



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

**Σχεδίαση και βελτιστοποίηση λειτουργίας κινητήρων
μονίμων μαγνητών: ανάπτυξη αλγορίθμων εκμάθησης
και θεώρηση του κύκλου φόρτισης**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΧΡΗΣΤΟΥ Θ. ΚΡΑΣΟΠΟΥΛΟΥ

Αθήνα, Νοέμβριος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

**Σχεδίαση και βελτιστοποίηση λειτουργίας κινητήρων
μονίμων μαγνητών: ανάπτυξη αλγορίθμων εκμάθησης
και θεώρηση του κύκλου φόρτισης**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΧΡΗΣΤΟΥ Θ. ΚΡΑΣΟΠΟΥΛΟΥ**

Συμβουλευτική Επιτροπή : Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Στέφανος Ν. Μανιάς

Σταύρος Α. Παπαθανασίου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 23η Νοεμβρίου 2017.

.....
Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Κωνσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γεώργιος Σταυρακάκης
Καθηγητής
Πολυτεχνείου Κρήτης

Αθήνα, Νοέμβριος 2017

.....
Χρήστος Θ. Κρασόπουλος

Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Χρήστος Θ. Κρασόπουλος, 2017.
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.

*Στη μνήμη του πατέρα μου,
στη Γεωργία, την Ελένη και την Παναγιώτα*

*«...πᾶσά τε ἐπιστήμη χωριζομένη δικαιοσύνης καὶ τῆς ἄλλης ἀρετῆς
πανουργία, οὐ σοφία φαίνεται.»*

Πλάτων

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η ανάπτυξη σύνθετων μεθόδων βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων για τον προσδιορισμό γεωμετριών ηλεκτρικών μηχανών μονίμων μαγνητών και μεθοδολογιών διαχείρισης ενέργειας αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων. Στα πλαίσια της ερευνητικής διαδικασίας αναπτύχθηκαν υβριδικές στρατηγικές νοημοσύνης σμήνους που επιτυγχάνουν ταχύτερη και πιο αξιόπιστη επίλυση, ενώ παράλληλα επιτρέπουν αποτελεσματικά τη θεώρηση πολλαπλών σημείων λειτουργίας και κατασκευαστικών αβεβαιοτήτων με τη βοήθεια αλγορίθμων εκμάθησης μηχανής. Εξετάστηκαν τοπολογίες επιφανειακού μαγνήτη εσωτερικού και εξωτερικού δρομέα, χαμηλής και υψηλής ταχύτητας, με συγκεντρωμένα τυλίγματα κλασματικής αύλακας, μέσω της ανάπτυξης αυτοματοποιημένων παραμετρικών μοντέλων που βασίζονται σε αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Αντίστοιχα, κατασκευάστηκαν δυναμικά μοντέλα προσομοίωσης της κίνησης ηλεκτρικών οχημάτων με δυνατότητα θεώρησης των ελεγκτών ταχύτητας και ροπής και υπολογισμού της καταναλισκόμενης ενέργειας μέσω του χάρτη απόδοσης του κινητηρίου συστήματος. Όλες οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν επιβεβαιώθηκαν πειραματικά και πιστοποιήθηκαν τα πλεονεκτικά τους χαρακτηριστικά.

Πιο συγκεκριμένα, αρχικά, αναπτύχθηκε διαδικασία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης που βασίζεται σε μετα-ευρετικούς αλγορίθμους νοημοσύνης σμήνους για το σχεδιασμό 16-πολικής μηχανής επιφανειακών μαγνητών εξωτερικού δρομέα σε ένα σημείο λειτουργίας για εφαρμογή πρότυπου ελαφρού ηλεκτρικού οχήματος εξοικονόμησης ενέργειας. Η προτεινόμενη στρατηγική επέδειξε γρηγορότερη και πιο αξιόπιστη σύγκλιση σε σχέση με γνωστότερους και καταξιωμένους αλγορίθμους της ίδιας κλάσης βάσει δοκιμών τόσο σε ακολουθία μαθηματικών συναρτήσεων διαβαθμισμένης δυσκολίας όσο και στην εφαρμογή της ηλεκτρικής μηχανής μονίμων μαγνητών. Σε επόμενο στάδιο αναπτύχθηκε σύνθετη μεθοδολογία βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων που επιτυγχάνει τον υπολογισμό του συνολικού χάρτη απόδοσης 2-πολικής μηχανής εσωτερικού δρομέα και κατ' επέκταση της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας ενός ηλεκτρικού οχήματος στον οδηγικό κύκλο με χρήση δυναμικού μοντέλου. Βασικό πλεονέκτημα της στρατηγικής είναι η ανάπτυξη υποκατάστατης μοντελοποίησης μέσω ενός αλγορίθμου εκμάθησης μηχανής και ενός επαναληπτικού σχήματος εκπαίδευσης από αποτελέσματα πεπερασμένων στοιχείων που ελαχιστοποιεί το σφάλμα πρόβλεψης. Επιχειρήθηκε εντοπισμός των τάσεων των βέλτιστων λύσεων τόσο στο χώρο αποτίμησης όσο και στο χώρο αναζήτησης και η διαδικασία επιβεβαιώθηκε πειραματικά μέσω της κατασκευής πρωτοτύπου μηχανής και διεξαγωγής μετρήσεων. Σε επόμενο βήμα διατυπώνεται ένα καινούριο κριτήριο ευρωστίας κατάλληλο για θεώρηση αυτής σε προβλήματα βελτιστοποίησης πολλών κριτηρίων. Η προκύπτουσα μεθοδολογία δοκιμάζεται σε μαθηματικές συναρτήσεις και εφαρμόζεται στο βέλτιστο εύρωστο σχεδιασμό 2-πολικής μηχανής υψηλής ταχύτητας με τη βοήθεια αλγορίθμου εκμάθησης μηχανής ώστε να επιτευχθεί εφικτή υπολογιστική πολυπλοκότητα του προβλήματος. Κατόπιν επιχειρείται η μοντελοποίηση και πειραματική επιβεβαίωση θερμικών και μηχανικών φαινομένων, των οποίων η μελέτη είναι απαραίτητη στο πεδίο εφαρμογών της υψηλής ταχύτητας. Πραγματοποιείται δηλαδή θερμική, αξονοδυναμική και δομική ανάλυση της διπολικής μηχανής μονίμων μαγνητών για τον προσδιορισμό του μέγιστου εφικτού ορίου περιστροφής της βάσει

των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της κατασκευής και των υλικών που χρησιμοποιούνται. Διερευνάται ακόμη η επίπτωση της μεταβολής των διαφόρων γεωμετρικών χαρακτηριστικών του δρομέα στη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής. Τέλος, προτείνεται μεθοδολογία βελτιστοποίησης της ενεργειακής κατανάλωσης και της χρονικής διάρκειας διαδρομής ηλεκτρικού οχήματος μέσω της εύρεσης κατάλληλων κατανομών ταχύτητας και ροπής επιτρέποντας μικρή ελεγχόμενη υπερφόρτιση του κινητηρίου συστήματος. Η στρατηγική βασίζεται σε αυτοτελή βήματα και προτεινόμενη τεχνική κατάτμησης της διαδρομής βάσει των υψομετρικών χαρακτηριστικών. Προσομοιώσεις με χρήση δυναμικού μοντέλου και πειραματικά αποτελέσματα σε πραγματικές οδηγικές συνθήκες επιβεβαιώνουν τα σημαντικά οφέλη σε σχέση με την κλασσική τεχνική οδήγησης με σταθερή ταχύτητα.

Λέξεις Κλειδιά: Ηλεκτρικά οχήματα, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, μέτωπο Pareto, κινητήρες μόνιμων μαγνητών, ταχύτητα σύγκλισης, εύρωστος σχεδιασμός, αβεβαιότητα, εκμάθηση μηχανής, κατασκευαστικές ατέλειες, αλγόριθμος ANFIS, κύκλος οδήγησης, χάρτης απόδοσης, ενεργειακή αποδοτικότητα, πυκνότητα ροπής, προφίλ ταχύτητας, προφίλ ορίων ροπής, συγκεντρωμένα τυλίγματα κλασματικής αύλακας, παραμετρική σχεδίαση.

Abstract

The present work undertakes the development of composite multicriteria optimization techniques in order to determine permanent magnet electrical machine geometries and energy management profiles for electric vehicles. Within this research framework, hybrid swarm intelligence strategies have been developed that accomplish faster and more stable solution, while they enable effective multiple operating points consideration as well as manufacturing uncertainties, by means of machine learning algorithms. Permanent magnet geometries involving internal and external rotor topologies have been examined, under low and high-speed operating conditions, with fractional slot concentrated windings, through the development of automated parametric models based on finite element analysis. Dynamic simulation models of electric vehicles operation have been developed, respectively, that consider the speed and torque controllers and compute the consumed energy through the efficiency map of the propulsion system. All the developed methods have been tested experimentally, and their advantages have been validated.

More specifically, initially, a multicriteria optimization routine was developed for the design of an outer rotor 16-pole traction machine with surface permanent magnets for a prototype light electric vehicle. It is based on meta-heuristic swarm intelligence algorithms and works best in cases of a single or a few operating points. The proposed strategy exhibited faster and more stable convergence with respect to well-known and established algorithms of the same class, based on test function suite and motor application assessments. In a next stage, a composite multiple criteria optimization methodology has been developed that enables the computation of the complete efficiency map of the internal rotor two-pole machine and consequently the total consumed energy of an electric vehicle during the driving cycle with the use of a dynamic model. The strategy key developments lie on a finite element surrogate modeling via a machine learning algorithm and on an iterative training scheme that minimizes the prediction error. Efforts were made to track the trends of the optimum solutions in the evaluation and search spaces and the procedure was experimentally tested via a prototype machine construction and measurements. In a next step, a new robustness criterion has been expressed, that considers multiple criteria during optimization in an objective nature. The resulting methodology has been assessed through test functions and has been applied in the robust optimal design of a high-speed double pole machine by using a machine learning routine so that feasible computational complexity is achieved. Afterwards, modeling and experimental validation of thermal and mechanical phenomena that need to be considered in electrical machine high-speed operation has been undertaken. Thermal, rotor dynamic and structural analysis has been performed for the two-pole permanent magnet motor to determine the maximum achievable rotating speed in terms of geometrical characteristics of the structure and the materials used. The correlation between the various geometric dimensions of the rotor with the maximum rotating speed have also been investigated. Finally, an optimization methodology of the energy consumption and trip time of a purely electric vehicle has been suggested to determine appropriate speed and torque limit profiles tolerating limited overloading of the traction motor. The proposed strategy is step-wise, and an itinerary segmentation technique based on

the road elevation profile has been introduced. Dynamic model simulations and experimental results under real driving conditions highlight the significant benefits with respect to the classic steady speed driving technique.

Keywords: Electric vehicles, finite element method, multiobjective optimization, Pareto front, permanent magnet motors, convergence speed, robust design, uncertainty, machine learning, manufacturing imperfections, ANFIS algorithm, driving cycle, efficiency map, energy efficiency, torque density, torque limit profile, speed profile, fractional slot concentrated windings, parametric design.

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα της διατριβής μου Καθηγητή κ. Αντώνιο Κλαδά για την αμέριστη υποστήριξη και συμπαράσταση του και την αδιάλειπτη επίβλεψη της εργασίας, καθώς και τα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, τους Καθηγητές κ. Στέφανο Μανιά και κ. Σταύρο Παπαθανασίου για την επιστημονική τους συνδρομή.

Ευχαριστώ για τη συμμετοχή τους στην επταμελή εξεταστική επιτροπή, τον Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Γεώργιο Σταυρακάκη και τους Καθηγητές ΕΜΠ κκ. Ιωάννη Ψαρρά, Νικόλαο Χατζηαργυρίου, Γεώργιο Κορρέ και Κωνσταντίνο Βουρνά.

Ακόμη, ευχαριστώ τους Διπλωματούχους Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς ΕΜΠ Η. Καραφυλλάκη, Ι. Αρμούτη, Α. Μπέζα, Σ. Δάβαρη, Ι. Παναγόπουλο, Ι.Ε. Κουκουβίνη, Α. Κορωνίδα για τη συνεργασία τους στα πλαίσια εκπόνησης των διπλωματικών τους εργασιών.

Επιθυμώ να εκφράσω επίσης ευχαριστίες σε όλους αυτούς τους ανθρώπους, η συνεργασία με τους οποίους ξεπέρασε τα στενά πλαίσια της επαγγελματικής συναναστροφής. Η συνεργασία που προκαλεί τελικά μία άσβεστη νοσταλγία των ημερών εκπόνησης της παρούσας διατριβής. Τους υποψήφιους διδάκτορες Αλέξανδρο Αλεξάνδρου, Αποστόλη Διαμαντή, Βασίλη Λάζαρη, Άγγελο Μοσχούδη και τους διδάκτορες Θανάση Σαρηγιαννίδη, Παναγιώτη Κακοσίμο, Χάρη Πάτσιο, Ελένη Γατή, Γεώργιο Καμίτση και Ευστράτιο Μπατζέλη. Ακόμη, ιδιαίτερα τον Παναγιώτη Ζάννη, ΕΤΕΠ του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος. Η βοήθεια του κ. Ζάννη σε όλα τα τεχνικά και κατασκευαστικά ζητήματα υπήρξε πάντοτε απρόσκοπτη και άνευ όρων. Πολλά τμήματα της εργασίας δεν θα ήταν εφικτά χωρίς την καταλυτική του παρέμβαση. Ξεχωριστή αναφορά οφείλω στον διδάκτορα και φίλο Μίνωα Μπενιακάρ που με βοήθησε όποτε και αν το χρειαζόμουν, που δεν δίστασε να συνδράμει επιστημονικά με όποιο τρόπο ήταν εφικτό, από τη στιγμή που ξεκίνησα μαζί του τη διπλωματική μου εργασία, μέχρι και τώρα. Δεν θα ήταν υπερβολή να επισημάνω, επίσης, τον καθοριστικό του ρόλο στη λήψη της απόφασης για την εκπόνηση της διατριβής.

Ένα μεγάλο μέρος των ευχαριστιών δεν μπορεί παρά να ανήκει στην ομάδα «Προμηθέας». Υπήρξε πηγή επιστημονικής έμπνευσης, εφαλτήριο μεγάλων κατορθωμάτων και ζυμωτήριο προσωπικότητας. Δύο χρόνια συμμετοχής και δύο χρόνια αρχηγίας αφήνουν ανεξίτηλα τα σημάδια της εμπειρίας στη συνεργασία με μηχανικούς και ανθρώπους. Τρία πανευρωπαϊκά βραβεία επισφραγίζουν την επιτυχία του εγχειρήματος. Κάθε μέλος της ομάδας από το 2013 μέχρι και το 2016 συνέβαλλε σε αυτά, περισσότερο ή λιγότερο, και κάθε μέλος -ανεξαιρέτως- αξίζει την ευγνωμοσύνη μου για όλες τις δύσκολες ή όμορφες στιγμές της συνεργασίας. Επειδή δεν μπορώ να αναφερθώ ονομαστικά σε όλους τους συνεργάτες, λόγω μεγάλου πλήθους, θα σταθώ κυρίως σε τρία πρόσωπα που κατά τα χρόνια της αρχηγίας μου επέδειξαν υπερβάλλοντα ζήλο και ξεχώρισαν: τον Σεβαστιανό Πολίτη, την Ιωάννα Αρμούτη και το Νικόλαο Νταβαρίνο. Φυσικά, διαχρονικοί πυλώνες αυτής της προσπάθειας υπήρξαν και εδώ, αφενός, ο κ. Κλαδάς που υπήρξε πάντοτε θερμός και έμπρακτος υποστηρικτής,

αφετέρου, ο κ. Ζάννης που με το μεράκι και την αγάπη του μας ενέπνευσε και μας συνέδραμε σε τεχνικό και ψυχολογικό επίπεδο.

Κλείνοντας, δεν θα μπορούσα να λησμονήσω την οικογένεια μου, για την αξιοθαύμαστη συμπαράσταση και υπομονή της όλα αυτά τα χρόνια. Η οικογένεια έπαιξε και τον πρωταγωνιστικό ρόλο για την ολοκλήρωση της διατριβής, καθώς οι συνθήκες ανέδειξαν πολλές φορές ως σημαντικότερη παράμετρο την υποστήριξη, παρά την επιστημονική συνδρομή. Ευχαριστώ ιδιαίτερα τη μητέρα μου Γεωργία που είχε το μεγαλύτερο φορτίο και κατόπιν την Ελένη, την Παναγιώτα, το Χρήστο και τον Αιμιλιανό. Ακόμη, τον Ευθύμιο, την Κωνσταντίνα και τη Παναγιώτα. Τέλος, τον Αρχιμανδρίτη π. Νικόλαο Κουμεντάκη που αποτελεί για μένα ζωντανό και διαχρονικό πρότυπο ανθρώπου που δεν διστάζει να αρθρώσει και να υπηρετήσει την αλήθεια, ανεξάρτητα από τις συνέπειες. Ένα πρότυπο ανιδιοτελούς προσφοράς και αγάπης. Το παράδειγμα και οι συμβουλές του με καθοδήγησαν στις σωστές επιλογές σε κομβικά σημεία της παρούσης διατριβής και όχι μόνο.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	17
1.1 Τοποθέτηση του προβλήματος.....	17
1.1.1 Γενικό πλαίσιο	17
1.1.2 Μεθοδολογικό πεδίο.....	18
1.2 Αντικείμενο και ερευνητικοί στόχοι	20
1.3 Διάρθρωση της εργασίας.....	22
Κεφάλαιο 2. Σχεδιομελέτη κινητήρων μονίμων μαγνητών	25
2.1 Εισαγωγή.....	25
2.2 Επιλογή διαμόρφωσης κινητήρα.....	26
2.2.1 Κινητήρες επιφανειακών μόνιμων μαγνητών	26
2.2.2 Κινητήρες εσωτερικά επιφανειακών μαγνητών	26
2.2.3 Κινητήρες εσωτερικών μαγνητών	26
2.2.4 Κινητήρες εσωτερικού και εξωτερικού δρομέα.....	27
2.3 Προκαταρκτική σχεδίαση	28
2.3.1 Διαστασιολόγηση διακένου	28
2.3.1.1 Πάχος διακένου	28
2.3.1.2 Ειδική μαγνητική φόρτιση	29
2.3.1.3 Ειδική ηλεκτρική φόρτιση.....	29
2.3.1.4 Επιφάνεια διακένου	30
2.3.2 Αναλογία διαστάσεων D_g και L	31
2.3.3 Προσδιορισμός κύριων χαρακτηριστικών στάτη	32
2.3.3.1 Διαμόρφωση τυλιγμάτων	34
2.3.4 Μελέτη χαρακτηριστικών δρομέα.	39
2.4 Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.....	40
2.4.1 Επίλυση μαγνητοστατικών προβλημάτων	40
2.4.2 Οριακές συνθήκες	42
2.4.3 Διαδικασία ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία.....	43
2.4.3.1 Σχεδίαση και πλεγματοποίηση	43
2.4.3.2 Υπολογισμός μέσης ροπής και κυμάτωσης ροπής.....	45
2.4.3.3 Υπολογισμός επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης.....	46
2.4.3.4 Υπολογισμός απωλειών	47
2.4.3.4.1 Απώλειες χαλκού	47
2.4.3.4.2 Απώλειες πυρήνα	49
2.4.3.4.3 Απώλειες μόνιμων μαγνητών	50
2.4.3.4.4 Απώλειες αεροδυναμικής αντίστασης	51
2.4.3.5 Υπολογισμός απόδοσης.....	51
2.4.3.6 Υπολογισμός αυτεπαγωγών ευθέως και εγκάρσιου άξονα	52
2.4.3.7 Υπολογισμός ροπής αδράνειας	52
2.5 Θερμική ανάλυση	53
2.5.1 Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας.....	53
2.5.2 Οριακές Συνθήκες.....	56
Κεφάλαιο 3. Εύρωση πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση	59
3.1 Εισαγωγή.....	59
3.2 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση	59
3.2.1 Αντίθεση κριτηρίων	60
3.2.2 Διττή προσέγγιση προβλημάτων πολλαπλών κριτηρίων.....	61
3.2.3 Πλεονεκτήματα ιδανικής πολυκριτηριακής μεθόδου	63
3.3 Μαθηματική διατύπωση πολυκριτηριακού προβλήματος.....	64
3.3.1 Γραμμικότητα προβλημάτων	65

3.3.2	Κυρτότητα προβλημάτων	66
3.3.3	Η έννοια της κυριαρχίας	67
3.3.4	Ορισμός βέλτιστου κατά Pareto	68
3.3.5	Σύνολο και μέτωπο Pareto	69
3.4	Εύρωστη βελτιστοποίηση	70
3.5	Δοκιμαστικά προβλήματα	71
3.6	Μέτρα επίδοσης πολυκριτηριακών αλγορίθμων	74
3.6.1	Απόσταση γενιών	75
3.6.2	Δείκτης ϵ	76
3.6.3	Κριτήριο υπερόγκου	76
3.6.4	Δείκτης συνεισφοράς	78
Κεφάλαιο 4. Βελτιστοποίηση γεωμετρίας κινητήρα μονίμων μαγνητών εξωτερικού		
δρομέα για πρότυπο μονοθέσιο ηλεκτρικό όχημα		81
4.1	Εισαγωγή	81
4.2	Υβριδικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης	83
4.3	Συγκριτική αξιολόγηση με δοκιμαστικές συναρτήσεις	85
4.4	Εφαρμογή στο βέλτιστο σχεδιασμό σύγχρονης μηχανής επιφανειακών μονίμων μαγνητών για πρωτότυπο ηλεκτρικό όχημα	87
4.5	Συμπεράσματα	90
Κεφάλαιο 5. Βελτιστοποίηση γεωμετρίας κινητήρα μονίμων μαγνητών εσωτερικού		
δρομέα για πρότυπο μονοθέσιο ηλεκτρικό όχημα		93
5.1	Εισαγωγή	93
5.2	Μεθοδολογία	95
5.2.1	Προφίλ βελτιστοποίησης	95
5.2.2	Προτεινόμενη στρατηγική βελτιστοποίησης	96
5.2.3	ANFIS για τον υπολογισμό του χάρτη απόδοσης της μηχανής μονίμων μαγνητών	100
5.2.4	Προσδιορισμός κεντροειδούς ροπής μηχανής μονίμων μαγνητών	101
5.3	Αποτελέσματα βελτιστοποίησης	105
5.4	Πειραματική επιβεβαίωση	108
5.5	Συμπεράσματα	109
Κεφάλαιο 6. Εύρωστη πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση γεωμετρίας μηχανής υψηλής ταχύτητας για πρότυπο διθέσιο ηλεκτρικό όχημα πόλης		
111		111
6.1	Εισαγωγή	111
6.2	Μεθοδολογία	113
6.2.1	Διαδικασία εύρωστης βελτιστοποίησης	113
6.2.2	Υπολογισμός WPF με ANFIS	114
6.2.3	Επικύρωση μεθοδολογίας με δοκιμαστικές συναρτήσεις	115
6.3	Εύρωστη βελτιστοποίηση μηχανής υψηλής ταχύτητας	116
6.4	Συμπεράσματα	121
Κεφάλαιο 7. Θερμική και Μηχανική Ανάλυση Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών Υψηλής Ταχύτητας		
123		123
7.1	Εισαγωγή	123
7.2	Θερμική Ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων	124
7.2.1	Γεωμετρία σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών	124
7.2.2	Ορισμός οριακών συνθηκών	126
7.2.3	Απώλειες Κινητήρα	127
7.2.4	Δισδιάστατη Θερμική Ανάλυση	128
7.2.4.1	Τομή κάθετα στον άξονα της μηχανής	128
7.2.4.2	Τομή παράλληλα στον άξονα της μηχανής	129
7.2.4.3	Προσομοιωμένα αποτελέσματα	131

7.2.4.3.1	Τομή κάθετη στον άξονα της μηχανής	131
7.2.4.3.2	Τομή παράλληλα στον άξονα της μηχανής	133
7.2.4.3.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων δισδιάστατης ανάλυσης	134
7.2.5	Τρισδιάστατη Θερμική Ανάλυση.....	135
7.2.6	Σύγκριση προσομοιωμένων αποτελεσμάτων	139
7.2.7	Πειραματική Επιβεβαίωση.....	140
7.2.7.1	Πειραματική διάταξη.....	140
7.2.7.2	Σύγκριση μεθόδων προσομοίωσης με πειραματικά αποτελέσματα	140
7.3	Αξονοδυναμική ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων	143
7.3.1	Μοντελοποίηση και ανάλυση δρομέα.....	144
7.3.1.1	Συσχετισμός λεπτότητας άξονα με τις φυσικές συχνότητες	147
7.3.1.2	Συσχετισμός ενεργού μήκους με τις φυσικές συχνότητες	147
7.3.1.3	Διερεύνηση ταλαντώσεων χαμηλών συχνοτήτων.....	149
7.3.1.4	Πειραματική επαλήθευση	150
7.4	Δομική ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.....	153
7.4.1	Μοντελοποίηση δρομέα	153
7.4.2	Ανάλυση δρομέα	154
7.5	Συμπεράσματα.....	158
Κεφάλαιο 8. Βέλτιστη διαχείριση ισχύος ηλεκτρικού οχήματος με βάση τη διαδρομή ...		161
8.1	Εισαγωγή.....	161
8.2	Μεθοδολογία.....	163
8.2.1	Κατάτμηση διαδρομής	163
8.2.2	Βελτιστοποίηση προφίλ ταχύτητας.....	165
8.2.3	Βελτιστοποίηση προφίλ ορίου ροπής.....	166
8.2.4	Λήψη αποφάσεων	166
8.2.5	Μεθοδολογική επέκταση σε μεγάλες διαδρομές.....	167
8.3	Μοντελοποίηση οχήματος.....	167
8.3.1	Ασκούμενες δυνάμεις	168
8.3.2	Μοντέλο ενεργειακής κατανάλωσης	170
8.3.3	Θερμικό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων	171
8.4	Προσομοιωμένα αποτελέσματα.....	173
8.5	Πειραματική επιβεβαίωση	177
8.6	Συμπεράσματα.....	180
Κεφάλαιο 9. Σύνοψη και συμπεράσματα		183
9.1	Κυριότερα συμπεράσματα	183
9.1.1	Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης.....	184
9.1.2	Υποκατάστατη μοντελοποίηση ANFIS.....	185
9.1.3	Σύνθετες τεχνικές πεπερασμένων στοιχείων και νευρωνικών δικτύων.....	186
9.1.4	Γεωμετρική διαμόρφωση ηλεκτρικών μηχανών	187
9.1.5	Προσομοίωση μηχανικών φαινομένων υψηλής ταχύτητας	187
9.1.6	Διαχείριση ισχύος ηλεκτρικών οχημάτων.....	188
9.2	Σημεία προαγωγής της επιστήμης.....	189
9.3	Σημεία για περαιτέρω διερεύνηση.....	190
Βιβλιογραφία		191
Ευρετήριο σχημάτων		201
Ευρετήριο πινάκων		207
Λίστα δημοσιεύσεων.....		209

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1 Τοποθέτηση του προβλήματος

1.1.1 Γενικό πλαίσιο

Η βιομηχανική επανάσταση που συντελέστηκε στα μέσα του 19^{ου} αιώνα υπήρξε ένα ιδιαίτερα σύνθετο σύστημα ραγδαίων μεταβολών και ανακατατάξεων – τεχνικών, οικονομικών, κοινωνικών και πολιτισμικών – οι οποίες οδήγησαν στην εκβιομηχάνιση της κοινωνίας. Κορυφαία επιτεύγματα της Βιομηχανικής Επανάστασης θεωρούνται η εφεύρεση της ατμομηχανής, της μηχανής εσωτερικής καύσης και της ηλεκτρικής μηχανής. Ο ηλεκτρισμός αποτέλεσε, ίσως, την κυριότερη καινοτομία του δεύτερου μισού του 19^{ου} αιώνα, τόσο ως πηγή ενέργειας για τους ηλεκτρικούς κινητήρες, όσο και ως μέσο φωτισμού. Στο δεύτερο μισό του 19ου αιώνα, η εξέλιξη των κινητήρων εσωτερικής καύσης και η ενσωμάτωσή τους σε οχήματα είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία του αυτοκινήτου.

Κινητήριος δύναμη της βιομηχανίας υπήρξαν ανέκαθεν τα ορυκτά καύσιμα που αντλούνται από το εσωτερικό της γης. Ωστόσο, κατά την καύση των παραγώγων του αργού πετρελαίου εκλύονται επιβλαβή αέρια για το περιβάλλον και τον άνθρωπο που διαταράσσουν τις ισορροπίες της φύσης. Με το πέρασμα του χρόνου έγινε αντιληπτό ότι ο ρυθμός επιβάρυνσης του περιβάλλοντος είναι υψηλός και η λήψη μέτρων για την αντιμετώπιση του προβλήματος κρίθηκε επιβεβλημένη. Συνεπώς, τα τελευταία χρόνια συντελείται αλλαγή πλεύσης προς την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική. Η πλήρης μεταβολή μίας βιομηχανικής κοινωνίας που βασίζεται στο πετρέλαιο σε μία κοινωνία που θα στηρίζεται σε «καθαρή» ενέργεια είναι, εν τούτοις, χρονοβόρα και πολυδάπανη. Απαιτεί τεράστιες επενδύσεις στην έρευνα και την ανάπτυξη, καθώς και θέσπιση κατάλληλης νομοθεσίας από τα κράτη.

Ένα σημαντικό μέρος των βλαβερών αερίων προέρχεται από το πεδίο των μεταφορών. Εκτιμάται ότι σε παγκόσμιο επίπεδο αποτελεί το 14% των συνολικών εκπομπών που συνεισφέρουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ενώ το ποσοστό δεν φαντάζει τεράστιο και άξιο σημαντικού ενδιαφέροντος, αποτελεί μία τιμή που μπορεί να μειωθεί αρκετά ευκολότερα, σε σύγκριση με αυτές των υπολοίπων πηγών μόλυνσης. Ακόμη, η έρευνα που σχετίζεται με αυτό το τομέα αποφέρει πολλαπλά οφέλη και στους άλλους τομείς, καθώς οι υποδομές που θα αναπτυχθούν για την εξηλεκτρίση των

μεταφορών θα βοηθήσουν επίσης σημαντικά τις άλλες πηγές εκπομπών στην ταχύτερη επίτευξη της «καθαρότητας».

Το κυριότερα εμπόδια στην εξηλεκτρίση των μεταφορών και γενικότερα στη διάδοση της «καθαρής» ενέργειας, είναι το κόστος και οι τεχνικοί περιορισμοί. Στη περίπτωση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και λόγω της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας των συσσωρευτών, η επίτευξη ελκυστικής αυτονομίας απαιτεί την ενσωμάτωση μεγάλης ποσότητας μπαταριών που προσθέτουν σημαντικό βάρος στο όχημα και αυξάνουν τη τιμή του σε άνισα επίπεδα σε σύγκριση με ένα συμβατικό αυτοκίνητο. Πέρα από την αυξημένη τιμή, όμως, ο χρόνος επαναφόρτισης είναι σημαντικά υψηλότερος από τον αντίστοιχο του ανεφοδιασμού με συμβατικά καύσιμα στα πρατήρια υγρών καυσίμων. Αυτοί οι λόγοι συνθέτουν μία λύση μετακίνησης που επιβάλλει σημαντικούς χρηστικούς περιορισμούς. Παρά τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα του ηλεκτρικού οχήματος, οι περιορισμοί αυτοί έχουν σαν αποτέλεσμα την απώθηση του αγοραστικού κοινού και κατ' επέκταση τη δυσκολία διείσδυσης του ηλεκτρικού αυτοκινήτου στη κοινωνία. Τελικά, η δημιουργία ενός ελκυστικότερου προϊόντος είναι αλληλένδετη με τη βελτίωση της τεχνολογικής στάθμης σε αυτό το τομέα.

Οι δράσεις της τεχνολογικής εξέλιξης που απαιτείται μπορούν να εντοπιστούν σε δύο, κυρίως, παράγοντες. Αφενός, στη βελτίωση της ενεργειακής πυκνότητας των συσσωρευτών, αφετέρου στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας του οχήματος. Και στις δύο περιπτώσεις επιτυγχάνεται μείωση του όγκου των μπαταριών, αύξηση της αυτονομίας και μείωση της τιμής αγοράς. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής ερευνώνται μέσα του δεύτερου παράγοντα που άπτονται της επιστήμης του ηλεκτρολόγου μηχανικού και που χωρίζονται σε δύο ενότητες. Επιχειρείται, από τη μία πλευρά, η θεμελίωση μεθοδολογιών που βοηθούν στο σχεδιασμό αποδοτικότερων και ελαφρύτερων ηλεκτρικών κινητήρων. Από την άλλη πλευρά, το κινητήριο σύστημα θεωρείται δεδομένο και ερευνώνται τεχνικές διαχείρισης ενέργειας που μπορούν να επιφέρουν μείωση της κατανάλωσης. Η επίτευξη των ανωτέρω στόχων γίνεται συστηματικά δυνατή με την ανάπτυξη κατάλληλων στρατηγικών βελτιστοποίησης, προσαρμοσμένων σε κάθε περίπτωση.

1.1.2 Μεθοδολογικό πεδίο

Μεταβαίνοντας από το γενικότερο πλαίσιο της υφιστάμενης κατάστασης στο πιο ειδικό, μπορούν να εξετασθούν οι υπάρχουσες τεχνικές αδυναμίες των μεθοδολογιών, η βελτίωση των οποίων επιχειρήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Αρχικά, αξίζει να παρατηρηθεί ότι οι μεθοδολογίες βελτιστοποίησης για την ηλεκτροκίνηση εμφανίζουν εκτεταμένες αδυναμίες σε πολλαπλά πεδία. Αυτές αναλύονται σύντομα στις αμέσως επόμενες παραγράφους.

Το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης ή μεγιστοποίησης διαφόρων δεικτών απόδοσης των ηλεκτρικών μηχανών αποτελεί εγγενώς ένα δυσπρόσιτο εγχείρημα λόγω της αυξημένης υπολογιστικής πολυπλοκότητας που χαρακτηρίζει τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Η πολυπλοκότητα είναι τόσο χρονική όσο και ποιοτική λόγω της μορφής του πεδίου αποτίμησης των δεικτών απόδοσης που προκύπτει από το

σύνολο των γεωμετρικών μεταβλητών. Η εν λόγω μορφή λαμβάνει πολύπλοκες γεωμετρίες στο n -διάστατο χώρο (όπως π.χ. αποσυνδεδεμένα σύνολα και εκφυλισμένα σημεία) λόγω των περιορισμών που αναπόφευκτα τίθενται. Έτσι, παρατηρείται ότι απαιτούνται μέρες ή και εβδομάδες για την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης. Ακόμη, η ανωμαλία στη μορφή του συνόλου αποτίμησης επιβάλλει τη χρήση στοχαστικών αλγορίθμων που δεν προσφέρουν εγγύηση για την επίτευξη της σύγκλισης και εγείρουν ερευνητικά ζητήματα αξιοπιστίας.

Το εν λόγω πρόβλημα αποτελεί, επίσης, ένα τυπικό παράδειγμα του πραγματικού κόσμου ως προς τον αριθμό των κριτηρίων βελτιστοποίησης. Δεν πρόκειται για μαθηματική συνάρτηση που έχει μόνο ένα ελάχιστο. Συνυπάρχουν πολλά κριτήρια ελαχιστοποίησης ή μεγιστοποίησης που συχνά είναι αντικρουόμενα (όπως π.χ. η πυκνότητα ισχύος με την απόδοση) και η συνήθης βιβλιογραφική αντιμετώπιση του προβλήματος επιχειρεί μία μίξη των κριτηρίων με βάση υποκειμενικά καθορισμένα βάρη ώστε να απλοποιηθεί η μαθηματική διατύπωση και το κριτήριο βελτιστοποίησης να είναι μοναδικό. Ωστόσο, αυτές οι απλουστεύσεις αφαιρούν τμήμα της αντικειμενικότητας της μεθοδολογίας και το τελικό αποτέλεσμα που προκύπτει μπορεί να υστερεί σε πλεονεκτικότητα.

Οι δυσκολίες που εκτέθηκαν στις δύο προηγούμενες παραγράφους δημιουργούν ένα προβληματικό υπόστρωμα σε μία ακόμη σύγχρονη σχεδιαστική ανάγκη των κινητήρων για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης. Σε αντίθεση με τους βιομηχανικούς κινητήρες που λειτουργούν σε ένα σημείο λειτουργίας, κατά κανόνα, οι κινητήρες των οχημάτων λειτουργούν σε μεγάλο εύρος ροπής-στροφών. Έτσι, μία εξιδανικευμένη οπτική θα απαιτούσε τη θεώρηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών της μηχανής σε κάθε σημείο λειτουργίας ώστε να επιτευχθεί η συνολική ενεργειακή αποδοτικότητα. Αποτελεί, άλλωστε, κοινό τόπο, ότι η βελτιστοποίηση σε ένα σημείο λειτουργίας δεν εγγυάται βέλτιστα χαρακτηριστικά λειτουργίας σε όλους του κύκλους λειτουργίας της μηχανής. Ωστόσο, ο υπολογισμός πολλαπλών σημείων λειτουργίας καθίσταται χρονικά ανέφικτος με βάση τη κλασσική και παραδοσιακή προσέγγιση.

Ένα ακόμη σημαντικό πεδίο έρευνας που χρήζει προσοχής όταν υπάρχει ενδιαφέρον για βελτιστοποίηση, είναι αυτό της ευρωστίας. Τα περισσότερα πραγματικά συστήματα υπόκεινται σε κατασκευαστικές και λειτουργικές αβεβαιότητες που θα ήταν χρήσιμο να ληφθούν υπόψη κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού. Πρόκειται για ένα ακόμη δυσπρόσιτο πεδίο, καθώς μία απλή θεώρηση της ευρωστίας κάθε γεωμετρίας θα απαιτούσε την εκτέλεση πολλαπλών αναλύσεων σε διάφορα σημεία του χώρου αναζήτησης που βρίσκονται πλησίον του αρχικού σημείου. Με χρήση πεπερασμένων στοιχείων για τις αναλύσεις, ο χρονικός ορίζοντας επεξεργασίας καθίσταται μη ρεαλιστικός. Γι' αυτό το λόγο, βιβλιογραφικά, η ευρωστία συχνά αμελείται λόγω αντικειμενικής επεξεργαστικής δυσκολίας, αν και αποτελεί ένα ζωτικό σημείο διερεύνησης. Ακόμα όμως και αν μπορούσε να βρεθεί λύση στην υπολογιστική πολυπλοκότητα, η αναζήτηση στη σχετική βιβλιογραφία για κατάλληλα κριτήρια ευρωστίας που να λαμβάνουν υπόψη πολλαπλούς στόχους βελτιστοποίησης θα απέδιδε ελάχιστα αποτελέσματα με σημαντικούς περιορισμούς στις δυνατότητες τους.

Μία άλλη λύση για τη μείωση των διαστάσεων της μηχανής και κατ' επέκταση την επίτευξη μεγάλης πυκνότητας ισχύος σχετίζεται με την υψηλή ταχύτητα περιστροφής. Δεδομένου ότι το μέγεθος μίας μηχανής είναι ανάλογο της ηλεκτρομαγνητικής ροπής

στο διάκενο και γνωρίζοντας ότι η αποδιδόμενη ισχύς μίας μηχανής είναι το γινόμενο της ροπής επί την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής, αν αυξηθεί η ταχύτητα μειώνεται η ροπή και οι απαιτούμενες διαστάσεις. Με τη μείωση του μεγέθους για δεδομένη ισχύ, αυξάνεται η πυκνότητα ισχύος της μηχανής. Το μέγεθος αύξησης της ταχύτητας υπόκειται, ωστόσο, σε μηχανικούς, κυρίως, περιορισμούς. Σε ένα δρομέα που στρέφεται με μεγάλη ταχύτητα ασκούνται σημαντικές φυγόκεντρες δυνάμεις που με τη σειρά τους δημιουργούν πιέσεις που καταπονούν κυρίως τα ενεργά μέρη και τους μαγνήτες, που χαρακτηρίζονται από χαμηλή αντοχή και ψαθυρότητα. Η δομική ακεραιότητα του δρομέα τίθεται, τελικά σε κίνδυνο μετά από κάποιο κατώφλι ταχύτητας. Η έρευνα στις υψηλές ταχύτητες έχει αναδείξει επίσης και τη σημασία της αξονοδυναμικής ανάλυσης του δρομέα, καθώς σε τέτοιες ταχύτητες μπορεί να υπάρξει ταύτιση κάποιας ιδιοσυχνότητας του στρεφόμενου σώματος με τη συχνότητα της ταχύτητας περιστροφής ή με αρμονικές της ηλεκτρομαγνητικής ροπής στο διάκενο. Ο συνδυασμός αυτών μπορεί να επιφέρει συντονισμό και καταστροφή της μηχανής. Αναδύεται, συνεπώς, ένα κρίσιμο πεδίο έρευνας στις μηχανές υψηλών ταχυτήτων που έχει σαν στόχο την επίλυση πολύπλοκων ηλεκτρομηχανικών προβλημάτων για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων, απόδοσης και βέλτιστης αξιοποίησης υλικού.

Τέλος, πέρα από τη κλασσική στρατηγική δημιουργίας αποδοτικότερων συστημάτων κίνησης, υπάρχουν και διαφορετικοί τρόποι να επιτευχθεί εξοικονόμηση στη διαχείριση της ενέργειας. Με τη ραγδαία ανάπτυξη της υπολογιστικής ικανότητας των διακομιστών και των τηλεπικοινωνιακών δικτύων ανοίγεται ένα ευρύ πεδίο διασυνδεσιμότητας μεταξύ των οχημάτων που μπορεί να επιτρέψει την καλύτερη διαχείριση ενέργειας σε συστημικό και ατομικό επίπεδο. Είτε πρόκειται για τα αυτόνομα οχήματα στο μέλλον, είτε πρόκειται για συστήματα καθοδήγησης του οδηγού στο παρόν, είναι πρακτικά δυνατός ο καλύτερος προγραμματισμός των ενεργειακών μεταβλητών με τη βοήθεια σύγχρονων τεχνολογικών επιτευγμάτων, όπως το γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών.

1.2 Αντικείμενο και ερευνητικοί στόχοι

Αντικείμενο της διατριβής αποτελεί η ανάπτυξη μεθοδολογιών που βελτιώνουν την ερευνητική στάθμη στα προβλήματα που αναφέρθηκαν στη προηγούμενη ενότητα (1.1.2). Σε γενικές γραμμές, επιχειρείται η ανάπτυξη κατάλληλων προηγμένων αλγοριθμικών σχημάτων, προσαρμοσμένων σε κάθε περίπτωση προβλήματος σχεδιασμού ηλεκτρικών μηχανών και διαχείρισης τους σε ηλεκτρικά οχήματα. Βασικά συστατικά της διαδικασίας αποτελούν οι μετά-ευρετικοί πολυκριτηριακοί αλγόριθμοι, οι διαδικασίες εκμάθησης μηχανής, τα παραμετρικά μοντέλα προσομοίωσης ηλεκτρικών μηχανών και τα δυναμικά μοντέλα προσομοίωσης ηλεκτρικών οχημάτων. Με εξαίρεση τις διαδικασίες εκμάθησης μηχανής, όλες οι υπόλοιπες συνιστώσες αναπτύχθηκαν εξ' αρχής με γνώμονα τις εκάστοτε απαιτήσεις του προβλήματος. Όσον αφορά τις διαδικασίες αυτές, η παρούσα διατριβή περιορίστηκε στην κατάλληλη εφαρμογή τους, κατά περίπτωση, με συστηματική διερεύνηση των επιλεγόμενων ρυθμίσεων για την επίτευξη των καλύτερων δυνατών αποτελεσμάτων. Επίσης,

καταβλήθηκε ιδιαίτερη προσπάθεια ώστε όλα τα στάδια της έρευνας να επιβεβαιωθούν πειραματικά με τα κατάλληλα μέσα για κάθε περίπτωση. Πιο αναλυτικά, οι βασικοί ερευνητικοί στόχοι της διατριβής είναι οι εξής:

- Ολοκληρωμένη βιβλιογραφική επισκόπηση των μεθοδολογιών σχεδίασης ηλεκτρικών κινητήρων μόνιμων μαγνητών και των μεθοδολογιών επίλυσης πολυκριτηριακών προβλημάτων.
- Ανάπτυξη πρωτότυπου αλγοριθμικού σχήματος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, κατάλληλου για την αντιμετώπιση προβλημάτων σχεδίασης ηλεκτρικών κινητήρων για ένα σημείο λειτουργίας, με γνώμονα την επιτάχυνση της διαδικασίας και τη βελτίωση της αξιοπιστίας σύγκλισης.
- Επιβεβαίωση των ικανοτήτων του αλγορίθμου και σύγκρισή του με άλλους γνωστούς και καταξιωμένους αλγορίθμους με αξιοποίηση κατάλληλων μέτρων επίδοσης σε ακολουθία μαθηματικών δοκιμαστικών συναρτήσεων και στο σχεδιασμό μηχανής επιφανειακών μόνιμων μαγνητών εξωτερικού δρομέα.
- Ανάπτυξη πρωτότυπης στρατηγικής πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης συζευγμένης με διαδικασία εκμάθησης μηχανής και δυναμικό μοντέλο οχήματος για τον εντοπισμό της ενεργειακά αποδοτικότερης μηχανής με θεώρηση όλου του χάρτη απόδοσης κάθε γεωμετρίας σε συνδυασμό με τον οδηγικό κύκλο του ηλεκτρικού οχήματος.
- Πειραματική επιβεβαίωση της στρατηγικής με μαθηματικούς ελέγχους κατά την εξέλιξη της και με κατασκευή πρωτοτύπου μηχανής μόνιμων μαγνητών για τη διεξαγωγή μετρήσεων στο χάρτη απόδοσης της μηχανής.
- Εντοπισμός των τάσεων και του συσχετισμού των δεικτών απόδοσης της μηχανής στο χώρο αποτίμησης και των μεταβλητών στο χώρο αναζήτησης των βέλτιστων γεωμετριών.
- Θεμελίωση αντικειμενικού κριτηρίου ευρωστίας κατάλληλου για ενσωμάτωση σε ρουτίνες βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων.
- Δημιουργία στρατηγικής εύρωστης βελτιστοποίησης με σύζευξη αλγορίθμου εκμάθησης μηχανής για την επίτευξη υπολογιστικά εφικτής διαδικασίας εντοπισμού εύρωστης γεωμετρίας ηλεκτρικών μηχανών όσον αφορά τις κατασκευαστικές αβεβαιότητες.
- Επιβεβαίωση της στρατηγικής με χρήση μαθηματικών δοκιμαστικών συναρτήσεων και εφαρμογής της στο σχεδιασμό μηχανής υψηλής ταχύτητας.
- Θερμική και μηχανική ανάλυση μηχανών επιφανειακών μόνιμων μαγνητών υψηλής ταχύτητας για τον προσδιορισμό της μέγιστης επιτρεπτής ταχύτητας περιστροφής. Πιο συγκεκριμένα, χρήση μεθοδολογίας πεπερασμένων στοιχείων για την δισδιάστατη και τρισδιάστατη ανάλυση της θερμικής τους συμπεριφοράς και για τη διεξαγωγή τρισδιάστατης αξονοδυναμικής και δομικής διερεύνησης.
- Ανάπτυξη σύνθετης στρατηγικής για τη διαχείριση της ισχύος ηλεκτρικού οχήματος με υβριδικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης και δυναμικό μοντέλο του οχήματος μέσω του καθορισμού των βέλτιστων κατανομών ταχύτητας και ορίων ροπής με ανοχή περιορισμένης υπερφόρτισης της μηχανής.
- Η επιβεβαίωση της στρατηγικής μέσω προσομοιώσεων και πειραματικών μετρήσεων πρότυπου ελαφρού ηλεκτρικού οχήματος σε συνθήκες πραγματικού αγώνα.

1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Το κείμενο της διατριβής περιλαμβάνει συνολικά οκτώ κεφάλαια στα οποία προσεγγίζονται και οι επιμέρους στόχοι. Αρχικά, το **πρώτο κεφάλαιο** αποτελεί την εισαγωγή της διατριβής όπου περιγράφεται το γενικότερο πρόβλημα προς επίλυση, παρατίθενται τα ερευνητικά κίνητρα και σκιαγραφούνται οι βασικοί στόχοι της διατριβής. Η διάρθρωση των υπολοίπων κεφαλαίων έχει ως εξής:

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** περιγράφονται λεπτομερώς οι επιμέρους διαδικασίες που ακολουθούνται κατά τη σχεδίαση ενός κινητήρα μόνιμων μαγνητών. Αρχικά παρατίθενται οι θεμελιώδεις σχέσεις προκαταρκτικής σχεδίασης που προσδιορίζουν τις βασικές διαστάσεις του κινητήρα και αναλύεται λεπτομερώς η διαδικασία επιλογής διαμόρφωσης συγκεντρωμένων τυλιγμάτων κλασματικής αύλακας. Στη συνέχεια η ανάλυση επεκτείνεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και περιγράφεται η διαδικασία επίλυσης ενός δυναμικού προβλήματος μέσω μιας αλληλουχίας μαγνητοστατικών αναλύσεων κατά τις οποίες μοντελοποιείται τόσο η σχετική κίνηση στάτη δρομέα όσο και η ημιτονοειδής μεταβολή των ρευμάτων τροφοδοσίας. Παράλληλα αναλύεται η διαδικασία θερμικής ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και η θερμική μοντελοποίηση των επιμέρους τμημάτων του κινητήρα. Τέλος, αναδεικνύεται η ανάγκη χαρακτηρισμού των μαγνητικών υλικών σε επίπεδο θερμικών και μαγνητικών ιδιοτήτων.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η θεωρία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης και αναλύονται οι απαιτήσεις μιας συστηματικής διαδικασίας αναζήτησης. Αρχικά, γίνεται αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο και αναδεικνύεται η μαθηματική υπεροχή αυτής της θεώρησης για την επίλυση προβλημάτων του πραγματικού κόσμου που χαρακτηρίζονται από αντικρουόμενα κριτήρια. Ορίζονται βασικές έννοιες της βελτιστοποίησης που βοηθούν στη κατανόηση των ανισοτικών σχέσεων στον n -διάστατο χώρο αποτίμησης, όπως, για παράδειγμα, η έννοια της κυριαρχίας και ορισμένες βασικές ιδιότητες των προβλημάτων. Γίνεται, ακόμη, αναφορά στην έννοια της εύρωστης βελτιστοποίησης σε θεωρητικό επίπεδο, καθώς θα αποτελέσει αντικείμενο διερεύνησης σε επόμενο κεφάλαιο και δίνεται έμφαση στην ανάδειξη της αναγκαιότητάς της σε προβλήματα σχεδιασμού που χαρακτηρίζονται από κατασκευαστικές και λειτουργικές αβεβαιότητες. Ύστερα, γίνεται λόγος για τα μαθηματικά προβλήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δοκιμή των αλγορίθμων βελτιστοποίησης και για τα χαρακτηριστικά που αυτά πρέπει να έχουν προκειμένου να αναπαριστούν, όσο το δυνατόν καλύτερα, τις δυσκολίες των πραγματικών προβλημάτων. Τέλος, απαριθμούνται οι βασικότερες τεχνικές αξιολόγησης της επίδοσης των αλγορίθμων επίλυσης των πολυκριτηριακών προβλημάτων και αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μαθηματικής έκφρασης.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** προτείνεται ένας υβριδικός, πολυκριτηριακός αλγόριθμος βελτιστοποίησης μηχανών μόνιμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης. Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται βασίζεται στις στρατηγικές της Τεχνητής Αποικίας Μελισσών (Artificial Bee Colony – ABC), του Εξελικτικού Αλγορίθμου Pareto Δύναμης

2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm – SPEA2) και της Διαφορικής Εξέλιξης (DE) και επιδεικνύει γρήγορη και αξιόπιστη σύγκλιση στο βέλτιστο μέτωπο Pareto. Η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας συγκρίνεται με άλλους κατάλληλων δοκιμαστικών συναρτήσεων, όσο και μέσω της εφαρμογής σε μία μηχανή επιφανειακών μονίμων μαγνητών εξωτερικού δρομέα με άνισα δόντια στάτη.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** προτείνεται μία μεθοδολογία πολλαπλών κριτηρίων για τη βελτιστοποίηση μηχανών μονίμων μαγνητών ηλεκτρικών οχημάτων βάσει του οδηγικού κύκλου. Στη διαδικασία χρησιμοποιείται ένα προσαρμοζόμενο Δικτυακό Σύστημα Ασαφών Συμπερασμάτων (Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System – ANFIS) το οποίο είναι συζευγμένο με έναν αλγόριθμο πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης και παίζει το ρόλο του υποκατάστατου μοντέλου των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων της ηλεκτρικής μηχανής. Έτσι γίνεται δυνατή η θεώρηση όλου του οδηγικού κύκλου και του αντίστοιχου χάρτη απόδοσης για κάθε γεωμετρία μηχανής. Το σφάλμα πρόβλεψης του ANFIS ελαχιστοποιείται μέσω της υιοθέτησης κατάλληλων συναρτήσεων μέλους, αρχικών δεδομένων εκπαίδευσης και ενός προσαρμοζόμενου σχήματος εκμάθησης μέσω επαναληπτικής εκπαίδευσης. Ο χάρτης απόδοσης ενσωματώνεται μετέπειτα σε ένα δυναμικό μοντέλο του οχήματος για να υπολογιστεί η συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια στον οδηγικό κύκλο. Το προφίλ βελτιστοποίησης λαμβάνει υπόψη την συνολική ενεργειακή αποδοτικότητα, την πυκνότητα ροπής και επιπρόσθετα θεωρεί συμπληρωματικά κριτήρια σχεδιασμού μέσω μίας εκ των υστέρων διαδικασίας επιλογής με βάση το προκύπτον μέτωπο Pareto. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε εφαρμόζεται στη βελτιστοποίηση μίας μηχανής μονίμων μαγνητών με συγκεντρωμένο τύλιγμα κλασματικού βήματος που ενσωματώνεται σε ένα ελαφρύ ηλεκτρικό όχημα που διαγωνίζεται σε αγώνες ενεργειακής οικονομίας. Η επιλεγμένη γεωμετρία μηχανής δοκιμάστηκε πειραματικά μέσω μετρήσεων σε ένα πρωτότυπο.

Στο **έκτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται μία στρατηγική εύρωστης βελτιστοποίησης που στοχεύει στην εύρεση του ολικά βέλτιστου παράλληλα με την θεώρηση των κατασκευαστικών αβεβαιοτήτων, για τον σχεδιασμό μηχανών μονίμων μαγνητών υψηλών ταχυτήτων. Προτείνεται ένα νέο κριτήριο ευρωστίας που λαμβάνει αποτελεσματικά υπόψη τον αντίκτυπο των αβεβαιοτήτων στις σχεδιαστικές μεταβλητές σε όλα τα κριτήρια. Υιοθετείται, επίσης, ένα προσαρμοζόμενο Δικτυακό Σύστημα Ασαφών Συμπερασμάτων (Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System – ANFIS) σαν υποκατάστατο μοντέλο των χρονοβόρων αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων που οδηγεί σε μία γρήγορη διαδικασία εύρωστης βελτιστοποίησης. Η στρατηγική δοκιμάζεται τόσο μέσω δοκιμαστικών συναρτήσεων, όσο και μέσω της εφαρμογής στο σχεδιασμό μίας μηχανής υψηλής ταχύτητας.

Στο **έβδομο κεφάλαιο** επιχειρείται η θερμική και μηχανική ανάλυση του πρωτότυπου σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών που κατασκευάστηκε στα πλαίσια του πέμπτου κεφαλαίου, ο οποίος χαρακτηρίζεται από μικρό όγκο και βάρος, χαμηλή ισχύ και υψηλή απόδοση, για τον οποίο έχει τεθεί σαν στόχος να λειτουργήσει και σε υψηλές ταχύτητες. Σκοπός είναι η μελέτη της θερμοκρασιακής κατανομής της μηχανής και της δομικής και αξονοδυναμικής της συμπεριφοράς με χρήση πεπερασμένων στοιχείων σε τρισδιάστατη γεωμετρία.

Στο **όγδοο κεφάλαιο** προτείνεται μία μεθοδολογία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης των προφίλ ταχύτητας και ροπής ενός ελαφρού ηλεκτρικού οχήματος που διανύει μία προδιαγεγραμμένη διαδρομή. Η διαδικασία που παρουσιάζεται λαμβάνει υπόψη περιορισμούς ταχύτητας, τα υψομετρικά χαρακτηριστικά της διαδρομής και περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των ανοχών της λειτουργίας υπερφόρτισης. Η προτεινόμενη τεχνική επιτυγχάνει την ανίχνευση των συμβιβασμών μεταξύ της εξοικονόμησης στην καταναλισκόμενη ενέργεια και τον χρόνο για μία προκαθορισμένη αγωνιστική διαδρομή. Η μέθοδος βασίζεται στη κατάτμηση του δρομολογίου και περιλαμβάνει μία διαδικασία δύο βημάτων. Σε ένα πρώτο βήμα τελείται η βελτιστοποίηση της ταχύτητας μέσω της ανοχής σημαντικής υπερφόρτισης ενώ σε ένα δεύτερο βήμα καθορίζονται τα βέλτιστα όρια της ροπής επιτάχυνσης και αναγεννητικής πέδησης. Προσομοιώσεις που βασίζονται σε ένα δυναμικό μοντέλο ενός ελαφρού ηλεκτρικού οχήματος και πειραματικά αποτελέσματα από την αγωνιστική πίστα υπογραμμίζουν τα σημαντικά οφέλη τόσο στη διάρκεια της διαδρομής όσο και στην ενεργειακή κατανάλωση σε σύγκριση με τη κλασσική τεχνική της κίνησης με σταθερή ταχύτητα.

Στο **ένατο κεφάλαιο** συνοψίζονται οι μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν, τόσο σε αλγοριθμικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο υλοποίησης. Παρατίθενται τα βασικά συμπεράσματα της διατριβής, συνοψίζονται οι στόχοι που επιτυγχάνονται και τα βασικά ευρήματα που οδηγούν σε προαγωγή της επιστήμης και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των εφαρμογών. Τέλος προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2. Σχεδιομελέτη κινητήρων μόνιμων μαγνητών

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται λεπτομερώς οι επιμέρους διαδικασίες που ακολουθούνται κατά τη σχεδίαση ενός κινητήρα μόνιμων μαγνητών. Στην πραγματικότητα η γενικευμένη μεθοδολογία που θα αναλυθεί παρακάτω μπορεί με μικρές αλλαγές να εφαρμοστεί στο σύνολο των τύπων ηλεκτρικών κινητήρων. Αρχικά παρατίθενται οι θεμελιώδεις σχέσεις προκαταρκτικής σχεδίασης με χρήση παραδοσιακών αναλυτικών σχέσεων που προσδιορίζουν τις βασικές διαστάσεις του κινητήρα και τις βασικές ηλεκτρικές και μαγνητικές φορτίσεις. Αναλύεται λεπτομερώς η διαδικασία επιλογής διαμόρφωσης συγκεντρωμένων τυλιγμάτων κλασματικής αύλακας και προσδιορίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά του φορέα διέγερσης, δηλαδή του δρομέα μόνιμων μαγνητών.

Στη συνέχεια η ανάλυση επεκτείνεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και περιγράφεται η διαδικασία επίλυσης ενός δυναμικού προβλήματος μέσω μιας αλληλουχίας μαγνητοστατικών αναλύσεων κατά τις οποίες μοντελοποιείται τόσο η σχετική κίνηση στάτη δρομέα όσο και η ημιτονοειδής μεταβολή των ρευμάτων τροφοδοσίας. Παράλληλα αναλύεται και η διαδικασία θερμικής ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και η θερμική μοντελοποίηση των επιμέρους τμημάτων του κινητήρα. Γίνεται εκτενής αναφορά στον τρόπο υπολογισμού των δεικτών απόδοσης, επίδοσης και θερμικής στιβαρότητας του κινητήρα και αναδεικνύεται η ανάγκη παραμετρικής σχεδίασης και αυτοματοποιημένης ανάλυσης ώστε οι μηχανισμοί που αναλύονται να μπορούν να ενσωματωθούν σε ρουτίνες βελτιστοποίησης.

Τέλος, αναδεικνύεται η ανάγκη χαρακτηρισμού των μαγνητικών υλικών σε επίπεδο θερμικών και μαγνητικών ιδιοτήτων. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στη μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς των κινητήρων μόνιμων μαγνητών, καθώς το φαινόμενο της μερικής απομαγνήτισης του δρομέα λόγω αύξησης της θερμοκρασίας αποτελεί την κυριότερη αιτία αστοχίας της σχεδίασης σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων ή ακραίου θερμοκρασιακού περιβάλλοντος.

2.2 Επιλογή διαμόρφωσης κινητήρα

Η επιλογή της διαμόρφωσης του κινητήρα αφορά κυρίως στη τοπολογία του δρομέα, δηλαδή στη θέση και τη σχετική γεωμετρία των μαγνητών στο δρομέα, αλλά και στη σχετική θέση στάτη και δρομέα του κινητήρα. Οι κυριότερες κατηγορίες κινητήρα με βάση τη διαμόρφωση των μαγνητών στο δρομέα αναλύονται παρακάτω [1]:

2.2.1 Κινητήρες επιφανειακών μόνιμων μαγνητών

Πρόκειται για την πιο συνηθισμένη διαμόρφωση κινητήρων μόνιμου μαγνήτη στην οποία οι μόνιμοι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του δρομέα. Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτής της τοπολογίας είναι η απλότητά κατασκευής της, το χαμηλότερο κόστος της συγκριτικά με άλλες διαμορφώσεις και κυρίως η πάρα πολύ υψηλή επίδοση της λόγω της συγκέντρωσης του πεδίου διέγερσης πρακτικά στο διάκενο της μηχανής. Τα κυριότερα μειονεκτήματα της είναι ο κίνδυνος απομαγνήτισης των μαγνητών λόγω εξωτερικών πεδίων, μολονότι έχει καλές ιδιότητες ψύξης των μαγνητών, η σταθερή τιμή του μαγνητικού πεδίου του δρομέα που δεν επιτρέπει μεταβολές στη διέγερση και η δυσκολία εξασθένισης του πεδίου για εφαρμογές με μεγάλο εύρος ταχυτήτων λειτουργίας. Επιπλέον, οι μαγνήτες υπόκεινται σε φυγόκεντρες δυνάμεις που μπορεί να προκαλέσουν την αποκόλλησή τους απ' τον δρομέα.

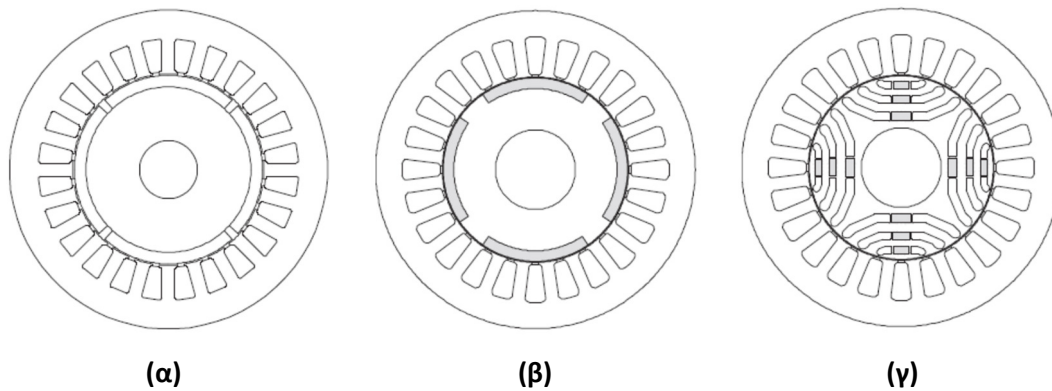
2.2.2 Κινητήρες εσωτερικά επιφανειακών μαγνητών

Σε αυτή την τοπολογία οι μόνιμοι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του δρομέα, αλλά τα μεταξύ τους διάκενα είναι πληρωμένα με σίδηρο. Η εκτυπότητα λόγω σιδήρου προκαλεί μία επιπλέον συνιστώσα ροπής που απομειώνει την συνολική ικανότητα ροπής της μηχανής, ενώ σε σχέση με τους εξωτερικά επιφανειακούς παρέχουν αυξημένη ικανότητα συγκράτησης των μαγνητών.

2.2.3 Κινητήρες εσωτερικών μαγνητών

Σε αυτές τις τοπολογίες οι μόνιμοι μαγνήτες τοποθετούνται στο εσωτερικό του σιδηροπυρήνα του δρομέα. Οι εσωτερικοί μαγνήτες διατρέχουν μικρότερο κίνδυνο απομαγνήτισης λόγω θερμικών, μαγνητικών ή μηχανικών καταπονήσεων καθώς η θέση τους δεν επιτρέπει απότομες μεταβολές στην θερμοκρασία, μειώνει την επίδραση των εξωτερικών πεδίων και προστατεύει από μηχανικές καταπονήσεις. Στον αντίποδα, υπάρχει σαφής κατασκευαστική δυσκολία καθώς και αυξημένο κόστος.

Στις περισσότερες εφαρμογές ο εσωτερικός μαγνήτης παρουσιάζει χαμηλότερη πυκνότητα ροπής συγκριτικά με τον επιφανειακό για ίδια ονομαστικά μεγέθη ρεύματος και ΗΕΔ. Προσφέρει όμως ευρεία περιοχή σταθερής ισχύος με σχετικά υψηλή πυκνότητα ροπής και υψηλό συντελεστή ισχύος καθώς το σώμα του δρομέα αποτελεί



Σχήμα 2.1. Κύριες τοπολογίες κινητήρων μόνιμων μαγνητών: (α) επιφανειακών μαγνητών, (β) εσωτερικά επιφανειακών μόνιμων μαγνητών και (γ) εσωτερικών μόνιμων μαγνητών [117].

εμπόδιο στη μαγνητική ροή. Αντίθετα, σε διαμορφώσεις επιφανειακού μαγνήτη η περιοχή σταθερής ισχύος είναι περιορισμένη, εξαιτίας της μειωμένης ικανότητας εξασθένησης πεδίου (field weakening capability) ενώ λόγω της έκθεσης των μόνιμων μαγνητών στις αρμονικές της μαγνητεγερτικής δύναμης του διακένου οι απώλειες μαγνήτη είναι αυξημένες. Παραπάνω, στο σχήμα 2.1, φαίνονται οι τοπολογίες κινητήρων που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους:

2.2.4 Κινητήρες εσωτερικού και εξωτερικού δρομέα

Σε ότι αφορά στη σχετική θέση δρομέα και στάτη, υφίστανται δυο κατηγορίες κινητήρων, δηλαδή κινητήρες εξωτερικού και κινητήρες εσωτερικού δρομέα. Οι κινητήρες εξωτερικού δρομέα ονομάζονται και κινητήρες τροχοί και χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε ελαφριές εφαρμογές ηλεκτροκίνησης. Η τοποθέτηση ηλεκτρικών μηχανών στο εσωτερικό των τροχών σε οχήματα έχει δείξει ιδιαίτερα καλές προοπτικές σήμερα καθότι μειώνει τις απώλειες μετάδοσης τόσο κατά την πρόωση όσο και κατά την αναγεννητική πέδηση. Κατά τη σχεδίαση κινητήρων- τροχών απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή διότι δεν εμπλέκεται σχέση μετάδοσης. Οι απαιτήσεις ροπής θα πρέπει να υπολογισθούν με ακρίβεια ώστε να επιτρέπεται στο όχημα να πραγματοποιεί εκκίνηση σε ανηφορικούς δρόμους και ταυτόχρονα να επιτυγχάνεται η επιθυμητή τελική ταχύτητα.

Ο εξωτερικός δρομέας πλεονεκτεί ως προς το γεγονός ότι η φυγόκεντρος δύναμη τείνει να συγκρατήσει τους μαγνήτες στη θέση τους. Επίσης, η υψηλή ροπή αδράνειας οδηγεί στην μείωση των δονήσεων λόγω εξομάλυνσης των αρμονικών ροπής. Η δυνατότητα ενσωμάτωσης του κινητήρα στον τροχό του οχήματος είναι ένα ακόμη στοιχείο που λαμβάνεται θετικά υπόψη. Οι δυσκολίες μιας τέτοιας διαμόρφωσης συνίστανται σε θέματα ψύξης, στον μειωμένο χώρο για αύλακες στον στάτη και στην αμφιλεγόμενη αξιοπιστία του διακένου λόγω των κραδασμών που μεταφέρονται αφιltrάριστοι από τις ανωμαλίες του δρόμου [1].

2.3 Προκαταρκτική σχεδίαση

Η προκαταρκτική σχεδίαση λαμβάνει υπόψη τις προδιαγραφές του συστήματος κίνησης και προσδιορίζει τη γεωμετρία του διακένου, χωρίς τη λεπτομερή διαμόρφωση του κινητήρα. Η προκαταρκτική σχεδίαση μιας ηλεκτρικής μηχανής, αποτελεί θεμελιώδη διαδικασία στην βελτιστοποίηση γεωμετρίας των ηλεκτρικών μηχανών, καθώς αποτελεί ένα ασφαλές σημείο εκκίνησης για την διαδικασία οριστικής σχεδίασης. Η προκαταρκτική σχεδίαση περιλαμβάνει τα εξής βήματα [2]:

- Προσδιορισμό της επιφάνειας διακένου, ώστε η μηχανή να αναπτύσσει την απαραίτητη ηλεκτρομαγνητική ροπή, σε μόνιμη αλλά και μεταβατική κατάσταση, όπως αυτή έχει υπολογιστεί από τις προδιαγραφές.
- Προσδιορισμό της διαμόρφωσης στάτη και δρομέα. Εδώ προσδιορίζεται ο τύπος και η γεωμετρία, τόσο του στάτη όσο και του δρομέα, ώστε να έχουμε την δημιουργία του επιθυμητού μαγνητικού πεδίου στο διάκενο.
- Έλεγχο ειδικής ηλεκτρικής και μαγνητικής φόρτισης.
- Προσδιορισμό επίδοσης και απόδοσης.

2.3.1 Διαστασιολόγηση διακένου

Με την έννοια διαστασιολόγηση του διακένου του κινητήρα εννοούμε τις προκαταρκτικές διαστάσεις του κυλίνδρου που ορίζει το μέσον του διακένου, ανάμεσα σε στάτη και δρομέα, το οποίο ορίζεται από τις μεταβλητές D_g και L που αντιστοιχούν στη διάμετρο του δρομέα αυξημένη κατά το κενό μεταξύ δρομέα-στάτη και στο ενεργό μήκος της μηχανής. Αυτή η διαστασιολόγηση γίνεται με βάση ορισμένες τυπικές τιμές βασικών μαγνητικών, ηλεκτρικών και θερμικών μεγεθών. Παρακάτω παρουσιάζονται αυτά τα μεγέθη και οι βασικές σχέσεις υπολογισμού τους στην περίπτωση του τριφασικού κινητήρα.

2.3.1.1 Πάχος διακένου

Το πάχος του διακένου είναι πρωτεύουσας σημασίας για την επίτευξη των επιθυμητών χαρακτηριστικών λειτουργίας μιας ηλεκτρικής μηχανής και εν γένει καταβάλλεται προσπάθεια ώστε να ελαχιστοποιείται. Συχνά μάλιστα, το πάχος διακένου υπαγορεύεται από τις ανοχές των εδράσεων ή τις κατασκευαστικές ανοχές της μηχανής. Επιπλέον, αυξημένο διάκενο συνεπάγεται μειωμένη ικανότητα ροπής, με μειωμένο όμως αρμονικό περιεχόμενο και πιο ημιτονική ΜΕΔ και αντίστροφα. Στη βιβλιογραφία εμφανίζεται πληθώρα εμπειρικών τύπων για τον υπολογισμό του πάχους διακένου και συνήθως οι τιμές του κυμαίνονται από 0.5 mm ως 1 mm για μηχανές μονίμων μαγνητών μικρής ισχύος.

2.3.1.2 Ειδική μαγνητική φόρτιση

Η ειδική μαγνητική φόρτιση, συνδέει τον αριθμό πόλων P με τη μαγνητική ροή ανά πόλο Φ και δίνεται ως εξής:

$$B_{av} = \frac{P\Phi}{\pi L D_g} \quad (2.1)$$

όπου D_g η διάμετρος του διακένου και L το αξονικό μήκος του ενεργού μέρους της μηχανής. Το μέγεθος αυτό λαμβάνει συνήθως τιμές από 0.4T ως 0.7T ενώ σε ειδικές μηχανές μεγάλης απαίτησης πυκνότητας ροπής, όπου πρωτεύοντα ρόλο παίζει η επίδοση σε στατική λειτουργία, μπορεί να ξεπεράσει και το 1T. Το άνω όριο συνήθως τίθεται από το φαινόμενο του κορεσμού του σιδηρομαγνητικού υλικού στα δόντια του στάτη. Η υψηλή μαγνητική φόρτιση σημαίνει αυξημένη δυνατότητα παραγωγής ροπής και ισχύος. Το αντίτιμο είναι αυξημένες απώλειες πυρήνα, ειδικά όταν τα δόντια του στάτη βρίσκονται σε κορεσμό.

2.3.1.3 Ειδική ηλεκτρική φόρτιση

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση, ac , προσδιορίζεται από την ενεργό τιμή των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο περιφέρειας του διακένου, και δίνεται ως εξής:

$$ac = \frac{3 N_i P I_{rms}}{\pi D_g} \quad (2.2)$$

Τυπικές τιμές ηλεκτρικής φόρτισης σύγχρονων μηχανών είναι από 15000 AE/m ως 45000AE/m. Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση καθορίζει από κοινού με την ειδική μαγνητική φόρτιση την ικανότητα παραγωγής ροπής μιας δεδομένης μηχανής. Όσον αφορά τις απώλειες, η ηλεκτρική φόρτιση συνδέεται με τις απώλειες χαλκού της μηχανής.

Τα δύο παραπάνω μεγέθη συνδέονται με τη λεγόμενη σχέση εξόδου της ηλεκτρικής μηχανής, η οποία δίνει μια εκτίμηση της ροπής ή της ισχύος εξόδου. Η ενεργός τιμή της επαγόμενης τάσης, E , δίνεται από τη σχέση:

$$E_{rms} = 4,44 \cdot f \cdot k_w \cdot N_i \cdot \Phi \quad (2.3)$$

όπου k_w ο συντελεστής τυλίγματος, f η ηλεκτρική συχνότητα, N_i ο συνολικός αριθμός ελιγμάτων ανά φάση και Φ η θεμελιώδης μαγνητική ροή ανά πόλο.

Η φαινόμενη ισχύς της μηχανής δίνεται από τη σχέση:

$$S = 3 \cdot E_{rms} \cdot I_{rms} \quad (2.4)$$

Η ηλεκτρική συχνότητα f συνδέεται με τη μηχανική ταχύτητα περιστροφής, n_s , με τη σχέση:

$$n_s = \frac{120 f}{P} \quad (2.5)$$

Ο συνδυασμός των παραπάνω σχέσεων δίνει την εξίσωση εξόδου της ηλεκτρικής σύγχρονης μηχανής:

$$S = 1,1 \cdot k_w \cdot \pi^2 \cdot B_{av} \cdot ac \cdot D_g^2 \cdot L \cdot n_s \quad (2.6)$$

Όπως φαίνεται από αυτή τη σχέση, η ισχύς εξόδου της μηχανής είναι ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου του διακένου και ανάλογη του αξονικού μήκους του ενεργού μέρους του πυρήνα. Έτσι λοιπόν, κατά τη σχεδίαση ενός κινητήρα πρέπει να προσδιοριστεί ο πιο συμφέρων συνδυασμός ειδικής ηλεκτρικής και μαγνητικής φόρτισης, διαστάσεων διακένου και ταχύτητας περιστροφής ώστε να ληφθεί η επιθυμητή ισχύς στην έξοδο χωρίς να θυσιάστούν άλλα χαρακτηριστικά της μηχανής.

2.3.1.4 Επιφάνεια διακένου

Η ροπή διακένου T_e υπολογίζεται βάσει της μέσης εφαπτομενικής πίεσης των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο και της επιφάνειας διακένου A , μέσω των παρακάτω σχέσεων:

$$F_t = P_t \cdot A = P_t \cdot \pi \cdot L \cdot D_g \quad (2.7)$$

$$T_{\max} = \frac{D_g \cdot F_t}{2} \quad (2.8)$$

$$T_{\max} = \frac{\pi}{2} \cdot L \cdot D_g^2 \cdot P_t \quad (2.9)$$

Επίσης η μέση μαγνητική δύναμη στο διάκενο, F_t , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_t = L \oint_C B_n \cdot B_t dl \quad (2.10)$$

Η μέση πίεση της εφαπτομενικής δύναμης στο διάκενο ορίζεται από τον τύπο:

$$P_t = \frac{F_t}{A} = \frac{1}{\pi \cdot D_g \cdot \mu_0} \oint_C B_n \cdot B_t dl \quad (2.11)$$

Η μέση μαγνητική φόρτιση στο διάκενο B_{av} επιλέγεται συνήθως ίση με 0,5 T όπως είθισται σε εφαρμογές υψηλής απόδοσης. Θεωρώντας ότι η γωνία μεταξύ της

ακτινικής και της εφαπτομενικής συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου είναι $\theta=45^\circ$ προκύπτει:

$$B_n = B_t = B_{av} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (2.12)$$

Άρα η εφαπτομενική πίεση προκύπτει ως εξής:

$$P_t = \frac{B_n B_t \pi D_g}{\pi D_g \mu_0} = \frac{B_{av}^2 \cdot \cos 2\theta}{2\mu_0} \quad (2.13)$$

Άρα προκύπτει:

$$D_g^2 \cdot L = \frac{2T_{\max}}{\pi P_t} \quad (2.14)$$

2.3.2 Αναλογία διαστάσεων D_g και L

Η διαστασιολόγηση του διακένου μιας ηλεκτρικής μηχανής εμπλέκει θέματα επίδοσης, απόδοσης και μηχανικής αντοχής [2]. Μια αύξηση στη διάμετρο του διακένου έχει ως αποτέλεσμα πολύ μεγαλύτερη αύξηση στην ισχύ εξόδου σε σχέση με αντίστοιχη αύξηση του ενεργού μήκους. Παρόλα αυτά πρέπει να ληφθούν υπόψη η απαίτηση ροπής και η ονομαστική ταχύτητα. Για υψηλές απαιτήσεις ροπής, συνίσταται η επιλογή μεγάλης διαμέτρου διακένου, καθώς έτσι επιτυγχάνεται υψηλότερη παραγόμενη ροπή, λόγω της αύξησης της απόστασης του διακένου από τον άξονα. Αντιθέτως, η απόδοση της μηχανής δεν αυξάνεται κατ' ανάγκη όταν η αναλογία L/D_g είναι μειωμένη. Ο λόγος είναι ότι σε περίπτωση μεγάλης διαμέτρου διακένου σε σχέση με το μήκος της μηχανής, αυξάνεται το ποσοστό του τυλίγματος που βρίσκεται έξω από την ενεργή περιοχή του πυρήνα και κατά συνέπεια οι θερμικές απώλειες. Επίσης, μια μηχανή με πολύ επίμηκες διάκενο έχει μεγάλη μάζα πυρήνα και αναμένεται να εμφανίζει αυξημένες απώλειες πυρήνα, επομένως δεν επιτυγχάνει τη βέλτιστη απόδοση.

Επίσης, το μικρό αξονικό μήκος επιφέρει μεγάλες τιμές ροής σκέδασης στο διάκενο. Αντίθετα, για εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων, η τυπική προσέγγιση σχεδίασης είναι η επιλογή μεγάλου αξονικού μήκους και όχι η αύξηση της διαμέτρου, ώστε να επιτευχθεί αύξηση της ισχύος. Με αυτό τον τρόπο διατηρείται η επιφανειακή ταχύτητα δρομέα σε λογικές τιμές και έτσι αποφεύγονται υψηλές τιμές φυγόκεντρων δυνάμεων και τοπικών απωλειών σιδήρου. Παράλληλα, οι δρομείς μεγάλου ενεργού μήκους μπορούν να εμφανίζουν έντονη ταλαντωτική συμπεριφορά, λόγω μηχανικών μεταβατικών, με την αύξηση της ταχύτητας. Η μηχανική αντοχή του δρομέα και η διαστασιολόγηση του διακένου εξαρτώνται και από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Σε μικρές ταχύτητες περιστροφής προτιμάται μικρός λόγος L/D_g . Σε μεγάλες ταχύτητες περιστροφής, η οριακή τάση διακένου περιορίζει τον δρομέα σε μικρή ακτίνα και πλέον η επιθυμητή ισχύς λαμβάνεται με αύξηση του αξονικού μήκους της μηχανής.

Πίνακας 2.1. Περιοχές τιμών του λόγου L/τ .

Λόγος L/τ	Χαρακτηριστικό ηλεκτρικής μηχανής
1.0	Ισορροπημένη σχεδίαση
1.0 - 1.5	Υψηλός συντελεστής ισχύος
1.5	Υψηλή απόδοση
1.5 – 2	Ελάχιστο κόστος

Και σε αυτή την περίπτωση όμως, υπάρχει μηχανικό όριο στην αύξηση του λόγου L/D_g , το οποίο συνίσταται στην ακαμψία του σώματος του δρομέα και την διατήρηση του διακένου.

Στη διεθνή βιβλιογραφία προσδιορίζονται ορισμένες αναλογίες που πρέπει να έχει μια μηχανή ώστε να χαρακτηρίζεται από υψηλή επίδοση, απόδοση ή ένα ισορροπημένο συνδυασμό των δύο. Συνήθως γίνεται λόγος για το λόγο του αξονικού μήκους της μηχανής L και του μήκους ενός πόλου τ . Το μήκος πόλου δίνεται ως εξής:

$$\tau = \frac{\pi D}{P} \quad (2.15)$$

Στον πίνακα 2.1 παρατίθενται οι περιοχές τιμών του λόγου, L/τ , η κάθε μια από τις οποίες παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά [1].

Ωστόσο, σε διπολικές μηχανές και σε κινητήρες ισχύος μικρότερης του ενός kW μπορεί να παρατηρηθούν τιμές του λόγου L/τ μέχρι και 0,6. Ο λόγος είναι ότι σε αυτές τις μηχανές, οι μεγάλες τιμές L/τ δίνουν μικρή διάμετρο με αποτέλεσμα να μην υπάρχει αρκετός χώρος για τις αύλακες του στάτη.

2.3.3 Προσδιορισμός κύριων χαρακτηριστικών στάτη

Η συχνότητα λειτουργίας αποτελεί πάρα πολύ σημαντικό λειτουργικό χαρακτηριστικό καθώς καθορίζει με άμεσο τρόπο τη διακύμανση των απωλειών πυρήνα αλλά και τις αυτεπαγωγές του κινητήρα. Μια αύξηση της συχνότητας επιφέρει αύξηση των απωλειών πυρήνα με πολυωνυμική σχέση δευτέρου βαθμού ενώ αυξάνει με ανάλογο τρόπο την τιμή της αντίδρασης του κινητήρα. Παράλληλα, για την ίδια ονομαστική ροπή, μηχανές με περισσότερους πόλους έχουν ελαφρύτερο μαγνητικό κύκλωμα, καθώς η ποσότητα της μαγνητικής ροής που διέρχεται από τον έναν πόλο στον άλλο είναι αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού των πόλων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα μέρη του σιδηρομαγνητικού υλικού, δηλαδή τα δόντια, το σώμα του στάτη και το σώμα του δρομέα, να μπορούν να μειωθούν σε μέγεθος, χωρίς να αυξηθούν τα επίπεδα κορεσμού του σιδήρου [3]. Ο λόγος πόλων/ηλεκτρικής συχνότητας προκύπτει ως εξής:

$$\frac{P}{f} = \frac{4\pi}{\omega_m} \quad (2.16)$$

Γίνεται εμφανές ότι για χαμηλή ταχύτητα περιστροφής ο αριθμός των πόλων δύναται να αυξηθεί, διατηρώντας σχετικά μικρή συχνότητα. Έτσι, οι απώλειες πυρήνα γι' αυτές τις εφαρμογές είναι σχετικά χαμηλές, συγκρινόμενες με τις απώλειες χαλκού. Επίσης, μέσω της χρήσης συγκεντρωμένων τυλιγμάτων, η αύξηση του αριθμού των πόλων αναμένεται να ελαττώσει και τις απώλειες χαλκού καθώς αυξάνοντας τους πόλους μειώνεται το πάχος του δοντιού, συνεπώς μειώνεται τόσο το μήκος των επιμέρους αγωγών, όσο και το μήκος των αγωγών εκτός ενεργού κυκλώματος. Μείωση του μήκους συνεπάγεται μείωση της αντίστασης των αγωγών οδηγώντας σε μείωση των ωμικών απωλειών των τυλιγμάτων. Έτσι λοιπόν, για συγκεκριμένο επίπεδο τάσης, αναμένονται μικρότερες απώλειες χαλκού για μεγαλύτερο αριθμό πόλων. Με βάση τα παραπάνω, η μέση ροή ανά πόλο υπολογίζεται ως εξής:

$$\Phi = \frac{B_{av} \pi L D_g}{P} \quad (2.17)$$

Άρα ο αριθμός ελιγμάτων των πηνίων κάθε φάσης προκύπτει:

$$N_i = \frac{E_{rms}}{4,44 \cdot f \cdot P/2 \cdot \Phi} \quad (2.18)$$

Το επίπεδο της τάσης καθορίζεται από το επίπεδο τάσης των μπαταριών, την δυνατότητα οδήγησης του αντιστροφέα και την προσπάθεια μείωσης των απωλειών. Καθώς η κυρίαρχη συνιστώσα απωλειών, είναι οι απώλειες χαλκού, είναι προφανές πως όσο υψηλότερο είναι το επίπεδο τάσης τόσο πιο αποδοτικός θα είναι ο κινητήρας. Έστω λοιπόν ότι η διαθέσιμη τάση μπαταριών είναι V_{DC} . Θεωρώντας για την οδήγηση της μηχανής αντιστροφή με τεχνική διαμόρφωσης SPWM και συντελεστή διαμόρφωσης m_a , το πλάτος της θεμελιώδης συνιστώσας της φασικής τάσης εξόδου προκύπτει:

$$V_{pp-ph} = \frac{m_a \cdot V_{DC}}{2} \quad (2.19)$$

Και επομένως η μέγιστη RMS τιμή της ΗΕΔ της μηχανής είναι:

$$E_{rms} = \frac{V_{pp-ph}}{\sqrt{2}} \quad (2.20)$$

Η τιμή της αναπτυσσόμενης αντι-ΗΕΔ ενός κινητήρα καθορίζει τη δυνατότητα οδήγησης του από τον αντιστροφέα ισχύος με βάση τη διαθέσιμη DC τάση των μπαταριών. Για να μπορεί ο κινητήρας να οδηγηθεί από το υφιστάμενο σύστημα κίνησης, θέτουμε ως επιθυμητή τιμή της αντι-ΗΕΔ το 85% με 90% της μέγιστης εναλλασσόμενης τάσης που μπορεί να παράγει ο αντιστροφέας:

Πίνακας 2.2. Κύρια χαρακτηριστικά των συγκεντρωμένων και των διανεμημένων τυλιγμάτων.

Χαρακτηριστικό	Διανεμημένα τυλίγματα	Συγκεντρωμένα τυλίγματα
Συντελεστής πληρότητας χαλκού στις αύλακες	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

$$E_{rms} = 0.85 \div 0.90 \cdot \frac{V_{pp-ph}}{\sqrt{2}} \quad (2.21)$$

Και η ενεργός τιμή του ρεύματος προκύπτει:

$$I_{rms} = \frac{P_{el}}{3V_{rms} \cos \varphi} \quad (2.22)$$

2.3.3.1 Διαμόρφωση τυλιγμάτων

Τα τυλίγματα μίας ηλεκτρικής μηχανής χαρακτηρίζονται ως προς τις τερματικές συνδέσεις των επιμέρους πηνίων, τον τρόπο με τον οποίο κατανέμονται στα αυλάκια και το βήμα συστάδας. Έτσι, μπορεί να είναι βροχοειδή ή κυματοειδή (τα 1^α χρησιμοποιούνται σε μηχανές με λίγους πόλους ενώ τα 2^α σε πολυπολικές μηχανές χαμηλών ταχυτήτων), διανεμημένα (με 1 ή περισσότερα αυλάκια ανά πόλο και φάση), πλήρους ή κλασματικού βήματος. Οι συνηθέστερες περιπτώσεις τυλιγμάτων είναι οι εξής:

- Επικαλυπτόμενα, διανεμημένα με 1 ή 2 αυλάκια ανά πόλο και φάση.
- Μη επικαλυπτόμενα, συγκεντρωμένα, μονής ή διπλής στρώσης.

