



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

**Συγκριτική σχεδιομελέτη ηλεκτρικής μηχανής μονίμων
μαγνητών και μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης για
εφαρμογή πρωτότυπου ηλεκτρικού οχήματος**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Παναγόπουλος

Επιβλέπων : Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάϊος 2017



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

**Συγκριτική σχεδιομελέτη ηλεκτρικής μηχανής μόνιμων
μαγνητών και μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης για
εφαρμογή πρωτότυπου ηλεκτρικού οχήματος**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Παναγόπουλος

Επιβλέπων : Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 11^η Μαΐου 2017.

.....
Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Στέφανος Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, Μάιος 2017

.....
Ιωάννης Παναγόπουλος

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

Copyright © Ιωάννης Παναγόπουλος, 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.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί συγκριτική σχεδιομελέτη ηλεκτρικού κινητήρα επιφανειακών μονίμων μαγνητών και κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης για εφαρμογή σε σύστημα ηλεκτρικής κίνησης πρότυπου οχήματος αγώνων εξοικονόμησης ενέργειας. Πρόκειται για κινητήρες χαμηλής ισχύος ($\sim 350\text{W}$), χαμηλής ταχύτητας περιστροφής (~ 300 ΣΑΛ), και ταυτόχρονα υψηλής απόδοσης ($\geq 90\%$), χρησιμοποιώντας ως κύρια κριτήρια βελτιστοποίησης τη μείωση των απωλειών, του βάρους, και της αρμονικής παραμόρφωσης της επαγόμενης τάσης και ροπής. Οι περιορισμοί, στους οποίους υπόκειται η σχεδίαση των κινητήρων, προέρχονται από τις προδιαγραφές συγκεκριμένου ευρωπαϊκού διαγωνισμού πρότυπων μονοθέσιων οχημάτων οικονομικής μετακίνησης. Στην εργασία, σε ένα πρώτο στάδιο, προσδιορίζονται οι προδιαγραφές των κύριων λειτουργικών χαρακτηριστικών των κινητήρων, σε ένα δεύτερο στάδιο καθορίζονται οι βασικές γεωμετρικές διαστάσεις των διαμορφώσεων τους μέσω προκαταρκτικής σχεδίασης και σε τελικό στάδιο υπολογίζονται οι βέλτιστες γεωμετρίες με χρήση πολυκριτηριακών εξελικτικών αλγορίθμων και τεχνικές ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου που βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Εισαγωγικά επιχειρείται μία σύντομη επισκόπηση των διαμορφώσεων των συστημάτων κίνησης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και ιδιαίτερα των διάφορων ειδών ηλεκτρικών κινητήρων που χρησιμοποιούνται. Στη συνέχεια αναλύεται η πίστα των αγώνων και αντίστοιχες απαιτήσεις ροπής. Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται προκαταρκτική σχεδίαση και των δύο τύπων κινητήρα, βασιζόμενη σε αναλυτικές σχέσεις για τον υπολογισμό βασικών μεγεθών της γεωμετρίας τους.

Στη συνέχεια επεξηγείται η επιλογή των σχεδιαστικών μεταβλητών για κάθε ένα από τους δύο τύπους κινητήρων. Επιπροσθέτως αναλύονται τεχνικές σχεδιασμού των γεωμετριών και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών των μηχανών. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι η αποδιδόμενη ροπή, η κυμάτωση της ροπής, το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης, το βάρος και οι απώλειες των κινητήρων.

Στο τελευταίο μέρος της εργασίας εξετάζονται οι γενικές αρχές της βελτιστοποίησης και οι εξελικτικοί πολυκριτηριακοί αλγόριθμοι. Στη συνέχεια αναλύεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε, ο συνδυασμός κριτηρίων που ορίστηκε και το σύνολο των μεταβλητών που επιλέχθηκαν. Παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης και γίνεται επιλογή των πιο κατάλληλων γεωμετριών του μετώπου Pareto. Τέλος, συγκρίνονται οι αρχικές και βελτιστοποιημένες γεωμετρίες των μηχανών μόνιμων μαγνητών και μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης και αναλύονται τα πλεονεκτήματα των βελτιστοποιημένων γεωμετριών αναδεικνύοντας την καταλληλότητα των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν.

Για την υλοποίηση των μεθοδολογιών προσομοίωσης που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων FEMM και αριθμητικής ολοκλήρωσης διαφορικών εξισώσεων MATLAB.

Λέξεις κλειδιά: Ηλεκτρικό όχημα, σχεδίαση ηλεκτρικού κινητήρα, βελτιστοποίηση, προκαταρκτική σχεδίαση μηχανών, κινητήρας μόνιμων μαγνητών, κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, εξελικτικοί αλγόριθμοι, αλγόριθμος PESA-II, πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, μέτωπο Pareto.

Abstract

The present diploma thesis undertakes a comparative design of a synchronous permanent magnet and a variable reluctance electrical motor for a prototype electric vehicle application. The motor specifications involve low nominal power (~ 350 W), low rotational speed (~ 300 rpm), and high efficiency ($\geq 90\%$), using as basic optimization criteria the reduction of losses, weight, harmonic distortion of voltage and torque ripple. The motor design constraints are defined by the specific European race for prototype vehicles targeting low energy consumption. In a first stage, the specifications of the electrical motors are determined and in a next preliminary design stage the main dimensions of the geometries are evaluated through analytic relations. In the final stage, the geometries are optimized using multi-objective evolutionary algorithms in conjunction with finite element magnetic field analysis.

Initially a brief overview of electric car traction systems configurations is presented focusing on various electrical motor types implemented. In the following, the specific racing track is presented and the torque needed is analyzed. These results are taken into account in the preliminary design stage of the two motor types, based on analytical relations to evaluate the basic geometric dimensions.

In addition, the choice of design variables is explained for each motor type and the geometry design methodology as well as the techniques for calculating the motor electromagnetic characteristics are analyzed. The basic characteristics implemented are the output power, the torque ripple, the harmonic content of the voltage, the weight and the losses.

The general optimization principles are mentioned in the last chapter, as well as the evolutionary multi-objective algorithms. The developed evolutionary algorithm is analyzed while the criteria adopted and the set of the variables selected are explained. The optimization results and the optimal motor geometries selected from the Pareto fronts are discussed and compared to the initial ones. The advantages of the optimized geometries are underlined illustrating the proposed methodology suitability.

The simulation methodologies developed have implemented finite element software FEMM and the software for numerical integration of differential equations MATLAB.

Keywords: Electric vehicle, electric motor design, optimization, preliminary motor design, permanent magnet motor, variable reluctance motor, evolutionary algorithms, algorithm PESA-II, multi-objective optimization, Pareto front.

Ευχαριστίες

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

Ευχαριστώ θερμά, τον Καθηγητή μου κ. Αντώνιο Κλαδά, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου την άκρως ενδιαφέρουσα παρούσα εργασία, για την καθοδήγησή του και την άψογη συνεργασία για την περάτωση της.

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Χρήστο Θ. Κρασόπουλο για την πρόθυμη καθοδήγηση, τις υποδείξεις, τη βοήθεια και στήριξη του σε κάθε βήμα της διπλωματικής αυτής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους κοντινούς μου ανθρώπους για την συνεχόμενη στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας, και κυρίως την οικογένεια μου για την αδιάκοπη βοήθεια και στήριξή της.

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας.....	12
1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΚΙΝΗΤΗΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	14
2.1 Ηλεκτρικά οχήματα	14
2.2 Συστήματα κίνησης ηλεκτρικών οχημάτων	15
2.2.1 Ηλεκτρικά οχήματα (EV).....	15
2.2.2 Υβριδικά οχήματα	17
2.3 Ηλεκτρικοί κινητήρες	18
2.3.1 Ηλεκτρικοί Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος (DC).....	18
2.3.2 Ηλεκτρικοί κινητήρες επαγωγής	19
2.3.3 Σύγχρονοι κινητήρες.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΔΙΑΓΩΝΙΣΜΟΥ	21
3.1 Απαιτήσεις διαγωνισμού	21
3.2 Υπολογισμός ασκούμενων δυνάμεων στο αμάξιμα	23
3.2.1 Δύναμη ευθύγραμμης επιτάχυνσης F_{la}	24
3.2.2 Δύναμη αντίστασης κύλισης F_{rr}	25
3.2.3 Οπισθέλκουσα δύναμη F_{ad}	26
3.2.4 Συνολική δύναμη πρόωσης F_{te}	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ.....	28
4.1 Σύστημα κίνησης	28
4.2 Διαστασιολόγηση μηχανών	28
4.2.1.1 Διαστασιολόγηση επιφάνειας διακένου μηχανής μόνιμων μαγνητών.....	29
4.2.1.2 Διαστασιολόγηση επιφάνειας διακένου μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης.....	32
4.2.2 Πάχος διακένου	33
4.2.3 Μελέτη στάτη.....	34
4.2.5 Μελέτη δρομέα	37
4.3 Επιλογή τυλίγματος μηχανής	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	44
5.1 Επιλογή μεταβλητών	44
5.1.1 Μηχανή Μόνιμων Μαγνητών	44
5.1.2 Μηχανή Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης	46

5.2 Υπολογισμός ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών μηχανών	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ	69
6.1 Εισαγωγή	69
6.2 Θεμελιώδεις αρχές βελτιστοποίησης	69
6.3 Κλασσική βελτιστοποίηση.....	71
6.4 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση.....	72
6.5 Κυριαρχία	73
6.6 Εξελικτικοί αλγόριθμοι.....	74
6.6.1 Ο αλγόριθμος SPEA-II	76
6.6.2 Αλγόριθμος PESA-II.....	78
6.7 Βελτιστοποίηση μηχανών	82
6.7.1 Κριτήριο υπερόγκου	83
6.7.2 Εύρος μεταβλητών των μηχανών.....	84
6.7.2.1 Μηχανή μόνιμων μαγνητών.....	84
6.7.2.2 Μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης.....	86
6.8 Κριτήρια βελτιστοποίησης	88
6.9 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης	89
6.9.1 Μέτωπα Pareto	90
6.9.1.1 Μηχανή μόνιμων μαγνητών.....	91
6.9.1.2 Μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης.....	94
6.9.2 Πίνακες αποτελεσμάτων βελτιστοποιήσεων.....	96
6.9.3 Παρουσίαση γεωμετριών και ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών των κινητήρων.....	98
6.9.3.1 Προκαταρκτική και βέλτιστη γεωμετρία μηχανής επιφανειακών μόνιμων μαγνητών	98
6.9.3.2 Ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά των μηχανών επιφανειακών μόνιμων μαγνητών	100
6.9.3.3 Προκαταρκτική και βέλτιστη γεωμετρία μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης.....	102
6.9.3.4 Ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά των μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης.....	104
6.9.4 Τελική επιλογή	106
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	108
7.1 Κυριότερα συμπεράσματα.....	108
7.2 Σημεία επιστημονικής συνεισφοράς	109
7.3 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση.....	109

ΟΡΟΛΟΓΙΑ

α	Επιτάχυνση ταχύτητας ($\frac{m}{s^2}$)
A	Επιφάνεια διακένου (mm^2)
A_{ad}	Μετωπική επιφάνεια αμαξώματος (m^2)
A_{plus}	Τιμή διανυσματικού δυναμικού για τη φάση +A
A_{minus}	Τιμή διανυσματικού δυναμικού για τη φάση -A
A_q	Διατομή αύλακας (mm^2)
A_s	Ειδική ηλεκτρική φόρτιση ($\frac{A \cdot s}{m}$)
A_{μη}	Διατομή αύλακας μηχανής μονίμων μαγνητών
A_{μια}	Διατομή αύλακας μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης
\bar{B}	Ειδική μαγνητική φόρτιση (T)
\bar{B}_n	Ακτινική συνιστώσα μαγνητικής ροής (T)
\bar{B}_t	Εφαπτομενική συνιστώσα μαγνητικής ροής (T)
B	Μαγνητική ροή (T)
C_d	Συντελεστής οπισθέλκουσας δύναμης
C_{iron}	Επιφάνεια σιδήρου (m^2)
C_{magnet}	Επιφάνεια μαγνητών (m^2)
C_{wire}	Επιφάνεια χαλκού (m^2)
D	Διάμετρος διακένου μηχανής (mm)
d_{magnet}	Πυκνότητα μαγνητών ($\frac{kg}{m^3}$)
d_{copper}	Πυκνότητα χαλκού ($\frac{kg}{m^3}$)
d_{iron}	Πυκνότητα σιδήρου ($\frac{kg}{m^3}$)
E	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου (V)
ε	Διηλεκτρική σταθερά
F_{te}	Συνολική ασκούμενη δύναμη στο αμάξωμα (N)
F_{ad}	Οπισθέλκουσα δύναμη (N)
F_{la}	Δύναμη ευθύγραμμης επιτάχυνσης (N)
F_{rr}	Δύναμη αντίστασης κύλισης (N)
F_{te,max}	Μέγιστη συνολική ασκούμενη δύναμη στο αμάξωμα (N)
F_{mean}	Μέση ασκούμενη δύναμη στο αμάξωμα (N)
f_{el}, f	Ηλεκτρική συχνότητα (Hz)
ff	Ποσοστό πληρότητας αύλακας
Φ	Μαγνητική ροή ανά πόλο (mWb)
g	Επιτάχυνση βαρύτητας ($\frac{m}{s^2}$)

θ_e	Ηλεκτρικές μοίρες
θ_m	Μηχανικές μοίρες
θ_i	Γωνία αγωγής ρεύματος
H_{obj}	Κριτήριο βελτιστοποίησης αρμονικού περιεχομένου
H	Ένταση μαγνητικού πεδίου ($\frac{A}{m}$)
I	Ρεύμα γραμμής (A)
I_{rms}	Ενεργός τιμή ρεύματος (A)
k_e	Απόδοση μηχανής
k_d	Κύκλος εργασίας μηχανής
J	Πυκνότητα ρεύματος ($\frac{A}{mm^2}$)
J_{rms}	Ενεργός τιμή πυκνότητας ρεύματος ($\frac{A}{mm^2}$)
L	Ενεργό μήκος μηχανής (mm)
l_e	Πραγματικό μήκος των άκρων τυλίγματος (mm)
l_{ent1}	Μήκος δοντιού (mm)
l_{ent2}	Μήκος πέλματος δοντιού (mm)
l_{wire}	Μήκος σπείρας δοντιού (mm)
l_s	Απόσταση δύο αυλάκων (mm)
L_{cop}	Μήκος χαλκού (mm)
L_{obj}	Κριτήριο βελτιστοποίησης απωλειών
m	Μάζα αμαξώματος και οδηγού (kg)
$mult1$	Συντελεστής πάχους δοντιού
$mult2$	Συντελεστής πάχους πέλματος δοντιού
μ	Μαγνητική διαπερατότητα υλικού
μ_o	Μαγνητική διαπερατότητα κενού
μ_{rr}	Συντελεστής αντίστασης κύλισης
n_{mean}	Ονομαστικές στροφές μηχανής (ΣΑΛ ή rpm)
N_r, n_s	Ταχύτητα δρομέα (ΣΑΛ)
N_i	Αριθμός σπειρών αύλακας
ρ_{ad}	Πυκνότητα του αέρα ($\frac{kg}{m^3}$)
P_{el}	Ονομαστική ισχύς (W)
p, P	Αριθμός πόλων μηχανής
P_t	Εφαπτομενική πίεση διακένου ($\frac{kN}{m^2}$)
ρ_c	Ειδική αντίσταση χαλκού ($\frac{Ohm}{m}$)
q_p	Αριθμός φάσεων στάτη
q	Αριθμός αυλάκων μηχανής
R_A	Αντίσταση πηνίων φάσης A (Ohm)

R_{losses}	Συνολικές ωμικές απώλειες μηχανής (W)
r_{wheel}	Ακτίνα τροχού (m)
r_{yoke}	Πάχος μαγνήτη/τμήματος σιδήρου στο δρομέα (mm)
r_{back}	Πάχος δρομέα (mm)
r_{arc}	Πολικό βήμα μηχανής
r_{arc1}	Ποσοστό γωνίας μαγνήτη/τμήματος σιδήρου επί πολικού βήματος
Step	Βήμα περιστροφής δρομέα (°)
S_{slot}	Επιφάνεια αύλακας (m^2)
s	Αριθμός αυλάκων ανά φάση
T_{max}	Μέγιστη ροπή (Nm)
T_{min}	Ελάχιστη ροπή (Nm)
T_{el}	Απαιτούμενη ροπή (Nm)
T_{ripple}	Κυμάτωση ροπής
T_{sum}	Άθροισμα ροπών (Nm)
T_{obj}	Κριτήριο βελτιστοποίησης ροπής
tooth_prc	Συντελεστής ενδιάμεσου δοντιού
v	Ταχύτητα οχήματος ($\frac{m}{s}$)
v_{mean}	Μέση ταχύτητα ($\frac{m}{s}$)
V_{rms}	Ενεργός τιμή έντασης (V)
W_{iron}	Βάρος σιδήρου μηχανής (kg)
W_{magnet}	Βάρος μαγνητών μηχανής (kg)
W_{copper}	Βάρος χαλκού μηχανής (kg)
w_{cros}	Διατομή καλωδίων χαλκού (mm)
ω	Γωνιακή ταχύτητα δρομέα ($\frac{r}{s}$)
ω_{mean}	Μέση γωνιακή ταχύτητα δρομέα ($\frac{r}{s}$)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση και η σύγκριση δύο διαφορετικών τύπων κινητήρων υψηλής απόδοσης, μικρού όγκου και υψηλής απόδοσης, για την κίνηση ενός προτύπου ηλεκτρικού οχήματος. Οι δύο υπό εξέταση κατηγορίες μηχανών είναι η σύγχρονη ηλεκτρική μηχανή επιφανειακών μονίμων μαγνητών και η μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Ο υπό μελέτη κινητήρας αποτελεί βασική συνιστώσα του συστήματος κίνησης ενός πρότυπου μονοθέσιου ηλεκτρικού οχήματος, το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια της συμμετοχής στον πανευρωπαϊκό διαγωνισμό οικονομίας καυσίμου Shell Eco Marathon. Ο πλέον εκτετατός κινητήρας για την συγκεκριμένη πίστα διεξαγωγής των αγώνων στο Λονδίνο προορίζεται να ενσωματωθεί στο υφιστάμενο αμάξωμα του οχήματος «Πυρφόρος».

Λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς που υπαγορεύονται από τους διοργανωτές και τη συγκεκριμένη διαμόρφωση της πίστας, προέκυψαν οι προδιαγραφές των εν λόγω κινητήρων. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι κατά τη συγκριτική σχεδιομελέτη των δύο μηχανών να αξιοποιηθούν και οι εμπειρίες που έχουν αποκτηθεί κατά την ανάπτυξη των προηγούμενων κινητήρων του οχήματος. Κατά την διαδικασία αυτή αναπτύχθηκαν μεθοδολογίες και εξήχθησαν συμπεράσματα που μπορούν να χρησιμεύσουν γενικότερα στη σχεδίαση και τη βελτιστοποίηση γεωμετρίας ηλεκτρικών κινητήρων. Συγκεκριμένα για την επίτευξη των παραπάνω στόχων χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι μοντελοποίησης γεωμετρίας και πεδιακής ανάλυσης, καθώς και πολυκριτηριακοί εξελικτικοί αλγόριθμοι για τη βελτιστοποίηση των κινητήρων.

1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει επτά κεφάλαια. Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται οι στόχοι της εργασίας και επεξηγείται η διάρθρωσή της.

Αρχικά παρατίθεται επισκόπηση των κινητήριων συστημάτων των ηλεκτρικών οχημάτων και συγκεκριμένα, στο **Κεφάλαιο 2** μια σύντομη παρουσίαση των τύπων ηλεκτρικών μηχανών που χρησιμοποιούνται καθώς και της διαχρονικής εξέλιξής τους.

Στο **Κεφάλαιο 3**, παρουσιάζεται η πίστα του διαγωνισμού και με βάση τα χαρακτηριστικά της αναλύονται οι δυνάμεις που ασκούνται στο όχημα, κατά μήκος της διαδρομής.

Στο **Κεφάλαιο 4**, υπολογίζεται η ροπή που θα πρέπει να αποδίδει ο κινητήρας, και επιπλέον παρουσιάζεται η διαδικασία διαστασιολόγησης που ακολουθήθηκε για κάθε είδος κινητήρα ξεχωριστά. Συγκεκριμένα η προκαταρκτική σχεδίαση των δύο κινητήρων βασίζεται σε κατάλληλες αναλυτικές σχέσεις για κάθε μηχανή. Αναλύονται επίσης, ξεχωριστά η τοπολογία του στάτη και του δρομέα της. Τέλος γίνεται μία εκτίμηση των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών των κινητήρων και επιλέγεται ο κατάλληλος τύπος τυλίγματος για την κάθε μηχανή.

Το **Κεφάλαιο 5**, αφορά την παραμετροποιημένη σχεδίαση των κινητήρων. Περιλαμβάνει εκτενή ανάλυση των διαδικασιών που ακολουθήθηκαν για τη σχεδιάσή τους καθώς και των μεθόδων και των σχέσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την διερεύνηση των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών των μηχανών.

Στο **Κεφάλαιο 6**, αναπτύσσεται η προτεινόμενη διαδικασία της βελτιστοποίησης των μηχανών, μετά από εξέταση των διάφορων υφιστάμενων μεθόδων βελτιστοποίησης και αιτιολόγηση της τελικής επιλογής του εξελικτικού αλγορίθμου που υιοθετήθηκε. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού εξετάζονται οι γεωμετρικές και τα χαρακτηριστικά των δύο τύπων μηχανών τόσο πριν όσο και μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Στο **Κεφάλαιο 7**, συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα της εργασίας και διατυπώνονται προτάσεις θεμάτων για περαιτέρω διερεύνηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΚΙΝΗΤΗΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

2.1 Ηλεκτρικά οχήματα

Τα τελευταία χρόνια γίνεται όλο και πιο έντονη η τάση στροφής προς εναλλακτικές πηγές ενέργειας, λόγω διάφορων περιβαλλοντικών και οικονομικών λόγων, όπως για παράδειγμα η περιβαλλοντική μόλυνση, η αναπόφευκτη μείωση των φυσικών πόρων και της μαζικότερης ευαισθητοποίησης προς το περιβάλλον. Οι παραπάνω λόγοι έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη και τη διάδοση ενός διαφορετικού τύπου αυτοκινήτου από τα απλά συμβατικά αυτοκίνητα που χρησιμοποιούν κινητήρες εσωτερικής καύσης. Οι εκπομπές αέριων ρύπων από τα οχήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσης ευθύνονται κατά ένα μεγάλο μέρος για την ρύπανση της ατμόσφαιρας και το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την υπερθέρμανση του πλανήτη.

Το ηλεκτρικό αυτοκίνητο προσφέρει έναν εναλλακτικό και περιβαλλοντικά φιλικό τρόπο μετακίνησης. Η υψηλή απόδοση του ηλεκτρικού συστήματος κίνησης, και η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προσφέρουν λύσεις στον περιβαλλοντικό και τον οικονομικό προβληματισμό που αναφέρθηκε παραπάνω.

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερη απόδοση από τους αντίστοιχους συμβατικούς εσωτερικής καύσης κινητήρες, φτάνοντας ως και τριπλάσιες τιμές. Η ηλεκτρική μηχανή αυτή καθ' εαυτή έχει απόδοση της τάξης του 80% και δυνατότητα αξιοποίησης αντίστροφης λειτουργίας απορροφώντας ενέργεια από τα φρεναρίσματα. Σε συνδυασμό με τις επιμέρους μετατροπές ενέργειας και την τροφοδοσία από το δίκτυο η απόδοση πέφτει περίπου στο 60% ποσοστό τρεις φορές μεγαλύτερο από αυτό των μηχανών εσωτερικής καύσης οι οποίες φτάνουν απόδοση ύψους 20% λόγω μεγάλων απωλειών σε θερμότητα.

Επίσης, οι ηλεκτρικοί κινητήρες εξασφαλίζοντας μεγάλη ροπή στη μηδενική ταχύτητα επιτυγχάνουν πολύ μεγάλη και ομαλή επιτάχυνση. Αυτά σε συνδυασμό με την αθόρυβη, συγκριτικά με μηχανές εσωτερικής καύσης, λειτουργία τους και τις μικρές απαιτήσεις συντήρησης, τους καθιστούν εξαιρετική εναλλακτική στους συμβατικούς τρόπους κίνησης. Τέλος είναι πλήρως φιλικό προς το περιβάλλον έχοντας μηδενικούς ρύπους.

Λόγω των παραπάνω πλεονεκτημάτων, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα κυκλοφόρησαν στο δρόμο ήδη από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα, ακόμα και πριν από την χρήση οχημάτων με κινητήρα εσωτερικής καύσης. Εντούτοις, ορισμένοι περιορισμοί στη χρήση και δυσκολίες στην παραγωγή τους, σε συνδυασμό με τη ραγδαία τεχνολογική εξέλιξη των κινητήρων εσωτερικής καύσης οδήγησαν στην εξαφάνισή τους από το προσκήνιο στις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Το ενδιαφέρον για το ηλεκτρικό αυτοκίνητο επανεμφανίστηκε στη δεκαετία του 60', όταν διαπιστώθηκαν οι συνέπειες της ευρείας διάδοσης των αυτοκινήτων εσωτερικής καύσης. Αν και η ηλεκτρική κίνηση, έχει χρησιμοποιηθεί έκτοτε εκτενώς στα μέσα μαζικής μεταφοράς, η εξέλιξη δεν ήταν η ίδια για τα οχήματα ιδιωτικής χρήσης.

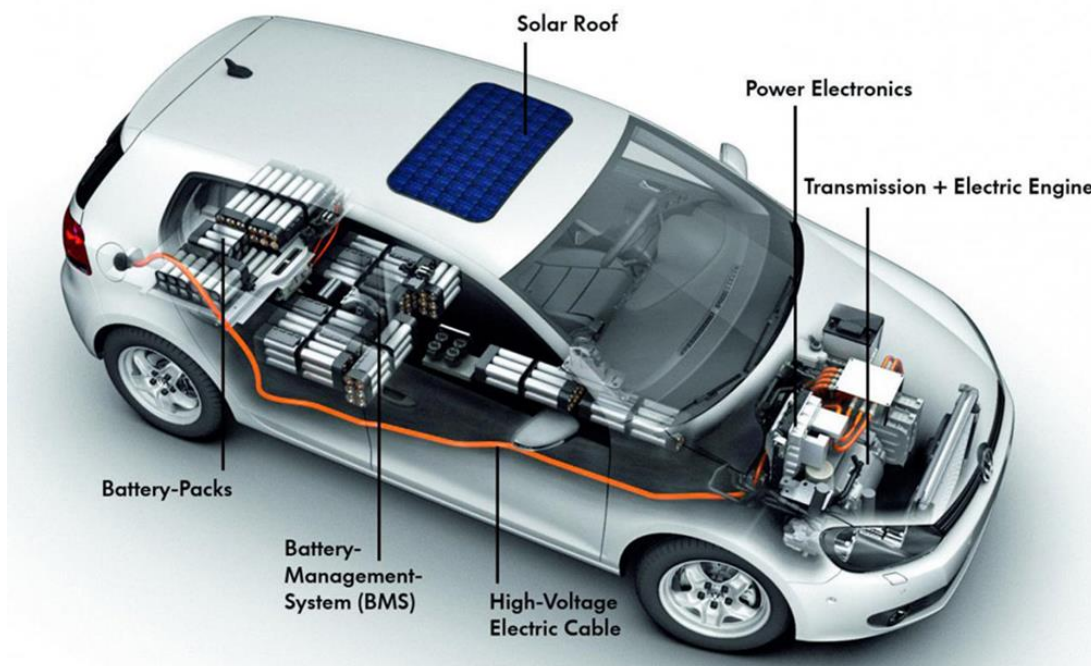
Ως βασικός τεχνολογικός παράγοντας που αποτελεί διαχρονικά εμπόδιο στη διάδοση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι η μικρή εμβέλεια κίνησης και η δυσκολία αποθήκευσης αρκετής ενέργειας σε συσσωρευτές αποδεκτού κόστους. Οι εξελίξεις των τελευταίων ετών στην τεχνολογία των συσσωρευτών είναι σημαντικές και η έρευνα συνεχίζεται ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα των μέσων αποθήκευσης ενέργειας, με ταυτόχρονη μείωση του βάρους και του κόστους τους. Συνεπώς, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αύξηση της παραγωγής και κυκλοφορίας ηλεκτρικών αυτοκινήτων.^{[1][5][6]}

2.2 Συστήματα κίνησης ηλεκτρικών οχημάτων

Οι κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα είναι δύο: τα πλήρως ηλεκτρικά και τα υβριδικά οχήματα. Η βασική διαφορά των δύο κατηγοριών είναι ότι τα υβριδικά οχήματα διαθέτουν περισσότερες από μία πηγές ενέργειας.

2.2.1 Ηλεκτρικά οχήματα (EV)

Τα χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι ότι η πρόωση παρέχεται αποκλειστικά από έναν ή περισσότερους ηλεκτρικούς κινητήρες και ότι η πηγή ενέργειας είναι φορητή, χημικής ή ηλεκτρομηχανικής φύσης.^[2]

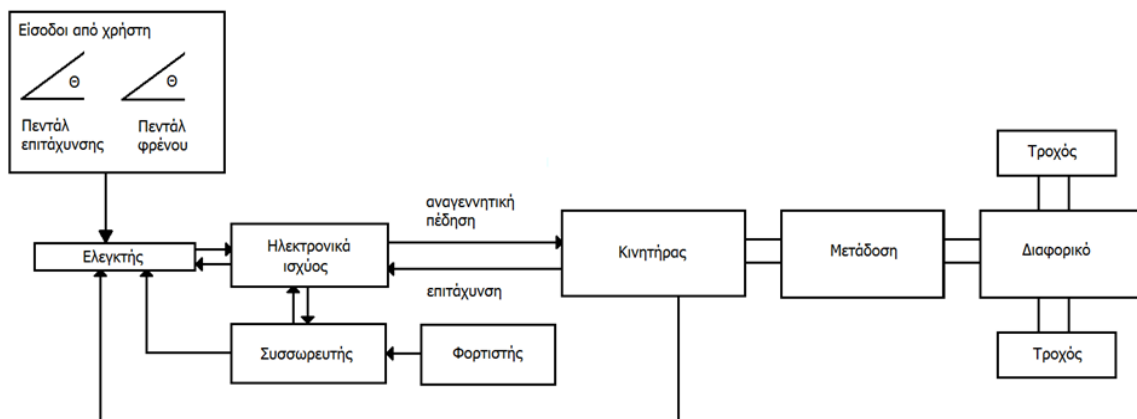


Σχήμα 2.1 Σύστημα κίνησης ηλεκτρικού αυτοκινήτου^[3]

Το σχήμα 2.1 απεικονίζει το σύστημα κίνησης ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου το οποίο τροφοδοτείται από φορητή πηγή ενέργειας. Ο ηλεκτρικός και μηχανικός εξοπλισμός που μετατρέπει την ενέργεια της πηγής σε κινητική ενέργεια στον τροχό ονομάζεται σύστημα πρόωσης.

Τα υποσυστήματα του συστήματος κίνησης ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι ο κινητήρας, ο ελεγκτής και το σύστημα οδήγησης (μετατροπέας), η πηγή ενέργειας και η μετάδοση. Η αναλυτική δομή και η αλληλεπίδραση των συνιστωσών ενός τέτοιου συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 2.2.

Η παραδοσιακή πηγή ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων ήταν οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές, με βασικό τύπο αυτό των συσσωρευτών μολυβδου-οξέος που προτιμήθηκε λόγω του χαμηλού κόστους και της ανεπτυγμένης τεχνολογίας. Η ανάγκη για βελτιωμένα χαρακτηριστικά οδήγησε στην ανάπτυξη εναλλακτικών ειδών συσσωρευτών, με ψηλότερη πυκνότητα ενέργειας και δυνατότητα παροχής μεγαλύτερης ισχύος, όπως επίσης με μεγαλύτερο αριθμό κύκλων φόρτισης –εκφόρτισης. Αναφέρονται ως παράδειγμα, οι συσσωρευτές νικελίου - καδμίου (NiCd), νικελίου μετάλλου - υβριδίου (NiMH), ιόντων λιθίου (LiION), λιθίου - ιόντων πολυμερών και οι εξελιγμένοι συσσωρευτές μολυβδου - οξέος.



