιπόν σαφές πως το CR αντιπροσωπεύει σε μεγάλο βαθμό τη συνεισφορά του εκάστοτε μετώπου στο πραγματικό τελικό μέτωπο. Στην MOP 6 μεγαλύτερο CR έχει ο ASMA ενώ ο PESA-II έρχεται δεύτερος αλλά με πολύ μικρή διαφορά. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 6.9, όπου βλέπουμε πως και οι δύο αλγόριθμοι έχουν πάρει την επιθυμητή μορφή με τον ASMA να είναι καλύτερα κατανεμημένος απ' ό,τι ο PESA-II και επίσης ο πρώτος εμφανίζεται έχοντας όλα τα σημεία του μετώπου του καλυμμένα. Ο ASMA λοιπόν κατάφερε να βρει εκατό μη-κυριαρχούμενες λύσεις και να γεμίσει το μέτωπο, εν αντιθέσει με τον PESA-II που έμεινε μόνο στα 71 μέλη. Για τους λόγους αυτούς ο δείκτης CR του ASMA είναι ελαφρώς καλύτερος από του PESA-II. Οι άλλοι δύο αλγόριθμοι δεν κατάφεραν να σχηματίσουν σε μεγάλο βαθμό το απαιτούμενο μέτωπο και κυρίως ο NSGA-II, ο οποίος έμεινε στα επτά μέλη και χωρίς να βρει και τις τέσσερις θέσεις στις οποίες αναπτύσσονται τα σημεία της ασυνεχούς δοκιμαστικής συνάρτησης MOP 6.

Μετά τη σύγκριση των αλγορίθμων και την παράθεση των αποτελεσμάτων, καταλήγουμε στο ότι ο ASMA έχει πολύ καλές επιδόσεις σε απλές αλλά και πολύπλοκες συναρτήσεις κόστους. Ειδικότερα, από τη σουίτα Van Veldhuizen επικρατεί ως προς τον δείκτη συνεισφοράς στο μέτωπο Pareto στις πέντε από τις επτά δοκιμαστικές συναρτήσεις, σε μία είναι δεύτερη με πολύ μικρή διαφορά και μόνο σε μία χάνει ολοκληρωτικά. Ο ASMA προέκυψε από έναν καθαρά μονοκριτηριακό αλγόριθμο βελτιστοποίησης, τον ABC, προσαρμόζοντάς τον έτσι ώστε να μπορεί να κάνει ταξινόμηση με βάση τις μεθόδους της SPEA-II. Έτσι, αναπτύχθηκε ένας άκρως αποτελεσματικός αλγόριθμος που μπορεί μέσα σε λίγες επαναλήψεις να δώσει αποτελέσματα πολύ κοντά στα βέλτιστα. Βέβαια, λόγω της μεγάλης του πολυπλοκότητας κατά τη διάρκεια των δοκιμών στη σύγκριση φάνηκε ότι είναι αρκετά αργός, αλλά όπως έχουμε αναφέρει αρκετές φορές μέχρι τώρα, λόγω της κλήσης του προγράμματος FEMM, η χρονική εκτέλεση του αλγορίθμου αυξάνεται δραματικά. Αν σε όλους τους αλγόριθμους δίναμε το πρόβλημα βελτιστοποίησης της γεωμετρίας του κινητήρα που δώσαμε νωρίτερα, όλοι θα έδιναν αποτελέσματα σε κάποιες μέρες και θα σταματούσαν με διαφορά κάποιων λεπτών. Όπως φαίνεται, λοιπόν, για τη δική μας εφαρμογή είναι ανούσιο να μιλάμε για ταχύτητα και πολυπλοκότητα και μας ενδιαφέρει μόνο η εύρεση ενός

αλγόριθμου που θα μπορεί σε λίγες επαναλήψεις να δώσει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Και για αυτόν τον λόγο αναπτύχθηκε ο ASMA.

Κεφάλαιο 7: Σχεδίαση κινητήρα επιφανειακών μονίμων μαγνητών και βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του

7.1 Μοντελοποίηση κινητήρα «Πυρφόρου II»

Σύμφωνα με προηγούμενη διπλωματική που εκπονήθηκε στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος του ΕΜΠ [21], τα παραπάνω έχουν ληφθεί υπόψιν για την κατασκευή του κινητήρα του «Πυρφόρου II».

7.1.1 Χαρακτηριστικά κινητήρα «Πυρφόρου II»

Με τη μέση ταχύτητα του οχήματος, για τις ανάγκες του αγώνα, στα 25km/h (6.95m/s), και με την ακτίνα του κινητήριου τροχού να είναι $r = 0.239\text{m}$, η ταχύτητα περιστροφής του in-wheel κινητήρα υπολογίζεται ως εξής:

$$\omega_m = \frac{v_{mean}}{r} = \frac{6.95 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.239\text{m}} = 29.1\text{rad/s} \quad \text{Εξ 7.1}$$

και οι ονομαστικές στροφές της μηχανής υπολογίζονται ως:

$$n = \frac{\omega_m \cdot 60}{2\pi} = \frac{29.1 \cdot 60}{2\pi} = 278 \text{rpm} \quad \text{Εξ 7.2}$$

Η ονομαστική ισχύς του κινητήρα τώρα αποτελεί το γινόμενο της επιθυμητής απόδοσης ροπής επί την γωνιακή ταχύτητα στρέψης του δρομέα:

$$P_{el} = T_{el} \cdot \omega_m = 7.5Nm \cdot 29.1 \frac{rad}{s} = 218.25W \cong 220W \quad \text{Εξ 7.3}$$

Βάσει των θεωρητικών σχέσεων που δόθηκαν νωρίτερα και με δεδομένη τη μέση μαγνητική φόρτιση που λαμβάνεται στο διάκενο, $\bar{B} = 0.5T$, εφόσον έχουμε εφαρμογή απαιτούμενης υψηλής απόδοσης, υπολογίστηκε μετά από δοκιμές πως η διάμετρος του διακένου, D , και το ενεργό μήκος της μηχανής, L , θα έχουν τις εξής τιμές:

$$D = 110 \text{ mm}$$

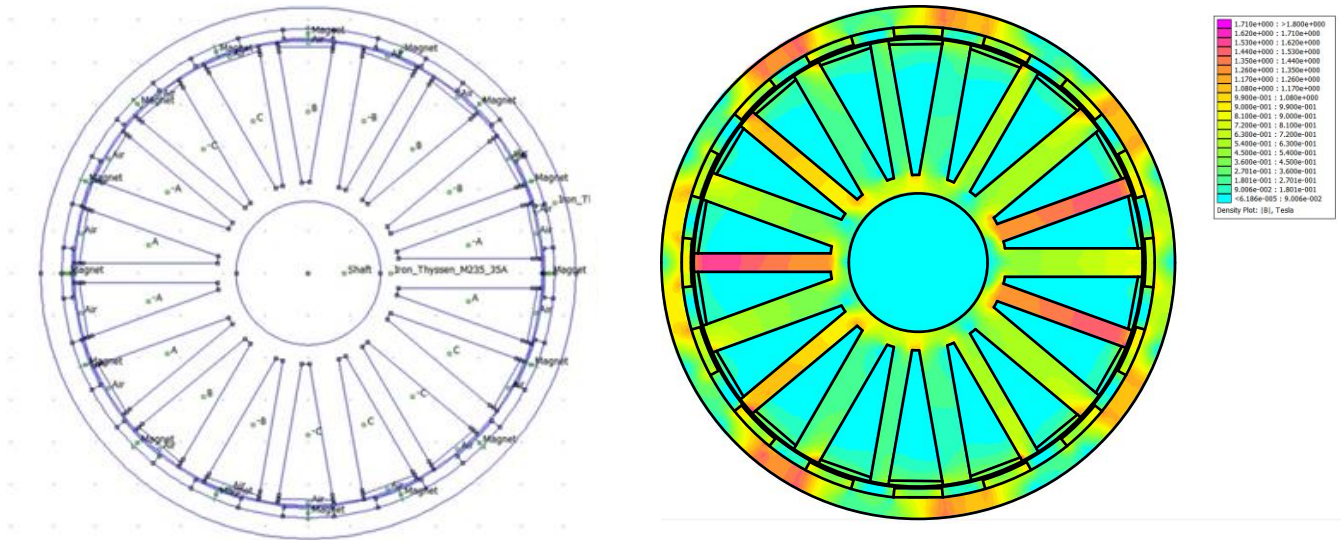
$$L = 37 \text{ mm}$$

Το πλάτος του διακένου τίθεται στα $g = 0.7 \text{ mm}$, καθώς η τιμή αυτή εκτιμάται πως είναι η ελάχιστη που μπορεί να επιτευχθεί κατά την κατασκευή και ταυτόχρονα να εξασφαλίζει την αξιόπιστη λειτουργία του κινητήρα.

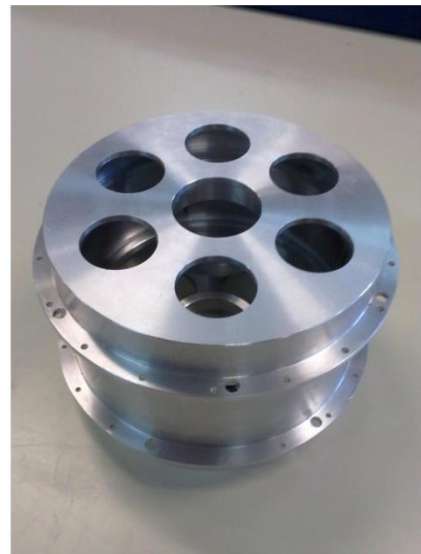
Για την επιλογή της ονομαστικής συχνότητας υπολογίστηκε ο λόγος P/f_{el} στα 0,432 με βάση τη γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα. Επιλέχθηκε με βάση τον λόγο αυτό μια συχνότητα στα 37Hz, κάτι το οποίο συνεπάγεται 16 πόλους στη μηχανή. Έτσι διατηρείται μια σχετικά μικρή συχνότητα που θα επιτρέψει και τον περιορισμό των απωλειών και ένας αριθμός πόλων που δεν απαιτεί ιδιαίτερο κόπο κατά την κατασκευή. Στο [21] με βάσει τα δεδομένα αυτά έγινε μια ανάλυση και ένας υπολογισμός της ροής, των ρευμάτων και της ΜΕΔ, τέτοια ώστε να επιτρέψουν τον καθορισμό της διατομής κάθε αύλακας του στάτη, συνυπολογίζοντας τη μέγιστη πυκνότητα ρεύματος που επιτρέπει η έλλειψη εξαναγκασμένης ψύξης και συντελεστή αξιοποίησης της αύλακας ίσο με 0.5. Επίσης, υπολογίστηκαν οι ειδικές ηλεκτρικές και μαγνητικές φορτίσεις, όπως αναλύθηκε νωρίτερα, και το επόμενο βήμα ήταν η μελέτη του δρομέα της μηχανής. Επιλέχθηκε σχεδίαση δρομέα επιφανειακών μαγνητών, λόγω των μικρών απωλειών πυρήνα, και μαγνήτες από κράματα Νεοδυμίου-Σιδήρου-Βορίου (NdFeB), γιατί δίνουν μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας από τις υπόλοιπες εναλλακτικές, καθώς και μέτρια θερμοκρασιακή συμπεριφορά.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, επιλέχθηκε τύλιγμα συγκεντρωμένο, μη επικαλυπτόμενο, μονής στρώσης λόγω των πλεονεκτημάτων που αναφέραμε πως παρουσιάζει νωρίτερα. Τελευταίο βήμα ανάλυσης ήταν η επιλογή αριθμού αυλάκων και πόλων. Για να μπορεί η μηχανή να αναπτύξει ταχύτητα περίπου στις 300 ΣΑΛ, ο αριθμός των πόλων της πρέπει να είναι μεταξύ 8 και 22. Για το εύρος αυτό ο αριθμός αυλάκων πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 6 και 36. Για τον προσδιορισμό του κατάλληλου συνδυασμού έγιναν διάφορες δοκιμές στο FEMM και επιλέχθηκε εν τέλει ο συνδυασμός 16 πόλοι/18 αύλακες.

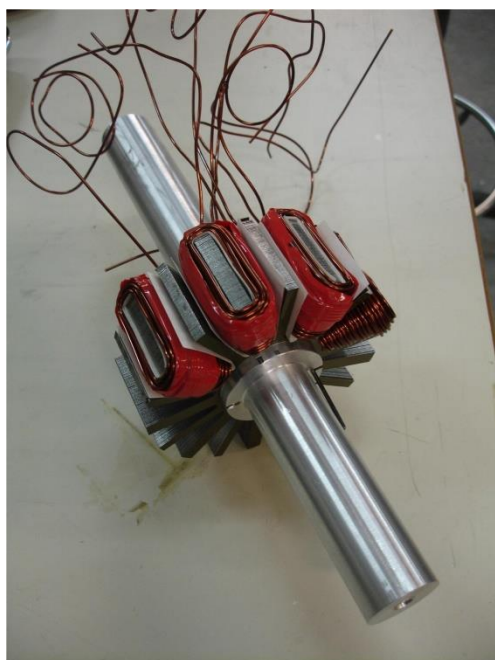
Σύμφωνα με το [21] έγιναν πολυάριθμες αναλύσεις και επιλέχθηκαν διάφορες λεπτομέρειες σχεδιασμού με σκοπό τη βελτίωση της επίδοσης και απόδοσης του κινητήρα. Για την όσο δυνατόν μεγαλύτερη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της μηχανής αυτής, προχώρησαν και σε ανάλυση ευαισθησίας, η οποία του έδωσε τη δυνατότητα να καταλήξει στο ακόλουθο σχέδιο.



Σχήμα 7.1: Σχέδιο κινητήρα «Πυρφόρου II»



Σχήμα 7.2: Εικόνες από την κατασκευή του κινητήρα του «Πυρφόρου II» Αριστερά: φαίνονται οι μαγνήτες στον δρομέα της μηχανής. Δεξιά: Κλειστό το κέλυφος του κινητήρα του «Πυρφόρου II»



Σχήμα 7.3: Εικόνες από το στάτη του κινητήρα. Φαίνεται η διαμόρφωση των τυλιγμάτων πάνω στις αύλακες του στάτη.

Μεταβλητή	Τιμή
Ποσοστό γωνίας μαγνήτη επί του πολικού βήματος	60 %
Ποσοστό ανισότητας μεταξύ των δοντιών του στάτη	65%
Πάχος μεγάλου δοντιού στο στάτη	7 mm
Πάχος μαγνήτη	2,25 mm
Πάχος δρομέα	5 mm
Ακτίνα διάκενου	55 mm
Ενεργό μήκος μηχανής	35 mm

Πίνακας 7.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά παραμετροποιημένης σχεδίασης

Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του κινητήρα αυτού φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Λειτουργικά χαρακτηριστικά	Ονομαστικά χαρακτηριστικά λειτουργίας κινητήρα
Μέγιστη ροπή	7.33 Nm
Κυμάτωση ροπής	4.58 %
Αρμονική παραμόρφωση (THD)	6.18 %
Ρεύμα γραμμής	7.1 A
Απώλειες σιδήρου	1.54 W
Απώλειες χαλκού	45.27 W

Πίνακας 7.2: Λειτουργικά χαρακτηριστικά κινητήρα «Πυρφόρου II»

Με βάση αυτά τα λειτουργικά θα διαμορφωθούν και οι συναρτήσεις κόστους στις βελτιστοποιήσεις των επόμενων κεφαλαίων.

Στην παρούσα εργασία, ωστόσο, μας ενδιαφέρει περισσότερο μια γενικότερη προσέγγιση αυτού του σχεδίου, καθώς σκοπός είναι όχι να γίνει περαιτέρω ανάλυση ευαισθησίας αλλά να βελτιστοποιηθεί το σχέδιο αυτό με βάση συγκεκριμένους αλγορίθμους βελτιστοποίησης. Η προσέγγιση που θα προσπαθήσουμε να κάνουμε εμείς θα δώσει μια ευρύτερη εικόνα μιας πιθανά καλύτερης περιοχής μεγεθών γεωμετρίας που θα μας επιτρέψει να αυξήσουμε την απόδοση και την επίδοση του κινητήρα. Η ανάλυση ευαισθησίας έχει το

μειονέκτημα ότι μπορεί το βέλτιστο το οποίο αγγίζουμε να είναι τοπικό, καθώς οι αλλαγές που γίνονται στη γεωμετρία είναι αρκετά μικρές ώστε να αλλάξει εξ ολοκλήρου η σχεδίαση του κινητήρα.

Για να ξεκινήσει η βελτιστοποίηση πρέπει να δημιουργηθεί λοιπόν σε κώδικα matlab ένα σχέδιο κινητήρα πάνω σε αυτά τα χαρακτηριστικά.

7.1.2 Σχεδίαση κινητήρα και επεξεργασία αποτελεσμάτων

Κατά τη σχεδίαση μιας μηχανής κρίνεται απαραίτητη η παραμετροποίησή της. Επιλέγεται ένα πλήθος ανεξάρτητων μεταβλητών σχεδίασης και έπειτα όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές εκφράζονται συναρτήσει των ανεξάρτητων. Για την παρούσα εργασία αναπτύχθηκαν κομμάτια κώδικα τα οποία δίνουν τη δυνατότητα δημιουργίας μιας μηχανής επιφανειακών μονίμων μαγνητών εξωτερικού δρομέα με συγκεντρωμένα τυλίγματα κλασματικής αύλακας. Ο κώδικας μας επιτρέπει να είμαστε ευέλικτοι ως προς τις λεπτομέρειες της γεωμετρίας, δηλαδή επιλογή διαφορετικού αριθμού πόλων και αυλάκων, επιλογή για ίσα και άνισα δόντια στον στάτη, διαφορετικοί συνδυασμοί γεωμετρικών μεταβλητών σε όλες τις ανεξάρτητες παραμέτρους, αρκεί να μην τίθεται πρόβλημα γεωμετρίας, επιλογή δημιουργίας πέλματος σε κάθε δόντι και δυνατότητα δημιουργίας αυλάκων μονής ή διπλής στρώσης. Αυτή η ευελιξία στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά είναι απαραίτητη για την είσοδο του κώδικα σχεδίασης και ανάλυσης της μηχανής σε αλγόριθμο βελτιστοποίησης.