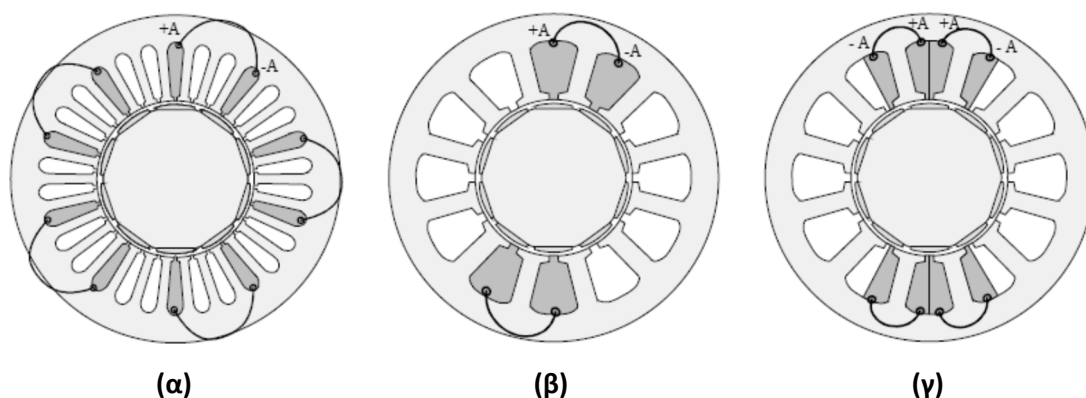
Τα διανεμημένα επικαλυπτόμενα τυλίγματα παράγουν γενικά πιο ημιτονοειδή ΜΕΔ στο διάκενο, γι' αυτό χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στις μηχανές μόνιμου μαγνήτη χωρίς συλλέκτη (Brushless AC PM machines). Μια νέα διαμόρφωση τυλιγμάτων, που χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο, είναι τα συγκεντρωμένα τυλίγματα κλασματικού βήματος (Fractional Slot Concentrated Windings). Ο λόγος διάδοσης έγκειται στην υψηλή πυκνότητα ισχύος, την απόδοση και τα κοντά άκρα τυλιγμάτων. Παραπάνω, στον πίνακα 2.2, παρατίθενται τα κύρια χαρακτηριστικά των συγκεντρωμένων και των διανεμημένων τυλιγμάτων:

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των συγκεντρωμένων τυλιγμάτων είναι τα εξής:

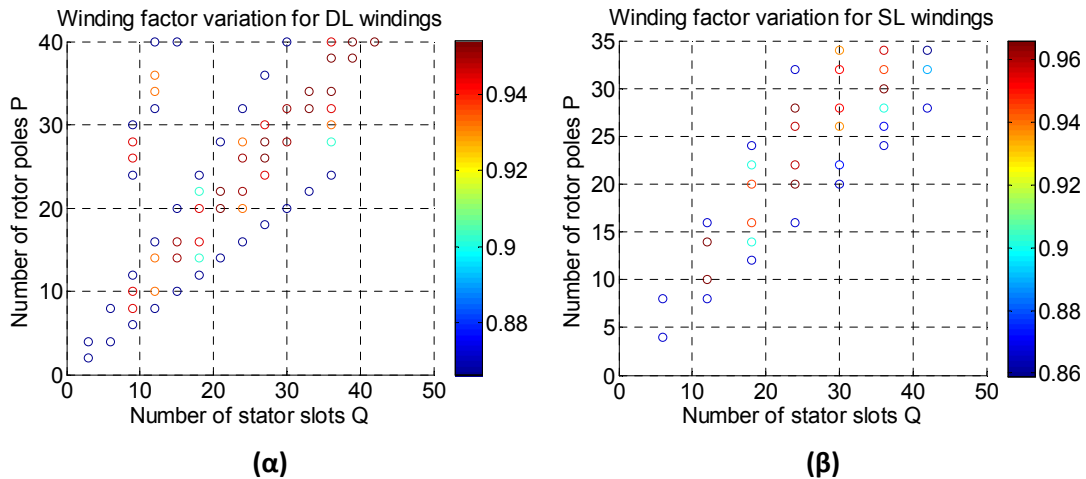
- Ευκολία στην κατασκευή, εφόσον πρόκειται για μη επικαλυπτόμενα τυλίγματα.
- Υψηλός συντελεστής πληρότητας χαλκού, άρα μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος.
- Κοντύτερα άκρα τυλιγμάτων, με αποτέλεσμα χαμηλότερες απώλειες χαλκού.
- Υψηλότερη ανοχή στα σφάλματα και καλύτερη συμπεριφορά σε μεταβατικές καταστάσεις, εφόσον δεν υπάρχουν αμοιβαίες επαγωγές ανάμεσα στις φάσεις.
- Χαμηλή ροπή ευθυγράμμισης, δεδομένου ότι περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό κύκλων ευθυγράμμισης ανά μηχανική περιστροφή.

Με χρήση συγκεντρωμένων τυλιγμάτων επιτυγχάνεται υψηλότερος συντελεστής πληρότητας χαλκού άρα και υψηλότερη πυκνότητα ισχύος. Παράλληλα, προκύπτουν κοντύτερα άκρα τυλιγμάτων και κατ' επέκταση χαμηλότερες απώλειες χαλκού. Παρόλα αυτά, η αναπτυσσόμενη ροπή περιλαμβάνει στις περισσότερες περιπτώσεις ανώτερες αρμονικές, εν αντιθέσει με τα διανεμημένα τυλίγματα όπου κυριαρχεί η θεμελιώδης αρμονική ροπής, χάρη στην περισσότερο ημιτονοειδή κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο. Επιπλέον, οι συνολικές απώλειες είναι υψηλές σε μεγάλες ταχύτητες εξαιτίας των πρόσθετων απωλειών δινορρευμάτων στο δρομέα και στους μόνιμους μαγνήτες λόγω των ανώτερων αρμονικών του μαγνητικού πεδίου [4].

Η χρήση κατανεμημένων τυλιγμάτων δίνει μεγαλύτερη τιμή της θεμελιώδους της ΗΕΔ του κινητήρα χάρη στον υψηλότερο συντελεστή τυλίγματος. Ιδιαίτερα σε εφαρμογές μηχανών εσωτερικών μονίμων μαγνητών, το διανεμημένο τύλιγμα παράγει υψηλότερη μέση ροπή και χαμηλότερη ροπή ευθυγράμμισης. Τα τυλίγματα στα οποία ο αριθμός αυλάκων ανά πόλο και ανά φάση δεν είναι ακέραιος αλλά κλασματικός, ονομάζονται τυλίγματα κλασματικού βήματος. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι τα πηνία έχουν τοποθετηθεί κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι πιο κοντά σε μήκος συγκριτικά με τα τυλίγματα πλήρους βήματος [5].



Σχήμα 2.2. Κύριες διαμορφώσεις τυλιγμάτων: (α) διανεμημένα, (β) συγκεντρωμένα μονής στρώσης και (γ) συγκεντρωμένα διπλής στρώσης [118].



Σχήμα 2.3. Κατανομή των τιμών του συντελεστή τυλίγματος για διαφορετικούς συνδυασμούς αυλάκων/πόλων για συγκεντρωμένα τυλίγματα (α) διπλής και (β) μονής στρώσης.[104]

Στον πίνακα 2.3 και στον πίνακα 2.4 παρουσιάζονται οι εφικτοί συνδυασμοί αυλάκων/πόλων και οι αντίστοιχοι συντελεστές τυλίγματος, για συγκεντρωμένα τυλίγματα κλασματικού βήματος διπλής και μονής στρώσης. Στο σχήμα 2.3, παρουσιάζονται γραφικά οι προαναφερθείσες τιμές συντελεστή τυλίγματος για τις δύο περιπτώσεις συγκεντρωμένων τυλιγμάτων [6].

Αντίθετα με τα διανεμημένα τυλίγματα, δεν υπάρχει μια πάγια τακτική δημιουργίας της ακολουθίας των φάσεων σε ότι αφορά τη διαμόρφωση των συγκεντρωμένων τυλιγμάτων. Κάθε δυνατός συνδυασμός αυλάκων/πόλων δημιουργεί διαφορετική διαμόρφωση τυλιγμάτων και διαφορετικό αριθμό συμμετριών. Παρακάτω, εξηγείται η διαδικασία τοποθέτησης των πηνίων των τριών φάσεων στις αύλακες για τον επιλεχθέντα συνδυασμό αυλάκων πόλων[7]. Τα βασικά βήματα είναι τα εξής:

- Ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και φάση αναλύεται σε κλάσμα που δεν επιδέχεται περαιτέρω απλοποίηση.

$$q = \frac{Q_s}{3 \cdot P} = \frac{n}{d} \quad (2.23)$$

- Βρίσκεται στη συνέχεια μία ακολουθία από $d-n$ μηδενικά και n άσσους, στην οποία οι άσσοι κατανομονται όσο πιο ομοιόμορφα δύναται.
- Η προκύπτουσα ακολουθία επαναλαμβάνεται $3P/d$ φορές. Στη συνέχεια αντιστοιχίζεται με την αλληλουχία του διανεμημένου τυλίγματος με $3P$ αύλακες και q αύλακες ανά πόλο και ανά φάση.
- Οι αγωγοί του διανεμημένου τυλίγματος που αντιστοιχούν στους άσσους σχηματίζουν τη μία στρώση του τυλίγματος. Η δεύτερη στρώση προκύπτει με την επιστροφή του αγωγού απ' την άλλη πλευρά του δοντιού, δηλαδή στο επόμενο αυλάκι.
- Τέλος γράφεται ένα διάνυσμα S που περιγράφει το τύλιγμα της φάσης A . Γι' αυτό, οι αύλακες αριθμούνται από το 1 έως το Q_s . Εάν και οι δύο στρώσεις μιας

αύλακας περιέχουν αγωγούς της φάσης A , ο αριθμός της αύλακας αυτής γράφεται δύο φορές στο διάνυσμα. Έτσι, το διάνυσμα S έχει $2/3 \cdot Q_s$ στοιχεία. Για τους αγωγούς επιστροφής της φάσης A τοποθετείται ένα “-“ στον αριθμό του αντίστοιχου αυλακίου. Σημειώνεται ότι απ’ αυτό το διάνυσμα υπολογίζεται ο συντελεστής του τυλίγματος, k_w .

Όπως προκύπτει απ’ την κατανομή των πηνίων στις αύλακες της μηχανής, υπάρχει αντιπεριοδικότητα ανά κάποιο συγκεκριμένο αριθμό αυλάκων (ή πόλων). Βάσει αυτής της συμμετρίας δύναται να γίνει ανάλυση μέσω πεπερασμένων στοιχείων προσομοιώνοντας μόνο κάποιο τμήμα της αρχικής γεωμετρίας:

- Ο μέγιστος κοινός διαιρέτης του αριθμού των αυλάκων και των πόλων, εκφράζει τον αριθμό των συμμετριών που υπάρχουν στη μηχανή.

$$X = \text{gcd}(Q_s, P) \quad (2.24)$$

- Στη συνέχεια διαιρώντας τον αριθμό των πόλων P και των αυλάκων Q_s , με το X προκύπτει ο αριθμός των αυλάκων και των πόλων που απαρτίζουν το κάθε συμμετρικό κομμάτι. Έτσι έχουμε:

$$P' = P/X \quad (2.25)$$

και

$$Q_s' = Q_s/X \quad (2.26)$$

Συνεπώς, κάθε συμμετρικό κομμάτι της μηχανής αποτελείται από P' πόλους και Q_s' αύλακες. Αν N_i είναι ο αριθμός σπειρών ανά φάση του τυλίγματος και m ο αριθμός των φάσεων, ο αριθμός σπειρών ανά αύλακα προκύπτει:

$$n_c = \frac{m \cdot N_i}{Q_s} \quad (2.27)$$

Η ενεργός διατομή αύλακας για κάποια τιμή πυκνότητα ρεύματος J A/καρέ είναι:

$$A_{Cu} = \frac{n_c \cdot I_N}{J} \quad (2.28)$$

Λαμβάνοντας μια τιμή συντελεστή πληρότητας χαλκού, ff , στην αύλακα, η τελική απαιτούμενη επιφάνεια αύλακας προκύπτει:

$$A_{slot} = \frac{A_{Cu}}{ff} \quad (2.29)$$

2.3.4 Μελέτη χαρακτηριστικών δρομέα.

Η καλή αξιοποίηση του μόνιμου μαγνήτη έγκειται στη λειτουργία του σε περιοχή κοντά στο σημείο μέγιστης ενέργειας στην καμπύλη απομαγνήτισης. Η καμπύλη απομαγνήτισης είναι πρακτικά ευθεία γραμμή, διευκολύνοντας τον υπολογισμό του σημείου που αποδίδουν τη μέγιστη ενέργεια, αρκεί να είναι γνωστά η παραμένουσα μαγνήτιση B_r , και το μαγνητικό πεδίο επαναφοράς H_c . Η καμπύλη απομαγνήτισης μπορεί να περιγραφεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$H(B) = \frac{H_c}{B_r} \cdot B - H_c \quad (2.30)$$

όπου η ένταση του μαγνητικού πεδίου H υπολογίζεται σε kA/m. Με χρήση της παραπάνω εξίσωσης συσχετισμού μαγνητεγερτικής δύναμης και πυκνότητας μαγνητικής ροής, υπολογίζεται η μείωση κατά την ονομαστική φόρτιση της πυκνότητας μαγνητικής ροής στην επιφάνεια του μαγνήτη ως εξής:

$$\Delta B = \frac{B_r}{H_c} \cdot ac \quad (2.31)$$

Στην περίπτωση επιφανειακού μόνιμου μαγνήτη, θεωρώντας σταθερή τη ΜΕΔ κατά μήκος του διακένου που αντιστοιχεί στον μαγνήτη, προκύπτει:

$$B_g = B_r \cdot \frac{L_m}{L_m + L_g} \quad (2.32)$$

Όπου B_g , η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο, B_r , η παραμένουσα μαγνήτιση, L_m το πάχος του μαγνήτη και L_g το μήκος διακένου. Το απαιτούμενο περιφερειακό μήκος μαγνήτη εκτιμάται από την σχέση:

$$L_{magnet} = \frac{\Phi}{B_g \cdot L} \quad (2.33)$$

Η ακτίνα του δρομέα δίνεται από την σχέση:

$$R_r = \frac{D_g - L_g}{2} - L_m \quad (2.34)$$

Και προκύπτει το τόξο του μαγνήτη σε μοίρες ως εξής:

$$\theta_{magnet} = \frac{L_{magnet}}{R_r} \cdot \frac{180}{\pi} \quad (2.35)$$

2.4 Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Κατά την προκαταρκτική σχεδίαση μιας μηχανής προκύπτει η βασική κατασκευαστική διαμόρφωση, η οποία αποτελεί προσχέδιο για τη φάση της οριστικής σχεδίασης. Προκειμένου να επιτευχθεί λεπτομερής βελτιστοποίηση γεωμετρίας, η οριστική σχεδίαση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ) για την επίλυση των εξισώσεων του μαγνητικού πεδίου. Η ανάλυση αυτή επιτρέπει εξαιρετικά λεπτομερή αναπαράσταση του μαγνητικού πεδίου θεωρώντας την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας και τη μη γραμμική συμπεριφορά των μαγνητικών υλικών. Αποτέλεσμα της μεθοδολογίας αυτής είναι η κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο μαγνητικό κύκλωμα της μηχανής και μέσω αυτής, με κατάλληλη μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων μπορούν να υπολογισθούν με ακρίβεια όλα τα λειτουργικά μεγέθη όπως, η ροπή, οι απώλειες και να εντοπιστούν οι περιοχές του πυρήνα που βρίσκονται σε κορεσμό.

Η επίλυση προβλημάτων σε πολύπλοκες γεωμετρίες που περιλαμβάνουν μη γραμμικά υλικά οδήγησε στην ανάπτυξη αριθμητικών μεθόδων επίλυσης. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων επιτυγχάνει τη μετατροπή των διαφορικών εξισώσεων με μερικές παραγώγους σε αλγεβρικές διακριτοποιώντας το συνεχές πρόβλημα σε ένα μεγάλο αριθμό περιοχών απλής γεωμετρίας. Κατά τη διαδικασία αυτή αντικαθίσταται η αρχική εξίσωση του πεδίου με το πρόβλημα στασιμότητας μίας συναρτησιακής που έχει διαστάσεις ενέργειας. Αν η αρχική γεωμετρία χωρισθεί σε αρκετά μεγάλο αριθμό τέτοιων υποπεριοχών, το υπολογιζόμενο μέγεθος μπορεί να προσεγγισθεί με την επιθυμητή ακρίβεια.

Η διακριτοποίηση του χώρου πραγματοποιείται συνήθως με τρίγωνα στην περίπτωση διδιάστατης γεωμετρίας, ή με τετράεδρα στην περίπτωση τρισδιάστατης γεωμετρίας, αντίστοιχα. Με αυτό τον τρόπο ένα συνεχές φυσικό πρόβλημα μετατρέπεται σε διακριτό, στο οποίο οι άγνωστοι απαρτίζονται από τις τιμές του πεδίου στις κορυφές των διαδοχικών τριγώνων ή τετραέδρων. Το πρόβλημα που προκύπτει με τη χρήση ΜΠΣ είναι ένα αλγεβρικό σύστημα εξισώσεων όπου οι τιμές του πεδίου στο εσωτερικό των στοιχείων (τρίγωνα ή τετράεδρα) μπορούν να υπολογισθούν χρησιμοποιώντας τις τιμές των αντίστοιχων κορυφών τους.

2.4.1 Επίλυση μαγνητοστατικών προβλημάτων

Μαγνητοστατικά ονομάζονται τα προβλήματα στα οποία το μαγνητικό πεδίο είναι αμετάβλητο ως προς το χρόνο [8]. Σε αυτή την περίπτωση, η ένταση του μαγνητικού πεδίου H και η μαγνητική επαγωγή B ικανοποιούν τις παρακάτω εξισώσεις του Maxwell:

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (2.36)$$

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (2.37)$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho \quad (2.38)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (2.39)$$

Σύμφωνα με το νόμο του Ampere και θεωρώντας χαμηλές συχνότητας λειτουργίας προκύπτει:

$$\frac{\partial D}{\partial t} \approx 0 \quad (2.40)$$

και συνεπώς:

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} \quad (2.41)$$

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

$$\bar{B} = \mu \bar{H} \quad (2.42)$$

Στην περίπτωση των μόνιμων μαγνητών η καταστατική εξίσωση έχει τη γενική μορφή:

$$\bar{B} = \mu_0 \bar{H} + \bar{M} \quad (2.43)$$

όπου M είναι η μαγνήτιση του υλικού του μόνιμου μαγνήτη. Αν το υλικό είναι μη γραμμικό, όπως για παράδειγμα κορεσμένος σίδηρος ή μαγνήτες alnico, τότε η μαγνητική διαπερατότητα, μ , είναι στην πραγματικότητα μία συνάρτηση του μέτρου του B :

$$\mu(B) = \frac{B}{H(B)} \quad (2.44)$$

Η εύρεση του μαγνητικού πεδίου σε κάθε σημείο του χώρου μπορεί να επιτευχθεί υπολογίζοντας το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό A . Το μαγνητικό πεδίο γράφεται ως συνάρτηση του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού, ως εξής:

$$\bar{B} = \nabla \times \bar{A} \quad (2.45)$$

Αυτός ο ορισμός του B ικανοποιεί πάντα την εξίσωση (2.39). Η εξίσωση (2.45) διατυπώνεται ως εξής:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times \bar{A} \right) = \bar{J} \quad (2.46)$$

Για ένα γραμμικό ιστροπικό μέσο, υπό την παραδοχή πως ισχύει η συνθήκη του Coulomb $\nabla \cdot \bar{A} = 0$, έχουμε:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \bar{A} = -\bar{J} \quad (2.47)$$

Στη γενική περίπτωση, το διανυσματικό δυναμικό είναι ένα διάνυσμα τριών συνιστωσών. Στη θεώρηση καρτεσιανής γεωμετρίας δύο διαστάσεων όμως, οι δύο από αυτές τις τρεις συνιστώσες μπορούν να μηδενισθούν, και μεταβάλλεται μόνο η A_z . Το πλεονέκτημα της χρήσης του διανυσματικού δυναμικού είναι πως όλες οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται στο μαγνητοστατικό πεδίο συνδυάζονται σε μία εξίσωση μίας μεταβλητής. Εάν είναι γνωστό το A , τότε τα B και H προκύπτουν από κατάλληλη επεξεργασία του. Συνεπώς έχουμε:

$$\bar{A} = A_z \bar{i}_z \quad (2.48)$$

Και για την πυκνότητα ρεύματος J :

$$\bar{J} = J_z \bar{i}_z \quad (2.49)$$

Για την πυκνότητα μαγνητικής ροής η ανάλυση περιορίζεται στις δύο διαστάσεις και εν προκειμένω:

$$\bar{B} = B_x \bar{i}_x + B_y \bar{i}_y \quad (2.50)$$

Στην εργασία αυτή τα προβλήματα που λύνονται θεωρούνται μαγνητοστατικά και επιλύονται με βάση την εξίσωση Poisson, ενώ τα δυναμικά φαινόμενα, που προϋποθέτουν περιστροφή του δρομέα, θεωρούνται ως διακριτές μαγνητοστατικές καταστάσεις, όπου γίνεται η παραδοχή πως σε εκείνες τις στιγμές το πεδίο είναι αμετάβλητο. Η ανάλυση των κινητήρων μόνιμων μαγνητών μπορεί να επιτευχθεί με βάση τη θεώρηση αυτή, εφόσον τα αναπτυσσόμενα δινορρέυματα είναι περιορισμένα και μπορούν να αμεληθούν.

2.4.2 Οριακές συνθήκες

Η επίλυση ενός μαγνητοστατικού ή ηλεκτροστατικού προβλήματος, ανάγεται σε επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων. Είναι γνωστό από την θεωρία των μερικών διαφορικών εξισώσεων, πως προκειμένου να έχουμε μοναδική λύση, πρέπει να ορισθούν οι οριακές συνθήκες του προβλήματος ώστε να έχουμε ένα καλώς τοποθετημένο πρόβλημα. Οι οριακές συνθήκες κατηγοριοποιούνται ως εξής [7]:

- Dirichlet: Σε αυτό τον τύπο οριακής συνθήκης, η τιμή του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού A δηλώνεται πάνω στο όριο. Αν $A=0$ τότε πρόκειται για την ομογενή συνθήκη Dirichlet, διαφορετικά πρόκειται για την μη ομογενή. Η συνθήκη $A=0$ απαντάται συχνά σε προβλήματα ηλεκτρικών μηχανών. Η

φυσική σημασία της δήλωσης $A=0$ κατά μήκος ενός ορίου της γεωμετρίας σε ένα μαγνητικό πρόβλημα, είναι πως η μαγνητική ροή περιορίζεται εντός των ορίων της μηχανής, ενώ οι γραμμές της μαγνητικής ροής θα είναι παράλληλες προς το σύνορο αυτό. Σε περιπτώσεις όπου μοντελοποιείται ολόκληρη η μηχανή, η χρήση μόνο αυτής της οριακής συνθήκης είναι επαρκής.

- Neumann: Η οριακή αυτή συνθήκη ορίζει την κάθετη παράγωγο του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού κατά μήκος του ορίου. Η συνηθέστερη περίπτωση είναι η χρήση της ομογενούς συνθήκης Neumann δηλαδή $\partial A/\partial n=0$. Συνήθως χρησιμοποιείται στα μαγνητικά προβλήματα σε περιπτώσεις διεπιφάνειας με υλικό πολύ μεγάλης διαπερατότητας. Η χρήση αυτής τη συνθήκης επιβάλλει στις μαγνητικές γραμμές να τέμνουν το σύνορο κάθετα.
- Robin: Η οριακή συνθήκη Robin είναι ένα είδος συνδυασμού των συνθηκών Dirichlet και Neumann, καθώς καθορίζει μια σχέση μεταξύ της των σταθμισμένων τιμών του A και της παραγώγου του. Αυτή η οριακή συνθήκη χρησιμοποιείται συχνά προβλήματα διάδοσης θερμότητας ως οριακή συνθήκη σε μονωτικές επιφάνειες.
- Περιοδική: Μία περιοδική οριακή συνθήκη συνδέει δύο όρια. Σε αυτό τον τύπο οριακής συνθήκης, οι οριακές τιμές στα αντίστοιχα σημεία των δύο ορίων είναι ίσες.
- Αντιπεριοδική: Μια αντιπεριοδική οριακή συνθήκη συνδέει επίσης δύο όρια μεταξύ τους, αλλά σε αυτή την περίπτωση τα αντίστοιχα σύνορα έχουν ίσα μέτρα αλλά αντίθετο πρόσημο.
Τόσο οι περιοδικές όσο και οι αντιπεριοδικές οριακές συνθήκες χρησιμοποιούνται όταν μοντελοποιείται ένα τμήμα μόνο της μηχανής.

2.4.3 Διαδικασία ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία

Συνοπτικά, η διαδικασία επίλυσης ενός μαγνητικού προβλήματος με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων έχει τα παρακάτω στάδια:

1. Σχεδίαση της γεωμετρίας, ορισμός των οριακών και περιοδικών συνθηκών και των υλικών.
2. Πλεγματοποίηση του προβλήματος με επιθυμητό αριθμό τριγωνικών στοιχείων, θεώρηση θεμάτων πεπερασμένης ακρίβειας ή άλλων υπολογιστικών περιορισμών.
3. Επίλυση του προβλήματος γραμμικής άλγεβρας και εύρεση του διανυσματικού δυναμικού.
4. Απεικόνιση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

2.4.3.1 Σχεδίαση και πλεγματοποίηση

Κατά τη διαδικασία της σχεδίασης της εκάστοτε γεωμετρίας κινητήρα αρχικά πραγματοποιείται η παραμετροποίηση της. Επιλέγεται ένα πλήθος ανεξάρτητων

μεταβλητών σχεδίασης και ακολούθως πραγματοποιείται η έκφραση όλων των υπόλοιπων μεταβλητών σχεδίασης ως εξαρτημένες από τις πρώτες. Στα πλαίσια της διατριβής υλοποιήθηκαν δύο παραμετρικά μοντέλα σχεδίασης ηλεκτρικών κινητήρων που αφορούν σε διαφορετικές εφαρμογές. Οι κινητήρες που μοντελοποιήθηκαν είναι οι εξής:

- Κινητήρας επιφανειακών μόνιμων μαγνητών εσωτερικού δρομέα με συγκεντρωμένα τυλίγματα κλασματικής αύλακας.
- Κινητήρας επιφανειακών μόνιμων μαγνητών εξωτερικού δρομέα με συγκεντρωμένα τυλίγματα κλασματικής αύλακας.

Η επιλογή της διαμόρφωσης του τυλίγματος και ο αριθμός των στρώσεων γίνεται με απόλυτα αυτοματοποιημένο τρόπο, με βάση την ανάλυση της παραγράφου 2.3.3.1. Στα μοντέλα δίνεται επίσης η δυνατότητα αυτόματου καθορισμού του πάχους των σωμάτων σιδήρου στάτη και δρομέα με βάση το πάχος των δοντιών και του εύρους του μόνιμου μαγνήτη. Δίνεται επίσης η δυνατότητα δημιουργίας διαμορφώσεων στάτη είτε με ομοιόμορφη κατανομή δοντιών ή με άνισα δόντια. Επίσης, ο σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει αν επιθυμεί ανοιχτές αύλακες ή δόντια με πέδιλο. Στη δεύτερη περίπτωση, για τη σχεδίαση των δοντιών εμπλέκονται οι εξής μεταβλητές: το πάχος του πέδilu του δοντιού, η απόσταση μεταξύ πέδilu και σώματος δοντιού, το πάχος και το ύψος του δοντιού και η ακτίνα καμπυλότητας στις ακμές των αυλάκων, που δίνουν τη δυνατότητα σχεδίασης οποιασδήποτε γεωμετρίας στάτη κατανεμημένου ή συγκεντρωμένου τυλίγματος με μονή ή διπλή στρώση.

Μετά την σχεδίαση, και πριν την διαδικασία της ανάλυσης παρεμβάλλεται η διαδικασία της πλεγματοποίησης. Η πλεγματοποίηση, αν και γίνεται αυτόματα από το πρόγραμμα, χρίζει ιδιαίτερης αναφοράς καθώς η ακρίβεια των αποτελεσμάτων βασίζεται στην επιτυχημένη διεξαγωγή της. Η πλεγματοποίηση, αφορά στην κατάτμηση της γεωμετρίας, σε τριγωνικά θεμελιώδη στοιχεία και κόμβους και πέραν της ακρίβειας της ανάλυσης καθορίζει και το υπολογιστικό κόστος, καθώς ο αριθμός των υπολογισμών είναι άμεσα συνδεδεμένος με τον αριθμό των κόμβων και των στοιχείων. Συνεπώς, καθώς στη βελτιστοποίηση ο κύριος όγκος του υπολογιστικού χρόνου δαπανάται στην επίλυση και επεξεργασία των πεπερασμένων στοιχείων, είναι θεμελιώδους σημασίας ζήτημα να βρεθεί η χρυσή τομή ανάμεσα στην ακρίβεια και την ταχύτητα επεξεργασίας.

Ο τρόπος υπολογισμού της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, είναι ένας από τους πιο χαρακτηριστικούς λόγους που επιβάλλουν την πύκνωση του πλέγματος στις περιοχές που υπολογίζεται η ροπή. Πιο συγκεκριμένα, η ροπή προκύπτει από το γινόμενο της ακτινικής και εφαπτομενικής συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής. Οι προαναφερθείσες συνιστώσες προκύπτουν από την παραγωγή του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού A . Συνεπώς για τον ακριβή υπολογισμό της ροπής, απαιτείται πυκνότερο πλέγμα στο διάκενο ώστε να υπολογιστούν με ακρίβεια οι συνιστώσες τις μαγνητικής επαγωγής. Έχει δειχθεί πως αν στο διάκενο υπάρχουν 5 στρώσεις στοιχείων τότε η ροπή προσεγγίζεται με πολύ μεγάλη ακρίβεια, ενώ περαιτέρω πύκνωση θα αυξήσει αρκετά το υπολογιστικό κόστος με δυσανάλογη αύξηση της ακρίβειας. Κατά

κανόνα 3-4 στρώσεις στοιχείων δίνουν πολύ καλή ακρίβεια στις περισσότερες εφαρμογές σχεδίασης.

Επίσης, πυκνότερο πλέγμα χρησιμοποιείται στα δόντια του στάτη όπου αναμένονται υψηλές τιμές της μαγνητικής επαγωγής, ενώ αντίθετα στον άξονα του δρομέα η πυκνότητα του πλέγματος μπορεί να μειωθεί. Μετά τον καθορισμό της γεωμετρίας και στη συνέχεια του πλέγματος ακολουθεί η επίλυση του προβλήματος και η λήψη των αποτελεσμάτων για την εκτίμηση της απόδοσης και της επίδοσης του κινητήρα. Τα κυριότερα βήματα της διαδικασίας αναλύονται παρακάτω.

2.4.3.2 Υπολογισμός μέσης ροπής και κυμάτωσης ροπής

Για την εξαγωγή της κυματομορφής της ηλεκτρομαγνητικής ροπής αρχικά υπολογίζεται η βέλτιστη ή η επιθυμητή γωνία ροπής. Λόγω της μαγνητοστατικής φύσης του προβλήματος αυτός ο υπολογισμός ανάγεται ουσιαστικά στην εύρεση της επιθυμητής γωνίας εκκίνησης. Ο προσδιορισμός αυτής γίνεται θεωρώντας εκ των προτέρων ένα στιγμιότυπο τριφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος, συνήθως αυτό κατά το οποίο έχουμε μέγιστο ρεύμα στη φάση A και επομένως στις φάσεις B και C θα έχουμε μείον το μισό του μέγιστου ρεύματος. Στη συνέχεια στρέφουμε το δρομέα για ένα πολικό βήμα και αναζητούμε τη θέση στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη ροπή. Αυτή η θέση, θεωρείται και η αρχική γωνία του δρομέα ή ισοδύναμα θέση με γωνία ροπής 90° . Αυτή η διαδικασία προκύπτει ως αναγκαιότητα καθώς στα συγκεντρωμένα τυλίγματα δεν είναι εύκολος ο θεωρητικός προσδιορισμός του σημείου συμμετρίας των φάσεων A, B, C και του σημείου μέγιστης ΜΕΔ διακένου.

Σε επόμενο στάδιο υπολογίζεται η μέση ροπή (mean torque) για μια ηλεκτρική περίοδο καθώς και η κυμάτωσης της (torque ripple). Αυτό γίνεται μέσω της επίλυσης μιας σειράς μαγνητοστατικών προβλημάτων, κατά τα οποία ο δρομέας στρέφεται σύγχρονα με τη συχνότητα των ρευμάτων που τροφοδοτείται ο στάτης ξεκινώντας από την γωνία εκκίνησης που προσδιορίστηκε στο προηγούμενο βήμα. Ο δρομέας στρέφεται με προκαθορισμένο βήμα για 2 πολικά βήματα και υπολογίζεται σε κάθε βήμα η ηλεκτρομαγνητική ροπή μέσω του τανυστή του Maxwell. Η κυμάτωση προκύπτει από το ποσοστό της μέγιστης μείον της ελάχιστης ροπής διά την μέση ροπή ως εξής:

$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{mean}} \quad (2.51)$$

Προφανώς, όσο μειώνεται το βήμα της γωνίας, τόσο αυξάνεται η ακρίβεια αλλά και το υπολογιστικό κόστος της διαδικασίας, και συνεπώς τίθεται εκ νέου μια ανάγκη συμβιβασμού. Μία εύλογη τιμή βήματος είναι οι 10 ηλεκτρικές μοίρες.

2.4.3.3 Υπολογισμός επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης.

Ένα από τα βασικά μεγέθη του κινητήρα που χρήζει διερεύνησης, αφορά στην επαγόμενη αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται από τον κινητήρα (αντί-ΗΕΔ). Η επαγόμενη τάση παίζει σημαντικό ρόλο στην ικανότητα οδήγησης του κινητήρα καθώς και στις προδιαγραφές του συστήματος οδήγησης αυτού. Η ποιότητα της επαγόμενης κυματομορφής (αρμονική παραμόρφωση) διαδραματίζει σημαντικό ρόλο τόσο στην ποιότητα της εξόδου του ίδιου του κινητήρα όσο στην ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος του δικτύου με το οποίο αλληλοεπιδρά ο κινητήρας. Όσον αφορά στον προσδιορισμό της αυτής γίνεται ως εξής:

Όταν ένας αγωγίμος βρόχος διαρρέεται από μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή, τότε επάγεται μια τάση στο βρόχο. Από τον νόμο του Faraday η αναπτυσσόμενη αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη δίνεται από τη σχέση:

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.52)$$

όπου N ο αριθμός των σπειρών και Φ η μαγνητική ροή. Το πρόσημο μείον οφείλεται στον κανόνα του Lenz σύμφωνα με τον οποίο το αιτιατό αντιτίθεται στο αίτιο. Συνεπώς το αποτέλεσμα, δηλαδή η αναπτυσσόμενη αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη, τείνει να μειώσει το αίτιο που την προκάλεσε δηλαδή τη μεταβολή της μαγνητικής ροής, εξ' ου και το πρόσημο αλλά και το πρόθεμα "αντί" στην ηλεκτρεγερτική δύναμη. Καθώς όμως δεν υφίσταται μια αναλυτική σχέση για την μαγνητική ροή συναρτήσει του χρόνου και συνεπώς για την μεταβολή της μαγνητικής ροής καταφεύγουμε στον ορισμό της παραγώγου, ούτως ώστε να προκύψει μια βολικότερη για την διενέργεια των υπολογισμών μορφή:

$$\begin{aligned} e(t) &= -N \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\Phi(h+t) - \Phi(t)}{h} \\ &= -N \frac{\Phi(t_2) - \Phi(t_1)}{t_2 - t_1} \end{aligned} \quad (2.53)$$

όπου t_2 και t_1 δύο χρονικές στιγμές, που στην εφαρμογή μας καθορίζονται από τη μεταβολή της γωνίας δρομέα και καθώς γνωρίζουμε την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής γνωρίζουμε τελικά και την χρονική διαφορά μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$dt = t_2 - t_1 = \frac{d\theta}{\omega_r} \quad (2.54)$$

όπου $d\theta$ είναι το βήμα περιστροφής που χρησιμοποιείται στην ανάλυση και ω_r είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Έστω ότι ο δρομέας της μηχανής βρίσκεται στη θέση k , τότε η μαγνητική ροή που επάγεται στη φάση A προκύπτει:

$$\Phi(k) = \sum_{j \in A} \Phi_j(k) - \sum_{j \in A'} \Phi_j(k) \quad (2.55)$$

Δηλαδή 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 των στρώσεων των αυλάκων της επιστροφής της φάσης A , δηλαδή της A' . Λαμβάνονται με θετικό πρόσημο οι επιμέρους ροές που επάγουν τάση στους αγωγούς των αυλάκων που ανήκουν στη φάση A και με αρνητικό οι αντίστοιχες ροές για τους γειτονικούς αγωγούς επιστροφής A' . Με βάση τα προηγούμενα ο τελικός τύπος υπολογισμού της επαγόμενης αντί-ΗΕΔ προκύπτει:

$$e = -N \cdot \frac{d\Phi(k)}{d\theta} \cdot \omega_r \quad (2.56)$$

Όπως γίνεται προφανές από τις παραπάνω σχέσεις, όσο μικρότερο είναι το χρονικό βήμα dt , που στην ουσία πρόκειται για βήμα περιστροφής $d\theta$, τόσο αυξάνεται η ακρίβεια των υπολογισμών, αλλά τόσο αυξάνεται και ο αριθμός των απαιτούμενων επιλύσεων. Για την επιλογή του βήματος συνήθως χρησιμοποιείται το θεώρημα δειγματοληψίας του Shannon-Nyquist σύμφωνα με το οποίο για την αξιόπιστη δειγματοληψία ενός σήματος και του φάσματός του, απαιτείται αριθμός δειγμάτων διπλάσιος ή μεγαλύτερος από την θεμελιώδη συχνότητα του σήματος. Συνεπώς καθώς είναι σημαντική παράμετρος η αρμονική παραμόρφωση και επιθυμούμε στη συνέχεια μέσω ανάλυσης Fourier να δούμε και την επίδραση των αρμονικών απαιτείται ένας ελάχιστος αριθμός δειγμάτων της τάσης ώστε τα αποτελέσματα της ανάλυσης σε συνιστώσες να είναι αξιόπιστα.

2.4.3.4 Υπολογισμός απωλειών

Οι απώλειες σε μια μηχανή καθορίζουν την τιμή της απόδοσης της. Συνεπώς είναι πολύ σημαντική η ανάπτυξη αυτοματοποιημένων διαδικασιών για τον ακριβή προσδιορισμό τους. Οι σημαντικότερες απώλειες ενός κινητήρα, και οι οποίες είναι εφικτό να υπολογιστούν στα πλαίσια μαγνητοστατικών αναλύσεων ή με χρήση αναλυτικών εργαλείων είναι οι εξής [8], [9], [10], [11]:

- Απώλειες χαλκού
- Απώλειες σιδήρου
- Απώλειες τριβών και ανεμισμού
- Απώλειες μαγνήτη

2.4.3.4.1 Απώλειες χαλκού

Οι απώλειες χαλκού οφείλονται στις ωμικές απώλειες που εμφανίζονται στα τυλίγματα του στάτη. Ο υπολογισμός τους γίνεται μέσω του παρακάτω τύπου:

$$P_{cu} = 3I_{nom}^2 \cdot R_{ph} \quad (2.57)$$

Για τον υπολογισμό τους πρέπει να προσδιοριστούν οι τιμές του ονομαστικού ρεύματος I_{nom} και της ωμικής αντίστασης φάσης του τυλίγματος R_{phase} . Κατά κανόνα σε μια διαδικασία βελτιστοποίησης γεωμετρίας ηλεκτρικού κινητήρα, λόγω του ότι οι γεωμετρικές παράμετροι του στάτη και άρα και το εμβαδόν της αύλακας αλλάζουν, το ονομαστικό ρεύμα I_{nom} δεν είναι σταθερή ποσότητα. Αυτό οφείλεται στην τυπική θεώρηση κατά τη σχεδίαση μηχανών σταθερής πυκνότητας ρεύματος στις αύλακες και όχι ρεύματος για την εξασφάλιση αξιόπιστης θερμικής συμπεριφοράς. Συνεπώς το I_{nom} πρέπει να υπολογίζεται εκ νέου για κάθε γεωμετρία. Για δοσμένη λοιπόν πυκνότητα ρεύματος J το ονομαστικό ρεύμα υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{nom} = \frac{J \cdot ff \cdot A_{slot}}{N} \quad (2.58)$$

όπου J είναι η *RMS* τιμή της πυκνότητα ρεύματος, N ο αριθμός των ελιγμάτων ανά αύλακα, ff ο συντελεστής πληρότητας και A_{slot} η επιφάνεια αύλακας.

Εν συνεχεία πρέπει να υπολογιστεί η ωμική αντίσταση ανά φάση. Προκειμένου να συμβεί αυτό χρειάζεται η γνώση του συνολικού μήκους αγωγού ανά φάση, που εξαρτάται από τον αριθμό των ελιγμάτων ανά φάση, των αριθμό των αυλάκων και τις γεωμετρικές ιδιότητες και διαστάσεις της τοπολογίας. Επίσης απαιτείται η γνώση της ειδικής αντίστασης του αγωγού. Η ειδική αντίσταση του χαλκού για θερμοκρασία περιβάλλοντος $\theta=20^\circ\text{C}$ είναι $r_{cu,20}=1.75 \mu\Omega\cdot\text{cm}$. Η διορθωμένη ειδική αντίσταση προκύπτει σε $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ως εξής:

$$r_{cu} = r_{cu,20} \cdot [1 + a \cdot (\theta - 20^\circ)] \quad (2.59)$$

Θεωρώντας πως η θερμοκρασία λειτουργίας της μηχανής σε ονομαστική φόρτιση είναι περίπου $\theta=70^\circ\text{C}$ και για συντελεστή θερμοκρασιακής μεταβολής αντίστασης του χαλκού $\alpha=3.9 \cdot 10^{-3}$ [26], η διορθωμένη ειδική αντίσταση είναι ίση με $2.091 \mu\Omega\cdot\text{cm}$.

Για τον υπολογισμό του μέσου μήκους μιας σπείρας του τυλίγματος, λαμβάνεται υπόψη το ενεργό μήκος L της μηχανής και ορίζεται η απόσταση $d_{average}$ από το γεωμετρικό μέσο της μίας στρώσης μιας αύλακας, μέχρι το γεωμετρικό μέσο της ακόλουθης στρώσης της γειτονικής αύλακας. Επίσης, εισάγεται ένας συντελεστής προσαύξησης του μέσου μήκους μιας σπείρας, ο συντελεστής πλέξης olf . Ο συντελεστής αυτός, υπεισέρχεται καθώς τα πηνία στην πραγματικότητα τυλίγονται κατά τέτοιο τρόπο που οδηγεί σε αυξημένο μήκος. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι οι αγωγοί έχουν κάποιες ελάχιστες ακτίνες καμπυλότητας που πρέπει να πληρούνται για μηχανικούς λόγους. Επίσης στις κεφαλές τυλίγματος ένα τμήμα των αγωγών βρίσκεται εκτός ενεργού μήκους και τέλος κατά την πλέξη υφίστανται συχνά μεταθέσεις αγωγών. Θεωρώντας μια τυπική τιμή για το συντελεστή πλέξης $olf=1.2$ προκύπτει το μέσο μήκος μιας σπείρας ως εξής:

$$l_{turn} = olf \cdot (2L + 2d_{average}) \quad (2.60)$$

Η διατομή του κάθε αγωγού είναι:

$$A_{cu} = \frac{ff \cdot A_{slot}}{N} \quad (2.61)$$

Η αντίσταση ανά φάση δίνεται από τον τύπο:

$$R_{phase} = \frac{N \cdot Q_s}{m} \cdot r_{cu} \cdot \frac{l_{turn}}{A_{cu}} \quad (2.62)$$

όπου m ο αριθμός των φάσεων της μηχανής, τυπικά $m=3$, και Q_s ο αριθμός των αυλάκων του στάτη.

2.4.3.4.2 Απώλειες πυρήνα

Ο υπολογισμός των απωλειών πυρήνα αποτελεί πολύ δύσκολο πρόβλημα κατά τη σχεδίαση ηλεκτρικών μηχανών και κατά κανόνα βασίζεται στη χρήση απλουστευτικών αναλυτικών ή αριθμητικών μοντέλων [12], [13]. Για τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα αξιοποιούνται τα αποτελέσματα των μαγνητοστατικών αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία μέσω μιας αναλυτικής έκφρασης υπολογισμού των απωλειών. Η διαδικασία βασίζεται στον υπολογισμό των τιμών της πυκνότητας της μαγνητικής ροής στο βαρύκεντρο κάθε τριγώνου (δηλαδή κάθε στοιχείου του πλέγματος) σε όλες τις περιοχές της μηχανής που θεωρείται ως υλικό η σιδηρομαγνητική λαμαρίνα [14].

Αρχικά, καταγράφεται η θέση κάθε στοιχείου του πλέγματος, καθώς και η επιφάνεια που αυτό καταλαμβάνει. Με δεδομένο το ενεργό μήκος της μηχανής υπολογίζεται και ο όγκος των ισοδύναμων πρισμάτων. Ακολουθώντας, καταγράφεται χωριστά για όλα τα στοιχεία του στάτη και του δρομέα η τιμή της μαγνητικής επαγωγής τους. Στη συνέχεια αξιοποιούνται τα πειραματικά δεδομένα της καμπύλης ειδικών απωλειών του σιδηρομαγνητικού υλικού, τα οποία παρέχονται από τον κατασκευαστή σε μορφή διαγράμματος. Συνήθως η λαμαρίνα που χρησιμοποιείται στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών του ΕΜΠ είναι η M235-35A της εταιρίας Thyssen. Από το φυλλάδιο προδιαγραφών της λαμαρίνας εξάγεται ένας αριθμός σημείων ικανοποιητικός να περιγράψει την καμπύλη ειδικών απωλειών σε ένα μεγάλο εύρος τιμών μαγνητικής επαγωγής και με χρήση αυτών των σημείων η καμπύλη ειδικών απωλειών της λαμαρίνας προσομοιώνεται με πολυώνυμο κάποιου βαθμού μέσω του πακέτου curve fitting tool στο MATLAB. Στην πλειοψηφία των εφαρμογών ένα πολυώνυμο 5^{ου} βαθμού προσομοιώνει με αρκετή ακρίβεια τη μορφή της καμπύλης. Μια στενωπός της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η έλλειψη πειραματικών δεδομένων σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται συνήθως γραμμική παρεμβολή ώστε οι καμπύλες να αναχθούν στην ζητούμενη συχνότητα.

Στη συνέχεια για κάθε στοιχείο του πλέγματος υπολογίζεται μέσω του πολυωνύμου προσαρμογής της καμπύλης η ειδική απώλεια πυρήνα. Οι απώλειες πυρήνα εξαρτώνται από τη μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής, ενώ λόγω της ημιτονικής κατανομής της ΜΕΔ στο διάκενο, επαρκεί η ανάλυση σε μια μόνο θέση του δρομέα. Συνεπώς για τον προσδιορισμό των απωλειών, εντοπίζεται το στοιχείο με τη μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής και υπολογίζονται οι απώλειες που του αντιστοιχούν. Γνωρίζοντας την επιφάνεια κάθε στοιχείου και πολλαπλασιάζοντας με το ενεργό μήκος της μηχανής και την πυκνότητα του υλικού της σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας αλλά και τις ειδικές απώλειες που υπολογίστηκαν για το στάτη και το δρομέα, προκύπτουν οι συνολικές απώλειες πυρήνα. Μολονότι θα μπορούσε να θεωρηθεί πως με την παραπάνω διαδικασία υπερεκτιμώνται οι απώλειες πυρήνα, αυτό δεν είναι ακριβές καθώς έχει αμεληθεί η επίδραση των ανώτερων αρμονικών. Στον αντίποδα, η εξαγωγή δεδομένων για κάθε συχνότητα και η υπέρθεσή τους είναι επίσης εσφαλμένη καθώς τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα δεν είναι γραμμικά. Η φύση του υλικού λοιπόν καθιστά απαγορευτική οποιαδήποτε προσέγγιση με επαλληλία ή υπέρθεση αρμονικών προβλημάτων. Σε κάθε περίπτωση, καθώς τα δεδομένα πηγάζουν από πειραματικές μετρήσεις και από λεπτομερή ανάλυση σε κάθε στοιχείο μας δίνουν μια καλή εκτίμηση των απωλειών πυρήνα. Επιπλέον καθώς το υπολογιστικό κόστος δεν μπορεί να αμεληθεί, λόγω της διαδικασίας βελτιστοποίησης, δεν πρέπει να παραγνωρίζουμε την σημαντική επιτάχυνση της επεξεργασίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως οι απώλειες εκτιμώνται σε μια μόνο θέση του δρομέα και όχι σε κάθε στοιχειώδη μετατόπιση $d\theta$, και έτσι έχουμε σημαντικό κέρδος καθώς η διαδικασία υπολογισμού όλων των παραπάνω δεδομένων για κάθε στοιχείο είναι μακράν η πιο χρονοβόρα.

2.4.3.4.3 Απώλειες μόνιμων μαγνητών

Οι απώλειες μόνιμων μαγνητών υπολογίζονται χρησιμοποιώντας ένα αναλυτικό μοντέλο και αρμονική ανάλυση της πυκνότητας μαγνητικής ροής στην επιφάνεια των μόνιμων μαγνητών, όπως υπολογίζεται στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τα δινορρεύματα αμελείται και επιπλέον θεωρούνται δινορρεύματα που περιορίζονται από την αντίσταση [15]. Συνεπώς, η μέση πυκνότητα ισχύος απωλειών των δινορρευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2.63), λαμβάνοντας υπόψη το βάθος διείσδυσης για κάθε αρμονική συχνότητα:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{ed} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\pi f_m \cdot B_{n,m}^2}{2\mu} \cdot \frac{w_{mag}}{\delta_m} \cdot G_m(\delta_m), \left(\frac{W}{m^3} \right) \\ G_m(\delta_m) = \frac{\sinh\left(\frac{w_{mag}}{\delta_m}\right) - \sin\left(\frac{w_{mag}}{\delta_m}\right)}{\cosh\left(\frac{w_{mag}}{\delta_m}\right) - \cos\left(\frac{w_{mag}}{\delta_m}\right)} \end{array} \right. \quad (2.63)$$

όπου w_{mag} είναι το πλάτος του μόνιμου μαγνήτη, δ_m είναι το βάθος διείσδυσης στην m αρμονική τάξη, $B_{n,m}$ είναι η τιμή της μαγνητικής επαγωγής που είναι κάθετη στην επιφάνεια του μαγνήτη στην m αρμονική τάξη, f είναι η ηλεκτρική συχνότητα, και μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα. Για την ανάλυση εξάγεται η πραγματική χωρική κατανομή της κάθετης συνιστώσας της πυκνότητας μαγνητικής ροής στην επιφάνεια του μαγνήτη από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Οι αρμονικές υπολογίζονται χρησιμοποιώντας γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (Fast Fourier Transform – FFT) και λαμβάνεται υπόψη η φορά περιστροφής και η σχετική συχνότητα στο σύστημα αναφοράς του δρομέα. Σε αυτή τη περίπτωση εκτιμώνται φαινόμενα κορεσμού στα δόντια του στάτη. Το μοντέλο λογαριάζει την επίδραση της γεωμετρίας στάτη και δρομέα στο σχήμα της κυματομορφής της μαγνητεγερτικής δύναμης.

2.4.3.4 Απώλειες αεροδυναμικής αντίστασης

Οι απώλειες αεροδυναμικής αντίστασης υπολογίζονται με το κάτωθι μοντέλο:

$$P_{wind} = C_D \cdot \pi \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot R_r^4 \cdot L \quad (2.64)$$

που υπόκειται στο:

$$\begin{cases} \frac{1}{\sqrt{C_D}} = 2.04 + 1.768 \cdot \ln(\text{Re} \cdot \sqrt{C_D}) \\ \text{Re} = \omega \cdot R_r \cdot l_g \cdot \rho / \mu \end{cases} \quad (2.65)$$

όπου ω είναι η ταχύτητα περιστροφής σε rad/s , C_d είναι ο συντελεστής επιφανειακής τριβής (skin friction coefficient), ρ είναι η πυκνότητα του αέρα σε $kg \cdot m^3$, μ είναι το κινηματικό ιξώδες του αέρα σε m^2/s , R_r είναι η εξωτερική ακτίνα του δρομέα, l_g είναι το μήκος διακένου και Re είναι ο αριθμός Reynolds.

2.4.3.5 Υπολογισμός απόδοσης

Εφόσον υπολογιστούν όλες οι συνιστώσες απωλειών με βάση τις προαναφερθείσες διαδικασίες, η απόδοση του κινητήρα δίνεται από την σχέση:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{P_m}{P_m + P_{losses}} \quad (2.66)$$

όπου

$$P_m = T_{mean} \cdot \omega_r \quad (2.67)$$

και

$$P_{losses} = P_{cu} + P_{iron} + P_{ed} + P_{wind} \quad (2.68)$$

2.4.3.6 Υπολογισμός αυτεπαγωγών ευθέως και εγκάρσιου άξονα

Για τον υπολογισμό της αυτεπαγωγής ευθέως άξονα με την μέθοδο της συγκέντρωσης μαγνητικής ροής, πρέπει να μηδενιστεί η διέγερση του κινητήρα. Εν προκειμένω, πρέπει να μηδενιστεί η μαγνητική ροή των μαγνητών. Για το λόγο αυτό οι μαγνήτες αντικαθίστανται από μη-μαγνητικό υλικό με ίδια μαγνητική διαπερατότητα. Δεδομένου ότι η μαγνητική διαπερατότητα του μαγνήτη είναι κοντά στη μονάδα, συνήθως αντικαθίσταται από αέρα [13]. Συνακόλουθα η μηχανή έχει πλέον ομοιόμορφο διάκενο λόγω της σταθερής μαγνητικής διαπερατότητας στο φαινόμενο διάκενο. Τα τυλίγματα των τριών φάσεων τροφοδοτούνται ως εξής:

$$\begin{cases} I_a = I_{\max} \\ I_b = -0.5 \cdot I_{\max} \\ I_c = -0.5 \cdot I_{\max} \end{cases} \quad (2.69)$$

Τα οποία μετασχηματιζόμενα κατά Park δίνουν:

$$\begin{cases} I_d = I_{\max} \\ I_q = 0 \end{cases} \quad (2.70)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η πεπλεγμένη ροή της φάσης A, με τον δρομέα να βρίσκεται ευθυγραμμισμένος με τον d-άξονα. Η αυτεπαγωγή ευθέως άξονα δίνεται από τη σχέση:

$$L_d = \frac{\Lambda_a}{I_a} = \frac{\Lambda_d}{I_d} \quad (2.71)$$

Για τον υπολογισμό του εγκάρσιου άξονα ο δρομέας στρέφεται κατά 90° ηλεκτρικές μοίρες, δηλαδή κατά μισό πολικό βήμα, ώστε να ευθυγραμμιστεί με τον εγκάρσιο άξονα και η αντίστοιχη αυτεπαγωγή εγκάρσιου άξονα δίνεται από την σχέση:

$$L_q = \frac{\Lambda_a}{I_a} = \frac{\Lambda_q}{I_q} \quad (2.72)$$

2.4.3.7 Υπολογισμός ροπής αδράνειας

Η ροπή αδράνειας είναι ένα πολύ χρήσιμο μέγεθος στον προσδιορισμό της γεωμετρίας της μηχανής. Καθώς η ροπή της μηχανής μπορεί να αυξηθεί είτε με αύξηση της ακτίνας διακένου, είτε με αύξηση του ενεργού μήκους, συχνά οι ανάγκες της

εφαρμογής σε ροπή αδράνειας μπορούν να οδηγήσουν τον σχεδιασμό προς δισκοειδές ή κυλινδρική τοπολογία:

$$J = 0.5 \cdot \pi \cdot \rho \cdot L \cdot (R_{out}^2 - R_{in}^2) \quad (2.73)$$

2.5 Θερμική ανάλυση

Η θερμική ανάλυση του κινητήρα, παρουσιάζει ιδιαίτερο κατασκευαστικό, αλλά και σχεδιαστικό ενδιαφέρον. Έχει ήδη διαφανεί από τα προηγούμενα πως η θερμοκρασία λειτουργίας επηρεάζει πολλές παραμέτρους όπως πχ. τις απώλειες χαλκού. Έχουμε ήδη αναφέρει τις καταστροφικές επιπτώσεις που μπορεί να έχει η υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας στην επίδοση των μόνιμων μαγνητών. Επιπλέον, η αντοχή της μονωτικής ικανότητας των αγωγών τυλίγματος στο χρόνο, και κατ'επέκταση η ορθή λειτουργία του κινητήρα εξαρτάται από την θερμοκρασία λειτουργίας. Επιπρόσθετα, στα περισσότερα υλικά, υφίσταται ισχυρή θερμοκρασιακή εξάρτηση των χαρακτηριστικών τους και συνήθως η αύξηση της θερμοκρασίας έχει αρνητικές συνέπειες σε αυτά. Καθίσταται λοιπόν σαφές, πως η θερμική ανάλυση είναι μια σημαντική διαδικασία που μπορεί να οδηγήσει είτε σε μεταβολές μεγεθών ή ακόμα και σε πιθανή αλλαγή του τρόπου ψύξης της μηχανής. Αν και η θερμική ανάλυση, αφορά κατά κύριο λόγο στην ονομαστική λειτουργία, ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί να ληφθούν υπόψη και άλλες καταστάσεις καθώς και καταστάσεις σφαλμάτων. Τέλος αξίζει να αναφερθεί πως, καθώς η σταθερά χρόνου των θερμικών φαινομένων είναι αρκετά μεγάλη (της τάξης των αρκετών λεπτών), οι μεταβατικές ηλεκτρικές καταστάσεις δεν έχουν ιδιαίτερη συνεισφορά στη θερμική ανάλυση και κατά κανόνα αγνοούνται. Το γεγονός αυτό καθιστά δυνατή την ανεξάρτητη ανάλυση της θερμοκρασιακής συμπεριφοράς του κινητήρα, αλλά και τη θεώρηση στατικών μοντέλων.

Η αύξηση της θερμοκρασίας οφείλεται στις απώλειες που λαμβάνουν χώρα στα διάφορα κατασκευαστικά μέρη του κινητήρα. Έχοντας λοιπόν προσδιορίσει τις απώλειες μέσω της επίλυσης του μαγνητικού προβλήματος, μπορούν να καθοριστούν οι ισοδύναμες πηγές θερμότητας. Οι κύριες πηγές θερμότητας ή θερμικών απωλειών, είναι τα τυλίγματα στις άλακες του κινητήρα, λόγω των απωλειών χαλκού, τα τμήματα σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας με υψηλό κορεσμό, όπως τα δόντια, λόγω των υψηλών απωλειών πυρήνα και το σώμα των μόνιμων μαγνητών λόγω των απωλειών δινορρευμάτων. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία της ανάλυσης, απαιτείται καλή γνώση των μηχανισμών ανταλλαγής θερμότητας, των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών (συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και θερμοχωρητικότητα), καθώς και των οριακών συνθηκών.

2.5.1 Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας

Οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας είναι οι εξής [14]:

- Με θερμική αγωγή (conduction): αφορά στη διάδοση της θερμότητας από μόριο σε μόριο σε στερεά, υγρά ή αέρια σώματα. Περιγράφεται από τη σχέση:

$$\nabla(k\nabla T) + q = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.74)$$

Πίνακας 2.5. Τυπικές τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Υλικό	Τιμή k (W/mK)
Αέρας	0.024 – 0.026
Χαλκός	385 - 400
Στερεοί μονωτές	0.035 – 0.16
Mica	0.71
Χαρτί	0.05
Πλαστικό	0.03
Μαγνήτης	5 - 15
Σίδηρος	60 -80
Ατσάλι	36 - 54
Αλουμίνιο	225 - 250

όπου k είναι συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σε $W/m \cdot K$, q είναι η χωρική πυκνότητα ενέργειας σε W/m^3 , C_p είναι η ειδική θερμότητα σε $J/kg \cdot K$ και ρ η πυκνότητα σε kg/m^3 .

- Με συναγωγή ή συναγωγιμότητα (thermal convection): Ορίζεται, ως ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας μεταξύ μιας στερεής επιφάνειας και ενός γειτονικού κινούμενου ρευστού (υγρού ή αερίου). Διέπεται από την σχέση:

$$q = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_0) = 0 \quad (2.75)$$

Ή εναλλακτικά:

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_0) = 0 \quad (2.76)$$

Όπου q_s είναι η επιφανειακή πυκνότητα ενέργειας σε W/m^2 , h ο συντελεστής συναγωγιμότητας σε $W/m^2 \cdot K$ που είναι χαρακτηριστικός του κάθε υλικού και T_0 η θερμοκρασία του ρευστού (ψυκτικού μέσου). Η συναγωγή χωρίζεται σε φυσικής ροής και εξαναγκασμένης ροής.

- Μέσω ακτινοβολίας (radiation): Ορίζεται ως η ανταλλαγή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας μεταξύ επιφανειών στερεών σωμάτων που βρίσκονται σε απόσταση. Διέπεται από την σχέση:

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial n} + \beta \cdot k_{sb} \cdot (T^4 - T_0^4) = 0 \quad (2.77)$$

Όπου β είναι ο συντελεστής ακτινοβολίας $0 < \beta < 1$, k_{sb} η σταθερά του Boltzmann ($k_{sb} = 5.6 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$) και T_o η θερμοκρασία του ρευστού (ψυκτικού μέσου). Για $T < 273 \text{ K}$ η μετάδοση μέσω ακτινοβολίας είναι πρακτικά αμελητέα.

Στον πίνακα 2.5 παρατίθενται οι τυπικές τιμές του συντελεστή k για υλικά ενδιαφέροντος στη σχεδίαση ηλεκτρικών κινητήρων. Παρακάτω, παρατίθενται οι τυπικές τιμές του συντελεστή συναγωγιμότητας h ανάλογα με τον τύπο ψύξης:

- Φυσική ροή αέρα: $5\text{--}25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
- Φυσική ροή νερού: $20\text{--}100 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
- Εξαναγκασμένη ροή αέρα: $10\text{--}200 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
- Εξαναγκασμένη ροή νερού: $50\text{--}10000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

Για την επίλυση του θερμικού προβλήματος καθορίζονται αρχικά οι πηγές της θερμότητας βάσει των απωλειών που έχουν ήδη υπολογιστεί, με συγκεκριμένη ειδική ισχύ εκφρασμένη σε $\text{W/m}^3 \cdot \text{K}$. Έπειτα καθορίζονται οι οριακές συνθήκες, δηλαδή ο τύπος μετάδοσης της θερμότητας, η θερμοκρασία περιβάλλοντος T_o , καθώς και τυχούσες περιοδικές συνθήκες. Τέλος καθορίζονται οι θερμικές ιδιότητες των υλικών του κινητήρα. Κατά την υλοποίηση των μοντέλων πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στη σωστή και πλήρη μοντελοποίηση των μονώσεων του κινητήρα, καθώς αυτές συνήθως αμελούνται, αλλά και στον υπολογισμό της τιμής της θερμικής αγωγιμότητας των τυλιγμάτων και του διακένου της μηχανής, καθώς η μη λεπτομερής και απλουστευτική μοντελοποίηση τους αποτελεί συνήθως την Αχίλλειο πτέρνα των θερμικών μοντέλων.

Η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας για τον αέρα του διακένου εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα στάτη και δρομέα, ω_m , και από το μήκος του διακένου g . Υπολογίζεται ως εξής [16]:

$$\lambda_{gap} = 0.0019\eta^{-2.9084} \text{Re}^{0.4614 \ln(3.3361\eta)} \quad (2.78)$$

όπου

$$\eta = \frac{D_i - 2g}{D_i} \quad (2.79)$$

και

$$\text{Re} = \frac{\omega_m \cdot g}{\nu} \quad (2.80)$$

όπου ν είναι το ιξώδες του αέρα. Προφανώς όταν ο δρομέας είναι ακινητοποιημένος η θερμική αγωγιμότητα του διακένου ταυτίζεται με τη στατική τιμή της αγωγιμότητας του αέρα.

Για τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας του τυλίγματος στην αύλακα, το κάθε πηνίο μοντελοποιείται ως ένα ισοδύναμο ομογενές υλικό που χαρακτηρίζεται από μια καινούρια τιμή αγωγιμότητας. Η ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα εξαρτάται

από το λόγο της διαμέτρου του χαλκού του αγωγού προς τη διάμετρο του μονωμένου με βερνίκι αγωγού, και υπολογίζεται ως εξής [17]:

$$\lambda_{Cu-ins} = F \cdot \lambda_{ins} \quad (2.81)$$

όπου

$$F = 37.5 \left(\frac{d_C}{d_{ins}} \right)^2 - 43.75 \left(\frac{d_C}{d_{ins}} \right) + 14 \quad (2.82)$$

και λ_{ins} είναι η θερμική αγωγιμότητα του μονωτικού βερνικιού.

2.5.2 Οριακές Συνθήκες

Η χρήση οριακών συνθηκών στις επιφάνειες επαφής διαφορετικών υλικών, είναι απαραίτητη για την πραγματοποίηση της θερμικής ανάλυσης. Ο προσδιορισμός τους είναι ζωτικής σημασίας προκειμένου να λάβουμε αξιόπιστα αποτελέσματα. Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται στη θερμική ανάλυση ηλεκτρικών μηχανών είναι οι ίδιες τόσο σε δισδιάστατη μορφή όσο και σε τρισδιάστατη. Πιο κάτω παρουσιάζονται οι οριακές συνθήκες για μονοδιάστατο πρόβλημα και όπως ορίζονται για μια επιφάνεια στη θέση $x=0$ [18]:

- Σταθερή θερμοκρασία επιφάνειας – Συνθήκη Dirichlet:

$$T(0, t) = T_s \quad (2.83)$$

- Σταθερή πυκνότητα θερμορροής επιφάνειας – Συνθήκη Neumann:
 - α) Πεπερασμένη πυκνότητα θερμορροής:

$$[-\lambda \cdot \partial T / \partial x]_{x=0} = q''_x \quad (2.84)$$

- β) Αδιάβατη ή θερμικά μονωμένη επιφάνεια:

$$[\partial T / \partial x]_{x=0} = 0 \quad (2.85)$$

όπου, λ : θερμική αγωγιμότητα.

- Συναγωγή στην επιφάνεια:

$$[-\lambda \cdot \partial T / \partial x]_{x=0} = h \cdot [T(0, t) - T_\infty] \quad (2.86)$$

όπου, h : συντελεστής συναγωγής
 T_∞ : θερμοκρασία περιβάλλοντος

- Ακτινοβολία στο περιβάλλον:

$$[-\lambda \cdot \partial T / \partial x]_{x=0} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot [T(0, t)^4 - T_\infty^4] \quad (2.87)$$

όπου, σ : σταθερά Stephan-Boltzmann
 ε : συντελεστής ακτινοβολίας

Κεφάλαιο 3. Εύρωστη πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση

3.1 Εισαγωγή

Ο όρος βελτιστοποίηση αναφέρεται στην εύρεση ενός ή περισσότερων εφικτών λύσεων που αντιστοιχούν σε ακραίες τιμές ενός ή περισσότερων κριτηρίων. Η ανάγκη εύρεσης βέλτιστων λύσεων σε οποιοδήποτε πρόβλημα προέρχεται κυρίως από το στόχο σχεδιασμού συστημάτων με το ελάχιστο δυνατό κόστος παραγωγής ή τη μέγιστη απόδοση λειτουργίας κ.α. Λόγω των πλεονεκτικών χαρακτηριστικών των βέλτιστων λύσεων, οι μέθοδοι βελτιστοποίησης αποδεικνύονται ιδιαίτερα σημαντικές στη πράξη, ιδίως στον μηχανολογικό σχεδιασμό, στα επιστημονικά πειράματα και στη λήψη επιχειρηματικών αποφάσεων.

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει εκτενής αναφορά στη πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, η οποία αποτελεί την τελειότερη, επί του παρόντος, μαθηματική θεμελίωση στην προσπάθεια εύρεσης του βελτίστου. Θα συζητηθεί η αντίθεση των κριτηρίων που απαντάται στα περισσότερα προβλήματα και που δημιούργησε την ανάγκη για διττή προσέγγιση τους και που τελικά ανέδειξε την ιδανική πολυκριτηριακή μέθοδο. Ύστερα θα οριστούν χρήσιμες έννοιες, όπως αυτές της γραμμικότητας, της κυρτότητας, της κυριαρχίας και του βελτίστου κατά Pareto. Θα αναδειχθεί η σημασία της εύρωστης βελτιστοποίησης για τα σύγχρονα (ηλεκτρομαγνητικά και μη) προβλήματα που χαρακτηρίζονται από κατασκευαστικές και λειτουργικές αβεβαιότητες. Τέλος, θα αναλυθούν τα μέσα προσδιορισμού της αποτελεσματικότητας των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται για την επίλυση αυτών των προβλημάτων. Δηλαδή θα γίνει λόγος για τα δοκιμαστικά προβλήματα που προσομοιάζουν τα πραγματικά και χρησιμεύουν σαν σημεία αναφοράς, καθώς και για τα μέτρα επίδοσης που ποσοτικοποιούν τις επιδόσεις των διαφόρων στρατηγικών.

3.2 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση

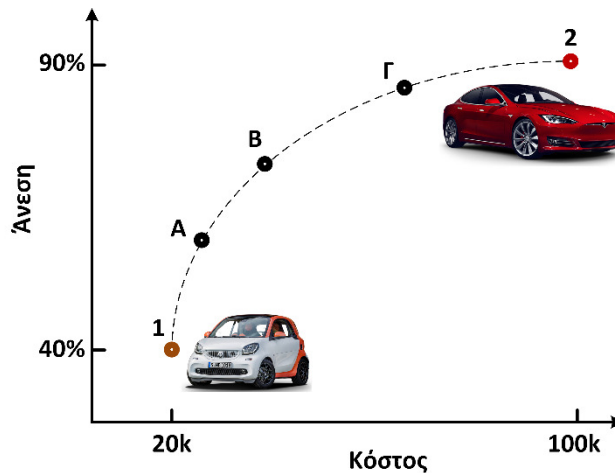
Όταν ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης διαχειρίζεται ένα φυσικό σύστημα το οποίο περιλαμβάνει μόνο μία αντικειμενική συνάρτηση, η διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης λύσης ονομάζεται μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση (single-objective optimization). Ξεκινώντας από τα μέσα του περασμένου αιώνα, οι πρώτες προσπάθειες

σε αυτό το τομέα αφορούν την κατανόηση, την ανάπτυξη και την εφαρμογή μονοκριτηριακών μεθόδων βελτιστοποίησης. Αυτές λειτουργούν είτε με τεχνικές που βασίζονται στη παραγωγή της στοχικής συνάρτησης (gradient-based), είτε με ευρεστικές μεθόδους αναζήτησης. Οι τελευταίες δεν περιλαμβάνουν μόνο ντετερμινιστικές αρχές αναζήτησης, αλλά και στοχαστικές, οι οποίες επιτρέπουν στους αλγόριθμους να εντοπίζουν τις ολικά βέλτιστες λύσεις πιο αξιόπιστα. Προκειμένου να διευρυνθούν οι δυνατότητες εφαρμογής των αλγορίθμων βελτιστοποίησης σε διάφορους τομείς προβλημάτων, έμπνευση για την ανάπτυξη ισχυρών τεχνικών βελτιστοποίησης αποτέλεσαν οι αρχές που διέπουν διάφορα φυσικά φαινόμενα. Οι αλγόριθμοι σμήνους και προσομοιωμένης ανόπτωσης είναι δύο μόνο σχετικά παραδείγματα.

Όταν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης περιλαμβάνει περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις, το έργο της εξεύρεσης ενός ή περισσότερων βέλτιστων λύσεων είναι γνωστό ως πολυκριτηριακή (multi-objective) βελτιστοποίηση. Στην ορολογία της διοίκησης επιχειρήσεων τα εν λόγω προβλήματα αναζήτησης και βελτιστοποίησης είναι γνωστά ως προβλήματα λήψης αποφάσεων βάσει πολλαπλών κριτηρίων (multiple criterion decision-making - MCDM). Δεδομένου ότι η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση περιλαμβάνει πολλαπλούς στόχους, είναι σκόπιμο να διευκρινιστεί ότι η μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση αποτελεί υπό-περίπτωση της πρώτης.

3.2.1 Αντίθεση κριτηρίων

Τα περισσότερα προβλήματα αναζήτησης και βελτιστοποίησης στον πραγματικό κόσμο περιέχουν φυσικά πολλαπλούς στόχους. Διαφορετικές λύσεις μπορεί να περιέχουν συμβιβασμούς (αντικρουόμενα σενάρια) μεταξύ των διαφόρων στόχων. Μια λύση που είναι βέλτιστη όσον αφορά ένα στόχο μπορεί να απαιτεί συμβιβασμούς σε άλλους στόχους και έτσι η επιλογή της λύσης να μην είναι συμφέρουσα. [17] Για παράδειγμα, μπορεί να εξεταστεί η διαδικασία λήψης απόφασης που εμπλέκεται στην αγορά ενός αυτοκινήτου. [18] Τα αυτοκίνητα πωλούνται σε τιμές που κυμαίνονται από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες χιλιάδες ευρώ. Έστω δύο σημαντικά διαφορετικές επιλογές υποθετικών αυτοκινήτων, δηλαδή το ένα κοστίζει περίπου είκοσι χιλιάδες ευρώ (λύση 1) και ένα άλλο κοστίζει περίπου εκατό χιλιάδες ευρώ (λύση 2), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1. Εάν η χρηματική αξία είναι ο μόνος στόχος αυτής της διαδικασίας λήψης απόφασης, η βέλτιστη επιλογή είναι η λύση 1. Αν αυτός ήταν ο μόνος στόχος για όλους τους αγοραστές, θα ήταν διαθέσιμος μόνο ένας τύπος αυτοκινήτου (λύση 1) και κανένας κατασκευαστής αυτοκινήτων δεν θα παρήγαγε ακριβό αυτοκίνητο. Ευτυχώς, αυτή η διαδικασία λήψης αποφάσεων δεν είναι μονοκριτηριακή. Αν υποθέσουμε ότι κατά κανόνα ένα φθηνό αυτοκίνητο είναι λιγότερο άνετο από ότι ένα ακριβό, το σχήμα 3.1 δείχνει ότι το φθηνότερο αυτοκίνητο έχει ένα υποθετικό επίπεδο άνεσης του 40% και ένα ακριβό αυτοκίνητο ένα επίπεδο άνεσης 90%. Για τους πλούσιους αγοραστές, για τους οποίους η άνεση είναι ο μόνος στόχος αυτής της διαδικασίας λήψης αποφάσεων, η επιλογή είναι η λύση 2. Οι λύσεις 1 και 2 συνιστούν τις βέλτιστες λύσεις για κάθε ένα από τα δύο κριτήρια. Ανάμεσα σε αυτές τις



Σχήμα 3.1 – Υποθετικοί συμβιβασμοί μεταξύ λύσεων για ένα πρόβλημα απόφασης αγοράς αυτοκινητού

δύο ακραίες λύσεις υπάρχουν πολλές άλλες λύσεις, που γίνονται συμβιβασμοί μεταξύ του κόστους και της άνεσης.

Ένας αριθμός τέτοιων λύσεων (A, B και Γ) με διαφορετικό κόστος και επίπεδο άνεσης φαίνεται στο σχήμα. Έτσι, μεταξύ οποιονδήποτε δύο λύσεων, η μία είναι καλύτερη ως προς το ένα κριτήριο, αλλά αυτή η βελτίωση έρχεται μόνο με μια θυσία στο άλλο κριτήριο. Αν κάποιος αγοραστής είναι πρόθυμος να θυσιάσει το χρηματικό κόστος μέχρι ενός ορισμένου σημείου ξεκινώντας από την επιλογή 1, είναι πιθανό να βρει κάποιο άλλο αυτοκίνητο με βελτιωμένα επίπεδα άνεσης από τη λύση 1. Το μέγεθος της θυσίας σχετίζεται με το κέρδος σε επίπεδο άνεσης. Έτσι, μπορεί κάποιος να φανταστεί την ύπαρξη ενός συνόλου βέλτιστων λύσεων (όπως οι λύσεις 1,2,A,B και Γ) όπου το κέρδος σε ένα κριτήριο επιφέρει θυσία σε κάποιο άλλο κριτήριο. Παρόλαυτα, έχοντας όλες αυτές τις βέλτιστες συμβιβαστικές λύσεις κατά νου, δεν μπορεί κανείς να ισχυριστεί ότι μία από αυτές είναι καλύτερη. Δεν υπάρχει κάποια που να είναι πλεονεκτική ως προς τα δύο κριτήρια που έχουν τεθεί γιατί καμία δεν δείχνει πιο συμφέρουσα όσον αφορά το σύνολο των κριτηρίων (χρηματικό κόστος και άνεση). Συνεπώς, σε προβλήματα πολλαπλών κριτηρίων δεν υπάρχει μία συγκεκριμένη βέλτιστη λύση. Υπάρχει ένας αριθμός λύσεων που όλες τους είναι βέλτιστες. Αυτή είναι η βασική διαφορά μεταξύ των μονοκριτηριακών και των πολυκριτηριακών προβλημάτων.

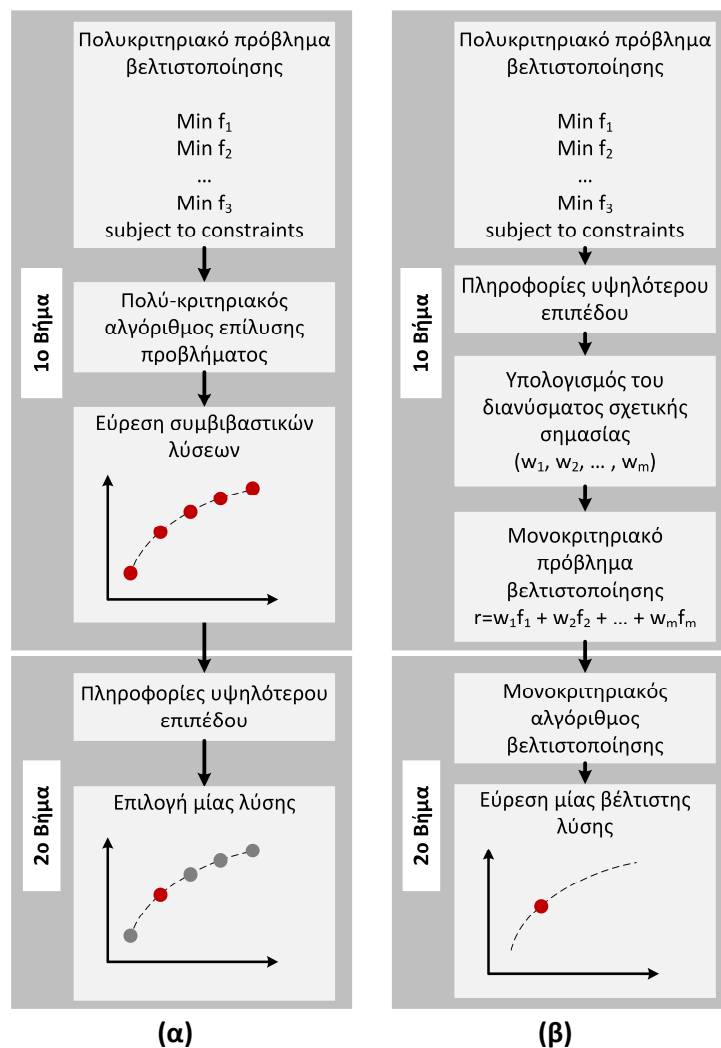
3.2.2 Διτή προσέγγιση προβλημάτων πολλαπλών κριτηρίων

Όπως και με τη μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση, η πολυκριτηριακή έχει μελετηθεί εκτενώς. Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι και μελέτες σε διάφορες εφαρμογές που περιλαμβάνουν πολλαπλά κριτήρια. Ωστόσο, υπάρχει ένα κοινό στοιχείο στις περισσότερες από αυτές. Στη συντριπτική πλειοψηφία τους αποφεύγουν την πολυπλοκότητα ενός πραγματικού προβλήματος πολλαπλών στόχων συγχωνεύοντας τα επιμέρους κριτήρια σε μία μονοκριτηριακή συνάρτηση με χρήση παραμέτρων που ορίζονται από τον χρήστη. Έτσι, οι περισσότερες μελέτες στην κλασική πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση δεν αντιμετωπίζουν τα προβλήματα με διαφορετικό

τρόπο από ότι η μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση. Πρακτικά, η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση εξετάζεται σαν μία εφαρμογή μονοκριτηριακής που ενσωματώνει πολλά κριτήρια. Οι μελέτες δείχνουν να επικεντρώνονται στα μέσα μετατροπής πολλαπλών κριτηρίων σε ένα και εξετάζουν διαφορετικές τεχνικές τέτοιων μετατροπών, παρέχοντας επιχειρήματα για την επιλογή των πιο πλεονεκτικών. Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση, η μονοκριτηριακή θεώρηση αποτελεί υπό-περίπτωση της πολυκριτηριακής και η δεύτερη δεν συνιστά μία απλή επέκταση της πρώτης.

Η διαδικασία μίας ιδανικής πολυκριτηριακής μεθόδου παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2(α). Στο υπό εξέταση σχήμα, στο 1^ο βήμα, γίνεται εύρεση πολλαπλών βέλτιστων συμβιβαστικών λύσεων. Ύστερα, στο 2^ο βήμα, υψηλότερου επιπέδου πληροφορίες χρησιμοποιούνται για να επιλεγεί μία εκ των συμβιβαστικών λύσεων. Με αυτή τη διαδικασία κατά νου, είναι εύκολο να συνειδητοποιηθεί ότι η μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση είναι μία υποπερίπτωση της πολυκριτηριακής, όπως ειπώθηκε νωρίτερα.

Από θεωρητικής πλευράς, κάθε συμβιβαστική λύση αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη κατάταξη σημαντικότητας των κριτηρίων. Είναι εμφανές από το σχήμα 3.1 ότι η λύση A αναθέτει περισσότερη σημασία στο κόστος παρά στην άνεση. Από την άλλη πλευρά, η



Σχήμα 3.2 – Σχηματική αναπαράσταση διαδικασιών (α) ιδανικής πολυκριτηριακής και (β) πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με σύνθετη στοχική συνάρτηση.

λύση Γ αντιστοιχίζει περισσότερη βαρύτητα στην άνεση παρά στο κόστος. Συνεπώς, αν αυτός ο σχετικός παράγοντας επιλογής ανάμεσα στους στόχους είναι γνωστός για ένα δεδομένο πρόβλημα, δεν υπάρχει ανάγκη να ακολουθηθεί η παραπάνω διαδικασία ιδανικής επίλυσης πολυκριτηριακού προβλήματος.

Μία απλή μέθοδος θα ήταν να σχηματιστεί μία σύνθετη στοχική συνάρτηση σαν το σταθμισμένο άθροισμα των κριτηρίων, όπου το βάρος του κάθε κριτηρίου να είναι ανάλογο με τον παράγοντα προτίμησης που έχει δοθεί στο εν λόγω κριτήριο. Αυτή η μέθοδος μετατρέπει ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα σε ένα μονοκριτηριακό και έτσι είναι δυνατή η εύρεση μία συγκεκριμένης συμβιβαστικής λύσης. Αυτή η διαδικασία χειρισμού πολυκριτηριακών προβλημάτων είναι απλούστερη και βασίζεται στις προτιμήσεις του χρήστη, ωστόσο αποτελεί και μία πιο υποκειμενική μέθοδο σε σχέση την προαναφερθείσα ιδανική διαδικασία. Η σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας φαίνεται στο σχήμα 3.2β. Με βάση πληροφορίες υψηλότερου επιπέδου, ένα διάνυσμα προτιμήσεων w επιλέγεται αρχικά. Ύστερα, το διάνυσμα προτιμήσεων χρησιμοποιείται για να κατασκευαστεί η σύνθετη στοχική συνάρτηση, η οποία μετέπειτα βελτιστοποιείται για να ευρεθεί μία μοναδική βέλτιστη συμβιβαστική λύση από έναν μονοκριτηριακό αλγόριθμο βελτιστοποίησης.

3.2.3 Πλεονεκτήματα ιδανικής πολυκριτηριακής μεθόδου

Παρόλο που η βασική διαφορά μεταξύ των δύο θεωρήσεων εντοπίζεται στο πλήθος των βέλτιστων λύσεων, πρακτικά ο χρήστης χρειάζεται μόνο μία λύση, είτε το πρόβλημα είναι μονοκριτηριακό με σύνθετη αντικειμενική συνάρτηση, είτε πολυκριτηριακό. Έτσι, στη δεύτερη περίπτωση, ο χρήστης βρίσκεται σε δίλημμα ως προς την επιλογή της καταλληλότερης λύσης. Λαμβάνοντας υπόψη και πάλι το παράδειγμα αγοράς αυτοκινήτου, οι διαθέσιμες επιλογές οχημάτων διαφορετικού κόστους και άνεσης στην αγορά δυσχεραίνουν την όποια επιλογή. Ακόμη, παίζουν καθοριστικό ρόλο εξωτερικοί παράγοντες όπως το διαθέσιμο κεφάλαιο για αγορά αυτοκινήτου, η απόσταση της καθημερινής οδήγησης, ο συνήθης αριθμός επιβατών, η κατανάλωση καυσίμου, η απομείωση αξίας μεταπώλησης, οι οδικές συνθήκες, η φυσική κατάσταση των επιβατών, η κοινωνική θέση κ.α. Συχνά, λοιπόν, τέτοιες υψηλότερου επιπέδου πληροφορίες είναι μη-τεχνικές, ποιοτικές και οδηγούνται από την εμπειρία. Για τον προσδιορισμό του διανύσματος προτιμήσεων w απαιτείται ανάλυση αυτών των μη-τεχνικών, ποιοτικών και εμπειρικών πληροφοριών για να ευρεθεί ένας ποσοτικός συσχετισμός των προτιμήσεων. Συνεπώς, η εύρεση του διανύσματος προτιμήσεων w εμπεριέχει μεγάλη δόση υποκειμενικότητας. Επιπρόσθετα, στερείται της δυνατότητας συσχετισμού με το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης. Η ανεπαρκής γνώση των συμβιβαστικών λύσεων που θα προκύψουν κατά την επίλυση του προβλήματος καθιστούν τη διαδικασία ακόμα πιο ασύμφορη. Εξάλλου, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η συμβιβαστική λύση που αποκτάται με τη στρατηγική της σύνθετης στοχικής συνάρτησης είναι εξαιρετικά ευαίσθητη λόγω του διανύσματος w . Μία αλλαγή σε αυτό το διάνυσμα θα επιφέρει πιθανότατα μία διαφορετική συμβιβαστική λύση.