Σχήμα 2.2 Συνιστώσες συστήματος κίνησης

Οι συσσωρευτές απαιτούν φόρτιση ώστε να ανακτήσουν το επίπεδο ενέργειας που είχαν πριν αυτή εξαντληθεί λόγω παροχής ισχύος στο φορτίο τους. Το γεγονός αυτό προσδίδει περιορισμένη αυτονομία κίνησης στο όχημα μεταξύ φορτίσεων, οι οποίες έχουν διάρκεια λίγων ωρών. Για να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα αναπτύσσονται εναλλακτικές πηγές ενέργειας όπως οι κυψέλες καυσίμου, οι οποίες είναι ένα ανοικτό θερμοδυναμικό σύστημα του οποίου τα αντιδρώντα εισάγονται εξωτερικά, σε αντίθεση με τους συσσωρευτές. Έχουν ήδη αναπτυχθεί και κατασκευαστεί οχήματα που τροφοδοτούνται από κυψέλη καυσίμου και αναμένεται να επεκταθεί η χρήση τους στο μέλλον. [6]

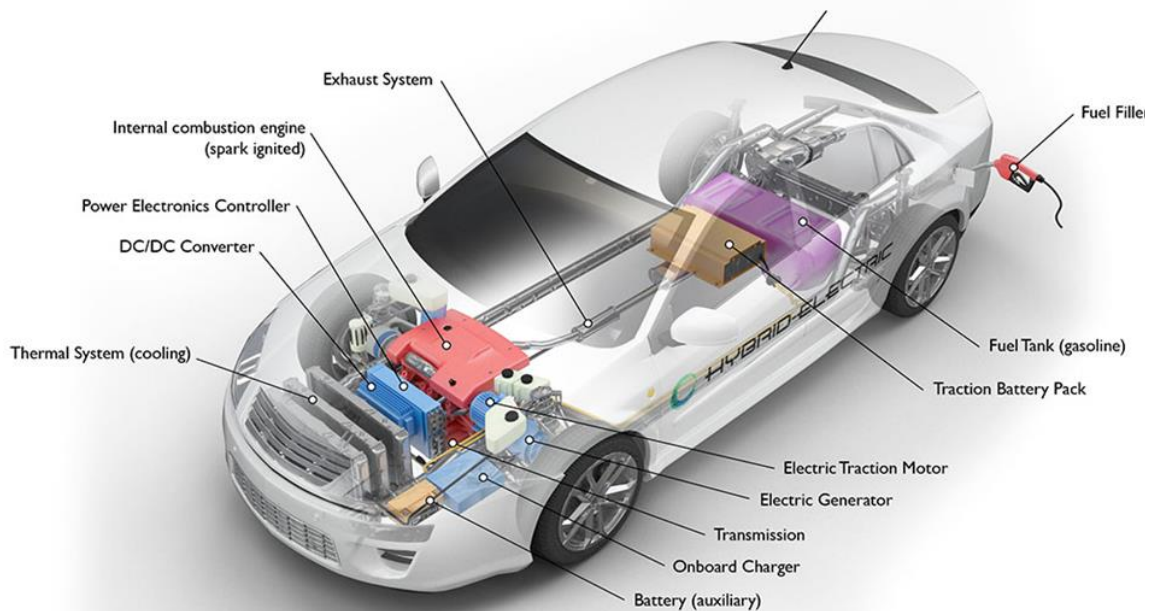
Ο κινητήρας του ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι σημαντικό υποσύστημα του συστήματος κίνησης και απαιτείται να πληροί προδιαγραφές μεγέθους, βάρους, κόστους, ακουστικού θορύβου, θερμοκρασιακής και μηχανικής αντοχής. Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται συνήθως σε ηλεκτρικά οχήματα είναι κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC), ασύγχρονοι κινητήρες και κινητήρες μονίμων μαγνητών. Σε κάθε περίπτωση η σχεδίαση είναι μια σύνθετη

διαδικασία λόγω της αλληλεξάρτησης παραμέτρων οι οποίες καθορίζουν την επίδοση, την απόδοση και το κόστος του κινητήρα και κατά συνέπεια του οχήματος.

Ο ηλεκτρικός κινητήρας οδηγείται από μια μονάδα ηλεκτρονικών ισχύος ελεγχόμενων από μικροεπεξεργαστή ή ψηφιακό επεξεργαστή σήματος. Ο ρόλος αυτής της μονάδας είναι η μετατροπή της συνεχούς τάσης της πηγής ενέργειας σε μεταβαλλόμενη τάση επιθυμητής συχνότητας αναλόγως του σημείου λειτουργίας του οχήματος. Η τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος είναι μια σημαντική παράμετρος στην εξέλιξη συστημάτων κίνησης υψηλής επίδοσης. Τα ηλεκτρονικά ισχύος και το κύκλωμα ελέγχου τείνουν να γίνονται ταχύτερα, αποδοτικότερα και μικρότερα σε μέγεθος. Η ψηφιακή επεξεργασία σήματος επιτρέπει την εφαρμογή σύνθετων αλγορίθμων ελέγχου με μεγάλη ακρίβεια και ταχύτητα.

2.2.2 Υβριδικά οχήματα

Σε αντίθεση με το ηλεκτρικό αυτοκίνητο, το υβριδικό ηλεκτρικό διαθέτει τουλάχιστον μια πηγή ενέργειας και ένα μετατροπέα που μπορεί να μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.3. Ανάλογα με τη λειτουργική κατάσταση, η πρόωση παρέχεται από δύο ή περισσότερα είδη πηγών ενέργειας. Το ηλεκτρικό υβριδικό αυτοκίνητο αποτελεί ουσιαστικά ένα συμβιβασμό ανάμεσα στα οφέλη του ηλεκτρικού αυτοκινήτου και στην αυξημένη εμβέλεια κίνησης που παρέχει το σύστημα κίνησης με κινητήρα εσωτερικής καύσης, ενώ θεωρείται ως βραχυχρόνια λύση μέχρι να λυθούν τα τεχνικοοικονομικά ζητήματα που δεν επιτρέπουν την μαζική παραγωγή και κυκλοφορία του ηλεκτρικού αυτοκινήτου.



Σχήμα 2.3 Σύστημα κίνησης υβριδικού αυτοκινήτου^[4]

Τα σύγχρονα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιούν τεχνολογίες που αυξάνουν την απόδοση, όπως είναι η αναγεννητική πέδηση, μέσω της οποίας η κινητική ενέργεια του οχήματος μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια για το συσσωρευτή. Μερικά υβριδικά οχήματα χρησιμοποιούν τον κινητήρα εσωτερικής καύσης που διαθέτουν ως γεννήτρια, με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρισμού είτε για την επαναφόρτιση των συσσωρευτών, είτε για την απευθείας

τροφοδοσία του ηλεκτρικού κινητήρα. Επίσης, ανάλογα με το αν η σύνδεση των κινητηρίων υποσυστημάτων μεταξύ τους είναι σε σειρά, παράλληλα, ή συνδυασμό των δύο, τα υβριδικά οχήματα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες. Στη σύνδεση σε σειρά, ο κινητήρας εσωτερικής καύσης χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την κίνηση μιας ηλεκτρικής γεννήτριας και τη φόρτιση του συσσωρευτή. Ο ηλεκτρικός κινητήρας που τροφοδοτείται από το συσσωρευτή αυτό αποτελεί το μόνο κινητήρα που δίνει κίνηση στο σύστημα μετάδοσης. Στην παράλληλη σύνδεση υπάρχουν δύο είδη κινητήρων που παρέχουν πρόωση, ένας κινητήρας εσωτερικής καύσης και ένας ηλεκτρικός κινητήρας. Αυτή η σύνδεση παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3. Η ισχύς των δύο κινητήρων συνδυάζεται κατάλληλα ώστε να ικανοποιηθεί η απαίτηση ισχύος του οχήματος με μικρή κατανάλωση καυσίμου.

2.3 Ηλεκτρικοί κινητήρες

Συγκεκριμένα, μία ηλεκτρική μηχανή οφείλει να παρέχει υψηλή και εύκολα ελεγχόμενη ροπή σε χαμηλές ταχύτητες, ώστε να επιτυγχάνεται ομαλή και μεγάλη επιτάχυνση, ενώ παράλληλα να εξασφαλίζει σταθερή ισχύ εξόδου σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων λειτουργίας. Πέραν των παραπάνω, οι τιμές των απωλειών θα πρέπει να κρατούνται στα ελάχιστα δυνατά επίπεδα, παρέχοντας υψηλή απόδοση και υψηλή πυκνότητα ισχύος. Ταυτόχρονα, οφείλει να ακολουθεί υψηλές προδιαγραφές αντοχών, τόσο μηχανικών όσο και θερμοκρασιακών, έτσι ώστε να συνδυάζει μεγάλη διάρκεια ζωής και μικρές απαιτήσεις συντήρησης. Τέλος, φυσικά είναι επιθυμητό το ελάχιστο δυνατό κόστος και βάρος της ηλεκτρικής μηχανής, αλλά και διάφορες εξειδικευμένες απαιτήσεις, αναλόγως της εφαρμογής και των ιδιομορφιών του κάθε συστήματος.

Παρακάτω θα αναλυθούν οι βασικότερες κατηγορίες ηλεκτρικών μηχανών. Οι οποίες είναι:

- Ηλεκτρικοί κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC)
- Ηλεκτρικοί κινητήρες επαγωγής
- Σύγχρονοι κινητήρες

2.3.1 Ηλεκτρικοί Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος (DC)

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, ήταν οι πρώτοι που χρησιμοποιήθηκαν στην ηλεκτροκίνηση. Οι κινητήρες αυτοί βασίζονται στη λειτουργία τους στην αλληλεπίδραση του πεδίου διέγερσης, που βρίσκεται στο στάτη και το πεδίο τυμπάνου που βρίσκεται στο δρομέα της μηχανής. Ο συλλέκτης της που βρίσκεται στο δρομέα επιβάλλει μονίμως καθετότητα των δύο πεδίων. Το βασικό πλεονέκτημα της μηχανής συνεχούς ρεύματος (DC) είναι ο εύκολος έλεγχος των στροφών σε μεγάλο εύρος τιμών, επεμβαίνοντας στην τάση ή στο ρεύμα τροφοδοσίας. Τα παραπάνω προσφέρουν υψηλές τιμές επιτάχυνσης και ομαλό έλεγχο της, καθιστώντας τους κινητήρες αυτούς ιδιαίτερα ελκυστική επιλογή.

Το μεγάλο μειονέκτημα, όμως των μηχανών αυτών είναι το μεγάλο κόστος τους καθώς και η μικρή αξιοπιστία τους, σε βαθμό που αντισταθμίζονται τα παραπάνω πλεονεκτήματα. Λόγω των ψηφικών και του συλλέκτη, που είναι ιδιαίτερα ευπαθείς και φθείρονται διαρκώς, καθώς εκεί πραγματοποιείται η μηχανική ανόρθωση του ρεύματος, οι ανάγκες σε συντηρήσεις είναι υψηλές και η διάρκεια ζωής τους επιβαρύνεται από πολλούς παράγοντες, όπως υγρασία, πίεση αλλά και το ίδιο το φορτίο. Η πρόοδος στην τεχνολογία ελέγχου των υπόλοιπων κατηγοριών

κινητήρων εκτόπισε τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος από το προσκήνιο. Παρόλα αυτά, εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται για εφαρμογές μικρής ισχύος.^{[7][8]}

2.3.2 Ηλεκτρικοί κινητήρες επαγωγής

Εναλλακτική επιλογή κινητήρα αποτελεί η μηχανή επαγωγής, η οποία χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό για ηλεκτροκίνηση. Η λειτουργία βασίζεται στην αλληλεπίδραση του πεδίου του τυμπάνου, που παράγεται από το τύλιγμα του στάτη, όσο αυτός διαρρέεται από την τριφασική τροφοδοσία, με το τύλιγμα του δρομέα που δημιουργεί ένα πεδίο εξ' επαγωγής. Το πεδίο αυτό τείνει να αντισταθεί στο μαγνητικό πεδίο που το προκαλεί, οπότε ο δρομέας ξεκινά να περιστρέφεται όπως το πεδίο του στάτη, έως ότου το επαγόμενο ρεύμα και η παραγόμενη ροπή να ισορροπούν με το φορτίο.

Γενικά οι κινητήρες επαγωγής έχουν μικρό κόστος και μικρές απαιτήσεις συντήρησης, παρέχοντας έτσι υψηλή αξιοπιστία, σε αντίθεση με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Παράλληλα, έχουν πιο ώριμη τεχνολογία σε σχέση με τις σύγχρονες μηχανές. Η αρνητική πλευρά είναι ότι παρουσιάζουν καλή απόδοση και μεγάλη ισχύ εξόδου μόνο για ορισμένες τιμές στροφών, ανάλογα με τις προδιαγραφές κατασκευής. Παρόλα αυτά, με την βοήθεια ηλεκτρονικών ισχύος είναι δυνατός ο καλός σχετικά έλεγχος της μηχανής και η μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας, η οποία μπορεί να προσαρμόσει τις στροφές στις επιθυμητές τιμές.^{[7][8]}

2.3.3 Σύγχρονοι κινητήρες

Πέραν των κινητήρων επαγωγής, γίνεται χρήση και σύγχρονων κινητήρων. Οι σύγχρονοι κινητήρες βασίζονται στη λειτουργία τους επίσης, στην αλληλεπίδραση των πεδίων δρομέα - στάτη και υπάρχουν διάφορες κατηγορίες αυτών των κινητήρων. Συγκεκριμένα, δύο μεγάλες κατηγορίες τους που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροκίνηση είναι μονίμων μαγνητών και κινητήρες μαγνητικής αντίδρασης.

Οι σύγχρονοι κινητήρες μονίμων μαγνητών (PMSM) αποτελούν την κύρια εναλλακτική απέναντι στους κινητήρες επαγωγής στην ηλεκτροκίνηση. Η χρήση μονίμων μαγνητών στο δρομέα δημιουργεί ένα μόνιμο πεδίο, έτσι ώστε αντικαθίσταται το τύλιγμα πεδίου, ενώ ο στάτης εξακολουθεί να έχει τροφοδοτούμενα από εναλασσόμενο ρεύμα τυλίγματα, ώστε να δημιουργείται το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Η έλλειψη τυλίγματος πεδίου, συντελεί στη μείωση απωλειών χαλκού και στη μεγαλύτερη αξιοπιστία, αφού επιπλέον δεν γίνεται χρήση ψηκτρών. Πλέον η χρήση σύγχρονων κινητήρων με επιφανειακούς μόνιμους μαγνήτες αποτελεί την τάση στην ηλεκτροκίνηση, καθώς εξασφαλίζουν υψηλή απόδοση και υψηλή πυκνότητα ισχύος. Επίσης, αποβάλουν προς στο περιβάλλον ευκολότερα την θερμότητα. Το μειονέκτημά τους είναι το περιορισμένο εύρος σταθερής τιμής ισχύος εξόδου. Παρόλα αυτά με κατάλληλο έλεγχο μπορούν να διευρύνουν το εύρος ταχυτήτων τους. Επίσης, είναι πιθανή η απομαγνήτιση των μονίμων μαγνητών λόγω αντίδρασης τυμπάνου και θερμότητας.

Η κατηγορία των σύγχρονων κινητήρων μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης (SRM), από την άλλη μεριά, έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον λόγω του ιδιαίτερα χαμηλού κόστους τους σε συνδυασμό με την απλή κατασκευή τους. Η απλότητα αυτή οφείλεται στο ότι απουσιάζει τύλιγμα διέγερσης και μόνιμοι μαγνήτες στο δρομέα, καθώς η λειτουργία τους βασίζεται στην

μεταβολή της μαγνητικής αντίστασης του δρομέα, εκμεταλλευόμενοι την ροπή εκτυπότητας. Πέραν αυτών, έχουν εύκολο έλεγχο και πολύ καλή χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας.

Τα προβλήματα που παρουσιάζουν αυτοί οι κινητήρες είναι αρκετά και έχουν μεγάλη επιρροή στις εφαρμογές ηλεκτροκίνησης. Συγκεκριμένα παρουσιάζουν έντονη κυμάτωση ροπής, έντονο θόρυβο λειτουργίας, μικρή δυνατότητα σε παροχή ισχύος εξόδου και απαιτούν ιδιαίτερες τοπολογίες μετατροπεία.

Παρακάτω γίνεται συγκεντρωτική σύγκριση των χαρακτηριστικών κάθε είδους μηχανής από τις παραπάνω, όσον αφορά την πυκνότητα ισχύος, την απόδοση, την δυνατότητα εύκολης οδήγησης και ελέγχου, την αξιοπιστία, το κόστος και το κατά πόσο ώριμη είναι η τεχνολογία τους. Η κλίμακα αξιολόγησης εκτείνεται από το 1 ως το 5, με μεγαλύτερες τιμές να σημαίνουν και καλύτερη συμπεριφορά.^{[7][8]}

Πίνακας 2.1: Αξιολόγηση ηλεκτρικών μηχανών

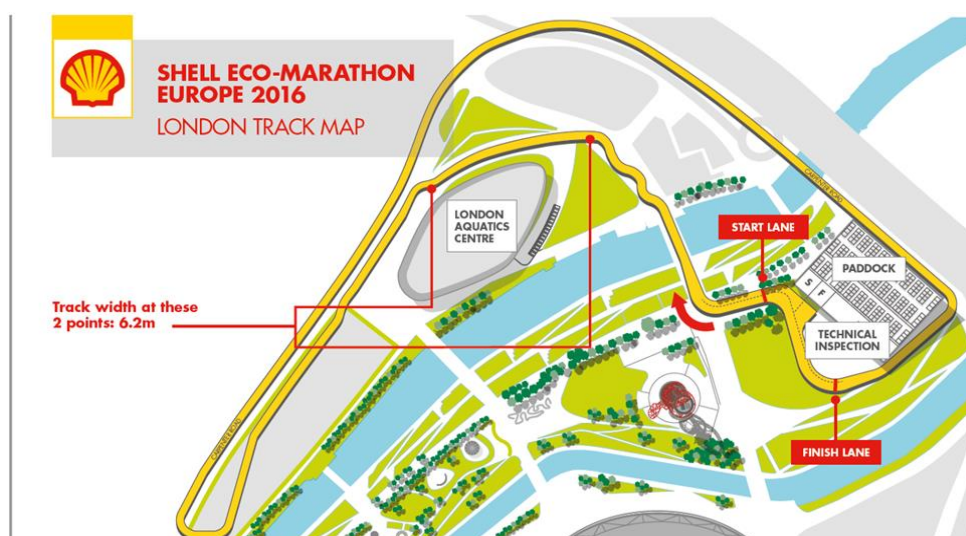
Χαρακτηριστικά	Κινητήρας			
	Συνεχούς ρεύματος (DC)	Επαγωγής	Μόνιμων Μαγνητών	Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης
Πυκνότητα Ισχύος	2.5	3.5	5	3.5
Απόδοση	2.5	3.5	5	3.5
Έλεγχος	5	5	4	3
Αξιοπιστία	3	5	4	5
Τεχνολογική Πρόοδος	5	5	4	4
Κόστος	4	5	3	4
Συνολική Αξιολόγηση	22	27	25	23

Στον πίνακα 2.1, αξιολογούνται οι διάφοροι τύποι μηχανών σε έξι διαφορετικούς τομείς, με άνω όριο της κλίμακας βαθμολογίας το 5. Στην τελευταία γραμμή του πίνακα παρουσιάζεται η συνολική απόδοση του κάθε τύπου μηχανής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΔΙΑΓΩΝΙΣΜΟΥ

3.1 Απαιτήσεις διαγωνισμού

Οι κινητήρες θα σχεδιαστούν με την προοπτική να ενσωματωθούν στο όχημα "Πυρφόρος-II", του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το όχημα θα καλεστεί να τρέξει στην πίστα η οποία βρίσκεται στο ολυμπιακό πάρκο "Queen Elizabeth" στο Λονδίνο, στα πλαίσια του διαγωνισμού Shell Eco Marathon.