Μετά την αρχική σχεδίαση της μηχανής, ορίζονται τα υλικά για κάθε κομμάτι σχεδίασης καθώς επίσης εισάγεται η οριακή συνθήκη Dirichlet και τα ρεύματα στις φάσεις.

7.1.2.1 Υπολογισμός μέσης ροπής και κυμάτωσης ροπής

Για τον υπολογισμό και την εξαγωγή της κυματομορφής της ροπής αρχικά υπολογίζεται η βέλτιστη γωνία ροπής. Λόγω της μαγνητοστατικής φύσης του προβλήματος αυτός ο υπολογισμός ανάγεται ουσιαστικά στην εύρεση της επιθυμητής γωνίας εκκίνησης. Αυτός ο καθορισμός γίνεται θεωρώντας εκ των προτέρων ένα στιγμιότυπο τριφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος κατά το οποίο συνήθως έχουμε μέγιστο ρεύμα στη φάση A και μισό κατά μέτρο και αρνητικό στις φάσεις B και C. Στη συνέχεια στρέφουμε τον δρομέα βηματικά για λίγες μοίρες και υπολογίζουμε σε κάθε περιστροφή τη ροπή που αναπτύσσεται. Αυτό επαναλαμβάνεται μέχρι η γωνία περιστροφής να φτάσει στις 45 μηχανικές μοίρες. Η διαδικασία αυτή κρίνεται αναγκαία καθώς στις μηχανές με συγκεντρωμένα τυλίγματα δεν είναι εύκολος ο θεωρητικός προσδιορισμός του σημείου συμμετρίας των τριών φάσεων και του σημείου μέγιστης ΜΕΔ του διάκενου.

Για την υπολογισμό της μέσης ροπής τα ρεύματα ορίστηκαν ως:

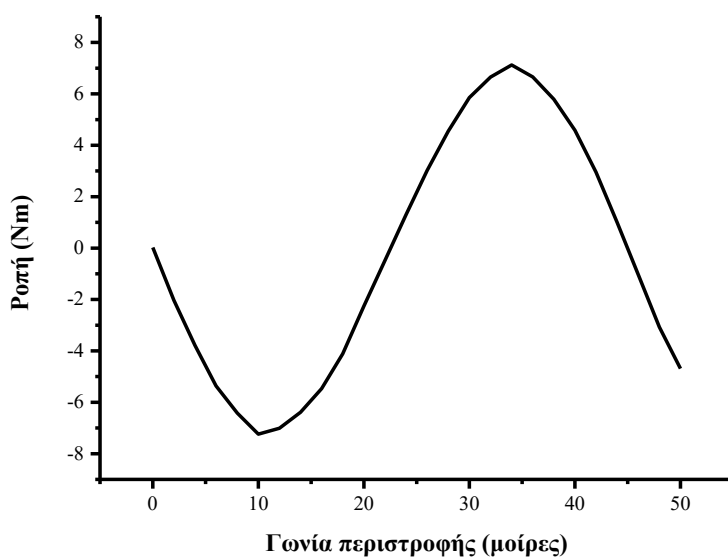
$$J_A = J_{rms} \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t + \theta) \quad \text{Εξ 7.4}$$

$$J_B = J_{rms} \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t + \theta + 2\pi/3) \quad \text{Εξ 7.5}$$

$$J_C = J_{rms} \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t + \theta - 2\pi/3) \quad \text{Εξ 7.6}$$

όπου έχουμε μαγνητοστατική ανάλυση άρα $\theta = 0$ και $\omega t = 0$.

Για την εύρεση της καμπύλης ροπής γίνεται σάρωση για γωνία που αντιστοιχεί σε δύο πόλους της μηχανής (άρα 45° μηχανικές) και μετρίεται η ροπή ανά περιστροφή γωνίας 2°.

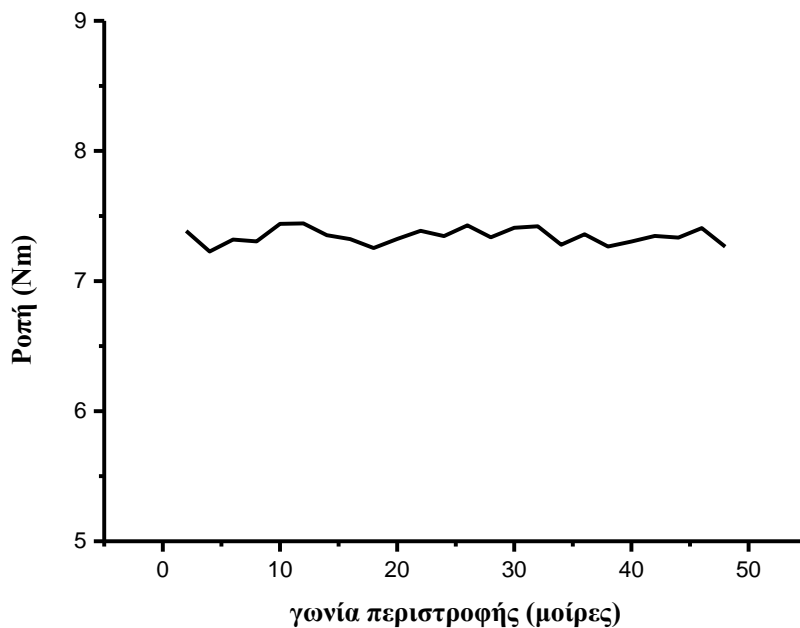


Σχήμα 7.4: Κυματομορφή ροπής σε συνάρτηση με τη μηχανική γωνία περιστροφής

Η κυμάτωση ροπής υπολογίζεται μέσω της επίλυσης μιας σειράς μαγνητοστατικών προβλημάτων όπου ο δρομέας περιστρέφεται όπως ακριβώς πριν, από τη γωνία που ορίστηκε πριν ως γωνία εκκίνησης, αλλά αυτή τη φορά ο δρομέας στρέφεται σύγχρονα με τη συχνότητα των ρευμάτων τα οποία τροφοδοτούν το στάτη, επίσης για ίση γωνία περιστροφής (σε ηλεκτρικές μοίρες με βάση τον τύπο $\theta_e = \frac{P}{2}\theta_m$). Η κυμάτωση ροπής μετά από την εύρεση αυτών των τιμών, υπολογίζεται με βάση τη μέγιστη, την ελάχιστη και τη μέση ροπή από αυτές τις τιμές ως εξής:

$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{mean}} \quad \text{Εξ 7.7}$$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κυμάτωση ροπής όπως εξήχθει από τον κώδικα ανάλυσης της μηχανής:



Σχήμα 7.5: Κυμάτωση ροπής σε συνάρτηση με τη γωνία περιστροφής. Ο δρομέας και τα ρεύματα στρέφονται σύγχρονα με την ίδια γωνία. Ο δρομέας σε μηχανικές μοίρες –οι οποίες απεικονίζονται και στο διάγραμμα- και τα ρεύματα σε ηλεκτρικές.

7.1.2.2 Υπολογισμός επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης (αντι-ΗΕΔ)

Η επαγόμενη αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται στον κινητήρα (αντι-ΗΕΔ) είναι ένα από τα βασικότερα μεγέθη της ανάλυσης, καθώς παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ικανότητα οδήγησης του κινητήρα και στις προδιαγραφές του συστήματος οδήγησης αυτού. Η ποιότητα της επαγόμενης κυματομορφής (αρμονική παραμόρφωση) παίζει επίσης σημαντικό ρόλο καθώς αντικατοπτρίζει την ποιότητα της εξόδου του αλλά και την ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος του δικτύου με το οποίο είναι συνδεδεμένος. Για τον υπολογισμό της αντι-ΗΕΔ γνωρίζουμε πως, όταν ένας αγωγίμος βρόχος διαρρέεται από μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή, τότε σε αυτόν επάγεται μια τάση. Από τον νόμο του Faraday η αναπτυσσόμενη αντι-ΗΕΔ δίνεται από τη σχέση:

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{Εξ 7.8}$$

όπου N ο αριθμός των σπειρών και Φ η μαγνητική ροή. Το αρνητικό πρόσημο οφείλεται στον κανόνα του Lenz σύμφωνα με τον οποίο το αιτιατό αντιτίθεται στο αίτιο. Για το λόγο αυτό ονομάζεται και αντι-ΗΕΔ, δηλαδή η δύναμη αυτή τείνει να μειώσει το αίτιο που την προκάλεσε, την μεταβολή της μαγνητικής ροής στην περίπτωση αυτή. Επειδή όμως δεν υπάρχει κάποια αναλυτική σχέση για τη μαγνητική ροή συναρτήσει του χρόνου καταφεύγουμε στον ορισμό της παραγώγου και έχουμε:

$$e(t) = -N \lim_{h \rightarrow 0} \left(\frac{\Phi(h+t) - \Phi(t)}{h} \right)$$

$$= -N \frac{\Phi(t_2) - \Phi(t_1)}{t_2 - t_1} \quad \text{Εξ 7.9}$$

όπου t_1 και t_2 δύο χρονικές στιγμές που στην περίπτωση μας καθορίζονται από τη μεταβολή της γωνίας δρομέα. Επίσης γνωρίζουμε πως έχοντας την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής μπορούμε να υπολογίσουμε τη χρονική αυτή διαφορά μέσω της σχέσης:

$$dt = t_2 - t_1 = \frac{d\theta}{\omega_r} \quad \text{Εξ 7.10}$$

με $d\theta$ να είναι το βήμα περιστροφής και ω_r η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Έστω ότι ο δρομέας βρίσκεται σε μια θέση k , τότε από την παρακάτω σχέση υπολογίζεται η μαγνητική ροή που επάγεται στη θέση A :

$$\Phi(k) = \sum_{j \in A} \Phi_j(k) - \sum_{j \in A'} \Phi_j(k) \quad \text{Εξ 7.11}$$

Σε κάθε χρονικό στιγμιότυπο που αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη γωνιακή μετατόπιση του δρομέα σε σχέση με τη θέση εκκίνησης, η μαγνητική ροή είναι ίση με το άθροισμα των μαγνητικών ροών των στρώσεων των αυλάκων της αναχώρησης της φάσης A μείον το άθροισμα των μαγνητικών ροών της επιστροφής της. Ο τελικός τύπος υπολογισμού της αντι-ΗΕΔ δίνεται από τον τύπο:

$$e = -N \frac{d\Phi(k)}{d\theta} \omega_r \quad \text{Εξ 7.12}$$

Για την εύρεση της μαγνητικής ροής στη φάση A χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$\Phi_{A^+} = \frac{\bar{A} n^* q^{A^+}}{S_{slot}} \quad \text{Εξ 7.13}$$

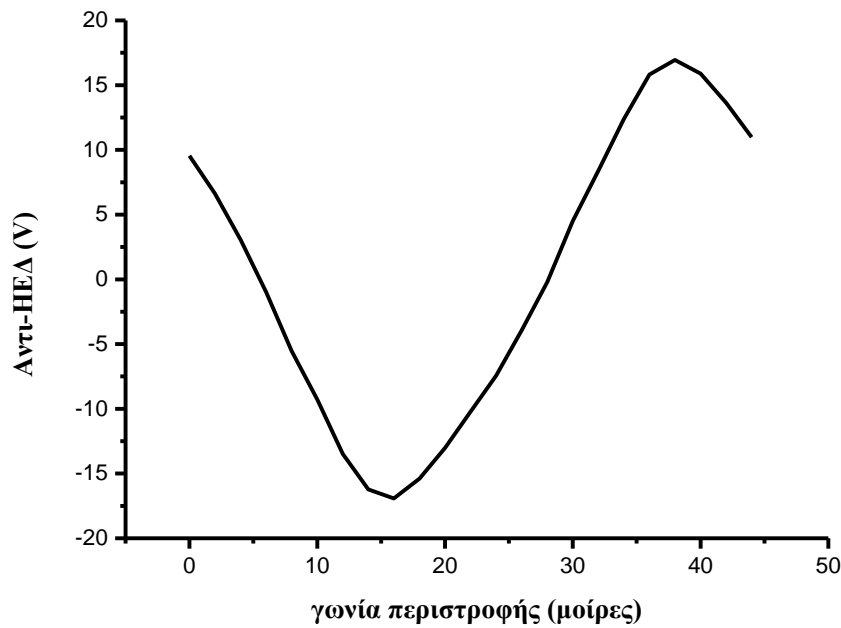
όπου \bar{A} το διανυσματικό δυναμικό το οποίο υπολογίζεται από τις εντολές `luascript`, n^* είναι ο αριθμός των σπειρών, q^{A^+} είναι ο αριθμός αυλάκων ανά φάση και S_{slot} η επιφάνεια της αύλακας. Ο αριθμός των ελιγμάτων στο δόντι υπολογίζεται βρίσκοντας την επιφάνεια της αύλακας που με βάση το fill factor μας δίνει ακριβώς την επιφάνεια που καλύπτεται από χαλκό και διαιρώντας τη με την επιφάνεια της τομής του καλωδίου. Έπειτα υπολογίζεται η ροή και για την επιστροφή της A και προστίθενται σαν μέτρα στην τελική τιμή της ροής της φάσης:

$$\Phi_A = |\Phi_{A^+}| + |\Phi_{A^-}| \quad \text{Εξ 7.14}$$

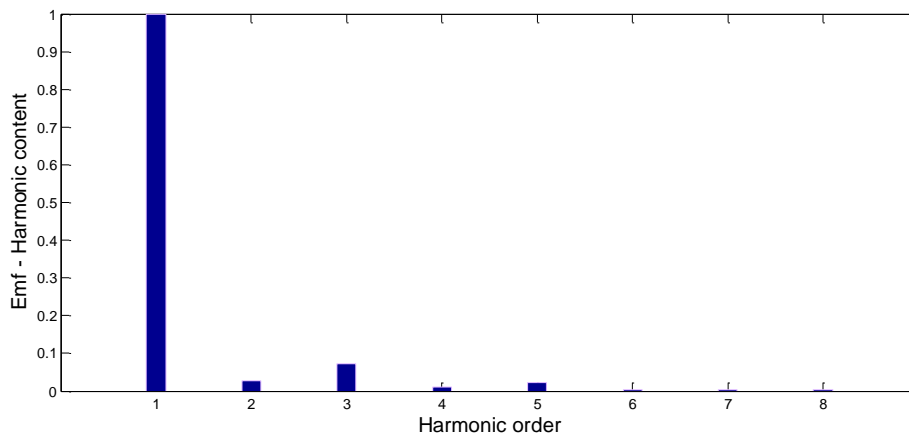
Τέλος από τον τύπο 3.49 και από τον τύπο που δίνει τη γωνιακή περιστροφής έχουμε:

$$e(\theta_m) = - \frac{\Phi_{A_{i+1}} - \Phi_{A_i}}{d\theta} \frac{2\pi n_{rpm}}{60} \quad \text{Εξ 7.15}$$

Με αυτόν τον πίνακα τιμών που δημιουργείται με αυτές τις περιστροφές και την εξαγωγή κάθε φορά του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού, μπορούμε να εξάγουμε την κυματομορφή της αντι-ΗΕΔ, και συνεπώς να βρούμε την ενεργό τιμή της τάσης αλλά και τον συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης (THD) μέσω ανάλυσης Fourier στην κυματομορφή. Το διάγραμμα της αντι-ΗΕΔ όπως προέκυψε από τον κώδικα ανάλυσης της μηχανής έχει ως εξής:



Σχήμα 7.6: Κυματομορφή αντι-ΗΕΔ με μετρήσεις κατά την ταυτόχρονη περιστροφή δρομέα και ρευμάτων



Σχήμα 7.7: Αρμονικό περιεχόμενο αντι - ΗΕΔ έτσι όπως προέκυψε από την ανάλυση Fourier

7.1.2.3 Υπολογισμός απωλειών

Οι απώλειες σε μια μηχανή είναι επίσης ένα σημαντικό μέγεθος στην εκτίμηση της λειτουργίας της αλλά και της καταλληλότητάς της για την εκάστοτε εφαρμογή. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή αναπτύχθηκε κώδικας για αυτοματοποιημένο υπολογισμό απωλειών μέσω της μαγνητοστατικής ανάλυσης, καθώς μας ενδιαφέρει οι τιμές αυτές να είναι προσδιορισμένες με ακρίβεια. Στην παρούσα εργασία υπολογίζονται απώλειες χαλκού και σιδήρου.

Απώλειες χαλκού

Οι απώλειες χαλκού αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό των συνολικών απωλειών της εφαρμογής μας και οφείλονται στις ωμικές απώλειες που εμφανίζονται στα τυλίγματα του στάτη. Ο υπολογισμός τους γίνεται με τον τύπο:

$$P_{\text{χαλκού}} = 3 \cdot I_{\text{ονομαστικό}}^2 \cdot R_{\text{φάσης}} \quad \text{Εξ 7.16}$$

Όπως φαίνεται και από τον τύπο οι απώλειες χαλκού είναι ανάλογες με το τετράγωνο του ονομαστικού ρεύματος και της ωμικής αντίστασης που παρουσιάζει το τύλιγμα της κάθε φάσης. Το ονομαστικό ρεύμα υπολογίζεται ανάλογα με τη γεωμετρία της μηχανής κάθε φορά, καθώς εξαρτάται από το fill factor, την επιφάνεια της αύλακας A_{slot} αλλά και τον αριθμό των ελιγμάτων στην αύλακα, N . Δεδομένης λοιπόν μιας πυκνότητας ρεύματος (ενεργός τιμή) ισχύει το εξής:

$$I_{\text{ονομαστικό}} = \frac{J \cdot ff \cdot A_{\text{slot}}}{N} \quad \text{Εξ 7.17}$$

Επόμενο βήμα στον κώδικά μας είναι ο υπολογισμός της ωμικής αντίστασης που παρουσιάζει ο αγωγός ανά φάση. Αυτό το μέγεθος εξαρτάται από το μήκος του αγωγού σε κάθε φάση, τη διατομή του καλωδίου και φυσικά τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Όπως αναφέρεται στο [11] ο τύπος που δίνει την αντίσταση ενός αγωγού εξαρτώμενος από τις μεταβολές θερμοκρασίας είναι ο εξής:

$$R_{\text{αγωγού}} = \rho(T) \cdot \frac{l}{S} \quad \text{Εξ 7.18}$$

Όπου l είναι το μήκος του καλωδίου, S είναι η διατομή του και $\rho(T)$ η εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία ειδική αντίσταση του χαλκού, η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$\rho(T) = \rho_o \cdot [1 + \alpha(T - T_o)] \quad \text{Εξ 7.19}$$

Όπου α ο θερμοκρασιακός συντελεστής της αντίστασης, ο οποίος για το χαλκό σύμφωνα με το [11] είναι $\alpha = 0,003862$, T_o είναι η θερμοκρασία δωματίου που συνήθως επιλέγεται ίση με $20 \text{ }^\circ\text{C}$ και ρ_o είναι η ειδική αντίσταση του χαλκού σε θερμοκρασία δωματίου. Η θερμοκρασία T σε εφαρμογές ηλεκτρικών μηχανών επιλέγεται στους $80 \text{ }^\circ\text{C}$, καθώς αυτή είναι μια μέση επιθυμητή θερμοκρασία λειτουργίας των μηχανών στην ονομαστική φόρτιση.