Ωστόσο, αν ένα σύνολο πολλών συμβιβαστικών λύσεων είναι διαθέσιμο, είναι δυνατό για κάποιον να αξιολογήσει τα θετικά και τα αρνητικά των λύσεων του συνόλου

λαμβάνοντας υπόψη όλους τους μη τεχνικούς και ποιοτικούς, αλλά επίσης σημαντικούς παράγοντες και να τις συγκρίνει ώστε να λάβει μία απόφαση. Συνεπώς, στην ιδανική πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, η προσπάθεια επικεντρώνεται στην εύρεση του συνόλου των βέλτιστων λύσεων θεωρώντας όλα τα κριτήρια που είναι σημαντικά. Σε δεύτερη φάση, με βάση τα αποτελέσματα, ο χρήστης μπορεί να αξιοποιήσει υψηλότερου επιπέδου ποιοτικά κριτήρια για να λάβει μία απόφαση. Εδώ εντοπίζεται και η θεμελιώδης διαφορά ανάμεσα στις δύο μεθόδους. Στη μέθοδο με χρήση της σύνθετης στοχαστικής συνάρτησης, ο καθορισμός του διανύσματος προτίμησης γίνεται χωρίς γνώση των πιθανών συνεπειών στα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης. Ωστόσο, στην πολυκριτηριακή μέθοδο, οι πληροφορίες του προβλήματος χρησιμοποιούνται για την επιλογή μίας από τις λύσεις της βελτιστοποίησης. Αυτή η διαφορά καθιστά την ιδανική πολυκριτηριακή μέθοδο περισσότερο μεθοδική, πρακτική και λιγότερο υποκειμενική. [19]

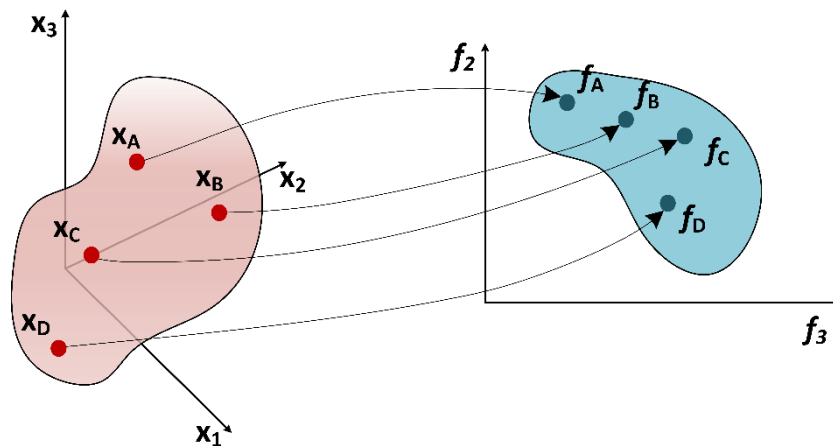
3.3 Μαθηματική διατύπωση πολυκριτηριακού προβλήματος

Ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης περιέχει έναν αριθμό αντικειμενικών συναρτήσεων που πρέπει να ελαχιστοποιηθούν ή να μεγιστοποιηθούν. Όπως και σε ένα μονοκριτηριακό πρόβλημα, υπάρχουν και εδώ περιορισμοί που πρέπει να ικανοποιεί κάθε εφικτή λύση. Η γενική μορφή του πολυκριτηριακού προβλήματος διατυπώνεται ως εξής:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Ελαχιστοποίηση/Μεγιστοποίηση} \\ \text{υποκείμενο σε} \end{array} \right\} \begin{array}{l} f_m(x) \quad m = 1, 2, \dots, M \\ g_j(x) \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, J \\ h_k(x) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, K \\ x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)} \quad i = 1, 2, \dots, n \end{array} \quad (3.1)$$

όπου η λύση x είναι ένα διάνυσμα ημεταβλητών απόφασης: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$. Το τελευταίο σύνολο περιορισμών καθορίζει τα όρια των μεταβλητών και περιορίζει κάθε μεταβλητή απόφασης x_i ώστε να λάβει μία τιμή ανάμεσα στο κατώτερο όριο $x_i^{(L)}$ και στο ανώτερο $x_i^{(U)}$. Αυτά τα όρια συνιστούν τον χώρο μεταβλητών απόφασης D , ή απλούστερα τον χώρο απόφασης. Σε συσχέτισμό με το πρόβλημα ορίζονται και περιορισμοί ανισότητας J και ισότητας K . Μία λύση x που δεν ικανοποιεί όλα τα $(J+K)$ όρια και όλα τα $2n$ όρια μεταβλητών αποκαλείται *ανέφικτη λύση*. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή η λύση ικανοποιεί όλα τα όρια που έχουν τεθεί, αποκαλείται *εφικτή λύση*. Συνεπώς, η παρουσία ορίων καθιστά ανέφικτο το σύνολο του χώρου μεταβλητών απόφασης D . Το σύνολο όλων των εφικτών λύσεων S αποκαλείται *εφικτή περιοχή* ή πιο απλά *χώρος αναζήτησης*.

Στη διατύπωση (3.1) θεωρούνται M αντικειμενικές συναρτήσεις $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_M(x))^T$. Κάθε αντικειμενική συνάρτηση μπορεί είτε να ελαχιστοποιηθεί, είτε να μεγιστοποιηθεί. Με βάση την αρχή της δυαδικότητας [20] [21], όσον αφορά τα προβλήματα βελτιστοποίησης, είναι δυνατή η μετατροπή ενός προβλήματος μεγιστοποίησης σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης πολλαπλασιάζοντας



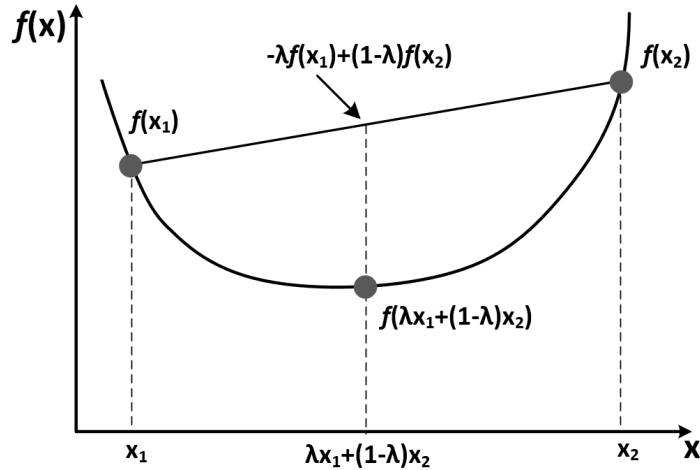
Σχήμα 3.3 – Αναπαράσταση ενός χώρου μεταβλητών απόφασης τριών διαστάσεων και η αντιστοίχιση του σε έναν χώρο αποτίμησης δύο διαστάσεων

τα αντίστοιχα κριτήρια με τη σταθερά -1. Αυτή η αρχή διευκολύνει σημαντικά την επίλυση του προβλήματος όταν συνυπάρχουν κριτήρια μικτού τύπου, δεδομένου ότι πολλοί αλγόριθμοι αναπτύσσονται ώστε να λύνουν μόνο ενός τύπου προβλήματα, π.χ. ελαχιστοποίησης.

Μία από τις πιο ουσιαστικές διαφορές της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης από τη μονοκριτηριακή είναι ότι πλέον οι αντικειμενικές συναρτήσεις σχηματίζουν έναν χώρο πολλών διαστάσεων, κατ' αναλογία με τον χώρο των μεταβλητών απόφασης, ο οποίος ονομάζεται *αντικειμενικός χώρος* ή *χώρος αποτίμησης*, D [22]. Για κάθε λύση x στο χώρο μεταβλητών απόφασης αντιστοιχίζεται ένα σημείο στον χώρο αποτίμησης που συμβολίζεται ως $f(x)=z=(z_1, z_2, \dots, z_M)^T$. Η αντιστοίχιση λαμβάνει χώρα μεταξύ ενός n -διάστατου διανύσματος λύσης και ενός M -διάστατου διανύσματος στόχου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.3. Συχνά η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναφέρεται και ως *διανυσματική βελτιστοποίηση* λόγω της ύπαρξης πολλών κριτηρίων που σχηματίζουν ένα διάνυσμα στόχων.

3.3.1 Γραμμικότητα προβλημάτων

Αν όλες οι αντικειμενικές συναρτήσεις και οι συναρτήσεις περιορισμών είναι γραμμικές, το πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης θεωρείται και αυτό γραμμικό. Αντίστροφα, σε περίπτωση που οποιοδήποτε κριτήριο είναι μη γραμμικό, τότε και το πρόβλημα αποκαλείται μη γραμμικό. Στα μη γραμμικά προβλήματα δεν μπορεί να εγγραφεί η σύγκλιση τεχνικών επίλυσης, ούτε και να υποτεθεί γνωστή κάποια δομή των αντικειμενικών και περιοριστικών συναρτήσεων. Ωστόσο, τα περισσότερα πολυκριτηριακά προβλήματα στον πραγματικό κόσμο είναι εκ φύσεως μη γραμμικά.



Σχήμα 3.4 – Παράδειγμα κυρτής συνάρτησης. Μία γραμμή που ενώνει τις τιμές της συνάρτησης σε δύο σημεία x_1, x_2 πάντοτε υπερεκτιμά τη τιμή της κυρτής συνάρτησης.

3.3.2 Κυρτότητα προβλημάτων

Η κυρτότητα υποδηλώνει ότι κάθε γραμμικός συνδυασμός εγγυάται τη γέννηση σημείων εντός του χώρου αναζήτησης D , και συνακόλουθα την de facto παραγωγή εφικτών λύσεων. Σύμφωνα με τον ορισμό του Deb [18]:

Μία συνάρτηση $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ είναι μία κυρτή συνάρτηση αν για οποιοδήποτε ζεύγος λύσεων $x_1, x_2 \in \mathbb{R}^n$, ισχύει η ακόλουθη συνθήκη:

$$f(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \leq \lambda f(x_1) + (1 - \lambda)f(x_2), \quad (0 \leq \lambda \leq 1) \quad (3.2)$$

Βάσει αυτού του ορισμού εξάγονται και οι ακόλουθες ιδιότητες μίας κυρτής συνάρτησης:

1. Η γραμμική προσέγγιση της $f(x)$ σε κάθε σημείο στο διάστημα $[x_1, x_2]$ πάντοτε υπερεκτιμά την πραγματική τιμή της συνάρτησης.
2. Τα στοιχεία του τετραγωνικού πίνακα μερικών παραγώγων 2^{ης} τάξης της $f(x)$ είναι θετικά για κάθε x .
3. Για μία κυρτή συνάρτηση, το τοπικό ελάχιστο είναι πάντοτε και το ολικό ελάχιστο.

Το σχήμα 3.4 παρουσιάζει μία κυρτή συνάρτηση. Παρατηρείται ότι μία γραμμή που ενώνει τις τιμές της σε δύο σημεία x_1, x_2 πάντοτε υπερεκτιμά τη τιμή της. Μία συνάρτηση που δεν ικανοποιεί την ανισότητα της (3.2) αποκαλείται μη κυρτή συνάρτηση.

Ο ορισμός ενός κυρτού πολυκριτηριακού προβλήματος δίνεται λοιπόν ως εξής:

Ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι κυρτό αν όλες οι στοχικές συναρτήσεις είναι κυρτές και η εφικτή περιοχή είναι κυρτή (ή όλες οι ανισοτικές περιοριστικές συναρτήσεις είναι μη κυρτές και οι περιοριστικές συναρτήσεις ισότητας είναι γραμμικές). [19]

Σύμφωνα με αυτόν τον ορισμό ένα γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι και κυρτό. Η κυρτότητα του προβλήματος είναι σημαντικό στοιχείο που θα αναδειχθεί σε επόμενη ενότητα. Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι που μπορούν εύκολα να λύσουν κυρτά προβλήματα, αλλά αποτυγχάνουν στα μη κυρτά. Εφόσον ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει δύο χώρους, η κυρτότητα σε κάθε χώρο (αποτίμησης και απόφασης) είναι σημαντική για τον αλγόριθμο. Επιπρόσθετα, ενώ ο χώρος απόφασης μπορεί να είναι μη κυρτός, το μέτωπο Pareto μπορεί να είναι κυρτό.

3.3.3 Η έννοια της κυριαρχίας

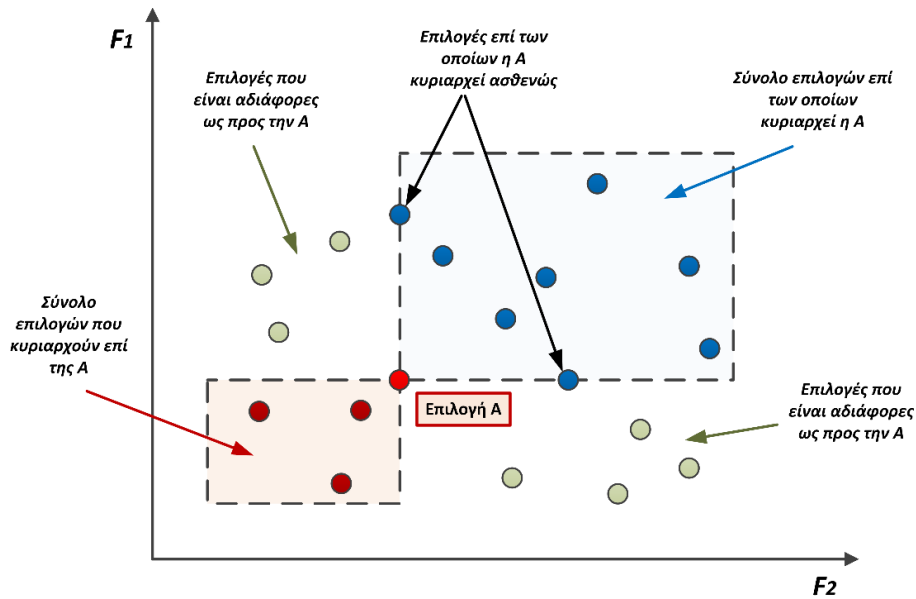
Καθώς στα πολυκριτηριακά προβλήματα αναφερόμαστε συνήθως σε διανύσματα και χώρους 2 και 3 διαστάσεων (συχνά και παραπάνω), η έννοια της διάταξης είναι συγκεκριμένη εν συγκρίσει με την απόλυτη διάταξη που προσφέρει η μια διάσταση και οι πραγματικοί αριθμοί, καθώς δεν μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα οι τελεστές σύγκρισης σε διανύσματα. Αυτό το πρόβλημα είναι και ο ακρογωνιαίος λίθος στις δυσκολίες λήψης αποφάσεων, καθώς άμεση συνέπεια του, είναι η αδυναμία απόλυτα αντικειμενικής αξιολόγησης των λύσεων, και αδυναμία ορισμού της έννοιας του βέλτιστου [23], [23]. Σε πρώτο βήμα ορίζεται η έννοια της μερικής διάταξης (partial ordering) των διανυσμάτων. Για κάθε ζεύγος διανυσμάτων u και v , ορίζουμε τις ακόλουθες σχέσεις μερικής διάταξης, βάσει της σύγκρισης των συνιστωσών των διανυσμάτων:

- $u = v$ αν $u_i = v_i$ για κάθε i
- $u \leq v$ αν $u_i \leq v_i$ για κάθε i
- $u < v$ αν $u_i \leq v_i$ για κάθε i και $u_i < v_i$ για ένα τουλάχιστον i
- u - v αν δεν ισχύει τίποτα από τα παραπάνω

Η τελευταία περίπτωση εξηγείται εκτενέστερα καθώς παίζει σημαντικότατο ρόλο στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση. Αν δεν ικανοποιείται καμία από τις τρεις πρώτες συνθήκες, τότε τα διανύσματα u και v αναφέρονται ως *αδιάφορα* (indifferent). Η αδιαφορία, εκφράζει την ύπαρξη ανταγωνιστικής σχέσης μεταξύ των διανυσμάτων, καθώς από μαθηματικής σκοπιάς θεωρούνται ισοδύναμα μεταξύ τους.

Βασιζόμενοι στη μερική διάταξη, επεκτείνουμε λίγο και ορίζουμε τις σχέσεις κυριαρχίας (dominance) μεταξύ δύο εφικτών λύσεων a, b , ενός προβλήματος πολυκριτηριακής ελαχιστοποίησης:

- Το a κυριαρχεί ισχυρώς ως προς το b αν $f(a) < f(b)$
- Το a κυριαρχεί ασθενώς ως προς το b αν $f(a) \leq f(b)$
- Το a είναι αδιάφορο ως προς το b αν $f(a) \sim f(b)$



Σχήμα 3.5. Γεωμετρική απεικόνιση των δυνατών σχέσεων κυριαρχίας ως προς ένα τυχαίο σημείο A του χώρου αποτίμησης σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο κριτηρίων. [22]

Στο σχήμα 3.5 απεικονίζονται οι δυνατές σχέσεις κυριαρχίας σε ένα πεδίο αποτίμησης $F \subseteq \mathbb{R}^m$ ενός υποθετικού προβλήματος ελαχιστοποίησης δύο κριτηρίων. Αν θεωρηθεί ένα σημείο A που αντιστοιχεί στην επιλογή αναφοράς, τότε, με βάση τον ορισμό της κυριαρχίας, το πεδίο F χωρίζεται σε τρεις υποπεριοχές:

- την υποπεριοχή κάτω αριστερά από το σημείο A , που περιλαμβάνει επιλογές που κυριαρχούν επί της αντίστοιχης επιλογής αναφοράς.
- την υποπεριοχή πάνω δεξιά από το σημείο A , που περιλαμβάνει επιλογές που κυριαρχούνται από την αντίστοιχη επιλογή αναφοράς.
- την υποπεριοχή πάνω αριστερά και κάτω δεξιά από το σημείο A , που περιλαμβάνει επιλογές που είναι αδιάφορες ως προς την αντίστοιχη επιλογή αναφοράς.

Είναι προφανές ότι ο τρόπος διαχωρισμού του πεδίου αποτίμησης εξαρτάται από το σημείο αναφοράς. Επιπλέον, ο προσανατολισμός των τριών υποπεριοχών εξαρτάται από τον τελεστή βελτιστοποίησης που ορίζεται για κάθε κριτήριο (\min ή \max). Με τη συμβατική θεώρηση της ταυτόχρονης ελαχιστοποίησης όλων των κριτηρίων, η βελτίωση σε σχέση με μιας επιλογή αναφοράς επιτυγχάνεται αποκλειστικά προς την κάτω αριστερά περιοχή του πεδίου αποτίμησης.

3.3.4 Ορισμός βέλτιστου κατά Pareto

Έχοντας ορίσει την κυριαρχία, μπορούμε να ξεπεράσουμε το πρόβλημα του ορισμού της βέλτιστης λύσης και στα πολυκριτηριακά προβλήματα. Έτσι ορίζουμε:

Ένα εφικτό σημείο $x^* \in D$, καλείται βέλτιστο εφόσον δεν υπάρχει άλλο εφικτό σημείο $x \in D$ τέτοιο ώστε $f(x) \leq f(x^*)$ δηλαδή δεν υπάρχει εφικτό σημείο που κυριαρχεί επί του x^* .

ή ισοδύναμα και πιο εύληπτα:

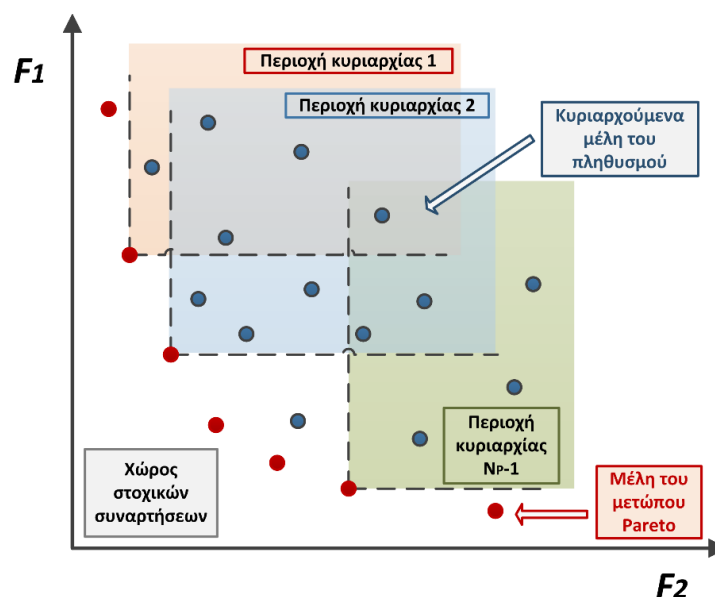
Το σημείο είναι βέλτιστο, αν και μόνο αν, δεν υπάρχει εφικτό σημείο, το οποίο να μπορεί να βελτιώσει κάποιο κριτήριο f_i , χωρίς ταυτόχρονα να χειροτερέψει τουλάχιστον ένα άλλο κριτήριο f_j .

3.3.5 Σύνολο και μέτωπο Pareto

Συχνά, παρατηρείται η σύγχυση πως η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση οδηγεί σε μοναδική λύση. Κάτι τέτοιο όμως δεν ισχύει, καθώς το διάλυμα που αποτελείται από τα ελάχιστα κάθε κριτηρίου ανήκει συνήθως στον μη εφικτό χώρο λύσεων. Αυτό που ισχύει, και γίνεται πιο εύκολα κατανοητό από τον δεύτερο ορισμό του βέλτιστου είναι το εξής: Οι ικανές και αναγκαίες συνθήκες περί βέλτιστου ισχύουν για περισσότερα του ενός εφικτά σημεία, που καλούνται βέλτιστα κατά Pareto ή μη-κατώτερα (non-inferior) ή μη-κυριαρχούμενα (non-dominated). Το σύνολο, των μη κυριαρχούμενων σημείων, που συμβολίζεται με X^* , 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, που ονομάζεται μέτωπο Pareto (Pareto front). Κάθε τέτοιο σημείο του μετώπου, είτε κυριαρχεί, είτε είναι αδιάφορο, ως προς κάθε άλλο σημείο του εφικτού υποχώρου αποτίμησης, ενώ είναι αυστηρά αδιάφορο σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία του μετώπου.

Όσον αφορά στην μορφή του μετώπου Pareto αυτή σε προβλήματα δύο κριτηρίων ($m=2$), είναι μια καμπύλη, που είναι γνωστή από τις οικονομικές επιστήμες



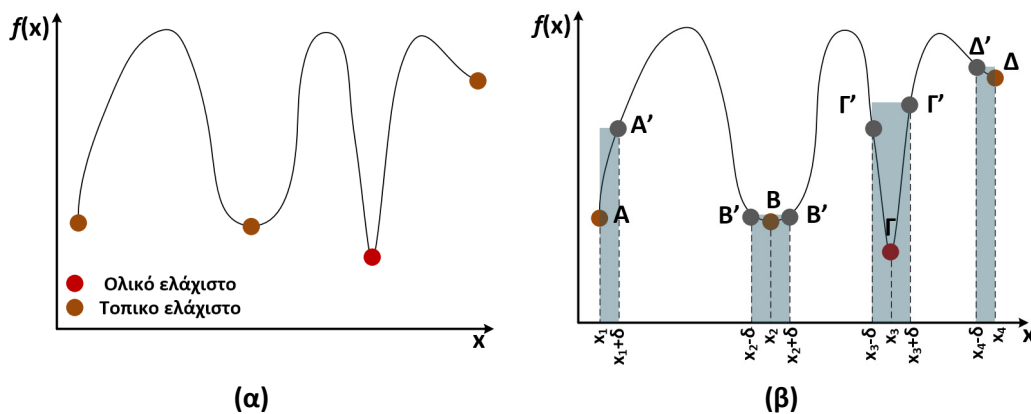
Σχήμα 3.6. Απεικόνιση μετώπου Pareto σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο κριτηρίων. [22]

και ως *καμπύλη αντιστάθμισης* (trade-off curve). Σε προβλήματα τριών κριτηρίων, είναι μια επιφάνεια, ενώ σε προβλήματα περισσότερων κριτηρίων (έστω m), μολονότι δεν μπορεί να αποτυπωθεί ώστε να γίνει αντιληπτό, εν γένει γενικεύεται και το μέτωπο συνιστά μια υπερ-επιφάνεια $(m-1)$ -διαστάσεων.

3.4 Εύρωση βελτιστοποίηση

Η μαθηματική διατύπωση της βελτιστοποίησης, όπως αυτή αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, αφορά την εύρεση των ακραίων τιμών μίας στοχικής συνάρτησης. Είτε πρόκειται για το ολικό ελάχιστο, είτε για το ολικό μέγιστο. Ωστόσο, η χρησιμότητα αυτής της προσέγγισης κρίνεται πολλές φορές αμφίβολη στα προβλήματα του πραγματικού κόσμου που συνήθως χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητες. Στο πεδίο των ηλεκτρομαγνητικών συσκευών, για παράδειγμα, τέτοιες αβεβαιότητες μπορεί να αποτελούν οι κατασκευαστικές ανοχές, οι άνισες ιδιότητες των υλικών ή και ο ατελής έλεγχος των λειτουργικών συνθηκών. Συνεπώς, το βέλτιστο σχέδιο που έχει επιτευχθεί χωρίς την θεώρηση των αβεβαιοτήτων συχνά αποτυγχάνει να αποδώσει τα προσδοκώμενα πειραματικά αποτελέσματα παρά το γεγονός ότι είχε εξαιρετική απόδοση αριθμητικά [24].

Ένα σχετικό παράδειγμα που προσφέρει καλύτερη οπτικοποίηση του φαινομένου προσφέρεται στο σχήμα 3.7. Στο σχήμα 3.7α απεικονίζεται η μεταβολή της τιμής μίας συνάρτησης $f(x)$ στο χώρο αποτίμησης συναρτήσεως της μεταβλητής x . Μπορούν να εντοπιστούν τρία τοπικά ελάχιστα και ένα ολικό ελάχιστο. Το τελευταίο αποτελεί την πιο πλεονεκτική λύση αριθμητικά. Αν, ωστόσο, υποθεθεί ότι η μεταβλητή x έχει αστάθεια με όρια $[x-\delta, x+\delta]$ και παρατηρηθεί η πιθανή μεταβολή της τιμής $f(x)$ λόγω αυτής της αβεβαιότητας, θα παρατηρηθεί ότι το ολικό ελάχιστο μπορεί να μην είναι πλεονεκτικό τελικά. Πιο συγκεκριμένα, σε μία απευθείας σύγκριση του σημείου Β με το σημείο Γ μπορεί να διακριθεί η σημαντικότερη διακύμανση της τιμής της συνάρτησης στο δεύτερο σημείο από ότι στο πρώτο πάρα το ίδιο εύρος αβεβαιότητας δ . Το μέγεθος της διακύμανσης μπορεί να οδηγήσει τον σχεδιαστή στην επιλογή Β αντί για την επιλογή Γ, καθώς μπορεί αριθμητικά να μειονεκτεί, κατασκευαστικά όμως προσφέρει ασυγκρίτως μεγαλύτερη ασφάλεια στην επίτευξη των ζητούμενων λειτουργικών χαρακτηριστικών. Γενικότερα, μικρή διακύμανση μίας μεταβλητής σχεδίασης που



Σχήμα 3.7: (α) Γραφική απεικόνιση υποθετικής συνάρτησης $f(x)$ ως προς τη μεταβλητή x . (β) Διακύμανση τιμών $f(x)$ στα ακρότατα λόγω αβεβαιότητας.

αντιστοιχίζεται σε μη εύρωστη λύση μπορεί να επιφέρει αναπόδεκτη τιμή στοχικής συνάρτησης ή παραβίαση των περιορισμών.

3.5 Δοκιμαστικά προβλήματα

Η επίλυση των πολυκριτηριακών προβλημάτων απαιτεί την ανάπτυξη κατάλληλων αλγορίθμων που θα έχουν την ικανότητα γρήγορης και αξιόπιστης σύγκλισης. Αυτοί θα έχουν τη δυνατότητα να αναδειχθούν ως πολύ χρήσιμα εργαλεία στην επίλυση 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 τεχνικών επίλυσης. Αυτή η ανάγκη οδήγησε στην δημιουργία σημαντικού αριθμού νέων αλγορίθμων με διαφορετικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες. Όπως ήταν φυσικό, παράλληλα έπρεπε να αναπτυχθούν μαθηματικοί τρόποι για τη σύγκριση μεταξύ τους και την ανάδειξη της καταλληλότητας τους για προβλήματα του πραγματικού κόσμου. Αυτή η μαθηματική διαδικασία υποστηρίζεται μέσω δύο βημάτων: το πρώτο είναι η εύρεση ενός ποικιλόμορφου συνόλου προβλημάτων προς επίλυση (test problems) και το δεύτερο είναι η διεξαγωγή μετρήσεων και η εξαγωγή αποτελεσμάτων με βάση τα οποία οι αλγόριθμοι θα μπορούν να συγκριθούν. Το τυπικό σενάριο σύγκρισης πολυκριτηριακών αλγορίθμων έχει ως εξής [25]:

1. Επιλογή αλγορίθμων προς σύγκριση
2. Επιλογή ενός συνόλου προβλημάτων αναφοράς ή η δημιουργία ενός νέου συνόλου
3. Επιλογή ενός συνόλου μετρήσεων προς σύγκριση
4. Ανάκτηση αποτελεσμάτων από τους αλγόριθμους
5. Έλεγχος των αποτελεσμάτων και σύγκριση
6. Συμπεράσματα

Για να είναι τα συμπεράσματα της σύγκρισης ακριβή, θεωρείται αναγκαία η πλήρης κατανόηση των δοκιμαστικών προβλημάτων, η ορθή λήψη των μετρήσεων από τους αλγόριθμους και φυσικά η εφαρμογή των κατάλληλων στατιστικών εργαλείων για την εξαγωγή των συμπερασμάτων.

Ένας μεγάλος αριθμός πολυκριτηριακών δοκιμαστικών προβλημάτων μπορεί να ευρεθεί στη βιβλιογραφία και είναι συνηθισμένη πρακτική να επιλέγονται ορισμένα από αυτά ώστε να σχηματίσουν δοκιμαστικές σουίτες [25]. Ένα σημαντικό αντιπροσωπευτικό παράδειγμα μίας τέτοιας ακολουθίας είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε από τον Van Veldhuizen [26]. Τα προβλήματα που συμπεριλαμβάνει είναι εξαιρετικά αντιπροσωπευτικά των τύπων προβλημάτων που υπήρχαν στην βιβλιογραφία πριν την δημοσίευση των αντίστοιχων σουιτών από τον Deb[27] και τον Zitzler[28], οι οποίες είναι πιο μεθοδικά κατασκευασμένες.

Πίνακας 3.1 – Πολυκριτηριακά δοκιμαστικά προβλήματα Van Veldhuizen

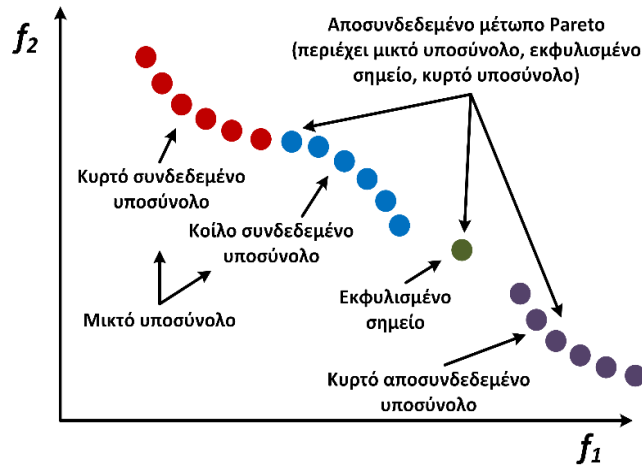
Όνομα	Πρόβλημα	Πεδίο ορισμού
π1	$f_1(x) = x^2$ $f_2(x) = (x - 2)^2$	$[-10^5, 10^5]$
π2	$f_1(x_1, \dots, x_n) = 1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^n \left(x_i - \frac{1}{\sqrt{n}}\right)^2\right)$ $f_2(x_1, \dots, x_n) = 1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^n \left(x_i + \frac{1}{\sqrt{n}}\right)^2\right)$	$[-4, 4]$
π3	$\max f_1(x_1, x_2) = -1 - (A_1 - B_1)^2 - (A_2 - B_2)^2$ $\max f_2(x_1, x_2) = -(x_1 + 3)^2 - (x_2 + 1)^2$ $A_1 = 0.5 \sin 1 - 2 \cos 1 + \sin 2 - 1.5 \cos 2$ $A_2 = 1.5 \sin 1 - \cos 1 + 2 \sin 2 - 0.5 \cos 2$ $B_1 = 0.5 \sin x_1 - 2 \cos x_1 + \sin x_2 - 1.5 \cos x_2$ $B_2 = 1.5 \sin x_1 - \cos x_1 + 2 \sin x_2 - 0.5 \cos x_2$	$[-\pi, \pi]$
π4	$f_1(x_1, x_2, x_3) = \sum_{i=1}^2 -10 \exp(-0.2 \sqrt{x_i^2 + x_{i+1}^2})$ $f_2(x_1, x_2, x_3) = \sum_{i=1}^3 x_i ^{0.8} + 5 \sin(x_i^3)$	$[-5, 5]$
π5	$f_1(x_1, x_2) = 0.5(x_1^2 + x_2^2) + \sin(x_1^2 + x_2^2)$ $f_2(x_1, x_2) = \frac{(3x_1 - 2x_2 + 4)^2}{8} + \frac{(x_1 - x_2 + 1)^2}{27} + 15$ $f_3(x_1, x_2) = \frac{1}{x_1^2 + x_2^2 + 1} - 1.1 \exp(-x_1^2 - x_2^2)$	$[-30, 30]$
π6	$f_1(x_1) = x_1$ $f_2(x_1, x_2) = (1 + 10x_2)\left(1 - \left(\frac{x_1}{1 + 10x_2}\right)^2\right) - \frac{x_1}{1 + 10x_2} \sin(8\pi x_1)$	$[0, 1]$
π7	$f_1(x_1, x_2) = \frac{(x_1 - 2)^2}{2} + \frac{(x_2 + 1)^2}{13} + 3$ $f_2(x_1, x_2) = \frac{(x_1 + x_2 - 3)^2}{36} + \frac{(-x_1 + x_2 + 2)^2}{8} - 17$ $f_3(x_1, x_2) = \frac{(x_1 + 2x_2 - 1)^2}{175} + \frac{(-x_1 + 2x_2)^2}{17} - 13$	$[-400, 400]$

Ωστόσο, η ακολουθία του Van Veldhuizen συμπεριλαμβάνει προβλήματα με ιδιότητες που χαρακτηρίζουν περισσότερο τα προβλήματα του πραγματικού κόσμου [25]. Ο πίνακας 3.1 παρουσιάζει τις μαθηματικές συναρτήσεις της εν λόγω ακολουθίας.

Οι αρχικοί συγγραφείς των πολυκριτηριακών προβλημάτων Π1-Π7 είναι οι εξής: Το Π1 διατύπωσε ο Schaffer[29], το Π2 οι Fonseca και Fleming[30], το Π3 οι Poloni, Mosetti και Contessi, το Π4 ο Kursawe[31], τα Π5 και Π7 οι Viennet, Fonteix και Marc [26] και, τέλος, το Π6 κατασκευάστηκε με βάση συναρτήσεις του Deb[27]. Ο πίνακας 3.2 παρουσιάζει αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των υπό συζήτηση προβλημάτων. Είναι αξιοσημείωτο ότι ορισμένα προβλήματα, όπως τα Π3 και Π5, είναι μη διαμερίσιμα και έχουν πολλαπλά τοπικά ακρότατα, χαρακτηριστικά που απαντώνται και στα προβλήματα του πραγματικού κόσμου. Επίσης, το σύνολο των προβλημάτων παρουσιάζει ποικιλία ασυνήθιστων γεωμετριών των μετώπων Pareto, όπως για παράδειγμα, αποσυνδεδεμένα σύνολα με εκφυλισμένα σημεία. Στο σχήμα 3.8 απεικονίζεται ένα τέτοιο παράδειγμα γεωμετρίας και εξηγούνται σχηματικά οι ονομασίες που δίνονται στα σύνολα του χώρου αποτίμησης ανάλογα με τη μορφή που έχουν. Τα μέτωπα των Π3 έως Π6 είναι αποσυνδεδεμένα και το Π3 έχει κυρτά υποσύνολα. Το Π4 χαρακτηρίζεται από εκφυλισμένα σημεία και μικτά υποσύνολα στο χώρο αποτίμησης. Το Π5 διαθέτει μία κυρτή και μία εκφυλισμένη γραμμή και το Π6 έχει ένα μέτωπο με κυρτές και μικτές συνιστώσες. Το Π7 χαρακτηρίζεται από ένα συνδεδεμένο και κυρτό μέτωπο με μερικές περιοχές που προεκτείνονται σε εκφυλισμένες γραμμές [25]. Ο ακριβής εντοπισμός των μετώπων Pareto του τρίτου και τέταρτου προβλήματος είναι εξαιρετικά δύσκολος [19]. Ένας ακόμη τρόπος μέσω του οποίου διαχωρίζεται η ακολουθία του Van Veldhuizen από του Deb και του Zitzler,

Πίνακας 3.2 – Χαρακτηριστικά δοκιμαστικών συναρτήσεων ακολουθίας Van Veldhuizen

Όνομα	Συνάρτηση	Παράμετροι	Διαμερισιμότητα	Τοπικά ακρότατα	Αποσυνδεδεμένες περιοχές χώρου αποτίμησης	Γνώση βέλτιστων λύσεων	Γεωμετρία
Π1	f_1	1	✓			✓	Κυρτή
	f_2	1	✓				
Π2	f_1	n	✓			✓	Μη κυρτή
	f_2	n	✓				
Π3	f_1	2		✓	✓		
	f_2	2	✓				
Π4	f_1	3	✓		✓	✓	
	f_2	3	✓	✓			
Π5	f_1	2		✓	✓	✓	
	f_2	2					
	f_3	2		✓			
Π6	f_1	1	✓		✓	✓	
	f_2	2	✓	✓			
Π7	f_1	2	✓		✓	✓	
	f_2	2					
	f_3	2					



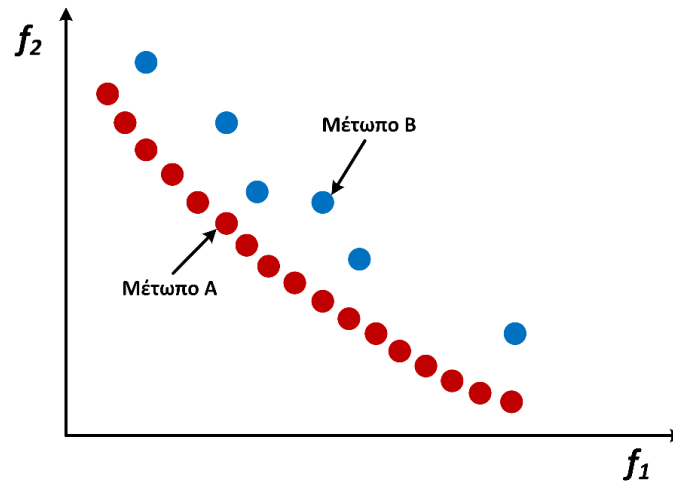
Σχήμα 3.8 – Παράδειγμα μετώπου Pareto και των ονομασιών των επιμέρους τμημάτων του ανάλογα με τη μορφή τους

είναι ότι οι περισσότερες παράμετροι είναι μικτές. Υπάρχουν ελάχιστες μεταβλητές θέσης και απόστασης [25].

3.6 Μέτρα επίδοσης πολυκριτηριακών αλγορίθμων

Η δυνατότητα επίλυσης ενός προβλήματος βελτιστοποίησης από έναν αλγόριθμο δεν αποτελεί το μοναδικό μέτρο αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας του. Μία ολοκληρωμένη αξιολόγηση πρέπει να περιλαμβάνει και επιπρόσθετους δείκτες που θα αφορούν την ταχύτητα σύγκλισης, την ποιότητα των λύσεων και την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων. Η ταχύτητα σύγκλισης μπορεί εύκολα να μελετηθεί αν εξετάζεται η ποιότητα των λύσεων σε τακτά χρονικά διαστήματα κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου. Στις περιπτώσεις των αλγορίθμων που δουλεύουν με πληθυσμούς, το χρονικό διάστημα ελέγχου συμπίπτει με την ολοκλήρωση της κάθε επανάληψης. Η επαναληψιμότητα μπορεί επίσης εύκολα να μελετηθεί, αν εκτελεστεί πολλές φορές ο αλγόριθμος με διαφορετικές αρχικές συνθήκες και εξεταστεί η σταθερότητα επίτευξης ή μη της ίδιας ποιότητας λύσεων. Όσον αφορά την ποιότητα των λύσεων, στις μονοκριτηριακές τεχνικές, η ελάχιστη τιμή του κριτηρίου που επιτεύχθηκε αποτελεί την μοναδική ένδειξη. Στα πολυκριτηριακά προβλήματα, ωστόσο, η ποσοτικοποίηση της ποιότητας των λύσεων αποτελεί μία διαρκή πρόκληση. [27]

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα, το αποτέλεσμα στη πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση είναι ένα μέτωπο Pareto, δηλαδή το σύνολο των μη κυριαρχούμενων λύσεων. Η μορφή αυτού του μετώπου είναι και αυτή που καθορίζει την ποιότητα του αποτελέσματος της βελτιστοποίησης. Στο σχήμα 3.9 επιχειρείται η ελαχιστοποίηση δύο κριτηρίων. Έτσι, οι πιο συμφέρουσες λύσεις βρίσκονται κάτω και αριστερά. Η καλύτερη γνωστή προσέγγιση του βέλτιστου μετώπου Pareto απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα και αποτελεί το μέτωπο A. Το μέτωπο μίας τυχαίας χρονικής στιγμής κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου απεικονίζεται με μπλε χρώμα και ονομάζεται μέτωπο B. Μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτό ότι το μέτωπο A είναι καλύτερο από το μέτωπο B καθώς προσφέρει περισσότερες λύσεις, ομοιόμορφα διεσπαρμένες στο χώρο και πλησιέστερα στην αρχή των αξόνων.

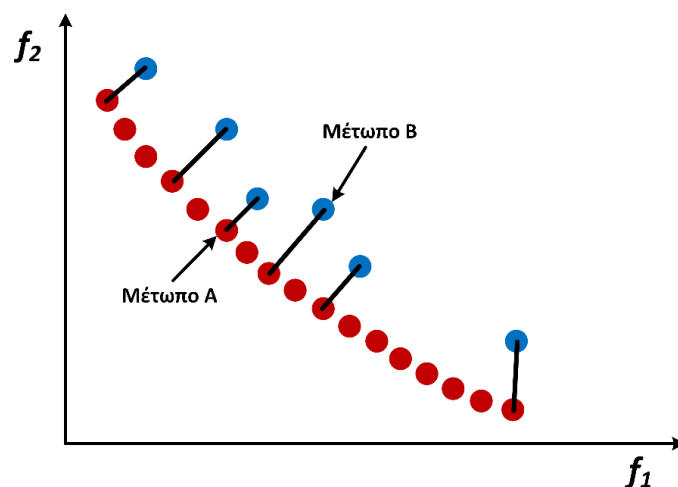


Σχήμα 3.9 – Το καλύτερο γνωστό σύνολο λύσεων (Μέτωπο A) και μία προσέγγιση αυτού του συνόλου (Μέτωπο B)

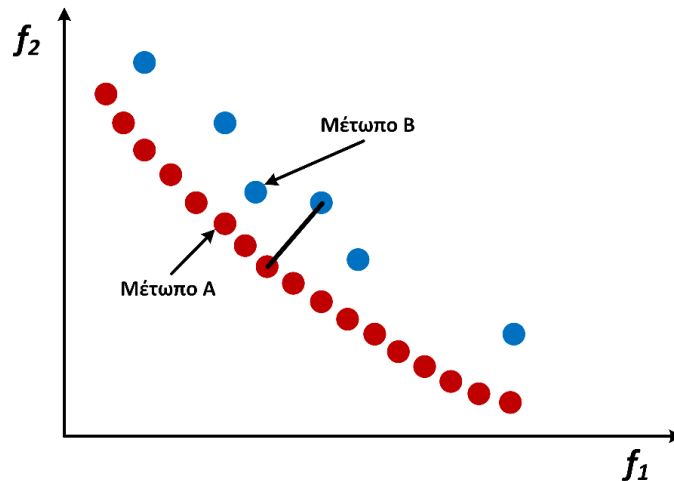
Έτσι λοιπόν μπορούν να οριστούν δύο έννοιες που θα βοηθούν στην ποσοτικοποίηση της ποιότητας ενός συνόλου λύσεων. Η έννοια της *σύγκλισης* (convergence) και η έννοια της *ποικιλίας* (divergence). Η πρώτη αφορά την εγγύτητα του υπό εξέταση μετώπου στο καλύτερο γνωστό σύνολο λύσεων και η δεύτερη την διασπορά των λύσεων στον χώρο αποτίμησης. Μπορούν να ευρεθούν στη βιβλιογραφία ποικίλοι τρόποι ποσοτικοποίησης των παραπάνω εννοιών, οι πιο σημαντικοί εκ των οποίων παρουσιάζονται παρακάτω.

3.6.1 Απόσταση γενιών

Η μέθοδος απόστασης γενιών (generational distance) προσφέρει μία πρώτη προσέγγιση της επίδοσης του υπό εξέταση μετώπου σε σύγκριση με το βέλτιστο. Με βάση αυτή τη τεχνική, υπολογίζονται οι κοντινότερες αποστάσεις των σημείων μεταξύ των δύο μετώπων (σχήμα 3.10). Ο μέσος όρος αυτών των αποστάσεων συνιστά το μέτρο επίδοσης. Αποτελεί ένα απλό κριτήριο επίδοσης του αλγορίθμου, ωστόσο έχει τρία



Σχήμα 3.10 – Σχηματοποίηση μεθόδου απόστασης γενιών. Οι μαύρες γραμμές δείχνουν την απόσταση μεταξύ των κοντινότερων σημείων των δύο μετώπων.



Σχήμα 3.11 – Σχηματοποίηση μεθόδου δείκτη έψιλον. Η μαύρη γραμμή δείχνει την μεγαλύτερη από τις αποστάσεις μεταξύ οποιονδήποτε σημείων των δύο μετώπων.

βασικά μειονεκτήματα. Πρώτον, προαπαιτεί τη γνώση του βέλτιστου μετώπου Pareto, κάτι που δεν είναι εφικτό στα πραγματικά προβλήματα. Δεύτερον, μπορεί λανθασμένα να ευνοήσει ορισμένες περιπτώσεις ύπαρξης πολύ μικρού αριθμού λύσεων που βρίσκονται πολύ κοντά στο βέλτιστο μέτωπο και τρίτον, αδυνατεί να συλλάβει την ποικιλία των λύσεων.

3.6.2 Δείκτης \mathcal{E}

Ο δείκτης *έψιλον* (epsilon indicator) ακολουθεί παρόμοια διαδικασία με την μέθοδο απόστασης γενιών. Γίνεται και εδώ εύρεση των μικρότερων αποστάσεων στο χώρο αποτίμησης μεταξύ των λύσεων του υπό εξέταση μετώπου και του βέλτιστου. Ωστόσο σε αυτή τη περίπτωση η τιμή του δείκτη ορίζεται από τη μεγαλύτερη απόσταση αυτών (σχήμα 3.11). Η τεχνική αυτή διατηρεί το μειονέκτημα της ανάγκης γνώσεως του βέλτιστου μετώπου. Επίσης, αποτελεί και ένα κριτήριο που ενδεχομένως να τείνει να αδικήσει αλγορίθμους που έχουν πετύχει άσχημα αποτελέσματα σε πολύ περιορισμένες περιοχές του χώρου αποτίμησης. Τέλος, αγνοεί επίσης την ποικιλία των λύσεων του μετώπου.

3.6.3 Κριτήριο υπερόγκου

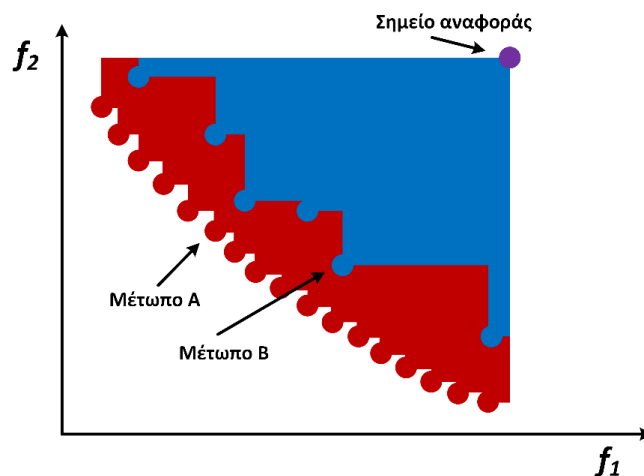
Ο υπερόγκος ενός δοθέντος μετώπου Pareto συνίσταται από τον όγκο του αντικειμενικού χώρου που κυριαρχείται ασθενώς από τα σημεία του μετώπου[34]. Αυτό γίνεται εφικτό υπολογίζοντας τον πολυδιάστατο όγκο ή μέτρο Lebesgue που δημιουργείται από κάθε μέτωπο όσον αφορά ένα σημείο αναφοράς. Στη μαθηματική θεωρία, το μέτρο Lebesgue (που ονομάστηκε έτσι από τον Γάλλο μαθηματικό Henri Lebesgue), είναι ο τυπικός τρόπος ανάθεσης ενός μέτρου σε υποσύνολα n -διαστάσεων του Ευκλείδειου χώρου. Για $n = 1, 2$ ή 3 , συμπίπτει με τα κλασικά μέτρα μήκους, εμβαδού ή όγκου. Σε γενικές γραμμές, ονομάζεται επίσης n -διάστατος όγκος, n -όγκος ή απλά όγκος. Χρησιμοποιείται σε όλες τις πραγματικές αναλύσεις, ιδίως για τον ορισμό

της ενσωμάτωσης του Lebesgue. Τα σύνολα στα οποία μπορεί να δοθεί ένα μέτρο Lebesgue ονομάζονται Lebesgue μετρήσιμα. Το μέτρο του υπολογίσιμου συνόλου A Lebesgue σημειώνεται με $\lambda(A)$. Ο Henri Lebesgue περιέγραψε το μέτρο αυτό το έτος 1901, συνεχίζοντας το επόμενο έτος με την θεμελίωση του ολοκληρώματος Lebesgue. Και τα δύο δημοσιεύθηκαν ως μέρος της διατριβής του το 1902. Ο υπερόγκος ενός μετώπου Pareto (PF) που ανήκει στο \mathbb{R}^C και μπορεί να συμβολιστεί ως $I_H(PF)$ εξαρτάται από το σημείο αναφοράς $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_c)'$ και ορίζεται ως:

$$I_H(PF, \mathbf{r}) = \lambda \left(\bigcup_{s \in PF} \text{space}(\mathbf{s}, \mathbf{r}) \right) \quad (3.3)$$

όπου $\text{space}(\mathbf{s}, \mathbf{r}) = \{\mathbf{v} \in \mathbb{R}^C \mid \mathbf{r} < \mathbf{v} \leq \mathbf{s}\}$ είναι το τμήμα του χώρου αποτίμησης που περιέχει όλα τα διανύσματα των κριτηρίων $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^C$, που κυριαρχούνται ασθενώς από τα στοιχεία $\mathbf{s} \in \mathbb{R}^C$ που κυριαρχούν το σημείο αναφοράς $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_c)'$ και λ είναι το μέτρο Lebesgue. Στο σχήμα 3.12 απεικονίζεται ένα παράδειγμα σε 2 διαστάσεις. Το μπλε εμβαδόν (υπερόγκος σε δύο διαστάσεις) αντιστοιχεί στο μέτωπο B και το κόκκινο στο μέτωπο A.

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι η επίτευξη μίας καλής τιμής υπερόγκου απαιτεί την ύπαρξη μεγάλου αριθμού λύσεων κοντά στην αρχή των αξόνων και με καλή διασπορά μεταξύ τους. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι λαμβάνει υπόψη τόσο τη σύγκλιση όσο και τη ποικιλία των μη κυριαρχούμενων λύσεων. Ένα ακόμα σημαντικό προβάδισμα της τεχνικής είναι ότι εδώ δεν απαιτείται η γνώση του βέλτιστου μετώπου, καθώς οποιαδήποτε δύο σύνολα μη κυριαρχούμενων λύσεων μπορούν να συγκριθούν άμεσα. Ωστόσο, η αξιοπιστία της μεθόδου περιορίζεται από την ανάγκη επιλογής του σημείου αναφοράς που μπορεί να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση ή υποτίμηση των χαρακτηριστικών ενός μετώπου σε σχέση με ένα άλλο.



Σχήμα 3.12 – Σχηματοποίηση μεθόδου υπερόγκου. Η μέθοδος συγκρίνει τους πολυδιάστατους όγκους που καθορίζονται από τα υπό εξέταση μέτωπα και ένα κοινό σημείο αναφοράς.

3.6.4 Δείκτης συνεισφοράς

Η τεχνική του δείκτη συνεισφοράς αποτελεί μία πρόσφατη προσθήκη στην βιβλιογραφία και στοχεύει στην αξιοποίηση των πλεονεκτικών χαρακτηριστικών του κριτηρίου του υπερόγκου προσπαθώντας παράλληλα να εξαλείψει την υποκειμενικότητα επιλογής του σημείου αναφοράς [28]. Για να οριστεί ο δείκτης συνεισφοράς, αρχικά γίνεται η υπόθεση 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 εν λόγω μετώπων γίνεται με την ακόλουθη διαδικασία:

1. Συνδυάζονται 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, το PF_S αποτελεί την καλύτερη δυνατή προσέγγισή του. 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 εκείνες τις λύσεις που δεν κυριαρχούνται από τα μέλη του PF_S .
2. Κανονικοποιούνται τα PF'_i και το PF_S με βάση την παρακάτω σχέση:

$$f_j(\xi)^* = \left| \frac{f_j(\xi) - f_j(\xi)_{worst}}{f_j(\xi)_{best} - f_j(\xi)_{worst}} \right|, j = 1, 2, \dots, C \quad (3.4)$$

όπου η τιμή $f_j(\xi)_{worst}$ αντιστοιχεί στη μέγιστη (ή στην ελάχιστη αν πρόκειται για 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 $[0, 1] \in R^C$.

3. Υπολογίζεται ο δείκτης υπερόγκου για κάθε ένα κανονικοποιημένο μέτωπο PF'_i ξεχωριστά και συμβολίζεται με $I_H(PF'_i, \mathbf{r})$, όπως επίσης και του κανονικοποιημένου πια μετώπου PF_S το οποίο συμβολίζεται με $I_H(PF_S, \mathbf{r})$. Υπενθυμίζεται εδώ πως το διάνυσμα \mathbf{r} είναι το διάνυσμα αναφοράς που τέθηκε για κάθε πρόβλημα.
4. Υπολογίζεται ο δείκτης συνεισφοράς CR που σχετίζεται με κάθε ένα από τα εξεταζόμενα μέτωπα ως εξής:

$$CR(PF_i, PF_S) = \frac{I_H(PF'_i, \mathbf{r})}{I_H(PF_S, \mathbf{r})} \quad (3.5)$$

Πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο πως η τιμή $CR(PF_i, PF_S)$ η οποία βρίσκεται πλησιέστερα στη μονάδα 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 αναφερθεί 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. Ωστόσο, η προτεινόμενη διαδικασία εξασφαλίζει σημαντικά αντικειμενικότερη συγκριτική ικανότητα.

Κεφάλαιο 4. Βελτιστοποίηση γεωμετρίας κινητήρα μονίμων μαγνητών εξωτερικού δρομέα για πρότυπο μονοθέσιο ηλεκτρικό όχημα

4.1 Εισαγωγή

Οι μετα-ευρετικοί αλγόριθμοι χαρακτηρίζονται από σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά τη βελτιστοποίηση γεωμετριών ηλεκτρικών μηχανών. Αποτελούν την καλύτερη επιλογή για την επίλυση των εν λόγω προβλημάτων, εφόσον έχουν μικρή πιθανότητα να εγκλωβιστούν σε περιοχές τοπικών ελαχίστων, ανεξάρτητα από τη μορφή που μπορεί να έχει η στοχική συνάρτηση. Η μεγαλύτερη πρόκληση της ερευνητικής διαδικασίας σε αυτή τη περιοχή συνίσταται στην επιτάχυνση της ταχύτητας σύγκλισης καθώς η αξιολόγηση των συναρτήσεων κόστους αποτελεί χρονοβόρα διαδικασία όταν χρησιμοποιούνται μοντέλα προσομοίωσης που βασίζονται σε πεπερασμένα στοιχεία [29], [30], [31], [32]. Στη σχετική βιβλιογραφία μπορούν να αντληθούν αντίστοιχα παραδείγματα. Στην εργασία [36] ερευνάται μία βελτιωμένη εκδοχή του αλγόριθμου βελτιστοποίησης αναζήτησης Tabu με προσθήκη των εξής τεχνικών: δέντρου διαμέρισης δυαδικού χώρου, εκτίμησης πυκνότητας λύσεων και διανυσμάτων προσαρμοζόμενου βήματος για διαφορετικούς χώρους αναζήτησης. Στις εργασίες [37] και [38] αναπτύχθηκαν πολυκριτηριακές τεχνικές με ειδικούς περιορισμούς που βασίζονται στην Διαφορική Εξέλιξη (Differential Evolution – DE) και στον Εξελικτικό Αλγόριθμο ParetoΔύναμης 2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2 – SPEA2) για εφαρμογές αεροπορικής τεχνολογίας και ηλεκτροκίνησης, αντίστοιχα. Ωστόσο, στα παραπάνω παραδείγματα και σε αντίστοιχες εργασίες (η απαρίθμηση των οποίων δεν έχει κάποιο πρακτικό νόημα) παρατηρείται ένα σημαντικό μειονέκτημα που χρήζει αναφοράς.

Οι ρουτίνες βελτιστοποίησης που αντιμετωπίζουν προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης έχουν αναπτυχθεί κατά κύριο λόγο για να επιλύουν προβλήματα της επιστήμης των υπολογιστών. Σε αυτή τη περιοχή παίζει κρίσιμο ρόλο η υπολογιστική πολυπλοκότητα της ρουτίνας βελτιστοποίησης καθώς η αξιολόγηση της συνάρτησης κόστους είναι ταχύτατη. Συνεπώς, με την εφαρμογή μίας τέτοιας ρουτίνας στην εύρεση

της βέλτιστης γεωμετρίας ηλεκτρικής μηχανής μπορεί να παρατηρηθεί μεγάλη ανισότητα στους χρόνους εκτέλεσης της κάθε συνιστώσας. Ειδικότερα, αν απομονωθούν τα χρονικά τμήματα εκτέλεσης των ηλεκτρομαγνητικών αναλύσεων και αθροιστούν, θα υπολογιστεί μία τιμή της τάξεως των ημερών ή εβδομάδων. Κατ' επέκταση, τα υπόλοιπα χρονικά τμήματα που απομένουν και πρακτικά συνιστούν τον υπολογιστικό χρόνο του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, αν αθροιστούν, θα δώσουν μία τιμή της τάξεως των δευτερολέπτων. Αυτό φανερώνει ότι ενδεχομένως να υπάρχει δρόμος για την εξέλιξη ευφύστερων τεχνικών που θα απαιτούν μεν περισσότερο υπολογιστικό χρόνο (ίσως της τάξεως των λεπτών της ώρας), αλλά θα οδηγούν δε στη μείωση του αριθμού κλήσεων της στοχικής συνάρτησης εξοικονομώντας ημέρες ή και εβδομάδες από τη διαδικασία. Οι δράσεις που αναπτύσσονται στο παρόν κεφάλαιο έχουν, τελικά, αυτό το στόχο.

Σε προηγούμενο κεφάλαιο έγινε εκτενής λόγος για τον αλγόριθμο Τεχνητής Αποικίας Μελισσών (Artificial Bee Colony – ABC), ο οποίος μιμείται τη συμπεριφορά των μελισσών που αναζητούν τροφή. Προτάθηκε σχετικά πρόσφατα και οι πρώτες συγκρίσεις με άλλους αλγορίθμους πάνω σε μαθηματικές συναρτήσεις ήταν αρκετά υποσχόμενες [33]. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε αντίστοιχα σε προβλήματα βελτιστοποίησης ηλεκτρομαγνητικών συσκευών με μεγάλη επιτυχία [40] [41] [42]. Επιπλέον, ειδικές τροποποιήσεις που προτάθηκαν στις [34] και [35] πέτυχαν βελτίωση στα χαρακτηριστικά σύγκλισης της τεχνικής, καθιστώντας την έναν ικανό ανταγωνιστή σε αυτή τη κατηγορία προβλημάτων. Η τεχνική είναι δομημένη εξ' αρχής σαν ένας μονοκριτηριακός αλγόριθμος και βασίζεται σε δύο φάσεις. Αυτή των μελισσών – εργατριών που αφορά το στάδιο εξερεύνησης του αλγορίθμου και αυτή των μελισσών – θεατών που συνιστά το στάδιο εκμετάλλευσης του αλγορίθμου. Με τον όρο εξερεύνηση και εκμετάλλευση εκφράζονται οι διαδικασίες κατά τις οποίες ο αλγόριθμος, αντίστοιχα, ερευνά νέες περιοχές του χώρου αναζήτησης και εκμεταλλεύεται τις ήδη υπάρχουσες πλεονεκτικές λύσεις (δηλαδή με επίκεντρο αυτές κάνει μικρές κινήσεις στις κοντινές περιοχές του χώρου αναζήτησης για τον προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης). Το δεύτερο στάδιο περιέχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μαθηματικής διατύπωσης του αλγορίθμου. Οι τεχνητές μέλισσες επισκέπτονται την κοντινή περιοχή των πλεονεκτικότερων πηγών τροφής (διανύσματα μεταβλητών) και αφού προσδιορίσουν την ποιότητα αυτών (τιμές στοχικής συνάρτησης) μοιράζονται άμεσα αυτή τη πληροφορία με τις υπόλοιπες. Συνεπώς, στη διάρκεια ενός κύκλου μπορεί να δεχτεί επίσκεψη η κοντινή περιοχή της ίδιας πλεονεκτικής πηγής τροφής πολλές φορές. Ωστόσο, η εξίσωση εξεύρεσης νέων λύσεων της Τεχνητής Αποικίας Μελισσών παρουσιάζει αδυναμία κίνησης προς τις βέλτιστες λύσεις και επιτρέπει την ανάμιξη των μεταβλητών μόνο δύο διανυσμάτων κάθε φορά. Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά συνιστούν μία αδυναμία του αλγορίθμου που φέρνει εμπόδιο τελικά στην εκμετάλλευση της ποικιλίας των λύσεων και την αναγνώριση της ανωτερότητας των καταλληλότερων εξ' αυτών.

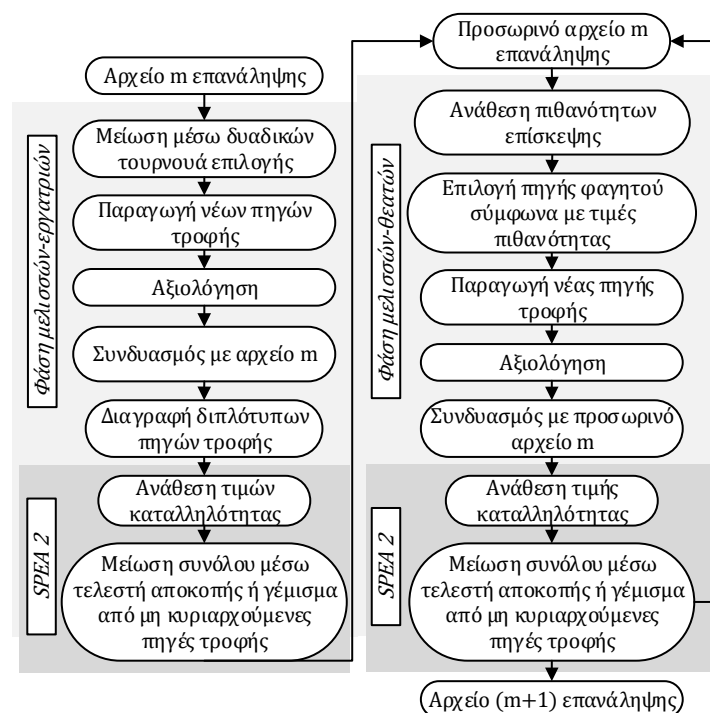
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί μία υβριδική πολυκριτηριακή τεχνική που βασίζεται στη SPEA2 και ενσωματώνει το έξυπνο στάδιο εκμετάλλευσης της ABC. Παρότι το στάδιο αυτό συνδυαζόμενο με τις τεχνικές προσδιορισμού καταλληλότητας λύσεων της SPEA2 αυξάνει σημαντικά τον καθαρό χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου, ο συνολικός χρόνος της διαδικασίας μειώνεται δραστικά καθώς απαιτούνται λιγότερες

κλήσεις της στοχικής συνάρτησης. Επίσης, προτείνεται και η αντικατάσταση της εξίσωσης προσδιορισμού νέων λύσεων με μία πιο εκλεπτυσμένη, όπως στις εργασίες [34] και [35]. Η μεθοδολογία που προκύπτει περιλαμβάνει χαρακτηριστικά γρήγορης σύγκλισης και βελτιωμένης ευρωστίας και συγκρίθηκε με άλλους γνωστούς και δυνατούς αλγορίθμους της βιβλιογραφίας τόσο μέσω κατάλληλων δοκιμαστικών συναρτήσεων όσο και μέσω μίας εφαρμογής κινητήρα μόνιμων μαγνητών για ηλεκτροκίνηση.

4.2 Υβριδικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος βελτιστοποίησης είναι ένας υβριδικός αλγόριθμος που συνδυάζει χαρακτηριστικά του ABC [39] και του SPEA2 [37], μαζί με μία νέα στρατηγική παραγωγής νέων λύσεων εμπνευσμένη από την τεχνική DE[43]. Το δομικό διάγραμμα της προτεινόμενης τεχνικής βελτιστοποίησης απεικονίζεται στο σχήμα 4.1. Βάση του προτεινόμενου πολυκριτηριακού υβριδικού αλγορίθμου ABC – SPEA2 (ABC SPEA2 Multi-objective Algorithm – ASMA) αποτελούν οι μηχανισμοί εξερεύνησης και εκμετάλλευσης του ABC. Ο προσδιορισμός της τιμής καταλληλότητας κάθε λύσης γίνεται σύμφωνα με τους μηχανισμούς δύναμης και πυκνότητας του SPEA2. Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε και πρωτύτερα, η αδύναμη στρατηγική μετάλλαξης που χρησιμοποιεί ο ABC για να παράγει γειτονικές πηγές τροφής αντικαθίσταται από έναν μηχανισμό εμπνευσμένο από την DE και ο οποίος θα εξηγηθεί παρακάτω.

Εφόσον γίνει η αρχικοποίηση των πληθυσμών κατά την εκκίνηση εκτέλεσης του αλγορίθμου, στην αρχή κάθε επανάληψης m παρέχεται σαν είσοδος ένα εξωτερικό αρχείο που διατηρεί τις πηγές τροφής που δόθηκαν σαν έξοδος από το πέρας της προηγούμενης επανάληψης του αλγορίθμου. Κατά τη διάρκεια της φάσης μελισσών-



Σχήμα 4.1: Δομικό διάγραμμα ASMA

εργατριών, το εν λόγω αρχείο πηγών τροφής μεγέθους N μειώνεται με χρήση της μεθόδου δυαδικών τουρνουά επιλογής [36] σε ένα αρχείο μεγέθους FN . Κάθε πηγή τροφής $x_i (i=1,2,\dots, FN)$ είναι ένα M -διάστατο διάνυσμα. Οι νέες πηγές τροφής παράγονται με την εισαγωγή μίας βολικής τεχνικής παραγωγής λύσεων που έχει εμπνευστεί από την τεχνική *DE/current-to-best/1* [37]:

$$v_{i,j} = x_{i,j} + F_1(x_{best,j} - x_{i,j}) + F_2(x_{k_2,j} - x_{k_3,j}) \quad (4.1)$$

όπου $i, k_2, k_3 \in \{1, 2, \dots, FN\}$ και $j \in \{1, 2, \dots, M\}$ είναι τυχαία επιλεγμένοι δείκτες τέτοιοι ώστε $i \neq k_2 \neq k_3$. Οι τιμές F_1, F_2 (τέτοιες ώστε $F_1 + F_2 = 1$) επιλέγονται σύμφωνα με τις προτιμήσεις του χρήστη για γρηγορότερη σύγκλιση ($F_1 > F_2$) ή ενισχυμένη απόκλιση των λύσεων ($F_2 > F_1$). Μία μεγαλύτερη τιμή στη παράμετρο F_2 είναι προτιμητέα σε πολύπλοκα προβλήματα και το αντίστροφο. Ο δείκτης *best* αναφέρεται στην κορυφαία πηγή τροφής του αρχείου, όπως αυτή ταξινομήθηκε από τους μηχανισμούς της SPEA2.

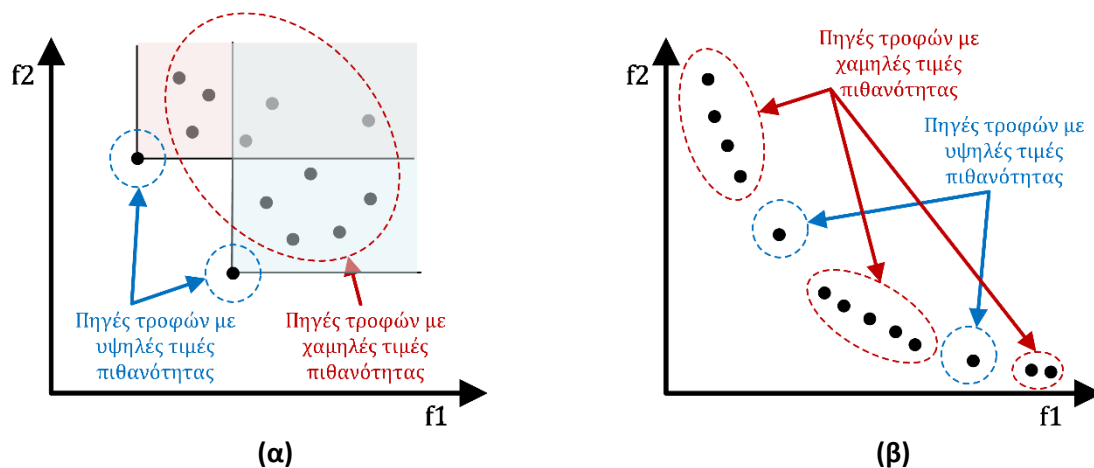
Οι νέες πηγές τροφών που παραχθήκαν αξιολογούνται τώρα και προστίθενται στο αρχείο για να σχηματίσουν το συνδυασμένο σύνολο C . Σε όλα τα στοιχεία του C ανατίθενται τιμές καταλληλότητας F σύμφωνα με τις διαδικασίες προσδιορισμού καταλληλότητας της SPEA 2 [37]. Η k κοντινότερη πηγή τροφής [44] μπορεί να προσδιορισθεί ορίζοντας ότι $k = \sqrt{N + FN}$ [38] και έτσι η πυκνότητα θα είναι:

$$D(i) = \frac{1}{\sigma_i^k + 2} \quad (4.2)$$

όπου το σ_i^k συμβολίζει την απόσταση από το i άτομο προς τον k κοντινότερο γείτονα [38]. Τα στοιχεία του C ταξινομούνται τώρα ανάλογα με τις τιμές καταλληλότητας σε μία αύξουσα σειρά έτσι ώστε το πρώτο στοιχείο του C να είναι η καλύτερη πηγή τροφής και η τελευταία η χειρότερη. Εάν ο αριθμός των μη-κυριαρχούμενων ατόμων υπερβαίνει το N , τότε το σύνολο C μειώνεται με χρήση του τελεστή αποκοπής της SPEA2 [38] μέχρις ότου ο αριθμός των μελών να είναι ίσος με N . Το προκύπτον σύνολο γίνεται το προσωρινό αρχείο που θα χρησιμοποιηθεί στη φάση των μελισσών-θεατών του ASMA. Το πρώτο βήμα της φάσης μελισσών-θεατών περιλαμβάνει τον υπολογισμό των τιμών πιθανοτήτων επίσκεψης που αντιστοιχούν σε κάθε πηγή τροφής [33] σύμφωνα με τις τιμές καταλληλότητας F :

$$P_i = \frac{F(i)}{\sum_{n=1}^N F(n)} \quad (4.3)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω πιθανότητες, μία μέλισσα-θεατής διαλέγει τυχαία μία πηγή τροφής. Η τωρινή θέση τροφής τροποποιείται ώστε να παραχθεί μία νέα με τον ίδιο τρόπο που αυτό συνέβη και στη φάση των μελισσών-εργατριών. Η αντίστοιχη νέα λύση προστίθεται στις λύσεις του αρχείου παράγοντας ένα συνδυασμένο σύνολο με $N+1$ στοιχεία. Αυτό το σύνολο διέρχεται τώρα από τα ίδια συστήματα της SPEA2 όπως και πριν. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα FN φορές μέχρι να ολοκληρωθεί η



Σχήμα 4.2: Προτεραιότητες του ASMA στη (α) σύγκλιση και την (β) απόκλιση στα αρχικά και τελικά στάδια της βελτιστοποίησης, αντίστοιχα.

φάση μελισσών-θεατών. Το αρχείο που προκύπτει είναι αυτό που θα διοχετευθεί στην επόμενη επανάληψη του αλγορίθμου.

Είναι αξιοσημείωτο για τον μηχανισμό ανάθεσης τιμών καταλληλότητας $F(i)$ της SPEA2 ότι αυτή είναι περίπου ίση με τη ωμή δύναμη $R(i)$ [37] ανάμεσα σε λύσεις που κυριαρχούν η μία στην άλλη και ότι $F(i)=R(i)$ ανάμεσα σε μη-κυριαρχούμενες λύσεις. Η πρώτη έκφραση χαρακτηρίζει τα στοιχεία του αρχείου κυρίως στις αρχικές επαναλήψεις του αλγορίθμου, όταν η αναζήτηση λαμβάνει χώρα χωρίς να έχει πλησιάσει ακόμα το βέλτιστο μέτωπο Pareto. Όταν οι μη κυριαρχούμενες λύσεις αρχίσουν να συνωστίζονται στο αρχείο, θα έχουν όλες τιμή $R(i)=0$ και η καταλληλότητα τους θα εξαρτάται μόνο από τη τιμή πυκνότητας D . Εφόσον ο ASMA έχει ένα ισχυρό στάδιο εκμετάλλευσης, στις αρχικές επαναλήψεις επικεντρώνεται κυρίως στις λίγες μη-κυριαρχούμενες λύσεις και βελτιώνει αυτές (σχήμα 4.2α). Όταν το αρχείο γεμίσει από μη-κυριαρχούμενες λύσεις, επικεντρώνεται στις πηγές τροφής που είναι λιγότερο συνωστισμένες (σχήμα 4.2β).

4.3 Συγκριτική αξιολόγηση με δοκιμαστικές συναρτήσεις

Σε αυτή την ενότητα, ο ASMA θα συγκριθεί με άλλους τρεις δυνατούς και καταξιωμένους πολυκριτηριακούς αλγορίθμους από τη βιβλιογραφία: τον Εξελικτικό Αλγόριθμο Pareto Δύναμης 2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2 - SPEA2) [36], τον Γενετικό Αλγόριθμο χωρίς Ταξινόμηση 2 (Non-Sorting Genetic Algorithm 2 - NSGA2)[17] και τον Αλγόριθμο Pareto Επιλογής Φακέλων 2 (Pareto Envelope-based Selection Algorithm 2 - PESA 2) [39]. Η πλήρης ακολουθία δοκιμαστικών συναρτήσεων του Van Veldhuizen [25] χρησιμοποιείται στη παρούσα διδακτορική διατριβή σαν ένα μέσο συγκριτικής αξιολόγησης των επιδόσεων του προτεινόμενου αλγορίθμου. Υιοθετήθηκε καθώς περιέχει συναρτήσεις που είναι σημαντικά αντιπροσωπευτικές των προβλημάτων του πραγματικού κόσμου, με μία ποικιλία ασυνήθιστων βέλτιστων μετώπων Pareto, που περιλαμβάνουν συναρτήσεις με αποσυνδεδεμένα και εκφυλισμένα μέτωπα [25].

Η συγκριτική δοκιμή δομήθηκε ως εξής: ο ASMA χρησιμοποιήθηκε αρχικά για να επιλύσει το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της κάθε δοκιμαστικής συνάρτησης. Κατόπιν καταγράφηκε ο μέσος αριθμός επαναλήψεων που απαιτήθηκαν για την επίτευξη του βέλτιστου μετώπου Pareto για την αντίστοιχη συνάρτηση. Με δεδομένη τιμή πληθυσμού υπολογίστηκε το σύνολο των κλήσεων της δοκιμαστικής συνάρτησης μέχρι την επίτευξη του αποτελέσματος. Οι άλλοι αλγόριθμοι ρυθμίστηκαν, κατόπιν, ώστε να τρέξουν για τον αντίστοιχο αριθμό κύκλων με τους ίδιους πληθυσμούς και τις ίδιες ρυθμίσεις και η συνολική τους επίδοση μετρήθηκε. Στη περίπτωση του NSGA2 ωστόσο, επειδή δεν μπορεί να οριστεί συγκεκριμένος πληθυσμός, τέθηκε συνθήκη τερματισμού στον συνολικό αριθμό κλήσεων της δοκιμαστικής συνάρτησης. Πιο συγκεκριμένα: ο αριθμός μελών του πληθυσμού των ASMA, SPEA2 και PESA2 τέθηκε ως 35 και το μέγεθος του αρχείου ως 100. Ο αριθμός κύκλων της PESA2 και SPEA2 τέθηκε ως διπλάσιος από αυτόν του ASMA, καθώς ο ASMA περιλαμβάνει δύο φάσεις με FN κλήσεις της δοκιμαστικής συνάρτησης. Όσον αφορά τις ρυθμίσεις των αλγορίθμων, χρησιμοποιήθηκαν οι προτεινόμενες τιμές από τις αρχικές εργασίες που τους παρουσίασαν. Οι πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης τέθηκαν σε όλους ως 0.7 και 0.3 αντίστοιχα, ούτως ώστε να επιτευχθεί ένας λόγος 2:1 (κατά προσέγγιση) ανάμεσα στην ταχύτητα σύγκλισης και την τυχαία αναζήτηση του χώρου απόφασης. Οι τιμές F_1 και F_2 του ASMA επιλέχθηκαν ίσες με 0,5 ώστε να διατηρηθεί μία ισορροπημένη τάση ανάμεσα στην σύγκλιση και την απόκλιση των λύσεων.

Στη συνέχεια ο κάθε αλγόριθμος εκτελέστηκε 30 φορές για κάθε δοκιμαστική συνάρτηση με διαφορετικούς αρχικούς πληθυσμούς. Τα μέτωπα Pareto αποθηκεύτηκαν και το κριτήριο του υπερόγκου (Hypervolume – HV) υπολογίστηκε για κάθε εκτέλεση. Το συγκεκριμένο κριτήριο επιλέχθηκε γιατί επιτρέπει την αποτύπωση τόσο της σύγκλισης των λύσεων στο βέλτιστο μέτωπο Pareto, όσο και την απόκλιση των λύσεων μεταξύ τους, χωρίς την υποχρέωση της εκ των προτέρων γνώσης του βέλτιστου μετώπου Pareto. Ωστόσο, η τιμή του εξαρτάται ισχυρά από την επιλογή του σημείου αναφοράς, όπως μπορούμε να δούμε στην αναφορά [28]. Γι' αυτό το λόγο και προκειμένου να επιτευχθεί μία αντικειμενικότερη σύγκριση, υιοθετήθηκε ο Δείκτης Συνεισφοράς (Contribution Rate – CR) που επιτρέπει μία πιο σύνθετη ανάλυση και ξεπερνά τα ανωτέρω προβλήματα [28]. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης απεικονίζονται στον πίνακα 4.1. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος υπερέρχει των άλλων σε 5 από τις δοκιμαστικές συναρτήσεις όσον αφορά τη ταχύτητα. Ο PESA2 υπερέρχει στα άλλα 2 πολυκριτηριακά προβλήματα. Όσον αφορά τη τυπική απόκλιση των τιμών CR στις 30 εκτελέσεις, ο ASMA είναι καλύτερος στις 6 από τις 7 περιπτώσεις και ο PESA2 σε 1 από τις 7 περιπτώσεις. Οι αλγόριθμοι SPEA2 και NSGA2 απέτυχαν να διακριθούν σε οποιαδήποτε περίπτωση. Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι ο ASMA καταφέρνει να επικρατήσει στα περισσότερα προβλήματα εμφανίζοντας παράλληλα αξιοσημείωτη αξιοπιστία και επαναληψιμότητα στα αποτελέσματά του.

Πίνακας 4.1: Μέσες τιμές Δείκτη Συνεισφοράς (πρώτες γραμμές) και τυπική απόκλιση τιμών Δείκτη Συνεισφοράς (δεύτερες γραμμές)

	ASMA	SPEA2	NSGA-II	PESA-II
ΠΠ1	0.97	0.76	0.76	0.95
	0.0027	0.1222	0.0229	0.0954
ΠΠ2	0.98	0.93	0.70	0.86
	0.0126	0.0494	0.2445	0.1504
ΠΠ3	0.78	0.67	0.48	0.71
	0.1871	0.2300	0.2102	0.2307
ΠΠ4	0.91	0.39	0.31	0.58
	0.0923	0.2806	0.2926	0.3009
ΠΠ5	0.17	0.31	0.32	0.43
	0.1319	0.2975	0.3255	0.3659
ΠΠ6	0.92	0.76	0.02	0.96
	0.1130	0.1243	0.1291	0.0292
ΠΠ7	0.99	0.11	0.01	0.04
	0.0156	0.1013	0.0249	0.1723

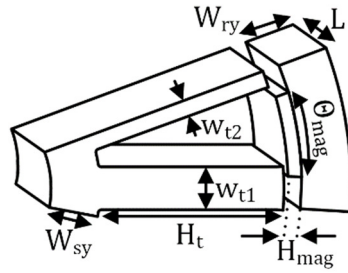
4.4 Εφαρμογή στο βέλτιστο σχεδιασμό σύγχρονης μηχανής επιφανειακών μονίμων μαγνητών για πρωτότυπο ηλεκτρικό όχημα

Η εφικτότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας εξετάστηκε στο βέλτιστο σχεδιασμό μίας μηχανής 220W και 300ΣΑΛ με εξωτερικό δρομέα, επιφανειακούς μόνιμους μαγνήτες και συγκεντρωμένα τυλίγματα κλασματικού βήματος με διαμόρφωση άνισων δοντιών στάτη. Η μηχανή ενσωματώνεται σε πρωτότυπο ελαφρύ αμιγώς ηλεκτρικό όχημα που εξοπλίζεται με μπαταρίες και φωτοβολταϊκό πάνελ και συμμετέχει σε αγώνες ενεργειακής οικονομίας. Η μοντελοποίηση γίνεται με χρήση πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό της ηλεκτρομαγνητικής ροπής στο μέσο του διακένου και την εξαγωγή της κυματομορφής της αντί-ΗΕΔ. Οι απώλειες χαλκού, σιδηρού και δινορρευμάτων στους μαγνήτες λαμβάνονται υπόψη με κατάλληλη μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων των πεπερασμένων στοιχείων και με τη βοήθεια αναλυτικών σχέσεων [36]. Το διάλυμα των μεταβλητών απόφασης απαρτίζεται από 8 στοιχεία και ορίζεται ως:

$$x = [W_{sy} \ W_{ry} \ W_{t1} \ W_{t2} \ H_{mag} \ \Theta_{mag} \ H_t \ L] \quad (4.4)$$

όπου W_{sy} , W_{ry} , W_{t1} και W_{t2} συμβολίζουν τα πάχη σώματος στάτη, δρομέα, παχιού δοντιού και λεπτού δοντιού αντίστοιχα. Το πάχος του μαγνήτη γράφεται ως H_{mag} και το γωνιακό του άνοιγμα ως Θ_{mag} . Το μήκος του δοντιού αναπαρίσταται με H_t και το ενεργό μήκος της μηχανής με L . Τα παραπάνω αναπαριστώνται γραφικά στο σχήμα 4.3.

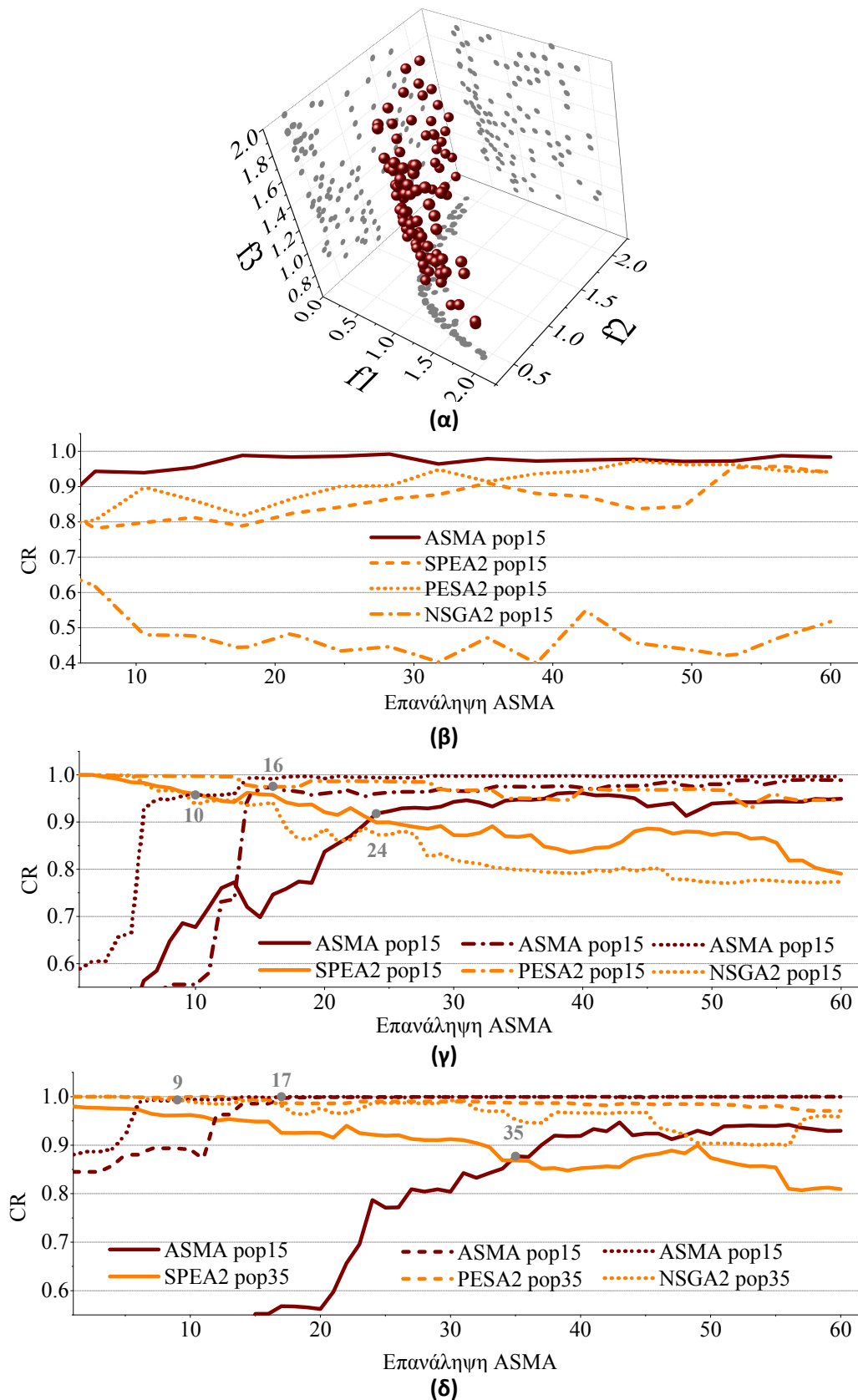
Τα κριτήρια βελτιστοποίησης τέθηκαν ως εξής [36]:



Σχήμα 4.3: Γεωμετρικές μεταβλητές παραμετρικού σχεδιασμού

$$[f_1 \quad f_2 \quad f_3] = \left[\frac{T_{n,0}}{T_n} \quad \frac{P_l}{P_{l,0}} \quad \left(0.5 \cdot \frac{THD_{EMF}}{THD_{EMF,0}} + 0.5 \cdot \frac{T_r}{T_{r,0}} \right) \right] \quad (4.5)$$

όπου T_n είναι η ονομαστική ροπή, P_l οι απώλειες, THD_{EMF} είναι η ολική αρμονική παραμόρφωση της επαγόμενης τάσης και T_r είναι η κυμάτωση ροπής. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύθηκε 3 φορές με κάθε έναν από τους αλγορίθμους που αναφέρθηκαν προηγουμένως με τις ίδιες ρυθμίσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως με τιμές πληθυσμών 15 και 35. Για τη τιμή πληθυσμού 15 έτρεξαν για 120 κύκλους (ή 60 κύκλους της ASMA) και απαιτήθηκαν 1800 κλήσεις της αντικειμενικής συνάρτησης. Για τη τιμή πληθυσμού 35 έτρεξαν για 60 κύκλους (ή 30 κύκλους ASMA) και απαιτήθηκαν 2100 κλήσεις της αντικειμενικής συνάρτησης. Ο NSGA2 θα εκτελέσει 17 και 20 κύκλους, αντίστοιχα, για να επιτύχει τον ίδιο αριθμό κλήσεων της στοχικής συνάρτησης. Το προκύπτον μέτωπο Pareto του ASMA φαίνεται στο σχήμα 4.4(α). Οι προβολές στα τρία επίπεδα που σχηματίζουν οι τρεις άξονες υπογραμμίζουν την ανωτερότητα του ASMA στην επίτευξη πολύ καλής απόκλισης μεταξύ των λύσεων. Είναι αξιοσημείωτο, ότι για να υπολογιστεί το μέτρο CR τα μέτωπα Pareto ενώνονται και οι μη-κυριαρχούμενες λύσεις διατηρούνται για να προσδιορίσουν το βέλτιστο μέτωπο Pareto που έχει ανακαλυφθεί μέχρι στιγμής. Ύστερα, σύμφωνα με τη διαδικασία που έχει οριστεί στην [28] εντοπίζεται η συνεισφορά του κάθε μετώπου PF στο βέλτιστο. Το σχήμα 4.4β συγκρίνει τις τιμές του Δείκτη Συνεισφοράς που υπολογίστηκαν από όλους τους ανταγωνιζόμενους αλγορίθμους με πληθυσμό 15 μελών για κάθε επανάληψη. Η συνεισφορά του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι μεγαλύτερη σε κάθε κύκλο. Γίνεται λοιπόν εμφανές ότι ο ASMA επιτυγχάνει καλύτερη σύγκλιση και καλύτερη απόκλιση στα μέτωπα Pareto που εντοπίζει σε κάθε βήμα της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Το σχήμα 4.4γ και το σχήμα 4.4δ συγκρίνουν τους Δείκτες Συνεισφοράς του μετώπου Pareto της κάθε επανάληψης του ASMA με το τελικό μέτωπο Pareto που βρέθηκε με τους άλλους αλγόριθμους. Ο ASMA διαθέτει πληθυσμό 15 μελών και οι άλλοι αλγόριθμοι ενσωματώνουν πληθυσμούς 15 και 35 μελών. Στη πρώτη περίπτωση, ο ASMA εντοπίζει ένα μέτωπο με ίση συνεισφορά σε σχέση με τον καλύτερο από τους άλλους αλγορίθμους 60% πιο γρήγορα (όσον αφορά τον αριθμό των κλήσεων της στοχικής συνάρτησης) και στη δεύτερη περίπτωση 50% πιο γρήγορα. Τελικά, σε κάθε περίπτωση, με δεδομένο αριθμό κλήσεων συνάρτησης κόστους, ο ASMA πάντα εντοπίζει ένα μέτωπο με βελτιωμένη ποιότητα λύσεων.