Σχήμα 3.1 : Σχέδιο της πίστας του αγώνα^[26]

Στο σχήμα (3.1) παρουσιάζεται η πίστα του διαγωνισμού, η οποία αποτελείται από αρκετές στροφές και εναλλαγές κλίσης. Το μεγάλο πλήθος στροφών καθώς και η συχνότητα αλλαγής της κλίσης της διαδρομής όπως φαίνεται στο σχήμα (3.2) δημιουργούν υψηλές απαιτήσεις για τον σχεδιασμό του κινητήρα του οχήματος καθώς και για το σύστημα οδήγησης.

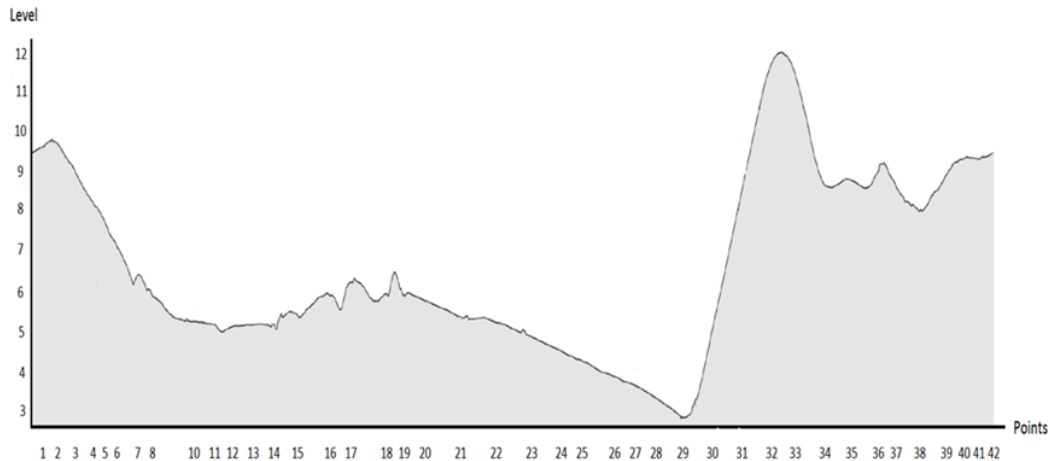
Πίνακας 3.1: Προδιαγραφές πίστας

Στοιχεία πίστας	
Μήκος πίστας	2240 m
Αριθμός γύρων	8
Μέσο πλάτος πίστας	7,5 m
Συνολική απόσταση	17,92 km
Χρόνος ολοκλήρωσης	43 λεπτά

Τα στοιχεία της διαδρομής όπως αυτά αναφέρονται από το διαγωνισμό παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα (3.1). Η συνολική απόσταση την οποία πρέπει να διανύσει το όχημα είναι 18 χιλιόμετρα και ο χρόνος στον οποίο πρέπει να ολοκληρωθεί αυτή είναι 43 λεπτά. Η

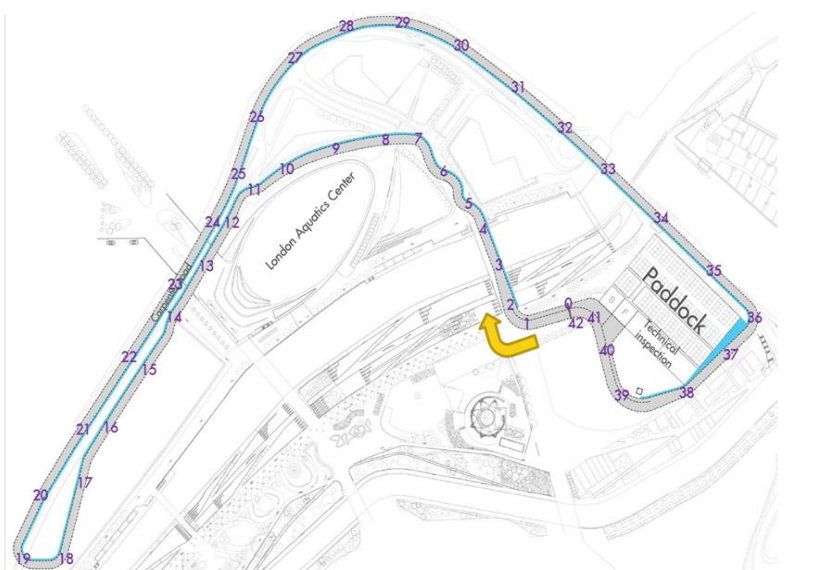
συνολική διαδρομή υποδιαιρείται σε 8 γύρους απόστασης 2240 ο καθένας. Το μέσο πλάτος της διαδρομής είναι αρκετά μεγάλο και ίσο με 7,5 μέτρα, μειώνοντας έτσι την χρήση απότομων χειρισμών για την οδήγηση του οχήματος στη διάρκεια της πίστας, μειώνοντας ταυτόχρονα και την ανάγκη απότομης αλλαγής της ροπής του κινητήρα.

TRACK MAP LONDON 2016 : ELEVATION



Σχήμα 3.2 : Υψομετρική διαφορά σημείων της πίστας^[26]

Το μεγαλύτερο εμπόδιο το οποίο θα συναντηθεί είναι προς το τέλος της πίστας, αμέσως μετά από τη στροφή των σημείων 27 με 30 του σχήματος (3.3). Το εμπόδιο αυτό αποτελεί τη μεγαλύτερη υψομετρική διαφορά, μια συνεχόμενη ανηφόρα για 223 μέτρα, η οποία παρουσιάζεται στα σημεία 29 με 32 της διαδρομής. Στο σχήμα (3.2), αναδεικνύεται η υψομετρική διαμόρφωση της πίστας και στο σχήμα (3.3) απεικονίζεται το αριθμημένο σχέδιο αυτής.



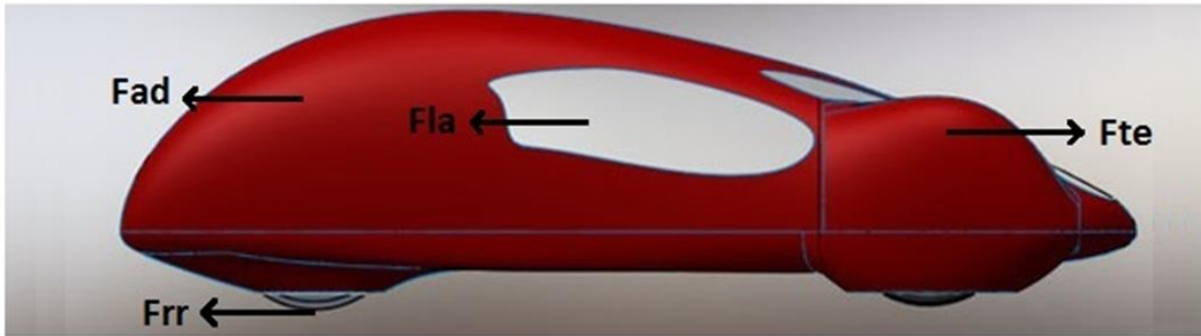
Σχήμα 3.3 : Αριθμημένη διαδρομή αγώνα^[26]

Το όχημα στη διάρκεια του αγώνα θα αντιμετωπίσει δύο ειδών απώλειες λόγω της ταχύτητας. Η πρώτη είναι η αντίσταση του αέρα, η οποία είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας και η δεύτερη είναι η τριβή ολίσθησης στα ελαστικά. Για να μειωθούν αυτές, το όχημα θα πρέπει να κινείται με την ελάχιστη ταχύτητα η οποία θα επιτρέψει την ολοκλήρωση του αγώνα στον απαιτούμενο χρόνο. Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψιν η χρονική διάρκεια επιτάχυνσης κατά την εκκίνηση, η οποία θα πρέπει να είναι ελάχιστη για την αποφυγή των μεταβατικών φαινομένων στον κινητήρα. Με δεδομένη αυτήν την πολιτική εξοικονόμησης καυσίμου, θα γίνει και ο σχεδιασμός του κινητήρα.

3.2 Υπολογισμός ασκούμενων δυνάμεων στο αμάξωμα

Για τον υπολογισμό της απαιτούμενης δύναμης F_{te} για την κίνηση του οχήματος, πρέπει πρώτα να βρεθούν και να υπολογιστούν όλες οι ασκούμενες δυνάμεις. Στο σχήμα (3.4) παρουσιάζεται το αμάξωμα του Πυρφόρου-II και οι ασκούμενες σε αυτό δυνάμεις. Αυτές είναι:

1. F_{ad} = οπισθέλκουσα δύναμη λόγω αεροδυναμικών τριβών^{[6][9]}
2. F_{la} = δύναμη ευθύγραμμης επιτάχυνσης
3. F_{rr} = δύναμη οφειλούμενη στην αντίσταση κύλισης



Σχήμα 3.4 : Ασκούμενες δυνάμεις στο αμάξι του Πυρφόρου-II

Η συνολική δύναμη F_{te} , η οποία απαιτείται τελικώς για την κίνηση του αυτοκινήτου, υπολογίζεται ως το άθροισμα των τριών προαναφερθέντων δυνάμεων:

$$F_{te} = F_{ad} + F_{la} + F_{rr} \quad (3.1)$$

3.2.1 Δύναμη ευθύγραμμης επιτάχυνσης F_{la}

Ο υπολογισμός της δύναμης ευθύγραμμης επιτάχυνσης, θα πραγματοποιηθεί για δύο ξεχωριστές στιγμές του αγώνα. Η πρώτη, είναι κατά την εκκίνηση του αγώνα, όπου απαιτείται δύναμη, ώστε το όχημα να αποκτήσει συγκεκριμένη ταχύτητα η οποία θα οριστεί από τις απαιτήσεις ολοκλήρωσης της πίστας μέσα στον ορισμένο χρόνο. Η δεύτερη είναι όταν το αυτοκίνητο θα βρίσκεται στην ανηφόρα, όπου η βαρυτική δύναμη θα παίξει ουσιαστικό ρόλο. Χρησιμοποιώντας τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, προκύπτει η σχέση (3.2):

$$F_{la} = m * a \quad (3.2)$$

όπου m , είναι η μάζα του οχήματος μαζί με τη μάζα του οδηγού και a η επιτάχυνση του οχήματος. Το βάρος του οχήματος ανέρχεται στα 30kg και μαζί με τον οδηγό, η συνολική μάζα θα ανέρχεται στα 100Kg.

Με βάση το πλάνο που έχει δημιουργηθεί για τον αγώνα, τέθηκε σαν προδιαγραφή, η επίτευξη της ονομαστικής ταχύτητας του οχήματος η οποία είναι τα $25 \frac{km}{h}$, σε χρόνο 30s. Η ταχύτητα αυτή προέκυψε από τον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας που χρειάζεται για την κάλυψη του συνολικού μήκους της διαδρομής στο χρόνο που έχει τεθεί από τη διοργάνωση. Αυτή η επιλογή, βοηθάει στην μείωση των απαιτήσεων για επίδοση του κινητήρα, άρα και την μείωση του βάρους του, κάτι πολύ σημαντικό για τον κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, λόγω του αναμενόμενου υψηλού του βάρους. Με βάση την απαίτηση αυτή, η επιτάχυνση για την εκκίνηση του οχήματος, υπολογίζεται ως εξής :

$$\alpha = \frac{25 \frac{km}{h} - 0 \frac{km}{h}}{30 s} = \frac{6,94 \frac{m}{s}}{30 s} = 0,23 \frac{m}{s^2} \quad (3.3)$$

Στην δεύτερη περίπτωση υπολογισμού της δύναμης ευθύγραμμης επιτάχυνσης, παίρνουμε σαν δεδομένο, ότι το όχημα την στιγμή πριν την ανηφόρα, θα έχει αποκτήσει μια ταχύτητα ίση με $40 \frac{km}{h}$, με την βοήθεια της κατηφορικής κλίσης η οποία εμφανίζεται ανάμεσα στα σημεία 20 και 29 του σχήματος 3.3, και θέλουμε στο τέλος της ανηφόρας να έχει ταχύτητα $10 \frac{km}{h}$. Επομένως, έχουμε :

$$\alpha = \frac{10 \frac{km}{h} - 40 \frac{km}{h}}{32s} = -0,26 \frac{m}{s^2} \quad (3.4)$$

Τα 32s, προέκυψαν από την διαίρεση της απόστασης της ανηφόρας, η οποία είναι ίση με 223 μέτρα, με τη μέση ταχύτητα η οποία είναι $25 \frac{km}{h}$ ή $6,94 \frac{m}{s}$.

Τελικά έχουμε για τις δύο διαφορετικές στιγμές, από την μία την εκκίνηση και από την άλλη την ανηφόρα τις εξής τιμές για τη δύναμη ευθύγραμμης επιτάχυνσης:

1. Για την εκκίνηση : $F_{la} = 100kg * 0,23 \frac{m}{s^2} = 23 N$
2. Για την ανηφόρα : $F_{la} = 100kg * \left(-0,26 \frac{m}{s^2}\right) = -26 N$

3.2.2 Δύναμη αντίστασης κύλισης F_{rr}

Η δύναμη αντίστασης κύλισης, οφείλεται κυρίως στην τριβή μεταξύ των ελαστικών του οχήματος και του οδοστρώματος. Η αντίσταση κύλισης, είναι ανάλογη του αθροίσματος του βάρους του αμαξώματος και του οδηγού, και ανεξάρτητη της ταχύτητας. Για την εύρεση της, χρησιμοποιήθηκε ο τύπος:

$$F_{rr} = \mu_{rr} * m * g \quad (3.5)$$

όπου g , είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και ίση με $9,78 \frac{m}{s^2}$, m , είναι η συνολική μάζα αμαξώματος και οδηγού (δηλαδή 100 Kg) και τέλος, όπου μ_{rr} , είναι ο συντελεστής αντίστασης κύλισης, ο οποίος επηρεάζεται κυρίως από την πίεση και από τον τύπο των ελαστικών. Οι τυπικές τιμές του συντελεστή αυτού, κυμαίνονται μεταξύ 0,015 (για συμβατικά υλικά) και 0,005 (για λάστιχα ειδικού τύπου). Η τιμή που χρησιμοποιήθηκε είναι 0,005, καθώς ο Πυρφόρος-II φέρει πάνω του λάστιχα ειδικού τύπου για την μείωση της τριβής επομένως και τη μείωση της απαίτησης ροπής από τον κινητήρα. Τελικά, η δύναμη αντίστασης κύλισης υπολογίζεται από την εξίσωση (3.6):

$$F_{rr} = 0,005 * 100Kg * 9,78 \frac{m}{s^2} = 4,9 N \quad (3.6)$$

3.2.3 Οπισθέλκουσα δύναμη F_{ad}

Η οπισθέλκουσα δύναμη, οφείλεται κατά κύριο λόγο στις τριβές του οχήματος με τον αέρα. Η δύναμη αυτή είναι ανάλογη της μετωπικής επιφάνειας του οχήματος, με οποιαδήποτε προεξοχή στο σχεδιασμό του οχήματος να επηρεάζει σημαντικά την τελική τιμή της, καθώς και του τετραγώνου της ταχύτητας. Ο τύπος ο οποίος χρησιμοποιείται, είναι:

$$F_{ad} = \frac{1}{2} * \rho_{ad} * A_{ad} * v^2 * C_d \quad (3.7)$$

όπου v , είναι η ταχύτητα του οχήματος. Ο όρος C_d , είναι ο συντελεστής οπισθέλκουσας δύναμης, ο οποίος υπολογίζεται μέσω της τοποθέτησης του αμαξώματος σε θάλαμο αεροδυναμικού ελέγχου, επειδή όμως αυτή η μέθοδος υπολογισμού δεν είναι διαθέσιμη, η τιμή η οποία επιλέχθηκε είναι 0,4. Όσο είναι δηλαδή και σε ένα συμβατικό αμάξι. Φυσικά, ο συντελεστής αυτός είναι αρκετά μεγαλύτερος από τον πραγματικό, αλλά η επιλογή αυτή προσφέρει αρκετή ασφάλεια, στην προσπάθειά μας να υπολογίσουμε την ελάχιστη επίδοση που θα χρειαστεί από τον κινητήρα. Ο όρος ρ_{ad} , απευθύνεται στην πυκνότητα του αέρα, όπου μια τυπική τιμή στους $20^{\circ}C$ είναι $1,2 \frac{kg}{m^3}$. Τέλος, ο όρος A_{ad} συμβολίζει την μετωπική επιφάνεια του αμαξώματος, η οποία ανέρχεται στα 580000 mm^2 ή $0,58 \text{ m}^2$. Τελικά η οπισθέλκουσα δύναμη υπολογίζεται και είναι ίση με:

$$F_{ad} = \frac{1}{2} * 1,2 \frac{kg}{m^3} * 0,58 m^2 * \left(6,94 \frac{m}{s}\right)^2 * 0,4 = 6,8 N \quad (3.8)$$

3.2.4 Συνολική δύναμη πρόωσης F_{te}

Τελικά, με τον υπολογισμό των τριών ασκούμενων δυνάμεων στο όχημα, γίνεται ο υπολογισμός της απαιτούμενης δύναμης πρόωσης (F_{te}) στις δύο διαφορετικές στιγμές, κατά την εκκίνηση και κατά την ανηφόρα.