Με δεδομένο λοιπόν το ονομαστικό ρεύμα μπορούμε να υπολογίσουμε με βάση τους παραπάνω τύπους τις απώλειες χαλκού της μηχανής.

Απώλειες πυρήνα

Η εύρεση των απωλειών πυρήνα μιας μηχανής αποτελεί μια πρόκληση, καθώς ο υπολογισμός τους είναι είναι αρκετά πολύπλοκος. Για τον λόγο αυτό ο προσδιορισμός των απωλειών πυρήνα γίνεται βάσει απλουστευτικών μοντέλων. Η ανάλυση με το πρόγραμμα FEMM βοηθάει στον υπολογισμό αυτό, καθώς μπορούμε να αξιοποιήσουμε τα αποτελέσματα της μαγνητοστατικής ανάλυσης ώστε να έχουμε έναν ακριβή προσδιορισμό των απωλειών. Μετά την πλεγματοποίηση της μηχανής κατά τη μαγνητοστατική ανάλυση, υπολογίζεται για κάθε διακριτό τρίγωνο, μέσω εντολών Iuascrip, η τιμή πυκνότητας της μαγνητικής ροής στο κέντρο κάθε τριγώνου που αποτελεί μέρος της σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας. Για τον υπολογισμό της τιμής αυτής αρχικά καταγράφεται η θέση κάθε στοιχείου του πλέγματος η επιφάνεια που καταλαμβάνει αλλά και ο όγκος τους με δεδομένο το ενεργό μήκος της μηχανής. Έπειτα, για κάθε τέτοιο τρίγωνο, είτε ανήκει στον στάτη είτε στον δρομέα, καταγράφονται οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής τους. Για τις εφαρμογές αυτές επιλέγεται συνήθως σιδηρομαγνητική λαμαρίνα από την οικογένεια των M235 και συγκεκριμένα η M235-35^A. Σύμφωνα με το φυλλάδιο προδιαγραφών του υλικού αυτού, παίρνουμε κάποιο ικανοποιητικό αριθμό σημείων που μπορούν να περιγράψουν την καμπύλη ειδικών απωλειών της, η οποία φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα του σχήματος 7.8.

Έπειτα, τα σημεία αυτά χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν με ακρίβεια την καμπύλη απωλειών με πολυώνυμο κάποιου βαθμού μέσω του πακέτου fitting tool του Matlab. Αυτό γίνεται ώστε να υπάρχει πλήρης αντιστοιχία μεταξύ των τιμών μαγνητικής επαγωγής που εξάγεται από κάθε τρίγωνο της ανάλυσης και των ειδικών απωλειών του υλικού σε W/kg. Γνωρίζοντας την επιφάνεια κάθε τριγώνου της ανάλυσης και πολλαπλασιάζοντας με το ενεργό μήκος της μηχανής, την πυκνότητα του υλικού της σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας αλλά και τις ειδικές απώλειες που μόλις υπολογίστηκαν για τον στάτη και τον δρομέα, βρίσκουμε τις συνολικές απώλειες πυρήνα.



Σχήμα 7.8: Καμπύλη ειδικών απωλειών σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας M235-35^A

7.1.2.4 Υπολογισμός απόδοσης

Μετά από την εύρεση των απωλειών μπορούμε να υπολογίσουμε την απόδοση της μηχανής από τη σχέση:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{P_m}{P_m + P_{total\ losses}} \quad \text{Εξ 7.20}$$

όπου P_m η ισχύς στον άξονα της μηχανής η οποία υπολογίζεται ως:

$$P_m = T_{mean} \cdot \omega_r \quad \text{Εξ 7.21}$$

και $P_{total\ losses}$ οι συνολικές απώλειες χαλκού και πυρήνα της μηχανής.

7.2 Καθορισμός παραμέτρων για τις βελτιστοποιήσεις

7.2.1 Παράμετροι αλγορίθμων

Στην παρούσα εργασία αντικείμενο βελτιστοποίησης τίθεται ο κώδικας σχεδίασης του κινητήρα, ο οποίος χρησιμοποιείται από την ομάδα «Προμηθέας» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για τον διαγωνισμό εξοικονόμησης καυσίμου «Shell eco-marathon». Ο κινητήρας είναι ενσωματωμένος στο πρωτότυπο όχημα «Πυρφόρος II» της ομάδας εδώ και δύο χρόνια.

Η προσαρμογή του κώδικα σχεδίασης του κινητήρα γίνεται με τρόπο τέτοιο, ώστε να υπάρχει ουσιαστική παρέμβαση στην εξέλιξη της βελτιστοποίησης από τους αλγορίθμους

ABC-DE και ASMA. Για την προσαρμογή χρησιμοποιήθηκε μια συνάρτηση `central_femm_function`, η οποία δέχεται ως είσοδο τις τροφές του αλγορίθμου και δίνει ως έξοδο αποτελέσματα που έχουν να κάνουν με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μηχανής που μόλις δημιουργήθηκε. Έτσι λοιπόν κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια αντιστοίχιση μεταξύ των παραμέτρων του κώδικα σχεδίασης και των αλγορίθμων.

Αρχικά έχουμε τα βασικά μεγέθη του αλγορίθμου, τα οποία είναι το μέγεθος της αποικίας των μελισσών, ο πληθυσμός του αλγορίθμου, ο μέγιστος αριθμός των κύκλων που θα εκτελέσει η βελτιστοποίησή μας, ο αριθμός των παραμέτρων κάθε διανύσματος τροφής, και τέλος το όριο με βάση το οποίο μια τροφή θα εγκαταλείπεται από τις μέλισσες. Έτσι λοιπόν προκύπτει ο παρακάτω πίνακας που δίνει τα βασικά μεγέθη της βελτιστοποίησης:

Παράμετροι αλγορίθμου ABC	Σύμβολο	Τιμή
Μέγεθος αποικίας	NP	70
Μέγεθος πληθυσμού	FoodNumber	NP/2
Μέγιστος αριθμός κύκλων	MaxCycle	100
Αριθμός παραμέτρων διανύσματος	D	5 ή 7
Όριο εγκατάληψης περιοχής τροφής ²	Limit	20

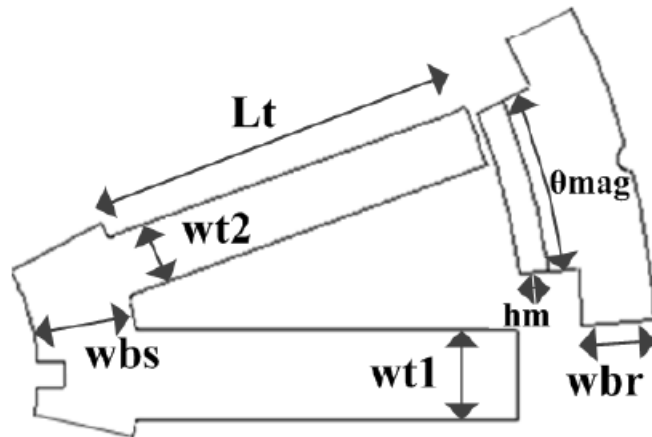
Πίνακας 7.3: Παράμετροι μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης γεωμετρίας κινητήρα μονίμων μαγνητών

Το μέγεθος D, όπως είπαμε, συμβολίζει το μέγεθος του διανύσματος της κάθε τροφής. Στο δικό μας πρόβλημα χρησιμοποιούμε πέντε έως επτά παραμέτρους για κάθε τροφή, οι οποίες αντιστοιχούν σε 7 διαστάσεις στη γεωμετρία του κινητήρα. Αυτές είναι:

- η γωνία του μαγνήτη
- το πάχος του μεγάλου δοντιού του στάτη
- το ποσοστό ανισότητας μεταξύ των δοντιών
- το πάχος του μαγνήτη
- το πάχος του δρομέα
- η διάμετρος διάκενου
- το ενεργό μήκος της μηχανής

Όλες οι άλλες διαστάσεις έχουν οριστεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Επιπλέον, για λόγους επαλήθευσης της γεωμετρίας του κινητήρα χρησιμοποιείται ακριβώς πριν από το βήμα της σχεδίασης, μέσα στη βελτιστοποίηση, ένας έλεγχος γεωμετρίας, ο οποίος εξασφαλίζει πως όλες οι διαστάσεις είναι τέτοιες, ώστε ο κινητήρας να είναι σε θέση να αναλυθεί από το πρόγραμμα FEMM. Ο βασικός έλεγχος που γίνεται σε αυτό το στάδιο είναι στα δόντια του στάτη, στον οποίο εξασφαλίζεται πως δεν θα υπάρχει υπερκάλυψη μεταξύ τους. Σε περίπτωση υπερκάλυψης αυξάνεται βηματικά το πάχος του αλουμινίου του άξονα, με αποτέλεσμα να μεταφέρεται η σχεδίαση του στάτη, μέχρις ότου να εξασφαλιστεί η δυνατότητα ανάλυσης.

² Μόνο στην μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση με τον αλγόριθμο ABC-DE



Σχήμα 7.9: Παράμετροι που διαφοροποιούνται κατά την κλήση του FEMM [7]

Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται οι παράμετροι που αλλάζουν σε κάθε κλήση του FEMM. Άμεση αλλαγή συμβαίνει όπως είπαμε και νωρίτερα στα θ_{mag} , W_{t1} , W_{t2} μέσω της ανισότητας, h_m και w_{br} . Τα άλλα μεγέθη που απεικονίζονται αλλάζουν ως συνέπεια της σχεδίασης κάθε φορά. Το w_{bs} που φαίνεται στο σχήμα είναι το κύριο κομμάτι ελέγχου γεωμετρίας που αναφερθήκαμε νωρίτερα.

7.2.2 Κριτήρια επιλογής αντικειμενικής συνάρτησης

Προτού παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των αλγορίθμων ελαχιστοποίησης που εξετάζουμε, κρίνεται αναγκαίο να προσδιοριστούν τα κριτήρια με βάση τα οποία θα επιλεγεί η αντικειμενική συνάρτηση που θα ορίσει την έκβαση των αποτελεσμάτων σε κάθε αλγόριθμο. Η συνάρτηση αυτή πρέπει να εκφράζει ένα μέγεθος, το οποίο βρίσκεται προς μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση και αυτό εξαρτάται αποκλειστικά από τον τύπο του προβλήματος και τις μεταβλητές γεωμετρίας που επιλέξαμε.

Η παρούσα μέθοδος χρησιμοποιείται αποκλειστικά για ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Οι συναρτήσεις κόστους που επιλέχθηκαν βασίστηκαν πάνω στα ουσιώδη μεγέθη μιας ηλεκτρικής μηχανής τα οποία κρίνονται ουσιώδη και για την εφαρμογή που έχει ο συγκεκριμένος κινητήρας. Κάποια από αυτά είναι:

- Απόδοση της μηχανής (Efficiency), η οποία εκφράζει το ποσοστό της ενέργειας εισόδου που μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια στον τροχό του οχήματος «Πυρφόρος II». Εμείς θα ασχοληθούμε κυρίως με τις απώλειες, καθώς λόγω περιορισμών γεωμετρίας η ισχύς εξόδου δεν μπορεί να αλλάξει δραματικά.
- Κυμάτωση της Ροπής Εξόδου (T_{ripple}), η οποία εκφράζεται ως ποσοστό της ροπής εξόδου και υπολογίζει την αστάθεια της ροπής κατά τη διάρκεια μιας πλήρους περιστροφής του κινητήρα.
- Μέγιστη Ροπή Εξόδου (T), η οποία εκφράζει τη μέση ροπή που παράγει η μηχανή στην κατάσταση λειτουργίας που εξετάζουμε
- Η ολική Αρμονική Παραμόρφωση (THD), η οποία δίνεται επίσης ως ποσοστό και υπολογίζει τη συνολική ενέργεια που περιέχουν οι αρμονικές ΗΕΔ της μηχανής σε σχέση με την ενέργεια της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας.
- Το ολικό βάρος της μηχανής (W_{total}), καθώς στη συγκεκριμένη εφαρμογή ο κινητήρας είναι μέρος του τροχού, με αποτέλεσμα να περιστρέφεται μαζί του. Γνωρίζουμε πως όσο μεγαλύτερο το βάρος του περιστρεφόμενου μέρους τόσο μεγαλύτερη και η συνολική αδράνεια η οποία επηρεάζει την απόδοση της μηχανής

μας. Για τους αγώνες «Shell eco-marathon» κρίνεται απαραίτητη η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση του βάρους στα περιστρεφόμενα μέρη.

Εξαιτίας λοιπόν των υψηλών απαιτήσεων που καθορίζει η ανταγωνιστικότητα στην απόδοση κατά τη διάρκεια των αγώνων πολλά από τα παραπάνω χαρακτηριστικά συνδυάστηκαν με στόχο την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια σε πολλές λειτουργικές παραμέτρους της μηχανής.

Για να έχουμε μια σαφέστερη εικόνα των αντικειμενικών συναρτήσεων και των αποτελεσμάτων που θα εξάγουμε, έγινε κανονικοποίηση των μεγεθών αυτών, με βάση αυτά που υπολογίστηκαν από την αρχική σχεδίαση της μηχανής. Αυτές οι τιμές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Λειτουργικά χαρακτηριστικά αρχικής σχεδίασης	
Απώλειες ($Losses_{total}$)	46.81 Watts
Το συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης (THD)	6.18 %
Rms τιμή της τάσης (Emf_{rms})	11.3 Volts
Μέση ροπή (T_{mean})	7.33 N*m
Απόδοση (Efficiency)	82 %
Κυμάτωση Ροπής (T_{ripple})	4.58 %
Συνολικό βάρος (W_{total})	3.2 kg

Πίνακας 7.4: Λειτουργικά χαρακτηριστικά αρχικής σχεδίασης κινητήρα

7.2.3 Πεδίο ορισμού μεταβλητών γεωμετρίας

Ο καθορισμός του πεδίου ορισμού των μεταβλητών γεωμετρίας του κινητήρα είναι ίσως το πιο σημαντικό κομμάτι της βελτιστοποίησης. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω του ότι πολλές γεωμετρίες με ελαφρώς καθορισμένα όρια οδηγούν σε μη έγκυρες γεωμετρίες, δηλαδή γεωμετρίες που δεν ορίζονται και δεν αναλύονται από το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούμε. Γίνεται εύκολα αντιληπτό πως η διαδικασία βελτιστοποίησης μιας ηλεκτρικής μηχανής είναι μια αρκετά χρονοβόρα διαδικασία, με αποτέλεσμα να μη θέλουμε να πέσουμε σε λάθη τα οποία μπορεί να στερήσουν αρκετό χρόνο και ορθά αποτελέσματα από την προσπάθεια αυτή, οδηγώντας μας στην αιφνίδια διακοπή της εκτέλεσης.

Συνεπώς, έχουμε θέσει αυστηρά όρια στις παραμέτρους μας αλλά και έναν αρκετά ικανοποιητικό έλεγχο γεωμετρίας, προτού ξεκινήσει η οποιαδήποτε ανάλυση. Τα όρια που δίνουμε στον αλγόριθμό μας είναι τα εξής:

Παράμετροι	Κατώτατο όριο	Ανώτατο όριο
θ_{mag}	40 %	80 %
Wt_1	4 mm	8.5 mm
Ποσοστό ανισότητας	50 %	95 %
$H_{μαγνήτη}$	1.5 mm	4 mm
Wbr (πλάτος δρομέα)	2 mm	6 mm
$R_{εξωτερική\ στάτη}$	40 mm	70mm
Πάχος μηχανής (Depth)	20 mm	50 mm

Πίνακας 7.5: Άνω και κάτω όρια παραμέτρων βελτιστοποίησης

7.3 Μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση γεωμετρίας κινητήρα με τον αλγόριθμο ABC-DE

7.3.1 Σύνδεση μονοκριτηριακού αλγορίθμου ABC-DE με το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων FEMM

Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του τροποποιημένου αλγορίθμου βελτιστοποίησης ABC σε συνδυασμό με το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων FEMM, δίνονται αναλυτικά οι φάσεις της αρχικοποίησης, των μελισσών-εργατριών και θεατών και τέλος η φάση των προσκόπων-μελισσών.