Σχήμα 4.4: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης πεπερασμένων στοιχείων: (α) τελικό μέτωπο Pareto του ASMA με πληθυσμό 15 μελών μετά από 60 επαναλήψεις. (β) CR των αντίπαλων αλγορίθμων σε κάθε επανάληψη με πληθυσμό 15 μελών (γ), (δ) CR μεταξύ της κάθε επανάληψης του ASMA και του τελικού μετώπου Pareto των SPEA2, PESA2 and NSGA2 με 15 και 35 μέλη πληθυσμού μετά από 120 και 60 επαναλήψεις, αντίστοιχα.

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά της αρχικής και της βέλτιστης γεωμετρίας της μηχανής

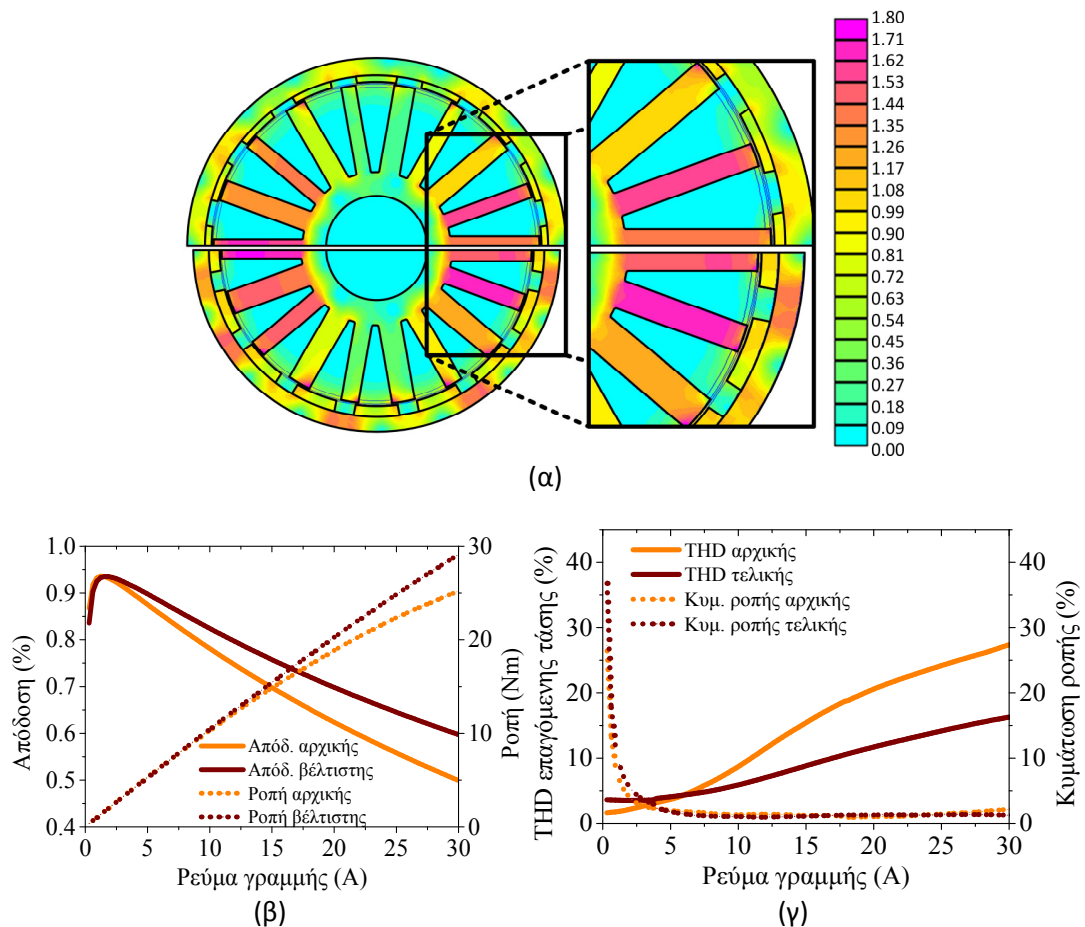
	Μέγεθος	Αρχική γεωμετρία	Βέλτιστη γεωμετρία
Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά	Γωνιακό εύρος μαγνήτη (%)	60	68
	Πάχος μαγνήτη (mm)	2.24	3.6
	Πάχος δοντιού (mm)	7.00	7.75
	Πάχος σώματος στάτη(mm)	8.0	8.5
	Πάχος σώματος δρομέα(mm)	6.0	5.3
	Λόγος ανισότητας δοντιών	0.70	0.76
	Μήκος δοντιού (mm)	30	27
	Ενεργό μήκος (mm)	35	38
	Συντελεστής πληρότητας αύλακος	0.5	0.5
Λειτουργικά χαρακτηριστικά	Ονομαστικό ρεύμα γραμμής (A)	7.08	7.08
	Ονομαστική ροπή (Nm)	7.43	7.43
	Απόδοση(%)	83.6	86.7
	Ολική αρμονική παραμόρφωση (%)	5.4	4.7
	Κυμάτωση ροπής (%)	1.7	1.2
	Συνολική μάζα (kg)	2.82	2.81

Στον πίνακα 4.2 συγκρίνονται τα χαρακτηριστικά της αρχικής και της βέλτιστης γεωμετρίας της μηχανής. Η αρχική γεωμετρία δημιουργήθηκε με χρήση της τεχνικής ανάλυσης ευαισθησίας στις μεταβλητές βελτιστοποίησης [40] ενώ η βέλτιστη γεωμετρία καθορίστηκε επιλέγοντας την καταλληλότερη λύση από το μέτωπο Pareto της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Είναι αξιοσημείωτο ότι το βέλτιστο σχέδιο περιλαμβάνει αυξημένη απόδοση και μειωμένα αρμονικά φαινόμενα στην επαγόμενη τάση και τη ροπή, όπως φαίνεται και στον πίνακα 4.2.

Οι κατανομές του μαγνητικού πεδίου και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των δύο γεωμετριών συγκρίνονται στο σχήμα 4.5. Μπορούν να παρατηρηθούν τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά για τη βέλτιστη γεωμετρία όσον αφορά την επίδοση και την απόδοση τόσο σε ονομαστικές συνθήκες όσο και σε συνθήκες υπερφόρτισης. Ο υπολογιστικός χρόνος ανήλθε στις 53 ώρες με χρήση ενός i7-4820K επιτραπέζιου υπολογιστή με 16GB μνήμη RAM.

4.5 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο προτάθηκε ένας υβριδικός αλγόριθμος (ASMA) που βασίζεται στον ABC, στη SPEA2 και στην DE. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε συγκρίθηκε με άλλους δυνατούς αλγόριθμους της βιβλιογραφίας τόσο μέσω μίας απαιτητικής ακολουθίας δοκιμαστικών συναρτήσεων, όσο και μέσω μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων μίας μηχανής επιφανειακών μονίμων μαγνητών εξωτερικού δρομέα για εφαρμογή ηλεκτροκίνησης. Στη πρώτη περίπτωση παρουσίασε σταθερή και γρήγορη σύγκλιση στο βέλτιστο μέτωπο Pareto. Στη δεύτερη περίπτωση απαίτησε το μισό χρόνο σε σχέση με τους υπό εξέταση αλγόριθμους και υπερέιχε των άλλων τεχνικών ακόμα



Σχήμα 4.5: Σύγκριση των προσομοιωμένων χαρακτηριστικών λειτουργίας της αρχικής και της βέλτιστης γεωμετρίας. (α) Κατανομή μαγνητικού πεδίου (αρχική γεωμετρία: επάνω, βέλτιστη γεωμετρία: κάτω) και λεπτομέρεια στο διάκενο. (β) Συσχετισμός μέγιστης ροπής και απόδοσης με το ρεύμα γραμμής. (γ) Συσχετισμός ολικής αρμονικής παραμόρφωσης επαγόμενης τάσης και κυμάτωσης ροπής με το ρεύμα γραμμής.

και όταν αυτοί διέθεταν περισσότερα από τα διπλάσια μέλη πληθυσμού. Τελικά, επέτρεψε την εξεύρεση γεωμετρίας με αξιοσημείωτη αύξηση στην απόδοση και μείωση των αρμονικών φαινομένων της επαγόμενης τάσης και της ροπής σε σύγκριση με την αρχική γεωμετρία που είχε καθοριστεί με χρήση ανάλυσης ευαισθησίας.

Κεφάλαιο 5. Βελτιστοποίηση γεωμετρίας κινητήρα μονίμων μαγνητών εσωτερικού δρομέα για πρότυπο μονοθέσιο ηλεκτρικό όχημα

5.1 Εισαγωγή

Η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας ηλεκτρικών μηχανών αποτελεί εγγενώς ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα με αντικρουόμενους στόχους. Περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό σχεδιαστικών μεταβλητών και αυξημένο υπολογιστικό κόστος που αποδίδεται στις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, οι οποίες είναι αναγκαίες για τον υπολογισμό της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης. Οι σύγχρονες εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων απαιτούν μηχανές με υψηλή πυκνότητα ισχύος και απόδοση, ενώ υπόκεινται σε αυστηρούς χωρικούς και λειτουργικούς περιορισμούς. Επιπρόσθετα, η θεώρηση πολλαπλών σημείων λειτουργίας είναι υποχρεωτική, εφόσον οι μηχανές ηλεκτροκίνησης προορίζονται για λειτουργία σε συνθήκες μεταβλητού φορτίου και ταχύτητας. Ωστόσο, η λύση του προβλήματος αποκτά μεγάλη δυσκολία όταν θεωρείται ολόκληρος ο κύκλος οδήγησης. Η συμπερίληψη της λειτουργίας σε μεταβλητή ταχύτητα και μερικό φορτίο στην διατύπωση του προβλήματος περιπλέκει σημαντικά την ανάλυση και αυξάνει τους χρόνους υπολογισμού, καθιστώντας το ένα σημαντικό ζήτημα μηχανικής. Η επιτάχυνση της διαδικασίας είναι, συνεπώς, ένα κοινό πρόβλημα στη σχετική βιβλιογραφία.

Μία από τις πιο συνήθεις αντιθέσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών των μηχανών είναι η σχέση μεταξύ της πυκνότητας ροπής και της απόδοσης. Οι αναλογίες της μέγιστης ροπής κατ' όγκο και της μέγιστης ροπής κατά βάρος ερευνώνται στην [41] ανάμεσα σε σύγχρονες μηχανές με ηλεκτρική διέγερση και με μόνιμο μαγνήτη, για εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας. Το ελάχιστο βάρος, η μέγιστη ισχύς εξόδου και η καταλληλότητα για λειτουργία σε ευρεία περιοχή σταθερής ισχύος, αποτελούν τους στόχους της εργασίας [42] όσον αφορά τον σχεδιασμό μίας μηχανής εσωτερικών μονίμων μαγνητών. Στην εργασία [43] επιδιώκεται η επίτευξη της μέγιστης ροπής με το ελάχιστο κόστος και όγκο για μία απύρηνη μηχανή. Ένα επεκτεταμένο σύνολο μεταβλητών βελτιστοποίησης που περιγράφει το σχήμα του δοντιού προτείνεται στην [44] με στόχο την αύξηση της πυκνότητας ροπής. Ένας επιπλέον σημαντικός

παράγοντας της επιλογής του πιο πλεονεκτικού σχεδίου είναι η συστηματική θεώρηση συμπληρωματικών δεικτών απόδοσης και λειτουργίας, όπως στις [45] [46], όπου ασύγχρονες μηχανές και μηχανές μονίμων μαγνητών λαμβάνονται υπόψη για τον βέλτιστο σχεδιασμό ενός σερβοκινητήρα για αεροπορικές εφαρμογές. Στην [41] ερευνάται η μεταβολή των βέλτιστων συναρτήσεων του αριθμού των πόλων και του μεγέθους ανάμεσα σε μηχανές με τυλιγμένο δρομέα και δρομέα μόνιμου μαγνήτη. Μία στρατηγική ιεραρχικής ανάλυσης επιστρατεύεται στο [47] για να επιλεχθεί το καλύτερο σχέδιο μηχανής. Μία παρόμοια συζήτηση γίνεται στην αναφορά [48] σχετικά με τους συμβιβασμούς στις βέλτιστες γεωμετρίες. Εκεί προτείνεται ακόμη μία διαδικασία ντετερμινιστικής απόφασης. Ωστόσο, παρότι αυτές οι τεχνικές προσπαθούν να εντοπίσουν τη βέλτιστη λύση ανάμεσα από διάφορα χαρακτηριστικά απόδοσης των μηχανών σε ένα σημείο λειτουργίας, δεν μπορούν εύκολα να επεκταθούν για τη θεώρηση πολλαπλών σημείων λειτουργίας [49].

Αναδύεται μία ανάγκη θεώρησης ευρέων περιοχών λειτουργίας [42], [50], [51] και κατ' επέκταση του υπολογισμού της απόδοσης σε αυτές τις περιοχές [52] [53]. Η σύγχρονη τάση υποδεικνύει ότι οι απώλειες πρέπει να ελαχιστοποιηθούν σε όλο το κύκλο λειτουργίας, όπως φαίνεται στην [54]. Εδώ επιχειρείται η ελαχιστοποίηση των απωλειών της μηχανής ενός υβριδικού λεωφορείου σε όλο τον κύκλο φόρτισης μέσω της μείωσης των απωλειών σιδήρου κενού φορτίου με παράλληλη διατήρηση της δυνατότητας υψηλής ροπής για την επιτάχυνση. Στην [55] προτείνεται μία γρήγορη μέθοδος υπολογισμού των απωλειών πυρήνα μηχανής μονίμων μαγνητών για όλα τα σημεία ενός κύκλου οδήγησης. Η αναπαράσταση του τελευταίου από ένα περιορισμένο αριθμό αντιπροσωπευτικών σημείων όσον αφορά την ενέργεια παρουσιάζεται στην [56]. Η βολική εκμετάλλευση αυτών των σημείων σε μία μονοκριτηριακή τεχνική προτείνεται στην [57] για την δοκιμαστική περίπτωση μηχανών επιφανειακών και εσωτερικών μονίμων μαγνητών για ηλεκτρικά οχήματα. Οι συγγραφείς της [58] εξάγουν επίσης κατά παρόμοιο τρόπο αντιπροσωπευτικά σημεία μέσω μίας τεχνικής ομαδοποίησης. Το κοινό μειονέκτημα αυτών των τεχνικών είναι, ωστόσο, το γεγονός ότι τα κεντροειδή (centroid) σημεία δεν μπορούν να αντικαταστήσουν τους κύκλους αυτούς καθ' εαυτούς. Παρότι αυτό το μειονέκτημα αποτελεί κοινό τόπο, οι προσομοιώσεις με πεπερασμένα στοιχεία δεν επιτρέπουν υπολογιστικά την θεώρηση όλων των σημείων λειτουργίας.

Μία λύση προς αυτή την κατεύθυνση είναι η χρήση ενός κατάλληλου αναπληρωτικού συστήματος προκειμένου να αντικαταστήσει μέρος των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων, ενώ θα εκπαιδεύεται από αυτές. Τα νευρωνικά δίκτυα συνιστούν πλεονεκτικές επιλογές με υψηλές προσδοκίες για δυνατότητα ακριβούς μοντελοποίησης. Ενώ η διαθέσιμη βιβλιογραφία για την εφαρμογή τους στο πεδίο του σχεδιασμού ηλεκτρικών μηχανών είναι σχετικά περιορισμένη [59] [60], χρησιμοποιούνται ευρέως στον έλεγχο μηχανών μονίμων μαγνητών [61] [62] και στη βέλτιστη διαχείριση ισχύος, όπως στη περίπτωση ενός υβριδικού οχήματος στην [63].

Σε αυτό το κεφάλαιο προτείνεται μία τεχνική δύο κριτηρίων για τον εντοπισμό της βέλτιστης γεωμετρίας μηχανής μονίμων μαγνητών για ένα ελαφρύ ηλεκτρικό όχημα που συμμετέχει σε αγώνες εξοικονόμησης ενέργειας. Το πρώτο κριτήριο βελτιστοποίησης αντιστοιχεί στην μεγιστοποίηση την πυκνότητας ροπής σε ένα επιλεγμένο ισοδύναμο ονομαστικό σημείο λειτουργίας. Αυτό είναι τοποθετημένο στο κέντρο απαίτησης ροπής στο επίπεδο ροπής-ταχύτητας που καθορίζεται από την εκ των

προτέρων γνώση του οδηγικού κύκλου αγώνα. Οι υπολογισμοί βασίζονται σε αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και αναλυτικά μοντέλα απωλειών όπως περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο. Το δεύτερο κριτήριο αντιστοιχεί στην ελαχιστοποίηση της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας σε μία επανάληψη του αγωνιστικού οδηγικού κύκλου. Ο χάρτης απόδοσης κάθε υποψήφιας γεωμετρίας μηχανής υπολογίζεται μέσω ενός προσαρμοζόμενου Δικτυακού Συστήματος Ασαφών Συμπερασμάτων (Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System – ANFIS) [64] και η συνολική ενέργεια του κύκλου λογαριάζεται μέσω ενός δυναμικού μοντέλου του οχήματος.

Προτείνεται μία στρατηγική προσαρμογής του ANFIS και ενημέρωσης του αρχείου ώστε να εξασφαλιστεί ότι το μέγεθος του σφάλματος εκπαίδευσης και πρόβλεψης δεν διακινδυνεύει την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Κατάλληλη επιλογή του αριθμού και του τύπου των συναρτήσεων μέλους επιτυγχάνεται με τη διεξαγωγή δοκιμών σε ένα αρχικό σετ δεδομένων εισόδων-εξόδων που προέκυψαν από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Όσον αφορά τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, χρησιμοποιείται σαν βάση ένας υβριδικός εξελικτικός αλγόριθμος Pareto δύναμης (Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2 - SPEA2) [38] που συνδυάζεται με μία τεχνική παραγωγής διανυσμάτων δανεισμένη από την τεχνική διαφορικής εξέλιξης (Differential Evolution – DE). Επιπρόσθετα, προτείνεται μία εκ των υστέρων διαδικασία επιλογής για την ανίχνευση των τάσεων των βέλτιστων λύσεων στο χώρο απόφασης και τον χώρο απόφασης. Ανακαλύπτονται, επίσης, οι συμβιβασμοί μεταξύ των βέλτιστων λύσεων όσον αφορά διάφορους δείκτες απόδοσης. Τελικά, η ακρίβεια μοντελοποίησης επικυρώθηκε με μετρήσεις σε ένα πρωτότυπο.

5.2 Μεθοδολογία

5.2.1 Προφίλ βελτιστοποίησης

Ο στόχος της τεχνικής είναι να εντοπίσει τη βέλτιστη γεωμετρία μηχανής μονίμων μαγνητών και πυκνότητα ρεύματος τυμπάνου που μεγιστοποιεί την πυκνότητα ροπής (TD_{nom}) και ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας (E_C) στον αγωνιστικό κύκλο οδήγησης του ηλεκτρικού οχήματος. Το κεντροειδές (centroid) σημείο ροπής-ταχύτητας του κύκλου θεωρείται ως το ονομαστικό και ο εντοπισμός της θέσης του στο επίπεδο ροπής-ταχύτητας εξηγείται σε επόμενη παράγραφο. Η συνήθης μέθοδος που περιλαμβάνει το ενεργειακό κέντρο [57] δεν υιοθετήθηκε εδώ, εφόσον η συνολική ενέργεια σε όλο τον οδηγικό αγωνιστικό κύκλο λαμβάνεται υπόψη στο δεύτερο κριτήριο. Οι μεταβλητές βελτιστοποίησης που υιοθετούνται σε αυτή τη διατύπωση αφορούν τις γεωμετρικές διαστάσεις του διανύσματος χτης γεωμετρίας της μηχανής και της πυκνότητας ρεύματος τυμπάνου J . Το πρόβλημα μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\begin{aligned}
& \text{Minimize} && \frac{TD_{nom}^{preliminary}(\mathbf{x}, J)}{TD_{nom}(\mathbf{x}, J)}, \frac{E_c(\mathbf{x})}{E_c^{preliminary}(\mathbf{x})} \\
& && x_{i, \min} \leq x_i \leq x_{i, \max}, \quad i = 1, 2, \dots, n \\
& && J \leq J_{\max} \\
& \text{subject to} && V = V_{nom} \\
& && (1 - e_l) \cdot T_{nom} \leq T \leq (1 + e_u) \cdot T_{nom} \\
& && T_{J_{\max}} \geq T_{\max}
\end{aligned} \tag{5.1}$$

όπου $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in \mathbb{R}^n$ είναι ένα διάνυσμα n γεωμετρικών μεταβλητών που περιορίζονται από άνω όρια (\mathbf{x}_{max}) και κάτω όρια (\mathbf{x}_{min}). Η πυκνότητα ρεύματος J περιορίζεται από μία μέγιστη τιμή J_{max} για να επιτευχθεί η θερμική ευρωστία. Η επαγόμενη RMS τιμή της τάσης V συγκρατείται σταθερή και ίση με την ονομαστική τιμή V_{nom} σε ονομαστική ταχύτητα και φορτίο. Η ροπή T δεσμεύεται κοντά στην ονομαστική τιμή χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες σταθερές e_l και e_u έτσι ώστε οι προκύπτουσες γεωμετρίες να έχουν την ίδια τιμή αποδιδόμενης ισχύος και να είναι άμεσα συγκρίσιμες. Η ροπή T_{max} που δημιουργείται με ρεύμα J_{max} πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση με τη μέγιστη τιμή ροπής της προδιαγραφής του κύκλου T_{max} ενώ τα $TD_{nom}^{preliminary}$ και $E_c^{preliminary}$ αντιστοιχούν στις σχετικές τιμές της προκαταρκτικής γεωμετρίας. Η συνολική ενέργεια που απαιτείται από το όχημα για να ολοκληρώσει έναν αγωνιστικό οδηγικό κύκλο με κάθε γεωμετρία μπορεί να ολοκληρωθεί στον χρόνο ως εξής:

$$E_c(x) = \int_{t=0}^{t_c} \frac{T(t) \cdot \omega(t)}{\eta(x, T(t), \omega(t))} dt \tag{5.2}$$

όπου η ροπή $T \in [0, T_{max}]$ και η ταχύτητα περιστροφής $\omega \in [0, \omega_{max}]$ δίνονται από τον αγωνιστικό οδηγικό κύκλο για κάθε χρονική στιγμή ενώ οι μέγιστες τιμές αντιστοιχούν στις μέγιστες τιμές του αγωνιστικού οδηγικού κύκλου. Η απόδοση της μηχανής η εξαρτάται από τη γεωμετρία της μηχανής, τη γωνιακή της ταχύτητα και την αποδιδόμενη ροπή. Ο συνολικός χρόνος του οδηγικού κύκλου υποδηλώνεται ως t_c . Οι απώλειες του αντιστροφέα αμελούνται στον υπολογισμό της ενέργειας.

5.2.2 Προτεινόμενη στρατηγική βελτιστοποίησης

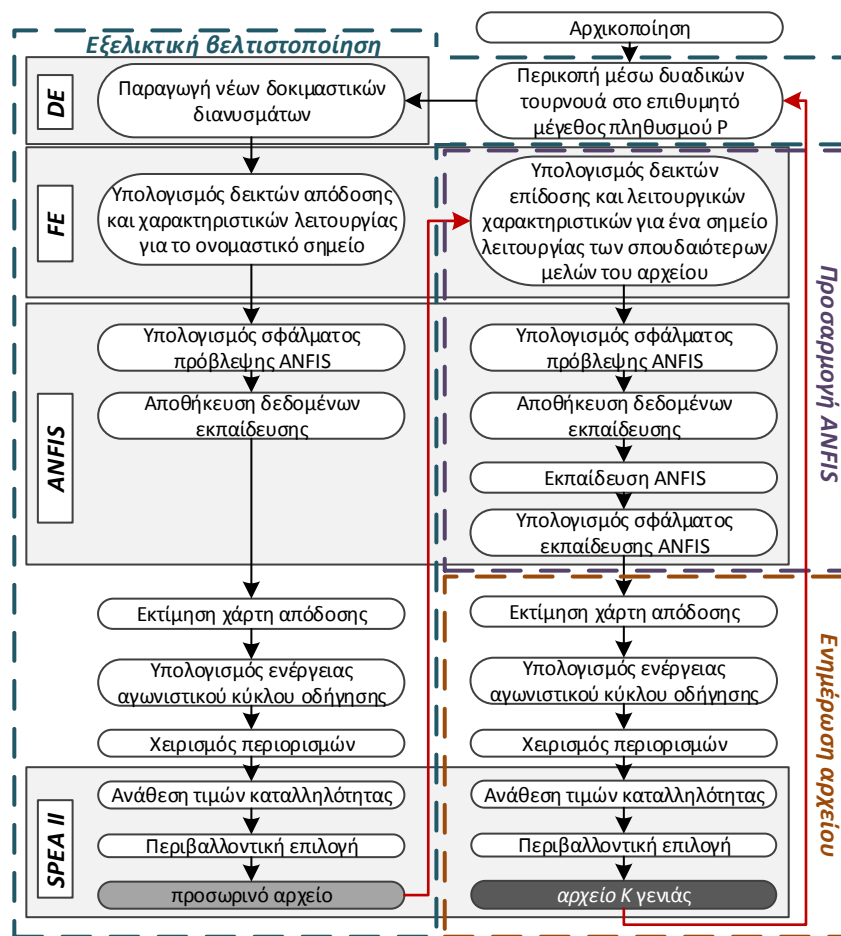
Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει μία υβριδική μετά-ευρεστική τεχνική με τις απαραίτητες τροποποιήσεις και προσθήκες που απαιτούνται για την υποκατάστατη μοντελοποίηση και προσαρμογή του ANFIS. Η προτεινόμενη στρατηγική αποτελείται από τρεις κύριες συνιστώσες: εξελικτική βελτιστοποίηση, προσαρμογή ANFIS και ενημέρωση αρχείου (σχήμα 5.1). Η πρώτη διαδικασία είναι υπεύθυνη για την εύρεση των βέλτιστων λύσεων και κατ' επέκταση για τη βελτίωση του μετώπου Pareto κάθε γενιάς. Η δεύτερη εξασφαλίζει ότι η ακρίβεια του ANFIS θα βελτιώνεται σταδιακά σε κάθε γενιά και στη τρίτη ενημερώνονται οι τιμές του κριτηρίου ενέργειας στα μέλη του αρχείου στο τέλος της κάθε γενιάς χρησιμοποιώντας το πιο πρόσφατο υποκατάστατο μοντέλο ANFIS.

Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διαδικασία της εξελικτικής βελτιστοποίησης, η βάση της τεχνικής είναι η ανάπτυξη μίας πολυκριτηριακής SPEA2 [44] με διανύσματα δεκαδικών

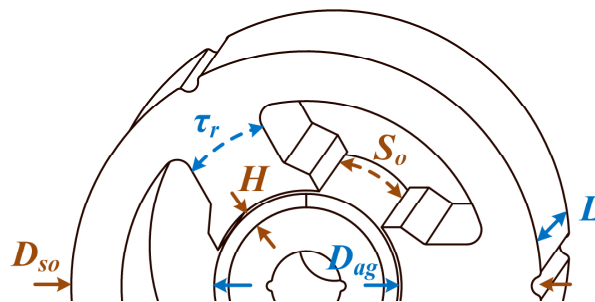
αριθμών. Κάθε γενιά του αλγορίθμου ξεκινά με την περικοπή του αρχείου στο επιθυμητό μέγεθος πληθυσμού P μέσω της επιλογής βάσει δυαδικών τουρνουά [38]. Οι μέθοδοι διασταύρωσης και μετάλλαξης αντικαθιστούνται από τη στρατηγική της διαφορικής εξέλιξης (Differential Evolution – DE) [68] [43] για να παραχθούν τα νέα δοκιμαστικά διανύσματα μεγέθους D :

$$v_{i,j}^{new} = v_{i,j} + 0.5 \cdot (v_{best,j} - v_{i,j}) + 0.5 \cdot (v_{k2,j} - v_{k3,j}) \quad (5.3)$$

όπου το μέλος $best$ είναι το καταλληλότερο μέλος του αρχείου και $i, k_2, k_3 \in \{1, 2, \dots, P\}$ τέτοια ώστε $i \neq k_2 \neq k_3$ και $j \in \{1, 2, \dots, D\}$ είναι τυχαία επιλεγμένοι δείκτες. Το δοκιμαστικό διάνυσμα αποτελείται από γεωμετρικές μεταβλητές μαζί με τη πυκνότητα ρεύματος και τη ταχύτητα περιστροφής ως εξής:



Σχήμα 5.1: Δομικό διάγραμμα διαδικασίας βελτιστοποίησης



Σχήμα 5.2: Παραμετροποίηση της γεωμετρίας μηχανής μόνιμων μαγνητών

$$\mathbf{v} = (x_1, x_2, \dots, x_n, J, \omega) \quad (5.4)$$

Η ταχύτητα περιστροφής, ωστόσο, λαμβάνει πάντα την ονομαστική τιμή ύστερα από τη παραγωγή των νέων δοκιμαστικών διανυσμάτων. Ποικίλει μόνο κατά τις φάσεις εκπαίδευσης του ANFIS και υπολογισμού του χάρτη απόδοσης, καθώς θεωρείται μία μεταβλητή που δύναται να λαμβάνει υπόψη όλο το εύρος ταχυτήτων. Το διάνυσμα μεταβλητών σχεδίασης εκφράζεται ως εξής:

$$\mathbf{x} = (S_r, A_r, D_{ag}, T_{rt}, S_o, H) = \left(\frac{D_{ag}}{D_{so}}, \frac{D_{ag}}{L}, D_{ag}, \frac{\tau_t}{\tau_s}, S_o, H \right) \quad (5.5)$$

όπου S_r είναι ο λόγος διαίρεσης, A_r ο λόγος πλευρών, T_{rt} ο λόγος δοντιών, S_o ο λόγος ανοίγματος αύλακας, H το πάχος του μαγνήτη, D_{ag} η διάμετρος διακένου, D_{so} η εξωτερική διάμετρος του στάτη, L το ενεργό μήκος και τ_t , τ_s τα βήματα δοντιού και αύλακας αντίστοιχα. Οι μεταβλητές απεικονίζονται στο σχήμα 5.2. Το εύρος του μόνιμου μαγνήτη ορίζεται σταθερό και ίσο με το βήμα του πόλου.

Μόλις παραχθεί ο νέος πληθυσμός από δοκιμαστικά διανύσματα, υπολογίζονται δείκτες επίδοσης και χαρακτηριστικά λειτουργίας για κάθε μέλος στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων. Η RMS τιμή της επαγόμενης τάσης κρατείται σταθερή σε κάθε γεωμετρία μεταβάλλοντας τον αριθμό των αγωγών της αύλακας και της διατομής τους προκειμένου να διατηρηθεί ο επιθυμητός συντελεστής πληρότητας. Τα δοκιμαστικά διανύσματα μαζί τις ανάλογες τιμές ροπής και απωλειών συνιστούν δεδομένα εισόδων-εξόδων που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση του ANFIS. Τα δεδομένα εκπαίδευσης αποθηκεύονται σε ξεχωριστό αρχείο. Το εκπαιδευμένο ANFIS της προηγούμενης γενιάς χρησιμοποιείται για να υπολογίσει τις τιμές ροπής και απωλειών για τα ίδια δοκιμαστικά διανύσματα έτσι ώστε να μπορεί να υπολογιστεί το RMS σφάλμα (Root Mean Square Error – RMSE) πρόβλεψης. Ο σχεδιαστής μπορεί, επομένως, να παρακολουθεί την ακρίβεια πρόβλεψης του ANFIS διαμέσου της εκτέλεσης του προγράμματος.

Σε επόμενο βήμα εκτιμάται ο χάρτης απόδοσης κάθε γεωμετρίας δοκιμαστικού διανύσματος. Το ANFIS χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ροπής και των απωλειών σε κάθε σημείο λειτουργίας σε ολόκληρο το εύρος πυκνοτήτων ρεύματος και ταχυτήτων περιστροφής με σταθερό βήμα. Η απόδοση υπολογίζεται σε αυτά τα σημεία και εξάγεται ο χάρτης απόδοσης με όρια J_{max} και ω_{max} . Ο τελευταίος εισάγεται στο δυναμικό μοντέλο του οχήματος [69] έτσι να μπορεί να υπολογιστεί το σύνολο της ενεργείας που απαιτείται για την εκτέλεση του αγωνιστικού κύκλου οδήγησης μέσω της (5.2).

Επιβάλλονται, ακόμη, ορισμένοι περιορισμοί προκειμένου να διασφαλιστεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Ενδεχόμενη αποτυχία των μελών του πληθυσμού να συμμορφωθούν με τους περιορισμούς επιφέρει τιμωρία, σύμφωνα με την οποία μία μεγάλη σταθερή τιμή προστίθεται στις τιμές των συναρτήσεων κόστους των λύσεων. Εφόσον η πυκνότητα ρεύματος για το ονομαστικό σημείο λειτουργίας ποικίλει, ένα διάνυσμα αφαιρείται από τον πληθυσμό αν χρειάζεται μεγαλύτερη πυκνότητα ρεύματος

από J_{max} για να επιτευχθεί ροπή T_{max} . Επιπρόσθετα, αν ο χάρτης απόδοσης περιέχει οποιαδήποτε τιμή μεγαλύτερη από τη μονάδα ή μικρότερη από το μηδέν, η γεωμετρία τιμωρείται. Τέλος, για να επιταχυνθεί η σύγκλιση, οι λύσεις δεν επιτρέπεται να αποδίδουν ροπή με μεγάλη απόκλιση από την ονομαστική χρησιμοποιώντας τις σταθερές e_l και e_u της (5.1).

Τα διανύσματα του πληθυσμού λαμβάνουν τις τιμές TD_{nom} και E_c των κριτηρίων μετά από τη φάση χειρισμού των περιορισμών. Κατά τη διάρκεια της περιβαλλοντικής επιλογής, ο πληθυσμός συγχωνεύεται με το αρχείο της προηγούμενης γενιάς και δίνεται μία τιμή καταλληλότητας σε κάθε μέλος σύμφωνα με τις τεχνικές προσδιορισμού της δύναμης και της πυκνότητας της SPEA2, προκειμένου να σχηματιστεί το προσωρινό αρχείο μεγέθους N [44]. Αν οι μη κυριαρχούμενες λύσεις είναι περισσότερες από N , οι καταλληλότερες από αυτές διατηρούνται. Εάν όχι, γεμίζει από τις καλύτερες κυριαρχούμενες λύσεις προκειμένου να διατηρηθεί ένα σταθερό μέγεθος.

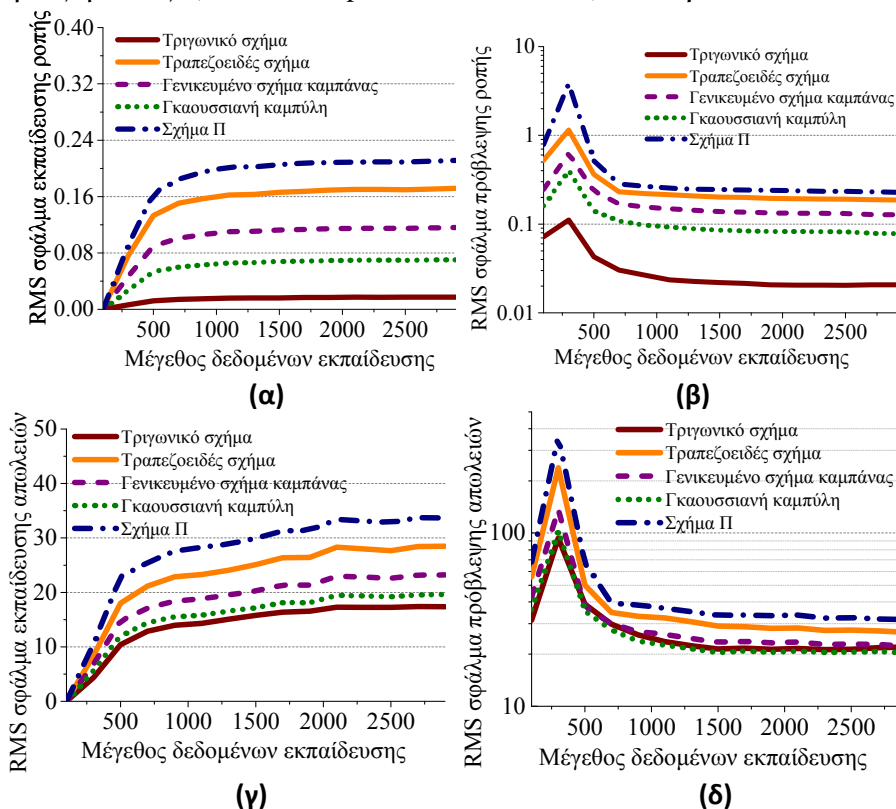
Στο στάδιο προσαρμογής του ANFIS προτείνονται επιπρόσθετες δράσεις για να βελτιωθεί η ακρίβεια του υποκατάστατου μοντέλου κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης. Ο αλγόριθμος σταδιακά κινείται προς συγκεκριμένες περιοχές του χώρου απόφασης που παρέχουν τα βέλτιστα αποτελέσματα. Θα ήταν, συνεπώς, πλεονεκτικό για το ANFIS να μπορεί να προσαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης και να βελτιώνει την ακρίβεια πρόβλεψης σε αυτές τις περιοχές. Η εκτίμηση της ροπής και των απωλειών θα ήταν πιο ακριβής κατ' αυτό τον τρόπο. Τέλος, τα καταλληλότερα μέλη του αρχείου είναι από πάσης πλευράς τα πιο σημαντικά για τον σχεδιαστή και τον αλγόριθμο. Η πλεονεκτικότερη γεωμετρία θα αντληθεί πιθανότατα από αυτά και οι πιο συχνές επισκέψεις του αλγορίθμου λαμβάνουν χώρο ανάμεσα τους λόγω της διαδικασίας των δυαδικών τουρνουά. Έτσι, προτείνεται η εκτέλεση μίας ακόμα προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία σε ένα τυχαίο σημείο λειτουργίας του χάρτη απόδοσης για κάθε ένα από τα σημαντικότερα S μέλη του αρχείου. Η RMS τιμή του σφάλματος πρόβλεψης μπορεί επίσης να υπολογιστεί όπως πρωτύτερα και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων πεπερασμένων στοιχείων να αποθηκευτούν σε ένα ξεχωριστό αρχείο, στο οποίο διατηρούνται συγκεντρωτικά τα δεδομένα εκπαίδευσης. Η RMS τιμή του σφάλματος εκπαίδευσης υπολογίζεται και εδώ. Τελικά, στο στάδιο επικαιροποίησης του αρχείου, η τιμή E_c επανυπολογίζεται με το πιο πρόσφατο μοντέλο ANFIS για όλα τα μέλη του αρχείου και οι ίδιες διαδικασίες χειρισμού των περιορισμών και ταξινόμησης των μελών μέσω της SPEA2 λαμβάνουν χώρα για να σχηματίσουν το τελικό επικαιροποιημένο και προσαρμοσμένο αρχείο της γενιάς.

Η αρχικοποίηση εκτελείται μέσω της απόκτησης ενός συνόλου κατάλληλα φραγμένων τυχαίων δοκιμαστικών διανυσμάτων \mathbf{v} . Αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων σε αυτά τα διανύσματα παρέχουν το αρχικό αρχείο δεδομένων εκπαίδευσης. Το πλήθος τους αποφασίζεται βάσει των αποτελεσμάτων της ανάλυσης του επόμενου κεφαλαίου και η πρώτη διαδικασία εκπαίδευσης του ANFIS μπορεί να λάβει χώρα σε αυτό το σημείο. Παράγεται ακόμη ένας συμπληρωματικός πληθυσμός από τυχαία διανύσματα \mathbf{v} μεγέθους P με ονομαστική ταχύτητα ω για να αποτελέσουν το πρώτο αρχείο του αλγορίθμου βελτιστοποίησης.

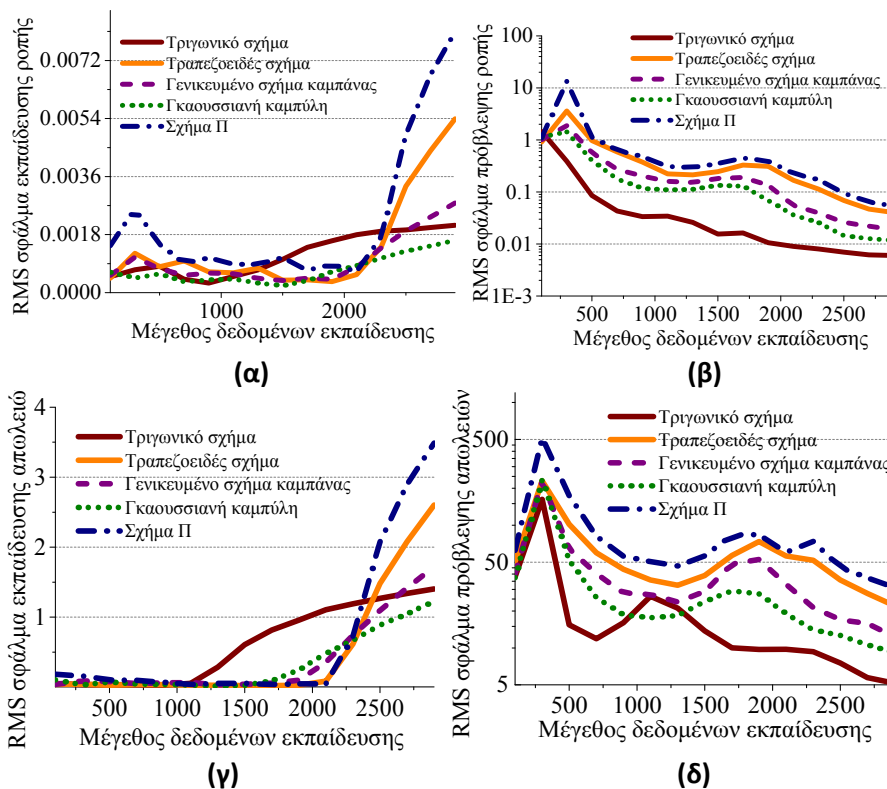
5.2.3 ANFIS για τον υπολογισμό του χάρτη απόδοσης της μηχανής μονίμων μαγνητών

Το προσαρμοζόμενο νευρο-ασαφές σύστημα συμπερασμάτων (adaptive neuro-fuzzy inference system) ή προσαρμοζόμενο δικτυακό σύστημα ασαφών συμπερασμάτων (adaptive network-based fuzzy inference system - ANFIS) είναι ένα είδος τεχνητού νευρωνικού δικτύου που βασίζεται στο Takagi-Sugeno σύστημα ασαφών συμπερασμάτων. Η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του '90 [64], [65]. Εφόσον ενσωματώνει τόσο νευρωνικά δίκτυα, όσο και κανόνες ασαφούς λογικής, έχει τη δυνατότητα να αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα και των δύο σε μία δομή. Το σύστημα συμπερασμάτων της αντιστοιχεί σε ένα σύνολο ασαφών AN-TOTE (IF-THEN) κανόνων που έχουν την ικανότητα μάθησης ώστε να προσεγγίζουν μη-γραμμικές συναρτήσεις [66]. Συνεπώς, το ANFIS θεωρείται ως ένας καθολικός εκτιμητής.

Για να αξιολογηθεί η εφαρμοσιμότητα του ANFIS στη μοντελοποίηση της ροπής και των απωλειών μίας μηχανής μονίμων μαγνητών, διεξάχθηκε μία σειρά από τεστ. Αρχικά, δημιουργήθηκε ένα μεγάλο σύνολο τυχαίων δοκιμαστικών διανυσμάτων \mathbf{v} . Ύστερα, επιλέχθηκαν σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης διαφόρων μεγεθών και με αυτά διεξάχθηκε εκπαίδευση του ANFIS. Σε κάθε περίπτωση υπολογίστηκε και η RMS τιμή του σφάλματος εκπαίδευσης. Η ακρίβεια πρόβλεψης των εκπαιδευμένων συστημάτων δοκιμάζεται με ένα τμήμα του συνόλου που δεν χρησιμοποιείται για εκπαίδευση. Δύο συναρτήσεις μέλους (Membership Functions - MF) επιλέγονται ανά είσοδο για να



Σχήμα 5.3: RMS σφάλμα (α)(γ) εκπαίδευσης και (β)(δ) πρόβλεψης ροπής και απωλειών για διάφορα πλήθη δεδομένων εκπαίδευσης και 2 συναρτήσεις μέλους τύπου σταθεράς για ένα σύνολο δοκιμών μεγέθους 500.



Σχήμα 5.4: RMS σφάλμα (α)(γ) εκπαίδευσης και (β)(δ) πρόβλεψης ροπής και απωλειών για διάφορα πλήθη δεδομένων εκπαίδευσης και 2 συναρτήσεις μέλους γραμμικού τύπου για ένα σύνολο δοκιμών μεγέθους 500.

παραμένει το υπολογιστικό κόστος σε αποδεκτά επίπεδα και εξετάζονται συναρτήσεις γραμμικού και τύπου σταθεράς με διάφορα σχήματα.

Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο σχήμα 5.3 και στο σχήμα 5.4. Είναι φανερό ότι υπάρχει γενικά μία αμυδρή αύξηση στο σφάλμα εκπαίδευσης όσο το σύνολο εκπαίδευσης γίνεται μεγαλύτερο. Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ότι το σφάλμα πρόβλεψης σταδιακά μειώνεται όσο περισσότερα δεδομένα γίνονται διαθέσιμα. Οι συναρτήσεις μέλους γραμμικού τύπου και τριγωνικού σχήματος αποδεικνύονται ως η πιο κατάλληλη επιλογή, κυρίως λόγω της μεγάλης ακρίβειας πρόβλεψης που παρέχουν. Μπορεί επίσης να σημειωθεί ότι η ροπή μοντελοποιείται εύκολα και προβλέπεται με μηδαμινό σφάλμα. Ωστόσο, η εκτίμηση των απωλειών συνιστά μία σημαντική πρόκληση για το ANFIS λόγω των αρμονικών φαινομένων που συνυπάρχουν στον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα και δινορρευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες. Επιπρόσθετα, υπογραμμίζεται η ανάγκη για προσαρμοστική εκπαίδευση όταν απαιτούνται ακριβείς υπολογισμοί απόδοσης.

5.2.4 Προσδιορισμός κεντροειδούς ροπής μηχανής μόνιμων μαγνητών

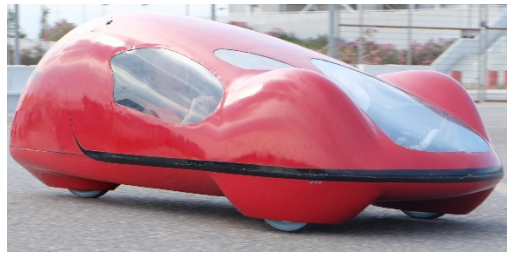
Το ελαφρύ ηλεκτρικό πρωτότυπο όχημα που εξετάζεται λαμβάνει μέρος σε αγώνες εξοικονόμησης ενέργειας και απεικονίζεται στο σχήμα 5.5. Τα χαρακτηριστικά του απαριθμούνται στον πίνακα 5.1. Η ηλεκτρική μηχανή που θα προκύψει από αυτή τη μελέτη θα συνδέεται μηχανικά με τον πίσω τροχό του οχήματος μέσω ενός πλανητικού συστήματος γραναζιών με λόγο μετάδοσης 6:1.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά ελαφρού ηλεκτρικού οχήματος

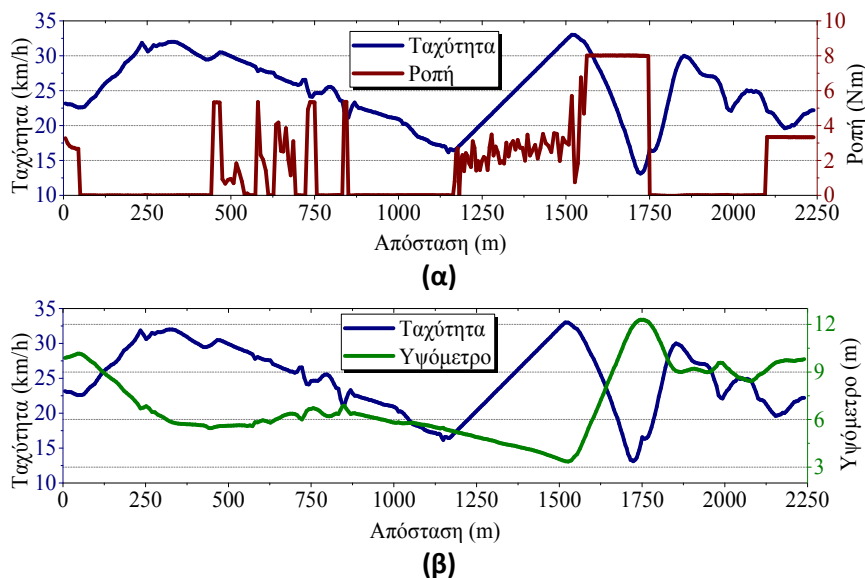
Μέγεθος	Τιμή
Μέση ταχύτητα (km/h)	25
Μάζα (kg)	90
Συντελεστής αντίσταση κύλισης	0.006
Γινόμενο συντελεστή οπισθέλκουσας και μετωπικής επιφάνειας(m ²)	0.0331
Σχέση μετάδοσης	6:1
Μέγεθος ελαστικών	45/75 R16
Ακτίνα τροχού (mm)	239

Ο βέλτιστος αγωνιστικός οδηγικός κύκλος μπορεί να εξαχθεί με χρήση ενός κατάλληλου αλγορίθμου βελτιστοποίησης [67] σύμφωνα με το υψομετρικό προφίλ της πίστας και τους περιορισμούς ταχύτητας και ενός δυναμικού μοντέλου του οχήματος που βασίζεται σε αναλυτικές σχέσεις [67] [68]. Στο σχήμα 5.6 απεικονίζονται οι καμπύλες βέλτιστης ταχύτητας και ροπής οχήματος και υψομετρικού προφίλ πίστας κατά μήκος της διαδρομής.

Από αυτά τα δεδομένα μπορούν να υπολογιστούν οι μέσες τιμές της ταχύτητας και της ροπής με βάση ένα σταθερό χρονικό βήμα προκειμένου να ληφθούν τα σημεία λειτουργίας του αγωνιστικού κύκλου. Αυτός πρέπει τώρα να αναπαρασταθεί ως προς τη ροπή όσο το δυνατόν καλύτερα από ένα ή περισσότερα σημεία. Αυτά αντιστοιχούν στα



Σχήμα 5.5: Πρωτότυπο ελαφρύ ηλεκτρικό όχημα

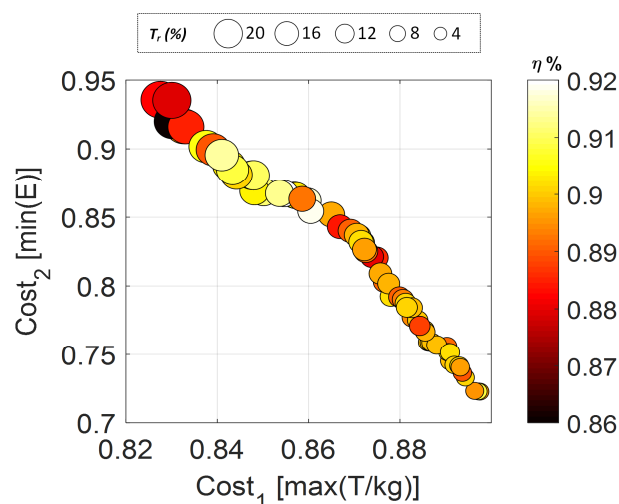


Σχήμα 5.6: (α) Ροπή και (β) υψόμετρο διαδρομής μαζί με ταχύτητα οχήματος ως προς την απόσταση για μία συγκεκριμένη διαδρομή.

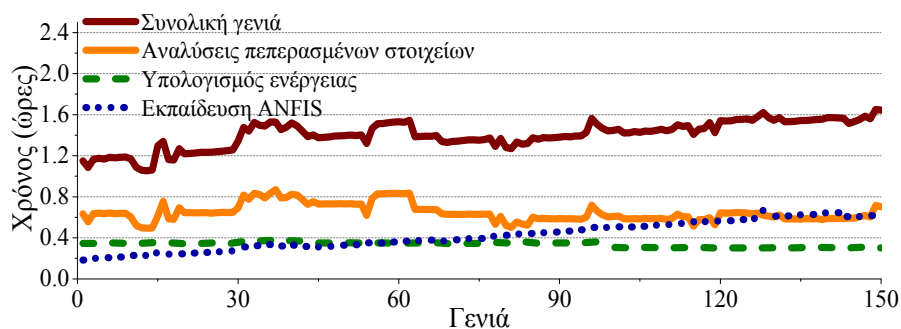
Πίνακας 5.2: Μεταβλητές γεωμετρίας και τα αντίστοιχα όρια

Διάσταση	Κάτω όριο	Πάνω όριο
Λόγος διαίρεσης	0.3	0.45
Λόγος πλευρών	0.6	0.95
Διάμετρος διακένου (mm)	32	48
Λόγος δοντιών (%)	0.35	0.5
Λόγος άνοιγμα αύλακας (%)	0.3	0.55
Πάχος μαγνήτη (mm)	2	4

κεντροειδή σημεία του υπάρχοντος συνόλου σημείων λειτουργίας. Για να επιλεχθούν με συστηματικό τρόπο στο επίπεδο $T\omega$, επιστρατεύεται μία εξελικτική μέθοδος ομαδοποίησης. Αρχικά, επιλέγεται ο επιθυμητός αριθμός m των κεντροειδών $c = (\omega, T)$, ενώ τα σημεία λειτουργίας της ηλεκτρικής μηχανής υποδηλώνονται ως $p = (\omega, T)$. Χρησιμοποιείται στη συνέχεια μία μονοκριτηριακή τεχνική Διαφορικής Εξέλιξης (DE) για να επιλυθεί το ακόλουθο πρόβλημα ομαδοποίησης:



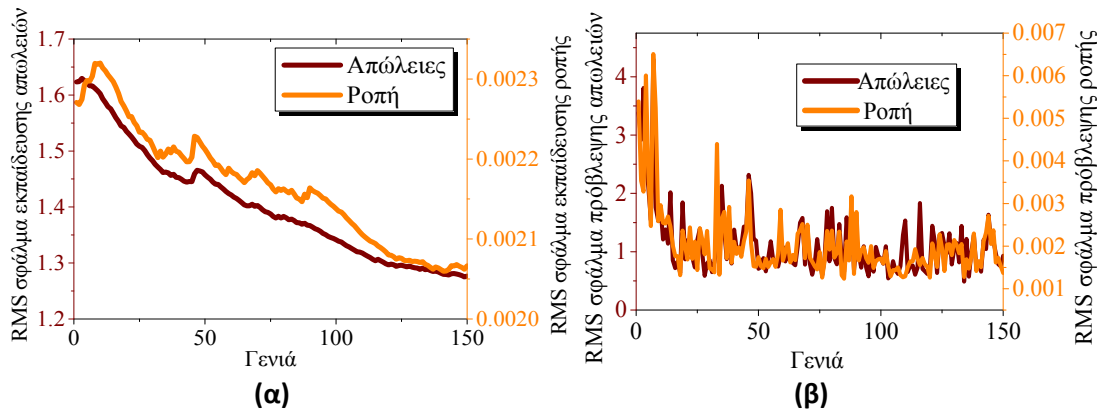
Σχήμα 5.7: Μέτωπο Pareto τελευταίας γενιάς. Απεικονίζονται οι τιμές απόδοσης και κυμάτωσης ροπής των μελών του μετώπου για το ονομαστικό σημείο λειτουργίας μέσω χρωματικής κλίμακας και μέγεθος δείκτη αντίστοιχα.



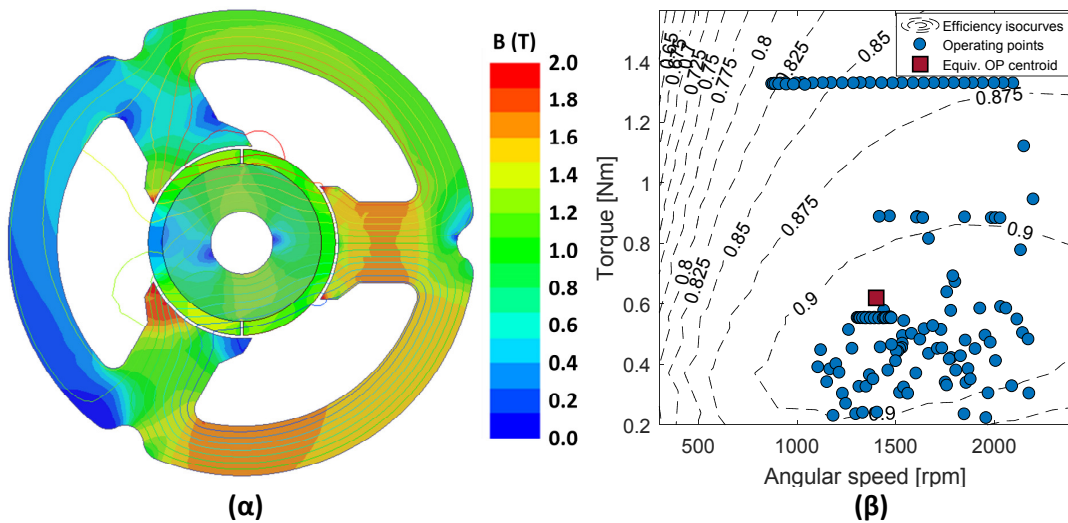
Σχήμα 5.8: Συνολικός υπολογιστικός χρόνος και επιμέρους χρονικές διάρκειες αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων, εκτίμησης ενέργειας και εκπαίδευσης ANFIS ανά γενιά για έναν επιτραπέζιο υπολογιστή i7.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} \quad \sum_{i=1}^n \min(d(\mathbf{p}_i, \mathbf{c}_i), \dots, d(\mathbf{p}_i, \mathbf{c}_m)) \\ & \text{subject to} \quad \omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max} \\ & \quad \quad \quad T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \end{aligned} \quad (5.6)$$

όπου $d(\mathbf{p}, \mathbf{c})$ είναι η Ευκλείδεια απόσταση ανάμεσα στα σημεία \mathbf{p} και \mathbf{c} και ο συνολικός αριθμός των σημείων λειτουργίας είναι n . Η λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης για ένα μοναδικό αντιπροσωπευτικό σημείο φαίνεται στο σχήμα 5.10β. Αυτό θα αποκαλείται από εδώ και στο εξής ονομαστικό και αντιστοιχεί σε μία ροπή 0.62 Nm και ταχύτητα περιστροφής 1400 rpm. Σύμφωνα με τα σημεία λειτουργίας του οδηγικού κύκλου, η μέγιστη ροπή T_{\max} που απαιτείται είναι 1.33 Nm και η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής ω_{\max} είναι 2200 ΣΑΛ.



Σχήμα 5.9: RMS σφάλμα (α) εκπαίδευσης και (β) πρόβλεψης ροπής και απωλειών για κάθε γενιά.



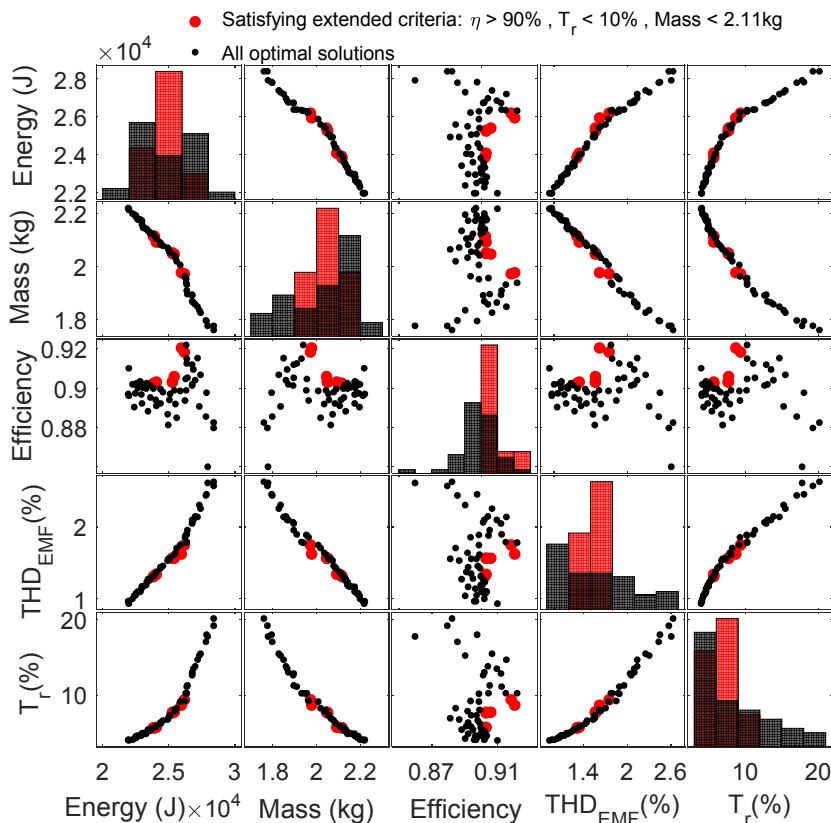
Σχήμα 5.10: (α) Κατανομή μαγνητικού πεδίου τελικής γεωμετρίας και (β) προσομοιωμένος χάρτης απόδοσης μαζί με τα σημεία λειτουργίας του αγωνιστικού οδηγικού κύκλου.

Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικά τελικής βέλτιστης γεωμετρίας μηχανής

	Μέγεθος	Τιμή
Χαρακτηριστικά γεωμετρίας	Πάχος μαγνήτη (mm)	3.25
	Πλάτος δοντιού (mm)	15.81
	Μήκος δοντιού (mm)	17.83
	Ενεργό μήκος (mm)	44.92
	Διάμετρος (mm)	32.74
	Λόγος ανοίγματος αύλακας	0.46
	Εξωτερική διάμετρος (mm)	94.47
Χαρακτηριστικά λειτουργίας	Ονομαστική ροπή (Nm)	0.64 (2.08 A/mm ²)
	Ονομαστική ισχύς (W)	94 (2.08 A/mm ²)
	Ενεργειακή κατανάλωση (kJ)	23.61
	Απόδοση (%)	90.3
	Ολική αρμονική παραμόρφωση επαγόμενης τάσης (%)	1.3
	Κυμάτωση ροπής (%)	5.6
	Συνολική μάζα (kg)	2.08

5.3 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης

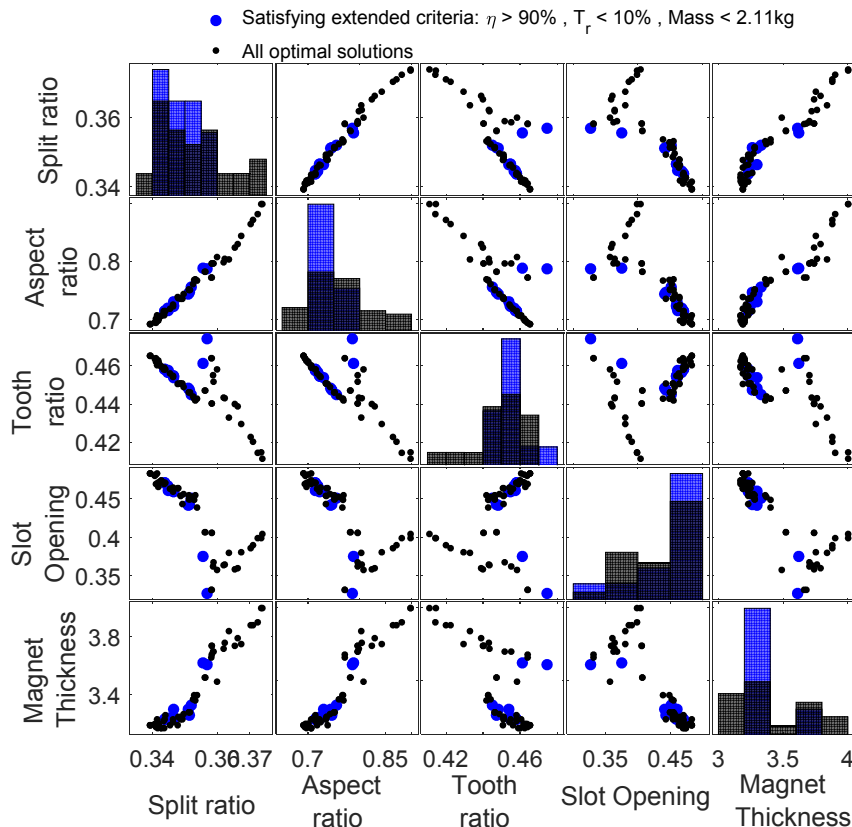
Ένα αρχικό σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης 3.000 σημείων παρέχεται στον αλγόριθμο. Το μέγεθος του πληθυσμού P τίθεται ίσο με 30, το μέγεθος του αρχείου είναι ίσο με 200 και ο αριθμός των γενιών περιορίζεται στη τιμή 150. Το διάγραμμα



Σχήμα 5.11: Διαγράμματα διασποράς των δεικτών επίδοσης για το τελικό μέτωπο Pareto. Οι λύσεις που ικανοποιούν τα επεκτεταμένα κριτήρια υπογραμμίζονται.

μεταβλητών αποτελείται από 8 στοιχεία: την πυκνότητα ρεύματος, την ταχύτητα περιστροφής και 6 γεωμετρικές διαστάσεις σύμφωνα με τις (5.4) και (5.5). Τα όρια των τελευταίων απεικονίζονται στον πίνακα 5.2. Επιτρέπεται μία πυκνότητα υπερ-ρεύματος 60% έτσι ώστε $J_{max}=6.4A/mm^2$ και η ονομαστική RMS τιμή της επαγόμενης τάσης κρατείται ίση με 8.5V στις 1400ΣΑΛ. Αυτή αντιστοιχεί στα 13.4V στις 2200ΣΑΛ, όπως υπαγορεύεται από την ελάχιστη διαθέσιμη συνεχή τάση 40V των μπαταριών του οχήματος κατά την εκφόρτιση. Διατηρείται ένα προσεγγιστικό περιθώριο 15% στη τάση προκειμένου να διασφαλιστεί η λειτουργία ΜΤΡΑ. Οι σταθερές e_l και e_u λαμβάνουν τις τιμές 0.05 και 0.15 αντίστοιχα. Επιλέγονται δύο συναρτήσεις μέλους γραμμικού τύπου και τριγωνικού σχήματος ανά είσοδο για την υποκατάστατη μοντελοποίηση του ANFIS. Ο αριθμός των μελών του αρχείου, S , που θα ελέγχεται ορίζεται ως το μισό του πληθυσμού.

Το τελικό μέτωπο Pareto (PF) που προέκυψε φαίνεται στο σχήμα 5.7. Είναι εμφανές ότι η ενέργεια του κύκλου δεν συσχετίζεται με κάποιο τρόπο με την απόδοση στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας. Στο σχήμα 5.8, ο συνολικός υπολογιστικός χρόνος κάθε γενιάς κατατμήθηκε σε τρεις συνιστώσες: αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, εκτίμηση ενέργειας και εκπαίδευση ANFIS. Είναι αξιοσημείωτο ότι τα τελευταία δύο μέρη είναι λιγότερο δαπανηρά χρονικά από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Ακόμη, η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων λογαριάζει μόνο το ονομαστικό σημείο ενώ τα άλλα δύο επιτρέπουν την εξέταση όλων των δυνατών σημείων λειτουργίας. Καθίσταται, δηλαδή, εφικτός ο υπολογισμός του χάρτη απόδοσης και της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας του οχήματος για κάθε γεωμετρία με μία μικρή αύξηση στον

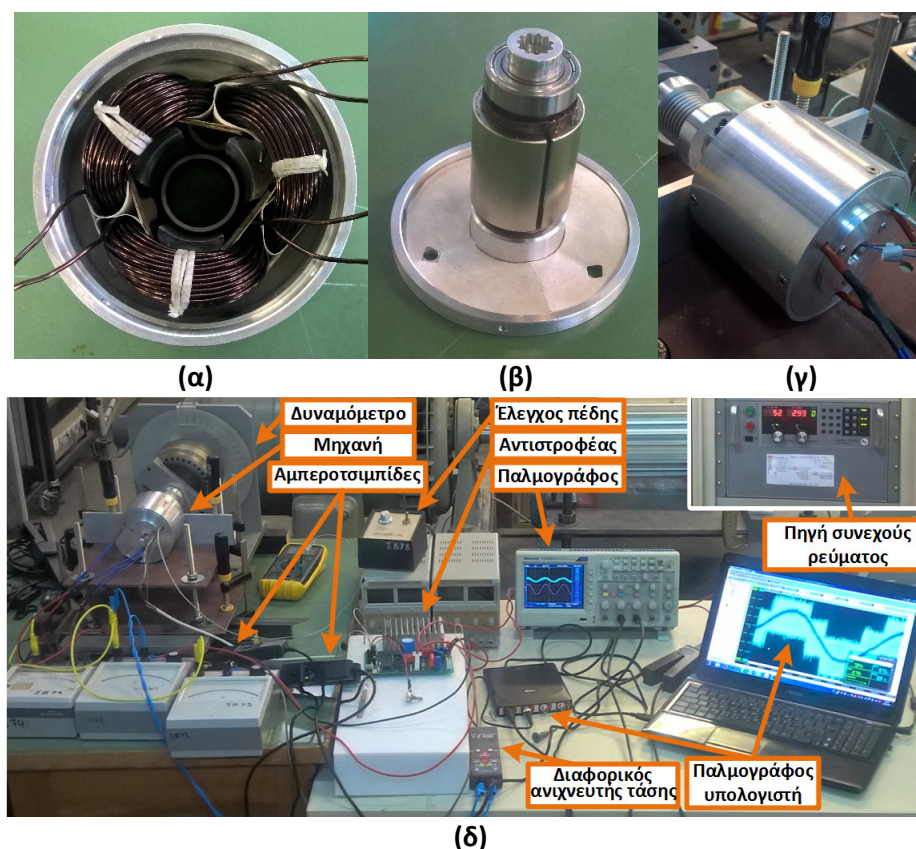


Σχήμα 5.12: Διαγράμματα διασποράς των μεταβλητών σχεδίασης για το τελικό μέτωπο Pareto. Οι λύσεις που ικανοποιούν τα επεκτεταμένα κριτήρια υπογραμμίζονται.

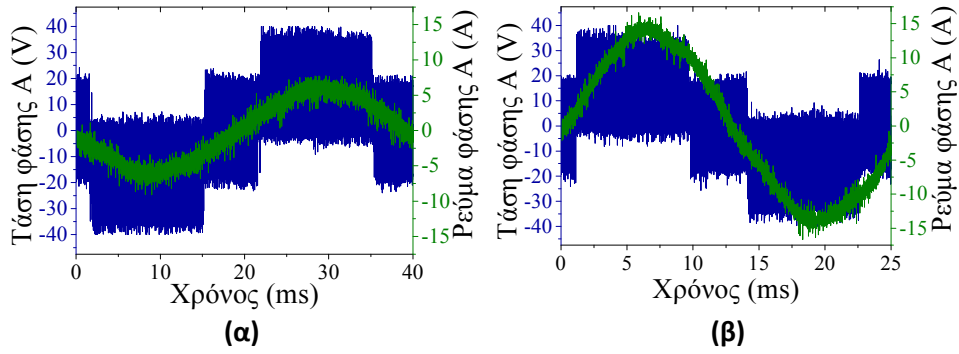
υπολογιστικό χρόνο.

Στο σχήμα 5.9 παρουσιάζεται το RMS σφάλμα εκπαίδευσης και πρόβλεψης της ροπής και των απωλειών σε κάθε γενιά αλγορίθμου. Το σφάλμα της ροπής είναι και στις δύο περιπτώσεις αμελητέο. Το σφάλμα πρόβλεψης των απωλειών είναι σημαντικό στις πρώτες 10 γενιές αλλά περίπου 1W στις υπόλοιπες 140. Αυτή η τιμή κρίνεται αποδεκτή καθώς η μαθηματική διατύπωση του RMS σφάλματος τείνει να διογκώσει το μέγεθος του μέσου σφάλματος αν υπάρχουν σημαντικές μεμονωμένες αποκλίσεις. Είναι όμως πιο σημαντικό ότι η προτεινόμενη στρατηγική προσαρμογής του ANFIS έχει θετικό αντίκτυπο στην ακρίβεια πρόβλεψης, μιας και οι αποκλίσεις μειώνονται με κάθε γενιά.

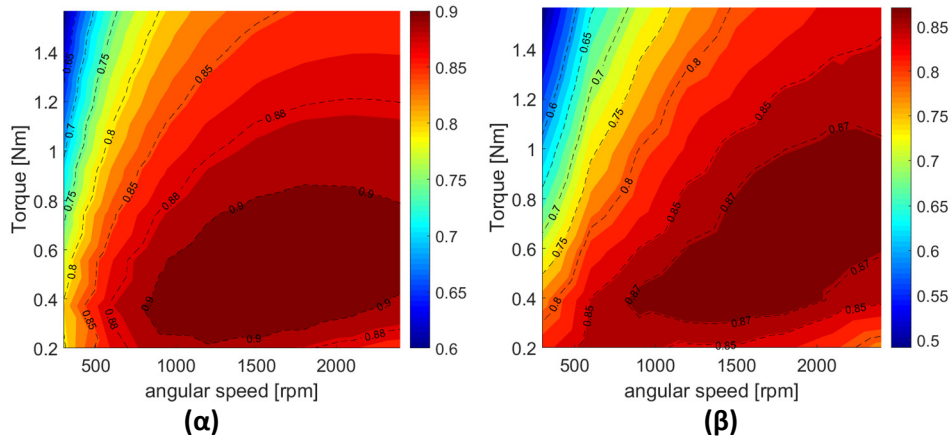
Το σχήμα 5.12 απεικονίζει τους συσχετισμούς ανάμεσα στα χαρακτηριστικά της μηχανής των τελικών μελών του μετώπου Pareto με κατάλληλα διαγράμματα διασποράς. Μία καθαρή τάση αναλογικής φύσης είναι εμφανής ανάμεσα στην ολική αρμονική παραμόρφωση της επαγόμενης τάσης και της ενέργειας, όπως επίσης και της κυμάτωσης ροπής με την ενέργεια. Η αντίστροφη τάση είναι παρούσα ανάμεσα στην μάζα και την κατανάλωση ενέργειας. Μπορεί επίσης να υπογραμμιστεί ότι δεν υπάρχει συσχετισμός ανάμεσα στην απόδοση (που υπολογίζεται στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας) και την ενέργεια. Αυτό είναι ένα σημαντικό συμπέρασμα αυτής της μελέτης, εφόσον καταδεικνύεται ότι οποιαδήποτε μονοκριτηριακή θεώρηση βελτιστοποίησης είναι εγγενώς αδύναμη στην αντιπροσώπευση του συνολικού χάρτη απόδοσης. Παρόμοιοι συσχετισμοί μπορούν να ευρεθούν και στο χώρο απόφασης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.12β. Για παράδειγμα, εμφανείς τάσεις παρουσιάζονται



Σχήμα 5.13: (α) Στάτης, (β) δρομέας και (γ) συναρμολόγηση κατασκευασμένης μηχανής. (δ) Πειραματική διάταξη.



Σχήμα 5.14: Μετρήσεις φασικής τάσης και φασικού ρεύματος για δύο σημεία λειτουργίας: (α) 1500ΣΑΛ/0.6Nm και (β) 2400ΣΑΛ/1.6Nm



Σχήμα 5.15: (α) Προσομοιωμένος και (β) μετρημένος χάρτης απόδοσης

ανάμεσα στο πάχος των μαγνητών και των λόγων διαίρεσης και πλευρών, με τους τελευταίους δύο να σχετίζονται αναλογικά. Προκειμένου να εντοπιστεί η τελική βέλτιστη γεωμετρία ανάμεσα στα μέλη του μετώπου Pareto γίνεται κατάλληλο φιλτράρισμα των αποτελεσμάτων από τον σχεδιαστή. Επεκτεταμένα κριτήρια όπως η απόδοση στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας, η κυμάτωση ροπής και η μάζα χρησιμοποιούνται για να υπογραμμιστούν οι αντίστοιχες κατάλληλες εναλλακτικές επιλογές (σχήμα 5.12β).

Η τελική γεωμετρία και η κατανομή του μαγνητικού πεδίου φαίνεται στο σχήμα 5.10α και τα χαρακτηριστικά της πινακοποιούνται στον πίνακα 5.3. Ο αντίστοιχος προσομοιωμένος χάρτης απόδοσης φαίνεται στο σχήμα 5.10β, μαζί με τα σημεία λειτουργίας του οδηγικού κύκλου (μέσες τιμές ανά δευτερόλεπτο) και τη τοποθεσία του κεντροειδούς της ροπής. Η μεγάλη πλειοψηφία των σημείων βρίσκεται στη περιοχή υψηλής απόδοσης του χάρτη. Είναι εμφανές ότι ο αλγόριθμος τοποθέτησε τη περιοχή υψηλής απόδοσης κατάλληλα προκειμένου να επιτύχει τα ζητούμενα οφέλη στην ενέργεια.

5.4 Πειραματική επιβεβαίωση

Για την επιλεγμένη βέλτιστη γεωμετρία κατασκευάστηκε μία πρωτότυπη μηχανή προκειμένου να επικυρωθεί πειραματικά η ακρίβεια της μοντελοποίησης και της

μεθοδολογίας σχεδιασμού. Ο στάτης της μηχανής, ο δρομέας και η τελική συναρμολόγηση, όπως και η διαμόρφωση της πειραματικής διάταξης φαίνονται στο σχήμα 5.13. Η πειραματική διάταξη δοκιμής περιλαμβάνει μία πρωτότυπη μηχανή και ένα δυναμόμετρο, το οποίο είναι μία ρυθμιζόμενη πέδη δινορρευμάτων. Η πρωτότυπη μηχανή οδηγείται από έναν αντιστροφέα IRAM136-3023B με MOSFET (150V, 30A). Ο έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου υλοποιείται με χρήση ενός μικροεπεξεργαστή Microchip dsPIC30F4011, προκειμένου να τροφοδοτηθεί η μηχανή με κατάλληλη διαμόρφωση παλμών διανυσμάτων χώρου (Space Vector Pulse Width Modulation - SVPWM). Η διακοπτική συχνότητα τίθεται ίση με 10 kHz.

Διεξάχθηκαν δοκιμές φόρτισης για ολόκληρο το εύρος ταχυτήτων και ροπών προκειμένου να εξαχθεί ο πειραματικός χάρτης απόδοσης της μηχανής και να επικυρωθούν τα προσομοιωμένα αποτελέσματα. Οι μετρούμενες τάσεις και ρεύματα για δύο διαφορετικά σημεία λειτουργίας απεικονίζονται στο σχήμα 5.14. Το πρώτο σημείο λειτουργίας βρίσκεται πολύ κοντά στο ονομαστικό ενώ το δεύτερο αντιστοιχίζεται στη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής και απόδοσης ροπής. Είναι εμφανές ότι η πρωτότυπη μηχανή οδηγείται αποτελεσματικά από το χρησιμοποιούμενο σύστημα οδήγησης, περιλαμβάνοντας ρεύματα με χαμηλό αρμονικό περιεχόμενο. Η σύγκριση μεταξύ του προσομοιωμένου και του πειραματικού χάρτη απόδοσης απεικονίζεται στο σχήμα 5.14. Το σχήμα 5.14α δείχνει τον προσομοιωμένο και το σχήμα 5.14β τον μετρημένο χάρτη απόδοσης του πρωτότυπου. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι τα αποτελέσματα βρίσκονται σε αρκετά καλή συμφωνία, καθώς περιέχουν μερικές τοπικές αποκλίσεις που δεν υπερβαίνουν το 10% στις απώλειες. Αυτές οι αποκλίσεις μπορούν να αποδοθούν εν μέρει σε αστοχίες μέτρησης ροπής και ταχύτητας.

5.5 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο προτάθηκε μία πολυκριτηριακή και διεπιστημονική στρατηγική βελτιστοποίησης γεωμετρίας ηλεκτρικής μηχανής μονίμων μαγνητών για ένα ελαφρύ ηλεκτρικό όχημα λογαριάζοντας ολόκληρο τον οδηγικό κύκλο. Ο πλήρης χάρτης απόδοσης εκτιμάται για κάθε δοκιμαστική γεωμετρία κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης με τη βοήθεια ενός αλγορίθμου εκμάθησης μηχανής (ANFIS) και υπολογίζεται η συνολική κατανάλωση ενέργειας με χρήση ενός δυναμικού μοντέλου του οχήματος. Χρησιμοποιούνται επίσης αρχικά δεδομένα εκπαίδευσης και ένα προσαρμοστικό σχήμα εκπαίδευσης για να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα πρόβλεψης του ANFIS. Υπογραμμίστηκε ότι η εισαγωγή του κύκλου οδήγησης στην θεώρηση της βελτιστοποίησης επιτρέπει τον εντοπισμό των τάσεων αποδοτικότητας μέσα στη περιοχή ροπών-ταχυτήτων σε σύγκριση με την ανάλυση μοναδικού σημείου λειτουργίας. Το απαράδεκτο υπολογιστικό κόστος που χαρακτηρίζει τον υπολογισμό των χαρτών απόδοσης με αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων ξεπεράστηκε με χρήση του υποκατάστατου μοντέλου καθώς αυτό απομείωσε το χρόνο κατά δύο τάξεις μεγέθους, διατηρώντας, ωστόσο, την αξιοπιστία της πρόβλεψης. Η διαδικασία επιλογής επιτελέστηκε με χρήση επιπρόσθετων φίλτρων που παρέχουν στον σχεδιαστή εναλλακτικές επιλογές στο μέτωπο Pareto. Η επιλεγμένη βέλτιστη μηχανή μονίμων μαγνητών κατασκευάστηκε και δοκιμάστηκε σε όλη τη γκάμα ροπών και ταχυτήτων και τα προσομοιωμένα χαρακτηριστικά λειτουργίας επικυρώθηκαν πειραματικά.

Κεφάλαιο 6. Εύρωση πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση γεωμετρίας μηχανής υψηλής ταχύτητας για πρότυπο διθέσιο ηλεκτρικό όχημα πόλης

6.1 Εισαγωγή

Η εύρωση πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση της γεωμετρίας ηλεκτρικών μηχανών είναι μία διαδικασία που περιλαμβάνει αυξημένο υπολογιστικό κόστος και αρχίζει να αποκτά ενδιαφέρον λόγω της σημαντικής προόδου που συντελείται στην επεξεργαστική ταχύτητα των υπολογιστών. Η προσομοίωση αρμονικών φαινομένων στις μηχανές με χρήση της τεχνικής πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μία χρονοβόρα διαδικασία με μεγάλο υπολογιστικό κόστος καθώς περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό αναλύσεων. Η κάθε ανάλυση απαιτεί την επίλυση ενός πολύπλοκου προβλήματος, το οποίο καθίσταται ακόμα πιο δυσεπίλυτο όταν γίνεται χρήση συγκεντρωμένων τυλιγμάτων κλασματικού βήματος, τα οποία δεν επιτρέπουν τη διαίρεση της γεωμετρίας σε συμμετρικά μέρη προκειμένου να επιταχυνθεί η διαδικασία. Συνεπώς, αν αναλογιστεί κανείς ότι μία ρουτίνα βελτιστοποίησης απαιτεί χιλιάδες προσομοιώσεις [45] που με τη σειρά τους χρειάζονται δεκάδες αναλύσεις και ταυτόχρονα ότι μία θεώρηση της ευρωστίας για κάθε λύση της βελτιστοποίησης θα προϋπέθετε δεκάδες ή χιλιάδες προσομοιώσεις, η επίλυση του προβλήματος φαντάζει αδύνατη. Έτσι, η βελτίωση της ικανότητας των υπολογιστών συνδυάζεται παράλληλα με προσπάθεια εύρεσης στρατηγικών που θα μειώνουν το υπολογιστικό κόστος της διαδικασίας χωρίς να διακυβεύεται η ποιότητα του αποτελέσματος.

Στη σχετική βιβλιογραφία μπορούμε να δούμε ότι ο εύρωστος ηλεκτρομαγνητικός σχεδιασμός προτάθηκε για πρώτη φορά σαν πολυκριτηριακή στρατηγική στην [69]. Σε αυτή την εργασία αξιολογούνται κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης δύο κριτήρια: ένα της επίδοσης και ένα με τη διαφορά της ονομαστικής τιμής της επίδοσης από την τιμή της επίδοσης στη χειρότερη περίπτωση (worst case) λόγω κατασκευαστικών αβεβαιοτήτων. Ο δείκτης κλίσης (gradient index) χρησιμοποιήθηκε στην [70] σε μία πολυκριτηριακή διατύπωση του προβλήματος σαν ένα εναλλακτικό κριτήριο ευρωστίας. Στην [24] προτάθηκε μία τεχνική που λαμβάνει υπόψη την ευρωστία του σχεδιασμού τόσο για την επίδοση όσο και για τους περιορισμούς του προβλήματος.

Παράλληλα γίνεται στην ίδια εργασία μία σύγκριση μεταξύ πρόσφατων και παλιότερων τεχνικών εύρωστου σχεδιασμού όσον αφορά τις επιδόσεις τους και το υπολογιστικό κόστος. Στην [71] προτείνεται σαν εναλλακτικό κριτήριο ευρωστίας η r -Κυριαρχία (r -Dominance) που έχει τη δυνατότητα να συμπεριλάβει ταυτόχρονα περισσότερα από ένα κριτήρια επίδοσης και που είχε προταθεί αρχικά στην [74] για τη σύγκριση μη κυριαρχούμενων συνόλων.

Στο σχεδιασμό ηλεκτρικών μηχανών χρειάζεται ιδανικά ένας δείκτης ευρωστίας που να είναι σε θέση να αξιολογήσει την ευρωστία πολλών κριτηρίων ταυτόχρονα καθώς τα προβλήματα σε αυτή τη περιοχή δεν είναι μονοκριτηριακά. Ένα ακόμα χρήσιμο πλεονέκτημα θα ήταν η ικανότητα αυτού του δείκτη να καθοδηγεί αντικειμενικά τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Οι προτεινόμενες διατυπώσεις στις [69] [70] [24] δεν μπορούν να επεκταθούν στη θεώρηση πολλαπλών κριτηρίων επίδοσης χωρίς την χρήση υποκειμενικών τεχνικών όπως η ανάθεση βαρών. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται μερικώς στην [71] μέσω της θεώρησης των χαρακτηριστικών του χείριστου μετώπου Pareto (Worst Pareto Front – WPF) κάθε λύσης για την ποσοτικοποίηση της αντίστοιχης ευρωστίας. Ωστόσο, το κριτήριο της r -Κυριαρχίας προϋποθέτει ότι τα Χειρότερα Μέτωπα Pareto των λύσεων αλληλοκαλύπτονται. Με άλλα λόγια, δεν μπορεί να γίνει σύγκριση της ευρωστίας λύσεων που βρίσκονται σε διαφορετικές περιοχές του μετώπου Pareto και κατ' επέκταση δεν μπορεί αυτός ο δείκτης να ενσωματωθεί αποτελεσματικά σε μία διατύπωση πολυκριτηριακού προβλήματος, όπως συμβαίνει στις [69] [70] [24].