1. Για την εκκίνηση:

Κατά την εκκίνηση ασκείται η δύναμη ευθύγραμμης επιτάχυνσης (F_{la}), η δύναμη αντίστασης κύλισης (F_{rr}), η οποία θεωρείται σταθερή σε όλη την διαδρομή και η οπισθέλκουσα δύναμη (F_{ad}), η οποία εμφανίζεται μόνο κατά τη μέγιστη και την μόνιμη ταχύτητα κίνησης. Τελικά από την εξίσωση (3.9) προκύπτει ο υπολογισμός της δύναμης πρόωσης.

$$F_{te} = F_{ad} + F_{la} + F_{rr} = 6,8 N + 23 N + 4,9 N = 34,7 N \quad (3.9)$$

2. Για την ανηφόρα:

Εκτός από τις τρεις δυνάμεις που έχουν υπολογισθεί, πρέπει να λάβουμε υπόψιν στην περίπτωση της ανηφόρας και την βαρυτική δύναμη, καθώς το όχημα θα βρίσκεται σε κεκλιμένο επίπεδο και η δύναμη του βάρους πλέον δεν θα είναι κάθετη στην κίνηση του οχήματος.

Έχοντας σαν δεδομένο ότι το μήκος της ανηφόρας του εν λόγω κεκλιμένου επιπέδου είναι 223 m, και το ύψος του είναι περίπου 9 m, τότε έχουμε τη γωνία του κεκλιμένου επιπέδου να ισούται με :

$$\tan(\gamma) = \frac{9}{223} \quad (3.10)$$

$$\gamma = 2,3^\circ \quad (3.11)$$

Έχοντας βρει πλέον τη γωνία, μπορούμε να υπολογίσουμε την βαρυτική δύναμη, η οποία θα είναι παράλληλη στην διεύθυνση της κίνησης ίση με:

$$F_b = m * g * \sin(\gamma) = 39 N \quad (3.12)$$

όπου m είναι η μάζα του αμαξώματος μαζί με τον οδηγό και ίση με 100 kg, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και ίση με $9,78 \frac{m}{s^2}$ και γ η γωνία του κεκλιμένου επιπέδου.

Τελικά ο υπολογισμός της συνολικής απαιτούμενης δύναμης πρόωσης την στιγμή που το όχημα θα βρίσκεται στο κεκλιμένο επίπεδο, προκύπτει από την εξίσωση (3.13).

$$F_{te} = F_{ad} + F_{la} + F_{rr} + F_b = 6,8N - 26N + 4,9N + 39N = 24,7N \quad (3.13)$$

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές αυτές είναι ενδεικτικές και σε καμία περίπτωση πλήρως ακριβείς. Σκοπός τους είναι, να μας δώσουν μια ένδειξη της επίδοσης που απαιτείται από τον κινητήρα. Επίσης, καλό είναι να λάβουμε υπόψιν μας, ότι οι δυνάμεις αυτές δεν ασκούνται όλη την ώρα στο όχημα. Σε όλη την διαδρομή ασκείται η δύναμη αντίστασης κύλισης (F_{rr}). Η οπισθέλκουσα δύναμη (F_{ad}) ασκείται μόνο κατά την μέγιστη και μόνιμη ταχύτητα, και η βαρυτική δύναμη (F_b) μόνο στην ανηφόρα.

Έχοντας πλέον υπολογιστεί οι απαραίτητες δυνάμεις πρόωσης στα πιο απαιτητικά σημεία του αγώνα, επιλέχθηκε η δύναμη η οποία είναι μεγαλύτερη. Τελικά την μέγιστη απαιτούμενη ροπή από τον κινητήρα θα την ορίσει η δύναμη πρόωσης κατά την εκκίνηση, η οποία είναι ίση με 34,7 Nm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

4.1 Σύστημα κίνησης

Το σύστημα κίνησης του Πυρφόρου-II βασίζεται σε ένα κινητήρα τροχό, ο οποίος βρίσκεται στο πίσω μέρος του οχήματος. Ο στάτης του κινητήρα θα βρίσκεται στερεωμένος πάνω στο σασί του αμαξώματος και ο δρομέας θα είναι ένα με τον πίσω τροχό.

Έχοντας υπολογίσει την μέγιστη απαιτούμενη δύναμη πρόωσης, η οποία εμφανίζεται κατά την εκκίνηση του αγώνα, όπου το όχημα θα επιταχυνθεί ώστε να φτάσει την ταχύτητα των $25 \frac{km}{h}$. Με δεδομένο ότι η ακτίνα του τροχού μαζί με το ελαστικό είναι 239mm, μπορεί να υπολογιστεί η απαιτούμενη ροπή που θα πρέπει να αποδίδει ο κινητήρας, ως εξής:

$$T_{max} = F_{te,max} * r_{wheel} = 34,7 N * 0,239 m = 8,3 N * m \quad (4.1)$$

όπου $F_{te, max}$ είναι η δύναμη πρόωσης στην εκκίνηση και r_{wheel} η ακτίνα του τροχού του οχήματος.

Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, η οποία θα είναι και η μεγαλύτερη σε διάρκεια κατάσταση, η απαιτούμενη δύναμη είναι $F_{mean} = 8,9 N$. Άρα μπορούμε, να υπολογίσουμε τη μέση απαιτούμενη ροπή, από τον κινητήρα ως εξής:

$$T_{mean} = F_{mean} * r_{wheel} = 8,9 N * 0,239 m = 2,2 N * m \quad (4.2)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω αποτελέσματα, ο κινητήρας θα πρέπει να αποδίδει τουλάχιστον, ροπή ίση με 8,3N. Όμως λόγω της μη ακρίβειας, της μεθόδου, που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό των δυνάμεων και κατ' επέκταση των ροπών, πρέπει να τεθεί σαν απαιτούμενη μέγιστη ροπή, για τον προς σχεδίαση κινητήρα, ροπή ίση με 10,5 N, έτσι ώστε να βρισκόμαστε σε μια πιο ασφαλή ζώνη τιμών.

4.2 Διαστασιολόγηση μηχανών

Πριν πραγματοποιηθεί η διαστασιολόγηση των δύο διαφορετικών τύπων κινητήρα, υπάρχουν κάποια μεγέθη που πρέπει να υπολογισθούν, καθώς θα χρησιμοποιηθούν στην πορεία. Η μέση ταχύτητα, έχει προκύψει από τη διαίρεση της συνολικής απόστασης με το απαιτούμενο χρόνο ολοκλήρωσης αυτής, και είναι ίση με:

$$v_{mean} = 25 \frac{Km}{h} = 6,94 \frac{m}{s} \quad (4.3)$$

Επίσης, η ακτίνα του τροχού μαζί με το ελαστικό, έχει μετρηθεί και είναι ίση με:

$$r_{wheel} = 0,239 \text{ m} \quad (4.4)$$

Η μέση γωνιακή ταχύτητα του τροχού του οχήματος (ω_{mean}) είναι ίση με το λόγο της μέσης ταχύτητας (v_{mean}) και της ακτίνας του τροχού, όπως φαίνεται στη σχέση (4.5):

$$\omega_{mean} = \frac{v_{mean}}{r} = 29,1 \frac{r}{s} \quad (4.5)$$

Επιπροσθέτως, πρέπει να υπολογισθούν οι ονομαστικές στροφές (n_{mean}) του κινητήρα, οι οποίες είναι ανάλογες της μέσης γωνιακής ταχύτητας (ω_{mean}) του τροχού και ίσες με:

$$n_{mean} = \frac{\omega_{mean} * 60}{2 * \pi} = 278 \text{ rpm} \quad (4.6)$$

Τέλος, θα χρειαστεί στην πορεία η απαιτούμενη ισχύς του κινητήρα η οποία είναι ανάλογη με την απαιτούμενη ροπή (T_{el}) και τη γωνιακή ταχύτητα (ω):

$$P_{el} = T_{el} * \omega = 10,5 \text{ Nm} * 29,1 \frac{r}{s} = 306 \text{ W} \quad (4.7)$$

4.2.1.1 Διαστασιολόγηση επιφάνειας διακένου μηχανής μόνιμων μαγνητών

Ένα από τα βασικά μεγέθη σχεδίασης είναι η επιφάνεια του διακένου. Για τον υπολογισμό της, θα χρειαστούν η ειδική μαγνητική φόρτιση του κινητήρα \bar{B} και οι δύο συνιστώσες της, η εφαπτομενική (\bar{B}_t) και η ακτινική συνιστώσα (\bar{B}_n), η εφαπτομενική πίεση διακένου P_t και η απαιτούμενη αποδιδόμενη ροπή του κινητήρα T_{el} .

Ειδική μαγνητική φόρτιση

Η ειδική μαγνητική φόρτιση, \bar{B} , συνδέει τη μαγνητική ροή με τους πόλους της μηχανής, μέσω του τύπου:

$$\bar{B} = \frac{P * \Phi}{\pi * L * D} \quad (4.8)$$

όπου P είναι ο αριθμός των πόλων, Φ είναι η μαγνητική ροή ανά πόλο, L το ενεργό μήκος της μηχανής και D η διάμετρος του διακένου της μηχανής.

Η τιμή της ειδικής μαγνητικής φόρτισης, παίρνει τιμές από 0,5 T μέχρι το άνω όριο το οποίο το ορίζει το φαινόμενο του κορεσμού του σιδηρομαγνητικού υλικού. Υψηλές τιμές στην τιμή αυτή, σημαίνει αυξημένη παραγωγή ροπής, με αντίτιμο την αύξηση των απωλειών πυρήνα.

Προσδιορισμός της επιφάνειας διακένου

Για τον υπολογισμό της επιφάνειας διακένου θα χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις (4.9),(4.10) και (4.11), οι οποίες συνδέουν την ροπή του κινητήρα με την εφραπτομενική πίεση των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο.

$$F_t = P_t * A \quad (4.9)$$

$$T_e = \frac{1}{2} * D * F_t \quad (4.10)$$

$$T_e = \frac{\pi}{2} * D^2 * L * P_t \quad (4.11)$$

όπου F_t είναι η δύναμη του διακένου, P_t είναι η εφραπτομενική πίεση στο διάκενο, T_e είναι η ροπή διακένου, D είναι η διάμετρος διακένου και L είναι το ενεργό μήκος της μηχανής.

Η δύναμη διακένου δύναται επίσης μέσω της σχέσης:

$$F_t = L * \oint_c B_n * H_t * dc \Rightarrow F_t = \frac{L}{\mu_0} * \oint_c B_n * B_t * dc \quad (4.12)$$

Τελικά προκύπτει:

$$P_t = \frac{1}{\pi * D * \mu_0} * \oint_c B_n * B_t * dc \quad (4.13)$$

Η μέση μαγνητική φόρτιση λαμβάνεται στο διάκενο $\bar{B} = 0,5 T$, εφόσον πρόκειται για εφαρμογή υψηλής απόδοσης. Θεωρώντας γωνία μεταξύ της ακτινικής συνιστώσας και της εφραπτομενικής, τις 45°. Έχουμε:

$$B_n = B_t = B * \sin\theta = 0.354 \quad (4.14)$$

Άρα η εξίσωση (4.13) σε συνδυασμό με τις παραπάνω εξισώσεις, γίνεται:

$$P_t = \frac{B_t * B_n * \pi * D}{\pi * D * \mu_0} = \frac{0,354^2}{4 * \pi * 10^{-7}} = 100 \frac{kN}{m^2} \quad (4.15)$$

Και αντικαθιστώντας στον τύπο (4.11) έχουμε:

$$D^2 * L = \frac{2 * T_{el}}{\pi * P_t} = 66845 \text{ mm}^3 \quad (4.16)$$

Από την παραπάνω σχέση, σε συνδυασμό με τους περιορισμούς τους οποίους θέτουν οι διαστάσεις του τροχού, και λαμβάνοντας υπόψιν τις ήδη υπάρχουσες διαμορφώσεις, μπορούμε να εξάγουμε τις διαστάσεις της επιφάνειας διακένου και το ενεργό μήκος μηχανής. Η διαστασιολόγηση του διακένου της ηλεκτρικής μηχανής εμπλέκει θέματα επίδοσης, απόδοσης και μηχανικής αντοχής. Από άποψη αύξησης της ισχύος της μηχανής θα προτιμηθούν δισκοειδείς μηχανές καθώς η ισχύς της μηχανής είναι ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου του διακένου. Όμως θα πρέπει να δοθεί προσοχή και στο ενεργό μήκος της μηχανής, καθώς αν υπάρχει μεγάλη αναλογία ανάμεσα στη διάμετρο και το ενεργό μήκος τότε αυξάνεται το ποσοστό του τυλίγματος το οποίο δεν θα βρίσκεται στην ενεργή περιοχή του πυρήνα, λόγω της αύξησης των άκρων των τυλιγμάτων, οπότε θα αυξηθούν αισθητά οι θερμικές απώλειες. Επίσης, μεγάλο ενεργό μήκος μηχανής σημαίνει και αυξημένες απώλειες πυρήνα καθώς αυξάνεται αισθητά ο όγκος του σιδήρου, κάτι το οποίο έχει μεγάλες επιπτώσεις στις μηχανές επιφανειακών μόνιμων μαγνητών καθώς ακόμα και στο χαμηλό φορτίο, όπου μειώνονται οι απώλειες χαλκού λόγω μείωσης του ρεύματος γραμμής, υπάρχει ένα συνεχώς επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο από τους μαγνήτες το οποίο δημιουργεί αναπόφευκτες απώλειες πυρήνα. Όλοι οι παραπάνω λόγοι σε συνδυασμό με τον περιορισμό του τροχού οδήγησαν σε μια ισορροπημένη αναλογία διαμέτρου διακένου και ενεργού μήκους. Οι τελικές τιμές της προκαταρκτικής σχεδίασης για το ενεργό μήκος και τη διάμετρο διακένου φαίνονται στις εξισώσεις (4.17) και (4.18) αντίστοιχα.

$$L = 40 \text{ mm} \quad (4.17)$$

$$D = 130 \text{ mm} \quad (4.18)$$

4.2.1.2 Διαστασιολόγηση επιφάνειας διακένου μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης.

Η ισχύς της μηχανής μεταβλητής αντίστασης είναι ανάλογη με το τετράγωνο της διαμέτρου του διακένου, όπως φαίνεται και στην εξίσωση (4.19). Αυτή η αναλογία θα αποτελέσει βασικό ρόλο για τη επιλογή των τιμών της διαμέτρου του διακένου και του ενεργού μήκους της μηχανής.^[10]

$$P_{el} = k_e * k_d * k_1 * k_2 * \bar{B} * A_s * D^2 * L * N_r \quad (4.19)$$

όπου ο συντελεστής k_e συμβολίζει την απόδοση μηχανής, ο συντελεστής k_1 είναι ίσος με $\frac{\pi^2}{120}$, ο συντελεστής k_2 είναι ίσος με $1 - \frac{1}{\sigma_u * \sigma_s}$, η μεταβλητή \bar{B} είναι η ειδική μαγνητική φόρτιση της μηχανής, A_s είναι αντίστοιχα η ειδική ηλεκτρική φόρτιση της μηχανής, N_r η ταχύτητα του δρομέα μετρούμενη σε στροφές ανά λεπτό και τέλος ο συντελεστής k_d αποτελεί το κύκλο εργασίας μηχανής ο οποίος ισούται με:

$$k_d = \frac{\theta_i * q_p * p}{360} \quad (4.20)$$

όπου θ_i είναι η γωνία αγωγής ρεύματος, q_p είναι ο αριθμός φάσεων στάτη που άγουν ταυτόχρονα και στην περίπτωση της τριφασικής ημιτονικής τροφοδοσίας είναι ίση με 3 φάσεις, και η μεταβλητή p συμβολίζει τον αριθμό πόλων μηχανής.