- Αρχικοποίηση: Αρχικά έχουμε την αρχικοποίηση ενός τυχαίου πίνακα τροφών με παραμέτρους που σέβονται τα εκάστοτε όρια. Για κάθε διάνυσμα τροφής γίνεται κλήση του προγράμματος FEMM και λαμβάνονται τα δεδομένα προς αξιολόγηση. Τα μεγέθη που μπαίνουν στην Cost Function δίνονται στην επόμενη ενότητα. Κλήση της αντικειμενικής συνάρτησης και δημιουργία πίνακα τιμών με την τιμή κόστους που αντιστοιχεί σε κάθε τροφή. Αξιολόγηση αυτών με βάση τη συνάρτηση Calculate Fitness του αρχικού αλγορίθμου. Ο αλγόριθμος ABC προσπαθεί να βρει θέσεις τροφών με όσο το δυνατόν μεγαλύτερο Fitness, δηλαδή όσο περισσότερο νέκταρ, ελαχιστοποιώντας τα αποτελέσματα της Cost Function.

- Είσοδος στο κύριο κομμάτι του αλγορίθμου:

Μέλισσες-εργάτριες: Στη φάση αυτή γίνεται μετάλλαξη της τροφής i σύμφωνα με τη μέθοδο της διαφορικής εξέλιξης (DE) που περιγράψαμε. Για κάθε μεταλλαγμένη τροφή γίνεται κλήση του FEMM και λήψη έπειτα των δεδομένων που θα εισέλθουν στην αντικειμενική συνάρτηση. Υπολογισμός Fitness της τιμής κόστους για την τροφή i και σύγκριση αυτής με τις τιμές των άλλων τροφών. Αν η τιμή Fitness της νέας μεταλλαγμένης λύσης είναι καλύτερη από την τιμή της τροφής που υπήρχε πριν στη θέση αυτή, τότε η νέα τροφή παίρνει τη θέση της παλιάς στον πίνακα. Αν είναι χειρότερη από την προηγούμενη λύση, τότε δεν γίνεται κάποια αντικατάσταση αλλά αυξάνεται ο δείκτης trial της τροφής ο οποίος καθορίζει το ποια τροφή θα εγκαταλειφθεί από τις μέλισσες. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου όλες οι τροφές του πίνακα μεταλλαχθούν και ελεγχθούν.

Μέλισσες-θεατές: Πριν ο αλγόριθμος εισέλθει στη φάση αυτή γίνεται μια κανονικοποίηση στις τιμές Fitness των τροφών με βάση τη μεγαλύτερη τιμή του. Με τον τρόπο αυτό σε κάθε τροφή αντιστοιχίζεται μια πιθανότητα, η οποία αφορά το κατά πόσο η κάθε θέση τροφής είναι πιθανό να έχει το περισσότερο νέκταρ. Μόνο οι τροφές με υψηλή πιθανότητα Fitness μπαίνουν στη φάση αυτή. Όταν οι επιλεγμένες τροφές εισέλθουν στη φάση των μελισσών θεατών ακολουθεί η διαδικασία με τη φάση των εργατριών. Δηλαδή, μετάλλαξη τροφής με βάση τη μέθοδο DE, κλήση του FEMM και λήψη δεδομένων που θα εισέλθουν στη συνάρτηση κόστους, υπολογισμός Fitness και επιλογή καλύτερης τροφής και τέλος επανάληψη της διαδικασίας μέχρις ότου η φάση των θεατών τρέξει ίσες φορές με τον αριθμό του πληθυσμού της κυψέλης.

Μέλισσες-πρόσκοποι: Ο δείκτης trial που αυξάνεται κάθε φορά που μια μεταλλαγμένη λύση δεν είναι καλύτερη από τη γονική της είναι και αυτός που θα ορίσει το πότε μια μέλισσα θα γίνει πρόσκοπος. Στη φάση λοιπόν αυτή εντοπίζεται κάποια τροφή της οποίας ο δείκτης trial έχει φτάσει στο όριο και χρειάζεται να εγκαταλειφθεί από τις μέλισσες. Έτσι λοιπόν η μέλισσα που αντιστοιχεί στην τροφή αυτή μετατρέπεται προσωρινά σε μέλισσα πρόσκοπο και βγαίνει από την κυψέλη

προς αναζήτηση μιας εντελώς τυχαίας θέσης τροφής. Για τη νέα τυχαία τροφή έχουμε πάλι κλήση του FEMM και της αντικειμενικής συνάρτησης. Υπολογίζεται έπειτα το Fitness της τροφής και αντικαθίσταται η παλιά τροφή με την τυχαία.

Ύστερα από αυτές τις τρεις φάσεις εντοπίζεται η τροφή με τη μικρότερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και αποθηκεύεται ως η καλύτερη του κύκλου. Η τιμή αυτή θεωρείται προσωρινά η βέλτιστη τιμή του αλγορίθμου και η τροφή που της αντιστοιχεί ως η προσωρινή βέλτιστη λύση. Σε μια πιθανή εύρεση καλύτερης τιμής σε άλλο κύκλο οι θέσεις αυτές αντικαθίστανται με τη νέα.

- ο Επανάληψη του κύριου μέρους του αλγορίθμου μέχρι να ενεργοποιηθεί κάποια συνθήκη τερματισμού.

7.3.2 Επιλογή αντικειμενικής συνάρτησης για τη μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση

Για τον προσδιορισμό της μονοκριτηριακής συνάρτησης χρησιμοποιήθηκαν έξι βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά της μηχανής, τα οποία συνδυάστηκαν με τη βοήθεια της μεθόδου των βαρών.

Έχουμε λοιπόν τα εξής μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν:

- ο Οι απώλειες χαλκού και σιδήρου της μηχανής ($Losses_{total}$)
- ο Ο συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης (THD)
- ο Η rms τιμή της τάσης (Emf_{rms})
- ο Η μέση ροπή (T_{mean})
- ο Η κυμάτωση ροπής (T_{ripple})
- ο Το συνολικό βάρος (W_{total})

Καθορίζουμε τη σχέση της αντικειμενικής συνάρτησης ως εξής:

$$f = A * \frac{THD}{6.18} + abs(Emf_{rms} - 11.3) + abs(T_{mean} - 7.33) + B * \frac{T_{ripple}}{4.58} + C * \frac{Losses_{total}}{46.81} + D * \frac{W_{total}}{3.2} \quad \text{Εξ 7.22}$$

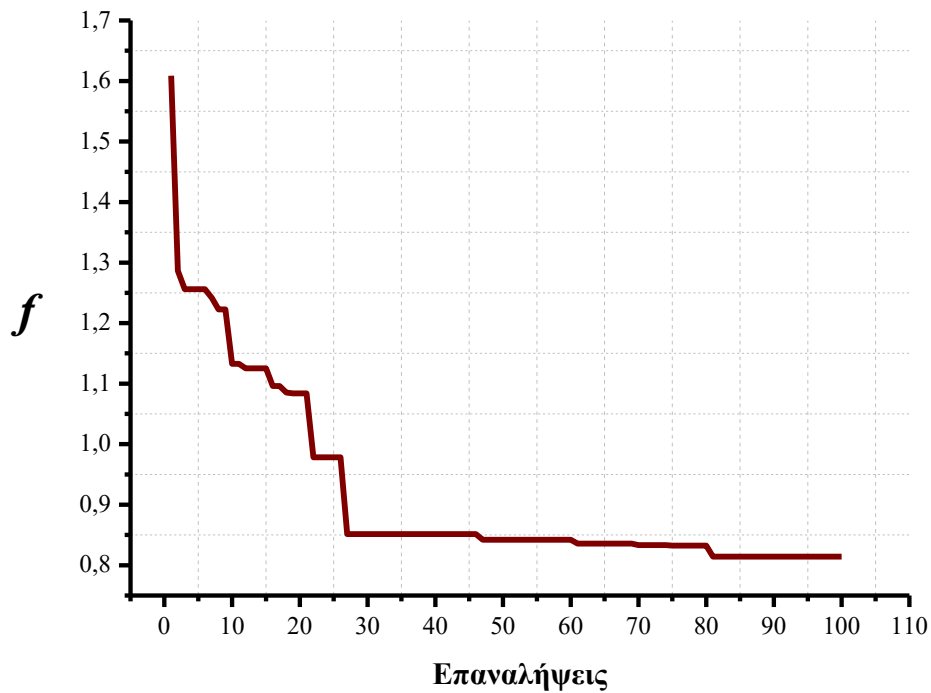
Όπως φαίνεται από τη μορφή της συνάρτησης, το αποτέλεσμα που παίρνουμε στην περίπτωση των μεταβλητών της αρχικής σχεδίασης είναι ίσο με 1. Αυτό μας προσφέρει δύο βασικά πλεονεκτήματα: πρώτον ένας τέτοιος τύπος συνάρτησης μας δίνει τη δυνατότητα να αξιολογήσουμε με διαφορετικά βάρη το κάθε αποτέλεσμα και δεύτερον την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση της τιμής ObjectiveValue χωρίς αυτή να πέσει κάτω από το 0. Τα κριτήρια που θέλουμε να μειωθούν όσο το δυνατόν περισσότερο τα βάζουμε στον αριθμητή του κάθε κλάσματος ενώ τα άλλα που θέλουμε να αυξηθούν στον παρονομαστή. Η βαρύτητα της κάθε μεταβλητής στο τελικό αποτέλεσμα ορίζεται από τους συντελεστές A, B, C και D οι οποίοι ποσοστιαία εκφράζονται ως εξής:

$$A = 10\% \quad B = 10\% \quad C = 60\% \quad \text{και} \quad D = 20\%$$

7.3.3 Αποτελέσματα μονοκριτηριακού αλγορίθμου ABC στην βελτιστοποίηση της γεωμετρίας σύγχρονου κινητήρα επιφανειακών μονίμων μαγνητών

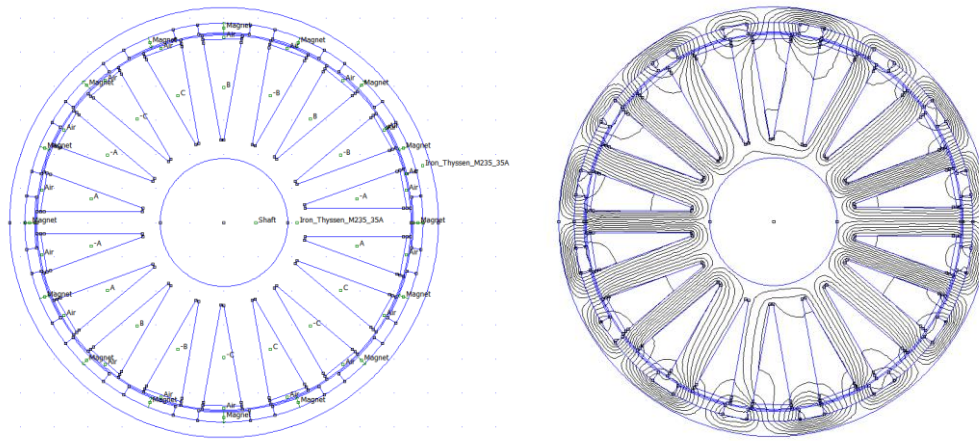
7.3.3.1 Βελτιστοποίηση με πέντε παραμέτρους

Αρχικά θέσαμε προς βελτιστοποίηση τις πέντε πρώτες από τις επτά παραμέτρους του πίνακα 7.5. Οι βέλτιστες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.

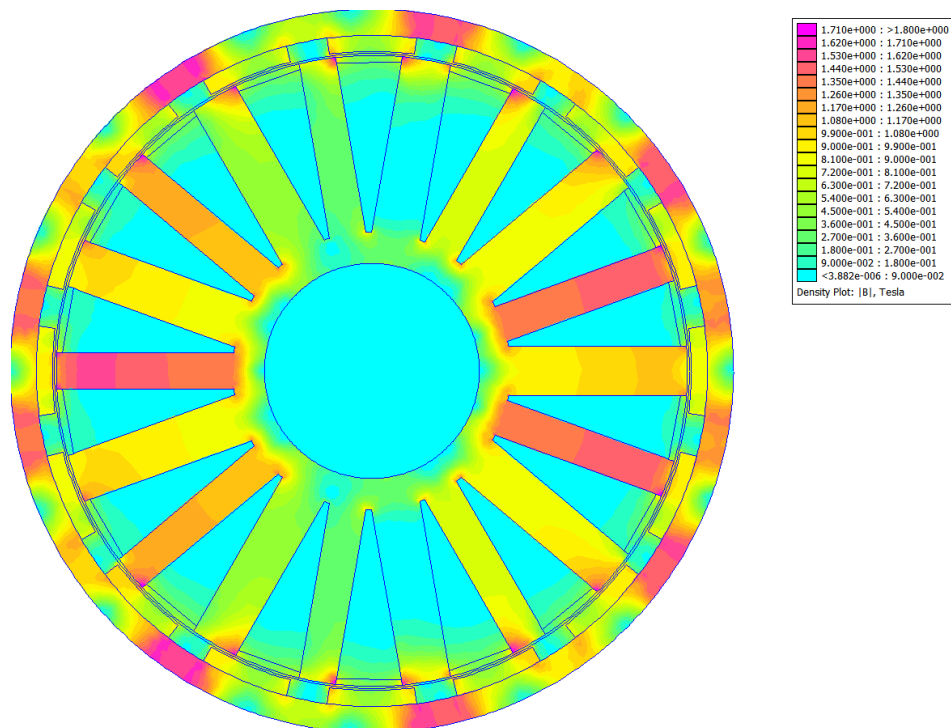


Σχήμα 7.10: Διάγραμμα προοδευτικής βελτιστοποίησης μέσω του υβριδικού αλγορίθμου ABC με DE τεχνική εύρεσης επόμενης λύσης και με πέντε παραμέτρους βελτιστοποίησης

Η βέλτιστη λύση σύμφωνα με τον μονοκριτηριακό υβριδικό αλγόριθμο ABC και με βελτιστοποίηση πέντε παραμέτρων είναι αυτή με τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ίση με 0,81431.



Σχήμα 7.11: Γεωμετρία του κινητήρα και κατανομή του μαγνητικού πεδίου μέσω του προγράμματος FEMM της βέλτιστης λύσης από τον ABC με βελτιστοποίηση πέντε παραμέτρων



Σχήμα 7.12: Κατανομή της πυκνότητας μαγνητικής ροής του βέλτιστου κινητήρα με εμφανή των χρωματικό κώδικα

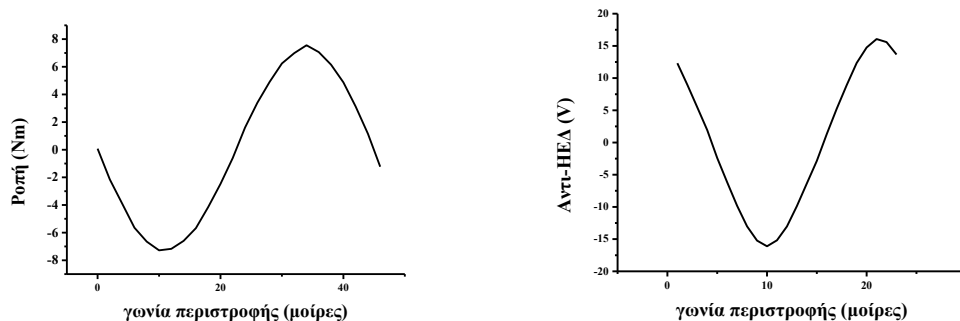
Η θέση στην οποία βρέθηκε δίνει τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά στον κινητήρα:

Μεταβλητή	Τιμή	Διαφορές με τον αρχικό κινητήρα
Ποσοστό γωνίας μαγνήτη επί του πολικού βήματος	76.99 %	16.99 % ↑
Ποσοστό ανισότητας μεταξύ των δοντιών	75.87 %	10.87% ↑
Πλάτος μεγάλου δοντιού στάτη	8.49 mm	1.49 mm ↑
Πάχος μαγνήτη	2.82 mm	0.57 mm ↑
Πάχος δρομέα	4.54 mm	0.45 mm ↓

Πίνακας 7.6: Τιμές γεωμετρικών χαρακτηριστικών βελτιστοποιημένου κινητήρα και διαφορές με την αρχική σχεδίαση

Λειτουργικά χαρακτηριστικά αρχικής σχεδίασης	Τιμή	Ποσοστιαίες διαφορές από τα χαρακτηριστικά του αρχικού κινητήρα
Απώλειες ($Losses_{total}$)	38 Watts	18.80 % ↓
Το συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης (THD)	4.33 %	29.78 % ↓
Rms τιμή της τάσης (Emf_{rms})	11.31 Volts	-
Μέση ροπή (T_{mean})	7.33 N*m	-
Απόδοση (Efficiency)	85.78 %	3.78 % ↑
Κυμάτωση Ροπής (T_{ripple})	1.84 %	59.79 % ↓
Συνολικό βάρος (W_{total})	3.087 kg	0.113 kg ↓

Πίνακας 7.7: Λειτουργικά χαρακτηριστικά βελτιστοποιημένου κινητήρα και διαφορές με την αρχική σχεδίαση

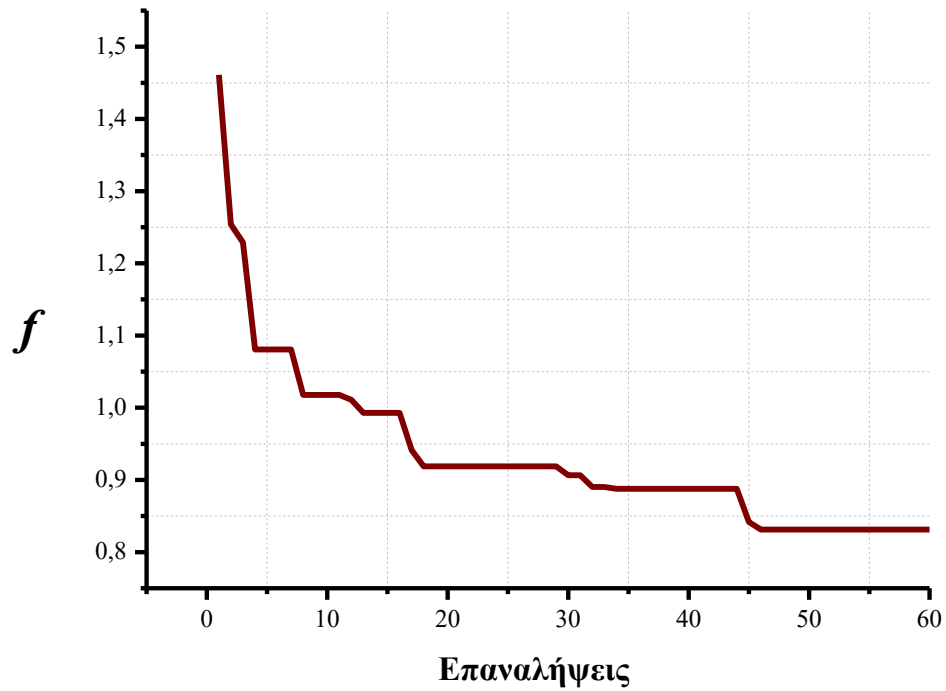


Σχήμα 7.13: Αριστερά: Κυματομορφή της ροπής σε συνάρτηση με την περιστροφή του δρομέα σε μηχανικές μοίρες. Δεξιά: Κυματομορφή της αντι-ΗΕΔ σε συνάρτηση με τη γωνία περιστροφής του κινητήρα