Δεδομένου ότι η ανάλυση γεωμετριών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει αυξημένη υπολογιστική δυσκολία, οι συγγραφείς του [71] προτείνουν τον υπολογισμό των χειρότερων μετώπων Pareto με αξιοποίηση πολυωνύμων δευτέρου βαθμού που δρουν σαν υποκατάστατες συναρτήσεις των προσομοιώσεων με πεπερασμένα στοιχεία. Ωστόσο, αυτή η τεχνική χαρακτηρίζεται από δύο ουσιαστικά μειονεκτήματα. Πρώτον, χρειάζεται ένας δεδομένος αριθμός δειγμάτων εκπαίδευσης προτού να δύναται να επιτευχθεί η παρεμβολή. Ο αριθμός, όμως, των δειγμάτων αυξάνεται εκθετικά με τον αριθμό των μεταβλητών του προβλήματος [71]. Έτσι, η τεχνική δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί παράλληλα με ρουτίνα βελτιστοποίησης, ιδιαίτερα σε πολυμεταβλητά προβλήματα. Δεύτερον, κρίνεται αμφίβολη η ικανότητα ενός πολυωνύμου δευτέρου βαθμού να υποκαταστήσει τις προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων με μικρό σφάλμα. Για την παράκαμψη των δυσχερειών απαιτείται μία τεχνική που να είναι ικανή να μοντελοποιήσει πολύπλοκες συναρτήσεις με πολλές μεταβλητές και ικανοποιητική ακρίβεια με λίγα δείγματα εκπαίδευσης.

Σε αυτό το κεφάλαιο προτείνεται, συνεπώς, ένα νέο κριτήριο κυριαρχίας που θα είναι σε θέση να θεωρεί την ευρωστία των λύσεων κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης, ανεξάρτητα από τον αριθμό των κριτηρίων. Για να επιταχυνθεί η διαδικασία επίλυσης στις περιπτώσεις όπου η αξιολόγηση της συνάρτησης κόστους είναι χρονοβόρα (όπως στην προκειμένη περίπτωση) υιοθετείται ένα Προσαρμοζόμενο Δικτυακό Σύστημα Ασαφών Συμπερασμάτων (Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System – ANFIS). Η προκύπτουσα μεθοδολογία έχει επικυρωθεί μέσω της εφαρμογής της σε δοκιμαστικές συναρτήσεις και στον βέλτιστο εύρωστο σχεδιασμό μίας μηχανής μονίμων μαγνητών υψηλής ταχύτητας με επιφανειακούς μαγνήτες.

6.2 Μεθοδολογία

6.2.1 Διαδικασία εύρωστης βελτιστοποίησης

Ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα ελαχιστοποίησης μπορεί γενικά να εκφραστεί ως εξής [71]:

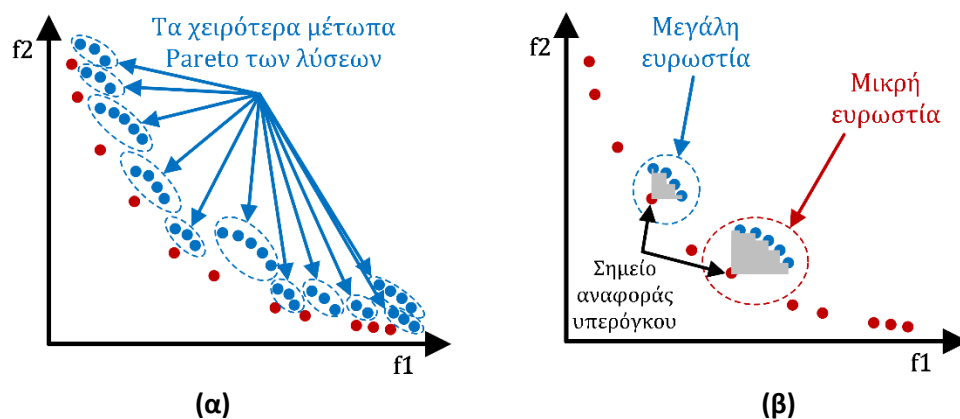
$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } f_m(x), & m = 1, 2, \dots, M \\
 & \text{subject to } g_a(x) \geq 0, & a = 1, 2, \dots, A \\
 & h_b(x) = 0, & b = 1, 2, \dots, B \\
 & x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)}, & i = 1, 2, \dots, n
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

όπου $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in \mathbb{R}^n$ είναι ένα διάνυσμα με n μεταβλητές βελτιστοποίησης που έχουν σαν όρια το τελευταίο σύνολο περιορισμών. Το γράμμα L εκφράζει τα κάτω όρια των μεταβλητών και το U τα άνω όρια. Επιπρόσθετα, τα $g_a(x)$ και $h_b(x)$ είναι περιορισμοί ανισότητας και ισότητας, αντίστοιχα. Το μέτωπο Pareto μεγέθους d , που προκύπτει από κάθε επανάληψη j του αλγόριθμου βελτιστοποίησης καθώς επιλύεται το πολυκριτηριακό πρόβλημα της (6.1), είναι:

$$PF_j = \{ (f_{1jk}, f_{2jk}, \dots, f_{mjk}) \mid k \in \mathbb{N}, 1 \leq k \leq d \} \tag{6.2}$$

Για κάθε στοιχείο του PF_j , το χειρότερο μέτωπο Pareto (WPF) [73] λόγω αβεβαιότητας μεταβλητών μπορεί να υπολογιστεί στο χώρο αποτίμησης (σχήμα 6.1α) διατυπώνοντας ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα μεγιστοποίησης που περιλαμβάνει τις αντίστοιχες τιμές ανοχών Δ_i των μεταβλητών:

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximize } f_m(\xi), & m = 1, 2, \dots, M \\
 & \text{subject to } g_a(\xi) \geq 0, & a = 1, 2, \dots, A \\
 & h_b(\xi) = 0, & b = 1, 2, \dots, B \\
 & x_i(1 - \Delta_i) \leq \xi_i \leq x_i(1 + \Delta_i), & i = 1, 2, \dots, n
 \end{aligned} \tag{6.3}$$



Σχήμα 6.1: (α) Χειρότερα μέτωπα Pareto των λύσεων λόγω αβεβαιότητας στις μεταβλητές. (β) Προτεινόμενο κριτήριο ευρωστίας

όπου $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)^T \in \mathbb{R}_n$ και Δ_i είναι το μέγεθος αβεβαιότητας κάθε μίας από τις μεταβλητές σχεδιασμού εκφρασμένο ως ποσοστό. Τα μέτωπα Pareto των χειρότερων λύσεων (WPF) [71] μεγέθους p (σχήμα 6.1) λόγω της αβεβαιότητας των μεταβλητών θα είναι:

$$WPF_{jk} = \left\{ (f_{1jk}, f_{2jk}, \dots, f_{mjk}) \mid p \in \mathbb{N}, 1 \leq p \leq d \right\} \quad (6.4)$$

Το προτεινόμενο κριτήριο ευρωστίας υπολογίζεται μέσω της συνάρτησης του υπερόγκου [72]:

$$\left\{ \begin{array}{l} HYP(WPF_k) := \text{VOL} \left(\bigcup_{S_1} S_2 \right) \\ S_1 = ((f_{1k1}, f_{2k1}, \dots, f_{mk1}), (f_{1k2}, f_{2k2}, \dots, f_{mk2}), \dots \\ \quad \dots, (f_{1kp}, f_{2kp}, \dots, f_{mkp})) \\ S_2 = [(f_{1k}, f_{2k}, \dots, f_{mk}), (f_{1k1}, f_{2k1}, \dots, f_{mk1})] \times \dots \\ \quad \dots \times [(f_{1k}, f_{2k}, \dots, f_{mk}), (f_{1kp}, f_{2kp}, \dots, f_{mkp})] \end{array} \right. \quad (6.5)$$

και VOL είναι το μέτρο Lebesgue [73]. Το χειρότερο μέτωπο Pareto μίας εύρωστης λύσης παρουσιάζει μικρή έκταση και βρίσκεται κοντά σε αυτή και το αντίστροφο (σχήμα 6.1β). Και τα δύο αυτά χαρακτηριστικά ενός μετώπου αποτυπώνονται επιτυχώς από τον υπερόγκο. Μπορεί να σημειωθεί επίσης ότι ένας τέτοιος δείκτης δεν επιβάλλει κάποιο όριο στον αριθμό των αντικειμενικών συναρτήσεων του προβλήματος, καθώς μπορεί να υπολογιστεί στον m -διάστατο χώρο. Η αξιολόγηση της ευρωστίας μπορεί, τελικά, να εφαρμοστεί σε όλα τα κριτήρια ή μόνο σε αυτά που θεωρούνται πιο σημαντικά. Ο υπολογισμός του μέτρου Lebesgue σε κάθε λύση επιτυγχάνεται με τη θεώρηση της ίδιας της λύσης σαν σημείο αναφοράς (σχήμα 6.1β). Το πολυκριτηριακό πρόβλημα εύρωστης βελτιστοποίησης μπορεί να οριστεί ως:

$$\min [f_1(x) \ f_2(x) \ \dots \ f_m(x) \ HYP(f_1, f_2, \dots, f_m)] \quad (6.6)$$

6.2.2 Υπολογισμός WPF με ANFIS

Η επίλυση της προτεινόμενης διαδικασίας εύρωστης βελτιστοποίησης μπορεί να οδηγήσει σε τεράστιο υπολογιστικό φόρτο σε περιπτώσεις που η συνάρτηση κόστους ενσωματώνει αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, όπως συμβαίνει και με τις προσομοιώσεις ηλεκτρικών μηχανών. Το πρόβλημα μπορεί να ξεπεραστεί χρησιμοποιώντας μία υποκατάστατη συνάρτηση που θα αναπληρώσει την αρχική στη διαδικασία υπολογισμού των χειρότερων μετώπων Pareto.

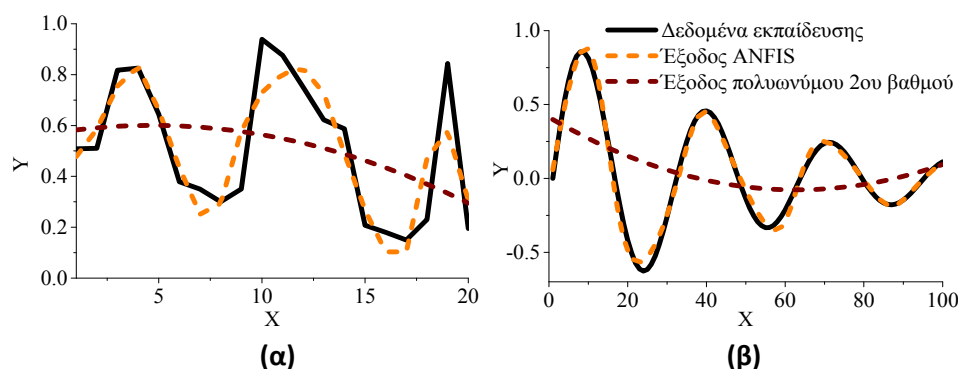
Πίνακας 6.1: Δοκιμαστικές συναρτήσεις και τα αντίστοιχα όρια των μεταβλητών

Δοκιμαστική συνάρτηση 1 (T1)	Δοκιμαστική συνάρτηση 2 (T2)	Δοκιμαστική συνάρτηση 3 (T3)
$f_1(x, y) = 4x^2 + 4y^2$ $f_2(x, y) = (x-5)^2 + (y-5)^2$	$f_1(x, y) = 2 + (x-2)^2 + (y-1)^2$ $f_2(x, y) = 9x - (y-1)^2$	$f_1(x, y) = x^2 - y$ $f_2(x, y) = -0.5x - y - 1$
$0 \leq x \leq 5$ $0 \leq y \leq 3$	$-20 \leq x, y \leq 20$	$-7 \leq x, y \leq 4$

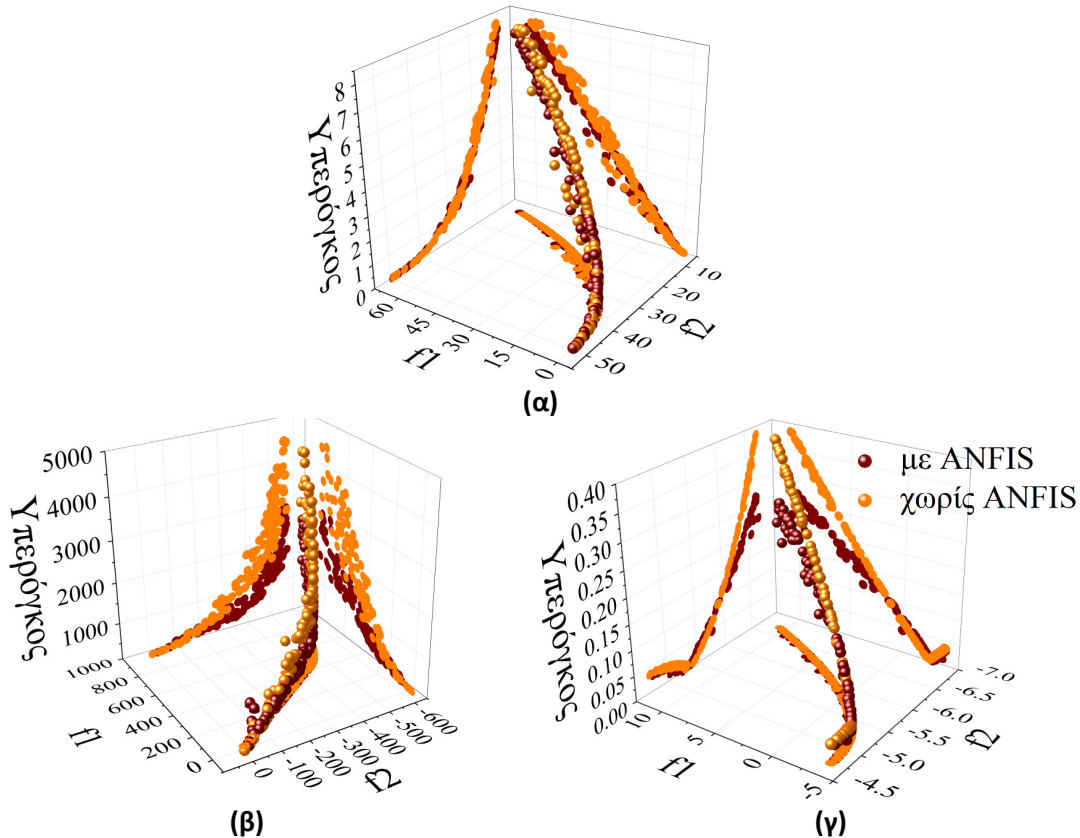
Ένας γρήγορος τρόπος δημιουργίας ενός τέτοιου ακριβούς υποκατάστατου μοντέλου είναι να εκπαιδεύεται ένα σύστημα ασαφών συμπερασμάτων τύπου Sugeno με χρήση του ANFIS[67] από τις αποτιμήσεις των συναρτήσεων κόστους που λαμβάνουν χώρα ούτως ή άλλως για το σκέλος της βελτιστοποίησης. Μπορεί να σημειωθεί ότι αυτά τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης θα αφήνονταν σε άλλη περίπτωση ανεκμετάλλευτα. Σε αυτές τις περιπτώσεις ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού [73] προσφέρει παρεμβολή κακής ποιότητας σε σχέση με το ANFIS, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.2.

6.2.3 Επικύρωση μεθοδολογίας με δοκιμαστικές συναρτήσεις

Προκειμένου να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου, επιστρατεύθηκαν τρία κοινά δοκιμαστικά προβλήματα συγκριτικής αξιολόγησης (πίνακας 6.1). Για κάθε δοκιμαστική συνάρτηση, το πρόβλημα εύρωστης βελτιστοποίησης επιλύθηκε τόσο υπολογίζοντας τα αντίστοιχα χείριστα μέτωπα Pareto μέσω του ANFIS όσο και μέσω των ίδιων των συναρτήσεων. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται είναι ένας υβριδικός αλγόριθμος SPEA-DE όπως έχει οριστεί στο [36]. Το ANFIS δημιουργείται αρχικά με τη μέθοδο της διαμέρισης πλέγματος (grid partitioning), περιλαμβάνει δύο συναρτήσεις μέλους (membership functions) τριγωνικού σχήματος (triangular-shaped) για κάθε είσοδο, 10 εποχές εκπαίδευσης (training epochs) και ο στόχος εκπαίδευσης τίθεται σε μηδενικό σφάλμα. Το αρχικό βήμα είναι 0,01 και οι ρυθμοί αύξησης ή μείωσης του βήματος είναι 1,1 και 0,9 αντίστοιχα. Η μέθοδος βελτιστοποίησης της εκπαίδευσης που υιοθετείται είναι ένας συνδυασμός της προσέγγισης ελάχιστων τετραγώνων και της οπίσθιας διάδοσης (back-propagation). Ο



Σχήμα 6.2: Ποιότητα παρεμβολής που επιτυγχάνεται με το ANFIS και το πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού για δύο διαφορετικές μορφές δεδομένων εκπαίδευσης (α),(β).



Σχήμα 6.3: Συγκριτικά αποτελέσματα εύρωστης βελτιστοποίησης με και χωρίς χρήση ANFIS για τον υπολογισμό των χειρίστων μετώπων Pareto μαζί με τις αντίστοιχες προβολές τους στα τρία επίπεδα για τις τρεις δοκιμαστικές συναρτήσεις: (α) T1, (β) T2, (γ) T3.

πληθυσμός της SPEA-DE τίθεται στη τιμή 35, το μέγεθος του αρχείου ορίζεται στη τιμή 100 και αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου είναι 50. Για τον υπολογισμό του υπερόγκου κάθε λύσης, ο εύρωστος SPEA-DE αλγόριθμος μεγιστοποίησης εκτελείται για 20 κύκλους με μέγεθος αρχείου 40. Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν με χρήση αυτών των ρυθμίσεων φαίνονται στο σχήμα 6.3. Το τρίτο κριτήριο βελτιστοποίησης που αφορά την ευρωστία τοποθετείται στον άξονα Z. Το σχήμα απεικονίζει πολύ καλή ταύτιση μεταξύ των μετώπων Pareto που υπολογίστηκαν.

6.3 Εύρωστη βελτιστοποίηση μηχανής υψηλής ταχύτητας

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε στο βέλτιστο εύρωστο σχεδιασμό μίας σύγχρονης μηχανής υψηλής ταχύτητας, επιφανειακών μονίμων μαγνητών, ισχύος 1.5kW, 12.000ΣΑΛ με δύο πόλους και συγκεντρωμένο τύλιγμα κλασματικού βήματος. Ο στόχος αυτής της διαδικασίας είναι να εξετάσει τη σκοπιμότητα μίας τέτοιας λύσης σαν μηχανή ηλεκτροκίνησης με λόγο μετάδοσης 1:26 για ένα ελαφρύ πρωτότυπο όχημα τύπου πόλεως που διαγωνίζεται σε αγώνες εξοικονόμησης ενέργειας. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή υπάρχει ανάγκη για υψηλή πυκνότητα ισχύος με υψηλή απόδοση και παράλληλα μειωμένα αρμονικά φαινόμενα στην επαγόμενη τάση και στη ροπή. Ξεκινώντας, αρχικά διεξάχθηκε προκαταρκτική σχεδίαση για τη βασική

διαστασιολόγηση της γεωμετρίας. Στη συνέχεια έγινε έρευνα για τις τιμές των βασικών γεωμετρικών μεταβλητών μέσω αναλύσεων ευαισθησίας προκειμένου να επιτευχθούν μικρές τιμές αρμονικών φαινομένων στη ροπή και την επαγόμενη τάση. Το διάγραμμα των μεταβλητών σχεδίασης που υιοθετήθηκε απαρτίζεται από 6 στοιχεία (σχήμα 6.4):

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_6] = [d_g \ h_m \ w_t \ k_t \ w_l \ l] \quad (6.7)$$

όπου d_g , h_m , w_t , k_t , w_l , l είναι η διάμετρος διακένου, το πάχος μαγνήτη, το πλάτος του δοντιού, ο λόγος του πλάτους του πέλματος του δοντιού προς το πλάτος του δοντιού, το μήκος του δοντιού και το ενεργό μήκος της μηχανής αντίστοιχα.

Στη πλευρά του στάτη, το πάχος του σώματος τίθεται ως το μισό του πλάτους του δοντιού και το ύψος του πέλματος του δοντιού είναι ανάλογο του μήκους του δοντιού. Στο δρομέα, ο μαγνήτης είναι παράλληλα μαγνητισμένος και καλύπτει ολόκληρο το πολικό βήμα. Το πάχος του σώματος του δρομέα έχει τεθεί από την προκαταρκτική σχεδίαση στα 9mm και μεταβάλλεται κατά τη βελτιστοποίηση βάσει του μήκους της περιφέρειας του μαγνήτη και του παραμένοντα μαγνητισμού. Ο συντελεστής πληρότητας τίθεται σταθερός και ίσος με 0,3. Τα κριτήρια βελτιστοποίησης ορίζονται ως:

$$\min \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{TD_0}{TD} \\ \frac{\eta_0}{\eta} \\ \left(0.5 \cdot \frac{THD_E}{THD_{E0}} + 0.5 \cdot \frac{T_r}{T_{r0}} \right) \\ HYP \left(\frac{TD_0}{TD}, \frac{\eta_0}{\eta} \right) \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

subject to

$$x_{i,\min} \leq x_i \leq x_{i,\max}, \quad i = 1, 2, \dots, 6$$

$$E = E_{nom}$$

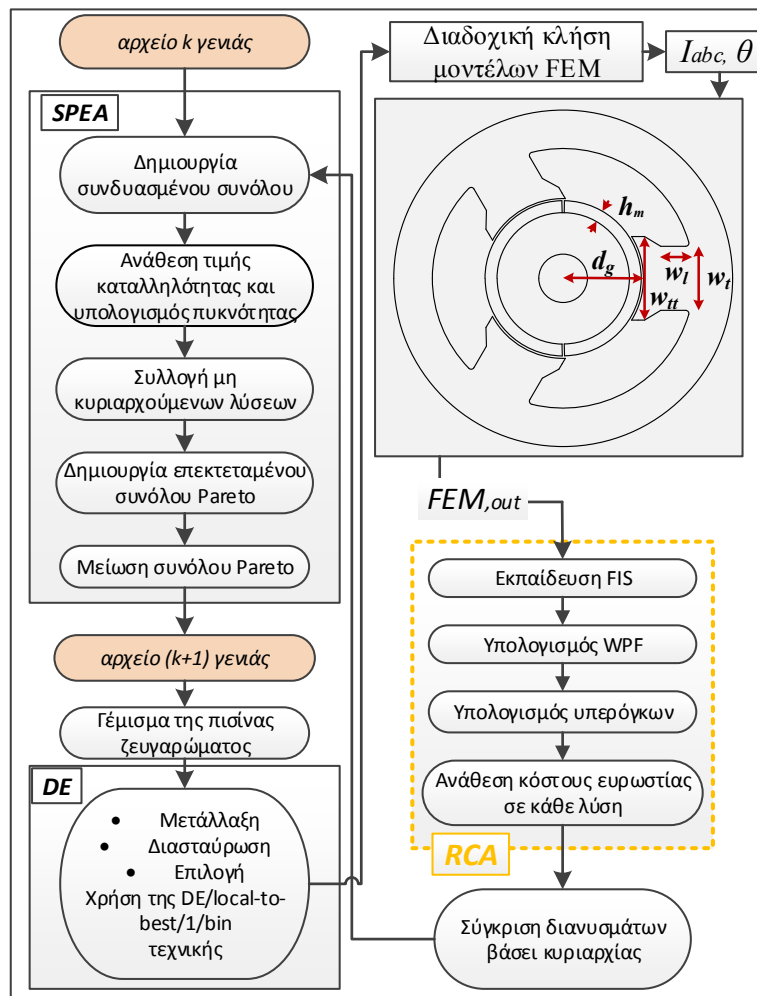
$$0.95 \cdot T_0 \leq T \leq 1.05 \cdot T_0$$

Πίνακας 6.2: Μεταβλητές σχεδίασης και τα αντίστοιχα όρια

Διάσταση	Κάτω όρια	Άνω όρια	Μέγεθος αβεβαιότητας
Πάχος μαγνήτη (mm)	2	4	0.25
Πλάτος δοντιού (mm)	15	20	0.25
Μήκος δοντιού (mm)	10	18	0.25
Ενεργό μήκος (mm)	40	50	0.25
Διάμετρος διακένου (mm)	32	48	0.25
Λόγος πλάτους πέλματος δοντιού προς το πλάτος δοντιού	1	1.4	0.02

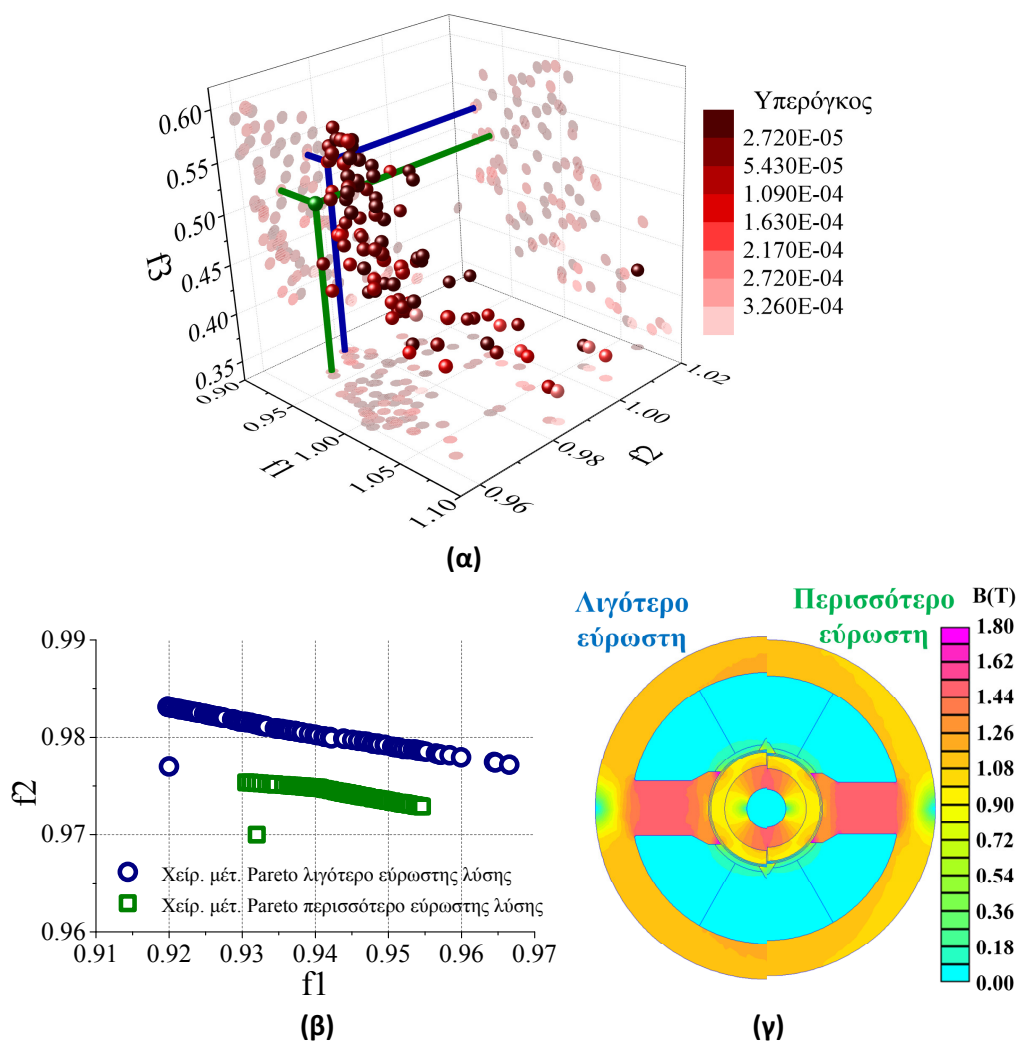
όπου το x περιορίζεται από άνω όρια (x_{max}) κάτω όρια (x_{min}) όπως φαίνεται στον πίνακα 6.2 μαζί με το μέγεθος αβεβαιότητας Δ . Ο συμβολισμός TD αποτελεί το λόγο ροπής προς τη μάζα της μηχανής (πυκνότητα ροπής), η είναι η απόδοση, THD_E είναι η ολική αρμονική παραμόρφωση της επαγόμενης τάσης, T_r είναι η κυμάτωση ροπής ενώ οι αντίστοιχες τιμές TD_o , E_o , THD_{Eo} , T_{ro} αναφέρονται στις τιμές της προκαταρκτικής σχεδίασης. Ο δείκτης ευρωστίας λαμβάνεται υπόψη για τα κριτήρια f_1 και f_2 . Η RMS τιμή της επαγόμενης τάσης E κρατείται σταθερή και ίση με την ονομαστική τιμή E_{nom} . Αυτό επιτυγχάνεται με την εκτέλεση μίας επιπρόσθετης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Ο αριθμός των αγωγών της αύλακας μεταβάλλεται ανάλογα με την απόκλιση από την ονομαστική τιμή. Η τιμή της ροπής T περιορίζεται ώστε να είναι σχεδόν ίση με την ονομαστική τιμή, με μικρά περιθώρια ανοχής, χρησιμοποιώντας κατάλληλες σταθερές έτσι ώστε οι προκύπτουσες γεωμετρίες να έχουν την ίδια ισχύ. Η μεταβαλλόμενη διάμετρος διακένου και το ενεργό μήκος της μηχανής, μαζί με τον περιορισμό της ροπής, προσφέρουν μία ποικιλία διαφορετικών διανυσμάτων σχεδίασης που αντιστοιχούν σε γεωμετρίες με κοντινή απόδοση ισχύος.

Το δομικό διάγραμμα της διαδικασίας που ακολουθήθηκε φαίνεται στο σχήμα 6.4. Η μοντελοποίηση της μηχανής επιτυγχάνεται με πολλαπλές μαγνητοστατικές



Σχήμα 6.4: Δομικό διάγραμμα προτεινόμενης διαδικασίας εύρωστης βελτιστοποίησης ηλεκτρικών κινητήρων

αναλύσεις που λαμβάνουν υπόψη τα αρμονικά φαινόμενα στη ροπή και την επαγόμενη τάση. Απώλειες χαλκού, σιδήρου, δινορρευμάτων στους μαγνήτες και ανεμισμού λαμβάνονται επίσης υπόψη και υπολογίζονται με αναλυτικά μοντέλα [36] [45]. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται είναι ένας υβριδικός αλγόριθμος SPEA-DE όπως έχει οριστεί στο [36]. Το ANFIS δημιουργείται αρχικά με τη μέθοδο της διαμέρισης πλέγματος (grid partitioning), περιλαμβάνει δύο συναρτήσεις μέλους (membership functions) τριγωνικού σχήματος (triangular-shaped) για κάθε είσοδο, 10 εποχές εκπαίδευσης (training epochs) και ο στόχος εκπαίδευσης τίθεται σε μηδενικό σφάλμα. Το αρχικό βήμα είναι 0,01 και οι ρυθμοί αύξησης ή μείωσης του βήματος είναι 1,1 και 0,9 αντίστοιχα. Η μέθοδος βελτιστοποίησης της εκπαίδευσης που υιοθετείται είναι ένας συνδυασμός της προσέγγισης ελάχιστων τετραγώνων και της οπίσθιας διάδοσης (back-propagation). Ο πληθυσμός της SPEA-DE τίθεται στη τιμή 35, το μέγεθος του αρχείου ορίζεται στη τιμή 100 και αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου είναι 50. Για τον υπολογισμό του υπερόγκου κάθε λύσης, ο εύρωστος SPEA-DE αλγόριθμος μεγιστοποίησης εκτελείται για 20 κύκλους με μέγεθος αρχείου 40.



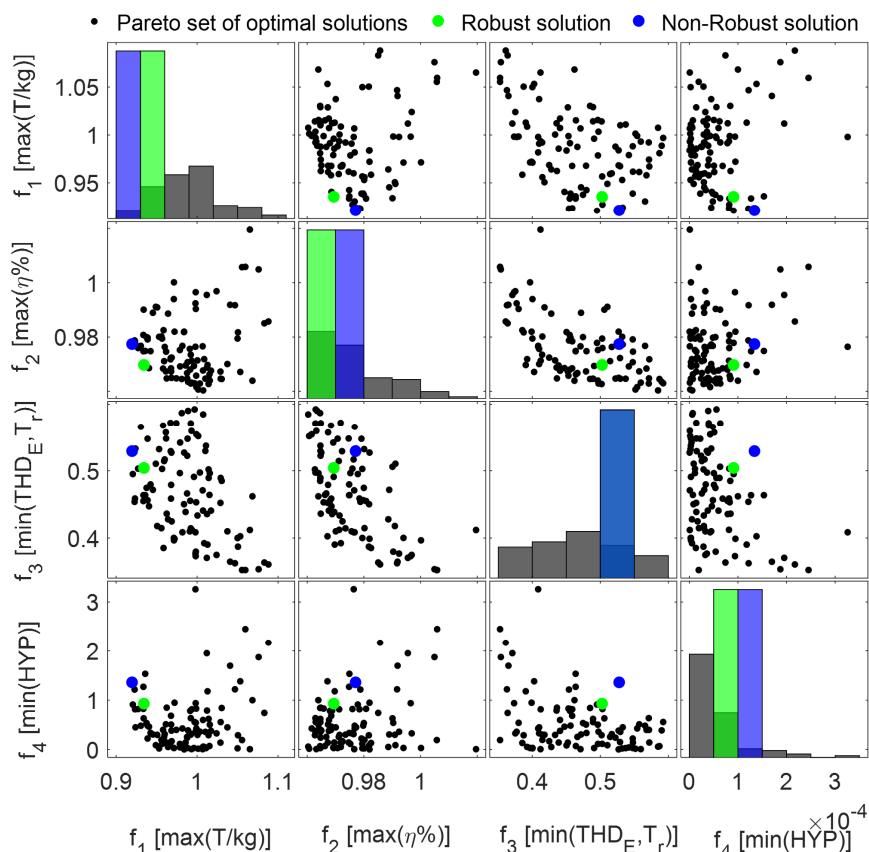
Σχήμα 6.5: (α) Τελικό μέτωπο Pareto εύρωστης βελτιστοποίησης, (β) χειρίστα μέτωπα Pareto δύο μη κυριαρχούμενων λύσεων με διαφορετικό δείκτη ευρωστίας και (γ) οι αντίστοιχες γεωμετρίες με τις κατανομές του μαγνητικού πεδίου.

Πίνακας 6.3: Χαρακτηριστικά προκαταρκτικής, εύρωστης βέλτιστης και μη-εύρωστης βέλτιστης γεωμετρίας ηλεκτρικής μηχανής

	Μέγεθος	Προκαταρκτική γεωμετρία	Εύρωστη βέλτιστη γεωμετρία	Μη εύρωστη βέλτιστη γεωμετρία
Χαρακτηριστικά γεωμετρίας	Πάχος μαγνήτη (mm)	3.00	3.98	3.81
	Πλάτος δοντιού (mm)	17.5	15.2	16.1
	Μήκος δοντιών (mm)	14.0	17.9	17.6
	Ενεργό μήκος (mm)	45.0	42.5	40.4
	Διάμετρος διακένου (mm)	40.0	32.2	35.2
	Λόγος πλάτους πέλματος δοντιού προς το πλάτος δοντιού	1.20	1.35	1.31
Χαρακτηριστικά επίδοσης	Ονομαστική ροπή (Nm)	1.23	1.22	1.22
	Αποδιδόμενη ισχύς (W)	1543	1527	1530
	Ρεύμα γραμμής (A)	7.07	7.07	7.07
	Συνολικές απώλειες (W)	171.0	117.4	131.3
	Απόδοση (%)	90.0	92.9	92.1
	Ολική αρμονική παραμόρφωση επαγόμενης τάσης (%)	2.77	2.38	2.25
	Κυμάτωση ροπής (%)	4.4	3.6	3.95
	Συνολική μάζα (kg)	2.24	2.08	2.07
	Υπερόγκος χείριστου μετώπου Pareto	-	$0.92 \cdot 10^{-4}$	$1.35 \cdot 10^{-4}$

Το προκύπτον μέτωπο Pareto απεικονίζεται στο σχήμα 6.5α. Οι τιμές των τριών κύριων κριτηρίων για κάθε λύση είναι εμφανείς από τη τοποθεσία των σφαιρών στον τρισδιάστατο χώρο. Ο δείκτης της ευρωστίας μπορεί να παρατηρηθεί από το χρώμα των σφαιρών με παράλληλη ανάγνωση του χρωματικού χάρτη που παρατίθεται. Οι προβολές των σφαιρών στα τρία επίπεδα είναι επίσης εμφανείς. Ένα διάγραμμα διασποράς των τεσσάρων κριτηρίων βελτιστοποίησης παρέχεται στο σχήμα 6.6 για καλύτερη οπτικοποίηση των διαφορετικών στοχικών συναρτήσεων και τον συσχετισμό μεταξύ τους. Είναι εμφανές ότι η πυκνότητα ροπής και η ευρωστία συνιστούν κριτήρια αντικρουόμενης φύσης. Μία τέτοια τάση δεν είναι τόσο εμφανής ανάμεσα στα κριτήρια απόδοσης και αρμονικών φαινομένων. Μπορούν να ευρεθούν αρκετές λύσεις με υψηλή απόδοση και ευρωστία παράλληλα με ελαχιστοποιημένα φαινόμενα αρμονικών. Τελικά, ο περιορισμός των παρασιτικών φαινομένων στη ροπή και στη τάση υφίσταται εις βάρος της πυκνότητας ροπής και της απόδοσης.

Επιλέγονται δύο κοντινά μέλη του μετώπου Pareto που επιδεικνύουν σημαντικά βελτιωμένες τιμές πυκνότητας ροπής και απόδοσης συγκρινόμενες με το αρχικό σχέδιο. Επίσης χαρακτηρίζονται από μειωμένα φαινόμενα αρμονικών στη ροπή και στην τάση. Οι δύο λύσεις έχουν την ίδια ισχύ εξόδου και το ίδιο ονομαστικό φασικό ρεύμα. Ωστόσο, ο υπερόγκος του χείριστου μετώπου Pareto είναι ανόμοιος και κατ' επέκταση τα επίπεδα ευρωστίας διαφέρουν σημαντικά όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο σχήμα 6.6. Η πιο εύρωστη λύση από τις δυο θα αποκαλείται από εδώ και πέρα "ΠΕ" και η λιγότερη εύρωστη "ΛΕ". Για να επικυρωθούν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης γίνεται υπολογισμός των χείριστων μετώπων Pareto στις δύο επιλεγμένες γεωμετρίες, για τις ίδιες περιοχές αβεβαιότητας των μεταβλητών, μέσω αναλύσεων πεπερασμένων



Σχήμα 6.6: Διάγραμμα διασποράς των κριτηρίων του τελικού μετώπου Pareto

στοιχείων. Το σχήμα 6.5β δείχνει τα αντίστοιχα μέτωπα και τις χωρικές διαφορές των ονομαστικών σημείων με τα χείριστα μέτωπα Pareto. Αυτή η διαφορά είναι σημαντικά μικρότερη για την ΠΕ λύση. Γίνεται λοιπόν φανερό ότι λόγω των αβεβαιοτήτων που υφίστανται στην παραγωγική διαδικασία, η επιλογή της ΛΕ λύσης θα μπορούσε να οδηγήσει σε μία μηχανή με χειρότερες τιμές απόδοσης και επίδοσης από το ονομαστικό. Όσο αυξάνει το επίπεδο της ευρωστίας μειώνεται η πιθανότητα κάποιας κατασκευαστικής απόκλισης. Ο πίνακας 6.3 παρέχει τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά σχεδιασμού των εν λόγω μηχανών και οι αντίστοιχες κατανομές του μαγνητικού πεδίου συγκρίνονται στο σχήμα 6.5γ.

Ο υπολογιστικός χρόνος για τη μεθοδολογία βελτιστοποίησης ήταν περίπου 24 ώρες χρησιμοποιώντας έναν i7-4820K επιτραπέζιο υπολογιστή με 16GB μνήμη RAM. Ο χρόνος εκπαίδευσης του ANFIS και του υπολογισμού των χείριστων μετώπων Pareto ήταν λιγότερο από το 2% του συνολικού χρόνου.

6.4 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μία νέα μέθοδος υπολογισμού της ευρωστίας που βασίζεται στον υπερόγκο του χείριστου μετώπου Pareto κάθε λύσης και είναι σε θέση να λαμβάνει υπόψη ταυτόχρονα πολλαπλά κριτήρια. Υιοθετείται ένα κατάλληλο ANFIS που δρα ως ένα αξιόπιστο υποκατάστατο μοντέλο για τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό εκπαιδεύεται από τις κλήσεις της συνάρτησης κόστους κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης και επιτρέπει τον γρήγορο υπολογισμό των χείριστων

μετώπων Pareto. Η μεθοδολογία επικυρώθηκε μέσω δοκιμαστικών συναρτήσεων και του βέλτιστου σχεδιασμού μίας μηχανής υψηλής ταχύτητας. Είναι αξιοσημείωτο ότι το κριτήριο της ευρωστίας που προτάθηκε έχει ενσωματωθεί στη διαδικασία βελτιστοποίησης προκαλώντας ασήμαντη αύξηση στον υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται.

Κεφάλαιο 7. Θερμική και Μηχανική Ανάλυση Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών Υψηλής Ταχύτητας

7.1 Εισαγωγή

Οι ηλεκτρικές μηχανές υψηλών ταχυτήτων αποτελούν ένα σύγχρονο πεδίο έρευνας με πληθώρα νέων δημοσιεύσεων και με συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια λόγω της εμφάνισης νέων απαιτήσεων με γνώμονα την αύξηση της αποδοτικότητας και της αξιοπιστίας, και τον ταυτόχρονο περιορισμό του όγκου και της μάζας της μηχανής. Οι μηχανές μονίμων μαγνητών κυριαρχούν στο πεδίο των εφαρμογών υψηλών ταχυτήτων, δεδομένου ότι έχουν υψηλή απόδοση και πυκνότητα ισχύος και χαμηλό ακουστικό θόρυβο.

Στο παρόν κεφάλαιο επιχειρείται η θερμική και μηχανική ανάλυση ενός πρωτότυπου σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών, μικρού όγκου και βάρους, χαμηλής ισχύος και υψηλής απόδοσης, για τον οποίο έχει τεθεί σαν στόχος να λειτουργήσει σε υψηλές ταχύτητες. Σκοπός είναι η μελέτη της θερμοκρασιακής κατανομής της μηχανής και της δομικής και αξονοδυναμικής της συμπεριφοράς.

Σε πρώτο στάδιο γίνεται προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς του πρωτότυπου κινητήρα με χρήση αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων σε δύο και τρεις διαστάσεις, όπου υπολογίζεται λεπτομερώς η τοπική κατανομή των θερμοκρασιών σε κάθε σημείο της γεωμετρίας του. Αρχικά πραγματοποιείται δυσδιάστατη ανάλυση για τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα τόσο σε εγκάρσια τομή όσο και σε τομή παράλληλη στον άξονα περιστροφής της μηχανής. Ακολούθως επιχειρείται τρισδιάστατη μοντελοποίηση του κινητήρα τόσο για τη μόνιμη όσο και για την μεταβατική κατάσταση λειτουργίας. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από πειραματικές μετρήσεις και γίνεται σύγκριση με τα αντίστοιχα προσομοιωτικά εργαλεία. Στόχος αυτού του σταδίου είναι η δημιουργία και πειραματική επιβεβαίωση ενός εργαλείου θερμικών προσομοιώσεων που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις θερμικές μελέτες σε υψηλές ταχύτητες.

Σε δεύτερο στάδιο επιχειρείται η αξονοδυναμική ανάλυση του πρωτότυπου κινητήρα μονίμων μαγνητών υψηλής ταχύτητας. Στις ηλεκτρικές μηχανές, η ανάλυση της δυναμικής του άξονα είναι πεδίο το οποίο σχετίζεται με τις ταλαντώσεις του

δρομέα. Ο δρομέας αποτελεί το σημαντικότερο κομμάτι μιας μηχανής υψηλών ταχυτήτων, επομένως είναι πρωταρχικής σημασίας να λαμβάνονται υπόψη τα αξονοδυναμικά του χαρακτηριστικά, καθώς αποτρέπονται καταστροφικές βλάβες λόγω μη αποσβενόμενης ταλάντωσης. Η προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς του δρομέα επιτυγχάνεται με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων που παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα και οπτική πληροφορία του είδους των ταλαντώσεων που εμπίπτει ο δρομέας. Απώτερος σκοπός της ενότητας αυτής είναι ο υπολογισμός των κρίσιμων ταχυτήτων και ο έλεγχος για ασφάλεια περιστροφής του κινητήρα στις 30.000ΣΑΛ. Αρχικά γίνεται διερεύνηση της εξάρτησης των φυσικών συχνοτήτων του δρομέα από τη δομική του σύνθεση, τη λεπτότητα του άξονα και το μήκος του ενεργού του μέρους. Στη συνέχεια πραγματοποιείται πειραματική επαλήθευση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για χαμηλές ταχύτητες. Τέλος γίνεται προσδιορισμός των κρίσιμων ταχυτήτων και καθορίζεται η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ως προς την αξονοδυναμική του συμπεριφορά.

Στο τρίτο σκέλος του κεφαλαίου πραγματοποιείται η δομική ανάλυση του σύγχρονου κινητήρα που εξετάζουμε. Σε μια ηλεκτρική μηχανή υψηλών ταχυτήτων η ανάλυση αυτή είναι ένα πολύ σημαντικό και απαιτητικό κομμάτι της σχεδίασης της μηχανής, καθώς σε υψηλές συχνότητες περιστροφής οι φυγόκεντρες δυνάμεις και οι πιέσεις που ασκούνται στον δρομέα γίνονται πολύ έντονες. Σκοπός της ενότητας αυτής είναι η εξαγωγή συμπεράσματος σχετικά με την δομική ακεραιότητα του δρομέα για ταχύτητα περιστροφής 30.000ΣΑΛ, μέσω προσομοίωσης με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Σαν πρώτο βήμα υπολογίζονται οι μέγιστες τάσεις που ασκούνται σε όλα τα μέρη του κινητήρα για τη πιο πάνω ταχύτητα περιστροφής και ο αντίστοιχος συντελεστής ασφαλείας. Ακολούθως προσδιορίζεται η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και τέλος γίνεται διερεύνηση του συσχετισμού της διαμέτρου του δρομέα με την μέγιστη ταχύτητα περιστροφής.

7.2 Θερμική Ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει θερμική ανάλυση του διπολικού σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή μας παρέχει την δυνατότητα για ακριβή προσομοίωση της θερμοκρασιακής κατανομής στην ηλεκτρική μηχανή. Αρχικά θα γίνει ανάλυση με δισδιάστατη προσέγγιση του προβλήματος και ακολούθως με τρισδιάστατη. Στο τέλος επιχειρούνται πειραματικές μετρήσεις και παρουσιάζονται συγκριτικά τα προσομοιωμένα και πειραματικά αποτελέσματα.

7.2.1 Γεωμετρία σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών

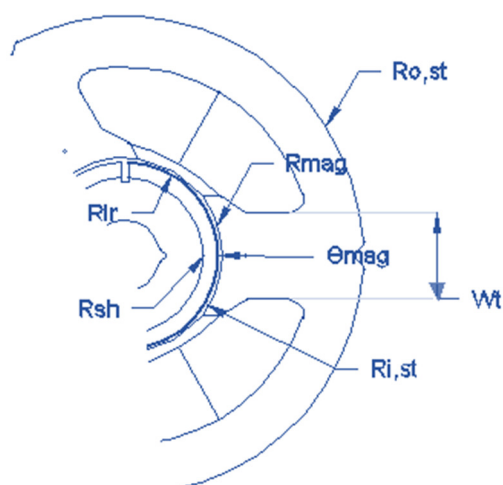
Οι παράμετροι επίλυσης του προβλήματος πεπερασμένων στοιχείων είναι τα υλικά από τα οποία αποτελείται η μηχανή με τις αντίστοιχες ιδιότητες τους, οι πηγές θερμότητας στον κινητήρα που δημιουργούνται από τις απώλειες ισχύος, οι οριακές συνθήκες, οι γνωστές σταθερές θερμοκρασίες (αν υπάρχουν) και οι συντελεστές συναγωγής που καθορίζουν την μετάδοση θερμότητας μεταξύ των υλικών.

Πίνακας 7.1 - Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κινητήρα

	Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή
Γενικά	Αριθμός αυλακών	N	3
	Αριθμός πόλων	ρ	2
	Μήκος κινητήρα (mm)	L	91
	Πλάτος διακένου (mm)	l_g	0,7
Δρομέας	Ακτίνα άξονα (mm)	R_{sh}	7,3
	Μήκος ενεργού μέρος δρομέα (mm)	L_r	45
	Εξωτερική ακτίνα σιδήρου δρομέα (mm)	R_{ir}	16,3
	Εξωτερική ακτίνα μαγνητών (mm)	R_{mag}	19,3
	Εύρος μαγνήτη (μοίρες)	Θ_{mag}	175°
Στάτης	Εσωτερική ακτίνα στάτη (mm)	$R_{i,st}$	20
	Εξωτερική ακτίνα στάτη (mm)	$R_{o,st}$	49,3
	Εξωτερική ακτίνα κελύφους (mm)	R_h	52,3
	Μηκος δοντιών στάτη (mm)	L_t	17,7
	Πλάτος δοντιών στάτη (mm)	W_t	17,5

Μετά τη σχεδίαση της γεωμετρίας της μηχανής και τον καθορισμό των παραμέτρων εισόδου, το πρόβλημα επιμερίζεται σε μεγάλο αριθμό υπό-προβλημάτων (πεπερασμένα στοιχεία), στα οποία εφαρμόζονται οι μαθηματικές σχέσεις της αγωγής και της συναγωγής. Η σύγκλιση των θερμοκρασιών γειτονικών στοιχείων επιτυγχάνεται μέσω επαναληπτικών μεθόδων βελτιστοποίησης. Αποτέλεσμα της ανάλυσης αποτελεί η κατανομή της πυκνότητας θερμορροής και της θερμοκρασίας σε κάθε σημείο του κινητήρα.

Η θερμική ανάλυση του διπολικού σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών θα πραγματοποιηθεί με βάση τη γεωμετρία που φαίνεται στον πίνακα 5.1. Εδώ φαίνονται τα κυριότερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μηχανής με τα μεγέθη και τα αντίστοιχα σύμβολα, ενώ παράλληλα στο σχήμα 1.1 επιδεικνύονται αυτά τα μεγέθη γραφικά σε εγκάρσια τομή του κινητήρα.



Σχήμα 7.1 – Παράμετροι σχεδίασης γεωμετρίας μηχανής σε τομή κάθετη στον άξονα

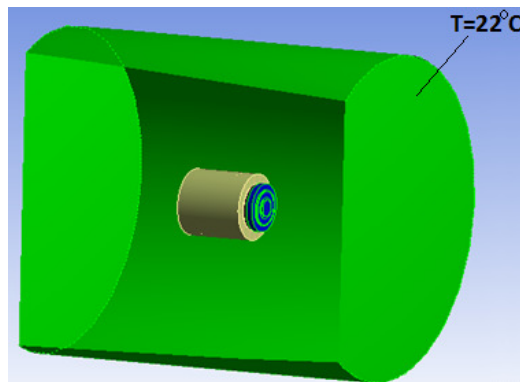
7.2.2 Ορισμός οριακών συνθηκών

Τόσο στην δισδιάστατη όσο και στην τρισδιάστατη θερμική ανάλυση οι οριακές συνθήκες που τέθηκαν είναι οι ίδιες, εντούτοις όμως στο τρισδιάστατο μοντέλο έχουν οριστεί κάποιες συναγωγές οι οποίες δεν μπορούσαν να οριστούν σε δύο διαστάσεις. Οι οριακές συνθήκες που ορίστηκαν είναι:

α) *Σταθερή θερμοκρασία επιφάνειας:* Σε πενταπλάσια ακτίνα από την μέγιστη ακτίνα της μηχανής θέτουμε όριο θερμοκρασίας ίσο με την θερμοκρασία περιβάλλοντος 295K (=22 °C). Επομένως σε ακτίνα μεγαλύτερη των 24.65 εκατοστών από τον άξονα την μηχανής, η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της λειτουργίας του κινητήρα είναι μηδενική (Σχήμα 7.2).

β) *Συναγωγή στην επιφάνεια:* Έχουμε απαγωγή θερμότητας μέσω συναγωγής μεταξύ επιφανειών της μηχανής και του αέρα. Ο συντελεστής συναγωγής του αέρα κυμαίνεται από 2 έως 25 για ελεύθερη ροή και από 25 έως 200 για εξαναγκασμένη ροή. Στην περίπτωση μας, έχουμε φυσική ψύξη επομένως και ο συντελεστής συναγωγής θα κυμαίνεται στα συγκεκριμένα όρια. Οι οριακές συνθήκες στις επιφάνειες για την ανάλυση του συγκεκριμένου κινητήρα είναι οι ακόλουθες:

- *Επιφάνεια μαγνητών:* στην επιφάνεια αυτή ορίζουμε συντελεστή συναγωγής $h=5\frac{W}{m^2\cdot K}$, ο οποίος ρυθμίζει τη μετάδοση θερμότητας από τον αέρα διακένου προς τους μόνιμους μαγνήτες.
- *Επιφάνεια στάτη:* στη συγκεκριμένη επιφάνεια ορίζουμε συντελεστή συναγωγής $h=10\frac{W}{m^2\cdot K}$ που ρυθμίζει τη μετάδοση θερμότητας από τον πυρήνα του στάτη προς το διάκενο.
- *Επιφάνεια κελύφους:* για τη προσομοίωση της μετάδοσης θερμότητας μέσω του μηχανισμού της συναγωγής από το κέλυφος προς τον περιβάλλοντα χώρο ορίζουμε στην επιφάνεια του κελύφους συντελεστή συναγωγής $h=20\frac{W}{m^2\cdot K}$
- *Επιφάνεια χαλκού:* στην επιφάνεια αυτή, ορίζουμε συντελεστή συναγωγής $h=5\frac{W}{m^2\cdot K}$, που ρυθμίζει την μετάδοση θερμότητας από τον αέρα στο εσωτερικό του κινητήρα προς τα τυλίγματα του στατη.



Σχήμα 7.2 – Καθορισμός θερμοκρασίας περιβάλλοντος

Πίνακας 7.2 – Απώλειες μηχανής μονίμων μαγνητών

Μέγεθος	Τιμή
Ένταση ρεύματος (A)	6A
Απώλειες χαλκού (W)	16,7
Απώλειες πυρήνα (W)	6,6
Απώλειες δινορρευμάτων στους μαγνήτες (W)	7,30
Απώλειες περιστροφής (W)	6,6

- *Επιφάνεια εδράνων-άξονα:* στις εξωτερικές επιφάνειες των εδράνων και του άξονα ορίζουμε συντελεστή συναγωγής $h=10\frac{W}{m^2\cdot K}$, ο οποίος ρυθμίζει τη μετάδοση θερμότητας από τον αέρα στο εσωτερικό του κινητήρα προς τα σώματα του άξονα και του δρομέα.

Οι οριακές συνθήκες που θα εφαρμόσουμε αναφέρονται στον τρόπο ψύξης των επιφανειών του κινητήρα με συναγωγή. Η οριακή συνθήκη ψύξης (θέρμανσης) περιγράφεται από την εξίσωση συναγωγής σε επιφάνεια.

$$-\lambda \cdot \partial T / \partial x = h \cdot (T_{\infty} - T) \quad (7.1)$$

όπου λ είναι η θερμική αγωγιμότητα του υλικού που ρέει η θερμότητα και h ο συντελεστής συναγωγής του μέσου που ψύχει (θερμαίνει) το υλικό, όπου στην περίπτωση μας είναι ο αέρας και T_{∞} είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος (22 °C).

7.2.3 Απώλειες Κινητήρα

Οι πηγές θερμότητας στο εσωτερικό της μηχανής προκύπτουν από τις απώλειες ισχύος. Οι απώλειες χαλκού κατανέμονται στα τυλίγματα του στάτη, οι απώλειες πυρήνα στη σιδηρομαγνητική λαμαρίνα στάτη και δρομέα, οι απώλειες δινορρευμάτων μαγνητών κατανέμονται στους επιφανειακούς μαγνήτες και τέλος οι απώλειες περιστροφής λόγω τριβής στα έδρανα του δρομέα. Στον πίνακα 7.2 φαίνονται οι συνθήκες για τις οποίες θα γίνει ανάλυση της μηχανής:

Από τις πιο πάνω απώλειες ενέργειας προκύπτουν οι πυκνότητες απωλειών θερμότητας σε όλα τα σημεία της μηχανής:

- *Πυκνότητα απωλειών χαλκού:*

$$q = \frac{P_{cu}}{N \cdot V_{\alpha}} = 1.6398 \cdot 10^5 \text{ W}/m^3 \quad (7.2)$$

όπου, N ο αριθμός των αυλακών,
 V_{α} ο όγκος της κάθε αύλακας

- *Πυκνότητα απωλειών μαγνήτη:*

$$q_{\text{μαγν.}} = \frac{P_{\delta, \text{μαγν.}}}{N_m \cdot V_m} = 4.8329 \cdot 10^5 \text{ W/m}^3 \quad (7.3)$$

όπου, N_m ο αριθμός των μαγνητών,
 V_m ο όγκος του κάθε μαγνήτη

- Πυκνότητα απωλειών πυρήνα:

$$q_{\pi} = \frac{P_{\pi}}{V_{\pi}} = 35050,45 \text{ W/m}^3 \quad (7.4)$$

όπου, P_{π} οι απώλειες πυρήνα,
 V_{π} ο όγκος του πυρήνα.

- Πυκνότητα απωλειών εδράνων:

$$q_{\text{ρουλεμάν}} = \frac{P_{\text{περιστρ.}}}{N_{br} \cdot V_{br}} = 6,9150 \cdot 10^5 \text{ W/m}^3 \quad (7.5)$$

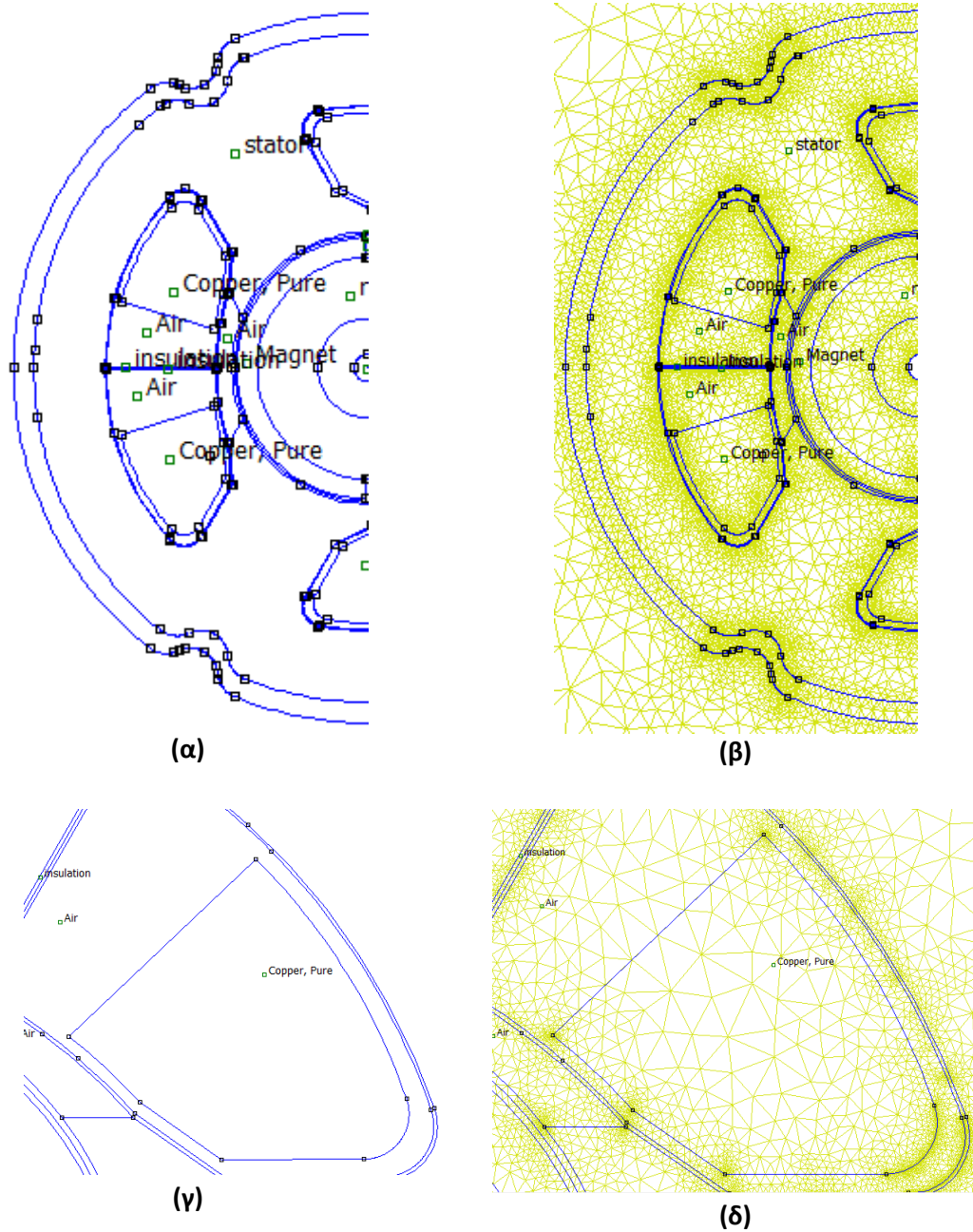
όπου, V_{br} ο όγκος των εδράνων,
 N_{br} ο αριθμός των εδράνων

7.2.4 Δισδιάστατη Θερμική Ανάλυση

Η ανάλυση θα γίνει σε δύο τομές. Η πρώτη είναι σε τομή κάθετη στον άξονα περιστροφής και η δεύτερη είναι σε αξονοσυμμετρική γεωμετρία (τομή παράλληλα στον άξονα). Οι παράμετροι επίλυσης του προβλήματος είναι όπως αναφέρθηκαν πιο πάνω. Πλεονέκτημα της δισδιάστατης τεχνικής αποτελεί η χρήση μεγάλου αριθμού πεπερασμένων στοιχείων που προσφέρουν σημαντική ακρίβεια στα αποτελέσματα, χωρίς σημαντική επιβάρυνση του υπολογιστικού χρόνου. Στα μειονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγονται, αφενός, η αδυναμία παραγωγής αποτελεσμάτων στην μεταβατική κατάσταση της θερμικής συμπεριφοράς του κινητήρα και αφετέρου η επίλυση του φαινομένου σε δύο διαστάσεις, ενώ η διάδοση θερμότητας υφίσταται εγγενώς σε τρεις διαστάσεις.

7.2.4.1 Τομή κάθετα στον άξονα της μηχανής

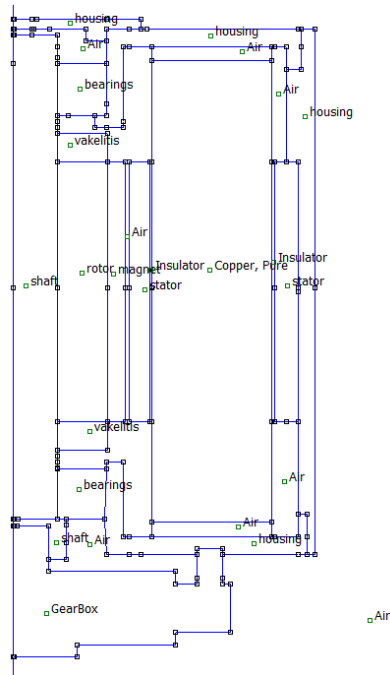
Στο σχήμα 7.3 φαίνεται η τομή κάθετα στον άξονα του κινητήρα. Μπορούν να διακριθούν όλα τα μέρη του κινητήρα, τα αντίστοιχα υλικά τους και η πυκνότητα του πλέγματος επίλυσης. Σε αυτή τη τομή υποτίθεται ακτινική μετάδοση της θερμότητας στο εσωτερικό του κινητήρα. Αυτή η υπόθεση κρίνεται ικανοποιητική για μηχανές με μεγάλη αναλογία μήκους προς διάμετρο διακένου.



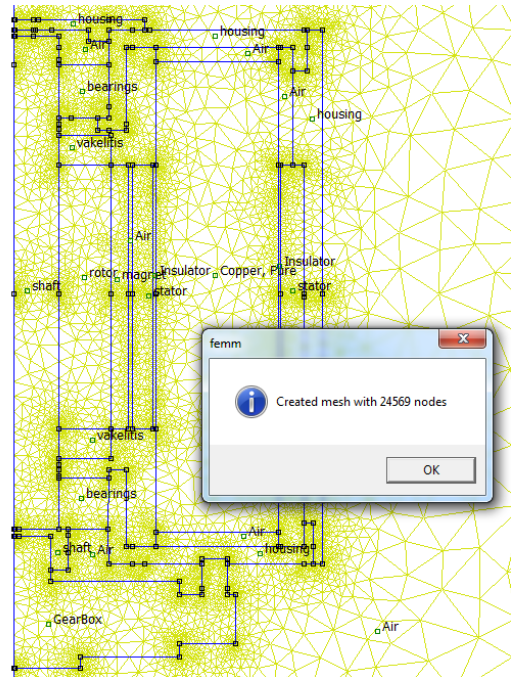
Σχήμα 7.3 – (α) Σχέδιο μηχανής για τη δισδιάστατη θερμική ανάλυση με τομή κάθετη στον άξονα και (β) το αντίστοιχο πλέγμα. (γ),(δ): λεπτομέρειες σχεδιασμού.

7.2.4.2 Τομή παράλληλα στον άξονα της μηχανής

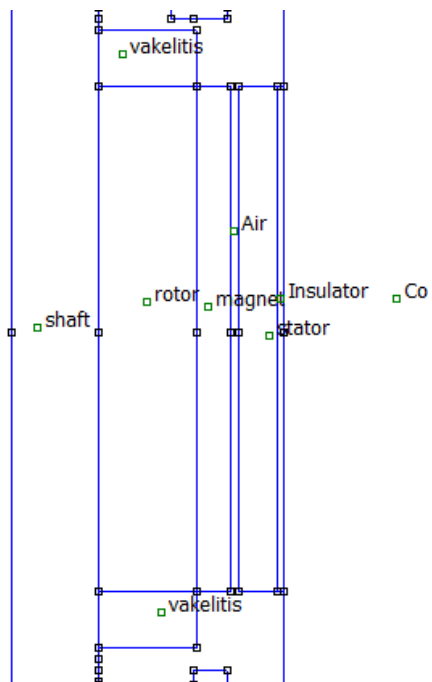
Στο σχήμα 7.4 φαίνεται η γεωμετρία του κινητήρα μονίμων μαγνητών σε τομή παράλληλα με τον άξονα του. Αυτή η τομή επιτρέπει τη θεώρηση των φαινομένων μετάδοσης θερμότητας στα άκρα της μηχανής. Ωστόσο, δεν μπορεί να κάνει σωστή διάκριση της τοπολογίας αυλακών-δοντιών της μηχανής.



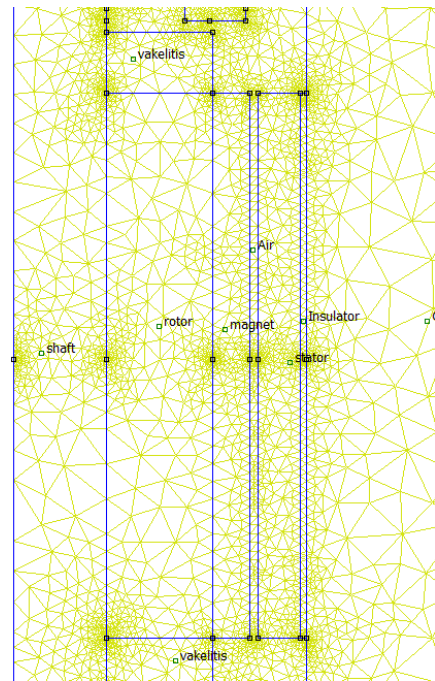
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 7.4 – (α) Αξονοσυμμετρικό σχέδιο μηχανής για τη διαστάσιμη θερμική ανάλυση και (β) το αντίστοιχο πλέγμα. (γ),(δ): λεπτομέρειες σχεδιασμού.

Πίνακας 7.3 – Θερμοκρασίες στα επιμέρους σώματα του κινητήρα σε τομή κάθετη στον άξονα

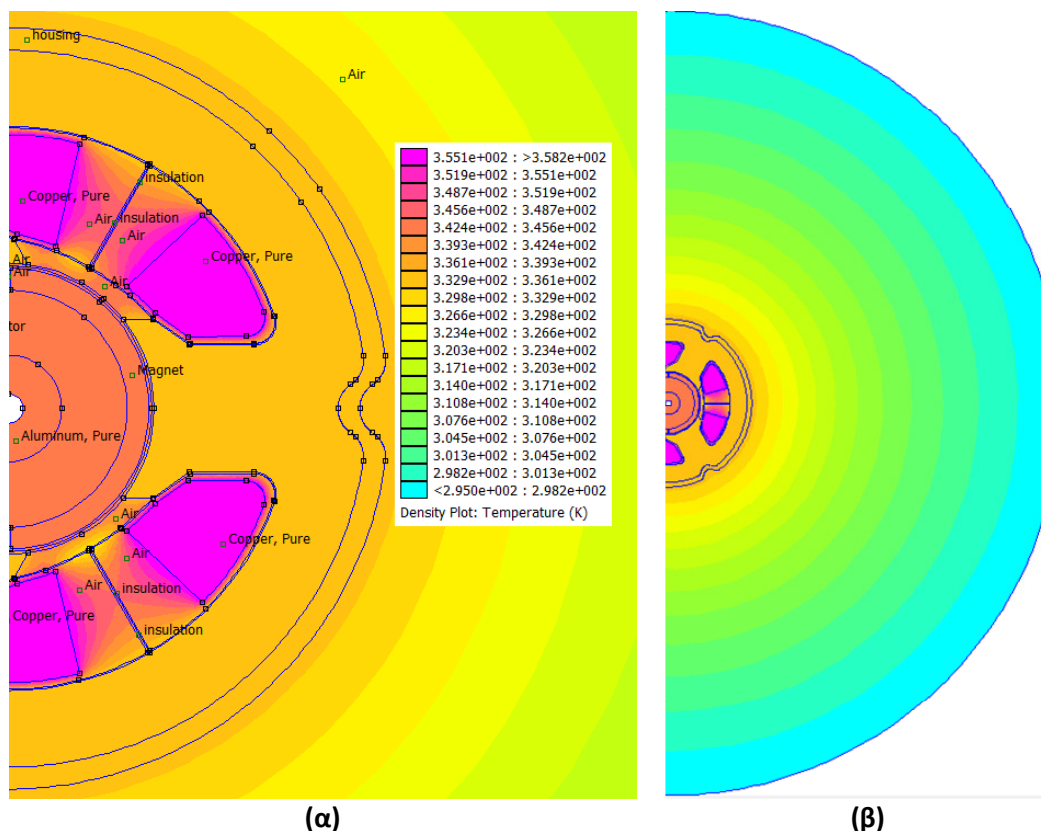
Συνιστώσα κινητήρα	Θερμοκρασία (°C)
Άξονας δρομέα	71,6
Μαγνήτες	71,6
Τυλίγματα στάτη	84,9
Πυρήνα στάτη	61,5
Κέλυφος	61,1

7.2.4.3 Προσομοιωμένα αποτελέσματα

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης του κινητήρα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και για τις δύο τομές.

7.2.4.3.1 Τομή κάθετη στον άξονα της μηχανής

Αρχικά παρουσιάζεται στο σχήμα 7.5α η θερμοκρασιακή κατανομή στην μηχανή. Παρατηρείται ότι η θερμοκρασία στα τυλίγματα είναι εμφανώς μεγαλύτερη από ότι στα υπόλοιπα μέρη της μηχανής. Αυτό οφείλεται τόσο στις υψηλές απώλειες χαλκού του κινητήρα, όσο και στην ύπαρξη μονωτικού χαρτιού και αέρα που περιβάλλει τα πηνία της μηχανής. Βλέπουμε επίσης ότι υψηλή θερμοκρασία έχουμε στους μαγνήτες λόγω των υψηλών πυκνοτήτων απωλειών τους. Η θερμοκρασία τόσο του σιδήρου του δρομέα όσο και του άξονα είναι σχεδόν ίδια με αυτή των μαγνητών λόγω της υψηλής θερμικής

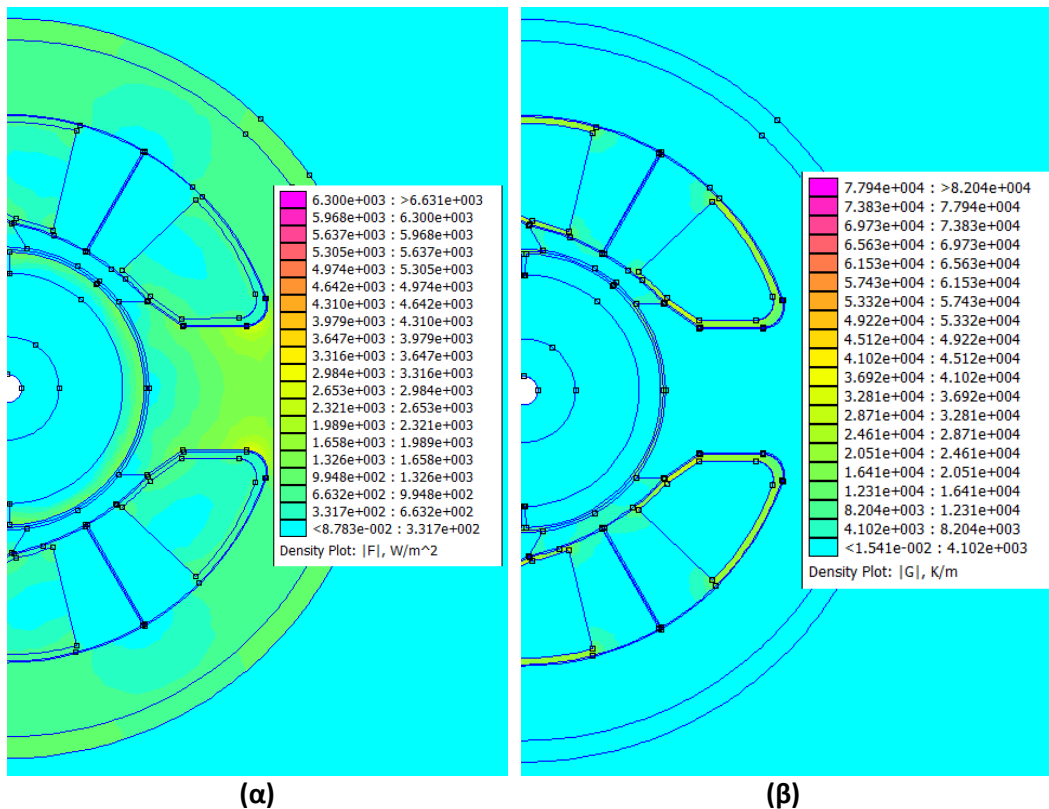


Σχήμα 7.5 – (α) Κατανομή θερμοκρασίας στον κινητήρα μονίμων μαγνητών, (β) Κατανομή θερμοκρασίας στο περιβάλλον

αγωγιμότητας του αλουμινίου και του σιδήρου που επιτρέπει την εύκολη διάδοση της θερμότητας. Τέλος, παρατηρείται ότι η θερμοκρασία στο στάτη και στο κέλυφος είναι περίπου ίση και είναι εμφανώς μικρότερη σε σχέση με τα άλλα μέρη της μηχανής. Στον πίνακα 7.3 παρουσιάζονται οι μέσες θερμοκρασίες στα επιμέρους σώματα του κινητήρα. Στο σχήμα 7.5β απεικονίζεται η κατανομή της θερμοκρασίας στο περιβάλλον προκειμένου να αναδειχθεί η οριακή συνθήκη που τέθηκε στα άκρα του προβλήματος.

Στο σχήμα 7.6α παρουσιάζεται η κατανομή της πυκνότητας θερμοροής στην κάθετη τομή του κινητήρα. Η πυκνότητα ροής θερμότητας είναι ο ρυθμός θέρμανσης ανά μονάδα επιφάνειας, στην οποία γίνεται μετάδοση θερμότητας από ένα σώμα μεγαλύτερης θερμοκρασίας προς ένα άλλο μικρότερης. Παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη τιμή θερμοροής στο εσωτερικό του σύγχρονου κινητήρα παρατηρείται στο στάτη και στο κέλυφος της μηχανής. Αυτό οφείλεται αφενός στην υψηλή θερμική αγωγιμότητα του σιδήρου και του αλουμινίου και αφετέρου στο γεγονός ότι τα τυλίγματα αλλά και ο δρομέας έχουν υψηλότερη θερμοκρασία από το στάτη και το κέλυφος με αποτέλεσμα να έχουμε ροή θερμότητας προς αυτά. Αντίθετα στις περιοχές όπου υπάρχει αέρας και μονωτικό χαρτί δεν παρατηρείται ροή θερμότητας, λόγω των ιδιοτήτων τους, που τα καθιστά μη αγώγιμα μέσα μετάδοσης θερμότητας. Παρατηρείται, επίσης, ότι η ροή θερμότητας στον δρομέα είναι ελάχιστη, όμως στην εξωτερική πλευρά του μαγνήτη υπάρχει απότομη αύξηση της ροής θερμότητας που οφείλεται στη μεγάλη τιμή πυκνότητας απωλειών των μαγνητών.

Στο σχήμα 7.6β παρουσιάζεται η κατανομή της παραγώγου της θερμοκρασίας. Από αυτό το σχήμα γίνεται εμφανές ότι αξιοσημείωτη μεταβολή της θερμοκρασίας υπάρχει μόνο στις περιοχές του κινητήρα όπου υπάρχει θερμική μόνωση και



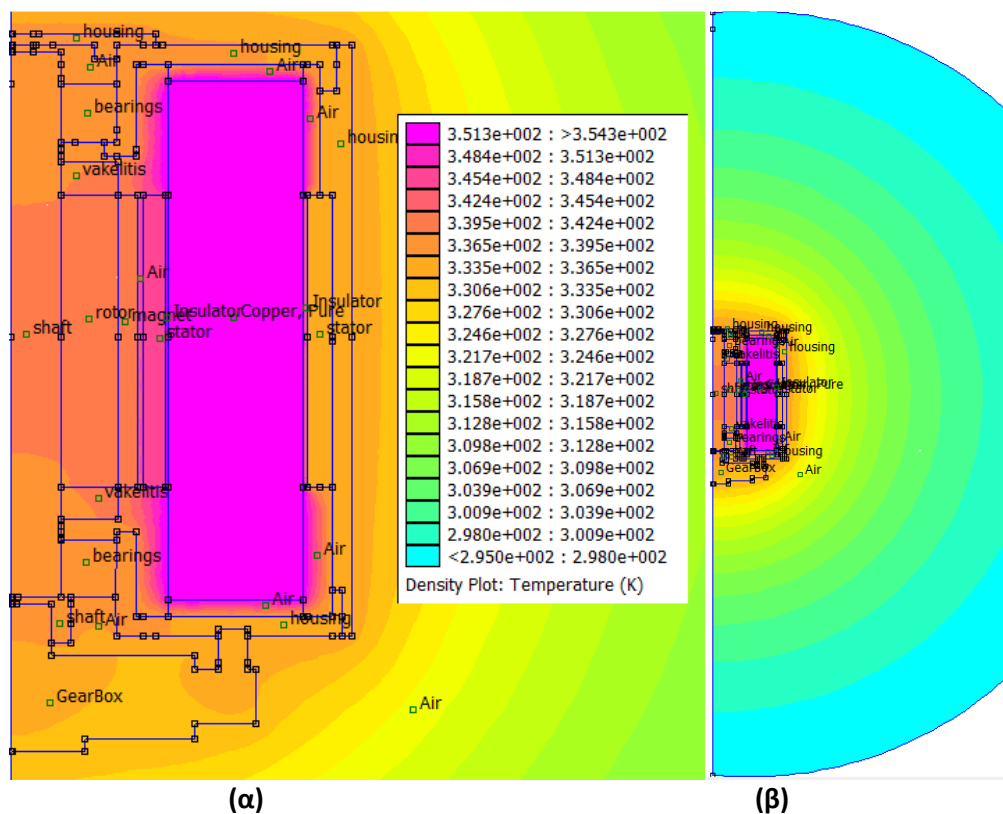
Σχήμα 7.6 – (α) Κατανομή πυκνότητας θερμοροής στη κάθετη τομή του κινητήρα, (β) Κατανομή μεταβολής θερμοκρασίας στη κάθετη τομή

συγκεκριμένα στο διάκενο, στον αέρα που περιβάλλει τα πηνία του στάτη και στα μονωτικά χαρτιά αυτών. Αυτό συμβαίνει λόγω της μονωτικής ικανότητας του αέρα και του έντονου θερμικού πεδίου τόσο στα τυλίγματα, όσο και στους μαγνήτες και τον στάτη.

7.2.4.3.2 Τομή παράλληλα στον άξονα της μηχανής

Το σχήμα 7.7 απεικονίζει τα αποτελέσματα της θερμοκρασιακής κατανομής του κινητήρα σε τομή παράλληλη ως προς τον άξονα της μηχανής. Σύμφωνα με αυτά, παρατηρείται ότι η μέγιστη θερμοκρασία εμφανίζεται στα τυλίγματα του στάτη, λόγω των υψηλών απωλειών χαλκού. Η θερμοκρασία στο δρομέα είναι αρκετά υψηλή, με την θερμοκρασία στον άξονα, το σίδηρο και τους μαγνήτες να διατηρείται σε παρόμοια επίπεδα. Επιπλέον, βλέπουμε ότι η θερμοκρασία στο σώμα του στάτη, στο κέλυφος και στο πλανητικό σύστημα μετάδοσης βρίσκεται σε πιο χαμηλά επίπεδα και αυτό οφείλεται στο μηχανισμό συναγωγής με τον περιβάλλοντα αέρα.

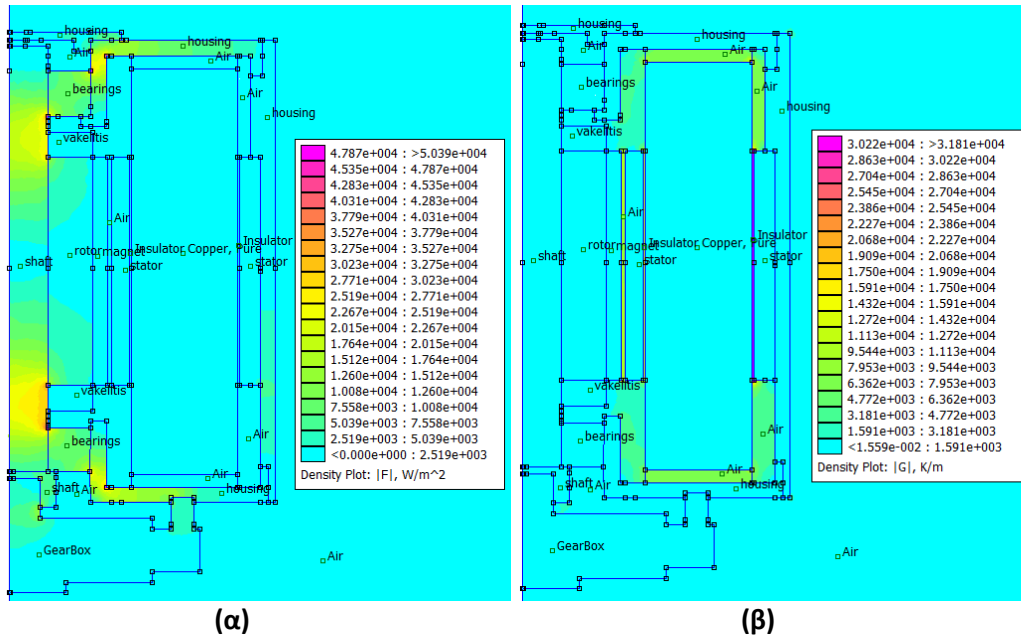
Βάσει των αποτελεσμάτων του σχήματος 7.8 διακρίνεται ότι δεν υπάρχει ροή θερμότητας από τα τυλίγματα προς τα άλλα μέρη του κινητήρα, λόγω των μονωτικών ικανοτήτων του αέρα και του μονωτικού χαρτιού που τοποθετείται ανάμεσα στο τυλίγμα και στο σώμα στάτη. Αντίθετα, παρατηρείται έντονη θερμοροή λόγω των απωλειών δινορρευμάτων των μαγνητών διαμέσου του άξονα και των ρουλεμάν στο κέλυφος του κινητήρα και το πλανητικό σύστημα γραναζιών. Η τελευταία



Σχήμα 7.7 – (α) Θερμοκρασιακή κατανομή κινητήρα σε τομή παράλληλη με τον άξονα, (β) Θερμοκρασιακή κατανομή στο περιβάλλον του κινητήρα

Πίνακας 7.4 – Θερμοκρασίες συνιστώσων κινητήρα σε τομή παράλληλη με τον άξονα

Συνιστώσα κινητήρα	Θερμοκρασία (°C)
Άξονας δρομέα	66,7
Μαγνήτες	67,3
Τυλίγματα στάτη	81,3
Πυρήνα στάτη	63,4
Κέλυφος	63,2

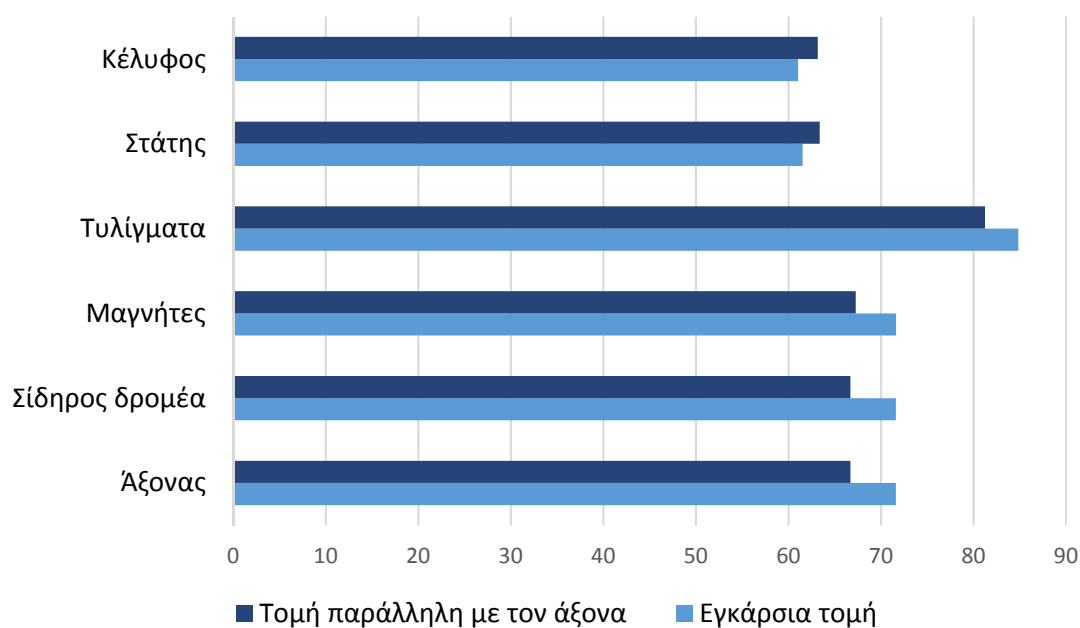


Σχήμα 7.8 – (α) Κατανομή πυκνότητας θερμορροής παράλληλης με τον άξονα τομής, (β) Κατανομή της μεταβολής της θερμοκρασία στην παράλληλη τομή

επιτυγχάνεται λόγω των πολύ καλών θερμικών αγωγιμοτήτων του αλουμινίου και του σιδήρου. Όσον αφορά τη μεταβολή της θερμοκρασίας, αυτή είναι αυξημένη εκεί που υπάρχει υλικό με μονωτικές ιδιότητες, όπως ο αέρας που περιβάλλει τα πηνία του τυμπάνου της μηχανής. Στον πίνακα 7.4 παρατηρείται η μέση θερμοκρασία ανά συνιστώσα του κινητήρα.

7.2.4.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων δισδιάστατης ανάλυσης

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των δύο μεθόδων τομής της γεωμετρίας για τη δισδιάστατη θερμική ανάλυση. Παρατηρήθηκε ότι οι δύο αναλύσεις βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με τα αποτελέσματα να φαίνονται στο σχήμα 7.9. Παρατηρείται ότι οι θερμοκρασίες σε τομή κάθετα στον άξονα περιστροφής είναι λίγο μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές της θερμικής ανάλυσης σε τομή παράλληλα στον άξονα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην πρώτη περίπτωση, λόγω της τοπολογίας, αμελείται η απαγωγή της θερμότητας από τα άκρα της μηχανής.



Σχήμα 7.9 – Σύγκριση αποτελεσμάτων θερμικής ανάλυσης δύο διαστάσεων με εγκάρσια τομή και τομή παράλληλη στον άξονα.