Από τον τύπο (4.19), εξάγεται ο τύπος για την ροπή της μηχανής μεταβλητής αντίστασης, ο οποίος είναι ίσος με:

$$T_{el} = k_e * k_d * k_3 * k_2 * B * A_s * D^2 * L \quad (4.21)$$

όπου $k_3 = \frac{\pi}{4}$.

Ο συντελεστής k_d ο οποίος αφορά τον κύκλο εργασίας της μηχανής, για ημιτονική τριφασική τροφοδοσία παίρνει την τιμή 0,5. Η απόδοση της μηχανής απαιτείται να είσαι πάνω από 90%, άρα ο αντίστοιχος συντελεστής k_e θα πάρει την τιμή 0,9. Ο συντελεστής k_2 παίρνει τιμές από 0,65 μέχρι 0,75. Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση στις μηχανές μεταβλητής μαγνητικής

αντίστασης παίρνει τιμές από $25.000 \frac{A-\varepsilon}{m}$ μέχρι $90.000 \frac{A-\varepsilon}{m}$, για την εφαρμογή μας επιλέχθηκε η τιμή των $30000 \frac{A-\varepsilon}{m}$. Ενώ η ειδική μαγνητική φόρτιση παίρνει την τιμή $0,5 \text{ T}$.^[10]

Τελικά προκύπτει :

$$D^2 * L = \frac{10,5}{0,9 * 0,5 * \frac{\pi}{4} * 0,65 * 0,5 * 30000} = 0,00304706 \text{ m}^3 \quad (4.22)$$

Αντίστοιχα όπως και στην μηχανή μόνιμων μαγνητών η ισχύς της μηχανής αυξάνεται ανάλογα με το τετράγωνο της διαμέτρου του διακένου της μηχανής οπότε και επιλέχθηκε αρκετά μεγάλη διάμετρος. Η επιλογή αυτή επίσης προήλθε και από τον περιορισμό που θέτει η τοποθέτηση του κινητήρα στο τροχό με το όριο να είναι τα 40mm. Η επιλογή του ενεργού μήκους στα 40mm θα επιφέρει αύξηση των απωλειών πυρήνα κατά την διέγερση της μηχανής για το πλήρες φορτίο, όμως στις μηχανές μεταβλητής αντίστασης δεν υπάρχει ένα συνεχώς επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο καθώς δεν υπάρχουν μόνιμοι μαγνήτες, άρα στο χαμηλό φορτίο αναμένεται ο όγκος του σιδήρου του πυρήνα να μην συμβάλει ενεργά στις συνολικές απώλειες της μηχανής. Η τελικές τιμές ενεργού μήκους και διαμέτρου του διακένου της μηχανής μεταβλητής αντίστασης σημειώνονται στις εξισώσεις 4.21 και 4.22.

$$L = 40 \text{ mm} \quad (4.23)$$

$$D = 276 \text{ mm} \quad (4.24)$$

4.2.2 Πάχος διακένου

Όσο μικρότερο είναι το πάχος διακένου μιας μηχανής, τόσο μεγαλύτερη πυκνότητα ροπής μπορεί να επιτευχθεί, όμως είναι πολύ σημαντικό να λαμβάνουμε υπόψιν και την αξιοπιστία του κινητήρα. Έχει διαπιστωθεί εργαστηριακά ότι μία λογική τιμή που μπορεί να επιτευχθεί χωρίς την εμφάνιση μηχανικών προβλημάτων, είναι τα 0,7 mm.

4.2.3 Μελέτη στάτη

Όσον αφορά τις φάσεις και την τοπολογία τους, στις δύο μηχανές, είναι περίπου ίδιες με τη διαφορά να βρίσκεται στην μορφολογία των δοντιών και στις διαστάσεις. Έχει επιλεχθεί και στις δύο περιπτώσεις, η χρησιμοποίηση της διάταξης των 42 αυλάκων στον στάτη και 50 πόλων στον δρομέα. Άρα ισχύει ότι $p = 50$ και $q = 42$, με p να συμβολίζεται ο αριθμός των πόλων και με q ο αριθμός των αυλάκων της μηχανής.

Ηλεκτρική συχνότητα λειτουργίας

Για να βρεθεί η συχνότητα λειτουργίας των μηχανών χρησιμοποιείται ο τύπος (4.25), ο οποίος συνδέει την γωνιακή ταχύτητα του δρομέα μιας μηχανής με την ηλεκτρική συχνότητα και τους πόλους της.

$$\omega = \frac{4 \cdot \pi \cdot f_{el}}{p} \quad (4.25)$$

$$f_{el} = \frac{p \cdot \omega}{4 \cdot \pi} = 116 \text{ Hz} \quad (4.26)$$

όπου f_{el} είναι η ηλεκτρική συχνότητα, p ο αριθμός των πόλων της μηχανής και ω η γωνιακή ταχύτητα της μηχανής.

Μαγνητική ροή ανά πόλο

Για την εύρεση, της μαγνητικής ροής ανά πόλο χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (4.27) η οποία στην ουσία είναι ο λόγος του ολοκληρώματος της μέσης πυκνότητας της μαγνητικής ροής στο διάκενο με τον αριθμό των πόλων της μηχανής.

$$\Phi = \frac{B \cdot L \cdot D \cdot \pi}{p} \quad (4.27)$$

όπου B μέση πυκνότητα της μαγνητικής ροής, L το ενεργό μήκος της μηχανής, D η διάμετρος του διακένου και p οι πόλοι της μηχανής.

Για την μηχανή μόνιμων μαγνητών, αντικαθιστώντας με τις κατάλληλες τιμές που έχουν υπολογισθεί από τις εξισώσεις (4.17) και (4.18) έχουμε :

$$\Phi = \frac{0,5 \cdot 40 \cdot 130 \cdot 3,14}{50} = 0,163 \text{ mWb} \quad (4.28)$$

Για την μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, αντικαθιστώντας με τις κατάλληλες τιμές που έχουν υπολογισθεί από τις εξισώσεις (4.23) και (4.24) έχουμε :

$$\Phi = \frac{0,5 \cdot 40 \cdot 276 \cdot 3,14}{50} = 0,347 \text{ mWb} \quad (4.29)$$

Μαγνητεγερτική δύναμη

Πρώτα υπολογίζεται η ενεργός τιμή του ρεύματος, δεχόμενοι συντελεστή ισχύος $\cos\varphi = 0,8$ επαγωγικό, ισχύ μηχανής $P_{el} = 306 \text{ W}$, η οποία έχει υπολογισθεί από την εξίσωση (4.7) και $V_{rms} = 11 \text{ V}$, και για τις δύο μηχανές έχω :

$$I_{rms} = \frac{P_{el}}{3 \cdot V_{rms} \cdot \cos\varphi} = \frac{306}{3 \cdot 11 \cdot 0,8} = 11,59 \text{ A} \quad (4.30)$$

Επίσης, θα χρειαστεί ο αριθμός των σπειρών του κάθε πηνίου. Για τον υπολογισμό στη μηχανή μόνιμων μαγνητών χρησιμοποιήθηκε ο τύπος:

$$N_i = \frac{V_{rms}}{4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot \frac{p}{2}} \quad (4.31)$$

όπου $V_{rms} = 11 \text{ V}$ είναι η ενεργός τιμή της τάσης, $f = 116 \text{ Hz}$ η ηλεκτρική συχνότητα της μηχανής, η οποία έχει υπολογισθεί από την εξίσωση 4.24, $\Phi = 0,163 \text{ mWb}$ η μαγνητική ροή ανά πόλο, όπως προκύπτει από την εξίσωση 4.26 και p ο αριθμός των πόλων της μηχανής.

$$N_i = \frac{11}{4,44 \cdot 116 \cdot 0,163 \cdot 25} = 5 \quad (4.32)$$

Για την μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης θα χρησιμοποιήθηκε ο τύπος (4.33)^[10]:

$$N_l = \frac{\pi \cdot D \cdot A_s}{2 \cdot m \cdot I_{rms} \cdot \frac{p}{2}} = \frac{3,14 \cdot 0,276 \cdot 30000}{2 \cdot 3 \cdot 11,59 \cdot 25} = 15 \quad (4.33)$$

όπου D η διάμετρος διακένου από την εξίσωση 4.22, A_s η ειδική ηλεκτρική φόρτιση η οποία έχει επιλεγεί και είναι ίση με $30000 \frac{A-\varepsilon}{m}$, m ο αριθμός των φάσεων που άγουν ταυτόχρονα και ίσος με 3, I_{rms} η ενεργός τιμή του ρεύματος, ίση με 11,59 A, όπως προκύπτει από την εξίσωση 4,28 και p ο αριθμός των πόλων της μηχανής.

Η μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ) της μηχανής επιφανειακών μόνιμων μαγνητών, είναι ανάλογη του αριθμού των αμπεροτυλιγμάτων του πηνίου και της ενεργού τιμής του ρεύματος που περνάει από μέσα τους.

$$ME\Delta = I_{rms} * N_i = 11,59 A * 5 = 57,95 A - \varepsilon \quad (4.34)$$

Η μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ) της μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, είναι αντίστοιχα και αυτή ανάλογη του αριθμού των αμπεροτυλιγμάτων του πηνίου και της ενεργού τιμής του ρεύματος που περνάει από μέσα τους.

$$ME\Delta = I_{rms} * N_i = 11,59 A * 15 = 173,85 A - \varepsilon \quad (4.35)$$

Η απαραίτητη διατομή αύλακας , και στις δύο περιπτώσεις υπολογίζεται με βάση την μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ) της κάθε μηχανής και την πυκνότητα ρεύματος της αύλακας της μηχανής, όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση (4.36).

$$A = \frac{ME\Delta}{J} \quad (4.36)$$

όπου:

$$J = \text{πυκνότητα ρεύματος} = 4 \frac{A}{mm^2} \quad (4.37)$$

Για τη μηχανή μόνιμων μαγνητών η διατομή της αύλακας, με τιμή μαγνητεγερτικής δύναμης 57,95 A-ε, είναι:

$$A_q = \frac{57,95 A-\varepsilon}{4 \frac{A}{mm^2}} = 14,49 mm^2 \quad (4.38)$$

Για τη μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης η διατομή της αύλακας, με τιμή μαγνητεγερτικής δύναμης 173,85 A-ε, είναι:

$$A_q = \frac{173,85 \frac{A-\varepsilon}{mm^2}}{4} = 43,46 \text{ mm}^2 \quad (4.39)$$

Θεωρώντας, ως συντελεστή πληρότητας τις αύλακας ίσο με 0,5, καθώς η συνολική επιφάνεια της αύλακας δεν αποτελείται μόνο από χαλκό, αλλά από την απαραίτητη μόνωση η οποία θα πρέπει να υπάρχει στο καλώδιο του χαλκού και από τη σφήνα η οποία κρατάει στη θέση τους τα πηνία. Οι τελικές τιμές των επιφανειών των αυλάκων είναι :

$$A_{\mu\mu} = 28,98 \text{ mm}^2 \quad (4.40)$$

$$A_{\mu\mu\alpha} = 86,93 \text{ mm}^2 \quad (4.41)$$

Υπολογισμός ειδικών φορτίσεων

Όσο αφορά, την ειδική μαγνητική φόρτιση, έχει τεθεί και είναι ίση με:

$$\bar{B} = 0,5 \text{ T} \quad (4.42)$$

Για τη μηχανή μόνιμων μαγνητών η ειδική ηλεκτρική φόρτιση είναι:

$$A_s = \frac{3*2*N_i*\frac{P}{z}*I_{rms}}{\pi*D} = 21283 \frac{A-\varepsilon}{m} \quad (4.43)$$

Για τη μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης έχει επιλεγεί από τη αρχή η ενδεικτική τιμή $30000 \frac{A-\varepsilon}{m}$:

$$A_s = 30000 \frac{A-\varepsilon}{m} \quad (4.44)$$

4.2.5 Μελέτη δρομέα

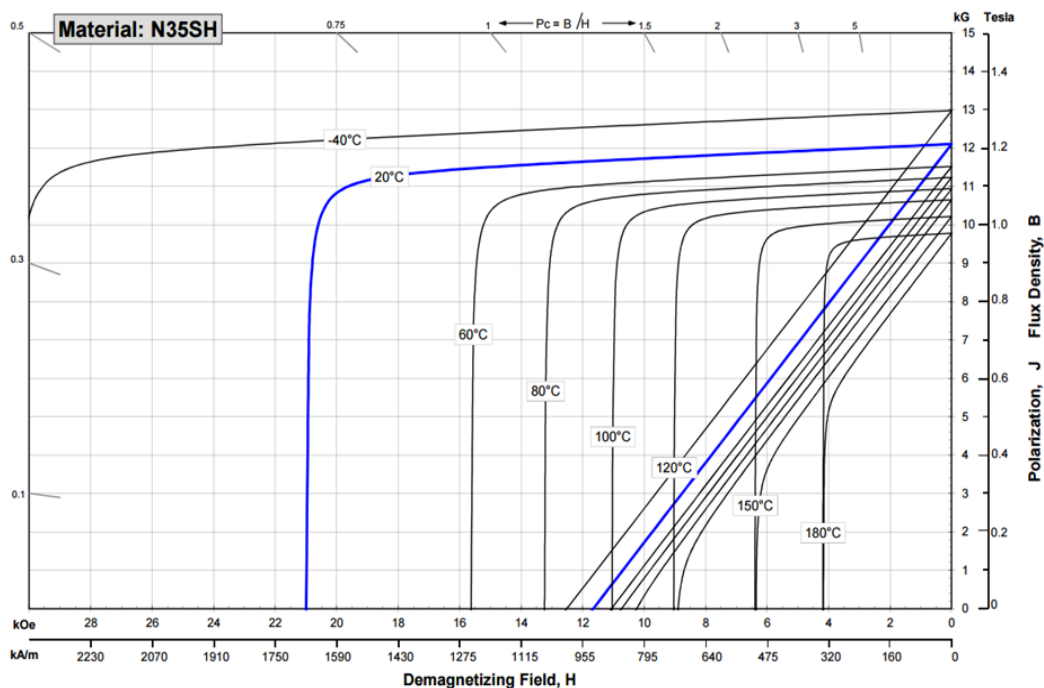
Μηχανή μόνιμων μαγνητών

Η γεωμετρική διαμόρφωση του δρομέα, καθορίζεται από την ανάγκη για χαμηλές απώλειες πυρήνα και δινορευμάτων. Επιλέγεται δρομέας επιφανειακών μαγνητών γιατί παρουσιάζει σταθερή μαγνητική επαγωγή στο σώμα του σιδηρού. Οι μαγνήτες κράματος Νεοδυμίου - Σιδήρου – Βορίου (NdFeB) επιλέγονται ως υλικό, γιατί έχουν την μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας από τις υπόλοιπες εναλλακτικές του εμπορίου. Παρουσιάζουν μέτρια θερμοκρασιακή

συμπεριφορά, αλλά στη συγκεκριμένη εφαρμογή υψηλής απόδοσης δεν αναμένονται υψηλές θερμοκρασίες.

Οι διαστάσεις, που θα επιλεγθούν για τους μαγνήτες θα πρέπει να γίνουν δίνοντας μεγάλη προσοχή στην αναλογία του πάχους του μαγνήτη και του πάχους του διακένου. Καθώς μπορεί μια μεγάλη αναλογία να αυξάνει τη μαγνητική ροή του σημείου λειτουργίας της μηχανής, προσεγγίζοντας την παραμένουσα μαγνήτιση του μαγνήτη, το μειονέκτημα είναι ότι μια τέτοια αύξηση του πάχους του μαγνήτη σε σχέση με το πάχος του διακένου, θα αυξήσει τη ροή σκέδασης μεταξύ των μαγνητών μέσω του διακένου και επίσης θα καταστήσει την μηχανή μη συμπαγή καθώς ο δρομέας θα είναι μη συμπαγής λόγω του μεγάλου πάχους των μαγνητών και επίσης θα αυξηθεί απότομα το κόστος της κατασκευής.^[24]

Η καλύτερη αξιοποίηση του μαγνήτη γίνεται όταν αυτός λειτουργεί κοντά στο σημείο μέγιστης ενέργειας στην καμπύλη απομαγνήτισης. Η καμπύλη απομαγνήτισης των μαγνητών αυτών είναι σχεδόν ευθεία γραμμή, έτσι διευκολύνεται ο υπολογισμός του σημείου που αποδίδουν τη μέγιστη ενέργεια, αρκεί να είναι γνωστά η παραμένουσα μαγνήτιση, B_r , και το μαγνητικό πεδίο επαναφοράς, H_c . Ο μαγνήτης δίνει τη μέγιστη ενέργεια όταν $B_d = 0.64$ T και $H_d = 497 \frac{kA}{m}$, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1. Αυτή θα πρέπει να είναι η πυκνότητα μαγνητικής ροής στην επιφάνεια του μαγνήτη κατά την ονομαστική λειτουργία του κινητήρα. Άρα, στο κενό φορτίο, η μαγνητική επαγωγή θα πρέπει να είναι λίγο αυξημένη, έστω $B_{nl} = 0.7$ T.