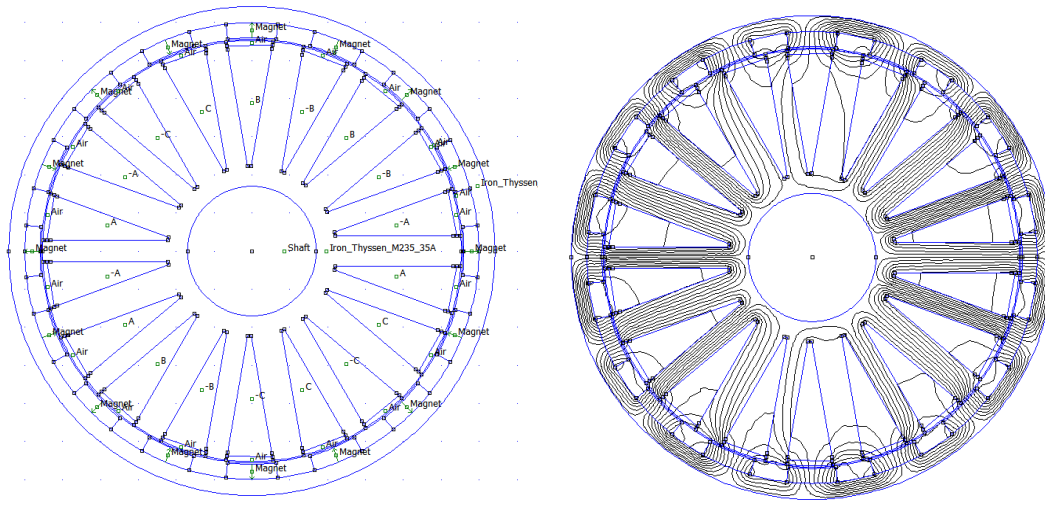
Βλέπουμε ότι έχουμε μια σημαντική αύξηση στο ποσοστό της γωνίας του μαγνήτη καθώς επίσης και στο ποσοστό ανισότητας μεταξύ των δοντιών. Το μεγάλο δόντι του στάτη έχει επίσης σημαντική αύξηση της τάξης του 20% από την αρχική σχεδίαση, καθώς και το πάχος του μαγνήτη. Η γεωμετρία αυτή μειώνει κατά πολύ τις απώλειες της μηχανής καθώς οι αύλακες περιορίζονται με αποτέλεσμα να έχουμε μείωση κυρίως στις απώλειες χαλκού. Επίσης για τη σχεδίαση της συγκεκριμένης γεωμετρίας έγινε αυτόματη αλλαγή στη διάμετρο του άξονα από τα 17 στα 18,75 mm κάτι που βοήθησε στη μείωση του βάρους καθώς η πυκνότητα του αλουμινίου είναι μικρότερη από αυτή του σιδήρου. Με αυτή την αλλαγή και με δεδομένο το μέγεθος της διάμετρου του διάκενου, τα δόντια μειώθηκαν σε μήκος κάτι που επίσης οδήγησε στη μείωση των απωλειών χαλκού.

7.3.3.2 Βελτιστοποίηση με επτά παραμέτρους

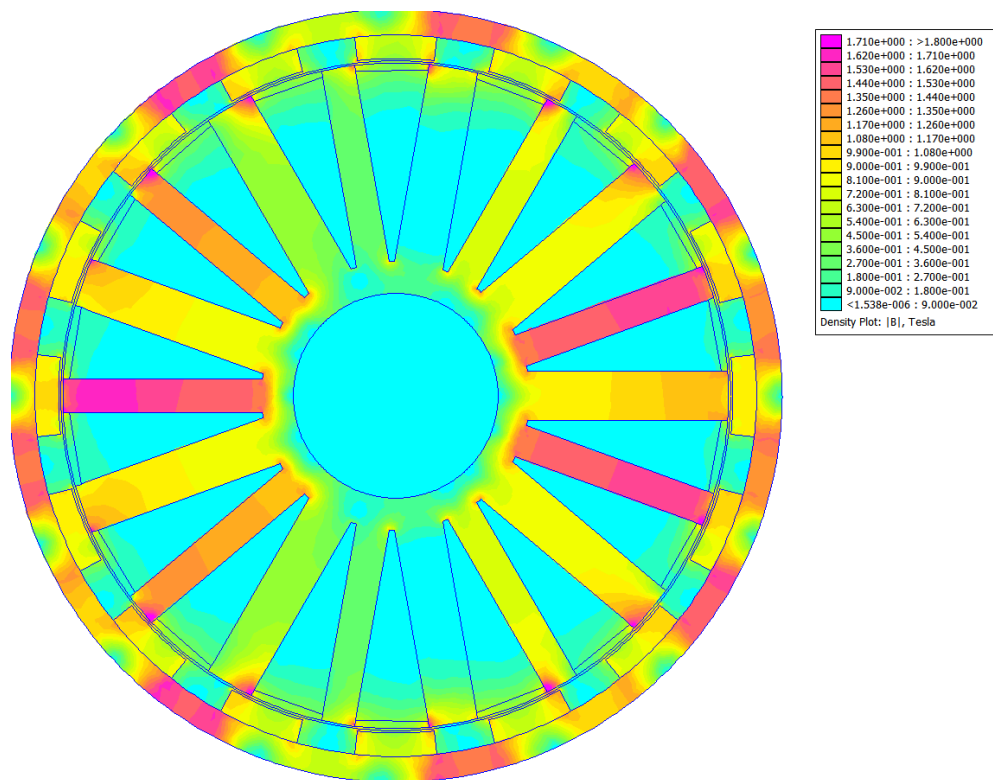
Στη συνέχεια θέσαμε στη διάθεση της βελτιστοποίησης και τις επτά παραμέτρους σχεδίασης του κινητήρα και είχαμε τα εξής αποτελέσματα.



Σχήμα 7.14: Διάγραμμα προοδευτικής βελτιστοποίησης μέσω του υβριδικού αλγορίθμου ABC με DE τεχνική εύρεσης επόμενης λύσης με επτά παραμέτρους βελτιστοποίησης



Σχήμα 7.15: Γεωμετρία του κινητήρα και κατανομή του μαγνητικού πεδίου μέσω του προγράμματος FEMM της βέλτιστης λύσης από τον ABC με βελτιστοποίηση πέντε παραμέτρων



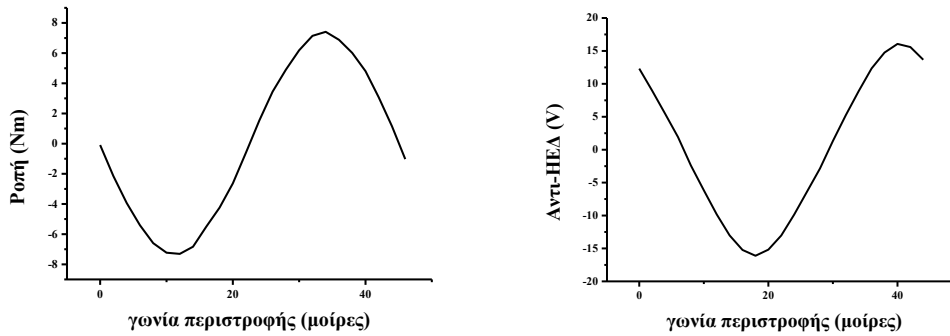
Σχήμα 7.16: Κατανομή της πυκνότητας μαγνητικής ροής του βέλτιστου κινητήρα με εμφανή των χρωματικό κώδικα

Μεταβλητή	Τιμή	Διαφορές με τον αρχικό κινητήρα
Ποσοστό γωνίας μαγνήτη επί του πολικού βήματος	65.17 %	5.17 % ↑
Ποσοστό ανισότητας μεταξύ των δοντιών	68.58 %	3.58 % ↑
Πλάτος μεγάλου δοντιού στάτη	8.13 mm	1.13 mm ↑
Πάχος μαγνήτη	3.94 mm	1.69 mm ↑
Πάχος δρομέα	4.26 mm	0.73 mm ↓
Διάμετρος διάκενου	55.26 mm	0.26 mm ↑
Ενεργό μήκος	33 mm	2 mm ↓

Πίνακας 7.8: Τιμές γεωμετρικών χαρακτηριστικών βελτιστοποιημένου κινητήρα και διαφορές με την αρχική σχεδίαση

Λειτουργικά χαρακτηριστικά αρχικής σχεδίασης	Τιμή	Ποσοστιαίες διαφορές από τα χαρακτηριστικά του αρχικού κινητήρα
Απώλειες ($Losses_{total}$)	40.87 Watts	12.68 % ↓
Το συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης (THD)	2.88 %	53.32 % ↓
Rms τιμή της τάσης (Emf_{rms})	11.30 Volts	-
Μέση ροπή (T_{mean})	7.33 Nm	-
Απόδοση (Efficiency)	84.62 %	2.67 % ↑
Κυμάτωση Ροπής (T_{ripple})	2.84 %	37.92 % ↓
Συνολικό βάρος (W_{total})	2.99 kg	0.21 kg ↓

Πίνακας 7.9: Λειτουργικά χαρακτηριστικά βελτιστοποιημένου κινητήρα και διαφορές με την αρχική σχεδίαση



Σχήμα 7.17: Αριστερά: Κυματομορφή της ροπής σε συνάρτηση με την περιστροφή του δρομέα σε μηχανικές μοίρες. Δεξιά: Κυματομορφή της αντι-HEA σε συνάρτηση με τη γωνία περιστροφής του κινητήρα

Στην περίπτωση της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης με επτά παραμέτρους βλέπουμε πως το ποσοστό γωνίας μαγνήτη και ανισότητας δεν έχουν αλλάξει δραστικά αλλά έχουμε μια κατακόρυφη αύξηση στο πάχος του μαγνήτη, το οποίο δίνει τη δυνατότητα στον κινητήρα να αυξήσει τη μαγνητική ροή στο διάκενο. Επίσης έχουμε μείωση του πάχους του δρομέα της μηχανής αλλά και του ενεργού της μήκους κάτι το οποίο επιτρέπει τη σημαντική μείωση του βάρους.

7.4 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση γεωμετρίας κινητήρα με τον αλγόριθμο ASMA

Όπως και στον μονοκριτηριακό ABC έτσι και στον πολυκριτηριακό πια ASMA, θα εισάγουμε το πρόβλημα βελτιστοποίησης της γεωμετρίας ενός κινητήρα μονίμων μαγνητών και συγκεκριμένα τον κινητήρα του «Πυρφόρου II». Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που θα τεθούν προς βελτιστοποίηση είναι τα εξής:

- Η γωνία μαγνήτη
- Το ποσοστό ανισότητας δοντιών στάτη
- Το πλάτος του μεγάλου δοντιού στον στάτη
- Το πάχος του μαγνήτη
- Το πάχος του δρομέα
- Η ακτίνα διάκενου
- Το ενεργό μήκος του κινητήρα

Σε αυτή τη φάση, όπως βλέπουμε, τα χαρακτηριστικά που ορίζονται προς βελτιστοποίηση είναι τα ίδια με αυτά που δώσαμε και στον μονοκριτηριακό αλγόριθμο. Όπως και στον ABC έτσι και εδώ χρησιμοποιείται ο ίδιος έλεγχος γεωμετρίας, ώστε να εξασφαλιστεί πως ο αλγόριθμος θα τρέξει χωρίς σφάλματα γεωμετρίας. Τα χαρακτηριστικά αυτά δίνονται αναλυτικά στο σχήμα 7.9 της ενότητας 7.2.

7.4.1 Επιλογή πολυκριτηριακής συνάρτησης

Όπως καθίσταται σαφές μέσω των προηγούμενων ενοτήτων της παρούσας εργασίας, η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση έγκειται στον έλεγχο παραπάνω από μίας επιμέρους τιμής εξόδου. Θα μπορούσαμε να θέσουμε 2 και παραπάνω τιμές, αλλά για λόγους απλότητας και εύκολης αναπαράστασης των αποτελεσμάτων επιλέξαμε τρεις διαστάσεις στον αντικειμενικό χώρο.

Τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού κινητήρα που μελετάμε δόθηκαν νωρίτερα, κατά την περιγραφή του μονοκριτηριακού αλγορίθμου βελτιστοποίησης ABC. Για την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση διαλέξαμε τις τέσσερις πιο ουσιώδεις παραμέτρους για την εφαρμογή μας οι οποίες είναι:

- Ροπή
- Απώλειες χαλκού και σιδήρου της μηχανής
- Συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης THD
- Κυμάτωση ροπής κινητήρα

Τα δύο τελευταία χαρακτηριστικά συνδυάστηκαν σε μια αντικειμενική αξία της συνάρτησης με βάρος 0,5 το καθένα. Έχουμε λοιπόν τις εξής εξισώσεις:

$$f_1 = \frac{7.33}{Torque} \quad \text{Εξ 7.23}$$

$$f_2 = \frac{Losses}{45.24} \quad \text{Εξ 7.24}$$

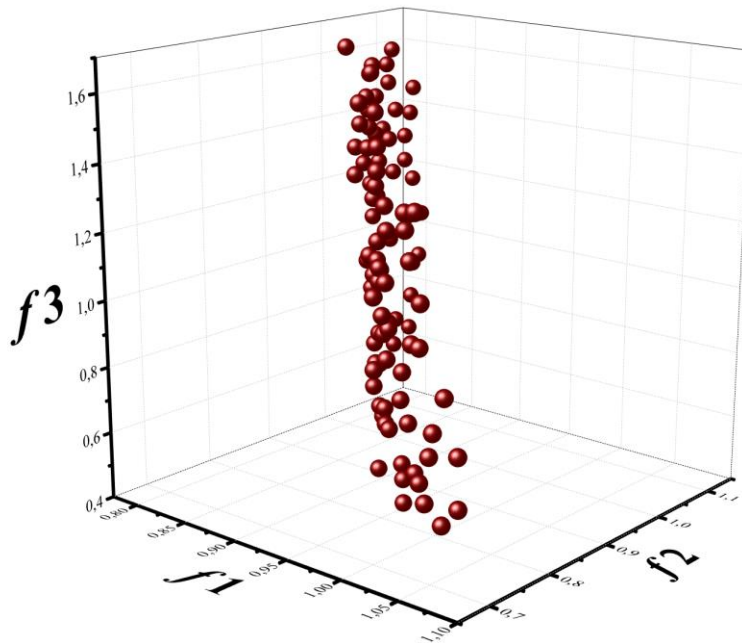
$$f_3 = 0.5 * \frac{THD}{5.6} + 0.5 * \frac{Torque ripple}{1.3} \quad \text{Εξ 7.25}$$

Σε έναν τρισδιάστατο χώρο δεν θα μπορούμε να αντιληφθούμε το μέτωπο Pareto, όπως το έχουμε ήδη αναλύσει. Συνεπώς πρέπει να στοχεύσουμε στις προβολές των αντικειμενικών συναρτήσεων στις επιφάνειες του (x,y,z) χώρου. Η τρισδιάστατη απεικόνιση μας βοηθάει να αντιληφθούμε την ισότητα κατανομής που υπάρχει στον χώρο. Οι λύσεις είναι έτσι κατανομημένες, ώστε να μην υπάρχουν περιοχές στον χώρο με μεγάλη πυκνότητα λύσεων σε αντίθεση με άλλες περιοχές. Αυτό είναι και το πλεονέκτημα του αλγορίθμου ASMA, ότι ψάχνει για λύσεις σε όλο τον αντικειμενικό χώρο και συγκλίνει γρήγορα στο επιθυμητό μέτωπο.