7.2.5 Τρισδιάστατη Θερμική Ανάλυση

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί η μεταβατική θερμική ανάλυση του κινητήρα σε τρεις διαστάσεις με χρήση κατάλληλης μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Θα υπολογιστούν, δηλαδή, οι θερμοκρασίες και άλλες θερμικές ποσότητες συναρτήσει του

Πίνακας 7.5 – Συντελεστές συναγωγής ανά συνιστώσα κινητήρα

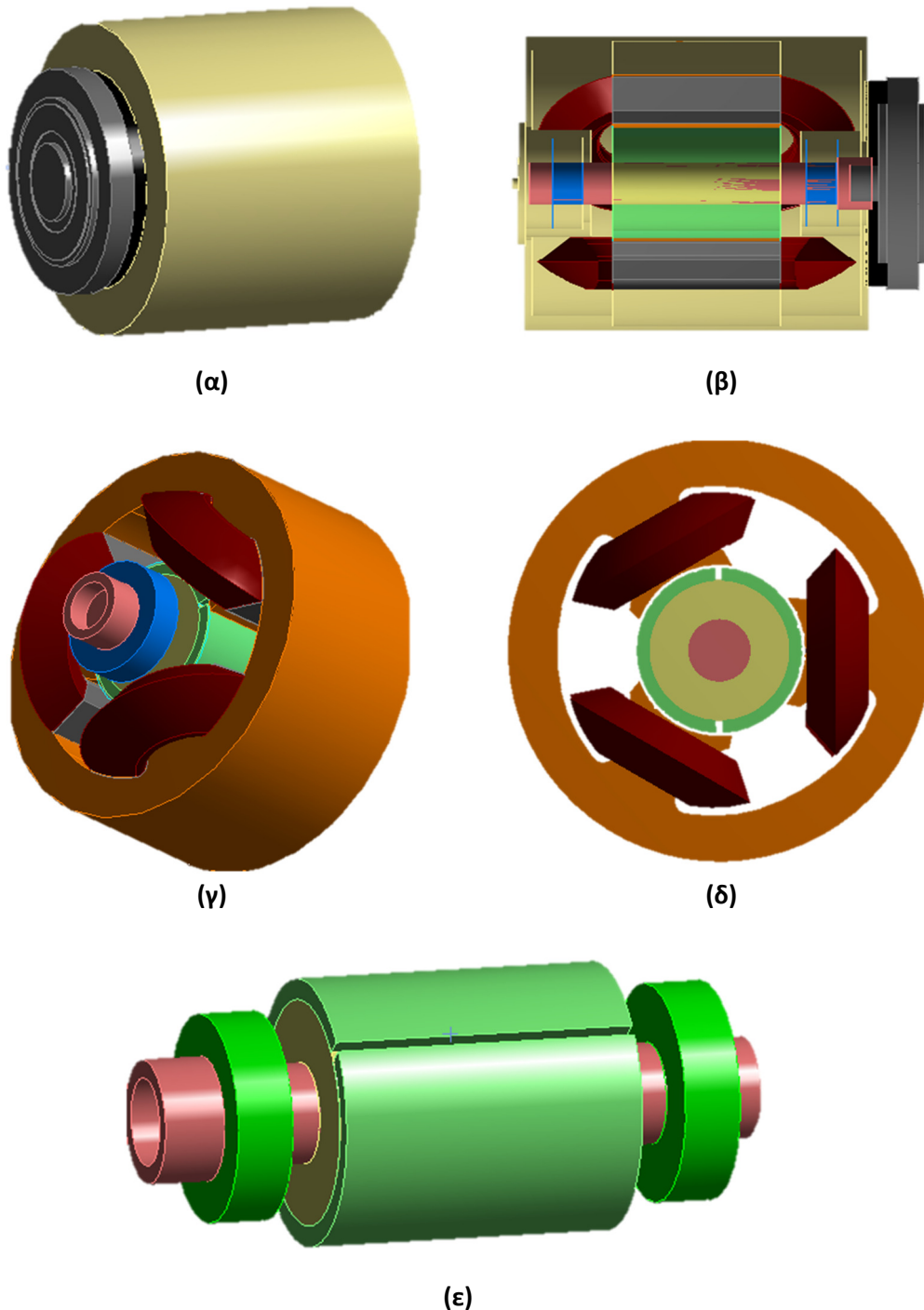
Συνιστώσα κινητήρα	Συντελεστής συναγωγής (W/(m ² ·K))
Μαγνήτες	5
Στάτης	10
Κέλυφος	20
Τυλίγματα	5
Έδρανα-Άξονας	10

Πίνακας 7.6 – Χρωματικές αντιστοιχίες 3D γεωμετρίας

Συνιστώσα κινητήρα	Χρώμα
Άξονας	Κόκκινο
Σίδηρος δρομέα	Κίτρινο
Μόνιμοι μαγνήτες	Πράσινο
Έδρανα	Μπλε
Τυλίγματα	Καφέ
Μόνωση	Γκρίζο
Σίδηρος στάτη	Πορτοκαλί
Κέλυφος	Μπεζ
Πλανητικό σύστημα γραναζιών	Σκούρο γκρίζο

χρόνου. Η ανάλυση αυτή συνιστά την πιο ακριβή μέθοδο για τον υπολογισμό της θερμοκρασιακής κατανομής μιας ηλεκτρικής μηχανής καθώς λαμβάνεται υπόψη το σύνολο της γεωμετρίας. Η τελευταία απεικονίζεται στο σχήμα 7.10 και οι συντελεστές συναγωγής που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον πίνακα 7.5. Στο σχήμα 7.6 μπορεί να παρατηρηθεί η χρωματική αντιστοιχία με τις συνιστώσες του κινητήρα για την καλύτερη κατανόηση του σχήματος 7.10.

Στο σχήμα 7.10β παρουσιάζεται η μορφή του κινητήρα σε τομή παράλληλα με τον άξονα, ενώ στο σχήμα 7.10δ σε τομή εγκάρσια στον άξονα της μηχανής. Παρατηρούμε ότι οι τομές αυτές είναι ταυτόσημες με αυτές που εξετάστηκαν στο δυσδιάστατο

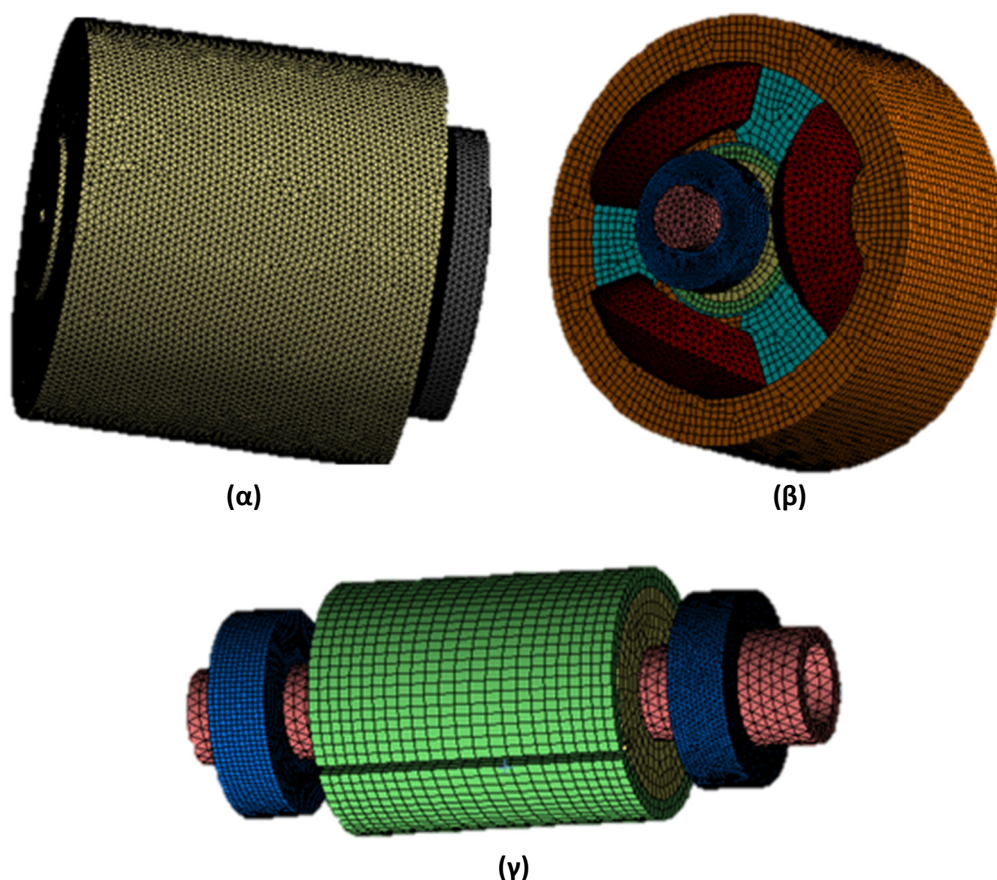


Σχήμα 7.10 – 3D γεωμετρία μηχανής - είσοδος θερμικής ανάλυσης.

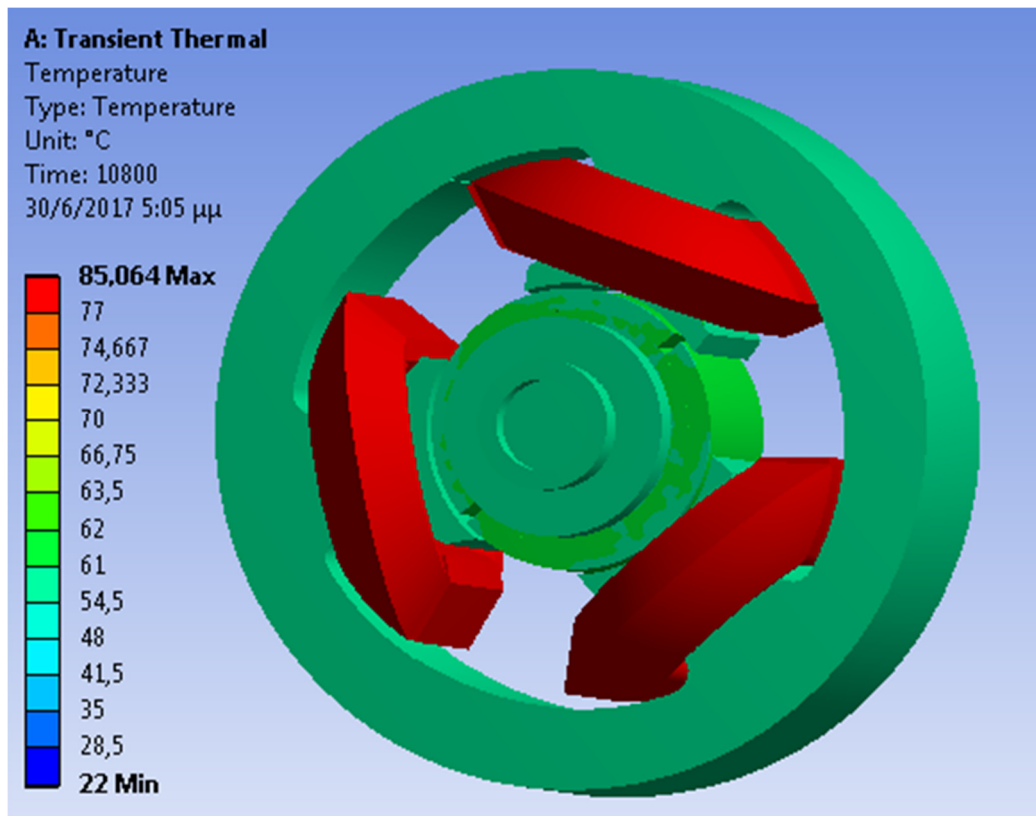
μοντέλο. Στα σχήματα 7.10γ και 7.10ε φαίνονται η εσωτερική όψη της μηχανής και ο δρομέας της αντίστοιχα. Στο σχήμα 7.11 φαίνεται το πλέγμα της μηχανής για διάφορες προοπτικές απεικονίσεις. Ο αριθμός των κόμβων εδώ είναι 30 φορές μεγαλύτερος από ότι στη περίπτωση των δύο διαστάσεων, ενώ τα στοιχεία είναι 14 φορές περισσότερα. Η πυκνότητα του πλέγματος κρίνεται επίσης επαρκής για την αποτύπωση του θερμικού φαινομένου. Οι πηγές θερμότητας καθορίζονται βάσει των απωλειών των επιμέρους τμημάτων της μηχανής και τίθενται και εδώ βάσει των τιμών του πίνακα 7.2.

Ο χρονικός ορίζοντας της προσομοίωσης του θερμικού φαινομένου τέθηκε στις 3 ώρες. Στο σχήμα 7.12 φαίνεται η τελική θερμοκρασιακή κατανομή στο εσωτερικό του κινητήρα μόνιμων μαγνητών, όπου μπορούμε εύκολα να διακρίνουμε τα θερμότερα μέρη της μηχανής. Παρατηρείται, όπως και στο μοντέλο δύο διαστάσεων, ότι τα τυλίγματα του στάτη αποτελούν το πιο θερμό μέρος της μηχανής λόγω των υψηλών απωλειών χαλκού και λόγω του μονωτικού υλικού που εκτός από ηλεκτρική μόνωση, επιβάλλει και θερμική.

Στο σχήμα 7.13 παρουσιάζεται η μεταβατική θερμοκρασιακή μεταβολή στις επιμέρους συνιστώσες της μηχανής. Παρατηρείται ότι η θερμική σταθερά χρόνου της μηχανής λαμβάνει εξαιρετικά μεγάλες τιμές, καθώς μετά από 3 ώρες θέρμανσης αρχίζει να σταθεροποιείται η τιμή της θερμοκρασίας. Επίσης, όπως είναι φυσικό, η θερμοκρασία των ελιγμάτων είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή του κελύφους. Επίσης, οι μέγιστες τιμές αυτής είναι αρκετά μικρότερες από τα όρια που τίθενται σε κάθε υλικό, οπότε σε αυτή τη κατάσταση λειτουργίας εξασφαλίζεται η αξιοπιστία της

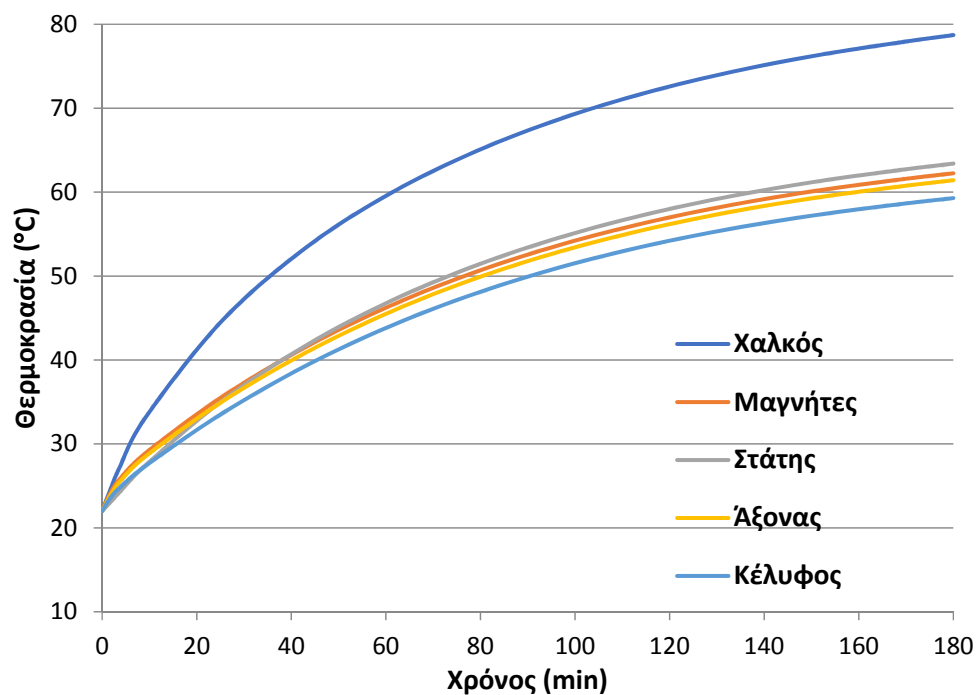


Σχήμα 7.11 – Πλέγμα επίλυσης προβλήματος με προοπτική απεικόνιση για: (α) το σύνολο της μηχανής, (β) τη μηχανή χωρίς το κέλυφος αλουμινίου, (γ) τον δρομέα

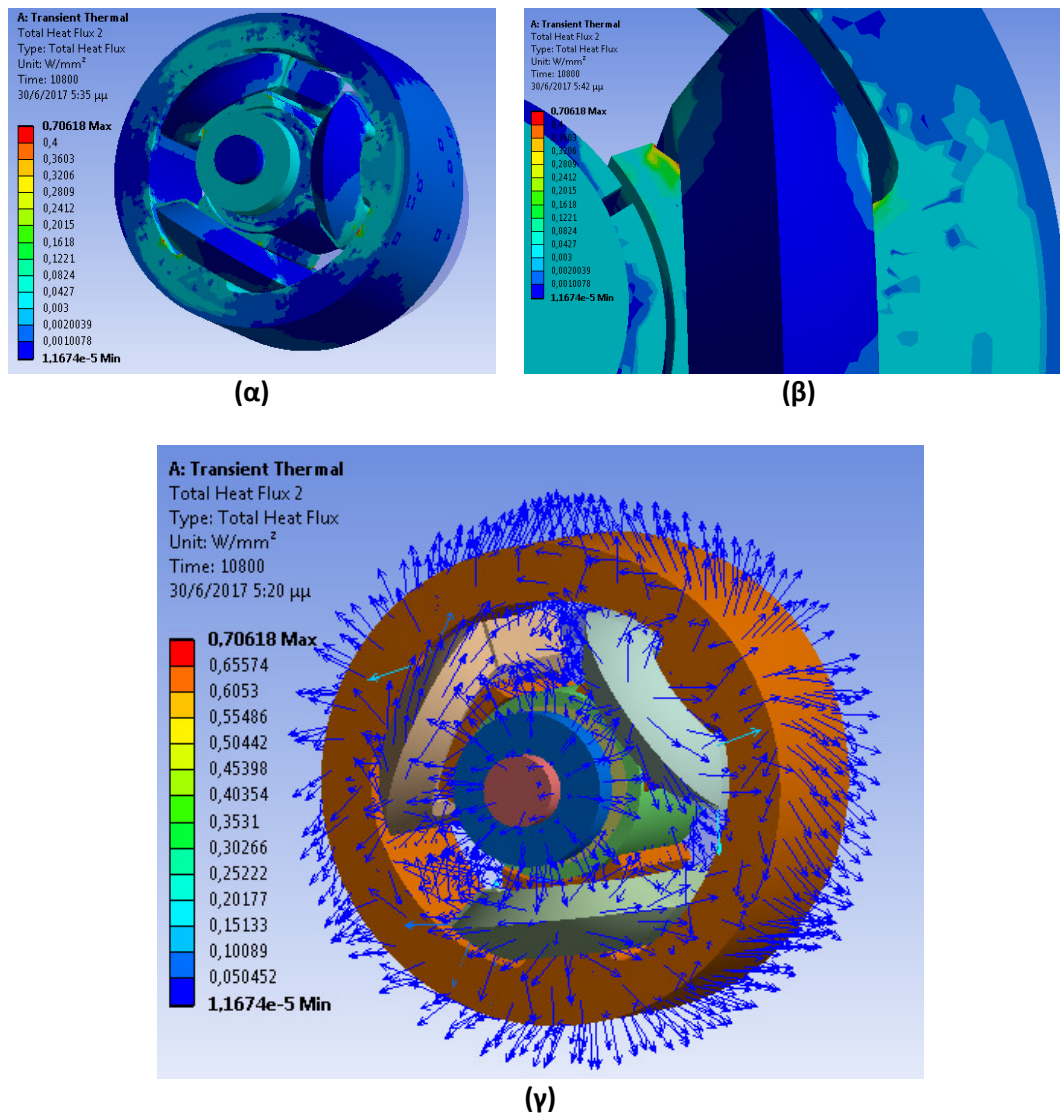


Σχήμα 7.13 – Κατανομή θερμοκρασίας στο εσωτερικό της μηχανής

μηχανής. Παρακάτω (σχήμα 7.14) μπορούν να διακριθούν τα διαγράμματα θερμοροής για τον εν λόγω κινητήρα. Η μεγαλύτερη τιμή αυτής διακρίνεται στις επιφάνειες που εφάπτονται των πηνίων στο σίδηρο του στάτη, καθώς και στο δρομέα σαν σύνολο, όπου γίνεται προσπάθεια απαγωγής της υψηλής πυκνότητας απωλειών των μαγνητών μέσω



Σχήμα 7.12 – Μεταβατική θερμοκρασιακή μεταβολή επιμέρους συνιστωσών κινητήρα

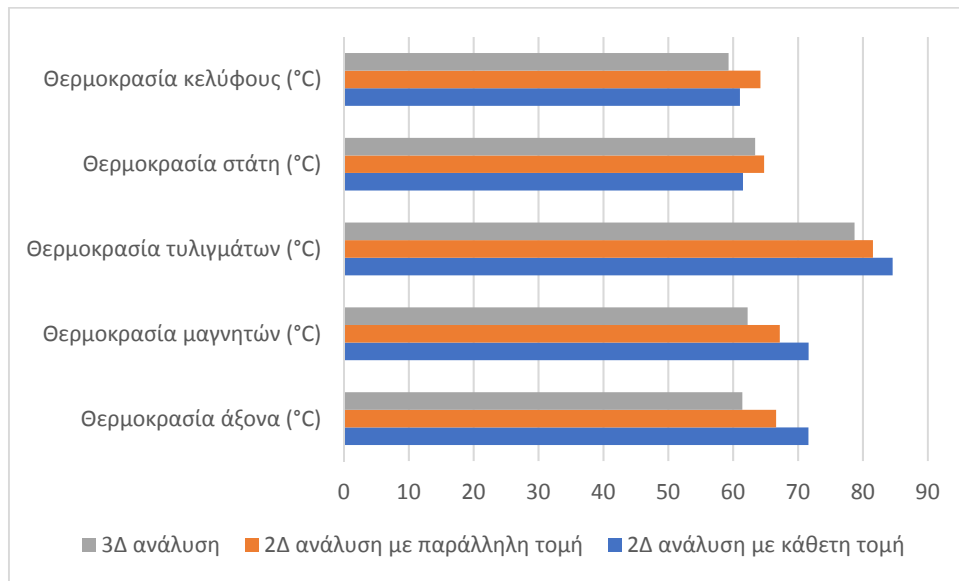


Σχήμα 7.14 – (α) Κατανομή θερμοροής στο εσωτερικό του κινητήρα, (β) λεπτομέρεια της κατανομής θερμοροής στο δόντι της μηχανής, (γ) διεύθυνση διανυσμάτων θερμοροής στο 3D χώρο

των αγωγίμων μέσων. Στο ίδιο σχήμα μπορούν να διακριθούν οι κατευθύνσεις της θερμικής απαγωγής, οι οποίες έχουν διεύθυνση προς το εξωτερικό του κινητήρα. Ή αλλιώς, ότι υπάρχει ροή θερμότητας από τα θερμότερα υλικά στα ψυχρότερα.

7.2.6 Σύγκριση προσομοιωμένων αποτελεσμάτων

Στο σχήμα 7.15 παρουσιάζεται η σύνοψη των αποτελεσμάτων της θερμικής ανάλυσης της σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών με βάση τις τρεις μεθόδους που αναπτύχθηκαν. Παρατηρείται ότι δεν υφίστανται μεγάλες αποκλίσεις, εξαιρουμένης της θερμοκρασίας του δρομέα, όπου έχουμε απόκλιση 10°C μεταξύ του τρισδιάστατου μοντέλου και του δισδιάστατου σε τομή κάθετη στον άξονα περιστροφής. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς σε τομή εγκάρσια στον άξονα περιστροφής, ο δρομέας περιβάλλεται μόνο από τον αέρα του διακένου, αγνοώντας δηλαδή τον εφαπτόμενο αέρα στα πάνω και κάτω άκρα της μηχανής.



Σχήμα 7.15 – Σύγκριση τελικών θερμοκρασιών των συνιστωσών της μηχανής με βάση τις τρεις μεθόδους

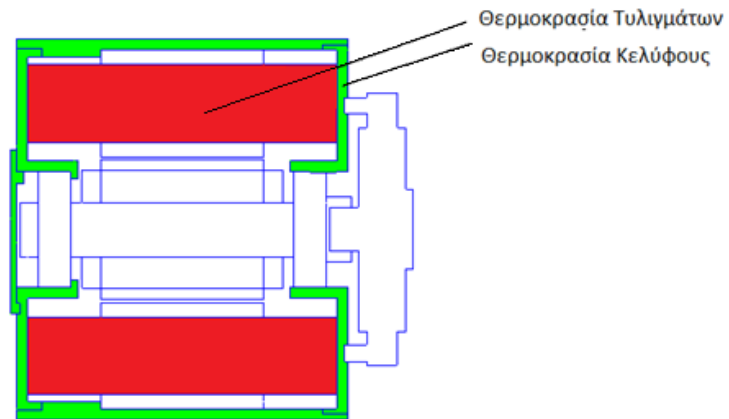
7.2.7 Πειραματική Επιβεβαίωση

7.2.7.1 Πειραματική διάταξη

Για την πειραματική επιβεβαίωση της θερμικής ανάλυσης του σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών, χρησιμοποιήθηκαν επαφές θερμίστορ PTC για λήψη θερμοκρασιών σε δύο σημεία του κινητήρα, σύμφωνα με το σχήμα 7.16. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με ακίνητο δρομέα. Τα τυλίγματα του στάτη συνδέθηκαν σε αστέρα και τροφοδοτήθηκαν από έναν αυτομετασχηματιστή μέσω αντιστάσεων που επέτρεπαν στη τιμή του ρεύματος να είναι η ίδια και στις τρεις φάσεις. Οι μετρήσεις λήφθηκαν με τη βοήθεια ψηφιακών πολυμέτρων με είσοδο PTC. Το ρεύμα που διαρρέει το κάθε τύλιγμα του κινητήρα ρυθμίστηκε μέσω του αυτομεσχηματιστή στα 6 A.

7.2.7.2 Σύγκριση μεθόδων προσομοίωσης με πειραματικά αποτελέσματα

Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει σύγκριση των θερμικών πειραματικών μετρήσεων που λήφθηκαν στον εργαστήριο, με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, τόσο για την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, όσο και για τη μεταβατική. Στο σχήμα 7.17 απεικονίζονται οι καμπύλες της θερμοκρασιακής μεταβολής λόγω θέρμανσης που λήφθηκαν τόσο μέσω της 3Δ ανάλυσης όσο και μέσω των πειραματικών μετρήσεων. Παρατηρούμε ότι η ταύτιση είναι πολύ καλή και το σφάλμα δεν υπερβαίνει του 2-3 βαθμούς κελσίου. Αξιοσημείωτη είναι και η μεγάλη χρονική σταθερά θέρμανσης της μηχανής, καθώς μετά από 3 ώρες θέρμανσης αρχίζει να σταθεροποιείται η θερμοκρασία. Στο σχήμα 7.18 παρατίθενται οι θερμοκρασίες του τυλιγματος στάτη και του κελύφους του κινητήρα στη μόνιμη κατάσταση.



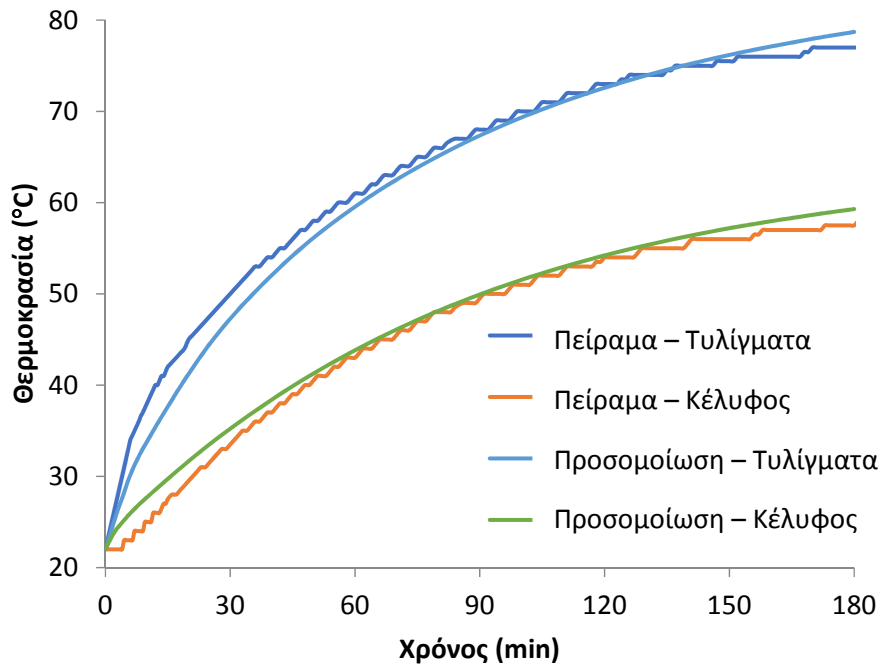
(α)



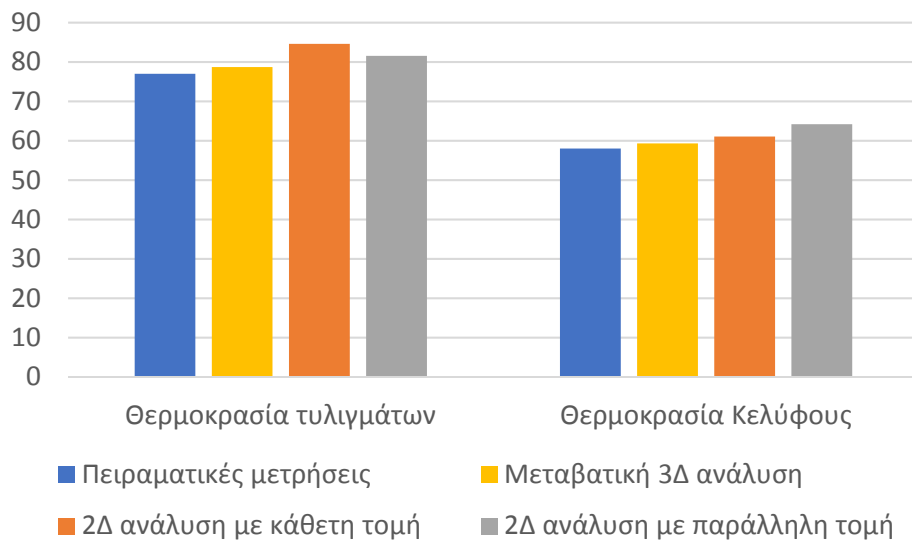
(β)

Σχήμα 7.16 – (α) Σημεία τοποθέτησης ΡΤC, (β) Πειραματική διάταξη

Παρατηρείται ότι οι τελικές θερμοκρασίες που προέκυψαν πειραματικά, είναι σε καλή συμφωνία με αυτές που λήφθηκαν μέσω της 3Δ μεταβατικής ανάλυσης. Αντίθετα, υπάρχει μικρή διαφορά με τις αντίστοιχες θερμοκρασίες που προέκυψαν από τη 2Δ ανάλυση. Το αποτέλεσμα κρίνεται αναμενόμενο καθώς σε δυσδιάστατη μοντελοποίηση δεν λαμβάνονται υπόψη ορισμένες περιοχές του κινητήρα όπως, για παράδειγμα, τα άκρα των τυλιγμάτων και το κέλυφος πάνω και κάτω.



Σχήμα 7.17 – Σύγκριση θερμοκρασιακής μεταβολής τυμπάνου και κελύφους μηχανής κατά τη θέρμανση.

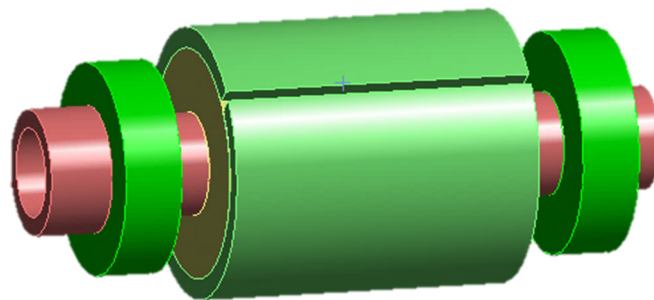


Σχήμα 7.18 – Σύγκριση τελικών θερμοκρασιών μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης.

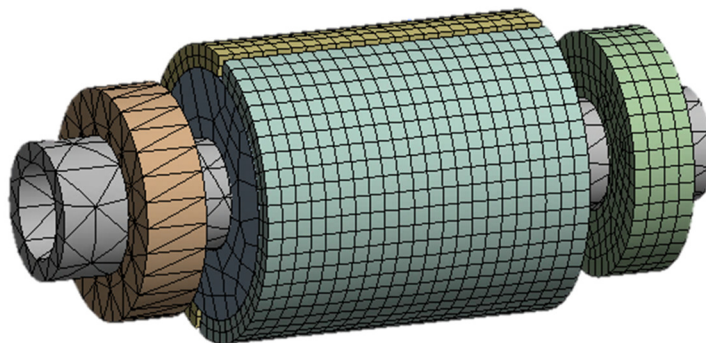
7.3 Αξονοδυναμική ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Η αξονοδυναμική ανάλυση αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της διαδικασίας σχεδιασμού μίας ηλεκτρικής μηχανής υψηλής ταχύτητας. Οι ιδιοσυχνότητες του δρομέα μπορεί να προκαλέσουν καταστροφή της μηχανής αν συμπέσουν με συχνότητες περιστροφής ή αρμονικών της ροπής. Η σωστή τους μοντελοποίηση επιτρέπει, συνεπώς, τον κατάλληλο σχεδιασμό της γεωμετρίας, βάσει των λειτουργικών προδιαγραφών της μηχανής. Πρακτικά, δίδεται προσοχή ώστε να μην ταυτιστεί κάποια ιδιοσυχνότητα του δρομέα της μηχανής με την συχνότητα της ταχύτητας περιστροφής. Εάν κάποια ιδιοσυχνότητα βρίσκεται ανάμεσα στη μηδενική και την ονομαστική συχνότητα περιστροφής, τότε γίνεται ιδιαίτερη φροντίδα ώστε να επιταχυνθεί γρήγορα η μηχανή προκειμένου να μην παραμείνει για σημαντικό χρονικό διάστημα σε συντονισμό. Αυτές οι ταχύτητες του δρομέα αναφέρονται ως κρίσιμες ταχύτητες και εκείνες που συνδέονται με καμπτικούς τρόπους ταλάντωσης είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες. Μία δεύτερη κατηγορία δονήσεων, οι αυτοδιεγερόμενες, καθιστούν την περιστροφή αδύνατη, αφού είναι ασταθείς και πάντοτε αρχίζουν μετά από μια συγκεκριμένη ταχύτητα κατωφλίου. [74]

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων καθιστά δυνατό τον προσδιορισμό των φυσικών συχνοτήτων και των τρόπων ταλάντωσης με μεγάλη ακρίβεια ανεξάρτητα από τη μορφή της γεωμετρίας. Έτσι, μπορεί να συνεκτιμηθεί η επιρροή βασικών παραμέτρων σχεδιασμού, όπως το ενεργό μήκος του δρομέα, το μήκος του άξονα και οι αντίστοιχες ιδιότητες των υλικών. Στη παρούσα ενότητα επιχειρείται η τρισδιάστατη αξονοδυναμική ανάλυση του δρομέα του διπολικού κινητήρα μονίμων μαγνητών που



Σχήμα 7.19 – 3D γεωμετρία δρομέα



Σχήμα 7.20 – Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων δρομέα

Πίνακας 7.7 - Γεωμετρικές διαστάσεις δρομέα

Μέγεθος	Τιμή (mm)
Ακτίνα άξονα	7,3
Ακτίνα πυρήνα	16,3
Ακτίνα μαγνητών	19,6
Συνολικό μήκος άξονα	91
Μήκος ενεργού μέρους	45
Διάμετρος ρουλεμάν	16

Πίνακας 7.8 – Ιδιότητες υλικών δρομέα

Συνιστώσα	Υλικό	Πυκνότητα (kg/m ³)	Young's Modulus (MPa)	Poisson ratio
Άξονας	Αλουμίνιο	2770	71000	0,33
Πυρήνας	Σίδηρος	7860	210000	0,3
Μαγνήτες	Νεοδύμιο	7400	160000	0,24
Ρουλεμάν	Ατσάλι	6040	200000	0,3

σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στα πλαίσια της εργασίας του κεφαλαίου 5. Στο τέλος της ενότητας παρουσιάζεται και η πειραματική επιβεβαίωση της διαδικασίας.

7.3.1 Μοντελοποίηση και ανάλυση δρομέα

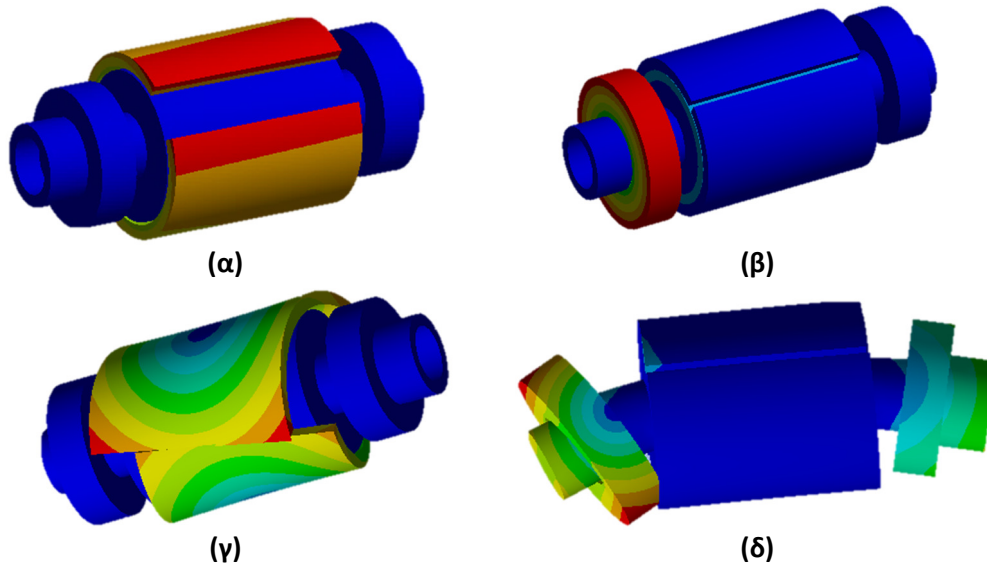
Για την αξονοδυναμική ανάλυση του δρομέα του σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών που εξετάζουμε, αρχικά σχεδιάστηκε η γεωμετρία που απεικονίζεται στο σχήμα 7.19. Οι διαστάσεις αυτής αναγράφονται στον πίνακα 7.7 και οι ιδιότητες των υλικών της στον πίνακα 7.8. Η πυκνότητα του πλέγματος των στοιχείων επίλυσης παρουσιάζεται επίσης στο σχήμα 7.20. Ακολούθως καθορίστηκαν τα είδη των επαφών στις διάφορες συνιστώσες του δρομέα, επιτρέποντας την κατάλληλη ολίσθηση ή/και περιστροφή των σωμάτων μεταξύ τους. Παράμετρος των αναλύσεων είναι και η

Πίνακας 7.9 – Ιδιοσυχνότητες δρομέα

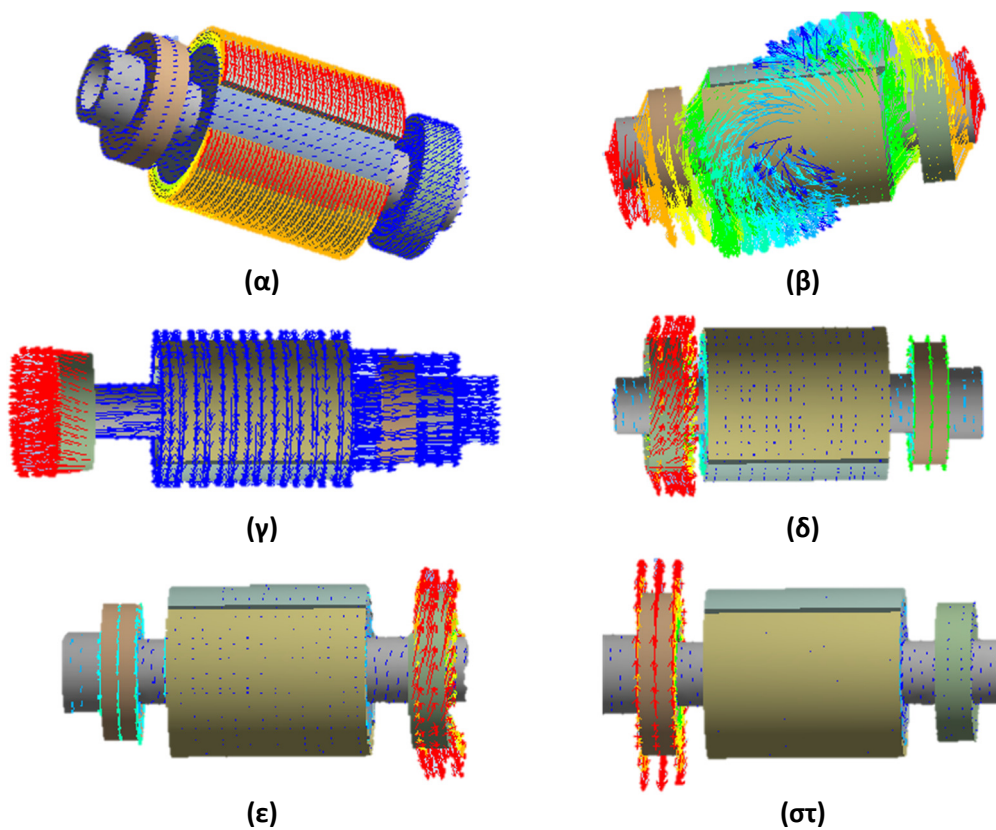
Τρόπος ταλάντωσης	Συχνότητα (Hz)	Τρόπος ταλάντωσης	Συχνότητα (Hz)
1	3,27E-03	11	69,5
2	4,37E-03	12	99,1
3	0	13	196,3
4	0	14	2149,1
5	1,52E-02	15	2290,0
6	19,7	16	7050,2
7	20,5	17	7079,7
8	21,5	18	8902,3
9	26,1	19	9044,2
10	36,0	20	15316,0

ταχύτητα περιστροφής του δρομέα καθώς λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του γυροσκοπικού φαινομένου.

Για μηδενική ταχύτητα περιστροφής απεικονίζονται στον πίνακα 7.9 οι ιδιοσυχνότητες του δρομέα για τους πρώτους 20 τρόπους ταλάντωσης. Παρατηρούμε ότι από τον 13^ο τρόπο ταλάντωσης και πάνω, οι ιδιοσυχνότητες είναι μεγαλύτερες από



Σχήμα 7.21 – Τρόποι ταλάντωσης δρομέα ιδιοσυχνότητας: (α)21,5Hz (β)196,3Hz (γ)2149Hz (δ)7050Hz

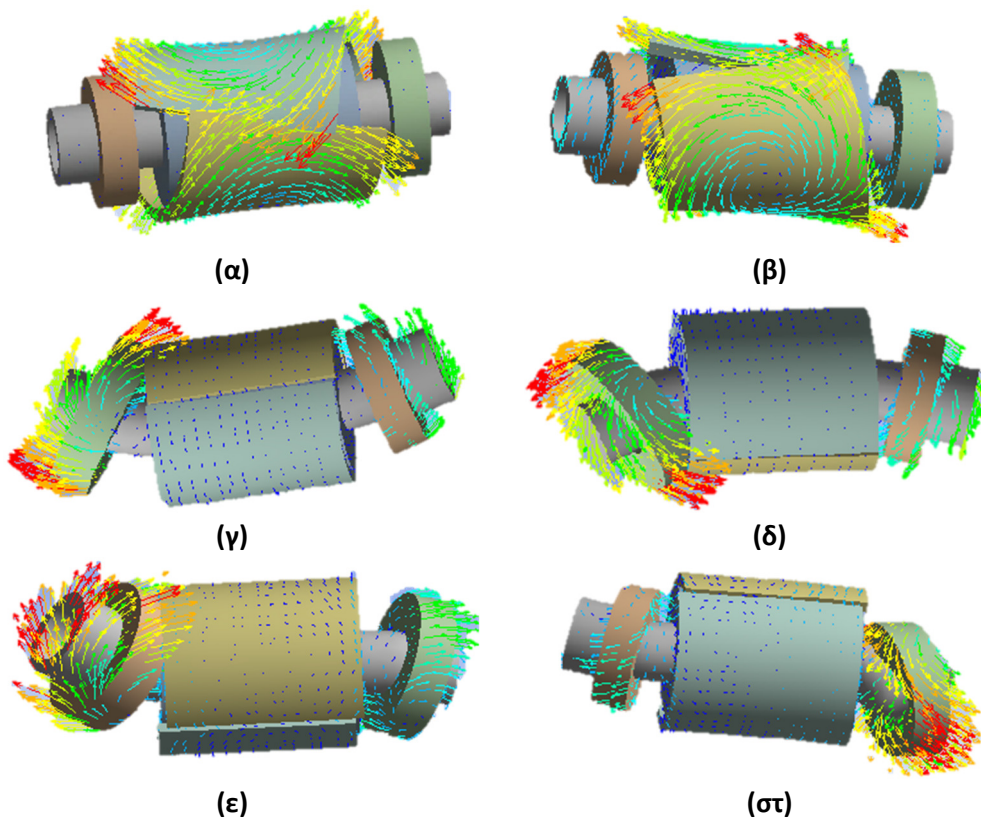


Σχήμα 7.22 - Άκαμπτες δονήσεις δρομέα ιδιοσυχνότητας: (α) 21,5 Hz (β) 26,1 Hz (γ) 36,0 Hz (δ) 69,5 Hz (ε) 99,1 (στ) 196,3 Hz

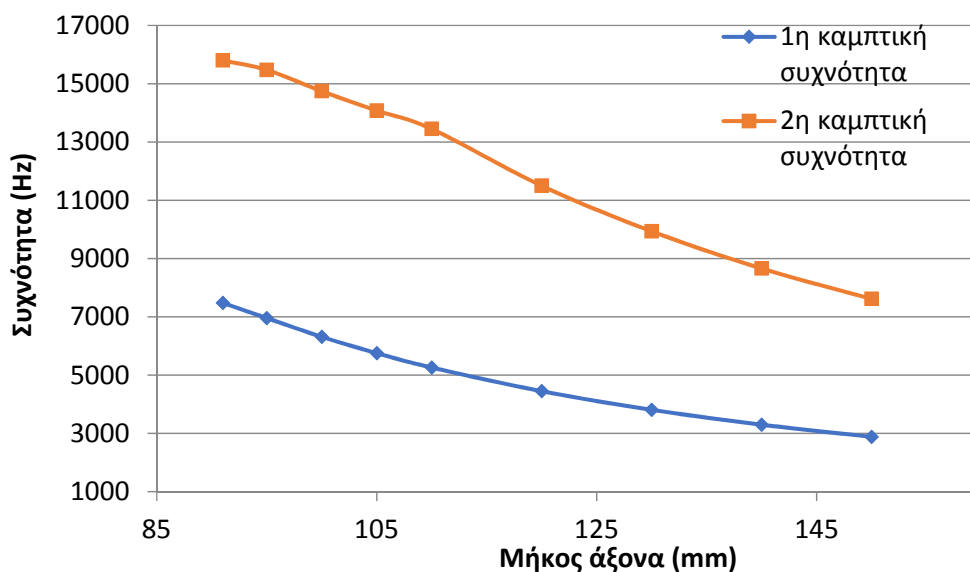
τη συχνότητα μέγιστης ταχύτητας περιστροφής της μηχανής (30.000ΣΑΛ) που αντιστοιχεί σε 500Hz. Γίνεται λοιπόν φανερό, ότι οι πρώτοι 12 τρόποι ταλάντωσης βρίσκονται εντός του εύρους ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα. Από αυτούς, οι 5 πρώτοι αφορούν εξαιρετικά χαμηλές συχνότητες που δεν είναι εφικτές, άρα δεν λαμβάνονται υπόψη για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Στο σχήμα 7.21 απεικονίζονται παραδείγματα χάριν τέσσερις τρόποι ταλάντωσης του δρομέα και οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες. Τα σχήματα 7.21α και 7.21β παραθέτουν δύο συχνότητες δονήσεων άκαμπτου τύπου και τα σχήματα 7.21γ και 7.21δ παρουσιάζουν τις πρώτες δύο καμπτικές συχνότητες. Με κόκκινο χρώμα σηματοδοτούνται οι περιοχές που θα εμφανίζουν το μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης. Οι καμπτικοί τρόποι ταλάντωσης θεωρούνται περισσότερο επικίνδυνοι από τους άκαμπτους [74] καθώς επιδρούν τόσο στο σχήμα του άξονα, όσο και στα ρουλεμάν. Αυτό έχει σαν συνέπεια να διακυβεύεται το πάχος του διακένου κατά τη περιστροφή με πιθανή την επαφή στάτη-δρομέα και την επακόλουθη καταστροφή της μηχανής.

Στα σχήματα 7.22 και 7.23 φαίνονται 12 τρόποι ταλάντωσης του δρομέα σύμφωνα με τον πίνακα 7.9. Στο μεν πρώτο απεικονίζονται άκαμπτες δονήσεις και στο δεύτερο καμπτικές. Τα βέλη δείχνουν τις παραμορφώσεις που υφίσταται σε κάθε περίπτωση το σώμα του δρομέα. Γίνεται φανερό ότι στις άκαμπτες δονήσεις ο δρομέας υφίσταται ταλάντωση που δεν παραμορφώνει το σχήμα του και που μπορεί να αποσβεστεί ευκολότερα από τα ρουλεμάν. Οι άκαμπτες δονήσεις παρουσιάζονται κυρίως σε χαμηλές συχνότητες και οι καμπτικές σε υψηλότερες [74], κάτι που επαληθεύεται και στην παρούσα εφαρμογή.



Σχήμα 7.23 – Καμπτικές δονήσεις δρομέα ιδιοσυχνότητας: (α) 2149,1 Hz (β) 2290 Hz
(γ) 7050,2 Hz (δ) 7079,7 Hz (ε) 8902,3 Hz (στ) 15316 Hz



Σχήμα 7.24 – Συσχέτιση μήκους άξονα με τις φυσικές συχνότητες

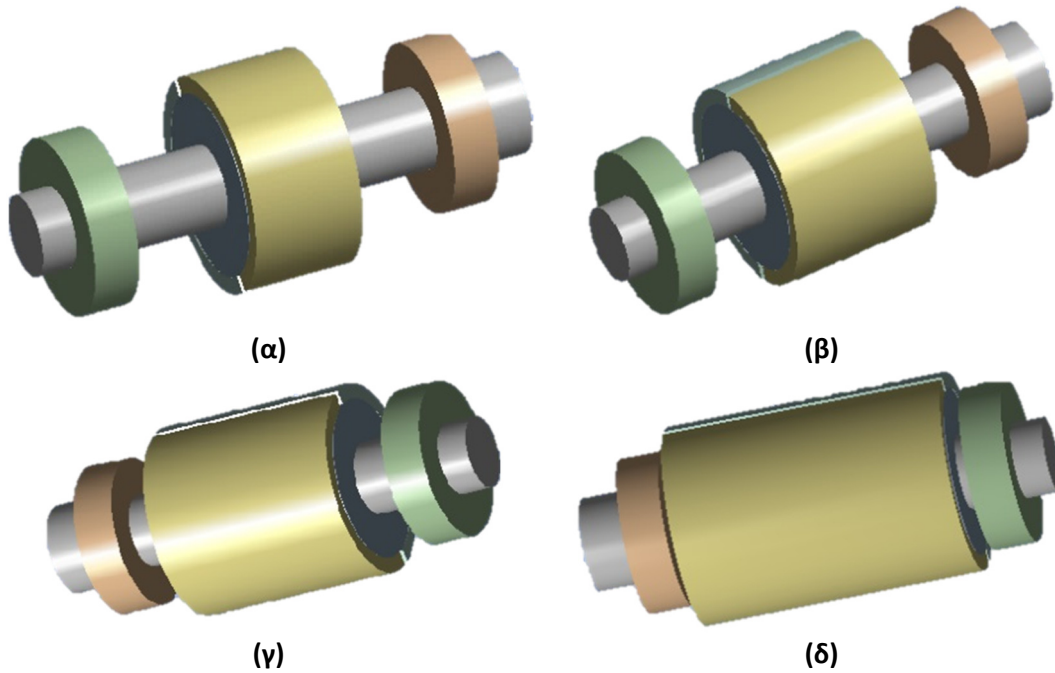
7.3.1.1 Συσχετισμός λεπτότητας άξονα με τις φυσικές συχνότητες

Η διάμετρος του δρομέα περιορίζεται από την μηχανική αντοχή και τις απώλειες λόγω τριβής αέρα (air friction losses), ενώ το μήκος του άξονα καθορίζεται από την αξονοδυναμική ανάλυση, αφού έχει σημαντικό ρόλο ως προς την μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Μεταβάλλοντας το μήκος του άξονα και κρατώντας σταθερή την διάμετρο, μεταβάλλουμε επομένως και τον δείκτη λεπτότητας $\lambda = l/d$, όπου l το μήκος του άξονα και d η διάμετρος του. Στην εφαρμογή της συγκεκριμένης ενότητας διερευνήθηκε αυτή η περίπτωση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων και τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο σχήμα 7.24. Παρατηρείται ότι με την αύξηση του μήκους του άξονα μειώνεται η τιμή της 1^{ης} και της 2^{ης} καμπτικής συχνότητας.

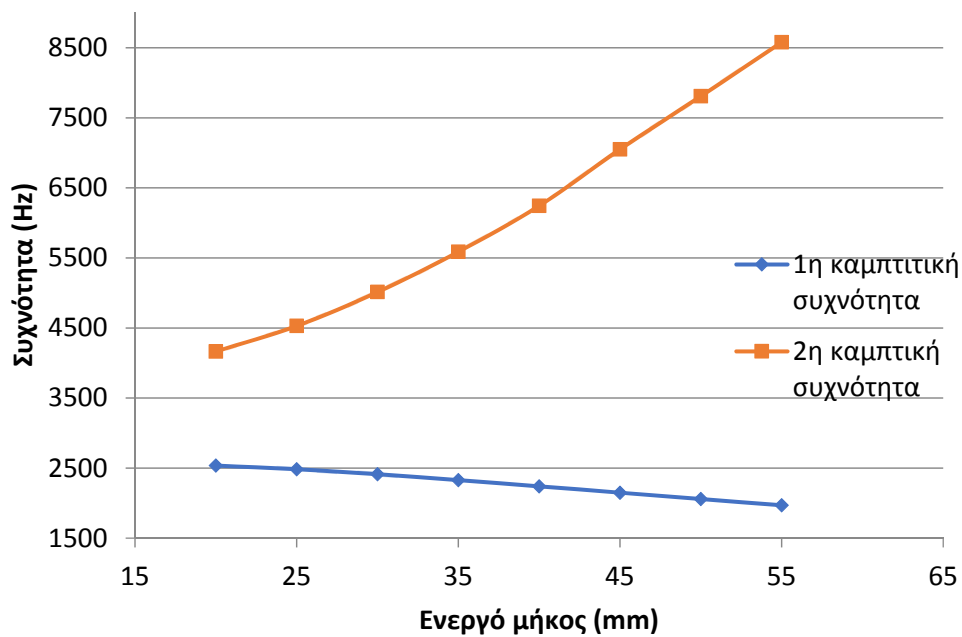
Παρατηρείται, δηλαδή, ότι ο λόγος του μήκους ως προς την διάμετρο του άξονα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο ως προς την μέγιστη επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής. Φαίνεται ότι αυξάνοντας το μήκος του άξονα και επομένως τον δείκτη λεπτότητας λ , η πρώτη και η δεύτερη καμπτική συχνότητα μειώνονται σχεδόν γραμμικά. Επομένως, για δεδομένη μέγιστη ταχύτητα μιας ηλεκτρικής μηχανής, η μέγιστη τιμή της λεπτότητας του δρομέα μπορεί να υπολογιστεί κατά την σχεδίαση, ώστε ο δρομέας να λειτουργεί σε ταχύτητα μικρότερη από την πρώτη κρίσιμη ταχύτητα. Η τιμή της πρώτης κρίσιμης ταχύτητας αποτελεί πρακτικά και το όριο της μέγιστης ταχύτητας περιστροφής της ηλεκτρικής μηχανής.

7.3.1.2 Συσχετισμός ενεργού μήκους με τις φυσικές συχνότητες

Το ενεργό μήκος του δρομέα διαδραματίζει και αυτό σημαντικό ρόλο ως προς τον καθορισμό των κρίσιμων ταχυτήτων. Στη παρούσα παράγραφο θα μεταβληθεί το ενεργό μήκος της μηχανής, δηλαδή το μήκος του πυρήνα του δρομέα και των



Σχήμα 7.25 – Γεωμετρία δρομέα για ενεργό μήκος άξονα: (α)20mm, (β)30mm, (γ)40mm, (δ)55mm



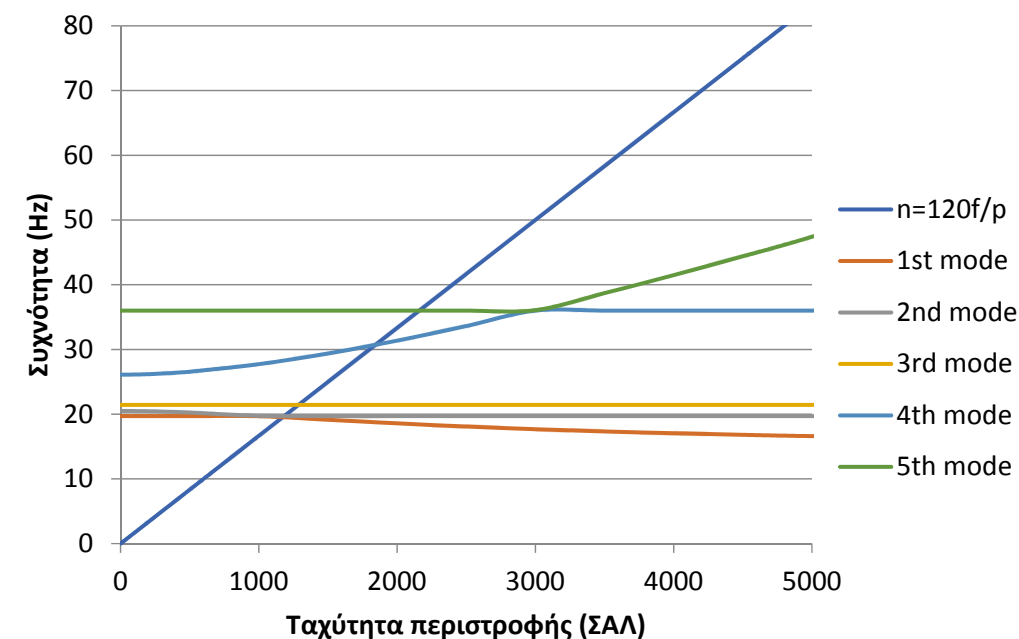
Σχήμα 7.26 – Συσχέτιση ενεργού μήκους πυρήνα με τις 2 πρώτες καμπτικές συχνότητες

μαγνητών, όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.25. Με χρήση πεπερασμένων στοιχείων θα μελετηθεί και εδώ η μεταβολή της πρώτης και της δεύτερης καμπτικής φυσικής συχνότητας. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 7.26. Διακρίνεται η μείωση της τιμής της 1^{ης} συχνότητας και η αύξηση της 2^{ης} με την αύξηση του μήκους. Η σύγκριση αυτών των αποτελεσμάτων με το σχήμα 7.23 που απεικονίζει τους τρόπους ταλάντωσης, φανερώνει ότι η αύξηση της ακαμψίας του άξονα μέσω της προσθήκης

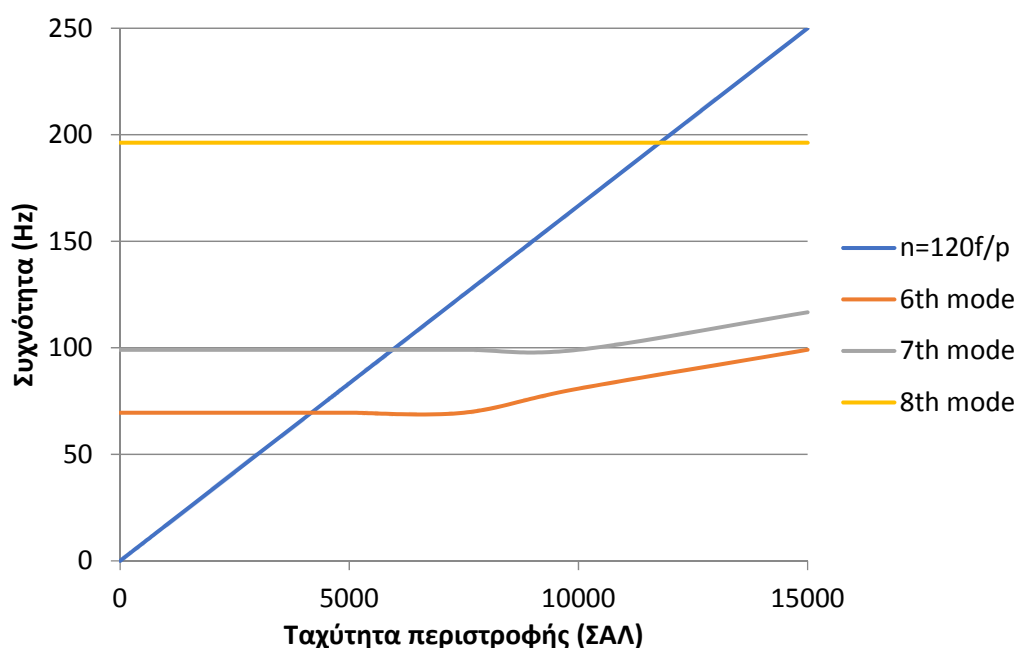
μεγαλύτερου όγκου πυρήνα μπορεί να προκαλέσει βελτίωση ή χειροτέρευση της κάθε ιδιοσυχνότητας σύμφωνα με το προφίλ της ταλάντωσης..

7.3.1.3 Διερεύνηση ταλαντώσεων χαμηλών συχνοτήτων

Στο στάδιο σχεδίασης είναι απαραίτητο να προβλεφθεί με ακρίβεια η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος περιστροφής, ώστε να αποφευχθούν καταστάσεις συντονισμού κατά την λειτουργία του κινητήρα. Οι κρίσιμες ταχύτητες ενός



(α)



(β)

Σχήμα 7.27 – Μεταβολή άκαμπτων ιδιοσυχνοτήτων ως προς τη ταχύτητα περιστροφής: (α) 5 πρώτοι τρόποι (β) 3 τελευταίοι τρόποι

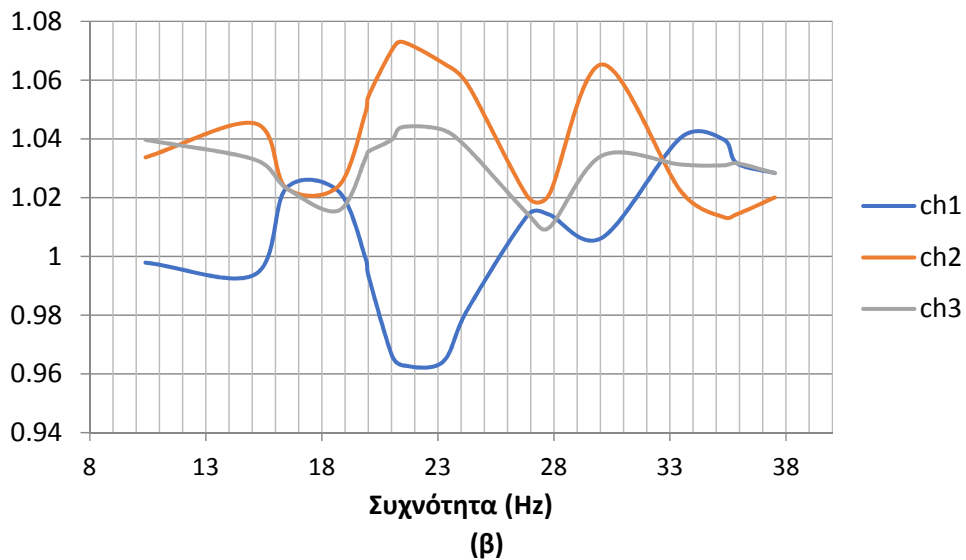
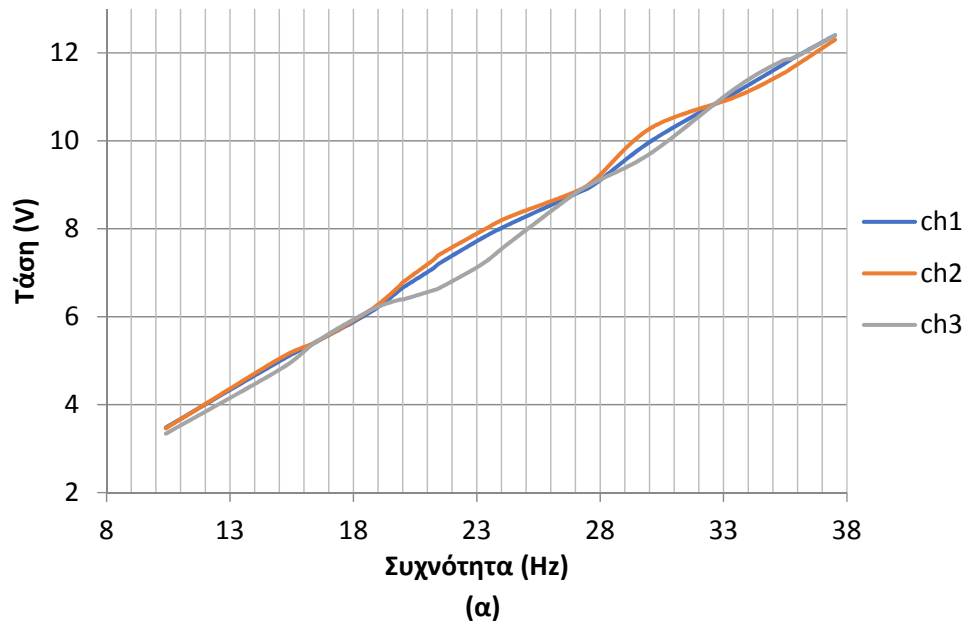
περιστρεφόμενου άξονα διαφέρουν από τις φυσικές συχνότητες ενός ακίνητου λόγω του γυροσκοπικού φαινομένου. Δηλαδή, καθώς μεταβάλλεται η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα αλλάζουν και οι ιδιοσυχνότητες του δρομέα. Στο σχήμα 7.27 απεικονίζεται με σκούρα μπλε γραμμή η αντιστοιχία ταχύτητας περιστροφής και συχνότητας βάσει της ισότητας $n = 60 \cdot f$. Παράλληλα διακρίνεται και η μεταβολή της κάθε ιδιοσυχνότητας βάσει της ταχύτητας περιστροφής. Συντονισμός μπορεί να προκληθεί στα σημεία που υπάρχει τομή της συχνότητας περιστροφής με τις ιδιοσυχνότητες του δρομέα. Παρατηρείται ότι υπάρχουν αρκετά τέτοια σημεία γύρω από την ονομαστική συχνότητα λειτουργίας της μηχανής (33Hz), κάτι το οποίο αναδεικνύει τη σημασία της μελέτης αυτής ακόμα και στις χαμηλές ταχύτητες περιστροφής των μηχανών. Εξάλλου, μία μηχανή ηλεκτροκίνησης δεν λειτουργεί σε σταθερές στροφές αλλά καταλαμβάνει όλο το φάσμα της ταχύτητας περιστροφής. Στην επόμενη παράγραφο επιχειρείται η πειραματική επιβεβαίωση των ευρημάτων.

7.3.1.4 Πειραματική επαλήθευση

Η πειραματική επαλήθευση των φυσικών συχνοτήτων ενός περιστρεφόμενου δρομέα απαιτεί τη χρήση ειδικού και ακριβούς εξοπλισμού. Στη παρούσα εργασία, ωστόσο, προτείνεται μία έμμεση και εύκολη μέθοδος προσδιορισμού αυτών των συχνοτήτων μέσω του συντονισμού που προκύπτει όταν συμπίπτει μία ιδιοσυχνότητα της κατασκευής με τη συχνότητα περιστροφής. Ο συντονισμός προκαλεί την ταλάντωση των μαγνητών και κατ' επέκταση την αυξομείωση της απόστασης τους από το στάτη. Αυτή η αυξομείωση μεταφράζεται σε μεταβολή της τιμής της πεπλεγμένης ροής στο πυρήνα της μηχανής. Εφόσον η παράγωγος της πεπλεγμένης ροής προκαλεί την αντι-ΗΕΔ του κινητήρα, μία προσεκτική παρατήρηση στις καμπύλες των τριών εν κενώ τάσεων της μηχανής συναρτήσει της συχνότητας μπορεί να δώσει σημαντική πληροφορία. Στο σχήμα 7.28α απεικονίζονται οι καμπύλες των τριών RMS φασικών τάσεων της μηχανής συναρτήσει της συχνότητας τους. Παρατηρείται ότι δεν διαθέτουν γραμμική μορφή, όπως θα ήταν φυσικό. Αυτό γίνεται περισσότερο αντιληπτό με την εύρεση της ανά μονάδα τιμής του λόγου της πραγματικής τάσης προς τη γραμμική τιμή που θα έπρεπε να έχει. Έτσι, απεικονίζεται αυτή η απόκλιση στο σχήμα 7.28β προκειμένου να είναι εύκολα κατανοητό που υφίστανται μεγάλες διαφορές. Οι κορυφές αυτού του σχήματος καταδεικνύουν, συνεπώς, συχνότητες συντονισμού.

Παρατήρηση των κορυφών δείχνει ότι ο δρομέας εμπίπτει σε ιδιοταλάντωση για τις εξής συχνότητες: 15Hz, 22Hz, 30Hz και 35Hz. Στον πίνακα 7.10 παρουσιάζονται παράλληλα τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις συγκεκριμένες συχνότητες περιστροφής. Παρατηρούμε ότι έχουμε ταύτιση των φυσικών συχνοτήτων του δρομέα στις 3 από τις τέσσερις περιπτώσεις. Για συχνότητα περιστροφής 15Hz πειραματικά φαίνεται να έχουμε ιδιοταλάντωση, αλλά προσομοιωτικά δεν επαληθεύεται. Αντίθετα για συχνότητες περιστροφής 22Hz, 30Hz και 35Hz έχουμε σχεδόν απόλυτη ταύτιση των πειραματικών με τα προσομοιωμένα αποτελέσματα.

Αυτό μπορεί να επαληθευτεί από το σχήμα 7.29, όπου φαίνονται οι κινήσεις των σωμάτων του δρομέα για συχνότητες περιστροφής 22Hz, 30Hz και 35Hz αντίστοιχα.

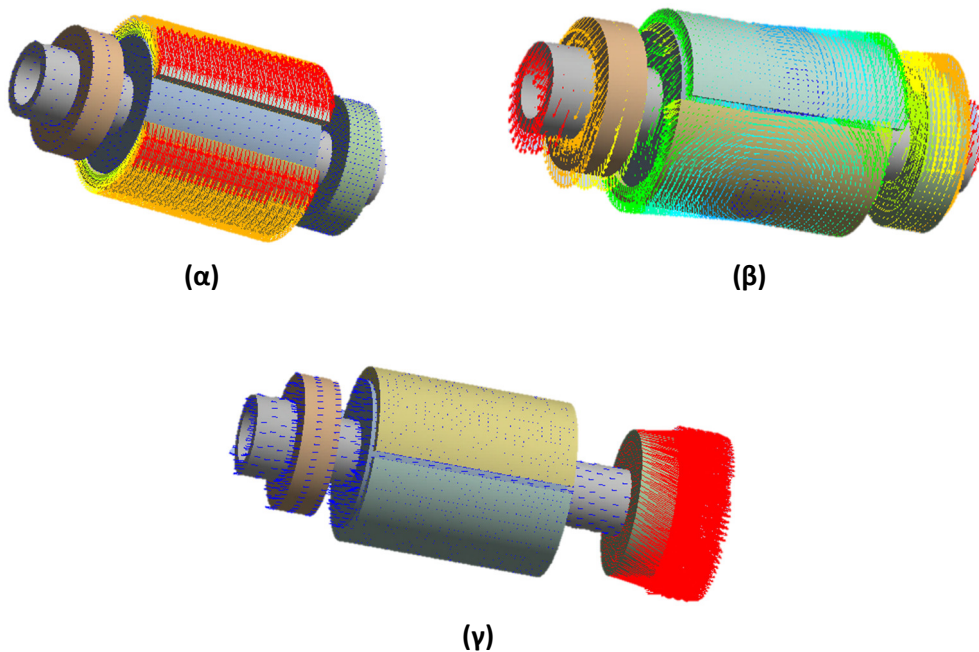


Σχήμα 7.28 – (α) Καμπύλες των τριών RMS φασικών τάσεων συναρτήσει της συχνότητας ρεύματος (β) Ανά μονάδα απόκλιση τάσεων από την γραμμική τιμή

Και στις τρεις περιπτώσεις του σχήματος 7.29 έχουμε μετακίνηση των μαγνητών στο διάκενο, είτε αυτοτελώς είτε μέσω της συνολικής ταλάντωσης του δρομέα. Πρόκειται και στις τρεις περιπτώσεις, φυσικά, για άκαμπτους τρόπους ιδιοταλάντωσης.

Πίνακας 7.10 - Πίνακας συχνοτήτων προσομοίωσης για συχνότητα περιστροφής 15Hz, 22Hz, 30Hz και 35Hz

Τρόπος ταλάντωσης	15Hz	22Hz	30Hz	35Hz
1	0,00327	0,00327	0,00326	0,00326
2	0,00431	0,00425	0,00419	0,00408
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0,0152	0,0152	0,0152	0,0151
6	19,7	19,4	18,8	18,5
7	19,9	19,7	19,7	19,7
8	21,5	21,5	21,5	21,5
9	27,5	28,7	30,6	31,8
10	36	36	36	36
11	69,6	69,6	69,6	69,6
12	99,1	99,1	99,1	99,1
13	196,3	196,3	196,3	196,3
14	2149,2	2149,2	2149,3	2149,4
15	2290	2290	2290,1	2290,2
16	7048	7045,8	7042,7	7040,5



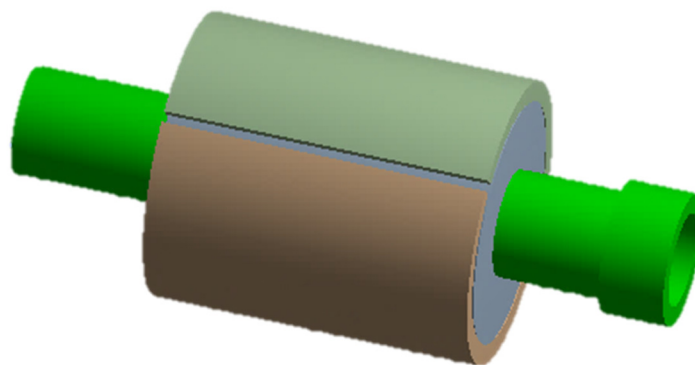
Σχήμα 7.29 – Ταλαντώσεις δρομέα σε συχνότητα (α) 22Hz, (β) 30Hz, (γ) 35Hz

7.4 Δομική ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

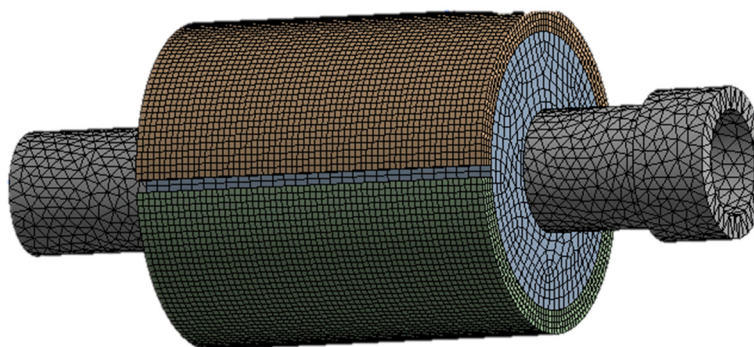
Όπως έχει αναφερθεί, στις μηχανές υψηλών ταχυτήτων είναι πολύ σημαντική η δομική ανάλυση της μηχανής κατά τα στάδια σχεδίασης. Σύμφωνα με αυτήν υπολογίζονται οι αναπτυσσόμενες πιέσεις στα υλικά του δρομέα λόγω της φυγόκεντρου δύναμης και διαπιστώνεται η διασφάλιση ή μη της ακεραιότητας της γεωμετρίας στις ζητούμενες λειτουργικές καταστάσεις. Στις υψηλές ταχύτητες λαμβάνει σημαντική τιμή η φυγόκεντρος δύναμη και η αντοχή των υλικών μαζί με τη γεωμετρία της κατασκευής συνιστούν τους περιοριστικούς παράγοντες στην επιτεύξιμη ταχύτητα περιστροφής. Η ακριβής ποσοτικοποίηση των πιέσεων αυτών μέσω κατάλληλης μοντελοποίησης επιτρέπει τον ακριβή υπολογισμό της ασφαλούς ταχύτητας περιστροφής.

7.4.1 Μοντελοποίηση δρομέα

Μια στατική δομική ανάλυση υπολογίζει τις πιέσεις σε μία δομή κάτω από σταθερές συνθήκες φόρτισης, ενώ αγνοεί τους παράγοντες της αδράνειας και της απόσβεσης που προκαλούνται από χρονικά μεταβαλλόμενα φορτία. Μια στατική ανάλυση μπορεί, ωστόσο, να περιλαμβάνει σταθερά φορτία αδράνειας (όπως βαρύτητα και ταχύτητα περιστροφής) και χρονικά μεταβαλλόμενα φορτία που μπορούν να



Σχήμα 7.30 – 3D γεωμετρία δρομέα



Σχήμα 7.31 – Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων δρομέα

Πίνακας 7.11 - Ιδιότητες υλικών δρομέα

	Αλουμίνιο	Σίδηρος	Μαγνήτες
Young's Modulus (MPa)	71700	210000	160000
Poisson ratio	0.33	0.3	0.24
Coefficient of Thermal Expansion (22°C)	2.3e-5	1.2e-5	3.4e-6
Tensile Yield Strength (MPa)	503	460	-
Tensile Ultimate strength (MPa)	572	580	78,45
Compressive Ultimate strength (MPa)	-	-	780

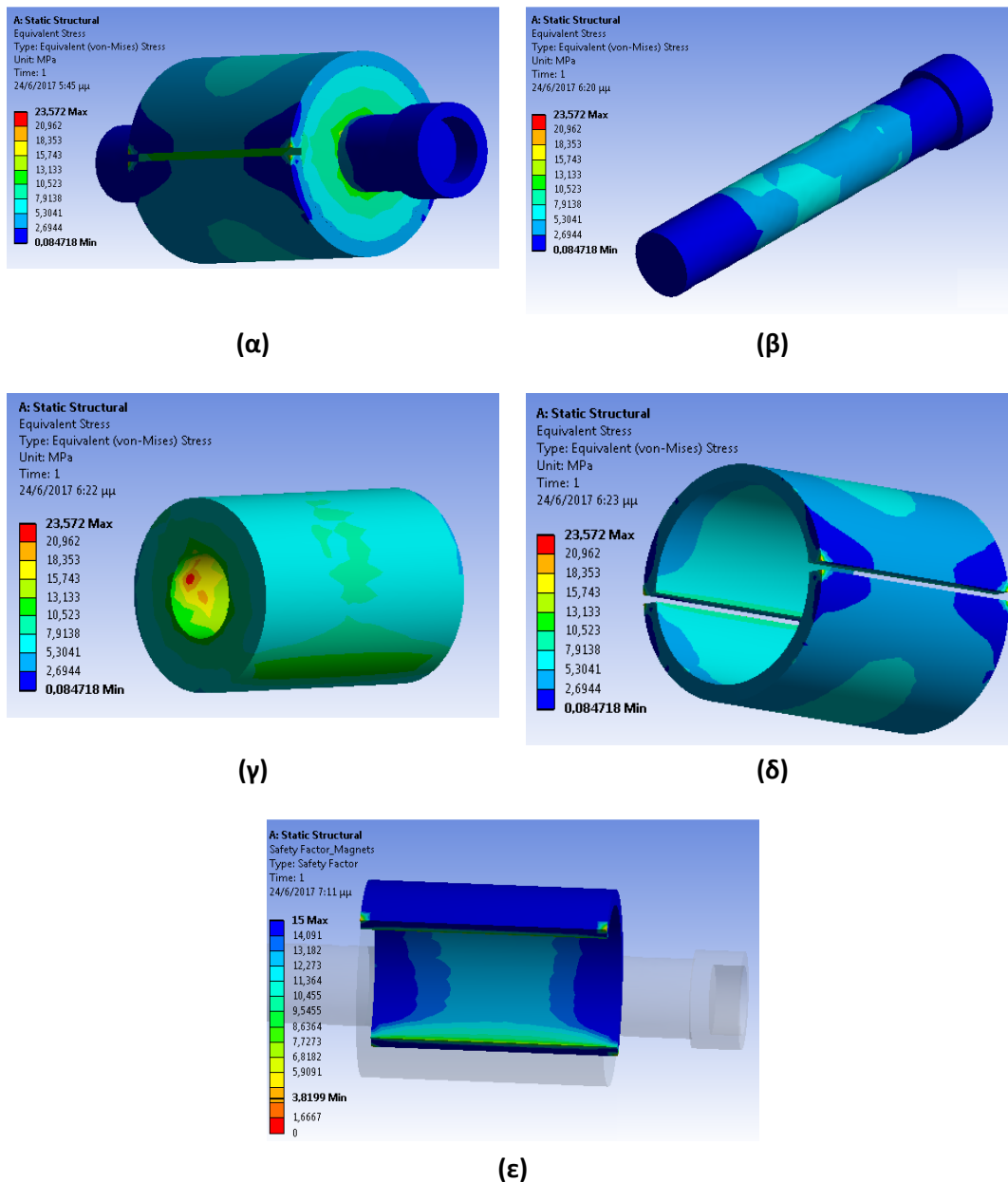
προσεγγιστούν ως ισοδύναμα στατικά φορτία. Με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, η δομική ανάλυση προσδιορίζει τις μετατοπίσεις, τις πιέσεις (stresses) και τις τάσεις (strains) σε ένα σώμα βάσει των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτό και της δομής του.

Η τρισδιάστατη γεωμετρία του δρομέα του κινητήρα φαίνεται στο σχήμα 7.30, και τα υλικά που τον απαρτίζουν με τα αντίστοιχα μηχανικά χαρακτηριστικά τους στον πίνακα 7.11. Παράμετροι του προβλήματος είναι επίσης τα είδη των επαφών στα διάφορα σώματα του δρομέα, ανάλογα με την κίνηση που κάνουν, και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Η πλεγματοποίηση του δρομέα απεικονίζεται στο σχήμα 7.31.

7.4.2 Ανάλυση δρομέα

Σκοπός της ενότητας είναι η επαλήθευση της δυνατότητας περιστροφής της μηχανής μέχρι τις 30.000ΣΑΛ, ένα όριο που έχει τεθεί βάσει του ορίου περιστροφής των ρουλεμάν. Στο σχήμα 7.32 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης, και πιο συγκεκριμένα, οι κατανομές των πιέσεων Von Mises στο σύνολο του δρομέα και στις επιμέρους συνιστώσες του. Παρατηρείται ότι πιο έντονες πιέσεις ασκούνται στις γωνίες των μαγνητών, γεγονός που δείχνει ότι αυτά τα σημεία είναι τα πιο κρίσιμα για τον δρομέα.

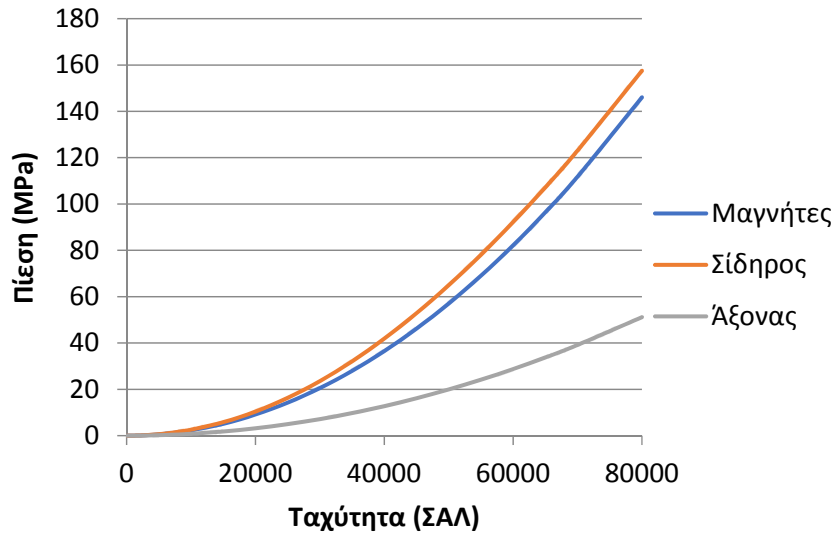
Η απεικόνιση των τιμών της πίεσης είναι χρήσιμη για την εποπτική αντίληψη του συστήματος και για την αναθεώρηση σχεδιαστικών πρακτικών, ωστόσο δεν προσφέρει εύληπτη πληροφορία καθώς το κάθε υλικό έχει το δικό του όριο αντοχής στη πίεση. Γι' αυτό και στο σχήμα 7.32(ε) επιλέγεται ο μαγνήτης και γίνεται απεικόνιση της κατανομής του συντελεστή ασφαλείας (safety factor). Όπως προαναφέρθηκε, οι μαγνήτες αποτελούν το πιο ευάλωτο σώμα του δρομέα, καθώς ενώ έχουν υψηλή αντοχή σε θλίψη, έχουν σχετικά χαμηλή αντοχή σε κάμψη και εφελκυσμό. Ο συντελεστής ασφαλείας απεικονίζει τη δυνατότητα ή μη του συστήματος να αντέξει στις καταπονήσεις λόγω των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτό. Καθορίζεται από τις δυνάμεις που ασκούνται στο σώμα και τα χαρακτηριστικά των υλικών και ορίζεται ως ο λόγος της ελάχιστης πίεσης που μπορεί να ασκηθεί στο σώμα ώστε να προκαλέσει παραμόρφωση ή καταστροφή του υλικού, προς τη μέγιστη πραγματική πίεση που ασκείται σε αυτό.



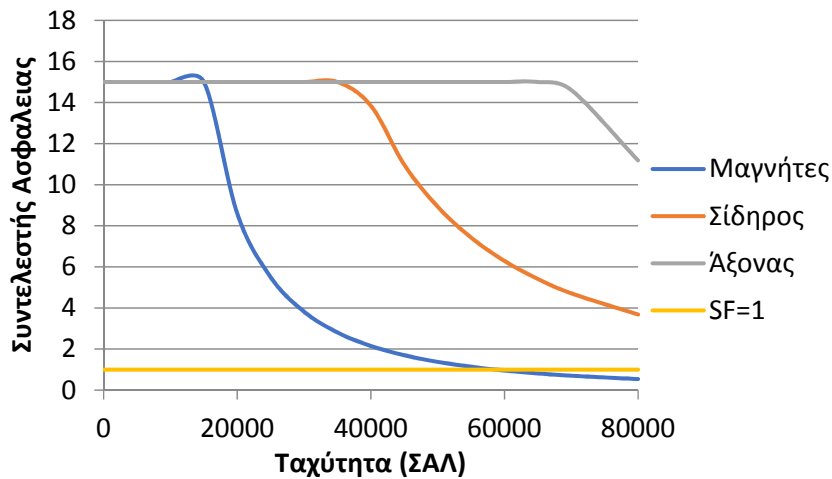
Σχήμα 7.32 – (α),(β),(γ),(δ): Κατανομή τιμής πίεσης Von Mises στην 3D γεωμετρία του δρομέα και στις επιμέρους συνιστώσες του. (ε): συντελεστής ασφάλειας στους μαγνήτες

Παρατηρούμε ότι η μικρότερη τιμή του συντελεστή ασφαλείας στο μαγνήτη είναι 3,82. Συνεπώς έχουμε περίπου 4 φορές περιθώριο ασφαλείας στις πιέσεις του μαγνήτη μέχρι τη πιθανότητα παραμόρφωσης του. Τελικά, κρίνεται δυνατή η λειτουργία της μηχανής στη ζητούμενη ταχύτητα περιστροφής.