Σχήμα 4.1 : Καμπύλη απομαγνήτισης μαγνητών N35SH^[23]

Για επαλήθευση, λογαριάζεται μέσω της ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης και της εξίσωσης της καμπύλης απομαγνήτισης ποια θα είναι η επιρροή του στάτη στη μαγνητική επαγωγή του μαγνήτη. Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση, έχει υπολογιστεί και είναι ίση με: $A_s = 21283 \frac{A-\varepsilon}{m}$. Θεωρώντας την καμπύλη απομαγνήτισης ως ευθεία γραμμή, η εξίσωση που προκύπτει είναι:

$$H_B = \frac{929.3}{1.28} * B - 929.3 = 726 * B - 929.3 \quad (4.43)$$

όπου H σε $\frac{kA}{m}$ και B σε Tesla. Με χρήση της παραπάνω εξίσωσης και με βάση την ειδική ηλεκτρική φόρτιση, συμπεραίνεται ότι στην ονομαστική φόρτιση η πυκνότητα μαγνητικής ροής στην επιφάνεια του μαγνήτη μειώνεται κατά:

$$\Delta B = \frac{ac}{726} = 0,029 \quad (4.44)$$

Επομένως σε κάθε περίπτωση, ο μαγνήτης χρησιμοποιείται κοντά στο σημείο μέγιστης ενέργειας, καθώς δεν υπάρχει μεγάλη απόκλιση, από την τιμή που παίρνει η μαγνητική πυκνότητα, όταν ο μαγνήτης αποδίδει τη μέγιστη ενέργεια.

Μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Στις μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, υπάρχει διαφοροποίηση της κατασκευής του δρομέα. Στο δρομέα των μηχανών αυτών δεν υπάρχει μέσο το οποίο να δημιουργεί κάποιο μαγνητικό πεδίο. Η λειτουργία τους στηρίζεται στην μεταβλητή μαγνητική αντίσταση που συναντάει η μαγνητική ροή κατά την περιστροφή του δρομέα. Η οδήγηση γίνεται πρακτικά, μέσω του ελέγχου της θέσης του δρομέα και ανάλογης διέγερσης των φάσεων για την δημιουργία ροπής, της οποίας στόχος είναι να μειώσει την μαγνητική αντίσταση την οποία συναντάει η παραγόμενη μαγνητική ροή.

Η γεωμετρική διαμόρφωση του δρομέα, για την μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, μπορεί να έχει δύο υλοποιήσεις. Η πρώτη είναι, ο δρομέας να είναι φτιαγμένος, από το ίδιο υλικό που είναι και ο πυρήνας της μηχανής, δηλαδή σίδηρο και οι πόλοι του δρομέα να είναι τα δόντια τα οποία θα εξέχουν ανά πολικό βήμα^{[10][11]}. Η δεύτερη επιλογή, η οποία και προτιμήθηκε, είναι το σώμα του δρομέα να είναι φτιαγμένο από αλουμίνιο και ανά πολικό βήμα να υπάρχουν τμήματα σιδήρου, όπως στις μηχανές μόνιμων μαγνητών υπάρχουν επιφανειακοί μαγνήτες στο δρομέα.

Η επιλεγμένη διαμόρφωση έχει μεγάλες ομοιότητες με αυτή του δρομέα της μηχανής επιφανειακών μόνιμων μαγνητών, με τη διαφορά ότι όπου υπάρχουν μαγνήτες στη μηχανή μόνιμων μαγνητών αντικαθίστανται από κομμάτια σιδήρου. Η διαμόρφωση αυτή έχει κάποια πλεονεκτήματα, όπως είναι το μειωμένο βάρος καθώς και οι μειωμένες απώλειες λόγω αισθητά μικρότερης επιφάνειας σιδήρου. Έκτος από αυτά, η χρησιμοποίηση τμημάτων σιδήρου στο δρομέα και όχι η χρησιμοποίηση ενός δρομέα φτιαγμένου εξολοκλήρου από σίδηρο, συμβάλει στην αύξηση της ροπής, καθώς και στην καλύτερη αξιοποίηση υλικού^{[12][13][14]}. Όσο αφορά τη μορφολογία των κομματιών αυτών, καθώς και τα κριτήρια με βάση τα οποία έγινε η επιλογή της μορφολογίας τους, θα αναπτυχθούν σε επόμενη ενότητα.

4.3 Επιλογή τυλίγματος μηχανής

Οι κινητήρες μόνιμων μαγνητών με συγκεντρωμένα μη επικαλυπτόμενα τυλίγματα κλασματικού βήματος, παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους κινητήρες κατανεμημένου τυλίγματος πλήρους βήματος. Τέτοια πλεονεκτήματα είναι τα πιο κοντά άκρα τυλίγματος, η μείωση των αρμονικών συνιστωσών, η χαμηλή ροπή ευθυγράμμισης, η ημιτονοειδής ηλεκτρεγερτική δύναμη, η επίτευξη μεγαλύτερου συντελεστή πληρότητας και η κατασκευαστική ευκολία. Για τους παραπάνω λόγους έχει επιλεγεί η χρησιμοποίηση συγκεντρωμένου τυλίγματος κλασματικού βήματος και στις δύο μηχανές ώστε να αποφευχθεί και η τοπολογία των πεπλατυσμένων δοντιών του στάτη.

Έπειτα υπάρχει η επιλογή του αριθμού των στρώσεων του τυλίγματος. Τα δύο είδη είναι, τα τυλίγματα μονής στρώσης, στα οποία τα πηνία τυλίγονται γύρω από εναλλασσόμενα δόντια, καθώς και τα τυλίγματα διπλής στρώσης όπου τα πηνία τυλίγονται γύρω από κάθε δόντι. Στον πίνακα (4.1) συγκρίνονται οι δύο τύποι τυλίγματος.

Πίνακας 4.1: Σύγκριση χαρακτηριστικών τυλίγματος μονής και διπλής στρώσης^[24]

	Τύλιγμα μονής στρώσης	Τύλιγμα διπλής στρώσης
Θεμελιώδης συντελεστής τυλίγματος	υψηλότερος	χαμηλότερος
Άκρα τυλίγματος	μακρύτερα	κοντύτερα
Συντελεστής πληρότητας αύλακας	υψηλότερος	χαμηλότερος
Αυτεπαγωγές	υψηλότερες	χαμηλότερες
Αμοιβαίες επαγωγές	χαμηλότερες	υψηλότερες
Ηλεκτρεγερτική δύναμη (EMF)	πιο τραπεζοειδής	πιο ημιτονοειδής
Αρμονικό περιεχόμενο (MMF)	υψηλότερος	χαμηλότερος
Απώλειες δινορευμάτων μόνιμου μαγνήτη	υψηλότερες	χαμηλότερες
Δυνατότητα παροχής ροπής σε υπερφόρτιση	υψηλότερη	χαμηλότερη

Εξαιτίας της επιλογής, να σχεδιαστούν κινητήρες με μεγάλο αριθμό αυλάκων και πόλων, η χρησιμοποίηση τυλίγματος διπλής στρώσης καθίσταται πολύ δύσκολη, καθώς μειώνεται αισθητά ο χώρος στην αύλακα. Επομένως στην σχεδίαση των κινητήρων θα χρησιμοποιηθεί τύλιγμα μονής στρώσης. Το τύλιγμα αυτό παρά το υψηλότερο αρμονικό περιεχόμενο το οποίο παρουσιάζει, παρέχει ταυτόχρονα και υψηλότερες αυτεπαγωγές, κάτι το οποίο είναι αναγκαία

προϋπόθεση για την υψηλότερη απόδοση της μηχανής μεταβλητής αντίστασης, καθώς η ροπή της εξαρτάται από την διαφορά της επαγωγής των θέσεων μέγιστης και ελάχιστης μαγνητικής ροής, του δρομέα.

Για τη σχεδίαση των κινητήρων, επιλέχθηκε η χρησιμοποίηση κλασματικού βήματος τυλίγματος, καθώς οι μηχανές με συγκεντρωμένα με επικαλυπτόμενα τυλίγματα κλασματικού βήματος παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους κινητήρες πλήρους βήματος. Τέτοια πλεονεκτήματα είναι τα πιο κοντά άκρα τυλίγματος, η χαμηλή ροπή ευθυγράμμισης, η ημιτονοειδής ηλεκτρεγερτική δύναμη, η επίτευξη μεγαλύτερου συντελεστή πληρότητας και η κατασκευαστική ευκολία. Οι μηχανές βέβαια, με κλασματικό βήμα μονής στρώσης, έχουν υψηλές αρμονικές χώρου στην κατανομή της μαγνητεγερτικής δύναμης (ΜΕΔ) λόγω του μικρού αριθμού αυλάκων ανά πόλο και φάση. Αυτές οι αρμονικές προσθέτουν απώλειες λόγω δινορευμάτων στον πυρήνα. Αυτό όμως στην συγκεκριμένη σχεδίαση μηχανών περιορίζεται αισθητά, όπως και θα φανεί στα παρακάτω κεφάλαια, λόγω της επιλογής μεγάλου αριθμού αυλάκων της μηχανής.

Οι κινητήρες μόνιμων μαγνητών, έχουν συγκεκριμένους συνδυασμούς πόλων και αυλάκων οι οποίοι επιτυγχάνουν υψηλό συντελεστή τυλίγματος και συμμετρική τριφασική έξοδο. Στο σχήμα (4.2) φαίνονται οι συντελεστές τυλίγματος για διάφορους συνδυασμούς αυλάκων και πόλων, και οι σημειωμένες επιλογές στο σχήμα δείχνουν τον αριθμό των πόλων ο οποίος είναι 50 και τον αριθμό των αυλάκων της μηχανής ο οποίος είναι 42.

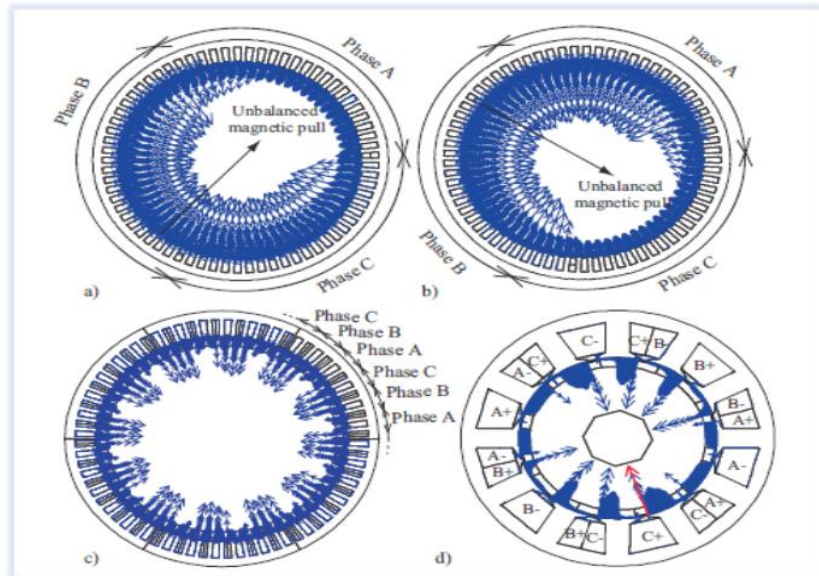
		Number of poles						
		44	46	48	50	52	54	56
Number of slots	33	0.866	0.778		0.659	0.591		0.438
	36	0.902	0.870	0.866	0.786	0.735		0.617
	39	0.936	0.917		0.863	0.866		0.740
	42	0.953	0.945		0.913	0.890		0.866
	45	0.955	0.955	0.951	0.945	0.927		0.886
	48	0.958	0.956		0.956	0.958		0.966
	51	0.933	0.944		0.955	0.955		0.944

Σχήμα 4.2 Συντελεστές τυλίγματος^[15]

Ένας παράγοντας πολύ σημαντικός που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η ασύμμετρη μαγνητική έλξη. Αυτό συμβαίνει όταν οι μαγνητικές δυνάμεις δεν είναι συμμετρικά κατανομημένες στο διάκενο, κάτι το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία θορύβου και τη δόνηση στη μηχανή κατά την λειτουργία, αυτό οφείλεται κυρίως στη δημιουργία ασκούμενης δύναμης στον άξονα της μηχανής λόγω του αθροίσματος των ασύμμετρων μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο.

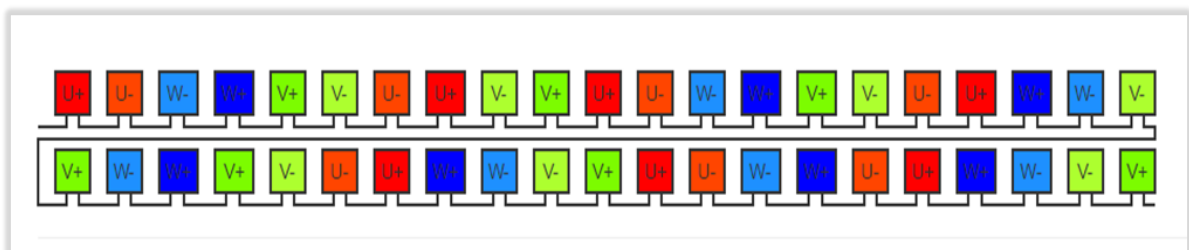
Στο σχήμα (4.3) φαίνονται τέσσερα διαφορετικά παραδείγματα κατανομής μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο. Στην τοπολογία της μηχανής που βρίσκεται πάνω αριστερά, στο σχήμα (4.3) παρατηρείται η ασύμμετρη κατανομή των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο της μηχανής, αντίστοιχο παράδειγμα δίνεται και στην τοπολογία της μηχανής, η οποία βρίσκεται

πάνω δεξιά στο σχήμα. Στις δύο αυτές περιπτώσεις το άθροισμα των δυνάμεων αυτών, έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία δύναμης η οποία καθώς θα στρέφεται το πεδίο θα στρέφεται και αυτή μαζί του δημιουργώντας θόρυβο και δόνηση στη μηχανή. Τέλος οι δύο γεωμετρικές μηχανών, οι οποίες βρίσκονται στο κάτω μέρος του σχήματος (4.3), απεικονίζουν συμμετρική κατανομή των μαγνητικών δυνάμεων, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα το άθροισμα τους είναι ίσο με μηδέν.



Σχήμα 4.3 Ασύμμετρη έλξη σε ηλεκτρικές μηχανές^[6]

Λαμβάνοντας υπόψιν, τους συντελεστές πληρότητας τυλίγματος οι οποίοι προκύπτουν από το σχήμα (4.2), και την ανάγκη δημιουργίας συμμετρικών κατανεμημένων μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο, ο συνδυασμός, αυλάκων και πόλων που επιλέχθηκε είναι αυτός των 42 αυλάκων και 50 πόλων. Ο συνδυασμός αυτός έχει αρκετά υψηλό συντελεστή πληρότητας, ίσο με 0,913. Η επιλογή αυτού του συνδυασμού αυλάκων και πόλων, προέκυψε έπειτα από σύγκριση των βασικών ηλεκτρομαγνητικών μεγεθών και για τα δύο είδη κινητήρων, με τους κινητήρες: $q = 36$ και $p = 40$, $q = 50$ και $p = 60$, $q = 18$ και $p = 50$. Από όλες αυτές τις επιλογές καλύτερη προέκυψε αυτή του συνδυασμού 42 αυλάκων και 50 πόλων.



Σχήμα 4.4 Διαμόρφωση τυλίγματος^[15]

Στο σχήμα 4.4 παρουσιάζεται η διαμόρφωση και η αλληλουχία των φάσεων στις αύλακες του δρομέα των μηχανών. Η διαμόρφωση αυτή είναι κοινή και για τους δύο τύπους κινητήρα. Τα σύμβολα (U+) και (U-) του σχήματος αντιστοιχούν στη φάση (A+) και (A-), τα σύμβολα (W+) και (W-) αντιστοιχούν στην φάση (B+) και (B-), και τέλος τα σύμβολα (V+) και (V-) αντιστοιχούν στην φάση (C+) και (C-).

και (V-) αντιστοιχούν στη φάση (C+) και (C-). Προσοχή δόθηκε ώστε κάθε ζεύγος, (A+,A-), (B+,B-) και (C+,C-), να βρίσκεται εκατέρωθεν κύριου δοντιού και όχι ενδιάμεσου, καθώς η τοπολογία του σάτη και στις δύο μηχανές θα έχει την επιλογή της δημιουργίας άνισων δοντιών. Με τον όρο άνισο δόντι εννοείται η διαφορά των κύριων και των ενδιάμεσων δοντιών τόσο σε πάχος όσο και σε διαμόρφωση πέλματος δοντιού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

5.1 Επιλογή μεταβλητών

Το πρώτο στάδιο, για τη σχεδίαση των κινητήρων, είναι η εύρεση και η επιλογή των κατάλληλων σταθερών και μεταβλητών σχεδίασης. Η επιλογή, πρέπει να γίνει με την προοπτική, ο τρόπος σχεδίασης των τοπολογιών να είναι αρκετά ευέλικτος, ώστε να μπορεί να έχει σαν εισόδους μεγάλα εύρη τιμών των μεταβλητών, για την αναπαράσταση και τη μελέτη ποικίλων γεωμετριών, οι οποίες θα παρουσιάζουν διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, βοηθώντας με αυτό τον τρόπο την καλύτερη αναζήτηση των βέλτιστων γεωμετριών.