7.4.2 Αποτελέσματα του πολυκριτηριακού αλγορίθμου ASMA στην βελτιστοποίηση της γεωμετρίας σύγχρονου κινητήρα επιφανειακών μονίμων μαγνητών

7.4.2.1 Βελτιστοποίηση με πέντε παραμέτρους

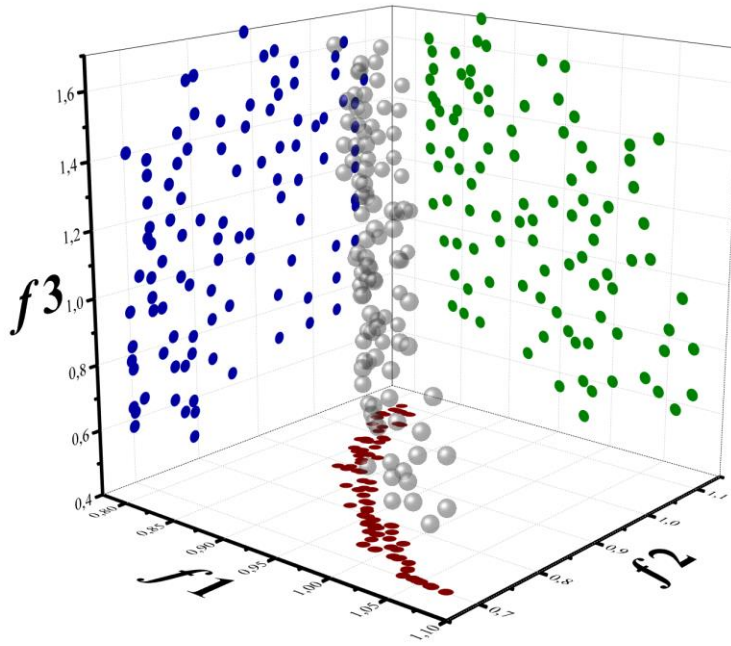
Η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση ASMA για την επιλογή βέλτιστης γεωμετρίας κινητήρα επιφανειακών μονίμων μαγνητών εκτελέστηκε δύο φορές με διαφορετικό αριθμό παραμέτρων κάθε φορά. Στην πρώτη εκτέλεση δώσαμε ως παραμέτρους εισόδου πέντε από τα επτά γεωμετρικά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν στην αμέσως προηγούμενη ενότητα. Αρχικά λοιπόν δώσαμε την ευχέρεια της μετάλλαξης των τιμών που σχετίζονται με τη γωνία μαγνήτη, το ποσοστό ανισότητας, το πλάτος του μεγάλου δοντιού του στάτη, το πάχος του μαγνήτη και το πάχος του δρομέα. Το μέτωπο Pareto που προέκυψε από τη βελτιστοποίησή μας είναι τρισδιάστατο, καθώς η αντικειμενική συνάρτηση διαθέτει τρεις αντικειμενικές τιμές, εκ των οποίων οι δύο είναι αντικρουόμενες ως προς την αυξομείωσή τους. Το μέτωπο Pareto μετά από πενήντα επαναλήψεις του αλγορίθμου είναι το εξής:



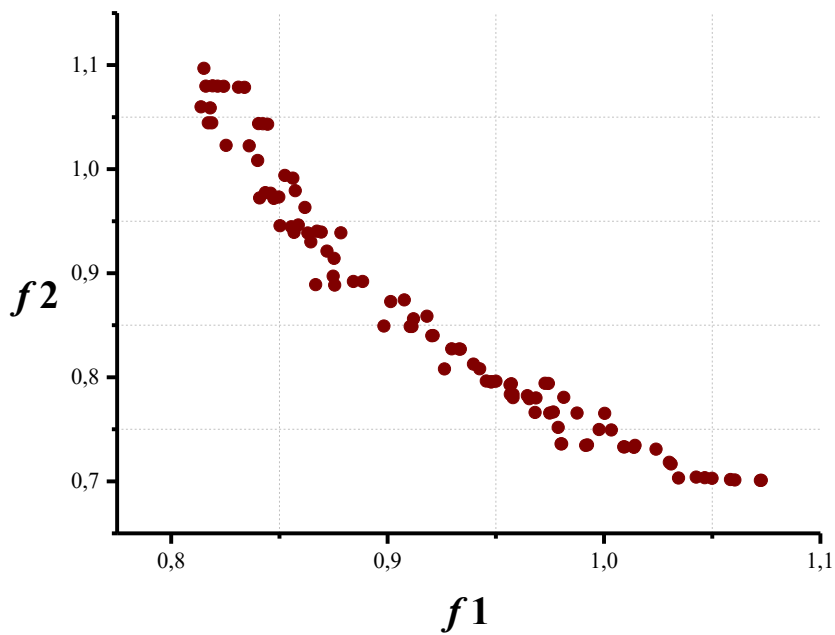
Σχήμα 7.18: Τρισδιάστατο μέτωπο Pareto από τη βελτιστοποίηση με τον αλγόριθμο ASMA με πέντε παραμέτρους

Στο παραπάνω διάγραμμα δίνονται τα σημεία που ορίζουν οι αντικειμενικές τιμές κάθε λύσης που βρίσκονται στο μέτωπο Pareto, μετά την 50^η επανάληψη του αλγορίθμου. Οι αντικειμενικές τιμές ένα και δύο αντιστοιχούν στη βελτιστοποίηση της ροπής και των απωλειών του κινητήρα και για τον λόγο αυτό είναι αντικρουόμενα μεγέθη. Η τρίτη αντικειμενική τιμή είναι προέρχεται από τη συνάρτηση της αρμονικής παραμόρφωσης και της κυμάτωσης ροπής με ίσα ποσοστιαία βάρη.

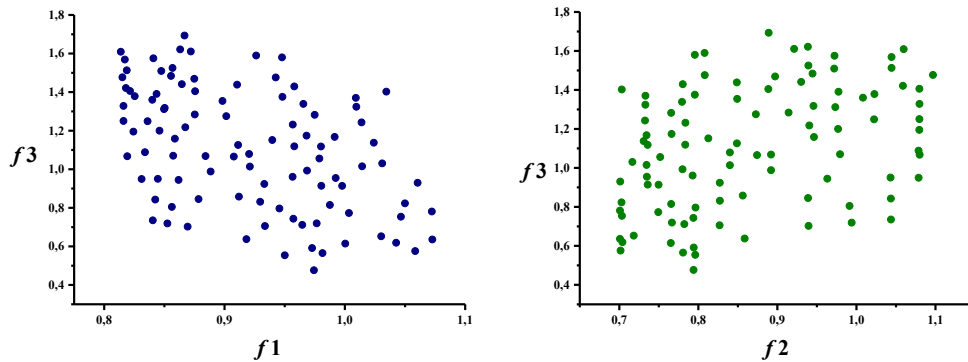
Οι αντικρουόμενες τιμές είναι αυτές που θα δώσουν μια πιο ξεκάθαρη εικόνα για το μέτωπο Pareto, ενώ η τρίτη τιμή είναι αυτή που θα μας δώσει μια εικόνα για τη διασπορά των λύσεων στον εφικτό χώρο αποτίμησης του μετώπου. Στο σχήμα 7.19, φαίνεται η γραφική αναπαράσταση των αντικρουόμενων αντικειμενικών τιμών ή αλλιώς η προβολή του παραπάνω μετώπου στην επιφάνεια xy , όπου ο x άξονας αντιστοιχεί στην αντικειμενική τιμή της ροπής και ο y άξονας στην αντικειμενική τιμή των απωλειών.



Σχήμα 7.19: Προβολές του μετώπου Pareto στις επιφάνειες που ορίζονται ανά δύο αντικειμενικές τιμές

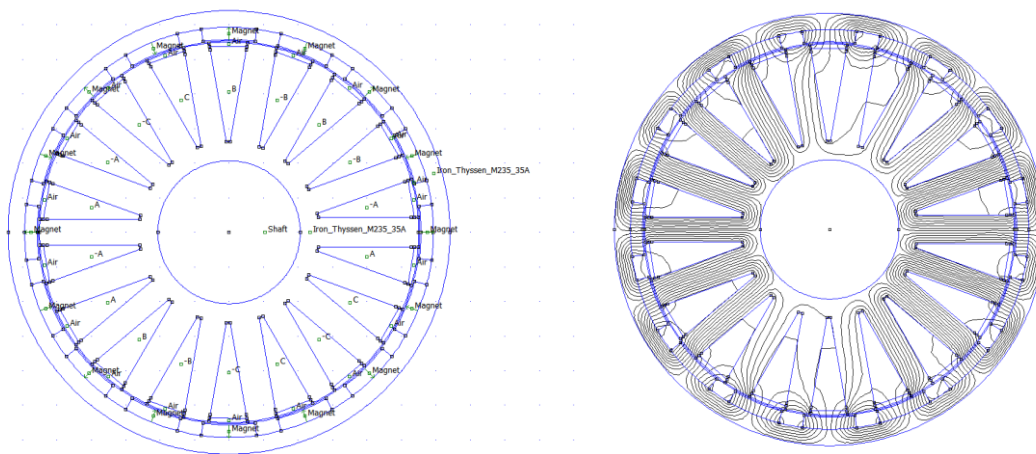


Σχήμα 7.20: Συνήθης μορφή μετώπου Pareto. Προβολή στην επιφάνεια που ορίζουν η αντικειμενική τιμή της ρόπης (Objective Value 1) και των απολειών (Objective Value 2)

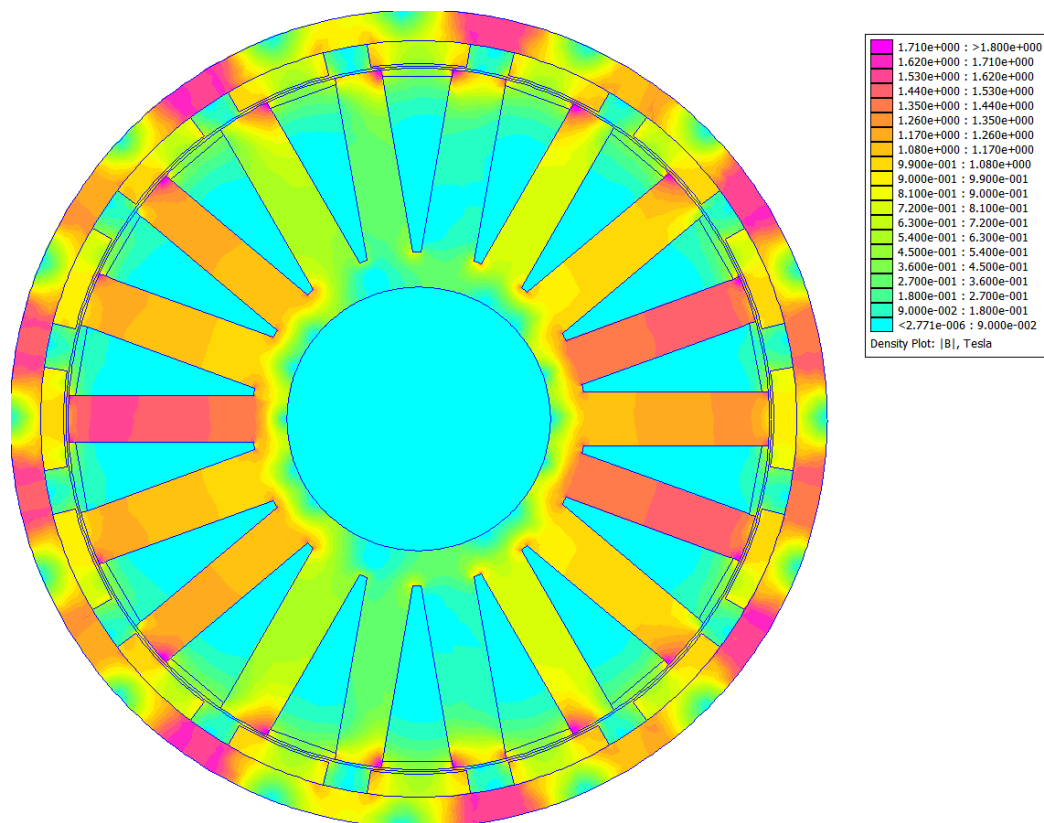


Σχήμα 7.21: Προβολές στις άλλες δύο επιφάνειες του χώρου που ορίζει το μέτωπο Pareto. Αριστερά: Προβολή στην επιφάνεια που ορίζεται από την αντικειμενική τιμή της ροπής (Objective Value 1) και της συνάρτησης THD και Torque Ripple (Objective Value 3). Δεξιά: Προβολή στην επιφάνεια που ορίζεται από την αντικειμενική τιμή των απωλειών (Objective Value 2) και της συνάρτησης THD και Torque Ripple (Objective Value 3)

Στα επόμενα σχήματα δίνεται μια γεωμετρία από το βέλτιστο Pareto που μπορεί να συγκριθεί με τον κινητήρα που προέκυψε από την αρχική σχεδίαση, καθώς έχουν ίδια ροπή και σχεδόν ίδιο βάρος. Ο κινητήρας αυτός παρουσιάζει σαφώς βελτιωμένα χαρακτηριστικά στην απόδοση, στον συντελεστή παραμόρφωσης και στην κυμάτωση ροπής.



Σχήμα 7.22: Γεωμετρία του κινητήρα και κατανομή του μαγνητικού πεδίου μέσω του προγράμματος FEMM της βέλτιστης λύσης από τον ASMA με βελτιστοποίηση πέντε παραμέτρων



Σχήμα 7.23: Κατανομή της πυκνότητας μαγνητικής ροής του βέλτιστου κινητήρα με εμφάνη των χρωματικό κώδικα

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	Τιμή	Διαφορές με τον αρχικό κινητήρα
Γωνία μαγνήτη σε ποσοστό επί του πολικού βήματος	78.16 %	18.16 % ↑
Ποσοστό ανισότητας δοντιών	86.79%	21.79 % ↑
Πάχος μεγάλου δοντιού	8.49 mm	1.49 mm ↑
Πάχος μαγνήτη	3.61 mm	1.36 mm ↑
Πάχος δρομέα	4.801mm	0.19 mm ↓

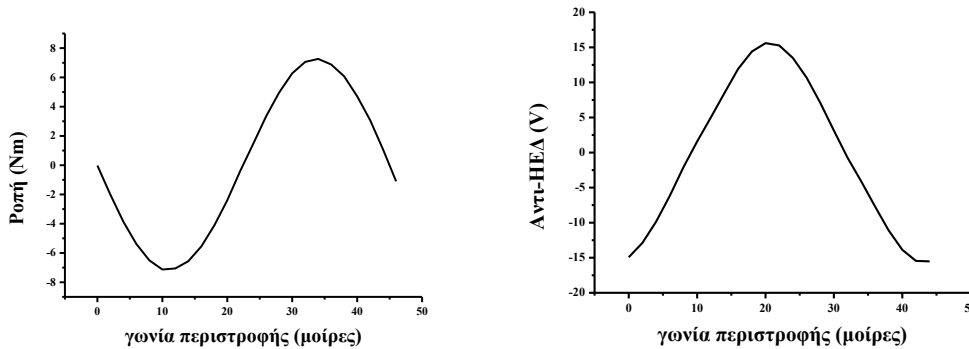
Πίνακας 7.10: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά βέλτιστης γεωμετρίας από την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση με πέντε παραμέτρους

Λειτουργικά χαρακτηριστικά από βελτιστοποίηση	Τιμή	Αντικειμενική τιμή	Ποσοστιαίες διαφορές από τα χαρακτηριστικά του αρχικού κινητήρα
Ροπή	7.33 Nm	0.9987	-
Απώλειες	35.26 W	0.7533	24.66 % ↓
Συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης (THD)	3.61 %	0.5649	41.5 % ↓
Κυμάτωση ροπής (Torque ripple)	2.49 %		45.50 % ↓

Πίνακας 7.11: Λειτουργικά χαρακτηριστικά κινητήρα με τις αντικειμενικές τους τιμές και ποσοστιαίες διαφορές από την αρχική σχεδίαση

Υπόλοιπα χαρακτηριστικά	Τιμή	Διαφορές με τον αρχικό κινητήρα
Αντι-ΗΕΔ (rms)	11.28 V	-
Ισχύς εξόδου	227.33 W	-
Απόδοση	86.57 %	4.571 % ↑
Βάρος	3.13 kg	0.07 kg ↓

Πίνακας 7.12: Υπόλοιπα χαρακτηριστικά και διαφορές από την αρχική σχεδίαση

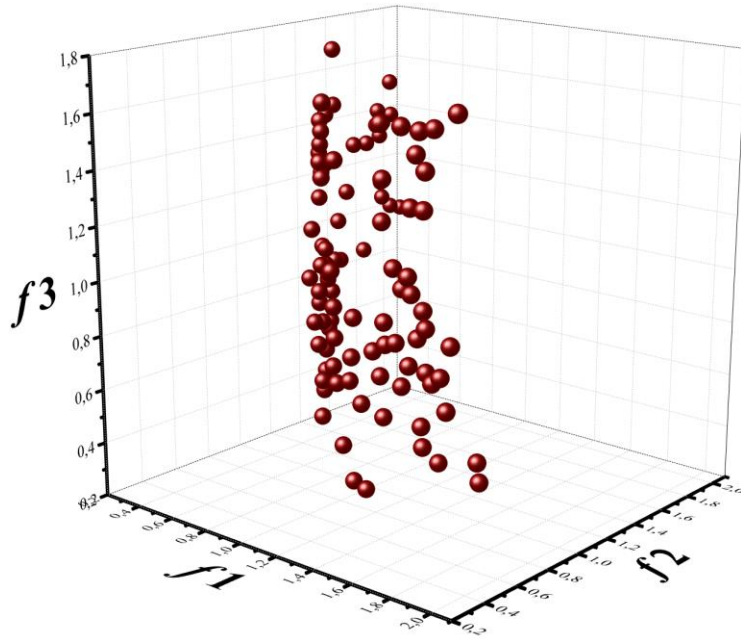


Σχήμα 7.24: Αριστερά: Κυματομορφή της ροπής σε συνάρτηση με την περιστροφή του κινητήρα. Δεξιά: Κυματομορφή της αντι-ΗΕΔ σε συνάρτηση με τη γωνία περιστροφής του κινητήρα

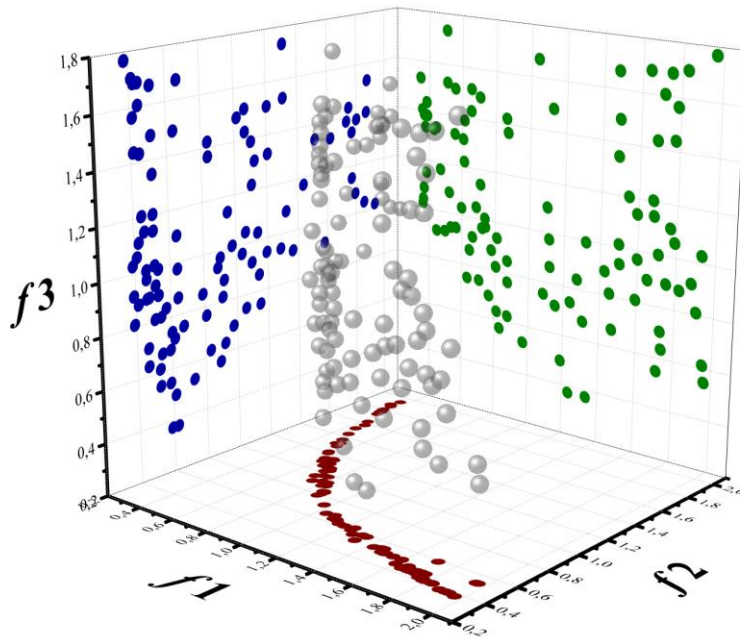
Όπως και στη μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση με πέντε παραμέτρους, βλέπουμε σημαντική αύξηση των ποσοστών της γωνίας του μαγνήτη και της ανισότητας αλλά και σημαντική αύξηση στο πάχος του δοντιού και του μαγνήτη. Παρατηρούμε πως η βελτιστοποίηση μας έδωσε έναν κινητήρα με αρκετά μεγαλύτερο πάχος δοντιών αλλά και μαγνήτη το οποίο επιτρέπει την αύξηση της πυκνότητας της μαγνητικής ροής από τους μαγνήτες και την αντίστοιχα εύκολη διέλευση της μέσω των δοντιών. Και εδώ έχουμε αύξηση της διαμέτρου του άξονα από τα 17 mm στα 20,66 mm ώστε να μην υπάρχει σφάλμα γεωμετρίας.