Σε ένα δεύτερο στάδιο επιχειρείται ο προσδιορισμός της μέγιστης ταχύτητας περιστροφής του σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών, βάσει της αντοχής των υλικών του. Αυτή θα είναι η ταχύτητα στην οποία ο συντελεστής ασφαλείας του πιο ευαίσθητου μέρους του δρομέα (μαγνήτες) θα είναι ίσο με 1. Εν προκειμένω, ωστόσο, ως μέτρο ασφαλείας της μηχανής επιθυμούμε η μέγιστη πίεση που ασκείται στους μαγνήτες να είναι μικρότερη από το 65% της ονομαστικής τους αντοχής [75] βάσει των



(α)



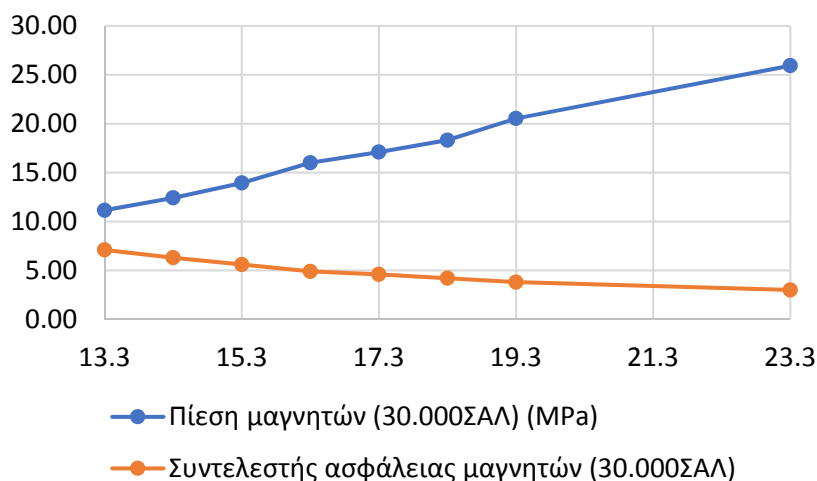
(β)

Σχήμα 7.33 – (α): Συσχετισμός μέγιστης πίεσης ανά συνιστώσα κινητήρα με την ταχύτητα περιστροφής. (β): Συσχετισμός συντελεστή ασφαλείας ανά συνιστώσα κινητήρα με την ταχύτητα περιστροφής.

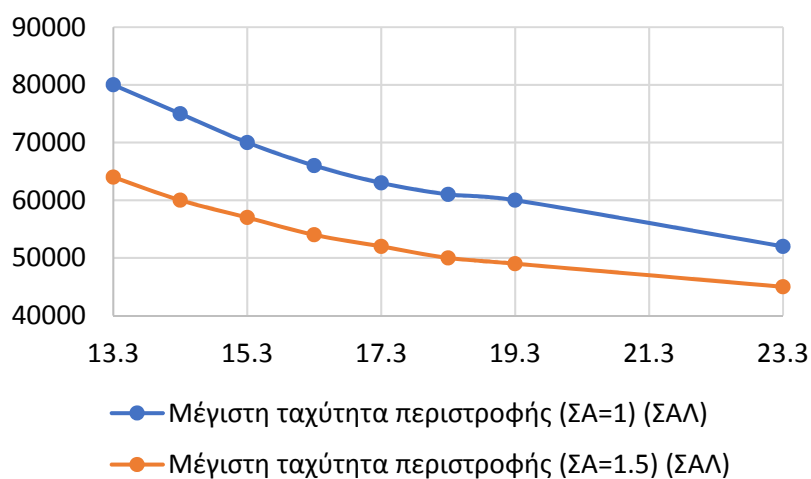
ιδιοτήτων του Νεοδυμίου. Αυτό μεταφράζεται σε ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας τιμής 1,5.

Σε πρώτη φάση ευρίσκεται μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων ο συσχετισμός μεταξύ της μέγιστης ασκούμενης πίεσης σε κάθε σώμα του δρομέα και της ταχύτητας περιστροφής (σχήμα 7.33α). Παρατηρείτε ότι η πίεση αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της ταχύτητα περιστροφής. Επίσης, η πίεση που ασκείται στο σίδηρο του δρομέα είναι μεγαλύτερη από αυτή των μαγνητών, αυτό όμως δεν αποτελεί πρόβλημα καθώς ο σίδηρος μπορεί να αντέξει πολύ μεγαλύτερες πιέσεις από ότι οι μαγνήτες. Ο άξονας έχει πολύ μικρότερη τιμή καθώς έχει τη μικρότερη διάμετρο και μάζα.

Στο σχήμα 7.33β παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα για κάθε συνιστώσα του δρομέα. Το διάγραμμα είναι φραγμένο στη τιμή 15, καθώς το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε δεν παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές. Αξιοσημείωτη είναι η έντονη



(α)



(β)

Σχήμα 7.34– (α,β): Συσχετισμός διαφόρων μεγεθών με την ακτίνα του δρομέα (mm).

κλίση της μείωσης του συντελεστή ασφαλείας των μαγνητών συναρτήσει της ταχύτητας σε σχέση με τον σίδηρο και το αλουμίνιο. Για συντελεστή ασφαλείας ίσο με τη μονάδα η μέγιστη θεωρητική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ως προς το δομικό έλεγχο είναι περίπου 60.000ΣΑΛ. Για συντελεστή ασφαλείας 1,5 η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής αντιστοιχεί στις 45.000ΣΑΛ. Πρακτικά, τα ρουλεμάν της μηχανής επιτρέπουν μέχρι 30.000ΣΑΛ και επομένως υψηλότερες ταχύτητες δεν μπορούν να αναπτυχθούν.

Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο της ενότητας επιχειρείται ο συσχετισμός διαφόρων μεγεθών με την ακτίνα του δρομέα. Εδώ συγκρατείται σταθερή η ακτίνα του αλουμινένιου άξονα και το πάχος των μαγνητών και μεταβάλλεται η εξωτερική ακτίνα του δρομέα (εσωτερική ακτίνα μαγνητών). Στο σχήμα 7.33 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Παρατηρείται ότι η αύξηση της διαμέτρου του δρομέα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των πιέσεων σε όλα μέρη της μηχανής, όπως και στους μαγνήτες οι οποίοι καθορίζουν ουσιαστικά την μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Επομένως, ο συντελεστής ασφαλείας του δρομέα υπόκειται αντίστοιχα σε πτώση με την αύξηση της διαμέτρου του δρομέα, για ταχύτητα περιστροφής

30.000ΣΑΛ. Ακόμη, η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής για δεδομένο συντελεστή ασφάλειας μειώνεται αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο σχήμα 7,33β.

7.5 Συμπεράσματα

Στο πρώτο στάδιο του κεφαλαίου έγινε προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς του πρωτότυπου κινητήρα με χρήση αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων σε δύο και τρεις διαστάσεις. Αρχικά πραγματοποιήθηκε δυσδιάστατη ανάλυση για τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα τόσο σε εγκάρσια τομή όσο και σε τομή παράλληλη στον άξονα περιστροφής της μηχανής. Ακολούθως επιχειρήθηκε τρισδιάστατη μοντελοποίηση του κινητήρα τόσο για τη μόνιμη όσο και για την μεταβατική κατάσταση λειτουργίας. Τέλος, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από πειραματικές μετρήσεις και έγινε σύγκριση με τα αντίστοιχα προσομοιωμένα. Η αντιπαραβολή ανέδειξε την καταλληλότητα της 3Δ μοντελοποίησης για τη προσομοίωση αυτών των φαινομένων. Ακόμη, η 2Δ ανάλυση προσέφερε ικανοποιητική ακρίβεια παρά τα μεγαλύτερα σφάλματα σε σχέση με την τρισδιάστατη.

Στο δεύτερο στάδιο έγινε ανάλυση της αξονοδυναμικής συμπεριφοράς του δρομέα του σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών με χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων. Διακρίθηκαν δύο τρόποι ταλάντωσης: οι άκαμπτες ταλαντώσεις όπου ο δρομέας δονείται χωρίς να παραμορφώνεται και οι καμπτικές ταλαντώσεις όπου ο δρομέας παραμορφώνεται και είναι πολύ πιθανό να υποστεί μόνιμη μηχανική βλάβη σε περίπτωση συντονισμού. Οι άκαμπτοι τρόποι ταλάντωσης εμφανίζονται σε συχνότητες χαμηλής τάξης, ενώ οι καμπτικές ταλαντώσεις σε υψηλές συχνότητες. Πρακτικά το όριο ταχύτητας περιστροφής είναι η πρώτη καμπτική συχνότητα.

Οι κρίσιμες ταχύτητες των μηχανών υψηλών ταχυτήτων σχετίζονται άμεσα με την λεπτότητα του άξονα. Όπως παρουσιάστηκε, οι καμπτικές κρίσιμες ταχύτητες του συστήματος δρομέα-ρουλεμάν έχουν μεγάλη εξάρτηση από την λεπτότητα του δρομέα και ειδικά από το μήκος του άξονα, λαμβάνοντας υπόψη ότι η διάμετρος του περιορίζεται από την δομική ανάλυση της μηχανής. Επομένως η λεπτότητα του δρομέα της μηχανής θεωρείται ίσως ο πιο κρίσιμος παράγοντας για ευσταθή λειτουργία του κινητήρα σε μια μηχανή υψηλών ταχυτήτων και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τα αρχικά στάδια της σχεδίασης.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επαληθεύθηκαν πειραματικά με την λειτουργία της μηχανής σε χαμηλές συχνότητες και λαμβάνοντας το γράφημα της τάσης στην εν κενώ λειτουργία, συναρτήσε της συχνότητας. Από το γράφημα παρατηρήθηκε απόκλιση της τάσης από την αναμενόμενη γραμμική μορφή σε συγκεκριμένες συχνότητες περιστροφής του δρομέα, γεγονός που οφείλεται στην ύπαρξη συντονισμένης ταλάντωσης στις συγκεκριμένες ταχύτητες περιστροφής.

Τέλος, αναδείχθηκε η ικανότητα του κινητήρα να λειτουργήσει με ασφάλεια μέχρι τις 30.000ΣΑΛ βάσει της αξονοδυναμικής συμπεριφοράς του δρομέα, καθώς η κρίσιμη καμπτική ταχύτητα που βρέθηκε είναι περίπου 131.000 ΣΑΛ, δηλαδή ταχύτητα πολύ μεγαλύτερη από την μέγιστη ταχύτητα περιστροφής της σύγχρονης μηχανής που εξετάζουμε.

Στο τρίτο και τελευταίο σκέλος του κεφαλαίου πραγματοποιήθηκε η δομική ανάλυση του υπό εξέταση σύγχρονου κινητήρα. Σε μια ηλεκτρική μηχανή υψηλών ταχυτήτων η ανάλυση αυτή είναι ένα πολύ σημαντικό και απαιτητικό κομμάτι της σχεδίασης της μηχανής, καθώς σε υψηλές συχνότητες περιστροφής οι φυγόκεντρες δυνάμεις και οι πιέσεις που ασκούνται στον δρομέα είναι πολύ ισχυρές. Στο πρώτο βήμα υπολογίστηκαν οι μέγιστες πιέσεις που ασκούνται σε όλα τα μέρη του κινητήρα στις 30.000ΣΑΛ και ο αντίστοιχος συντελεστής ασφαλείας. Έτσι επαληθεύθηκε η δομική ακεραιότητα του δρομέα σε αυτή τη ταχύτητα. Ακολούθως προσδιορίστηκε η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και τέλος διερευνήθηκε ο συσχετισμός της διαμέτρου του δρομέα με την μέγιστη ταχύτητα περιστροφής.

Κεφάλαιο 8. Βέλτιστη διαχείριση ισχύος ηλεκτρικού οχήματος με βάση τη διαδρομή

8.1 Εισαγωγή

Η ενεργειακή απόδοση στην ηλεκτρική μετακίνηση είναι ένα κρίσιμο πεδίο έρευνας στις μέρες μας. Προσπάθεια καταβάλλεται για να ελαχιστοποιηθεί η ενεργειακή κατανάλωση των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς, μεταξύ άλλων, διαθέτουν περιορισμένη αυτονομία λόγω της φτωχής ενεργειακής πυκνότητας των μπαταριών στη σημερινή στάθμη τεχνολογίας. Δεν είναι απαραίτητο να αναπτύσσονται μόνο πιο αποδοτικά ηλεκτρικά συστήματα κίνησης [56] [52] [76] [53] [77], αλλά έξυπνες τεχνικές διαχείρισης του υπάρχοντος αποθέματος εξαρτημάτων [78]. Η ενεργειακή κατανάλωση ενός ηλεκτρικού οχήματος που ταξιδεύει σε ανοιχτό δρόμο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και παραμέτρους. Αυτοί κατηγοριοποιούνται κυρίως στα χαρακτηριστικά του οχήματος, της διαδρομής και της οδηγικής συμπεριφοράς. Η καθοδήγηση της τελευταίας με βέλτιστο τρόπο μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά μειωμένη κατανάλωση ενέργειας αν γίνει σωστή εκμετάλλευση των χαρακτηριστικών του οχήματος και της διαδρομής [79] [80] [81] [82].

Στη σχετική βιβλιογραφία, παρουσιάζεται και δοκιμάζεται πειραματικά ένα ειδικό σύστημα υποβοήθησης του οδηγού στην οικολογική οδήγηση που βασίζεται σε ακριβές μοντέλο του ηλεκτρικού οχήματος [79]. Στην εργασία [80] λαμβάνονται υπόψη οι καιρικές συνθήκες για την αλλαγή της ταχύτητας κατά μήκος μίας διαδρομής. Στην [81] οι συγγραφείς προτείνουν την αξιοποίηση γεωγραφικού συστήματος πληροφορίας (Geographic Information System – GIS) από τον υπολογιστή του αυτοκινήτου για να αποφασιστεί ο βέλτιστος κύκλος οδήγησης με στόχο την εξοικονόμηση της ενέργειας. Οι προαναφερθείσες μέθοδοι χρησιμοποιούν τον δυναμικό προγραμματισμό σαν το μέσο βελτιστοποίησης της τροχιάς της ταχύτητας και συλλαμβάνουν το πρόβλημα σαν μονοκριτηριακό. Συνεπώς, αν το κριτήριο δεν είναι μόνο ένα, όπως π.χ. η ενεργειακή κατανάλωση, συμβιβαστικά βάρη πρέπει να ανατεθούν σε κάθε ένα από τα επιθυμητά κριτήρια που μπορεί επίσης να περιλαμβάνουν π.χ. τον χρόνο της διαδρομής ή την άνεση του επιβάτη. Μία μη γραμμική μέθοδος προβλεπτικού ελέγχου αναπτύσσεται στην [82] για να καθοδηγήσει την τροχιά της ταχύτητας του οχήματος σε δρόμους με κλίσεις. Μία τέτοια υλοποίηση επιτυγχάνει υπολογισμό της βέλτιστης ταχύτητας του οχήματος σε πραγματικό χρόνο θεωρώντας τις μελλοντικά κοντινές πιθανές

καταστάσεις. Αυτή η μέθοδος, ωστόσο, δεν προσφέρει το ολικά βέλτιστο οδηγικό προφίλ για μία δεδομένη διαδρομή. Επιπρόσθετα, η καταλληλότητα των εξελικτικών αλγορίθμων δεν έχει εξερευνηθεί επαρκώς στα επιβατικά οχήματα, παρότι είναι ικανοί να επιλύουν τα πλέον πολύπλοκα προβλήματα. Σε αντίθεση με τα τρένα, στα οποία έχει γίνει αξιοσημείωτη πρόοδος σε αυτό το κομμάτι. Στην [83], ένας υβριδικός εξελικτικός αλγόριθμος αναπτύχθηκε για να υπολογίζει την βέλτιστη τροχιά ταχύτητας του τραίνου προκειμένου να επιτύχει όχι μόνο εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά και ελαχιστοποίηση του χρόνου του ταξιδιού. Ένα τμήμα μεταξύ δύο σταθμών χωρίς κλίσεις ή στροφές θεωρείται στην προαναφερθείσα εργασία. Παρόμοια δουλειά έχει γίνει και στις [84], [85] [86], όπου ενσωματώνονται δύο ή περισσότερα κριτήρια για τη λειτουργία του τραίνου.

Σε αυτό το κεφάλαιο προτείνεται ένας υβριδικός εξελικτικός αλγόριθμος SPEA-DE [36], που βασίζεται στην SPEA2 [44] και στην DE[87], για την βελτιστοποίηση των προφίλ ταχύτητας και ορίου ροπής ενός ελαφριού ηλεκτρικού οχήματος με ανοχή περιορισμένης υπερφόρτισης της ηλεκτρικής μηχανής. Τα κριτήρια αφορούν τόσο την συνολική ενέργεια που καταναλώνεται στη διαδρομή όσο και τη διάρκεια του ταξιδιού. Σε ένα πρώτο βήμα η τεχνική ανιχνεύει το βέλτιστο προφίλ ταχύτητας του οχήματος κάνοντας χρήση μίας τεχνικής κατάτμησης της διαδρομής που προτείνεται στη παρούσα διατριβή. Σε ένα δεύτερο βήμα, προτείνεται μία στρατηγική βελτιστοποίησης του προφίλ ορίου ροπής της ηλεκτρικής μηχανής για την περαιτέρω ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας ενός ήδη επιλεγμένου προφίλ ταχύτητας που προέκυψε από την προηγούμενη διαδικασία. Η τεχνική μοντελοποίησης του ηλεκτρικού αυτοκινήτου μπορεί να θεωρήσει οποιοδήποτε περιορισμό της ταχύτητας λόγω απότομων στροφών ή ορίων ταχύτητας και περιλαμβάνει τον χάρτη απόδοσης της ηλεκτρικής μηχανής και ένα θερμικό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων [87] [88]. Η κλειστή πίστα ενός διαγωνισμού οικολογικών οχημάτων χρησιμοποιείται σαν ένα τυπικό παράδειγμα που ομοιάζει με ανοιχτό δρόμο λόγω ποικιλίας κλίσεων και απουσίας φαναριών κυκλοφορίας. Το σύνολο της διαδρομής λαμβάνεται υπόψη στην διαδικασία βελτιστοποίησης [67].

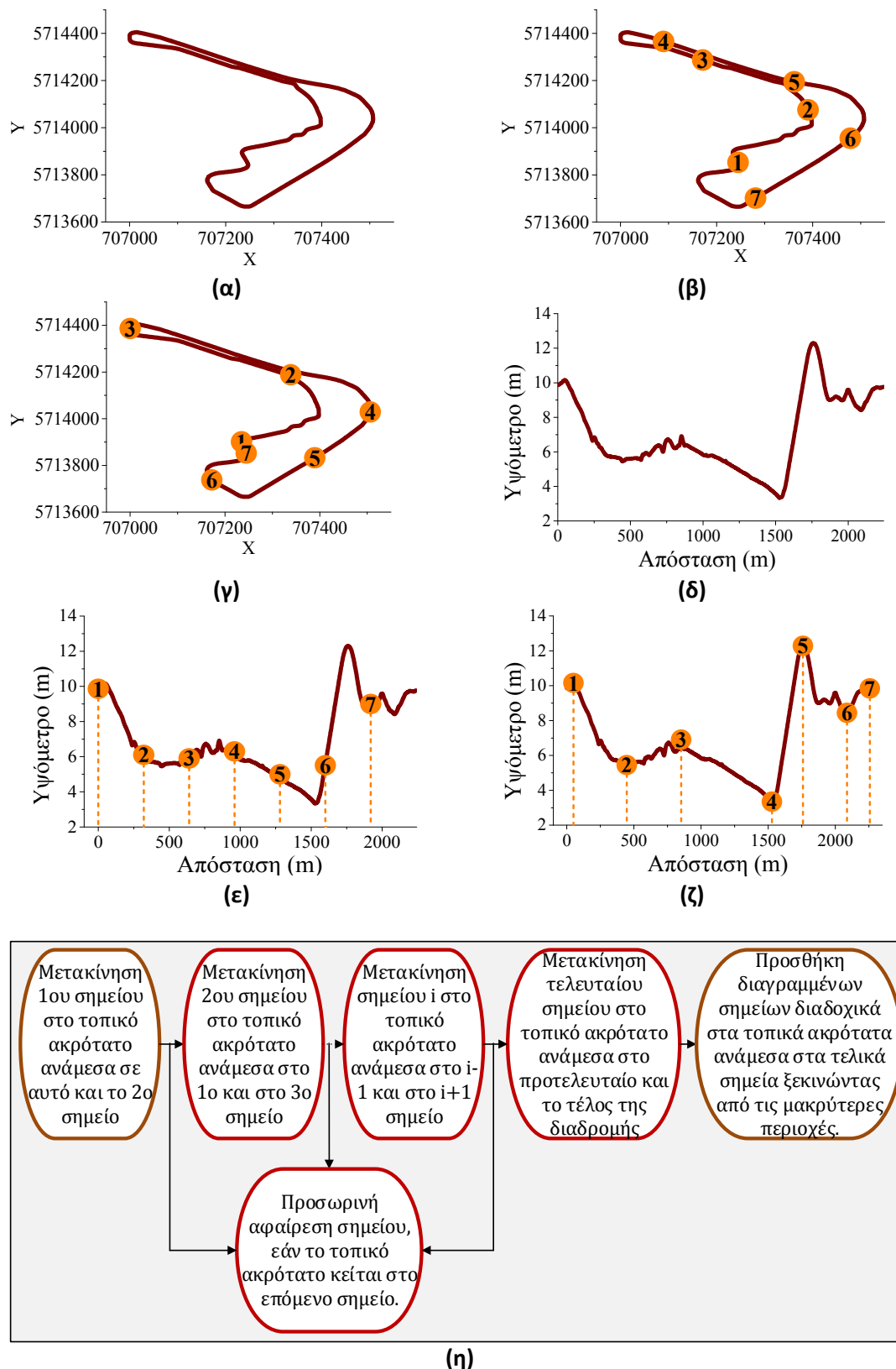
Η καινοτομία της προτεινόμενης μεθοδολογίας κείται στην ειδική περίπτωση βελτιστοποίησης των προφίλ ταχύτητας και ορίου ροπής οχήματος σε προδιαγεγραμμένη διαδρομή εισάγοντας μία συστηματική βήμα-προς-βήμα προσέγγιση που αναπτύχθηκε λόγω της συμμετοχής σε έναν διαγωνισμό εξοικονόμησης ενέργειας [67]. Η προτεινόμενη τεχνική εμπλέκει μία διαδικασία βελτιστοποίησης τριών επιπέδων που περιλαμβάνει την κατάτμηση της διαδρομής με κατάλληλη ομαδοποίηση, την βελτιστοποίηση του προφίλ ταχύτητας λαμβάνοντας υπόψη τοπικά όρια ταχύτητας και την βελτιστοποίηση του προφίλ ορίου ροπή από έναν πολυκριτηριακό εξελικτικό αλγόριθμο. Σε αυτό το πλαίσιο, συνδυάζονται αναλυτικές μέθοδοι κινηματικής του οχήματος και θερμικής μοντελοποίησης της ηλεκτρικής μηχανής, καθώς και ηλεκτρομαγνητικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, επιτρέποντας περιορισμένη υπερφόρτιση της μηχανής. Η πολυκριτηριακή φύση της διατύπωσης του προβλήματος επιτρέπει την θεώρηση της ενεργειακής κατανάλωσης και της διάρκειας της διαδρομής σαν ξεχωριστά και αυτόνομα κριτήρια βελτιστοποίησης. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε μπορεί να επεκταθεί και στον προσδιορισμό των ολικά βέλτιστων προφίλ που προσφέρουν συμβιβασμούς μεταξύ της εξοικονόμησης ενέργειας και της διάρκειας

του ταξιδιού σε περιπτώσεις διαδρομών λίγων χιλιομέτρων δεδομένου ότι γεωγραφικά δεδομένα είναι διαθέσιμα. Η μαθηματική θεμελίωση επιτρέπει, επιπλέον, την παράλληλη επεξεργασία ξεχωριστών υπό-προβλημάτων για περιπτώσεις μεγάλων διαδρομών με μεγαλύτερο μήκος. Τέλος, τα οφέλη της προτεινόμενης προσέγγισης επικυρώνονται πειραματικά σε έναν αγώνα οικολογικών οχημάτων με την δημιουργία μίας εφαρμογής για τον μικροϋπολογιστή του οχήματος και την αντίστοιχη διασύνδεση του τελευταίου με τον αντιστροφέα του κινητηρίου συστήματος.

8.2 Μεθοδολογία

8.2.1 Κατάτμηση διαδρομής

Οι συντεταγμένες της διαδρομής και το υψομετρικό προφίλ μπορούν να εξαχθούν από τα δεδομένα ενός συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών (Geographic Information System- GIS) μόλις οριστεί ο επιθυμητός προορισμός. Ένα παράδειγμα μίας τέτοιας περίπτωσης είναι η κλειστή πίστα του σχήματος 8.2. Οι συντεταγμένες του σχήματος της απεικονίζονται στο σχήμα 8.1α και το υψομετρικό της προφίλ στο σχήμα 8.1δ. Μία τέτοια διαδρομή μπορεί να κατατμηθεί με έναν προκαθορισμένο αριθμό σημείων που ισαπέχουν (Ίση Κατάτμηση - ΙΚ), όπως φαίνεται στο σχήμα 8.1β και στο σχήμα 8.1ε. Διαφορετικά, η διαδρομή μπορεί να κατατμηθεί ανάλογα με το υψομετρικό προφίλ (Προτεινόμενη Κατάτμηση - ΠΚ) όπως φαίνεται στο σχήμα 8.1γ και στο σχήμα 8.1ζ. Τα πιο σημαντικά τοπικά ακρότατα μπορούν να επιλεγούν σε αυτή τη περίπτωση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω μίας κατάλληλης επαναληπτικής μεθόδου (σχήμα 8.1η) που κάνει χρήση γεωγραφικών υψομετρικών δεδομένων και του επιθυμητού αριθμού σημείων ως εξής: Αρχικά, το πρώτο σημείο της ίσης κατάτμησης επιλέγεται και μετακινείται στο τοπικό ακρότατο της περιοχής ανάμεσα σε αυτό και το δεύτερο σημείο. Ύστερα, το δεύτερο σημείο μετακινείται στο τοπικό ακρότατο της περιοχής ανάμεσα στο πρώτο και το τρίτο σημείο. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι το τελευταίο σημείο να τοποθετηθεί ανάμεσα στο προτελευταίο και στο τέλος της διαδρομής. Το τοπικό ακρότατο επιλέγεται είτε είναι τοπικό μέγιστο, είτε είναι τοπικό ελάχιστο. Αν το τοπικό ακρότατο μεταξύ δύο σημείων βρίσκεται στο επόμενο σημείο, τότε η επιλεγμένη θέση αφαιρείται προσωρινά και η αναζήτηση συνεχίζεται με το επόμενο σημείο. Εάν είναι αναγκαίο, περισσότερα σημεία αφαιρούνται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Αμέσως μόλις η τελευταία θέση τοποθετηθεί στη πίστα, τα σημεία που έχουν προσωρινά αφαιρεθεί εισάγονται διαδοχικά στα τοπικά ακρότατα μεταξύ των τελικών σημείων στη διαδρομή. Σε αυτή τη διαδικασία, η μακρύτερη περιοχή επιλέγεται πρώτη.



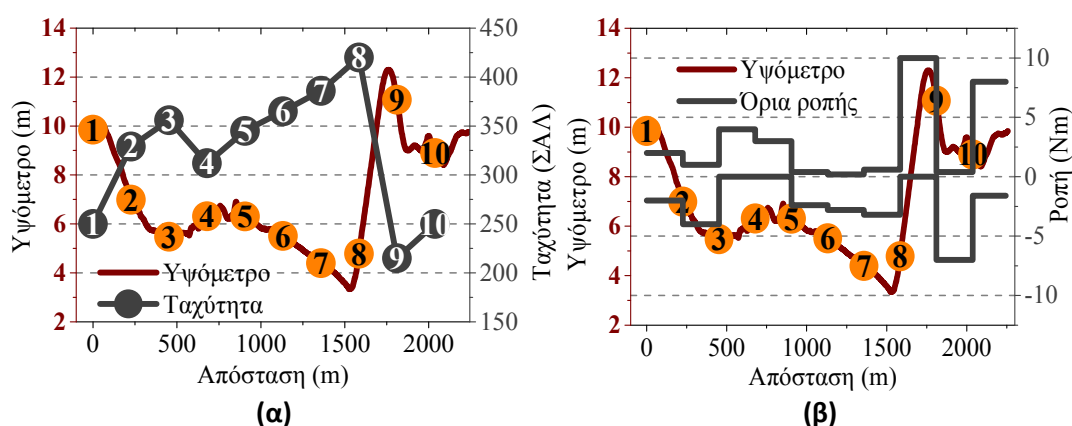
Σχήμα 8.1: (α)-(γ): Συντεταγμένες δοκιμαστικής πίστας σε συμπαγή προβολή Universal Transverse Mercator (UTM). (δ)-(ζ): Υψομετρικό προφίλ. (β),(ε): Ίση κατάτμηση, (γ),(ζ): κατάτμηση σημαντικότερων ακροτάτων, (η): επαναληπτική διαδικασία εύρεσης σημαντικότερων ακροτάτων

8.2.2 Βελτιστοποίηση προφίλ ταχύτητας

Τα σημεία κατάτμησης μπορεί να θεωρηθούν ως θέσεις στη πίστα όπου η ταχύτητα του οχήματος μπορεί να προσδιοριστεί εκ των προτέρων ανάλογα με τα αποτελέσματα μίας διαδικασίας βελτιστοποίησης. Η τιμή της ταχύτητας του οχήματος σε κάθε ένα από αυτά τα σημεία μπορεί να θεωρηθεί σαν μία μεταβλητή σε ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα ελαχιστοποίησης της ενέργειας και του χρόνου:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } E_t(\mathbf{v}), T_t(\mathbf{v}) \\ & \text{subject to } v_i^{(L)} \leq v_i \leq v_i^{(U)}, \quad i = 1, 2, \dots, n \\ & v_{start} = v_{finish}, e_{start} = e_{finish} \end{aligned} \quad (8.1)$$

όπου E_t η συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια της διαδρομής, T_t η χρονική διάρκεια της διαδρομής, $\mathbf{v}=(v_1, v_2, \dots, v_n)^T$ το διάνυσμα ταχυτήτων, v_{start} και v_{finish} η ταχύτητα στην αρχή και το τέλος της διαδρομής, e_{start} και e_{finish} οι υψομετρικές τιμές στην αρχή και το τέλος της διαδρομής και n ο αριθμός των σημείων κατάτμησης της διαδρομής. Κάθε μεταβλητή v_i φράσσεται από άνω και κάτω όρια που αναφέρονται ως U και L αντίστοιχα. Τα όρια μπορεί να είναι κοινά σε όλα τα σημεία στη διαδρομή που θεωρείται λόγω περιορισμών του οχήματος. Μπορεί ακόμη να ανατίθενται ξεχωριστά σε κάθε σημείο λόγω οποιονδήποτε άλλων περιορισμών που υπαγορεύονται από τις οδηγικές συνθήκες. Ο περιορισμός ταχύτητας εκκίνησης και τερματισμού στην (8.1) διαβεβαιώνει ότι η κινητική ενέργεια του οχήματος θα είναι ίδια στην αρχή και στο τέλος της διαδρομής. Ο περιορισμός ισότητας εφαρμόζεται επίσης στις υψομετρικές τιμές της αρχής και του τέλους της διαδρομής. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι τιμές της δυναμικής ενέργειας είναι κοινές στα δύο αυτά σημεία. Αυτοί οι περιορισμοί αποτρέπουν λάθος υπολογισμούς στα οφέλη ενέργειας και επιτρέπουν την κατάτμηση ενός πολύ μεγάλου δρομολογίου σε μικρότερα, όπου τα προβλήματα βελτιστοποίησης μπορούν να επιλυθούν παράλληλα. Οι μεμονωμένες τιμές v_i μπορούν να παρεμβληθούν γραμμικά προκειμένου να σχηματίσουν το προφίλ ταχυτήτων του οχήματος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 8.2α.



Σχήμα 8.2: Παραδείγματα προφίλ (α) ταχύτητας και (β) ορίου ροπής

8.2.3 Βελτιστοποίηση προφίλ ορίου ροπής

Με έναν παρόμοιο τρόπο, η μέγιστη επιτρεπόμενη ροπή της μηχανής μπορεί να ρυθμιστεί με βάσει τα αντίστοιχα σημεία στη πίστα. Τα όρια της ροπής κατά την επιτάχυνση και την αναγεννητική πέδηση μπορούν να βελτιστοποιηθούν προκειμένου να αποφευχθεί η υπέρβαση συγκεκριμένων τιμών όπως φαίνεται στο σχήμα 8.2β. Αυτό το πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να θεμελιωθεί ως εξής:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } E_t(\mathbf{y}_u, \mathbf{y}_d), T_t(\mathbf{y}_u, \mathbf{y}_d) \\
 & \text{subject to } 0 \leq y_{u,i} \leq y_{u,i}^{(U)}, \quad i = 1, 2, \dots, n \\
 & \quad y_{d,i}^{(L)} \leq y_{d,i} \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \\
 & \quad v_{start} = v_{finish}, e_{start} = e_{finish}
 \end{aligned} \tag{8.2}$$

όπου τα y_u και y_d αντιστοιχούν στα διανύσματα μέγιστης επιτρεπτής ροπής κατά την επιτάχυνση και την αναγεννητική πέδηση, αντίστοιχα. Η βελτιστοποίηση των ορίων ροπής μπορεί να συνδυασθεί με την αντίστοιχη της τροχιάς ταχυτήτων με διάφορους τρόπους. Η πρώτη προσέγγιση είναι να επιλυθούν τα δύο προβλήματα ταυτόχρονα επιστρατεύοντας 3η ανεξάρτητες μεταβλητές. Αυτή η λύση παρέχει τα βέλτιστα οφέλη οικονομίας και χρόνου αλλά περιλαμβάνει αυξημένο υπολογιστικό κόστος αν τα τμήματα της διαδρομής είναι πολλά. Η δεύτερη προσέγγιση είναι να επιλεγεί μία λύση από το μέτωπο Pareto των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης του προφίλ ταχύτητας και με βάση αυτή να ευρεθεί το βέλτιστο προφίλ ορίου ροπής. Αυτός ο τρόπος μειώνει την πολυπλοκότητα και μπορεί να επιτρέψει την εφαρμογή της τεχνικής σε διαδρομές με πολλά τμήματα. Ωστόσο, τα δύο προβλήματα πρέπει να λυθούν διαδοχικά. Ο τρίτος τρόπος είναι να επιλυθεί το πρόβλημα χωρίς θεωρηθεί το προφίλ ταχύτητας. Σε αυτή τη περίπτωση το όχημα θα έχει και πάλι μεταβλητή τροχιά ταχύτητας, παρά τη σταθερή αναφορά αυτής, εφόσον η ροπή της μηχανής περιορίζεται και ο δρόμος δεν μπορεί ποτέ να έχει μηδενική κλίση στον πραγματικό κόσμο. Στη παρούσα διδακτορική διατριβή επιλέγεται η δεύτερη περίπτωση καθώς κρίνεται ως η πιο ελκυστική από πλευράς οφέλους στην εξοικονόμηση ενέργειας και χρόνου, υπολογιστικής πολυπλοκότητας και εφικτότητας στον πραγματικό κόσμο.

8.2.4 Λήψη αποφάσεων

Λόγω της πολυκριτηριακής φύσης της προσέγγισης, το προκύπτον σενάριο λύσεων περιλαμβάνει διαφορετικά προφίλ κατανάλωσης ενέργειας και διάρκειας ταξιδιού. Μία ποικιλία λύσεων είναι διαθέσιμη, έτσι ώστε η πιο πλεονεκτική να μπορεί να επιλεγεί μέσω συμβιβασμών ανάμεσα στο διαθέσιμο χρόνο που υπάρχει και την ενεργειακή εξοικονόμηση που απαιτείται. Για παράδειγμα, αν υπάρχει ένα άνω όριο στον διαθέσιμο χρόνο, όπως συμβαίνει και στον διαγωνισμό εξοικονόμησης ενέργειας που συμμετέχει το πρωτότυπο όχημα, το προφίλ με την ελάχιστη ενέργεια που ικανοποιεί αυτό το όριο δύναται να επιλεγεί. Στην περίπτωση που η στάθμη φόρτισης της μπαταρίας του οχήματος είναι χαμηλή, θα επιλεγεί ένα προφίλ που επιτρέπει την ολοκλήρωση της

διαδρομής στον ελάχιστο χρόνο. Ακόμα, η τάση των λύσεων είναι εμφανής, επιτρέποντας την επιλογή ενός προφίλ που θα συμπεριλαμβάνει σημαντικά οφέλη στην ενέργεια με αντιστάθμισμα μικρή αύξηση στο χρόνο της διαδρομής. Για ένα επιλεγμένο προφίλ ταχύτητας, εκτελείται επιπρόσθετα και βελτιστοποίηση ορίων ροπής ώστε να επιτευχθούν περαιτέρω οφέλη στο χρόνο και την ενέργεια. Η ύπαρξη αυτών των προφίλ ορίου ροπής αυξάνουν την πιθανότητα του οχήματος να καταφέρει να φτάσει τον επιθυμητό προορισμό στον ορισμένο χρόνο παρά την ύπαρξη εμποδίων στο δρόμο. Στην περίπτωση μικρής καθυστέρησης, ο υπολογιστής μπορεί να μεταπηδήσει σε ταχύτερο προφίλ για να ολοκληρώσει τη συνολική διαδρομή στον επιθυμητό χρόνο.

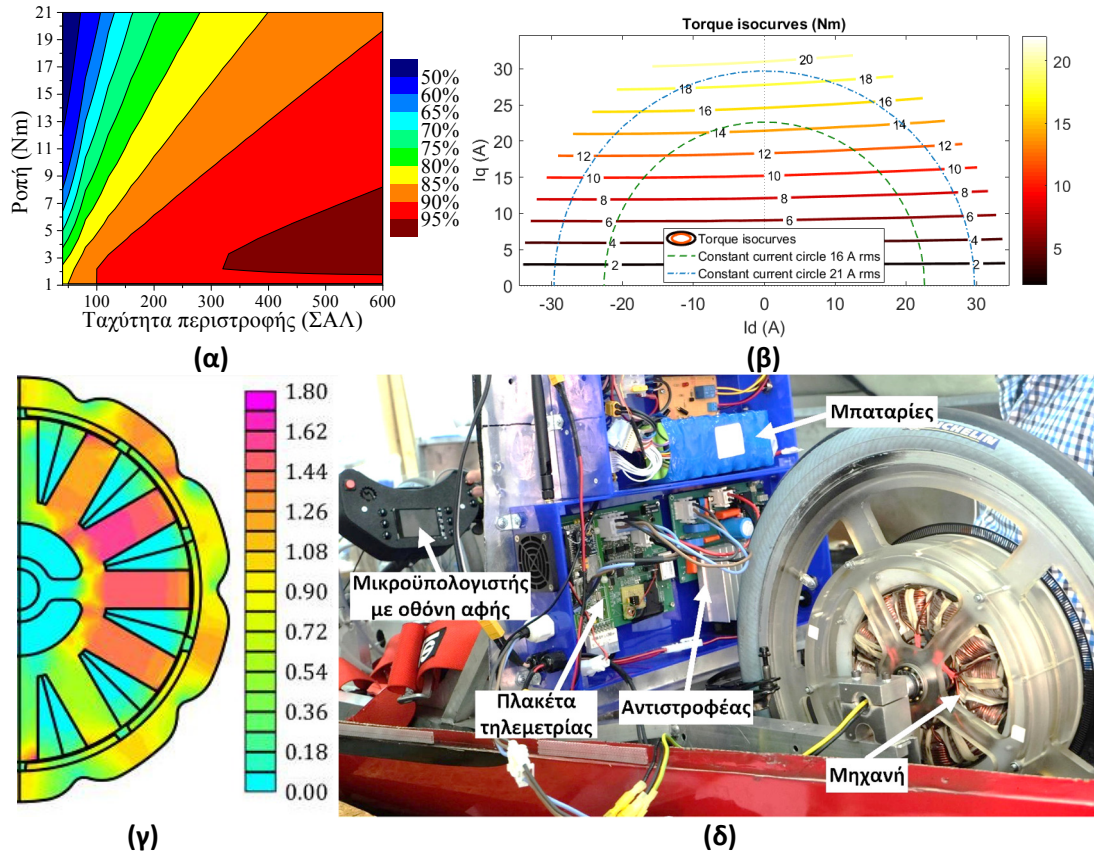
8.2.5 Μεθοδολογική επέκταση σε μεγάλες διαδρομές

Η προτεινόμενη μεθοδολογία θα μπορούσε να επεκταθεί σε περιπτώσεις προκαθορισμένων μεγάλων διαδρομών, οι οποίες θα περιλαμβάνουν περιορισμένο αριθμό περιοχών με σημαντικές αλλαγές κλίσεων στα υψομετρικά προφίλ και για τις οποίες θα υπάρχει γνώση των κατά τόπους ορίων ταχύτητας μέσω δεδομένων GIS. Οι μόνες παράμετροι που πρέπει να προσαρμοστούν και να επιλεγθούν από τον χρήστη είναι το μήκος της βασικής διαδρομής (στην προκειμένη περίπτωση είναι ίσο με το μήκος του γύρου) και ο αριθμός των τμημάτων ανά βασική διαδρομή (στη προκειμένη περίπτωση αυτό τίθεται στη τιμή 8). Ο χρόνος υπολογισμών του αλγορίθμου εξαρτάται από τον αριθμό των σημείων κατάτμησης και τη μορφολογία της διαδρομής. Τα ενεργειακά οφέλη που θα επιτευχθούν είναι ανάλογα με το λόγο σημείων κατάτμησης προς μήκος διαδρομής. Ανάλογα με την διαθέσιμη επεξεργαστική ισχύ και τον υπολογιστικό χρόνο, ο αριθμός των σημείων κατάτμησης και η προκαθορισμένη τιμή μήκους της βασικής διαδρομής μπορούν να επιλεγθούν. Σε αυτό το πλαίσιο, αλλαγές της διαδρομής του οχήματος σε πραγματικό χρόνο σε τυπικούς δρόμους πόλης και αυτοκινητόδρομους αναμένεται να αντιμετωπιστούν από τυπικούς επεξεργαστές, ενώ η εφαρμοσιμότητα της τεχνικής σε τοπικούς δρόμους που περιλαμβάνουν συχνές αλλαγές κλίσης εξαρτάται από την επεξεργαστική ισχύ του υπολογιστή του οχήματος και αν αυτός είναι σε θέση να επιλύσει τα παράλληλα προβλήματα βελτιστοποίησης.

8.3 Μοντελοποίηση οχήματος

Σε αυτό το κεφάλαιο εξηγείται με λεπτομέρεια το δυναμικό μοντέλο ενός προσομοιωτή του τρίτροχου ελαφρού ηλεκτρικού οχήματος. Σε γενικές γραμμές, το μοντέλο θεωρείται ότι λαμβάνει σαν είσοδο το προφίλ ταχύτητας του οχήματος και τα υψομετρικά δεδομένα της διαδρομής και παρέχει την καταναλισκόμενη ενέργεια και το χρόνο της διαδρομής σαν εξόδους. Λαμβάνει υπόψη τις δυνάμεις της επιτάχυνσης, της αεροδυναμικής αντίστασης, της αντίστασης κύλισης και της παράλληλης συνιστώσας του βάρους σε δρόμους με κλίση προκειμένου να υπολογίσει την ισχύ που χρειάζεται το όχημα για να κινηθεί. Χρησιμοποιώντας τον εκ των προτέρων υπολογισμένο χάρτη απόδοσης του κινητηρίου συστήματος μπορεί να υπολογιστεί, τελικά, η ισχύς εισόδου.

Το όχημα που εξετάζεται είναι ένα τρίτροχο ελαφρύ ηλεκτρικό όχημα (light electric



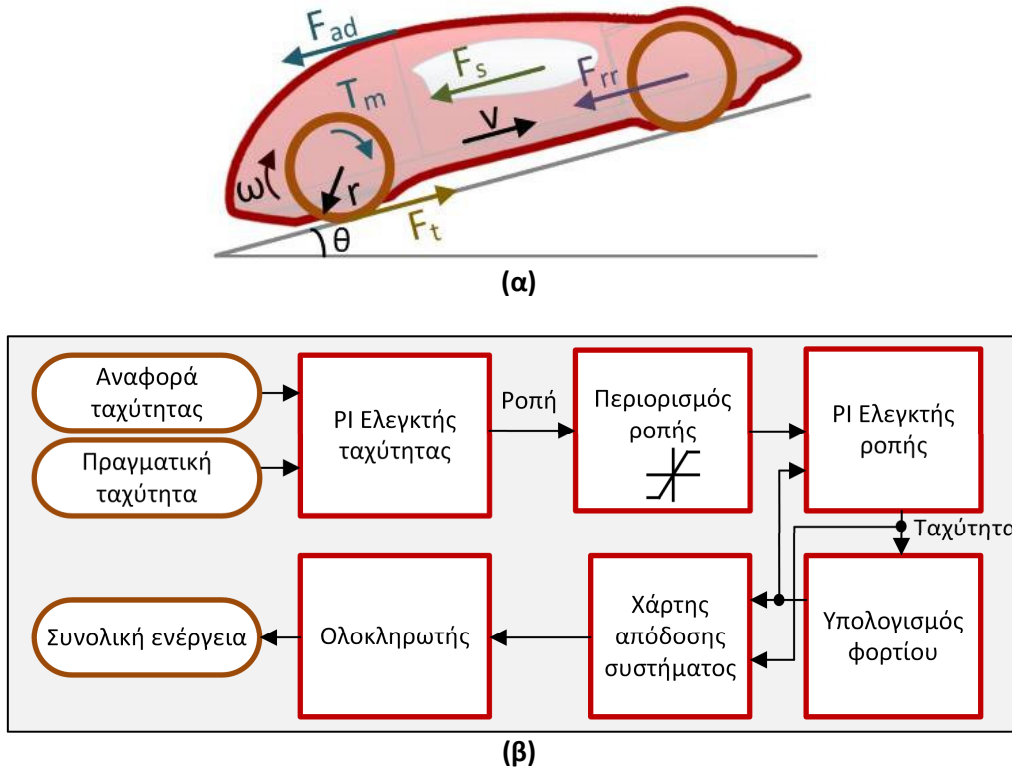
Σχήμα 8.3: (α) Χάρτης απόδοσης, (β) ισοδυναμικές καμπύλες ροπής συναρτήσει του φασικού ρεύματος d και q άξονα και (γ) κατανομή μαγνητικού πεδίου της μηχανής επιφανειακών μονίμων μαγνητών εξωτερικού δρομέα του οχήματος. (δ) Συνιστώσες οχήματος

vehicle- LEV) που είναι εξοπλισμένο με έναν κινητήρα επιφανειακών μονίμων μαγνητών (Surface Mounted Permanent Magnet - SMPM) εξωτερικού δρομέα με συγκεντρωμένα τυλίγματα κλασματικού βήματος (Fractional Slot Concentrated Windings - FSCW) και αποτελείται από 10 πόλους και 12 αύλακες (σχήμα 8.3γ), ο οποίος αποτελεί την πίσω ρόδα (σχήμα 8.3δ). Τα χαρακτηριστικά του οχήματος και της ηλεκτρικής μηχανής απεικονίζονται στον πίνακα 8.1. Η ηλεκτρική μηχανή οδηγείται από έναν τριφασικό μετατροπέα πηγής τάσης με γέφυρα δύο επιπέδων. Αποτελείται από διακόπτες MOSFET και υποστηρίζει αντίστροφη ροή ισχύος. Επιστρατεύεται διανυσματικός έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου (Field Oriented Control - FOC) με διαμόρφωση διανυσμάτων χώρου (Space Vector Modulation - SVM). Το σύστημα τροφοδοτείται από μπαταρίες λιθίου.

8.3.1 Ασκούμενες δυνάμεις

Χρησιμοποιώντας το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, οι δυνάμεις που εκφράζουν την κίνηση του οχήματος μπορούν να εκφραστούν παρόμοια με την [68] ως εξής (σχήμα 8.4α):

$$m_{ev} \cdot \frac{dv}{dt} = F_t - F_{ad} - F_{rr} - F_s \quad (8.3)$$



Σχήμα 8.4: (α) Δυναμικό μοντέλο οχήματος για τον υπολογισμό του φορτίου. (β) Δομικό διάγραμμα υπολογισμού κατανάλωσης ενέργειας.

όπου m_{ev} η μάζα του οχήματος, v η ταχύτητα, F_t η δύναμη επιτάχυνσης, F_{ad} η αεροδυναμική αντίσταση, F_{rr} η αντίσταση κύλισης και F_s η παράλληλη με το έδαφος συνιστώσα του βάρους στους δρόμους με κλίση. Η δύναμη λόγω αεροδυναμικής αντίστασης μπορεί να εκφραστεί ως:

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho A_f C_d v^2 \quad (8.4)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα, A_f η μετωπική επιφάνεια του οχήματος και C_d ο συντελεστής οπισθέλκουσας δύναμης. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι εξ' αιτίας της αναλογίας της αεροδυναμικής αντίστασης με το τετράγωνο της ταχύτητας του οχήματος, αυτή η δύναμη γίνεται δεσπόζουσα σε υψηλές ταχύτητες. Η αντίσταση κύλισης υπολογίζεται ως εξής:

$$F_{rr} = C_{rr} m_{ev} g \cos(\theta) \quad (8.5)$$

όπου C_{rr} είναι ο συντελεστής αντίστασης κύλισης, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και θ η γωνία κλίσης του οδοστρώματος. Η παράλληλη με το επίπεδο συνιστώσα του βάρους του οχήματος σε δρόμους με κλίσεις θα είναι:

$$F_s = m_{ev} g \sin(\theta) \quad (8.6)$$

Πίνακας 8.1: Χαρακτηριστικά οχήματος

	Μέγεθος	Τιμή
Μηχανή	Ενεργό μήκος (mm)	20
	Ακτίνα διακένου (mm)	85.35
	Εξωτερική ακτίνα (mm)	103
	Ονομαστική ροπή (Nm)	16
	Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής (ΣΑΛ)	300
	Απόδοση (%)	91.86
	Συνολική μάζα (kg)	5
Όχημα	Μέγεθος ελαστικών	45/75 R16
	Ακτίνα τροχού (mm)	239
	Μάζα (kg)	96
	Συντελεστής αντίστασης κύλισης	0.006
	Γινόμενο συντελεστή αντίστασης αέρα επί τη μετωπική επιφάνεια(m ²)	0.0331
	Πυκνότητα αέρα (kg/ m ²)	1.2
	Σχέση μετάδοσης	1:1
	Τελική ταχύτητα (km/h)	47

Είναι επίσης χρήσιμο να μοντελοποιηθεί η επίδραση της αδράνειας του πίσω τροχού στις εξισώσεις κίνησης του οχήματος, η οποία είναι σημαντική σε αυτή τη περίπτωση:

$$J_w \cdot \dot{\omega} = T_m - r \cdot F_t \quad (8.7)$$

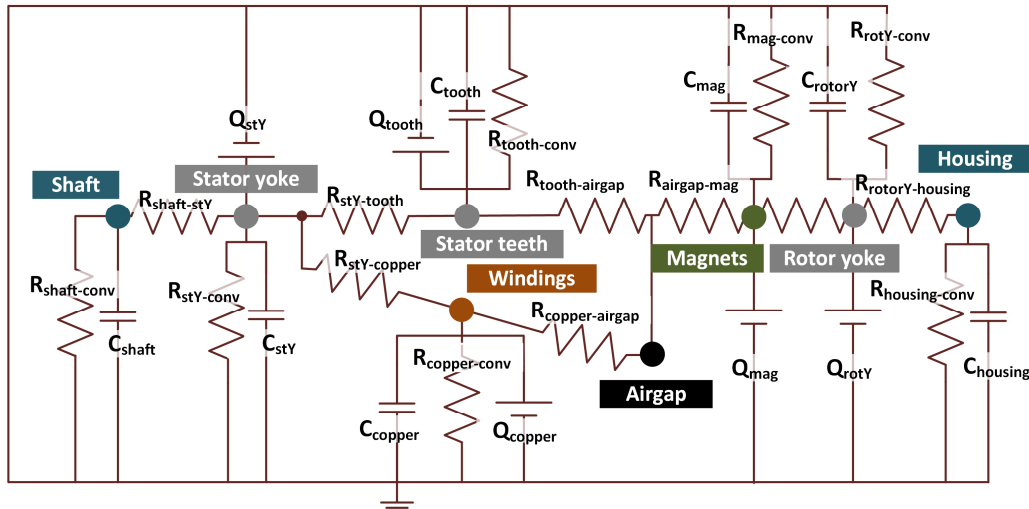
όπου J_w η αδράνεια του πίσω τροχού, ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, T_m η ροπή του κινητήρα και r η ακτίνα του τροχού. Τελικά, η ταχύτητα του οχήματος υπολογίζεται μέσω της ακτίνας ως εξής:

$$v = r \cdot \omega \quad (8.8)$$

8.3.2 Μοντέλο ενεργειακής κατανάλωσης

Ο χάρτης απόδοσης του κινητήριου συστήματος του ηλεκτρικού οχήματος χρησιμοποιείται στη παρούσα εργασία για τον υπολογισμό της καταναλισκόμενης ενέργειας. Αυτός εξάγεται από προσομοιώσεις με πεπερασμένα στοιχεία για διάφορες τιμές ροπής και ταχύτητας περιστροφής και απεικονίζεται στο σχήμα 8.3α. Λαμβάνονται υπόψη με κατάλληλα αναλυτικά μοντέλα οι απώλειες δινορρευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες λόγω αρμονικών χώρου της μαγνητεγερτικής δύναμης καθώς και οι απώλειες χαλκού και σιδήρου στον πυρήνα της μηχανής [36]. Στις προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων, για κάθε σημείο λειτουργίας, θεωρείται η λειτουργία μέγιστης ροπής ανά αμπέρ (Maximum Torque per Ampere -MTPA) (σχήμα 8.3β) [48], [89]. Εξασθένιση πεδίου δεν θεωρείται για αυτή τη γκάμα ταχυτήτων περιστροφής. Η απόδοση του αντιστροφέα θεωρείται σταθερή.

Για να υπολογιστεί η ενέργεια που καταναλώθηκε (σχήμα 8.4β), το μοντέλο λαμβάνει τη ταχύτητα του οχήματος σαν είσοδο και υπολογίζει το φορτίο της μηχανής για κάθε χρονική μονάδα. Λαμβάνοντας υπόψη το φορτίο της μηχανής και τη τρέχουσα



Σχήμα 8.5 Θερμικό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων της μηχανής

ταχύτητα του οχήματος, μπορεί να υπολογιστεί η ισχύς εξόδου του συστήματος πρόωσης ως εξής:

$$P_{out} = T_m \cdot \omega \quad (8.9)$$

Ο χάρτης απόδοσης του συστήματος χρησιμοποιείται τώρα για τον υπολογισμό της ισχύος εισόδου τόσο κατά τη φάση της επιτάχυνσης όσο και κατά τη φάση της επιβράδυνσης:

$$P_{in} = \begin{cases} \frac{P_{out}}{\eta_s}, & T_m \geq 0 \\ P_{out} \cdot \eta_s, & T_m < 0 \end{cases} \quad (8.10)$$

όπου η_s ο συντελεστής απόδοσης του κινητηρίου συστήματος. Η στιγμιαία ισχύς εισόδου ολοκληρώνεται στο χρόνο για να υπολογιστεί η ολική καταναλισκόμενη ενέργεια.

8.3.3 Θερμικό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων

Για να λάβουμε υπόψη τους θερμικούς περιορισμούς κάθε λύσης, ένα μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων (σχήμα 8.5) [87], [88] ενσωματώνεται στο δυναμικό μοντέλο του οχήματος και υπολογίζει τη θερμοκρασία σε κρίσιμα σημεία της μηχανής κάθε χρονική στιγμή. Στο θερμικό ισοδύναμο μοντέλο γίνεται αντιστοίχιση θερμικών και ηλεκτρικών μεγεθών, βάσει της φυσικής σημασίας τους. Η διαφορά δυναμικού αντιστοιχίζεται με τη διαφορά θερμοκρασίας. Το ρεύμα με τη ροή θερμότητας, η ηλεκτρική αντίσταση με τη θερμική αντίσταση και η ηλεκτρική χωρητικότητα με τη θερμοχωρητικότητα. Η τελευταία χρησιμεύει αποκλειστικά για τη μεταβατική φάση του φαινομένου [90]. Έτσι επιτυγχάνεται ταχύτατη επίλυση του θερμικού προβλήματος με πολύ καλή ακρίβεια, εφόσον έχει προηγηθεί σωστός υπολογισμός των παραμέτρων.

Πίνακας 8.2: Τιμές χωρητικότητας και αντιστάσεων αγωγής και συναγωγής

Θερμοχωρητικότητα	Συμβολισμός	C(J/K)
Άξονας	C_{shaft}	171
Σώμα στάτη	C_{stY}	128
Δόντια	C_{tooth}	396
Τυλίγματα	C_{copper}	715
Μαγνήτες	C_{mag}	58
Σώμα δρομέα	C_{rotY}	336
Κέλυφος	$C_{housing}$	560

Αντίσταση αγωγής	Συμβολισμός	R(Ω)
Άξονας-Σώμα στάτη	$R_{shaft-stY}$	0.049
Σώμα στάτη-Δόντια	$R_{stY-tooth}$	0.1
Σώμα στάτη-Τυλίγματα	$R_{stY-copper}$	1.31
Δόντια-Διάκενο	$R_{tooth-airgap}$	1.21
Τυλίγματα-Διάκενο	$R_{copper-airgap}$	2.32
Διάκενο-Μαγνήτες	$R_{airgap-mag}$	1.14
Μαγνήτες- Σώμα δρομέα	$R_{mag-rotorY}$	0.024
Σώμα δρομέα - Κέλυφος	$R_{rotorY-housing}$	0.0077

Αντίσταση συναγωγής	Συμβολισμός	R(Ω)
Άξονας	$R_{shaft-conv}$	13.01
Σώμα στάτη	$R_{stY-conv}$	95
Δόντια	$R_{tooth-conv}$	18.5
Τυλίγματα	$R_{copper-conv}$	8.1
Μαγνήτες	$R_{mag-conv}$	17.3
Σώμα δρομέα	$R_{rotY-conv}$	14.3
Κέλυφος	$R_{housing-conv}$	6

Το θερμικό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων απαρτίζεται, λοιπόν, από τρία είδη στοιχείων: τις πηγές, τις αντιστάσεις και τις χωρητικότητες. Οι πηγές θερμότητας υφίστανται λόγω των απωλειών της μηχανής και η τιμή τους ισούται με τη τιμή των απωλειών. Οι τιμές των χωρητικότητας που αντιπροσωπεύουν τη θερμοχωρητικότητα των διαφόρων επιμέρους συνιστωσών των μηχανών υπολογίζονται από τη σχέση:

$$C = p \cdot C_p \cdot V \quad (J/K) \quad (8.11)$$

όπου $p(kg/m^3)$ η πυκνότητα του υλικού, $C_p (J/Kg \cdot K)$ η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού και $V(m^3)$ ο όγκος της συνιστώσας του κινητήρα που υπολογίζουμε. Οι αντιστάσεις διαχωρίζονται σε θερμικές αντιστάσεις αγωγής και συναγωγής. Η αντίσταση αγωγής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_{\alpha\gamma} = L/\lambda A \quad (K/W) \quad (8.12)$$

όπου λ είναι ο συντελεστής αγωγιμότητας, L το μήκος του υλικού μέσω του οποίου γίνεται η μετάδοση της θερμότητας και A η επιφάνεια του υλικού. Η αντίσταση συναγωγής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_{\sigma\nu} = 1/hA \quad (K/W) \quad (8.13)$$

όπου h είναι ο συντελεστής συναγωγής και A η επιφάνεια επαφής στερεού και ρευστού. Οι τιμές των αντιστάσεων αγωγής και συναγωγής και των θερμοχωρητικοτήτων παρατίθενται στον πίνακα 8.2. Οι συμβολισμοί που δίδονται αντιστοιχούν στους συμβολισμούς τους σχήματος 8.5.

8.4 Προσομοιωμένα αποτελέσματα

Το ελαφρύ ηλεκτρικό όχημα (LEV) προσομοιώνεται εδώ για ένα πλήρη γύρο της κλειστής πίστας του σχήματος 8.1α χωρίς περιορισμούς ταχύτητας λόγω κίνησης ή άλλων εμποδίων. Η πίστα χαρακτηρίζεται από ένα ποικίλο υψομετρικό προφίλ που απεικονίζεται στο σχήμα 8.1δ. Μία κλειστή πίστα αποτελεί βολική περίπτωση δοκιμής για τις ανάγκες της προσομοίωσης καθώς τα σημεία εκκίνησης και τερματισμού βρίσκονται στο ίδιο σημείο με συνέπεια να έχουν κοινό υψόμετρο. Αρχικά, υποτίθεται ένας χρόνος διαδρομής που συμβολίζεται ως T_o . Σε αυτή τη περίπτωση, ο T_o είναι ο μέγιστος επιτρεπτός χρόνος που διαθέτει το όχημα για να διατρέξει τη πίστα μία φορά. Το όχημα προσομοιώνεται ύστερα να ταξιδεύει με σταθερή ταχύτητα διαμέσου της πίστας έτσι ώστε να επιτευχθεί χρόνος γύρου T_o . Η συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια E_o καταγράφεται σε αυτή τη προσπάθεια. Τα κριτήρια βελτιστοποίησης θεωρούν την ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης και της διάρκειας του ταξιδιού και εκφράζονται ως εξής:

$$[f_1 \quad f_2]^T = \left[\begin{array}{cc} E_t & T_t \\ E_o & T_o \end{array} \right]^T \quad (8.14)$$

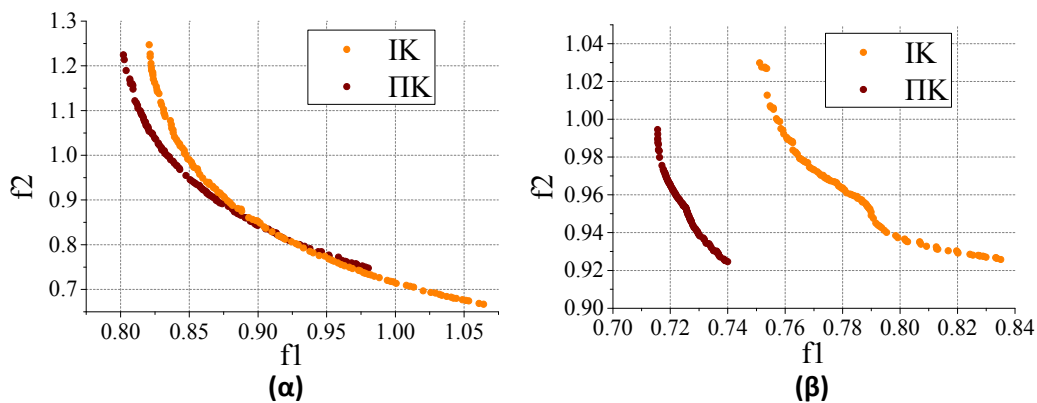
Το πολυκριτηριακό πρόβλημα ελαχιστοποίησης διαμορφώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f_1(\mathbf{v}), f_2(\mathbf{v}) \\ & \text{subject to } 0 < v_i \leq V_{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, n \\ & \quad v_{\text{start}} = v_{\text{finish}}, \quad \mathbf{e}_{\text{start}} = \mathbf{e}_{\text{finish}} \\ & \quad t_{\text{wn}} \leq t_{\text{w1}}, \quad t_{\text{wi}} \leq t_{\text{crit}} \end{aligned} \quad (8.15)$$

όπου V_{max} είναι το κοινό άνω όριο για όλα τα σημεία, t_w η θερμοκρασία των τυλιγμάτων και t_{crit} η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία των τυλιγμάτων. Οι θερμοκοί περιορισμοί της (8.15) αποτρέπουν την παραγωγή προφίλ ταχυτήτων που μπορεί να προκαλέσουν υπερθέρμανση των τυλιγμάτων της μηχανής μετά από άπειρες επαναλήψεις του οδηγικού προφίλ. Η αρχική θερμοκρασία $t_{w,i}$ τίθεται ως η τελική θερμοκρασία ύστερα από άπειρες επαναλήψεις του σεναρίου σταθερής ταχύτητας. Στο τέλος της προσομοίωσης της συγκεκριμένης διαδρομής η θερμοκρασία των τυλιγμάτων πρέπει να είναι χαμηλότερη από την αρχική τιμή. Παρόλαυτα, σε κάθε χρονική στιγμή δεν πρέπει να ξεπερνάει μία προκαθορισμένη κρίσιμη τιμή.

Αρχικά, ο αριθμός σημείων κατάτμησης τίθεται ίσος με 8. Το πρόβλημα ελαχιστοποίησης λύνεται με μία εκδοχή κωδικοποίησης δεκαδικού συστήματος της υβριδικής SPEA-DE τεχνικής [36]. Η SPEA-DE είναι μία πολυκριτηριακή μετά-ερευνητική τεχνική που ενσωματώνει τις τεχνικές ανάθεσης καταλληλότητας της SPEA2 και την έννοια των διαφορικών διανυσμάτων της DE στη φάση της επιλογής μέσω δυαδικών τουρνουά. Ο χειρισμός των περιορισμών των οριακών συνόρων επιτυγχάνεται με την μέθοδο της αναπήδησης προς τα πίσω (bounce back), ενώ η περικοπή του αρχείου επιτυγχάνεται με μία τεχνική ομαδοποίησης. Ο χειρισμός των περιορισμών υλοποιείται με την πρόσθεση μίας μεγάλης σταθεράς στις τιμές της συνάρτησης κόστους των λύσεων που είναι μη εφικτές. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι λύσεις που δεν ικανοποιούν τους περιορισμούς κυριαρχούνται από οποιαδήποτε λύση που ικανοποιεί τους περιορισμούς. Ωστόσο, σε περίπτωση που το αρχείο είναι γεμάτο από μη εφικτές λύσεις (το οποίο συμβαίνει κυρίως στις αρχικές επαναλήψεις του αλγορίθμου) οι σχέσεις κυριαρχίας μεταξύ τους διατηρούνται. Συνεπώς, υποβοηθείται ο αλγόριθμος προς τη γρηγορότερη εύρεση των εφικτών λύσεων. Το μέγεθος του πληθυσμού τίθεται ίσο με 100 και το μέγεθος του εξωτερικού αρχείου ίσο με 120. Η πιθανότητα διασταύρωσης είναι ίση με 0.7 ενώ η πιθανότητα μετάλλαξης είναι 0.3. Ο αριθμός των επαναλήψεων τίθεται στη τιμή 50. Το τελικό μέτωπο Pareto που προκύπτει φαίνεται στο σχήμα 8.6α.

Παρατηρούνται βελτιώσεις στην κατανάλωση ενέργειας κατά 16.8% και 15% για τη προτεινόμενη μέθοδο κατάτμησης και τη μέθοδο ίσης κατάτμησης, αντίστοιχα, χωρίς την αύξηση της διάρκειας της διαδρομής. Στο σχήμα 8.7 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες της ταχύτητας του οχήματος, της ροπής, της ισχύος εισόδου και της ενέργειας για τις δύο περιπτώσεις κατάτμησης.

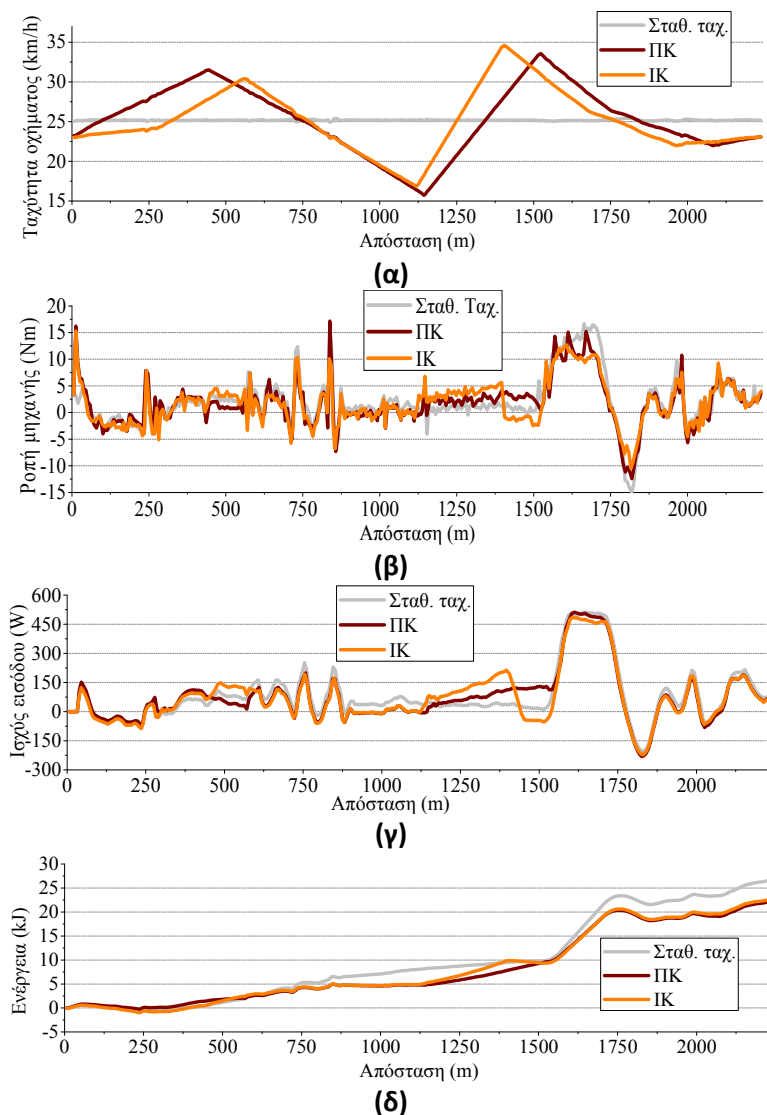


Σχήμα 8.6: Μέτωπο Pareto που προκύπτει μετά από τη βελτιστοποίηση (α) του προφίλ ταχύτητας, (β) του προφίλ ορίων ροπής.

Το βέλτιστο προφίλ ορίων ροπής μπορεί επίσης να υπολογιστεί για τη λύση του μετώπου Pareto των προφίλ ταχύτητας με χρόνο T_o . Το πρόβλημα βελτιστοποίησης εκφράζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize} \quad f_1(\mathbf{y}_u, \mathbf{y}_d), f_2(\mathbf{y}_u, \mathbf{y}_d) \\
 & \text{subject to} \quad 0 \leq y_{ui} \leq T_{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, n \\
 & \quad \quad \quad -T_{\max} \leq y_{di} \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \\
 & \quad \quad \quad v_{start} = v_{finish}, e_{start} = e_{finish} \\
 & \quad \quad \quad t_{wn} \leq t_{w1}, t_{w,i} \leq t_{crit}
 \end{aligned} \tag{8.16}$$

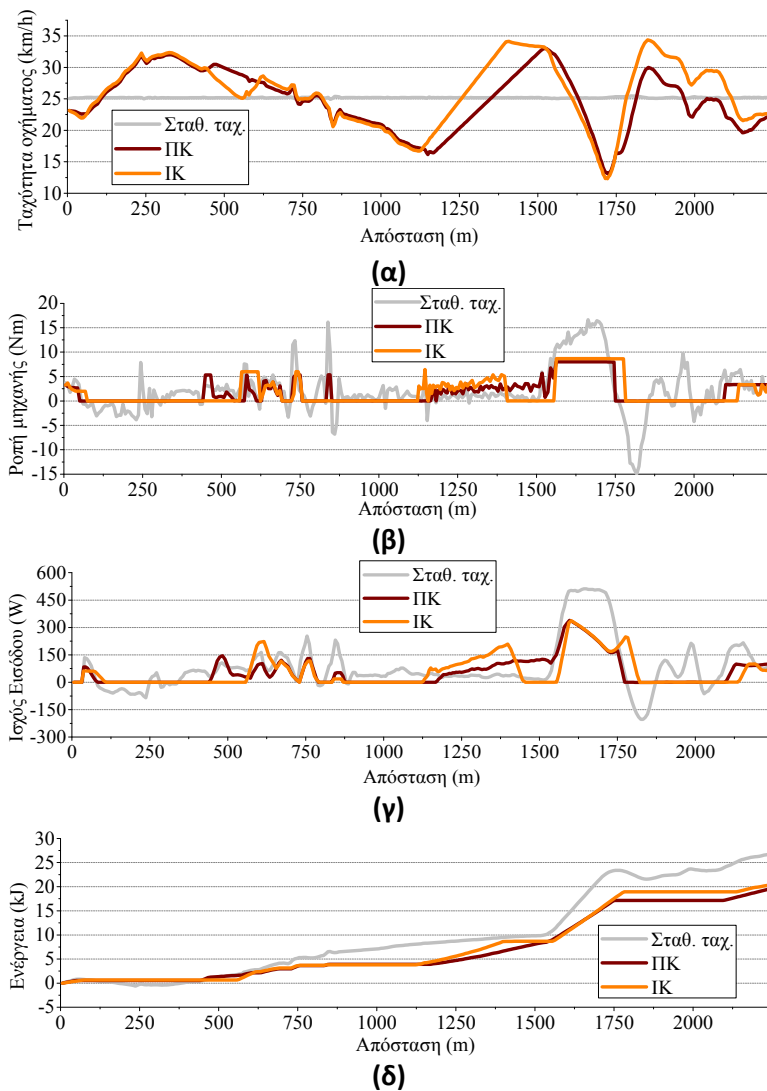
όπου τα άνω και κάτω όρια της ροπής τίθενται σαν απόλυτη τιμή στη μέγιστη ικανότητα ροπής της ηλεκτρικής μηχανής T_{max} . Ο αριθμός των σημείων κατάτμησης



Σχήμα 8.7: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης προφίλ ταχύτητας. Απεικόνιση (α) ταχύτητας, (β) ροπής, (γ) ισχύος εισόδου και (δ) καταναλισκόμενης ενέργειας για τις μεθόδους Προτεινόμενης Κατάτμησης (ΠΚ) και Ίσης Κατάτμησης (ΙΚ) με παράλληλη σύγκριση με το σενάριο σταθερής ταχύτητας.

η παραμένει ο ίδιος όπως και πρωτύτερα. Πανομοιότητες είναι οι ρυθμίσεις του SPEA-DE και σε αυτό το πρόβλημα, με τη μόνη διαφορά να έγκειται στον αριθμό των μεταβλητών απόφασης, που τώρα είναι διπλάσιες. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο σχήμα 8.6β. Επιλέγεται, κατόπιν, από τον υπολογιστή του οχήματος σαν προεπιλογή μία λύση από το μέτωπο Pareto των προφίλ ορίων ροπής με χρόνο διαδρομής T_0 . Ωστόσο, εναλλακτικά προφίλ μπορούν να αποθηκευτούν και να επιλεγθούν από τον οδηγό στον αγώνα προκειμένου π.χ. να τρέξει πιο γρήγορα σε περίπτωση που προκύψουν καθυστερήσεις στη πίστα λόγω συμφορήσεων οχημάτων.

Αυτό είναι ένα εξαιρετικό πλεονέκτημα της μεθόδου για τον συγκεκριμένο αγώνα γιατί μία τυχόν καθυστέρηση θα ανάγκαζε τον οδηγό να αγνοήσει το σύστημα και να τρέξει πιο γρήγορα χωρίς στρατηγική και με έναν μη βέλτιστο τρόπο προκειμένου να αναπληρώσει τον χαμένο χρόνο. Συνολική εξοικονόμηση ενέργειας της τάξεως των 28.4% και 24.5% παρατηρούνται στις ΠΚ και ΙΚ αντίστοιχα, επιλέγοντας μία κατάλληλη λύση από το μέτωπο Pareto που δεν επιβαρύνει τη διάρκεια της διαδρομής. Οι



Σχήμα 8.8: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης προφίλ ορίων ροπής. Απεικόνιση (α) ταχύτητας, (β) ροπής, (γ) ισχύος εισόδου και (δ) καταναλισκόμενης ενέργειας για τις μεθόδους Προτεινόμενης Κατάτμησης (ΠΚ) και Ίσης Κατάτμησης (ΙΚ) με παράλληλη σύγκριση με το σενάριο σταθερής ταχύτητας.

αντίστοιχες καμπύλες της ταχύτητας του οχήματος, της ροπής, της ισχύος εισόδου και της ενέργειας και για τις δύο περιπτώσεις απεικονίζονται στο σχήμα 8.8. Η θερμοκρασία των τυλιγμάτων της ηλεκτρικής μηχανής για τις μεθόδους σταθερής ταχύτητας, ΠΚ και ΙΚ απεικονίζεται στο σχήμα 8.9. Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ότι μέθοδος κατάτμησης της διαδρομής επιφέρει αξιοσημείωτη μείωση της θερμοκρασίας στα τυλίγματα. Ο υπολογιστικός χρόνος είναι περίπου 4 λεπτά σε έναν φορητό υπολογιστή i7.

8.5 Πειραματική επιβεβαίωση

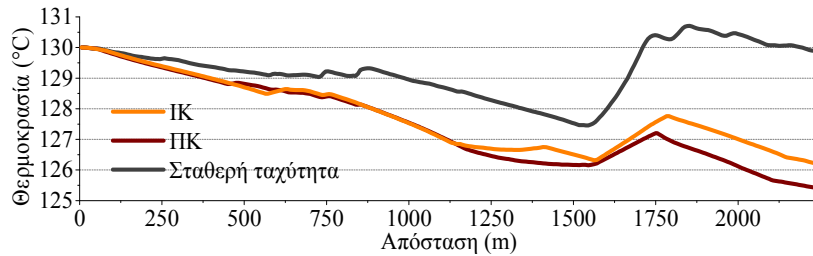
Προκειμένου να επικυρωθεί η προτεινόμενη μεθοδολογία, αναπτύχθηκε μία εφαρμογή Java (σχήμα 8.10α) και εγκαταστάθηκε σε έναν μικροεπεξεργαστή Raspberry PI με οθόνη αφής, ο οποίος τοποθετήθηκε στο τιμόνι του πρωτότυπου ηλεκτρικού οχήματος «Πυρφόρος» (σχήμα 8.10β). Το όχημα έλαβε μέρος επιτυχώς στον ευρωπαϊκό διαγωνισμό εξοικονόμησης ενέργειας (Eco-Marathon) στη μετακίνηση (σχήμα 8.10γ). Τα προφίλ που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο συσχετίστηκαν με τις συντεταγμένες GPS της πίστας και φορτώθηκαν στον μικροϋπολογιστή σαν πίνακες αναζήτησης. Με τη βοήθεια μίας συσκευής GPS, ο Raspberry PI μπορούσε να εντοπίσει τη θέση του οχήματος στη πίστα και να βρει την αντίστοιχη τιμή επιθυμητής ταχύτητας και ορίων ροπής σύμφωνα με το επιλεγμένο οδηγικό προφίλ.

Η διαμόρφωση επιτρέπει είτε αυτόματη λειτουργία του γκαζιού (AutomaticThrottle operation - ATO) είτε καθοδήγηση του οδηγού (Driver Guidance - DG). Στη πρώτη περίπτωση, ο οδηγός πιέζει το μπουτόν ασφαλείας (Safety Button - SB) (σχήμα 8.10β) μόνιμα για να λειτουργήσει το σύστημα. Τότε το τελευταίο στέλνει ένα αναλογικό σήμα για να θέσει την αναφορά ταχύτητας στον αντιστροφέα. Στη λειτουργία DG, ο οδηγός παρακολουθεί τη βέλτιστη ταχύτητα που προτείνει το σύστημα και τη τρέχουσα πραγματική ταχύτητα και μεταχειρίζεται το χειρόγκαζο (Manual Throttle - MT) με στόχο να μην υπάρχει απόκλιση μεταξύ τους. Και στις δύο περιπτώσεις το σύστημα στέλνει ένα δεύτερο αναλογικό σήμα στον αντιστροφέα που περιορίζει τη ροπή στα κατάλληλα διαστήματα με τις κατάλληλες τιμές, σύμφωνα με τη ρουτίνα βελτιστοποίησης.

Κατά τη περιορισμένη διάρκεια του αγώνα, μόνο η καθοδηγούμενη λειτουργία χρησιμοποιήθηκε λόγω τεχνικών προβλημάτων με την ακρίβεια του GPS και την συχνότητα ανανέωσης του. Τα προβλήματα που προέκυψαν οδήγησαν το ATO σε απότομες αλλαγές αναφοράς ταχύτητας, δημιουργώντας βηματικές μεταβολές στο φασικό ρεύμα του κινητήρα. Το σχήμα 8.12 παρουσιάζει τα πειραματικά δεδομένα που λήφθηκαν, συγκρινόμενα με τα προσομοιωμένα, όσον αφορά την ισχύ εισόδου και τη ταχύτητα του οχήματος. Το βέλτιστο προφίλ ταχύτητας και ορίων ροπής σύμφωνα με τη μέθοδο της προτεινόμενης κατάτμησης ήταν αυτό που επιλέχθηκε, όπως ήταν αναμενόμενο, λόγω του μεγαλύτερου οφέλους στην καταναλισκόμενη ενέργεια.

Οι παρατηρούμενες αποκλίσεις μεταξύ των προσομοιωμένων βέλτιστων στόχων και των αντίστοιχων μετρημένων αποτελεσμάτων του σχήματος 8.12 καταδεικνύουν κυρίως τις παρεκκλίσεις που έλαβαν χώρα από την ανάμιξη του ανθρώπινου παράγοντα στο σύστημα λόγω κίνησης και οδηγικών συνθηκών στη πίστα. Ο οδηγός παρεμβαίνει και

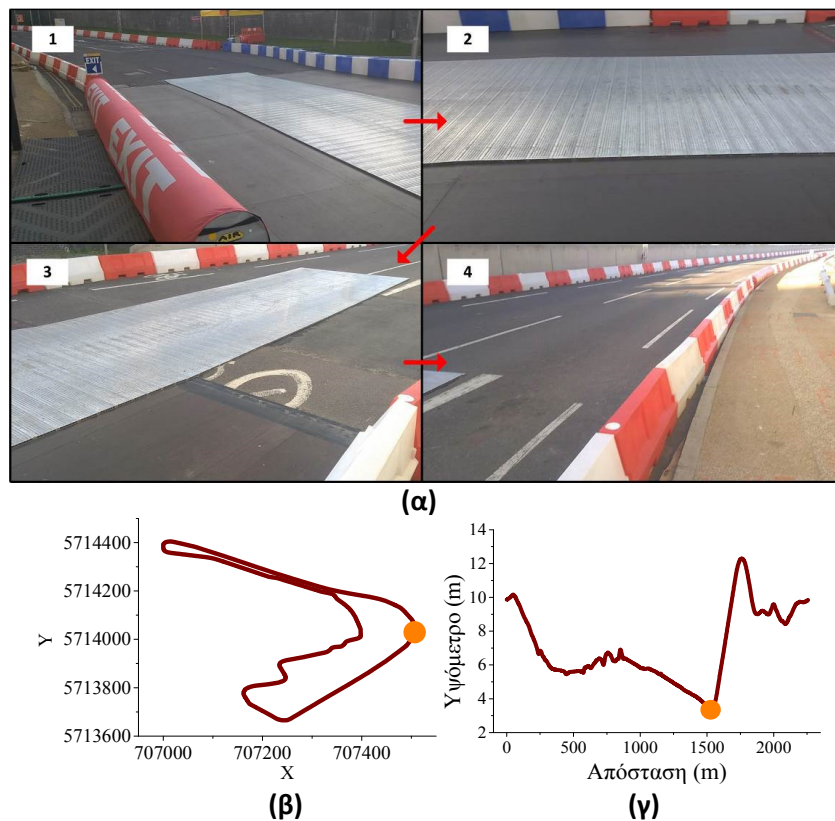
ελέγχει το γκάζι χειροκίνητα σύμφωνα με τις υποδείξεις του συστήματος όποτε αυτό είναι αναγκαίο, ενώ η προσοχή του είναι κυρίως στο δρόμο. Η ύπαρξη άλλων οχημάτων στη πίστα μπορεί να τον αναγκάσει να πάρει κάποια στροφή απότομα, να μην επιταχύνει λόγω αργά κινούμενων οχημάτων που εμποδίζουν ή ακόμα και να πατήσει ελαφρά το φρένο σε περιπτώσεις ανάγκης. Επίσης, η πίστα ήταν γεμάτη από ψηλά σαμαράκια για τους πεζούς, που δεν συμπεριλαμβάνονταν στο υψομετρικό προφίλ που δόθηκε από τους διοργανωτές και επηρέαζαν σημαντικά τις επιδόσεις του οχήματος. Πρακτικά προκαλούσαν μείωση της ταχύτητας του οχήματος που έπρεπε ύστερα να αναπληρωθεί.



Σχήμα 8.9: Καμπύλες θερμοκρασίας τυλιγμάτων για τη περίπτωση της σταθερής ταχύτητας, και των βέλτιστων προφίλ με χρήση ίσης κατάτμησης (ΙΚ) και προτεινόμενης κατάτμησης (ΠΚ).



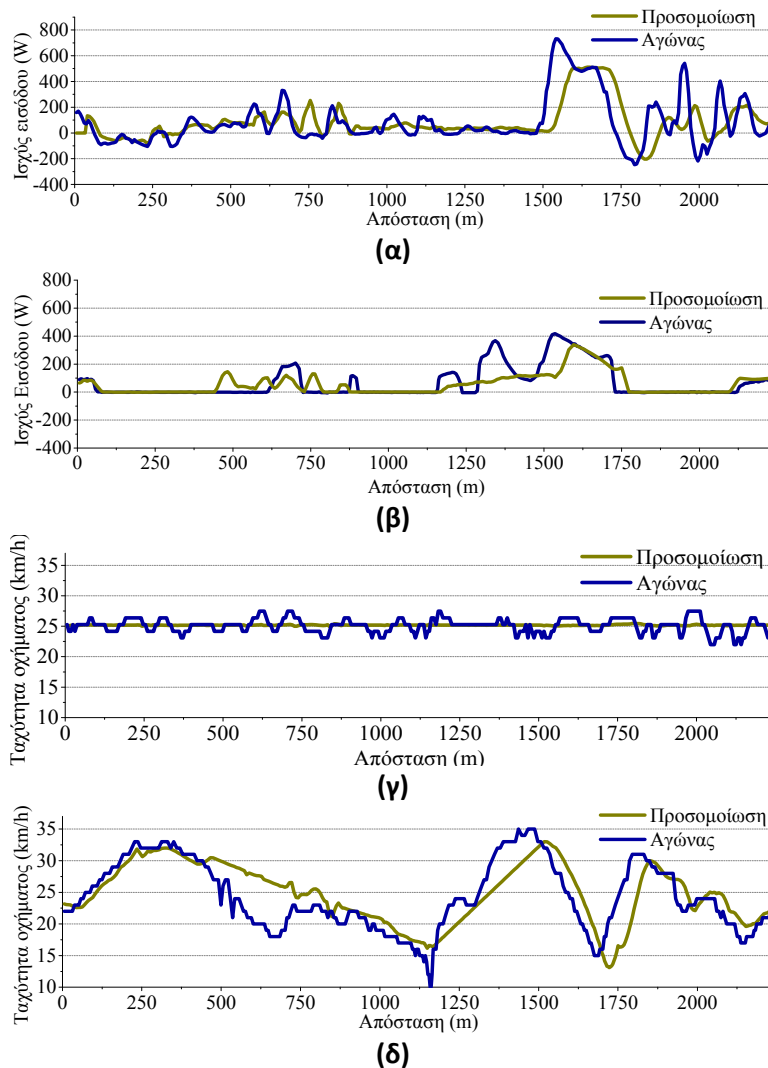
Σχήμα 8.10: (α) Διεπαφή java εφαρμογής SECS και (β) πολυλειτουργικό τιμόνι πρωτότυπου οχήματος με ενσωματωμένο τον μικροϋπολογιστή με την οθόνη αφής. (γ) Το πρωτότυπο όχημα «Πυρφόρος» στον διαγωνισμό «Eco-Marathon» που διεξάχθηκε στο Λονδίνο τον Ιούλιο του 2016.



Σχήμα 8.11: (α) Ομαλοποιημένη ράμπα πεζών και (β),(γ) η θέση της στη πίστα.

Για παράδειγμα, στο σχήμα 8.11 απεικονίζεται η ράμπα των πεζών λίγο πριν το μεγάλο ανηφορικό τμήμα της πίστας σε απόσταση περίπου 1500 μέτρων από την εκκίνηση, το οποίο είχε καλυφθεί από φύλλα ξύλου και μετάλλου προκειμένου να γίνει πιο λείο. Μπορεί να παρατηρηθεί στο σχήμα 8.12γ ότι ο ελεγκτής ταχύτητας επιταχύνει το όχημα καθώς διέρχεται πάνω από τη μεταλλική κατασκευή. Την ίδια στιγμή ξεκινάει η ανηφόρα και οι δύο αυτοί παράγοντες ευθύνονται για την εκτίναξη της ισχύος εισόδου σε αυτό το σημείο. Στο σχήμα 8.13 συγκρίνονται τα δεδομένα του αγώνα για το βελτιστοποιημένο προφίλ και το σενάριο σταθερής ταχύτητας που αφορούν την ενέργεια και τη τάση και το ρεύμα της μπαταρίας. Παρατηρείται εξοικονόμηση ενέργειας 23% και αισθητή μείωση της διακύμανσης των δύο μεγεθών με την προτεινόμενη τεχνική.