7.4.2.2 Βελτιστοποίηση με επτά παραμέτρους

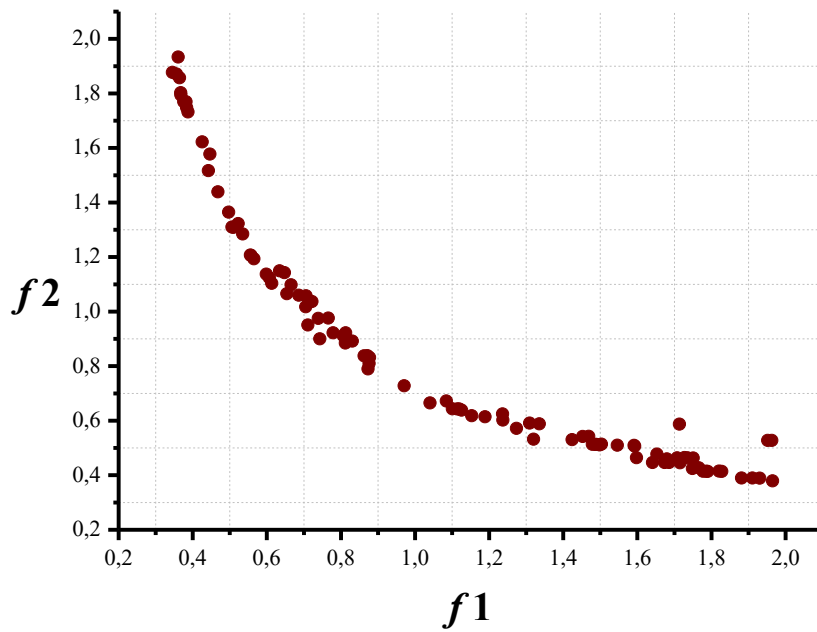
Στη συνέχεια, στον αλγόριθμο αυξήσαμε τις μεταβλητές εισόδου από πέντε σε επτά θεωρώντας πια μεταβαλλόμενα και δύο από τα κυριότερα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας, τα οποία είναι η διάμετρος διάκενου και το πάχος της μηχανής. Αυτά τα χαρακτηριστικά θεωρούνται πολύ σημαντικά, καθώς είναι αυτά που μπορούν να αλλάξουν πλήρως τη γεωμετρία της μηχανής, αλλάζοντας ταυτόχρονα σε μεγάλο ποσοστό τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του κινητήρα.



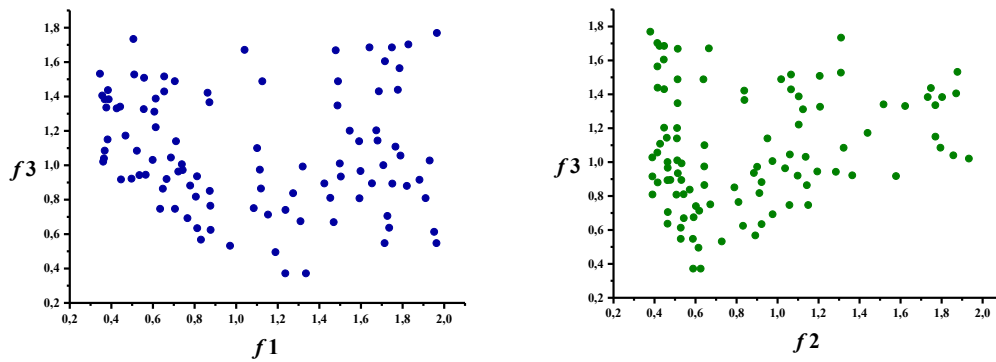
Σχήμα 7.25: Τριδιάστατο μέτωπο Pareto από τη βελτιστοποίηση με τον αλγόριθμο ASMA με επτά παραμέτρους



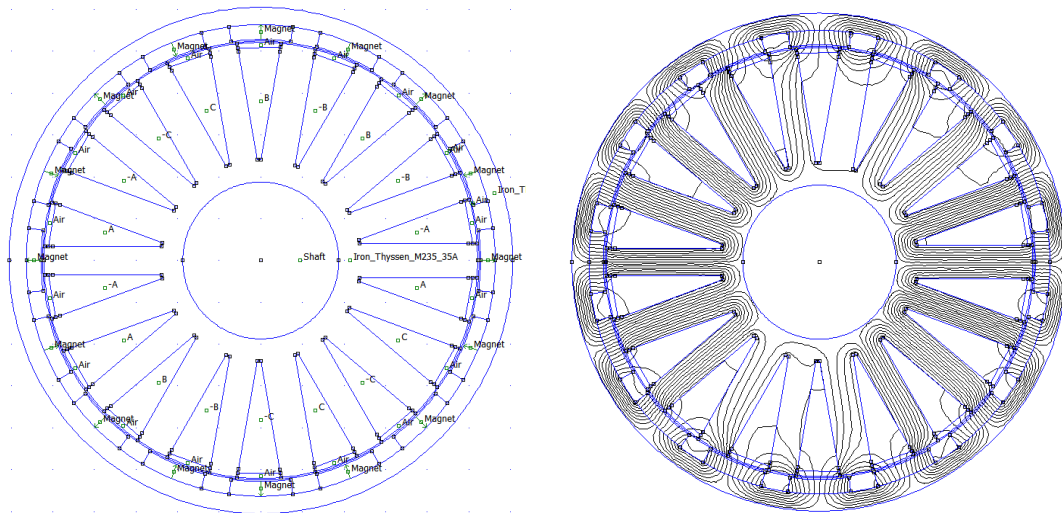
Σχήμα 7.26: Προβολές του μετώπου Pareto στις επιφάνειες που ορίζονται ανά δύο αντικειμενικές τιμές



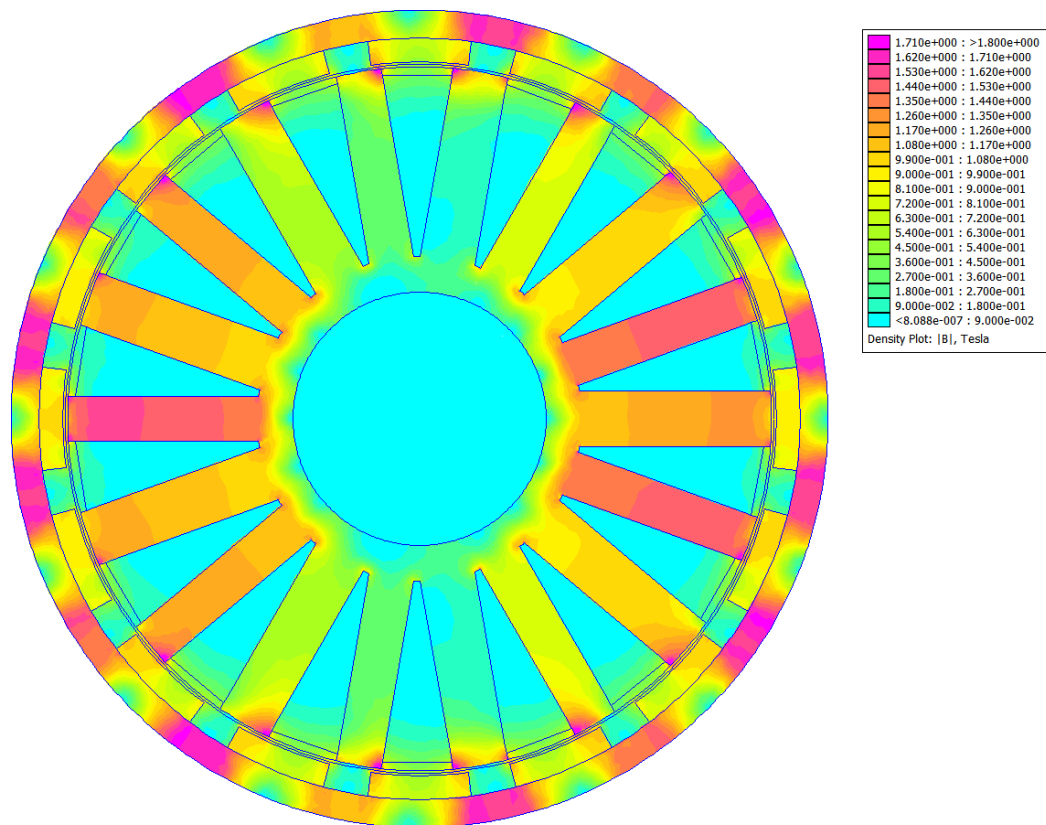
Σχήμα 7.27: Συνήθης μορφή μετώπου Pareto. Προβολή στην επιφάνεια που ορίζουν η αντικειμενική τιμή της ροπής (Objective Value 1) και των απωλειών (Objective Value 2)



Σχήμα 7.28: Προβολές στις άλλες δύο επιφάνειες του χώρου που ορίζει το μέτωπο Pareto. Αριστερά: Προβολή στην επιφάνεια που ορίζεται από την αντικειμενική τιμή της ροπής (Objective Value 1) και της συνάρτησης THD και Torque Ripple (Objective Value 3). Δεξιά: Προβολή στην επιφάνεια που ορίζεται από την αντικειμενική τιμή των απωλειών (Objective Value 2) και της συνάρτησης THD και Torque Ripple (Objective Value 3)



Σχήμα 7.29: Γεωμετρία του κινητήρα και κατανομή του μαγνητικού πεδίου της βέλτιστης λύσης από τον ASMA με βελτιστοποίηση επτά παραμέτρων



Σχήμα 7.30: Κατανομή της πυκνότητας μαγνητικής ροής του βέλτιστου κινητήρα με εμφάνιση των χρωματικό κώδικα

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	Τιμή	Διαφορές με τον αρχικό κινητήρα
Γωνία μαγνήτη σε ποσοστό επί του πολικού βήματος	78.35 %	18.35 % ↑
Ποσοστό ανισότητας δοντιών	82.38%	16.38 % ↑

Πάχος μεγάλου δοντιού	8.19 mm	1.19 mm ↑
Πάχος μαγνήτη	3.53 mm	1.28 mm ↑
Πάχος δρομέα	4.17 mm	0.82 mm ↓
Ακτίνα διάκενου	52.11 mm	2.88 mm ↓
Ενεργό μήκος	41.25 mm	6.25 mm ↑

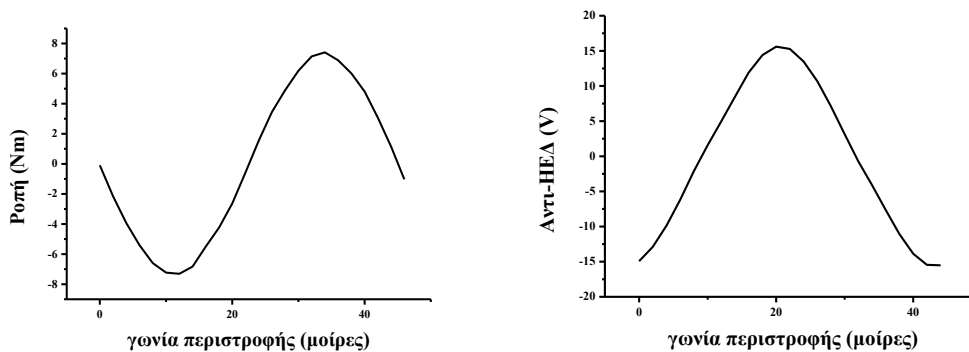
Πίνακας 7.13: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά βέλτιστης γεωμετρίας από την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση με επτά παραμέτρους

Λειτουργικά χαρακτηριστικά από βελτιστοποίηση	Τιμή	Αντικειμενική τιμή	Ποσοστιαίες διαφορές από τα χαρακτηριστικά του αρχικού κινητήρα
Ροπή	7.33 Nm	0.999	-
Απώλειες	35.92 W	0.767	23.26 % ↓
Συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης (THD)	3.79 %	0.52	38.63 % ↓
Κυμάτωση ροπής (Torque ripple)	1.95 %		57.26 % ↓

Πίνακας 7.14: Λειτουργικά χαρακτηριστικά κινητήρα με τις αντικειμενικές τους τιμές και ποσοστιαίες διαφορές από την αρχική σχεδίαση

Υπόλοιπα χαρακτηριστικά	Τιμή	Διαφορές με τον αρχικό κινητήρα
Αντι-ΗΕΔ (rms)	11.36 V	-
Ισχύς εξόδου	225.64 W	-
Απόδοση	86.26 %	4.26 % ↑
Βάρος	3.25 kg	0.05 kg ↑

Πίνακας 7.15: Υπόλοιπα χαρακτηριστικά και διαφορές από την αρχική σχεδίαση



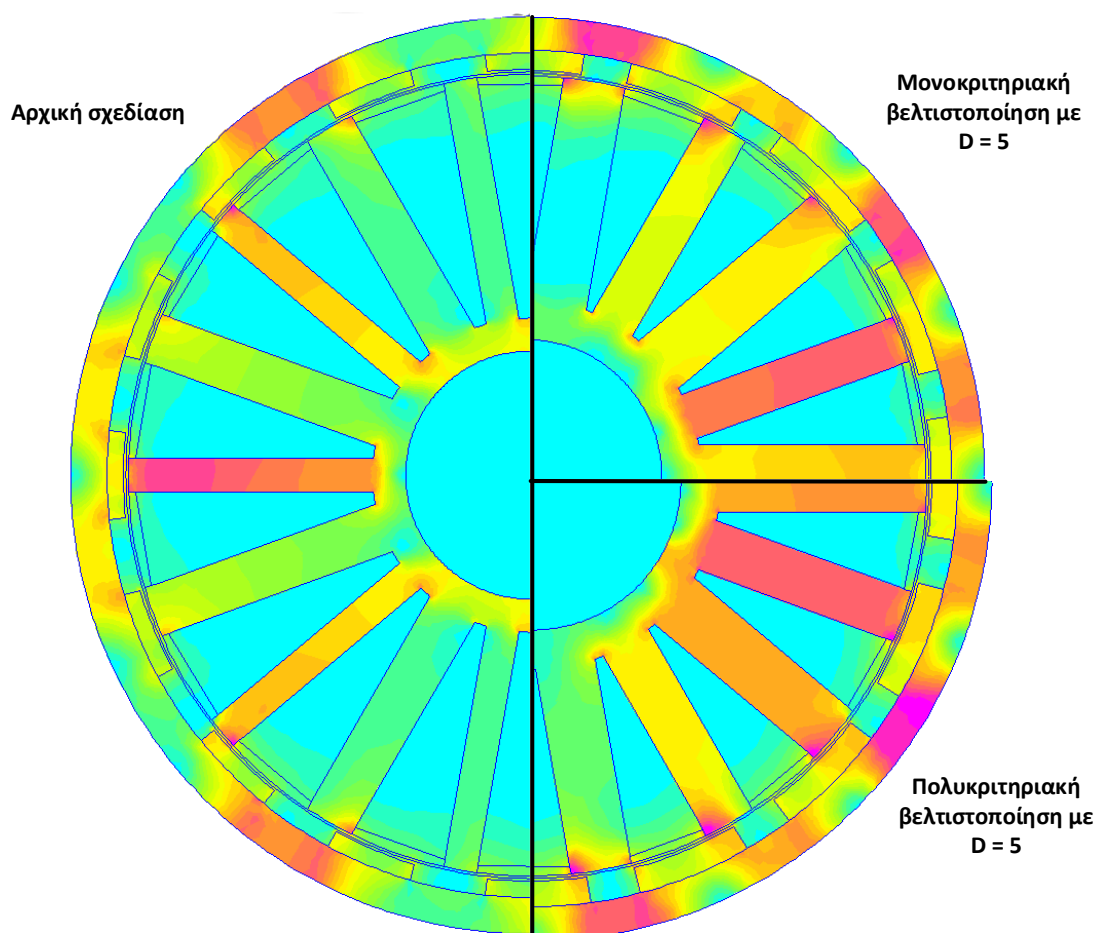
Σχήμα 7.31: Αριστερά: Κυματομορφή της ροπής σε συνάρτηση με την περιστροφή του κινητήρα. Δεξιά: Κυματομορφή της αντι-ΗΕΔ σε συνάρτηση με την περιστροφή του κινητήρα.

Στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση με τις επτά παραμέτρους βλέπουμε σημαντικές αλλαγές σχεδόν σε όλα τα παραμετροποιημένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Όλες οι λύσεις του μετώπου Pareto προτείνουν γεωμετρίες με μεγάλες αλλαγές στις τιμές αυτές, κάτι που αποδεικνύει πως η βέλτιστη λύση μπορεί να έχει την οποιαδήποτε γεωμετρία. Όπως βλέπουμε και από το μέτωπο Pareto, προτείνονται και γεωμετρίες στις οποίες η ροπή έχει αυξηθεί αρκετά, κάτι το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί στην εφαρμογή που εξετάζουμε με αλλαγές στο ενεργό μήκος του κινητήρα. Επιλέξαμε να παρουσιάσουμε μια λύση η οποία βρίσκεται στο κέντρο του μετώπου με ροπή ίση με της αρχικής σχεδίασης και περίπου ίδιο βάρος ώστε να υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης. Επίσης, η γεωμετρία αυτή δεν χρειάστηκε μεταβολές για να προσαρμοστεί στις απαιτήσεις της εφαρμογής. Παρατηρήσαμε ωστόσο πως

μέσα στο μέτωπο δίνονται αρκετές γεωμετρίες με σημαντικά μειωμένες απώλειες και συντελεστές παραμόρφωσης και κυμάτωσης ροπής, οι οποίες απαιτούν κάποια αλλαγή στο ενεργό τους μήκος, ώστε να είναι συγκρίσιμες με τη γεωμετρία της αρχικής σχεδίασης. Και σε αυτή την περίπτωση είχαμε αύξηση της διαμέτρου του στάτη από τα 17 στα 18,7 mm για λόγους ευστοχίας της γεωμετρίας.

7.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βελτιστοποιήσεων

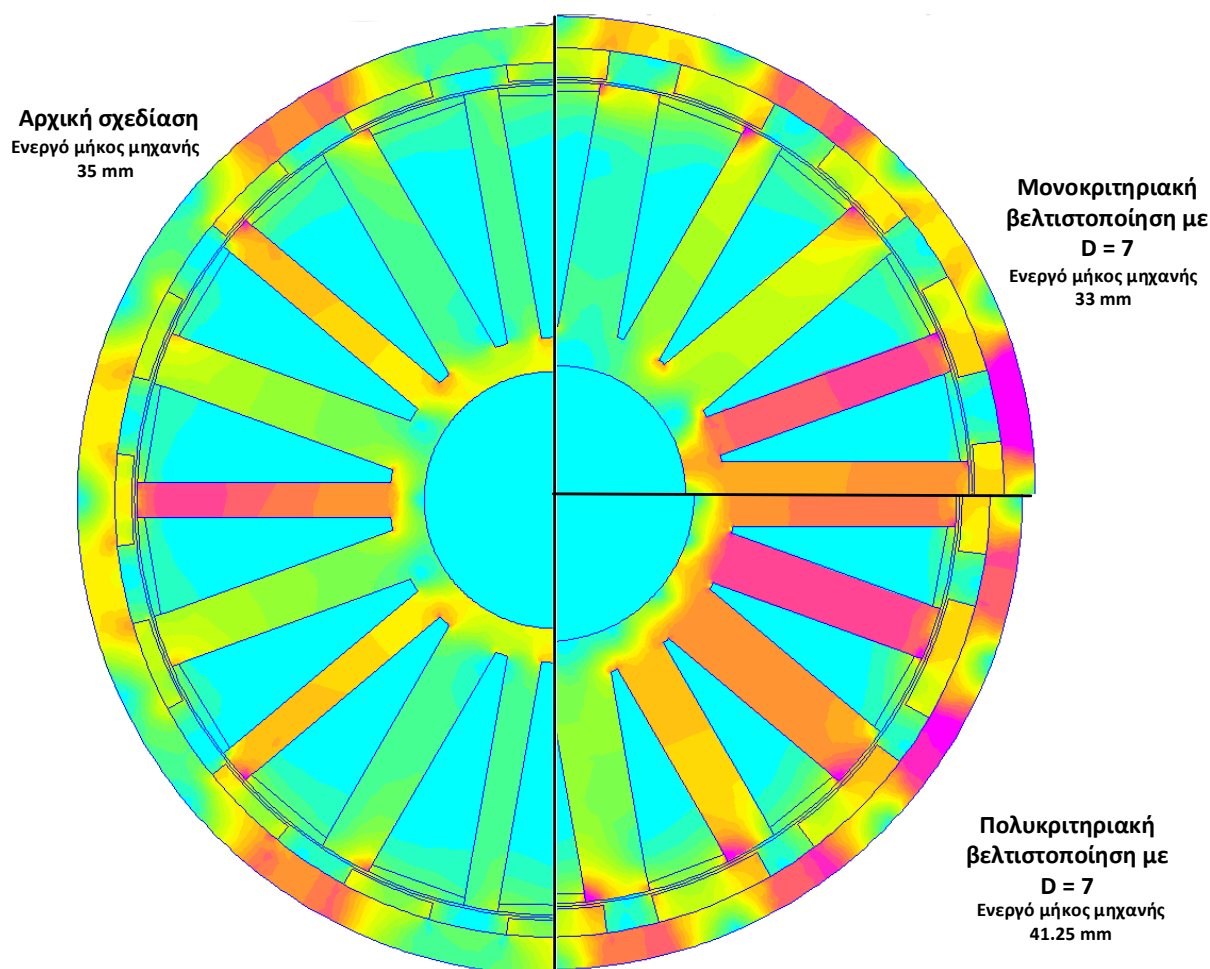
Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε όλες τις γεωμετρίες που προέκυψαν από τις βελτιστοποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν. Αρχικά θα δείξουμε μια σύγκριση της αρχικής σχεδίασης με τις γεωμετρίες που προέκυψαν από την μονοκριτηριακή και πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση με πέντε παραμέτρους και στη συνέχεια θα δείξουμε τις διαφορές της αρχικής σχεδίασης με τις γεωμετρίες που προέκυψαν από τις βελτιστοποιήσεις με τις επτά παραμέτρους.



Σχήμα 7.32: Συγκριτική παρουσίαση γεωμετριών από την μονοκριτηριακή και την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση πέντε παραμέτρων, με την αρχική σχεδίαση

Παρατηρούμε πως έχουμε σημαντική αύξηση του πλάτους του μεγάλου δοντιού του στάτη, και ταυτόχρονα μεγάλο ποσοστό ανισότητας στα δόντια. Επίσης παρατηρούμε αύξηση της διαμέτρου του άξονα με αποτέλεσμα τη μείωση του μήκους των δοντιών και συνεπώς τη μείωση των απωλειών χαλκού καθώς ο χώρος εσωτερικά της άλακας περιορίζεται και κατά συνέπεια και τα αμπερελίγματα. Επίσης παρατηρούμε αύξηση του πάχους του μαγνήτη, κυρίως στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση και ελαφρά μείωση του σώματος του δρομέα.

Στο επόμενο σχήμα δίνεται μια παρόμοια αναπαράσταση των νέων γεωμετριών από τη μονοκριτηριακή και πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση με επτά παραμέτρους, με στοιχεία για το ενεργό μήκος της μηχανής.



Σχήμα 7.33: Συγκριτική παρουσίαση γεωμετριών από την μονοκριτηριακή και την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση επτά παραμέτρων, με την αρχική σχεδίαση

Εδώ παρατηρούμε πως έχουμε αύξηση του πλάτους του μεγάλου δοντιού του στάτη καθώς επίσης και του ποσοστού ανισότητας και στις δύο γεωμετρίες που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση. Επίσης βλέπουμε αύξηση του πάχους του μαγνήτη και ελαφρά αύξηση της διαμέτρου διακένου του κινητήρα που προκάλεσε αύξηση της συνολική διαμέτρου της μηχανής. Και πάλι παρατηρούμε αύξηση στη διάμετρο του άξονα για λόγους ευστοχίας της γεωμετρίας που συντέλεσε στην ισορροπία του βάρους με αυτό της αρχικής σχεδίασης. Πιο συγκεκριμένα στη γεωμετρία που προέκυψε από την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση έχουμε αρκετά μεγάλη αύξηση στον άξονα κάτι που ισοσταθμίζει όμως σε ένα βαθμό την αύξηση του βάρους με τη αύξηση του ενεργού μήκους του κινητήρα.

Απόδοση	Αρχική σχεδίαση	Βελτιστοποίηση πέντε παραμέτρων	Βελτιστοποίηση επτά παραμέτρων
ABC-DE	82 %	85,78 %	84,62 %
ASMA		86,57 %	86,26 %

Πίνακας 7.16: Συγκριτικός πίνακας απόδοσης ανα περίπτωση βελτιστοποίησης με αυτή της αρχικής σχεδίασης

Στον πίνακα 7.16 δίνεται η απόδοση των κινητήρων της αρχικής σχεδίασης και των κινητήρων που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας με πέντε και επτά παραμέτρους. Παρατηρούμε πως έχουμε αύξηση στην απόδοση από ~2.5% έως και ~4,5% στην απόδοση του κινητήρα. Η μέγιστη απόδοση εμφανίζεται στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση πέντε παραμέτρων όπου είχαμε μεγάλη ποσοστιαία αύξηση στα χαρακτηριστικά του μαγνήτη αλλά και των δοντιών του στάτη. Στην περίπτωση αυτή η διάμετρος διακένου, κατά τη βελτιστοποίηση, παρέμενε σταθερή όπως και το ενεργό μήκος της μηχανής κάτι που επέτρεπε στη βελτιστοποίηση να διερευνήσει πολλούς διαφορετικούς συνδυασμούς διαστάσεων μαγνητών αλλά και ανισότητας δοντιών, χωρίς αν μεταβάλλει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που θα μετέβαλλαν κατά πολύ το βάρος και τη ροπή του κινητήρα.

Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό συγκεντρώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από αυτήν. Από τη διερεύνηση των βέλτιστων συνιστωσών του κινητήρα που εξετάσαμε προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα αλλά και πολύτιμες πληροφορίες, τόσο για τα συγκριτικά πλεονεκτήματα που εμφανίζουν εναλλακτικές γεωμετρίες και διαμορφώσεις που μπορούν να εφαρμοσθούν σε έναν κινητήρα μονίμων μαγνητών όσο και για τη διαδικασία βελτιστοποίησης, που βασίζεται σε μονοκριτηριακές και σε πολυκριτηριακές τεχνικές. Επίσης, αξιοποιώντας τις προαναφερόμενες μεθοδολογίες καταφέραμε να αναπτύξουμε δύο αλγόριθμους βελτιστοποίησης οι οποίοι απέδωσαν σημαντικά αποτελέσματα.

8.1 Κυριότερα συμπεράσματα

Αρχικά, επιχειρήθηκε λεπτομερής ανάλυση της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για την εύρεση των κατάλληλων γεωμετρικών χαρακτηριστικών κατά τη φάση της σχεδίασης ενός σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών. Αναλύθηκε η μεθοδολογία προσδιορισμού των λειτουργικών χαρακτηριστικών σύγχρονων κινητήρων μονίμων μαγνητών και αναπτύχθηκε κώδικας για τη σχεδίαση και ανάλυση των λειτουργικών χαρακτηριστικών του κινητήρα του οχήματος «Πυρφόρος II».

Στη συνέχεια, όσον αφορά τις μεθόδους βελτιστοποίησης που αναλύθηκαν, περιγράφηκαν οι βασικές έννοιες της μονοκριτηριακής και πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης και δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην κατηγορία των εξελικτικών πολυκριτηριακών αλγορίθμων για την εύρεση βέλτιστων μετώπων Pareto. Επιπλέον αναπτύχθηκαν δύο υβριδικοί αλγόριθμοι, ο μονοκριτηριακός ABC-DE και ο πολυκριτηριακός ASMA. Έγινε προσαρμογή των αλγορίθμων αυτών και ενσωμάτωση σε αυτούς του κώδικα σχεδίασης και ανάλυσης ενός κινητήρα μονίμων επιφανειακών μαγνητών, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του.

Η βελτιστοποίηση του κινητήρα επέφερε σημαντικά αποτελέσματα, καθώς αναλύθηκαν γεωμετρίες οι οποίες αποδίδουν καλύτερα λειτουργικά χαρακτηριστικά χωρίς να επηρεάζονται η ροπή και το βάρος του. Ουσιαστικά, προέκυψαν γεωμετρίες κινητήρων με βελτιωμένη συμπεριφορά και απόδοση μεγαλύτερη της τάξης του 4% σε σχέση με τον υφιστάμενο κινητήρα του οχήματος «Πυρφόρος II» χωρίς να επηρεάζονται τα ονομαστικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του [21]. Τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά, καθώς οι γεωμετρίες αυτές δεν θα μπορούσαν να προκύψουν μέσω ανάλυσης ευαισθησίας παραμέτρων.

Τέλος, αποδείχθηκε πως ο μονοκριτηριακός ABC-DE και ο πολυκριτηριακός αλγόριθμος ASMA, είναι σε θέση να ανταγωνιστούν με επιτυχία τον ABC και τους τρεις εξελικτικούς αλγόριθμους SPEA-II, NSGA-II και PESA-II, αντίστοιχα. Από τη σύγκριση μεταξύ αυτών διαπιστώθηκε πως οι τεχνικές που προσαρμόστηκαν στους υβριδικούς αλγόριθμους μπορούν να αποδώσουν πολύ πιο γρήγορα και αποδοτικά τη βέλτιστη λύση και το βέλτιστο μέτωπο λύσεων Pareto, κάτι το οποίο μπορεί να προσφέρει σημαντικές υπηρεσίες στη βελτιστοποίηση των ηλεκτρικών μηχανών. Με τους αλγόριθμους αυτούς υπάρχει η δυνατότητα μέσα σε λίγες μόνο επαναλήψεις να προσδιορισθούν με μεγάλη ακρίβεια, οι περιοχές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών ενός κινητήρα στις οποίες εμφανίζονται τα βέλτιστα λειτουργικά χαρακτηριστικά.

8.2 Επιστημονική συνεισφορά της εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία υλοποιήθηκαν και αναλύθηκαν δύο νέοι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πληθώρα εφαρμογών, όπως απέδειξε η συγκριτική τους αξιολόγηση με άλλους δημοφιλείς αλγόριθμους. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των δυο αυτών αλγορίθμων είναι ότι μπορούν να συγκλίνουν πολύ γρήγορα στα βέλτιστα σημεία του χώρου αποτίμησης είτε αυτά αντιστοιχούν σε ένα μέτωπο Pareto είτε σε μια βέλτιστη λύση, που προέκυψε από μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση. Ένας κατάλληλος τομέας εφαρμογής αυτών των αλγορίθμων, είναι η σχεδίαση ηλεκτρικών μηχανών, στην οποία χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με πρόγραμμα ανάλυσης βασισμένο στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η χρήση αυτού του τύπου των προγραμμάτων καθιστά τη διαδικασία βελτιστοποίησης σχετικά χρονοβόρα με αποτέλεσμα η ανάγκη χρησιμοποίησης μεθόδου με γρήγορη σύγκλιση να κρίνεται σοβαρής σημασίας.

Τέλος, με την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής διαπιστώθηκε ότι στην κατηγορία των κινητήρων μονίμων μαγνητών που μελετήθηκαν, η προκαταρκτική σχεδίαση σε συνδυασμό με τεχνικές ανάλυσης ευαισθησίας παραμέτρων οδηγεί συχνά σε τοπικό ακρότατο με αποτέλεσμα να καθίσταται αναγκαία η εφαρμογή σύνθετων τεχνικών βελτιστοποίησης όπως αυτές που αναπτύχθηκαν.

8.3 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση

Η παρούσα διπλωματική εργασία, θα μπορούσε να συνεχισθεί με την κατασκευή μιάς εκ των προτεινομένων διαμορφώσεων κινητήρα που προέκυψαν και την πειραματική επιβεβαίωση των βελτιωμένων λειτουργικών χαρακτηριστικών που υπολογίσθηκαν.

Βιβλιογραφία

- [1] Husain, Iqbal, *Electric and hybrid vehicles: design fundamentals*, New York, 2003, CRC Press
- [2] AENews Electric cars
- [3] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, JR., Stephen D. Umans, *Electric Machinery* 6th Edition
- [4] Gieras και Wing, *Permanent Magnet Motor Technology*, Basel, Switzerland: Marcel Dekker Inc., 2002.
- [5] A. Medina, G. Pulido και J. Torres, *Comparative Study of Neighbourhood Topologies for Particle Swarm Optimizers*, στο International Joint Conference of Computational Intelligence, Madeira, Portugal, 2009.
- [6] Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen, Valeria Hrabovcova, *Design of Rotating Electrical Machines*, 2009
- [7] D. Meeker, *Finite Element Method Magnetics*, 2015
- [8] N. Bianchi, *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements*, 2005
- [9] Mays, L.W, and Y.K Tung, *Systems analysis, in: Water Resources Handbook*, New York, 1996
- [10] Pierre, D. A., *Optimization Theory with Applications*, New York, 1986
- [11] Μίνωας Μπενιακάρ, *Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση κινητήρων με θεώρηση των απωλειών των μονίμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης*, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, 2014, ΕΜΠ
- [12] K. Deb, *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, Kampur, 2001
- [13] Huband, S.; Hingston, P.; Barone, L.; While, L., *A review of multiobjective test problems and a scalable test problem toolkit*, in *Evolutionary Computation*, IEEE Transactions on , vol.10, no.5, pp.477-506, Oct. 2006J. Clerk Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp. 68-73.
- [14] Y. Cao, B. J. Smucker, T. J. Robinson, *On using the hypervolume indicator to compare Pareto fronts: Applications to multi-criteria optimal experimental design*, *Journal of Statistical Planning and Inference*, Volume 160, 2015
- [15] D. Karaboga, B. Basturk, *A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm*, *J. Global Optimiz.*, vol. 39, pp. 459–471, 2007
- [16] R. Storn, K. Price, *Differential evolution: A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces*, Berkeley, 1995
- [17] E. Zitzler , M. Laumanns, L. Thiele, *SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm*, 2001

- [18] N. Srinivas and K. Deb, *Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms*, Evolutionary Computation, 1994
- [19] Deb, K. Pratap, A. Agarwal, S. Meyarivan, T., *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*, in Evolutionary Computation, IEEE Transactions on , vol.6, no.2, pp.182-197, 2002
- [20] Corne, D.W. Jerram, N.R. Joshua, D.K. Oates, M.J., *PESA-II: Region-based Selection in Evolutionary Multiobjective Optimization*
- [21] Χρήστος Κρασόπουλος, *Σχεδίαση και κατασκευή κινητήρα μονίμων μαγνητών για πρότυπο ηλεκτρικό όχημα*, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2013, ΕΜΠ
- [22] Lowrie, *Fundamentals of Geophysics*
- [23] C.A Coello Coello, G.B Lamont, D.A. Van Veldhuizen, *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*, 2nd edition, 2007