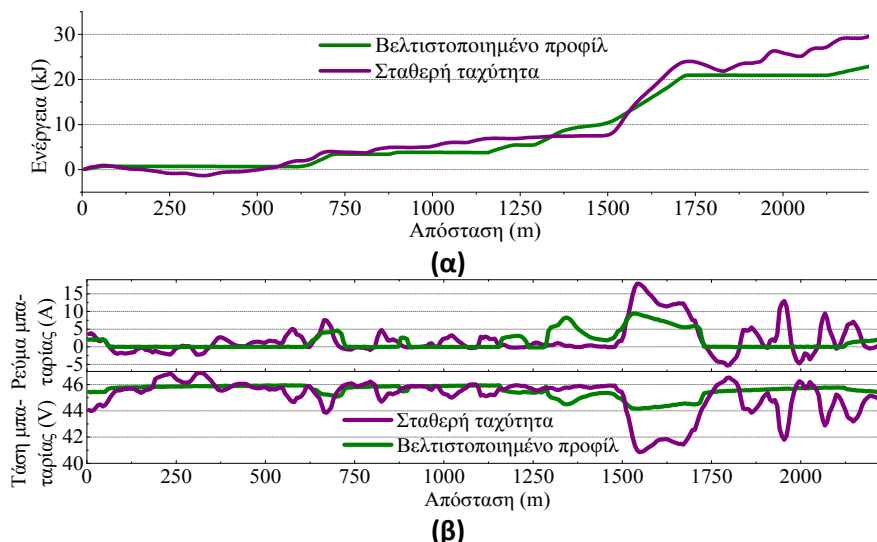
Το θερμικό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων που υλοποιήθηκε (σχήμα 8.5) επιβεβαιώθηκε μέσω σύγκρισης προσομοιωμένων και πειραματικών αποτελεσμάτων σε έναν τυπικό κύκλο φόρτισης [23] και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 8.14α. Το σημείο λειτουργίας που θεωρήθηκε αφορά τα 13Nm ροπή και 300ΣΑΑ ταχύτητα δρομέα. Η θερμοκρασία μετρήθηκε στα τυλίγματα και στο σώμα του στάση με θερμίστορ. Η μηχανή τροφοδοτήθηκε με φορτίο για 130 λεπτά και παρέμεινε χωρίς φορτίο για 120 λεπτά. Ακόμα, έγινε λήψη φωτογραφιών με θερμοκάμερα από δύο διαφορετικές γωνίες λήψης στη λήξη της φάσης θέρμανσης (σχήμα 8.14β). Η σύγκριση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι η μέγιστη θερμοκρασία υπολογίζεται με αποδεκτά μικρό σφάλμα και η θερμική συμπεριφορά κατά τη διάρκεια των φάσεων θέρμανσης και της ψύξης αναπαρίσταται επαρκώς, καταδεικνύοντας την καταλληλότητα του μοντέλου που αναπτύχθηκε για την θεωρούμενη ανάλυση της περιορισμένης υπερφόρτισης.



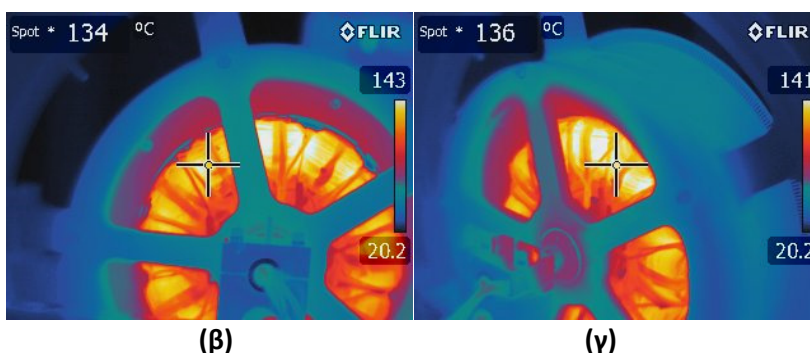
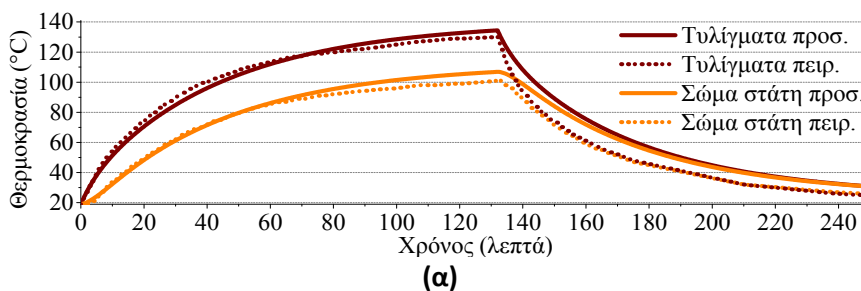
Σχήμα 8.12: Προσομοιωμένες και πειραματικές καμπύλες (α),(β) ισχύος εισόδου και (γ),(δ) ταχύτητας οχήματος για (α),(γ) σταθερή αναφορά ταχύτητας και (β),(δ) βέλτιστο προφίλ ταχύτητας και ορίου ροπής

8.6 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε μία μεθοδολογία για τη βελτιστοποίηση του προφίλ ταχύτητας και ροπής ενός ελαφρού ηλεκτρικού οχήματος που λαμβάνει υπόψη περιορισμένη υπερφόρτιση του κινητήρα και επιτυγχάνει ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας και της χρονικής διάρκειας του ταξιδιού. Η προτεινόμενη τεχνική περιλαμβάνει δύο στάδια. Στο πρώτο, το προφίλ ταχύτητας του οχήματος βελτιστοποιείται με ανοχή περιορισμένης υπερφόρτισης, περίπου 30% μεγαλύτερης από την ονομαστική ροπή, ενώ στο δεύτερο στάδιο τα άνω και κάτω όρια της ροπής βελτιστοποιούνται στα ίδια τμήματα της διαδρομής. Το δρομολόγιο έχει καταταμηθεί σύμφωνα με δύο διαφορετικές μεθόδους: από τη μία μεριά μέσω της επιλογής των πιο σημαντικών τοπικών ακροτάτων και από την άλλη με χρήση ίσων τμημάτων. Προκειμένου να δοκιμαστεί η αποδοτικότητα της μεθοδολογίας θεωρήθηκε ένα τυπικό παράδειγμα κλειστής διαδρομής σε πίστα. Μέσω των πειραμάτων παρατηρήθηκε 23%



Σχήμα 8.13: Σύγκριση βελτιστοποιημένου προφίλ και προφίλ σταθερής ταχύτητας βάσει πειραματικών δεδομένων αγώνα όσον αφορά την (α) ενέργεια και (β) τη τάση και το ρεύμα της μπαταρίας



Σχήμα 8.14: (α) Προσομοιωμένες και πειραματικές τιμές θερμοκρασίας. (β),(γ): Φωτογραφίες θερμοκάμερας στο τέλος του κύκλου θέρμανσης

εξοικονόμηση ενέργειας με χρήση της προτεινόμενης μεθοδολογίας και κατάτμησης στη διαδρομή που θεωρήθηκε. Το συμπέρασμα καταδεικνύει τα πλεονεκτήματα της στρατηγικής σε αυτή τη κατηγορία προβλημάτων.

Κεφάλαιο 9. Σύνοψη και συμπεράσματα

9.1 Κυριότερα συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία αναφέρεται κατά κύριο λόγο σε μεθοδολογικό επίπεδο στη βέλτιστη διαμόρφωση και αξιοποίηση του συστήματος κίνησης ηλεκτρικού οχήματος, είτε κατά τη φάση του σχεδιασμού, είτε κατά τη φάση της λειτουργίας. Όσον αφορά τον σχεδιασμό του ηλεκτρικού κινητήρα, αναπτύχθηκαν προηγμένες και σύνθετες τεχνικές που διευρύνουν τις δυνατότητες του χρήστη, επειδή του επιτρέπουν να λάβει αποφάσεις βασιζόμενος σε πληροφορίες υψηλότερου επιπέδου. Στη περίπτωση της λειτουργίας, δίνεται η δυνατότητα στον οδηγό ή στο αυτόνομο σύστημα κίνησης του ηλεκτρικού οχήματος να επιλέξει σενάρια οδήγησης που προσφέρουν εξοικονόμηση ενέργειας και χρόνου. Σε κάθε περίπτωση, επιτυγχάνεται αυτοματοποίηση της διαδικασίας εξοικονόμησης ενέργειας χωρίς ιδιαίτερη εξάρτηση από τους περιορισμούς ή τις ιδιαίτερες ανάγκες του προβλήματος. Η γενικότερη αλγοριθμική φιλοσοφία της εργασίας έγκειται στον εντοπισμό αποτελεσμάτων που χωρίς να είναι εξασφαλισμένο ότι αποτελούν ολικά βέλτιστα, εμφανίζουν συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι υφιστάμενων μεθοδολογιών και ικανοποιητική ταχύτητα σύγκλισης. Εξάλλου, η επίτευξη μίας πλεονεκτικής λύσης που προσεγγίζει ικανοποιητικά το ολικό βέλτιστο με περιορισμένη υπολογιστική προσπάθεια μπορεί να προσφέρει πολύτιμες υπηρεσίες καθώς η ολικά βέλτιστη λύση δεν έχει πάντα πρακτική σημασία λόγω των κατασκευαστικών και λειτουργικών αβεβαιοτήτων των φυσικών προβλημάτων που προκαλούν αποκλίσεις στα λειτουργικά χαρακτηριστικά της διάταξης.

Μέσω των επιμέρους δράσεων της παρούσας εργασίας έγινε αντιληπτή η σημασία των αποτελεσμάτων μίας διαδικασίας βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων. Τα πραγματικά συστήματα έχουν πολλούς δείκτες απόδοσης και οι εν λόγω τεχνικές επιτρέπουν τον εντοπισμό όλων των βέλτιστα συμβιβαστικών λύσεων μεταξύ αυτών. Προσεκτική παρατήρηση των τάσεων μεταβολής των κριτηρίων και του συσχετισμού αυτών μπορεί να προσφέρει ολοκληρωμένη εικόνα των συμβιβασμών που θα πρέπει να γίνουν ανάλογα με τη σημαντικότητα των στόχων που πρέπει να ικανοποιεί το σύστημα. Μελέτη του αντίκτυπου των βέλτιστων λύσεων στο χώρο αναζήτησης μπορεί, επίσης, να αναδείξει σχεδιαστικούς κανόνες και κατευθυντήριες γραμμές και να καταδείξει ενδεχόμενα λάθη στα όρια του χώρου απόφασης. Με λίγα λόγια, σε έναν χώρο που

εξελισσεται συνεχώς, με τις γεωμετρίες των μηχανών να γίνονται όλο και περισσότερο πολύπλοκες, οι μνημονικοί κανόνες διαστασιολόγησης καθίστανται όλο και πιο προσεγγιστικοί και δυσλειτουργικοί. Σε αυτό ακριβώς το σημείο μπορούν να βοηθήσουν οι προηγμένες τεχνικές, προκειμένου να ληφθούν συστηματικές αποφάσεις με χρήση κατάλληλων παραδοχών.

Συγκεντρωτικά, τα συμπεράσματα της διατριβής μπορούν να διακριθούν στις εξής επιμέρους κατηγορίες:

9.1.1 Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης

Στα πλαίσια της εργασίας εξετάστηκαν δύο πολυκριτηριακοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης με ακρωνύμια ASMA και SPEA-DE, αντίστοιχα. Ο πρώτος από τους δύο αποτελεί συνεισφορά αυτής της εργασίας και ο δεύτερος είναι επιλεγμένος από τη βιβλιογραφία [36]. Παρατηρήθηκε ότι:

- Ο ASMA επιτυγχάνει αυξημένες δυνατότητες σύγκλισης λόγω του συνδυασμού του δεύτερου σταδίου της ABC και του τρόπου ανάθεσης καταλληλότητας της SPEA2. Σύμφωνα με αυτά, τόσο κατά τις πρώτες επαναλήψεις του αλγορίθμου, όσο και κατά τις τελευταίες, γίνεται συχνότερη επίσκεψη των λύσεων (πιθανότητα επίσκεψης ABC) που ξεχωρίζουν είτε λόγω κυριαρχίας είτε λόγω μη συνωστισμού (σχήματα καταλληλότητας SPEA2). Με αυτό τον τρόπο επιταχύνεται η σύγκλιση όπου αυτό είναι εφικτό και ευνοείται η διασπορά των λύσεων όπου διαφαίνεται πιθανότητα εγκλωβισμού σε τοπικά ελάχιστα. Πρόκειται για μία προσαρμοστική αλγοριθμική διαχείριση της ταχύτητας σύγκλισης που δεν εξαρτάται από παραμέτρους του χρήστη.
- Η σύγκριση του ASMA με γνωστούς και καταξιωμένους αλγορίθμους της βιβλιογραφίας (SPEA2, NSGA2, PESA2) κατέδειξε την ανωτερότητα της τεχνικής σε 5 από τα 7 προβλήματα όσον αφορά την ταχύτητα σύγκλισης και σε 6 από τα 7 προβλήματα όσον αφορά την σταθερότητα επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων. Στη δε σταθερότητα, η διαφορά ήταν συχνά κατά μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη σε σχέση με εκείνη των εν λόγω αλγορίθμων.
- Ο ASMA κατασκευάστηκε, ουσιαστικά, για το σχεδιασμό μηχανών επιφανειακών μονίμων μαγνητών. Η εφαρμογή που δοκιμάστηκε αφορά μία 16-πολική μηχανή με άνισα δόντια στάτη για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης με μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων. Συγκρίθηκε με άλλους ισχυρούς αλγορίθμους της βιβλιογραφίας (SPEA2, NSGA2, PESA2) και απαίτησε περίπου μισό χρόνο εκτέλεσης σε σχέση με εκείνων των υπό εξέταση αλγορίθμων. Υπερείχε των άλλων τεχνικών ακόμα και όταν αυτές διέθεταν περισσότερα από τα διπλάσια μέλη πληθυσμού. Επέτρεψε την εξεύρεση γεωμετρίας με αξιοσημείωτη αύξηση στην απόδοση και μείωση των αρμονικών φαινομένων της επαγόμενης τάσης και της ροπής σε σύγκριση με την αρχική γεωμετρία που είχε καθοριστεί με χρήση ανάλυσης ευαισθησίας.
- Ο αλγόριθμος SPEA-DE αποτέλεσε βασικό συστατικό των σύνθετων τεχνικών που αναπτύχθηκαν στα υπόλοιπα κεφάλαια της διατριβής. Επιλέχθηκε μετά από

βιβλιογραφική αναζήτηση, καθώς συνδυάζει καλές ικανότητες σύγκλισης και απλή υλοποίηση. Η τελευταία διευκόλυνε τη διαδικασία προσθήκης επιπρόσθετων στρατηγικών για τη δημιουργία των σύνθετων σχημάτων των κεφαλαίων 5,6,7. Επέδειξε αποτελεσματικότητα στην επίλυση σημαντικά ετερόκλητων προβλημάτων, καθώς κλήθηκε να επιλύσει προβλήματα με μικτά κριτήρια που υπολογίζονταν μέσω πεπερασμένων στοιχείων και νευρωνικών δικτύων. Επίσης, ήταν σε θέση να επιλύσει προβλήματα σχετιζόμενα με τα προφίλ διαχείρισης ενέργειας ηλεκτρικού οχήματος.

9.1.2 Υποκατάστατη μοντελοποίηση ANFIS

Μέσα από τις μελέτες των κεφαλαίων 5 και 6 προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Ο αλγόριθμος ANFIS είναι σε θέση να εκπαιδευτεί στη μοντελοποίηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών των ηλεκτρικών μηχανών μονίμων επιφανειακών μαγνητών συναρτήσει γεωμετρικών μεταβλητών με πολύ μικρό σφάλμα αν ρυθμιστεί και εκπαιδευθεί κατάλληλα.
- Η επιλογή συναρτήσεων μέλους τύπου σταθεράς έχουν σχετικά αμετάβλητες τιμές σφάλματος εκπαίδευσης και πρόβλεψης. Απαιτούν μικρό αριθμό δεδομένων εκπαίδευσης, ωστόσο το σφάλμα λαμβάνει σε κάθε περίπτωση μεγάλη τιμή στη προκειμένη περίπτωση. Σε αντίθεση, οι συναρτήσεις μέλους γραμμικού τύπου μπορούν να επιτύχουν πολύ μικρά σφάλματα εκπαίδευσης και πρόβλεψης με συγκεκριμένες ελάχιστες τιμές πλήθους αρχικών δεδομένων.
- Ανάμεσα στους τύπους συναρτήσεων μέλους, η καλύτερη υποκατάστατη μοντελοποίηση των μηχανών επιτυγχάνεται με το τριγωνικό σχήμα. Ακολουθούν με σειρά αναφοράς η Γκαουσιανή καμπύλη, το γενικευμένο σχήμα καμπάνας, το τραπεζοειδές και το σχήμα Π.
- Ανάμεσα στους δείκτες υποκατάστατης μοντελοποίησης που επιλέχθηκαν, ο αλγόριθμος ANFIS επιτυγχάνει αμελητέο σφάλμα στη ροπή και παρατηρήσιμο, αν και πολύ μικρό, στις απώλειες. Αυτό δικαιολογείται από τα αρμονικά φαινόμενα που εμπλέκονται στον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα και δινορρευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες που μεταβάλλονται έντονα από μικρές μεταβολές στη γεωμετρία της μηχανής.
- Δύναται να ακολουθηθούν τρεις τεχνικές που αφορούν τη λήψη δεδομένων εκπαίδευσης που θα χρησιμοποιηθούν για την υποκατάσταση μοντελοποίηση κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης. Πρώτον, με τη λήψη τυχαίων δεδομένων πριν ξεκινήσει η κυρίως διαδικασία. Δεύτερον, με τη χρησιμοποίηση των δεδομένων της βελτιστοποίησης χωρίς περαιτέρω σπατάλη υπολογιστικών πόρων. Τρίτον, με συνδυασμό και των δύο. Στη πρώτη περίπτωση υπάρχει βεβαιότητα ορθής μοντελοποίησης από την πρώτη γενιά της διαδικασίας βελτιστοποίησης σε βάρος του υπολογιστικού χρόνου. Στη δεύτερη περίπτωση δεν σπαταλούνται παραπάνω υπολογιστικοί πόροι, χωρίς να συνεπάγεται απαραίτητα ότι τα φτωχά αποτελέσματα των πρώτων γενεών θα προκαλέσουν πρόβλημα, καθώς μπορούν να υιοθετηθούν τεχνικές τιμωρίας των αρχικών λύσεων που θα αναγκάζουν τις λύσεις

των πρώτων γενεών να αποχωρούν. Εναλλακτικά, μπορεί κάλλιστα να επανυπολογίζεται σε επόμενες γενιές το κριτήριο που βασίζεται στον αλγόριθμο ANFIS με βάση το πιο πρόσφατα ενημερωμένο υποκατάστατο σύστημα. Η τρίτη περίπτωση αποτελεί την πιο σίγουρη επιλογή αν ο υπολογιστικός χρόνος δεν είναι μείζονος σημασίας. Ενδέχεται κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης ο αλγόριθμος να εστιάσει σε πολύ περιορισμένες περιοχές του χώρου αναζήτησης, καθιστώντας επιτακτική την ανάγκη για καλά εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο ακριβώς εκεί.

- Το σφάλμα εκπαίδευσης αυξάνεται με τον αριθμό των δεδομένων εκπαίδευσης μέχρι και τη σταθεροποίηση του και το αντίθετο ισχύει για το σφάλμα πρόβλεψης. Ένας εμπειρικός κανόνας που προέκυψε, επομένως, και αφορά την επιλογή του κατάλληλου αριθμού αρχικών δεδομένων εκπαίδευσης είναι ο εξής: Ο χρήστης μπορεί να ζητήσει τη λήψη τυχαίων δεδομένων εκπαίδευσης και παράλληλα να επιτηρεί τα σφάλματα εκπαίδευσης και πρόβλεψης. Όταν αυτά γίνουν ίσα δεν ωφελεί η περαιτέρω λήψη δεδομένων και η διαδικασία βελτιστοποίησης μπορεί να ξεκινήσει.

9.1.3 Σύνθετες τεχνικές πεπερασμένων στοιχείων και νευρωνικών δικτύων

Στα κεφάλαια 5 και 6 αναπτύχθηκαν τεχνικές που βασίζονται σε υποκατάστατα συστήματα νευρωνικών δικτύων που μπορούν να εκπαιδευτούν και να μιμηθούν τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Μία τέτοια προσέγγιση επιτρέπει την εκτίμηση των επιδόσεων τεράστιου αριθμού γεωμετριών ηλεκτρικών μηχανών χωρίς την χρονοβόρα απαίτηση για προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων. Τα κυριότερα συμπεράσματα αυτών των διαδικασιών είναι τα εξής:

- Στην εφαρμογή του κεφ. 5 αναπτύσσεται κατάλληλη στρατηγική εκπαίδευσης του αλγορίθμου ANFIS ώστε να υπολογίζεται ο χάρτης απόδοσης κάθε γεωμετρίας κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης. Προτείνεται ένα σχήμα δυναμικής εκπαίδευσης στις περιοχές που αυτό είναι αναγκαίο και μία ρουτίνα επανυπολογισμού των κριτηρίων του αρχείου με το πιο πρόσφατο νευρωνικό δίκτυο. Κατ' αυτόν τον τρόπο ενισχύεται σημαντικά η ακρίβεια πρόβλεψης του ANFIS και έτσι τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα. Αυτό αποδεικνύεται με τη συνεχή επιτήρηση του RMS σφάλματος πρόβλεψης του ANFIS.
- Με την προτεινόμενη στρατηγική είναι εμφανής η επιτάχυνση της διαδικασίας, όπως επίσης και η διαπίστωση ότι δεν θα ήταν υπολογιστικά σύμφωρη οποιαδήποτε άλλη θεώρηση με πεπερασμένα στοιχεία με την ίδια ακρίβεια. Η τελευταία με τα διατιθέμενα μέσα υπολογισμού θα απαιτούσε χρόνο της τάξεως μερικών ετών, ενώ η προτεινόμενη αρκείται σε λιγότερο από μία εβδομάδα. Ο συμβιβασμός έγκειται σε ένα μέσο σφάλμα υπολογισμού της απόδοσης της τάξεως του 0.1%, σφάλμα που ούτως ή άλλως είναι μικρότερο εκείνου της μοντελοποίησης των απωλειών.
- Στην εφαρμογή του κεφ. 6 χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος ANFIS για τον υπολογισμό των χειρίστων μετώπων Pareto (WPF). Εδώ αξιοποιείται η ταχύτητα πρόβλεψης του ANFIS για τον υπολογισμό των κατασκευαστικών αβεβαιοτήτων μέσω της σάρωσης όλου του πεδίου ορισμού πλησίον της λύσης που εξετάζεται χωρίς να γίνονται απλουστεύσεις ή παραδοχές. Η εφαρμογή της τεχνικής σε

δοκιμαστικές συναρτήσεις και σε ηλεκτρική μηχανή υψηλής ταχύτητας αποδεικνύει την αποτελεσματικότητά της.

9.1.4 Γεωμετρική διαμόρφωση ηλεκτρικών μηχανών

Μέσω των σύνθετων τεχνικών που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διατριβής και της μετεπεξεργασίας των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης διαφάνηκαν συσχετισμοί μεταξύ των δεικτών επίδοσης των μηχανών επιφανειακών μονίμων μαγνητών μικρής ισχύος που χρήζουν αναφοράς:

- Η απόδοση μίας μηχανής επιφανειακών μαγνητών στο κεντροειδές του οδηγικού κύκλου δεν είναι ενδεικτική της απόδοσης της σε όλο το κύκλο. Δηλαδή δεν μπορεί να ευρεθεί κάποιος συσχετισμός ανάμεσα σε αυτά τα δύο μεγέθη και συνεπώς η κλασσική προσέγγιση του σχεδιασμού σε ένα σημείο φαίνεται αδύναμη να θεωρήσει τις συνολικές απώλειες στο κύκλο λειτουργίας.
- Η καταναλισκόμενη ενέργεια του ελαφρού οχήματος που εξετάστηκε στα πλαίσια της διατριβής στον οδηγικό κύκλο που θεωρήθηκε, έχει αντιστρόφως ανάλογη σχέση με τη μάζα της μηχανής και ανάλογη σχέση με τις αρμονικές της επαγόμενης αντί-ΗΕΔ και της κυμάτωσης ροπής στο κεντροειδές του κύκλου. Εδώ διαφαίνεται ότι η επίτευξη ενεργειακής οικονομίας έρχεται σε αντίθεση με τη μάζα της μηχανής, κάτι που είναι γνωστό ότι συμβαίνει με την απόδοση όταν πρόκειται για ένα σημείο λειτουργίας. Ενδιαφέρον αποτέλεσμα είναι επίσης ο συσχετισμός ενέργειας-αρμονικών. Παρότι δεν είναι εύκολο να μετατραπούν οι τιμές αρμονικών μίας μηχανής σε τιμές απωλειών, η μεταξύ τους σχέση μπορεί να βοηθήσει σημαντικά τον σχεδιαστή στη λήψη αποφάσεων χρησιμοποιώντας λιγότερα κριτήρια.
- Απόρροια των ανωτέρω είναι ότι η μάζα έχει αντίστροφη σχέση με τις αρμονικές της τάσης και της ροπής και η απόδοση δεν συσχετίζεται με αυτές.
- Οι αρμονικές της τάσης έχουν και αυτές με τη σειρά τους ανάλογη σχέση με τις αρμονικές της ροπής. Εδώ αναδεικνύεται ότι τα παρασιτικά φαινόμενα εμφανίζουν αλληλεξάρτηση, κάτι που διαφαίνεται και από τις προσομοιώσεις με πεπερασμένα στοιχεία.
- Η ευρωστία μίας γεωμετρίας μηχανής έχει αντίστροφη σχέση με τη πυκνότητα ισχύος. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να δικαιολογηθεί εμπειρικά αν αναλογιστεί κανείς ότι όσο περισσότερο μειώνεται ο όγκος του μαγνητικού κυκλώματος και φτάνει στα όρια του κορεσμού, προκειμένου να μειωθεί το βάρος της μηχανής, τόσο πιο πιθανό είναι μία κατασκευαστική ατέλεια να στερήσει ποσοστό της ροπής.

9.1.5 Προσομοίωση μηχανικών φαινομένων υψηλής ταχύτητας

Στο κεφάλαιο 7 επιχειρήθηκε η προσομοίωση των φαινομένων που απασχολούν για την ανάλυση των μηχανών μονίμων μαγνητών που λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες. Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

- Βάσει της αξονοδυναμικής ανάλυσης του δρομέα του σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών παρατηρήθηκαν δύο τρόποι ταλάντωσης: οι άκαμπτες ταλαντώσεις όπου

ο δρομέας δονείται χωρίς να παραμορφώνεται και οι καμπτικές ταλαντώσεις όπου ο δρομέας παραμορφώνεται και είναι πολύ πιθανό να υποστεί μόνιμη μηχανική βλάβη σε περίπτωση συντονισμού.

- Οι άκαμπτοι τρόποι ταλάντωσης εμφανίζονται σε συχνότητες χαμηλής τάξης, ενώ οι καμπτικές ταλαντώσεις σε υψηλές συχνότητες. Πρακτικά το όριο ταχύτητας περιστροφής είναι η πρώτη καμπτική συχνότητα.
- Οι κρίσιμες ταχύτητες των μηχανών υψηλών ταχυτήτων σχετίζονται άμεσα με την λεπτότητα του άξονα. Οι καμπτικές κρίσιμες ταχύτητες του συστήματος δρομέα-εδράσεων έχουν μεγάλη εξάρτηση από την λεπτότητα του δρομέα και ειδικά από το μήκος του άξονα, λαμβάνοντας υπόψη ότι η διάμετρός του περιορίζεται από την δομική ανάλυση της μηχανής.
- Τα αποτελέσματα της αξονοδυναμικής ανάλυσης επαληθεύθηκαν πειραματικά με την λειτουργία της μηχανής σε χαμηλές συχνότητες και λαμβάνοντας το γράφημα της τάσης στην εν κενώ λειτουργία, συναρτήσε της συχνότητας. Από το γράφημα παρατηρήθηκε απόκλιση της τάσης από την αναμενόμενη γραμμική μορφή σε συγκεκριμένες συχνότητες περιστροφής του δρομέα, γεγονός που οφείλεται στην ύπαρξη συντονισμένης ταλάντωσης στις συγκεκριμένες ταχύτητες περιστροφής.
- Σε μια ηλεκτρική μηχανή υψηλών ταχυτήτων, η δομική ανάλυση είναι κεντρικής σημασίας, καθώς σε υψηλές συχνότητες περιστροφής οι φυγόκεντρες δυνάμεις και οι πιέσεις που ασκούνται στον δρομέα είναι πολύ ισχυρές. Στην εφαρμογή της διπολικής μηχανής μονίμων μαγνητών προσδιορίστηκε η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και διερευνήθηκε ο συσχετισμός της διαμέτρου του δρομέα με την μέγιστη ταχύτητα περιστροφής.

9.1.6 Διαχείριση ισχύος ηλεκτρικών οχημάτων

Με βάση τη μελέτη του κεφαλαίου 8, στο οποίο επιχειρήθηκε η θεμελίωση μίας στρατηγικής για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης ενέργειας κατά τη κίνηση ενός αμιγώς ηλεκτρικού οχήματος, εξάχθηκαν τα εξής συμπεράσματα:

- Αποδείχθηκε ότι με τον καθορισμό κατάλληλων κατανομών ταχύτητας του οχήματος και ορίων ροπής του κινητηρίου συστήματος μπορεί να μειωθεί σημαντικά η καταναλισκόμενη ενέργεια όταν η διαδρομή διαθέτει υψομετρικές διακυμάνσεις σε σύγκριση με την κλασσική τεχνική διατήρησης της σταθερής ταχύτητας.
- Η πολυκριτηριακή θεώρηση του προβλήματος με δύο ανεξάρτητα κριτήρια ενέργειας και χρόνου είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα στις πραγματικές εφαρμογές αυτού του είδους καθώς είναι δυνατός ο εξαρχής εντοπισμός όλων των βέλτιστα συμβιβαστικών λύσεων μεταξύ της ενέργειας και του χρόνου. Αν παρουσιαστεί μία καθυστέρηση στη διαδρομή λόγω κίνησης μπορεί να γίνει άμεσα μεταπήδηση σε άλλη πιο γρήγορη κατανομή ταχυτήτων χωρίς να εκτελεστεί από την αρχή η βελτιστοποίηση. Έτσι θα συνεχιστεί η οδήγηση με βέλτιστο τρόπο χωρίς άσκοπη απώλεια χρόνου ή ενέργειας.

- Η τεχνική που αναπτύχθηκε είναι υπολογιστικά εφικτή για τους επεξεργαστές των αυτοκινήτων παρά το γεγονός ότι είναι πολυκριτηριακή και ως μετά-ευρεστική είναι σε θέση να λαμβάνει υπόψη οποιονδήποτε περιορισμό.
- Λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος κρίνεται απαραίτητη η κατάτμηση της διαδρομής, ώστε να εκτελείται γρήγορα η βελτιστοποίηση. Ο τρόπος κατάτμησης όμως επηρεάζει, όπως είναι φυσικό, τα αποτελέσματα. Η μεθοδολογία που προτάθηκε εδώ προσφέρει σημαντικά οφέλη στην ενέργεια και τον χρόνο σε σχέση με μία απλή στρατηγική ισοκατανομής των διαστημάτων.
- Η προτεινόμενη μεθοδολογία υλοποιήθηκε μέσω μικροεπεξεργαστή και οθόνης αφής σε πρότυπο μονοθέσιο αγωνιστικό όχημα εξοικονόμησης ενέργειας. Εφαρμόστηκε στην αγωνιστική πίστα ευρωπαϊκού διαγωνισμού και τα πειραματικά αποτελέσματα υπογράμμισαν τα οφέλη της μεθόδου.
- Παράλληλα, στη διαδικασία έγινε θεώρηση των θερμικών περιορισμών της μηχανής κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης μέσω θερμικού μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων. Το μοντέλο επαληθεύθηκε ως προς την εγκυρότητα του με διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων.

9.2 Σημεία προαγωγής της επιστήμης

Η εργασία περιλαμβάνει τα παρακάτω σημεία πρωτότυπης συνεισφοράς

- Δημιουργία πολυκριτηριακού υβριδικού μετα-ευρετικού αλγορίθμου για τη βελτιστοποίηση μηχανών επιφανειακών μονίμων μαγνητών σε ένα σημείο λειτουργίας με σημαντικά βελτιωμένες δυνατότητες ταχύτητας σύγκλισης και αξιοπιστίας.
- Θεμελίωση κριτηρίου ευρωστίας που καθιστά δυνατή την θεώρηση πολλαπλών κριτηρίων για την ενσωμάτωση σε στρατηγικές απόφασης.
- Διερεύνηση της δυνατότητας υποκατάστατης μοντελοποίησης ηλεκτρικών μηχανών μονίμων επιφανειακών μαγνητών μέσω του αλγορίθμου εκμάθησης μηχανής ANFIS και διατύπωση βασικών κανόνων για την επίτευξη αυτής με αμελητέο σφάλμα.
- Δημιουργία σύνθετης τεχνικής εύρωστης πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης γεωμετρικών ηλεκτρικών μηχανών μονίμων μαγνητών υψηλής ταχύτητας που καθιστά δυνατή τη βελτιστοποίηση δεικτών απόδοσης της μηχανής ταυτόχρονα με την ευρωστία της γεωμετρίας. Η τεχνική επιτυγχάνει υπολογιστική εφικτότητα με κατάλληλη προσαρμογή του ANFIS για υποκατάστατη μοντελοποίηση των ηλεκτρικών μηχανών.
- Δημιουργία σύνθετης διεπιστημονικής τεχνικής μετώπου Pareto για τη βελτιστοποίηση μηχανής επιφανειακών μονίμων μαγνητών για χρήση σε πρότυπο ηλεκτρικό όχημα με θεώρηση της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται στον οδηγικό κύκλο βάσει δυναμικού μοντέλου του οχήματος και του πλήρους χάρτη απόδοσης κάθε γεωμετρίας. Η τεχνική επιτυγχάνει υπολογιστική εφικτότητα με κατάλληλη προσαρμογή του ANFIS για υποκατάστατη μοντελοποίηση των ηλεκτρικών μηχανών.

- Χρήση πεπερασμένων στοιχείων τριών διαστάσεων για την θερμική, αξονοδυναμική και δομική ανάλυση διπολικής μηχανής (30.000ΣΑΛ, ~3.5kW) με συγκεντρωμένα τυλίγματα κλασματικού βήματος.
- Δημιουργία σταδιακής στρατηγικής για τον εντοπισμό των βέλτιστων κατανομών ταχύτητας και ορίων ροπής αμιγώς ηλεκτρικού οχήματος με κριτήρια την καταναλισκόμενη ενέργεια και τη χρονική διάρκεια της διαδρομής με ανοχή υπερφόρτισης της μηχανής. Η πολυκριτηριακή θεώρηση διευρύνει τη χρησιμότητα της τεχνικής και διευκολύνει την εφαρμογή της σε πραγματικά προβλήματα.

9.3 Σημεία για περαιτέρω διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αναδείχθηκαν τα παρακάτω σημεία για περαιτέρω διερεύνηση:

- Χρήση πολυκριτηριακών αλγορίθμων βελτιστοποίησης με πολλαπλές παραλλαγές κριτηρίων σε μηχανές επιφανειακών μονίμων μαγνητών για την εύρεση και το συσχετισμό των τάσεων των βέλτιστων λύσεων όσον αφορά τους χώρους απόφασης και αποτίμησης (δείκτες χαρακτηριστικών λειτουργίας).
- Διερεύνηση της επίδρασης διαφορετικών υλικών στη δομική και αξονοδυναμική συμπεριφορά της διπολικής σύγχρονης μηχανής μονίμων επιφανειακών μαγνητών, όσον αφορά την μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα περιστροφής.
- Συμπερίληψη μοντέλων αξονοδυναμικής, δομικής και θερμικής ανάλυσης τις μεθοδολογίες βελτιστοποίησης σχεδιασμού για τον αποκλεισμό γεωμετριών που δεν ικανοποιούν τους περιορισμούς εφικτής ταχύτητας περιστροφής του δρομέα.

Βιβλιογραφία

- [1] Κ. Λάσκαρης, "Σχεδιασμός και Κατασκευή Κινητήρων Μονίμων Μαγνητών για Ηλεκτρικά Οχήματα", Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, Δεκέβριος 2011.
- [2] M. Say, *Alternating Current Machines*, John Wiley & Sons Ltd., 1983.
- [3] J. Wang, V. Patel και W. Wang, «Fractional-Slot Permanent Magnet Brushless Machines with Low Space Harmonic Contents,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 50, αρ. 1, pp. 1-9, 2014.
- [4] N. Bianchi, M. Dai Pre, L. Alberti και E. Fornasiero, «Theory and Design of Fractional-Slot PM Machines,» σε *Tutorial Course notes of IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, Padova, 2007.
- [5] A. El-Refaie, «Fractional-Slot Concentrated-Windings Synchronous Permanent Magnet Machines: Opportunities and Challenges,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, τόμ. 57, αρ. 1, pp. 107-121, 2010.
- [6] F. Meier, "Permanent-Magnet Synchronous Machines with Non-Overlapping Concentrated Windings for Low-Speed Direct-Drive Applications", PhD Thesis, Stockholm: Royal Institute of Technology, School of Electrical Engineering, Electrical Machines and Power Electronics, 2008.
- [7] N. Bianchi, *Electrical Machine Analysis using Finite Elements*, Boca Raton (USA): CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005.
- [8] E. Sandra και B. Hans, *Loss evaluation and design optimization for direct driven permanent magnet synchronous generators for wind power*, Elsevier, 2011.
- [9] A. Sarigiannidis, M. Beniakar και A. Kladas, «Hybrid analytical-FEM methodology for loss evaluation in traction motors for electric vehicle applications,» σε *IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC)*, 2016.
- [10] S. Nair, J. Wang, T. Sun, L. Chen , R. Chin, M. Beniakar, D. Svehkarenko και I. Manolas, «Experimental validation of 3D magnet eddy current loss prediction in Surface Mounted Permanent Magnet Machines,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017.
- [11] S. S. Nair, J. Wang, L. Chen, R. Chin και M. Beniakar, «Prediction of 3D eddy current loss in retaining sleeve of surface mounted permanent magnet machines,» σε *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 2017.
- [12] C. Patsios, E. Tsampouris, M. Beniakar, P. Rovolis και A. Kladas, «Dynamic finite element hysteresis model for iron loss calculation in non-oriented grain iron laminations under PWM excitation,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 47, αρ. 5, pp. 1130-1133, 2011.
- [13] A. Sarigiannidis, M. Beniakar, P. Kakosimos, A. Kladas, L. Papini και C. Gerada, «Fault Tolerant Design of Fractional Slot Winding Permanent Magnet Aerospace Actuator,» *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, τόμ. 2, αρ. 3, pp. 380-390, 2016.

- [14] D. Meeker, «Iron Loss Calculation in PM synchronous machines,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.femm.info/wiki/CoreLossCalculation>.
- [15] K. Yamazaki και A. Abe, «Loss Investigation of Interior Permanent-Magnet Motors Considering Carrier Harmonics and Magnet Eddy Currents,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, τόμ. 45, αρ. 2, pp. 659-665, 2009.
- [16] C. Mademlis, N. Margaritis και J. Xypteras, «Magnetic and thermal performance of a synchronous motor under loss minimization control,» *IEEE Transaction on Energy Conversion*, τόμ. 15, αρ. 2, pp. 135-142, 2000.
- [17] P. Mellor, D. Roberts και D. Turner, «Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design,» σε *Electric Power Applications, IEE Proceedings B*, 1991.
- [18] D. Meeker, *Finite Element Method Magnetics, Version 4.2. User's Manual*, 2015.
- [19] K. Deb, *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [20] S. Rao, *Optimization: Theory and Applications*, New York: Wiley, 1984.
- [21] G. V. Reklaitis, A. Ravindran και K. Ragsdell, *Engineering Optimization Methods and Applications*, New York: Wiley, 1983.
- [22] Μ. Μπενιακάρ, Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση κινητήρων με θεώρηση των απωλειών των μόνιμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, Αθήνα: Διδακτορική διατριβή, 2014.
- [23] Α. Ευστρατιάδης, Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων, Αθήνα: Διδακτορική διατριβή, 2008.
- [24] Z. Ren, M.-T. Pham και C. S. Koh, «Robust Global Optimization of Electromagnetic Devices With Uncertain Design Parameters: Comparison of the Worst Case Optimization Methods and Multiobjective Optimization Approach Using Gradient Index,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 49, αρ. 2, pp. 851-859, 2013.
- [25] S. Huband, P. Hingston, L. Barone και L. While, «A Review of Multi-objective Test Problems and a Scalable Test Problem Toolkit,» *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, τόμ. 10, αρ. 5, pp. 477-506, 2006.
- [26] R. Viennet, C. Fonteix και I. Marc, «Multicriteria optimization using a genetic algorithm for determining a Pareto set,» *Int. J. Syst. Sci.*, τόμ. 27, αρ. 2, pp. 255-260, 1996.
- [27] J. Kasprzyk, «<https://waterprogramming.wordpress.com/>,» Water Programming: A Collaborative Research Blog, 25 June 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://waterprogramming.wordpress.com/2013/06/25/moea-performance-metrics/>. [Πρόσβαση 17 3 2017].
- [28] Y. Cao, B. J. Smucker και 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*, τόμ. 160, pp. 60-74, 2015.
- [29] E. Tsampouris, M. Beniakar και A. Kladas, «Geometry optimization of PMSMs

- comparing full and fractional pitch winding configurations for aerospace actuation applications,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 48, αρ. 2, pp. 943-946, 2012.
- [30] P. Kakosimos, A. Sarigiannidis, M. Beniakar, A. Kladas και C. Gerada, «Induction motors versus permanent-magnet actuators for aerospace applications,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, τόμ. 61, αρ. 8, pp. 4315-4325, 2014.
- [31] M. Beniakar, E. Tsampouris, C. Patsios και A. Kladas, «Evolutionary Optimization of Permanent Magnet machine design for traction applications,» σε *14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC)*, 2010.
- [32] A. Sarigiannidis, A. Kladas, A. Mountaneas, M. Beniakar, G. Politis, I. Pallis, E. Tatakis, S. Dallas και J. Prousalidis, «Design of surface PM motors for pod application utilizing a 3D hydrodynamic model,» σε *XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2016.
- [33] D. Karaboga και B. Basturk, «A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial Bee Colony (ABC) algorithm,» *J. Global Optimiz.*, τόμ. 39, pp. 459-471, 2007.
- [34] X. Zhang, X. Zhang, S. Y. Yuen, S. Ho και W. Fu, «An Improved Artificial Bee Colony Algorithm for Optimal Design of Electromagnetic Devices,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 49, αρ. 8, pp. 4811-4816, 2013.
- [35] X. Zhang, X. Zhang, S.L. Ho και W. Fu, «A Modification of Artificial Bee Colony Algorithm Applied to Loudspeaker Design Problem,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 50, αρ. 2, pp. 737-740, 2014.
- [36] M. Beniakar, P. Kakosimos και A. Kladas, «Strength Pareto Evolutionary Algorithm of an In-Wheel PM Motor With Unequal Teeth for Electric Traction,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 51, αρ. 3, pp. 1-4, 2015.
- [37] N. Baatar, D. Zhang και C.-S. Koh, «An Improved Differential Evolution Algorithm Adopting λ -Best Mutation Strategy for Global Optimization of Electromagnetic Devices,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 49, αρ. 5, pp. 2097-2100, 2013.
- [38] E. Zitzler, M. Laumanns και L. Thiele, «SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm for Multiobjective Optimization,» σε *Eurogen 2001 - Evolutionary Methods for Design, Optimization and Control with Applications to Industrial Problems*, 2001.
- [39] D. Corne, N. Jerram, J. Knowles και M. Oates, «PESA-II: region-based selection in evolutionary multiobjective optimization,» σε *Genetic and Evolutionary Computation Conference*, San Fransisco, 2001.
- [40] X. Θ. Κρασόπουλος, Σχεδίαση και κατασκευή κινητήρα μονίμων μαγνητών για πρότυπο ηλεκτρικό όχημα, Αθήνα: Διπλωματική, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2013.
- [41] W. Chu, Z. Zhu και J. Chen, «Simplified Analytical Optimization and Comparison of Torque Densities Between Electrically Excited and Permanent-Magnet Machines,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, τόμ. 61, αρ. 9, pp. 5000-

- 5011, 2014.
- [42] F. Parasiliti, M. Villani, S. Lucidi και F. Rinaldi, «Finite-Element-Based Multiobjective Design Optimization Procedure of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors for Wide Constant-Power Region Operation,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, τόμ. 59, αρ. 6, pp. 2503-2514, 2012.
- [43] L. Guo, H. Zhang, M. Galea, J. Li και C. Gerada, «Multiobjective Optimization of a Magnetically Levitated Planar Motor With Multilayer Windings,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, τόμ. 63, αρ. 6, pp. 3522-3532, 2016.
- [44] P. Ponomarev, I. Petrov, N. Bianchi και J. Pyrhonen, «Selection of Geometric Design Variables for Fine Numerical Optimizations of Electrical Machines,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, τόμ. 51, αρ. 12, pp. 1-8, 2015.
- [45] M. Beniakar, A. Sarigiannidis, P. Kakosimos και A. Kladas, «Multiobjective Evolutionary Optimization of a Surface Mounted PM Actuator With Fractional Slot Winding for Aerospace Applications,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 50, αρ. 2, pp. 665-668, 2014.
- [46] P. Kakosimos, A. Sarigiannidis, M. Beniakar και A. Kladas, «Induction Motors Versus Permanent-Magnet Actuators for Aerospace Applications,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, τόμ. 61, αρ. 8, pp. 4315-4325, 2014.
- [47] R. Nasiri-Zarandi, M. Mirsalim και A. Cavagnino, «Analysis, Optimization, and Prototyping of a Brushless DC Limited-Angle Torque-Motor With Segmented Rotor Pole Tip Structure,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, τόμ. 62, αρ. 8, pp. 4985-4993, 2015.
- [48] P. Zhang και et al., «Multi-Objective Tradeoffs in the Design Optimization of a Brushless Permanent-Magnet Machine With Fractional-Slot Concentrated Windings,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, τόμ. 50, αρ. 5, pp. 3285-3294, 2014.
- [49] A. Sarigiannidis, M. Beniakar, P. Kakosimos και A. Kladas, «Multi-operating points PM motor design methodology for electric actuation systems,» σε *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2014.
- [50] T. Marcic, B. Stumberger και G. Stumberger, «Differential-Evolution-Based Parameter Identification of a Line-Start IPM Synchronous Motor,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, τόμ. 61, αρ. 11, pp. 5921-5929, 2014.
- [51] A. Sarigiannidis, M. Beniakar, P. Kakosimos και A. Kladas, «Performance evaluation and thermal analysis of interior permanent magnet traction motor over a wide load range,» σε *XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2016.
- [52] K. Kiyota, H. Sugimoto και A. Chiba, «Comparing Electric Motors: An Analysis Using Four Standard Driving Schedules,» *IEEE Industry Applications Magazine*, τόμ. 20, αρ. 4, pp. 12-20, 2014.
- [53] J. Aubry, H. Ahmed και B. Multon, «Sizing Optimization Methodology of a Surface Permanent Magnet Machine-Converter System Over a Torque-Speed Operating Profile: Application to a Wave Energy Converter,» *IEEE Transactions*

- on *Industrial Electronics*, τόμ. 59, αρ. 5, pp. 2116-2125, 2012.
- [54] P. Lindh, «Multidisciplinary Design of a Permanent-Magnet Traction Motor for a Hybrid Bus Taking the Load Cycle into Account,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, τόμ. 63, αρ. 6, pp. 3397-3408, 2016.
- [55] V. Ruuskanen, J. Nerg, M. Rilla και J. Pyrhonen, «Iron Loss Analysis of the Permanent-Magnet Synchronous Machine Based on Finite-Element Analysis Over the Electrical Vehicle Drive Cycle,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, τόμ. 63, αρ. 7, pp. 4129-4136, 2016.
- [56] P. Lazari, J. Wang και L. Chen, «A Computationally Efficient Design Technique for Electric-Vehicle Traction Machines,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, τόμ. 50, αρ. 5, pp. 3203-3213, 2014.
- [57] G. Sarigiannidis, M. Beniakar και A. Kladas, «Fast Adaptive Evolutionary PM Traction motor Optimization based on Electric Vehicle Drive Cycle,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, τόμ. 66, αρ. 7, pp. 5762-5774, 2017.
- [58] A. Fatemi, N. Demerdash, T. Nehl και D. Ionel, «Large-Scale Design Optimization of PM Machines Over a Target Operating Cycle,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, τόμ. 52, αρ. 5, pp. 3772-3782, 2016.
- [59] G. Bramerdorfer, «Using FE Calculations and Data-Based System Identification Techniques to Model the Nonlinear Behavior of PMSMs,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, τόμ. 61, αρ. 11, pp. 6454-6462, 2014.
- [60] M. Mohammadi, T. Rahman, R. Silva, M. Li και D. Lowther, «A Computationally Efficient Algorithm for Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machines,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 52, αρ. 3, pp. 1-4, 2016.
- [61] D. Flieller, N. Nguyen, P. Wira, G. Sturtzer, D. Abdeslam και J. Merckle, «A Self-Learning Solution for Torque Ripple Reduction for Nonsinusoidal Permanent-Magnet Motor Drives Based on Artificial Neural Networks,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, τόμ. 61, αρ. 2, pp. 655-666, 2014.
- [62] X. Sun, L. Chen, H. Jiang, Z. Yang, J. Chen και W. Zhang, «High-Performance Control for a Bearingless Permanent-Magnet Synchronous Motor Using Neural Network Inverse Scheme Plus Internal Model Controllers,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, τόμ. 63, αρ. 6, pp. 3479-3488, 2016.
- [63] Y. Murphey, J. Park, Z. Chen, M. Kuang, M. Masrur και A. Phillips, «Intelligent Hybrid Vehicle Power Control-Part I: Machine Learning of Optimal Vehicle Power,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, τόμ. 61, αρ. 8, pp. 3519-3530, Oct. 2012.
- [64] J.-S. R. Jang, «ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System,» *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, τόμ. 23, αρ. 3, pp. 665-685, 1993.
- [65] J.-S. Jang, «Fuzzy Modeling Using Generalized Neural Networks and Kalman Filter Algorithm,» σε *Proceedings of the 9th National Conference on Artificial Intelligence*, Anaheim, CA, USA, 1991.
- [66] A. Abraham, «Adaptation of Fuzzy Inference System Using Neural Learning. In: Nedjah N., Macedo Mourelle L. (eds) Fuzzy Systems Engineering. Studies in

- Fuzziness and Soft Computing, vol 181. Springer, Berlin, Heidelberg».
- [67] C. Krasopoulos, M. Beniakar και A. Kladas, «Velocity and torque profile optimization of electric vehicle including limited overload,» σε *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2016.
- [68] E. Ozatay, J. Onori, J. Wollaeger, U. Ozguner, G. Rizzoni, D. Filev, J. Michelini και S. Di Cairano, «Cloud-Based Velocity Profile Optimization for Everyday Driving: A Dynamic-Programming-Based Solution,» *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, τόμ. 15, αρ. 6, pp. 2491-2505, 2014.
- [69] F. Guimaraes, D. Lowther και J. Ramirez, «Multiobjective approaches for robust electromagnetic design,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 42, αρ. 4, pp. 1207-1210, 2006.
- [70] Z. Ren, M.-T. Pham, M. Song, D.-H. Kim και C. S. Koh, «A Robust Global Optimization Algorithm of Electromagnetic Devices Utilizing Gradient Index and Multi-Objective Optimization Method,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 47, αρ. 5, pp. 1254-1257, 2011.
- [71] M. Li, R. Silva, F. Guimaraes και D. Lowther, «A New Robust Dominance Criterion for Multiobjective Optimization,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 51, αρ. 3, pp. 1-4, 2015.
- [72] K. Bringmann και T. Friedrich, «An Efficient Algorithm for Computing Hypervolume Contributions,» *Evolutionary Computation*, τόμ. 18, αρ. 3, pp. 383-402, 2010.
- [73] E. Zitzler και L. Thiele, «Multiobjective optimization using evolutionary algorithms - a comparative case study.,» σε *Parallel problem solving from Nature*, Berlin Heidelberg, Springer, 1998, pp. 292-301.
- [74] A. Borisavlijevic, Limits, Modeling and Design of High-Speed Permanent Magnet Machines, Doctoral Thesis, Springer, 2013.
- [75] Z. Huang και J. Fang, «Multi-Physics Design and Optimization of High Speed Permanent Magnet Electrical Machines for Air Blower Applications,» *IEEE*, 2016.
- [76] J. Estima και A. Marques Cardoso, «Efficiency Analysis of Drive Train Topologies Applied to Electric/Hybrid Vehicles,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, τόμ. 61, αρ. 3, pp. 1021-1031, 2012.
- [77] G. Pellegrino, A. Vagati, B. Boazzo και P. Guglielmi, «Comparison of Induction and PM Synchronous Motor Drives for EV Application Including Design Examples,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, τόμ. 48, αρ. 6, pp. 2322-2332, 2012.
- [78] X. Yuan και J. Wang, «Torque Distribution Strategy for a Front and Rear-Wheel-Driven Electric Vehicle,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, τόμ. 61, αρ. 8, pp. 3365-3374, 2012.
- [79] X. Lin, D. Gorges και S. Liu, «Eco-driving assistance system for electric vehicles based on speed profile optimization,» σε *IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, 2014.
- [80] Y. Zonggen και P. H. Bauer, «Optimal Speed Profiles for Sustainable Driving of

- Electric Vehicles,» σε *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2015.
- [81] S. Kelouwani, K. Agbossou, Y. Dube και L. Boulon, «Energetic Optimization of the Driving Speed Based on Geographic Information System Data,» σε *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 2012.
- [82] M. Kamal, M. Mukai, J. Murata και T. Kawabe, «Ecological Vehicle Control on Roads With Up-Down Slopes,» *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, τόμ. 12, αρ. 3, pp. 783-794, 2011.
- [83] W. ShangGuan, X.-H. Yan, B.-G. Cai και J. Wang, «Multiobjective Optimization for Train Speed Trajectory in CTCS High-Speed Railway With Hybrid Evolutionary Algorithm,» *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, τόμ. 16, αρ. 4, pp. 2215-2225, 2015.
- [84] C. Chang, D. Xu και H. Quek, «Pareto-optimal set based multiobjective tuning of fuzzy automatic train operation for mass transit system,» σε *Proc. Inst. Elect. Eng. - Elect. Power Appl.*, 1997.
- [85] R. Chevrier, «An evolutionary multi-objective approach for speed tuning optimization with energy saving in railway management,» σε *Proc. 13th Int. IEEE Conf. Intell. Transp. Syst.*, 2010.
- [86] A. Lejeune, R. Chevrier και J. Rodriguez, «Improving an evolutionary multi-objective approach for optimizing railway energy consumption,» σε *Procedia-Soc. Behav. Sci.*, 2012.
- [87] B. Zhang, R. Qu, J. Wang, W. Xu, X. Fan και Y. Chen, «Thermal Model of Totally Enclosed Water-Cooled Permanent-Magnet Synchronous Machines for Electric Vehicle Application,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, τόμ. 51, αρ. 4, 2015.
- [88] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Popescu και D. Staton, «Thermal Model and Analysis of Wound-Rotor Induction Machine,» *IEEE Transactions of Industry Applications*, τόμ. 49, αρ. 5, pp. 2078-2085, 2013.
- [89] S. Manias, *Power Electronics and Motor drive systems*, Elsevier, 2016.
- [90] Λ. Ε. Λαναράς, *Θερμική Ανάλυση Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών, Διπλωματική Εργασία*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011.
- [91] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal και T. Meyarivan, «A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II,» *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, τόμ. 6, αρ. 2, pp. 182-197, 2002.
- [92] C. Coello, «Recent trends in evolutionary multiobjective optimization,» *Evolutionary Multiobjective Optimization: Theoretical Advances and Applications*, pp. 7-32, 2005.
- [93] A. Van Veldhuizen, *Multiobjective Evolutionary Algorithms: Classifications, Analyzes and New Innovations*, Air Force Institute of Technology: Ph.D. Dissertation, Wright-Patterson AFB, 1999.
- [94] E. Zitzler, K. Deb και L. Thiele, «Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results,» *Evolutionary Computation*, τόμ. 8, αρ. 2, pp. 173-

- 195, 2000.
- [95] K. Deb, «Multi-objective genetic algorithms: Problem difficulties and construction of test problems,» *Evolutionary Computation*, τόμ. 7, αρ. 3, pp. 205-230, 1999.
- [96] Y. Cao, B. Smucker και T. Robinson, «On using the hypervolume indicator to compare Pareto fronts: Applications to multi-criteria optimal experimental design,» *Journal of Statistical Planning and Inference*, τόμ. 160, pp. 60-74, 2015.
- [97] J. Schaffer, «Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms,» *Proc. 1st Int. Conf. Genetic Algorithms and Their Applications*, pp. 93-100, 1985.
- [98] C. Fonseca και P. Fleming, «Multiobjective genetic algorithms made easy: Selection, sharing and mating restriction,» *Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications*, pp. 45-52, 1995.
- [99] C. Poloni, G. Mosetti και S. Contessi, «Multi objective optimization by GAs: Application to system and component design,» *Proc. Comput. Methods in Applied Sciences '96: Invited Lectures and Special Technological Sessions of the 3rd ECCOMAS Comput. Fluid Dynamics Conf. and the 2nd ECCOMAS Conf. Numerical Methods in Engineering*, pp. 258-264, 1996.
- [100] F. Kursawe, «A variant of evolution strategies for vector optimization,» σε *Lecture Notes in Computer Science*, Berlin, Springer-Verlag, 1991, pp. 193-197.
- [101] W. J. Cook, W. H. Cunningham, W. R. Pulleyblank και A. Schrijver, *Combinatorial Optimization*, Wiley, 1997.
- [102] Α. Γ. Σαρηγιαννίδης, Βέλτιστος σχεδιασμός και Διαχείριση Συστημάτων Κίνησης Ηλεκτρικών Οχημάτων, Αθήνα: Διδακτορική διατριβή, 2016.
- [103] D. Pham και D. Karaboga, *Intelligent Optimisation Techniques*, London: Springer, 2000.
- [104] S. Nichols, «hmcbee.blogspot.gr,» 17 July 2014. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://hmcbee.blogspot.gr/2014/07/the-waggle-dance.html>. [Πρόσβαση 30 3 2017].
- [105] R. Storn και K. Price, «Differential evolution: A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces,» *Int. Comput. Sci. Inst., Tech. Rep. TR-95-012*, Berkeley, CA, 1995.
- [106] R. Storn και K. Price, «Differential evolution: A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces,» *J. Global Opt.*, τόμ. 11, αρ. 4, pp. 341-359, 1997.
- [107] E. Mezura-Montes, J. Velasquez-Reyes και C. Coello, «A comparative study of differential evolution variants for global optimization,» *Proc. GECCO*, pp. 485-492, 2006.
- [108] L. Yang, S. Ho, W. Fu και W. Li, «Design Optimization of a Permanent Magnet Motor Derived from a General Magnetization Pattern,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 51, αρ. 11, pp. 1-4, 2015.
- [109] L. d. S. Coelho και P. Alotto, «Gaussian Artificial Bee Colony Algorithm Approach

- Applied to Loney's Solenoid Benchmark Problem,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 47, αρ. 5, pp. 1326-1329, 2011.
- [110] S. Huband, P. Hingston, L. Barone και L. While, «A review of multiobjective test problems and a scalable test problem toolkit,» *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, τόμ. 10, αρ. 5, pp. 477-506, 2006.
- [111] G. Tenaglia και L. Lebensztajn, «A multiobjective approach of differential evolution optimization applied to electromagnetic problems,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 50, αρ. 2, 2014.
- [112] R. Wrobel, P. Mellor, N. McNeill και D. Staton, «Thermal Performance of an Open-Slot Modular-Wound Machine with External Rotor,» *IEEE Transactions on Energy Conversion*, τόμ. 25, αρ. 2, pp. 403-411, 2010.
- [113] E. Zitzler, *Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications*, Zurich: Doctoral Dissertation Swiss Federal Institute of Technology, 1999.
- [114] C. Krasopoulos, I. Armouti και A. Kladas, «Hybrid Multi-Objective Optimization Algorithm for PM Motor Design,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 53, αρ. 6, 2017.
- [115] C. Krasopoulos, M. Beniakar και A. Kladas, «Velocity and torque profile optimization of electric vehicle including limited overload,» σε *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Lausanne, 2016.
- [116] G. Sizov, D. Ionel και N. Demerdash, «Modeling and Parametric Design of Permanent-Magnet AC Machines Using Computationally Efficient Finite-Element Analysis,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, τόμ. 59, αρ. 6, pp. 2403-2413, 2012.
- [117] J. Pyrhonen, T. Jokinen και V. Hrabovcova, *Design of Rotating Electrical Machines*, John Wiley & Sons Ltd., 2008.
- [118] P. Salminen, M. Niemela, J. Pyhonen και J. Mantere, «Performance analysis of fractional slot wound PM-motors for low speed applications,» σε *Industry Applications Conference 2004, 39th IAS Annual Meeting*, October 2014.
- [119] T. Ohnishi και N. Takahashi, «Optimal design of efficient IPM motor using finite element method,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 36, αρ. 5, pp. 3537-3539, 2000.
- [120] R. Bargallo, J. Llaverlas, A. De Blas, H. Martin και R. Pique, «Main inductance determination in rotating machines. Analytical and Numerical calculation: A didactical approach».
- [121] N. Bianchi, M. Barcaro και S. Bolognani, «Electromagnetic and Thermal Analysis of Permanent Magnet Synchronous Machines,» σε *Finite Element Analysis - From Biomedical Applications to Industrial Developments*, InTech, 2012, pp. 407-438.
- [122] M. Beniakar, P. Kakosimos, C. Krasopoulos, A. Sarigiannidis και A. Kladas, «Comparison of in-wheel permanent magnet motors for electric traction,» σε *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Berlin, 2014.

Ευρετήριο σχημάτων

Σχήμα 2.1. Κύριες τοπολογίες κινητήρων μόνιμων μαγνητών: (α) επιφανειακών μαγνητών, (β) εσωτερικά επιφανειακών μόνιμων μαγνητών και (γ) εσωτερικών μόνιμων μαγνητών [117].	27
Σχήμα 2.2. Κύριες διαμορφώσεις τυλίγμάτων: (α) διανεμημένα, (β) συγκεντρωμένα μονής στρώσης και (γ) συγκεντρωμένα διπλής στρώσης [118].	35
Σχήμα 2.3. Κατανομή των τιμών του συντελεστή τυλίγματος για διαφορετικούς συνδυασμούς αυλάκων/πόλων για συγκεντρωμένα τυλίγματα (α) διπλής και (β) μονής στρώσης.[104].	37
Σχήμα 3.1 – Υποθετικοί συμβιβασμοί μεταξύ λύσεων για ένα πρόβλημα απόφασης αγοράς αυτοκινήτου	61
Σχήμα 3.2 – Σχηματική αναπαράσταση διαδικασιών (α) ιδανικής πολυκριτηριακής και (β) πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με σύνθετη στοχαστική συνάρτηση.	62
Σχήμα 3.3 – Αναπαράσταση ενός χώρου μεταβλητών απόφασης τριών διαστάσεων και η αντιστοίχιση του σε έναν χώρο αποτίμησης δύο διαστάσεων	65
Σχήμα 3.4 – Παράδειγμα κυρτής συνάρτησης. Μία γραμμή που ενώνει τις τιμές της συνάρτησης σε δύο σημεία x_1 , x_2 πάντοτε υπερεκτιμά τη τιμή της κυρτής συνάρτησης.	66
Σχήμα 3.5. Γεωμετρική απεικόνιση των δυνατών σχέσεων κυριαρχίας ως προς ένα τυχαίο σημείο A του χώρου αποτίμησης σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο κριτηρίων. [22]	68
Σχήμα 3.6. Απεικόνιση μετώπου Pareto σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο κριτηρίων. [22]	69
Σχήμα 3.7: (α) Γραφική απεικόνιση υποθετικής συνάρτησης $f(x)$ ως προς τη μεταβλητή x . (β) Διακύμανση τιμών $f(x)$ στα ακρότατα λόγω αβεβαιότητας.	70
Σχήμα 3.8 – Παράδειγμα μετώπου Pareto και των ονομασιών των επιμέρους τμημάτων του ανάλογα με τη μορφή τους	74
Σχήμα 3.9 – Το καλύτερο γνωστό σύνολο λύσεων (Μέτωπο A) και μία προσέγγιση αυτού του συνόλου (Μέτωπο B).	75
Σχήμα 3.10 – Σχηματοποίηση μεθόδου απόστασης γενιών. Οι μαύρες γραμμές δείχνουν την απόσταση μεταξύ των κοντινότερων σημείων των δύο μετώπων.	75
Σχήμα 3.11 – Σχηματοποίηση μεθόδου δείκτη έψιλον. Η μαύρη γραμμή δείχνει την μεγαλύτερη από τις αποστάσεις μεταξύ οποιονδήποτε σημείων των δύο μετώπων.	76
Σχήμα 3.12 – Σχηματοποίηση μεθόδου υπερόγκου. Η μέθοδος συγκρίνει τους πολυδιάστατους όγκους που καθορίζονται από τα υπό εξέταση μέτωπα και ένα κοινό σημείο αναφοράς.	77
Σχήμα 4.1: Δομικό διάγραμμα ASMA	83
Σχήμα 4.2: Προτεραιότητες του ASMA στη (α) σύγκλιση και την (β) απόκλιση στα αρχικά και τελικά στάδια της βελτιστοποίησης, αντίστοιχα.	85
Σχήμα 4.3: Γεωμετρικές μεταβλητές παραμετρικού σχεδιασμού	88
Σχήμα 4.4: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης πεπερασμένων στοιχείων: (α) τελικό μέτωπο Pareto του ASMA με πληθυσμό 15 μελών μετά από 60 επαναλήψεις. (β) CR των αντίπαλων αλγορίθμων σε κάθε	

επανάληψη με πληθυσμό 15 μελών (γ), (δ) CR μεταξύ της κάθε επανάληψης του ASMA και του τελικού μετώπου Pareto των SPEA2, PESA2 and NSGA2 με 15 και 35 μέλη πληθυσμού μετά από 120 και 60 επαναλήψεις, αντίστοιχα	89
Σχήμα 4.5: Σύγκριση των προσομοιωμένων χαρακτηριστικών λειτουργίας της αρχικής και της βέλτιστης γεωμετρίας. (α) Κατανομή μαγνητικού πεδίου (αρχική γεωμετρία: επάνω, βέλτιστη γεωμετρία: κάτω) και λεπτομέρεια στο διάκενο. (β) Συσχετισμός μέγιστης ροπής και απόδοσης με το ρεύμα γραμμής. (γ) Συσχετισμός ολικής αρμονικής παραμόρφωσης επαγόμενης τάσης και κυμάτωσης ροπής με το ρεύμα γραμμής.	91
Σχήμα 5.1: Δομικό διάγραμμα διαδικασίας βελτιστοποίησης.....	97
Σχήμα 5.2: Παραμετροποίηση της γεωμετρίας μηχανής μονίμων μαγνητών.....	97
Σχήμα 5.3: RMS σφάλμα (α)(γ) εκπαίδευσης και (β)(δ) πρόβλεψης ροπής και απωλειών για διάφορα πλήθη δεδομένων εκπαίδευσης και 2 συναρτήσεις μέλους τύπου σταθεράς για ένα σύνολο δοκιμών μεγέθους 500.	100
Σχήμα 5.4: RMS σφάλμα (α)(γ) εκπαίδευσης και (β)(δ) πρόβλεψης ροπής και απωλειών για διάφορα πλήθη δεδομένων εκπαίδευσης και 2 συναρτήσεις μέλους γραμμικού τύπου για ένα σύνολο δοκιμών μεγέθους 500.	101
Σχήμα 5.5: Πρωτότυπο ελαφρύ ηλεκτρικό όχημα.....	102
Σχήμα 5.6: (α) Ροπή και (β) υψόμετρο διαδρομής μαζί με ταχύτητα οχήματος ως προς την απόσταση για μία συγκεκριμένη διαδρομή.	102
Σχήμα 5.7: Μέτωπο Pareto τελευταίας γενιάς. Απεικονίζονται οι τιμές απόδοσης και κυμάτωσης ροπής των μελών του μετώπου για το ονομαστικό σημείο λειτουργίας μέσω χρωματικής κλίμακας και μέγεθος δείκτη αντίστοιχα.....	103
Σχήμα 5.8: Συνολικός υπολογιστικός χρόνος και επιμέρους χρονικές διάρκειες αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων, εκτίμησης ενέργειας και εκπαίδευσης ANFIS ανά γενιά για έναν επιτραπέζιο υπολογιστή i7.....	103
Σχήμα 5.9: RMS σφάλμα (α) εκπαίδευσης και (β) πρόβλεψης ροπής και απωλειών για κάθε γενιά.	104
Σχήμα 5.10: (α) Κατανομή μαγνητικού πεδίου τελικής γεωμετρίας και (β) προσομοιωμένος χάρτης απόδοσης μαζί με τα σημεία λειτουργίας του αγωνιστικού οδηγικού κύκλου.	104
Σχήμα 5.11: Διαγράμματα διασποράς των δεικτών επίδοσης για το τελικό μέτωπο Pareto. Οι λύσεις που ικανοποιούν τα επεκτεταμένα κριτήρια υπογραμμίζονται.....	105
Σχήμα 5.12: Διαγράμματα διασποράς των μεταβλητών σχεδίασης για το τελικό μέτωπο Pareto. Οι λύσεις που ικανοποιούν τα επεκτεταμένα κριτήρια υπογραμμίζονται.	106
Σχήμα 5.13: (α) Στάτης, (β) δρομέας και (γ) συναρμολόγηση κατασκευασμένης μηχανής. (δ) Πειραματική διάταξη.....	107
Σχήμα 5.14: Μετρήσεις φασικής τάσης και φασικού ρεύματος για δύο σημεία λειτουργίας: (α) 1500ΣΑΛ/0.6Nm και (β) 2400ΣΑΛ/1.6Nm	108
Σχήμα 5.15: (α) Προσομοιωμένος και (β) μετρημένος χάρτης απόδοσης.....	108

Σχήμα 6.1: (α) Χειρότερα μέτωπα Pareto των λύσεων λόγω αβεβαιότητας στις μεταβλητές. (β) Προτεινόμενο κριτήριο ευρωστίας	113
Σχήμα 6.2: Ποιότητα παρεμβολής που επιτυγχάνεται με το ANFIS και το πολυώνυμο 2 ^{ου} βαθμού για δύο διαφορετικές μορφές δεδομένων εκπαίδευσης (α),(β).....	115
Σχήμα 6.3: Συγκριτικά αποτελέσματα εύρωστης βελτιστοποίησης με και χωρίς χρήση ANFIS για τον υπολογισμό των χειρίστων μετώπων Pareto μαζί με τις αντίστοιχες προβολές τους στα τρία επίπεδα για τις τρεις δοκιμαστικές συναρτήσεις: (α) T1, (β) T2, (γ) T3.	116
Σχήμα 6.4: Δομικό διάγραμμα προτεινόμενης διαδικασίας εύρωστης βελτιστοποίησης ηλεκτρικών κινητήρων.....	118
Σχήμα 6.5: (α) Τελικό μέτωπο Pareto εύρωστης βελτιστοποίησης, (β) χειρίστα μέτωπα Pareto δύο μη κυριαρχούμενων λύσεων με διαφορετικό δείκτη ευρωστίας και (γ) οι αντίστοιχες γεωμετρίες με τις κατανομές του μαγνητικού πεδίου.	119
Σχήμα 6.6: Διάγραμμα διασποράς των κριτηρίων του τελικού μετώπου Pareto	121
Σχήμα 7.1 – Παράμετροι σχεδίασης γεωμετρίας μηχανής σε τομή κάθετη στον άξονα	125
Σχήμα 7.2 – Καθορισμός θερμοκρασίας περιβάλλοντος	126
Σχήμα 7.3 – (α) Σχέδιο μηχανής για τη δισδιάστατη θερμική ανάλυση με τομή κάθετη στον άξονα και (β) το αντίστοιχο πλέγμα. (γ),(δ): λεπτομέρειες σχεδιασμού.	129
Σχήμα 7.4 – (α) Αξονοσυμμετρικό σχέδιο μηχανής για τη δισδιάστατη θερμική ανάλυση και (β) το αντίστοιχο πλέγμα. (γ),(δ): λεπτομέρειες σχεδιασμού.	130
Σχήμα 7.5 – (α) Κατανομή θερμοκρασίας στον κινητήρα μονίμων μαγνητών, (β) Κατανομή θερμοκρασίας στο περιβάλλον	131
Σχήμα 7.6 – (α) Κατανομή πυκνότητας θερμοροής στη κάθετη τομή του κινητήρα, (β) Κατανομή μεταβολής θερμοκρασίας στη κάθετη τομή	132
Σχήμα 7.7 – (α) Θερμοκρασιακή κατανομή κινητήρα σε τομή παράλληλη με τον άξονα, (β) Θερμοκρασιακή κατανομή στο περιβάλλον του κινητήρα	133
Σχήμα 7.8 – (α) Κατανομή πυκνότητας θερμοροής παράλληλης με τον άξονα τομής, (β) Κατανομή της μεταβολής της θερμοκρασία στην παράλληλη τομή	134
Σχήμα 7.9 – Σύγκριση αποτελεσμάτων θερμικής ανάλυσης δύο διαστάσεων με εγκάρσια τομή και τομή παράλληλη στον άξονα.....	135
Σχήμα 7.10 – 3Δ γεωμετρία μηχανής - είσοδος θερμικής ανάλυσης.....	136
Σχήμα 7.11 – Πλέγμα επίλυσης προβλήματος με προοπτική απεικόνιση για: (α) το σύνολο της μηχανής, (β) τη μηχανή χωρίς το κέλυφος αλουμινίου, (γ) τον δρομέα.....	137
Σχήμα 7.12 – Μεταβατική θερμοκρασιακή μεταβολή επιμέρους συνιστωσών κινητήρα.....	138
Σχήμα 7.13 – Κατανομή θερμοκρασίας στο εσωτερικό της μηχανής.....	138
Σχήμα 7.14 – (α) Κατανομή θερμοροής στο εσωτερικό του κινητήρα, (β) λεπτομέρεια της κατανομής θερμοροής στο δόντι της μηχανής, (γ) διεύθυνση διανυσμάτων θερμοροής στο 3Δ χώρο.....	139
Σχήμα 7.15 – Σύγκριση τελικών θερμοκρασιών των συνιστωσών της μηχανής με βάση τις τρεις μεθόδους.....	140

Σχήμα 7.16 – (α) Σημεία τοποθέτησης PTC, (β) Πειραματική διάταξη.....	141
Σχήμα 7.17 – Σύγκριση θερμοκρασιακής μεταβολής τυμπάνου και κελύφους μηχανής κατά τη θέρμανση.	142
Σχήμα 7.18 – Σύγκριση τελικών θερμοκρασιών μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης.....	142
Σχήμα 7.19 – 3D γεωμετρία δρομέα.....	143
Σχήμα 7.20 – Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων δρομέα	143
Σχήμα 7.21 – Τρόποι ταλάντωσης δρομέα ιδιοσυχνότητας: (α)21,5Hz (β)196,3Hz (γ)2149Hz (δ)7050Hz	145
Σχήμα 7.22 - Άκαμπτες δονήσεις δρομέα ιδιοσυχνότητας: (α) 21,5 Hz (β) 26,1 Hz (γ) 36,0 Hz (δ) 69,5 Hz (ε) 99,1 (στ) 196,3 Hz.....	145
Σχήμα 7.23 – Καμπτικές δονήσεις δρομέα ιδιοσυχνότητας: (α) 2149,1 Hz (β) 2290 Hz (γ) 7050,2 Hz (δ) 7079,7 Hz (ε) 8902,3 Hz (στ) 15316 Hz.....	146
Σχήμα 7.24 – Συσχέτιση μήκους άξονα με τις φυσικές συχνότητες.....	147
Σχήμα 7.25 – Γεωμετρία δρομέα για ενεργό μήκος άξονα: (α)20mm, (β)30mm, (γ)40mm, (δ)55mm	148
Σχήμα 7.26 – Συσχέτιση ενεργού μήκους πυρήνα με τις 2 πρώτες καμπτικές συχνότητες	148
Σχήμα 7.27 – Μεταβολή άκαμπτων ιδιοσυχνοτήτων ως προς τη ταχύτητα περιστροφής: (α) 5 πρώτοι τρόποι (β) 3 τελευταίοι τρόποι.....	149
Σχήμα 7.28 – (α) Καμπύλες των τριών RMS φασικών τάσεων συναρτήσει της συχνότητας ρεύματος (β) Ανά μονάδα απόκλιση τάσεων από την γραμμική τιμή.....	151
Σχήμα 7.29 – Ταλαντώσεις δρομέα σε συχνότητα (α) 22Hz, (β) 30Hz, (γ)35Hz	152
Σχήμα 7.30 – 3D γεωμετρία δρομέα.....	153
Σχήμα 7.31 – Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων δρομέα	153
Σχήμα 7.32 – (α),(β),(γ),(δ): Κατανομή τιμής πίεσης Von Mises στην 3D γεωμετρία του δρομέα και στις επιμέρους συνιστώσες του. (ε): συντελεστής ασφάλειας στους μαγνήτες.....	155
Σχήμα 7.33 – (α): Συσχετισμός μέγιστης πίεσης ανά συνιστώσα κινητήρα με την ταχύτητα περιστροφής. (β): Συσχετισμός συντελεστή ασφαλείας ανά συνιστώσα κινητήρα με την ταχύτητα περιστροφής.....	156
Σχήμα 7.34– (α,β): Συσχετισμός διαφόρων μεγεθών με την ακτίνα του δρομέα (mm).	157
Σχήμα 8.1: (α)-(γ): Συντεταγμένες δοκιμαστικής πίστας σε συμπαγή προβολή Universal Transverse Mercator (UTM). (δ)-(ζ): Υψομετρικό προφίλ. (β),(ε): Ίση κατάτμηση, (γ),(ζ): κατάτμηση σημαντικότερων ακροτάτων, (η): επαναληπτική διαδικασία εύρεσης σημαντικότερων ακροτάτων .	164
Σχήμα 8.2: Παραδείγματα προφίλ (α) ταχύτητας και (β) ορίου ροπής.....	165
Σχήμα 8.3: (α) Χάρτης απόδοσης, (β) ισοδυναμικές καμπύλες ροπής συναρτήσει του φασικού ρεύματος dκαι q άξονα και (γ) κατανομή μαγνητικού πεδίου της μηχανής επιφανειακών μονίμων μαγνητών εξωτερικού δρομέα του οχήματος. (δ) Συνιστώσες οχήματος.....	168
Σχήμα 8.4: (α) Δυναμικό μοντέλο οχήματος για τον υπολογισμό του φορτίου. (β) Δομικό διάγραμμα υπολογισμού κατανάλωσης ενέργειας.	169
Σχήμα 8.5 Θερμικό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων της μηχανής	171

Σχήμα 8.6: Μέτωπο Pareto που προκύπτει μετά από τη βελτιστοποίηση (α) του προφίλ ταχύτητας, (β) του προφίλ ορίων ροπής.....	174
Σχήμα 8.7: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης προφίλ ταχύτητας. Απεικόνιση (α) ταχύτητας, (β) ροπής, (γ) ισχύος εισόδου και (δ) καταναλισκόμενης ενέργειας για τις μεθόδους Προτεινόμενης Κατάτμησης (ΠΚ) και Ίσης Κατάτμησης (ΙΚ) με παράλληλη σύγκριση με το σενάριο σταθερής ταχύτητας.....	175
Σχήμα 8.8: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης προφίλ ορίων ροπής. Απεικόνιση (α) ταχύτητας, (β) ροπής, (γ) ισχύος εισόδου και (δ) καταναλισκόμενης ενέργειας για τις μεθόδους Προτεινόμενης Κατάτμησης (ΠΚ) και Ίσης Κατάτμησης (ΙΚ) με παράλληλη σύγκριση με το σενάριο σταθερής ταχύτητας.....	176
Σχήμα 8.9: Καμπύλες θερμοκρασίας τυλιγμάτων για τη περίπτωση της σταθερής ταχύτητας, και των βέλτιστων προφίλ με χρήση ίσης κατάτμησης (ΙΚ) και προτεινόμενης κατάτμησης (ΠΚ).	178
Σχήμα 8.10: (α) Διεπαφή jana εφαρμογής SECS και (β) πολυλειτουργικό τιμόνι πρωτότυπου οχήματος με ενσωματωμένο τον μικροϋπολογιστή με την οθόνη αφής. (γ) Το πρωτότυπο όχημα «Πυρφόρος» στον διαγωνισμό «Eco-Marathon» που διεξάχθηκε στο Λονδίνο τον Ιούλιο του 2016.	178
Σχήμα 8.11: (α) Ομαλοποιημένη ράμπα πεζών και (β),(γ) η θέση της στη πίστα.	179
Σχήμα 8.12: Προσομοιωμένες και πειραματικές καμπύλες (α),(β) ισχύος εισόδου και (γ),(δ) ταχύτητας οχήματος για (α),(γ) σταθερή αναφορά ταχύτητας και (β),(δ) βέλτιστο προφίλ ταχύτητας και ορίου ροπής.....	180
Σχήμα 8.13: Σύγκριση βελτιστοποιημένου προφίλ και προφίλ σταθερής ταχύτητας βάσει πειραματικών δεδομένων αγώνα όσον αφορά την (α) ενέργεια και (β) τη τάση και το ρεύμα της μπαταρίας	181
Σχήμα 8.14: (α) Προσομοιωμένες και πειραματικές τιμές θερμοκρασίας. (β),(γ): Φωτογραφίες θερμοκάμερας στο τέλος του κύκλου θέρμανσης	181

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 2.1. Περιοχές τιμών του λόγου L/τ	32
Πίνακας 2.2. Κύρια χαρακτηριστικά των συγκεντρωμένων και των διανεμημένων τυλιγμάτων.....	34
Πίνακας 2.3. Εφικτοί συνδυασμοί αριθμού αυλάκων – πόλων και αντίστοιχοι συντελεστές.....	36
Πίνακας 2.4. Εφικτοί συνδυασμοί αριθμού αυλάκων – πόλων και αντίστοιχοι συντελεστές τυλίγματος για συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσης. [22].....	36
Πίνακας 2.5. Τυπικές τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.....	54
Πίνακας 3.1 – Πολυκριτηριακά δοκιμαστικά προβλήματα Van Veldhuizen.....	72
Πίνακας 3.2 – Χαρακτηριστικά δοκιμαστικών συναρτήσεων ακολουθίας Van Veldhuizen.....	73
Πίνακας 4.1: Μέσες τιμές Δείκτη Συνεισφοράς (πρώτες γραμμές) και τυπική απόκλιση τιμών Δείκτη Συνεισφοράς (δεύτερες γραμμές).....	87
Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά της αρχικής και της βέλτιστης γεωμετρίας της μηχανής.....	90
Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά ελαφρού ηλεκτρικού οχήματος.....	102
Πίνακας 5.2: Μεταβλητές γεωμετρίας και τα αντίστοιχα όρια.....	103
Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικά τελικής βέλτιστης γεωμετρίας μηχανής.....	105
Πίνακας 6.1: Δοκιμαστικές συναρτήσεις και τα αντίστοιχα όρια των μεταβλητών.....	115
Πίνακας 6.2: Μεταβλητές σχεδίασης και τα αντίστοιχα όρια.....	117
Πίνακας 6.3: Χαρακτηριστικά προκαταρκτικής, εύρωστης βέλτιστης και μη-εύρωστης βέλτιστης γεωμετρίας ηλεκτρικής μηχανής.....	120
Πίνακας 7.1 - Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κινητήρα.....	125
Πίνακας 7.2 – Απώλειες μηχανής μονίμων μαγνητών.....	127
Πίνακας 7.3 – Θερμοκρασίες στα επιμέρους σώματα του κινητήρα σε τομή κάθετη στον άξονα.....	131
Πίνακας 7.4 – Θερμοκρασίες συνιστωσών κινητήρα σε τομή παράλληλη με τον άξονα.....	134
Πίνακας 7.5 – Συντελεστές συναγωγής ανά συνιστώσα κινητήρα.....	135
Πίνακας 7.6 – Χρωματικές αντιστοιχίες 3D γεωμετρίας.....	135
Πίνακας 7.7 - Γεωμετρικές διαστάσεις δρομέα.....	144
Πίνακας 7.8 – Ιδιότητες υλικών δρομέα.....	144
Πίνακας 7.9 – Ιδιοσυχνότητες δρομέα.....	144
Πίνακας 7.10 - Πίνακας συχνοτήτων προσομοίωσης για συχνότητα περιστροφής 15Hz, 22Hz, 30Hz και 35Hz.....	152
Πίνακας 7.11 - Ιδιότητες υλικών δρομέα.....	154
Πίνακας 8.1: Χαρακτηριστικά οχήματος.....	170
Πίνακας 8.2: Τιμές χωρητικότητας και αντιστάσεων αγωγής και συναγωγής.....	172

Λίστα δημοσιεύσεων

A. Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά μετά από κρίση

1. C. T. Krasopoulos, M. E. Beniakar and A. G. Kladas, "Velocity and Torque Limit Profile Optimization of Electric Vehicle Including Limited Overload," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 4, pp. 3907-3916, July-Aug. 2017.
2. C. T. Krasopoulos, M. E. Beniakar and A. G. Kladas, "Robust Optimization of High-Speed PM Motor Design," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 6, pp. 1-4, June 2017.
3. C. T. Krasopoulos, I. P. Armouti and A. G. Kladas, "Hybrid Multiobjective Optimization Algorithm for PM Motor Design," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 6, pp. 1-4, June 2017.
4. C. T. Krasopoulos, M. E. Beniakar and A. G. Kladas, "Multi-Criteria PM Motor Design based on ANFIS evaluation of EV Driving Cycle Efficiency", *IEEE Trans. on Transportation Electrification*, accepted for publication with minor changes.
5. C.T. Krasopoulos, M.E. Beniakar and A.G. Kladas, "Comparison of three different in-wheel SMPM motor configurations based on the urban NEDC", *International Journal Materials Science Forum*, vol. 856, pp. 233-238, 2016.
6. C.T. Krasopoulos, M.E. Beniakar, P.E. Kakosimos, C. Patsios and A.G. Kladas, "Design Considerations for an In-wheel PM motor with Fractional Slot Concentrated Windings for Light Electric Vehicle Applications", *International Journal Materials Science Forum*, vol. 792, pp. 343-348, 2014.

B. Δημοσιεύσεις σε πρακτικά επιστημονικών συνεδρίων μετά από κρίση

1. C. T. Krasopoulos, M. E. Beniakar and A. G. Kladas, "Velocity and torque profile optimization of electric vehicle including limited overload," *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Lausanne, 2016, pp. 2688-2694.
2. C. T. Krasopoulos, M. E. Beniakar and A. G. Kladas, "Robust optimization of high speed PM motor design," *2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC)*, Miami, FL, 2016, pp. 1-1.
3. C. T. Krasopoulos, I. P. Armouti and A. G. Kladas, "Hybrid multi-objective optimization algorithm for PM motor design," *2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC)*, Miami, FL, 2016, pp. 1-1.
4. Iris Eirini K. Koukouvini, Christos T. Krasopoulos, Antonios G. Kladas, "Fault Tolerant Design of Fractional Slot Concentrated Winding PM Motor for Electric Traction", *2017 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, Tinos, Greece, 2017, pp. 1-1
5. M. E. Beniakar, P. E. Kakosimos, C. T. Krasopoulos, A. G. Sarigiannidis and A. G. Kladas, "Comparison of in-wheel permanent magnet motors for electric traction,"

2014 *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Berlin, 2014, pp. 2472-2478.

6. C.T. Krasopoulos, M.E. Beniakar and A.G. Kladas, "Comparison of Three Different In-Wheel PM Motors Based on the Urban NEDC", IXth Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting and Nanomaterials, JAPMED'9, Sofia, July 5th-8th 2015.
7. C.T. Krasopoulos, M.E. Beniakar, P.E. Kakosimos, C. Patsios and A.G. Kladas, "Design Considerations for an In-wheel PM motor with Fractional Slot Concentrated Windings for Light Electric Vehicle Applications", VIIIth Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting, Multifunctional and Nanomaterials, JAPMED'8, Athens, June 23rd-26th 2013.