Παρότι η προκαταρκτική σχεδίαση μας δίνει μια πρώτη εκτίμηση των διαστάσεων των μηχανών, οι διαστάσεις, που θα χρησιμοποιηθούν θα προκύψουν από αλληπάλληλες προσομοιώσεις διαφορετικών γεωμετριών για τους δύο τύπους μηχανών, μέχρι να βρεθεί η γεωμετρία, η οποία θα ικανοποιεί κάποια βασικά κριτήρια. Η γεωμετρία αυτή θα πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις, οι οποίες έχουν οριστεί ως το κατώτερο επίπεδο απόδοσης, και θα λειτουργήσει σαν βάση για την εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας της μηχανής. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 4, τόσο ο συνδυασμός των αυλάκων και των πόλων, όσο και η γεωμετρία η οποία επιλέχθηκε σαν αρχική για κάθε τύπο μηχανής, προέκυψαν μετά από έλεγχο ευαισθησίας των μηχανών στις μεταβολές των μεταβλητών σχεδίασής τους. Με το τέλος της διαδικασίας αυτής, βρέθηκαν οι σταθερές και οι μεταβλητές σχεδίασης.

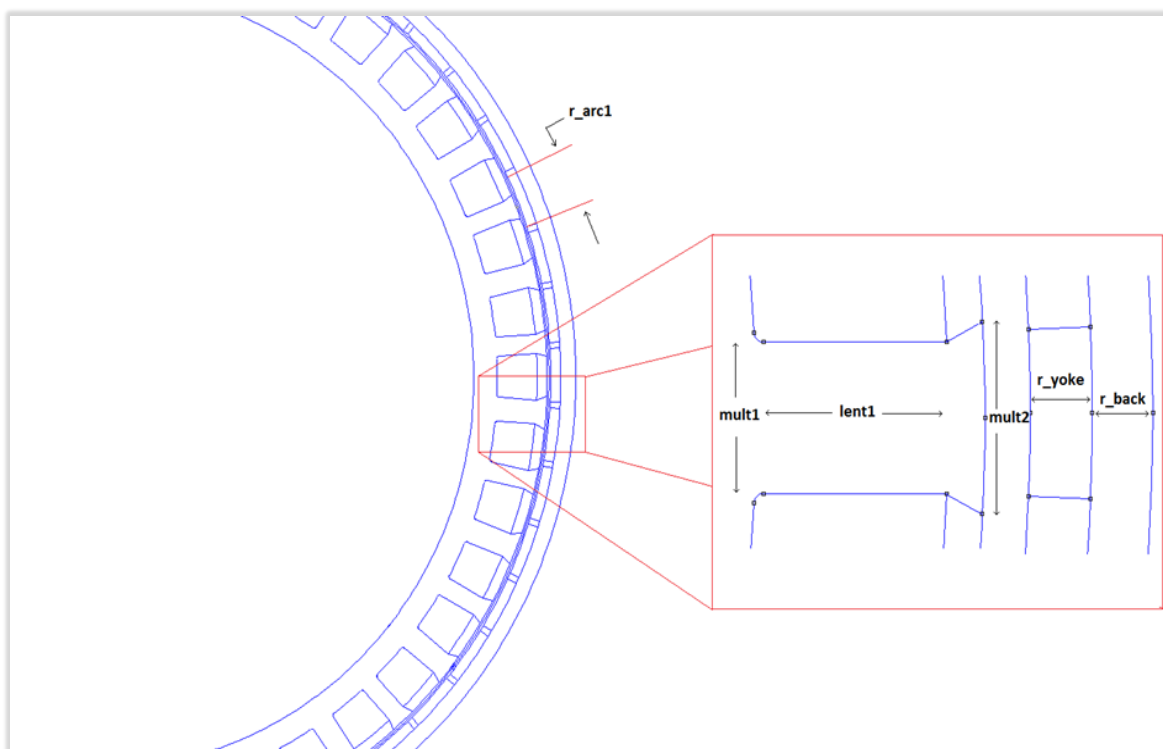
5.1.1 Μηχανή Μόνιμων Μαγνητών

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν, για τη σχεδίαση της γεωμετρίας της μηχανής μόνιμων μαγνητών, παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα (5.1).

Πίνακας 5.1: Μεταβλητές μηχανής μόνιμων μαγνητών

Μηχανή Επιφανειακών μόνιμων μαγνητών
Ενεργό μήκος μηχανής (L)
Διάμετρος διακένου (D)
Μήκος σώματος δοντιού (lent1)
Συντελεστής πάχους σώματος δοντιού (mult1)
Συντελεστής πάχους πέλματος δοντιού (mult2)
Πάχος μαγνήτη (r_yoke)
Πάχος δρομέα (r_back)
Ποσοστό γωνίας μαγνήτη επί πολικού βήματος (r_arc1)
Συντελεστής πάχους ενδιάμεσου δοντιού (tooth_prc)

Από τις πιο βασικές μεταβλητές, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα την απόδοση, το βάρος και τη ροπή του κινητήρα, είναι το ενεργό μήκος της μηχανής (L) και η διάμετρος του διακένου (D). Στο κεφάλαιο 4 έχει εξηγηθεί η σχέση της ισχύς μιας ηλεκτρικής μηχανής με το ενεργό μήκος της και με το τετράγωνο της διαμέτρου της. Οι δύο αυτές μεταβλητές δεν φαίνονται στο σχήμα (5.1). Το ενεργό μήκος είναι κάθετο στο επίπεδο του χαρτιού και η διάμετρος διακένου ισούται με το άθροισμα του πάχους του στάτη και του διακένου. Εξίσου σημαντικές μεταβλητές σχεδίασης είναι και οι υπόλοιπες του πίνακα, από τις οποίες μόνο ο συντελεστής πάχους ενδιάμεσου δοντιού ($tooth_prc$), δεν γίνεται άμεσα αντιληπτός από το σχήμα (5.1). Η μεταβολή αυτού του συντελεστή, έχει σαν αποτέλεσμα τη ρύθμιση του πάχους των ενδιάμεσων δοντιών κατά μία αναλογία του πάχους των κύριων δοντιών. Η δημιουργία άνισων δοντιών σε μία μηχανή επηρεάζει άμεσα την κυμάτωση ροπής και τη αρμονική παραμόρφωση της τάσης, καθώς διαφοροποιεί τις διαδρομές που θα ακολουθήσουν οι μαγνητικές ροές μέσω της μεταβολής της κατανομής των αυλάκων στο χώρο.



Σχήμα 5.1 Γεωμετρία κινητήρα επιφανειακών μόνιμων μαγνητών

Στο σχήμα (5.1) απεικονίζονται οι μεταβλητές σχεδίασης του κινητήρα μόνιμων μαγνητών. Οι μεταβλητές αυτές επηρεάζουν με διαφορετικούς τρόπους την τοπολογία του στάτη και του δρομέα και τα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά της μηχανής. Το μήκος του σώματος των δοντιών ($lent1$), η οποία εκτός από την μεταβολή του μήκους του δοντιού επηρεάζει με ίδιο τρόπο το μήκος της αύλακας. Αντίστοιχη επιρροή έχει και η μεταβλητή του πάχους σώματος δοντιών ($mult1$), με δεδομένο ότι μία μείωση του πάχους των δοντιών επιτρέπει την δημιουργία μεγαλύτερης επιφάνειας αύλακας. Οι δύο προαναφερθείσες μεταβλητές συνδέονται άμεσα με τη ροπή της μηχανής, τον αριθμό των σπειρωμάτων και τη διατομή των καλωδίων. Καθώς επίσης και το βάρος του κινητήρα, εφόσον μεταβάλλουν τον όγκο του σιδήρου του στάτη. Η μεταβλητή για το πάχος του πέλματος των δοντιών ($mult2$), συνδέεται άρρητα με τις μαγνητικές ροές και τις διαδρομές τις οποίες θα ακολουθήσουν. Η βέλτιστη επιλογή του πέλματος των δοντιών έχει σαν συνέπεια την μείωση της κυμάτωσης της ροπής

και του αρμονικού περιεχομένου του κινητήρα. Η μεταβλητή (r_{yoke}), του πάχους των μαγνητών θα πρέπει να λάβει μεγάλη προσοχή, καθώς μεγάλο πάχος μαγνητών θα προκαλέσει τη δημιουργία ενός μη συμπαγή δρομέα, επομένως και ενός μη συμπαγή κινητήρα. Το πάχος του σιδήρου του δρομέα (r_{back}), πρέπει να επιλεγεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μην είναι αναλογικά μικρό, σε σχέση με τις μαγνητικές ροές ώστε να μην εμφανιστούν φαινόμενα κορεσμού του σιδήρου και αύξηση των απωλειών. Τέλος, το ποσοστό γωνίας του μαγνήτη επί του πολικού βήματος (r_{arc1}), συντελεστής ο οποίος ελέγχει το ποσοστό του πολικού βήματος το οποίο θα καλύψει η επιφάνεια του μαγνήτη. Μεταβάλλοντας τη γωνία του μαγνήτη και κατ' επέκταση τον όγκο του, έχουμε μεγάλη αλλαγή στην αποδιδόμενη ροπή του κινητήρα.

Εκτός από τις μεταβλητές του πίνακα (5.1), οι οποίες θα αποτελέσουν τις μεταβλητές σχεδίασης της παραμετροποιημένης σχεδίασης της μηχανής και κατ' επέκταση τις μεταβλητές βελτιστοποίησης του εξελικτικού αλγορίθμου, υπάρχουν και κάποιες σταθερές οι οποίες αποτελούν βασικό κομμάτι της σχεδίασης. Οι σταθερές αυτές είναι, το μήκος του πέλματος του δοντιού (l_{ent2}), το οποίο μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας αποδείχτηκε ότι δεν επιφέρει σημαντικές αλλαγές στα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά των κινητήρων επιφανειακών μόνιμων μαγνητών. Λόγω αυτής της μικρής επιρροής που έχει στα αποτελέσματα και τον περιορισμένο αριθμών μεταβλητών βελτιστοποίησης του αλγορίθμου, αποτέλεσε τελικά μία από τις σταθερές σχεδίασης. Η απόσταση, μεταξύ της περιμέτρου του άξονα της μηχανής, και της βάσης του δοντιού (s_{yoke}). Η τιμή που επιλέχθηκε είναι ανάλογη του πάχους των κύριων δοντιών του κινητήρα. Μία άλλη σταθερά σχεδίασης, είναι το πάχος του διακένου (air_{gap}) το οποίο είναι ίσο με 0,7 mm. Η τιμή αυτή έχει δικαιολογηθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, καθώς είναι το μικρότερο πάχος που μπορεί να επιτευχθεί στο εργαστήριο, κοιτώντας πάντα και την ασφαλή λειτουργία της μηχανής.

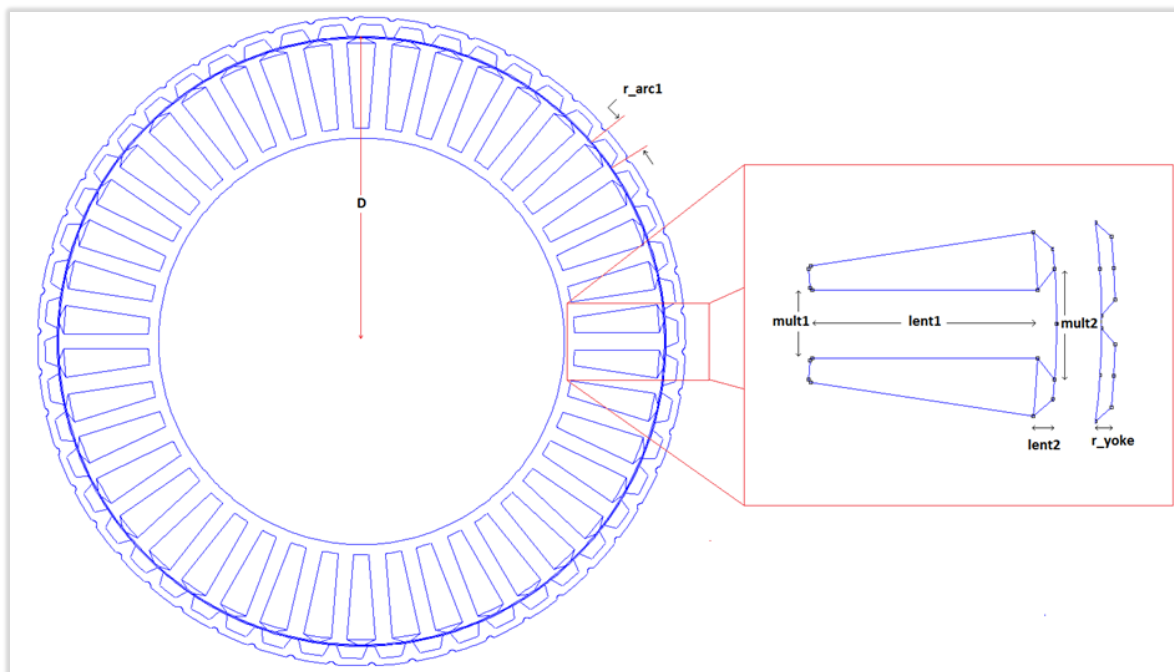
5.1.2 Μηχανή Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης

Οι μεταβλητές, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν, για τη σχεδίαση της γεωμετρίας της μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα (5.2).

Πίνακας 5.2: Μεταβλητές μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Μηχανή Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης
Ενεργό μήκος μηχανής (L)
Διάμετρος Διακένου (D)
Μήκος δοντιού (l_{ent1})
Μήκος πέλματος δοντιού (l_{ent2})
Συντελεστής πάχους δοντιού ($mult1$)
Συντελεστής πάχους άκρης δοντιού ($mult2$)
Πάχος τμήματος σιδήρου (r_{yoke})
Ποσοστό τμήματος σιδήρου επί πολικού βήματος (r_{arc1})
Συντελεστής ενδιάμεσου δοντιού ($tooth_{prc}$)

Όπως και στις μηχανές επιφανειακών μόνιμων μαγνητών, έτσι και στις μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, από τις πιο βασικές μεταβλητές σχεδίασης, είναι το ενεργό μήκος της μηχανής (L) και η διάμετρος του διακένου (D). Λόγω της σχέσης τους με την απόδοση, το βάρος και τη ροπή του κινητήρα. Το ενεργό μήκος της του κινητήρα δεν φαίνεται στο σχήμα (5.2). Αυτό είναι κάθετο στο επίπεδο του χαρτιού. Στο σχήμα (5.2) όπως και στο σχήμα (5.1), ο συντελεστής πάχους ενδιάμεσου δοντιού ($tooth_prc$), δεν γίνεται άμεσα αντιληπτός, όμως η μεταβολή του και σε αυτή τη μέθοδο σχεδίασης, έχει σαν αποτέλεσμα τη ρύθμιση του πάχους των ενδιάμεσων δοντιών κατά μία αναλογία του πάχους των κύριων.



Σχήμα 5.2 Πρότυπο μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Οι μεταβλητές οι οποίες απεικονίζονται στο σχήμα (5.2) είναι, το μήκος του σώματος των δοντιών ($lent1$), η οποία εκτός από την μεταβολή του μήκους του δοντιού μεταβάλλει αντίστοιχα και το μήκος της αύλακας. Αντίστοιχη επιρροή έχει και η μεταβλητή του πάχους σώματος δοντιών ($mult1$), καθώς μία μείωση του πάχους των δοντιών επιτρέπει την δημιουργία μεγαλύτερης επιφάνειας αύλακας στο στάτη. Οι δύο προαναφερθείσες μεταβλητές και σε αυτή την περίπτωση επηρεάζουν άμεσα τη ροπή της μηχανής, μεταβάλλοντας την επιφάνεια της αύλακας, τον αριθμό των σπειρωμάτων και τη διατομή των καλωδίων, καθώς επίσης και το βάρος του κινητήρα, εφόσον μεταβάλλουν τον όγκο του σιδήρου του στάτη. Το πάχος του πέλματος των δοντιών ($mult2$). Η μορφολογία του πέλματος των δοντιών, συνδέεται άρρηκτα με τις μαγνητικές ροές και τις διαδρομές τις οποίες θα ακολουθήσουν. Η βέλτιστη επιλογή του πέλματος των δοντιών έχει σαν συνέπεια την μείωση της κυμάτωσης της ροπής και της αρμονικής παραμόρφωσης της αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης η οποία αναμένεται να είναι υψηλή σε αυτό τον τύπο κινητήρα.

Στις μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, το πέλμα του δοντιού είναι συνυφασμένο με την αποδιδόμενη ροπή, καθώς βασικός παράγοντας για τη μέγιστη απόδοση ροπής αυτού του τύπου κινητήρων, είναι η μεγιστοποίηση της διαφοράς της μαγνητικής επαγωγής ανάμεσα στις θέσεις όπου ο κινητήρας σημειώνει τη μέγιστη και την ελάχιστη μαγνητική ροή^{[11][12][13][14]}. Για το λόγο αυτό, στη σχεδίαση έχει προστεθεί σαν μεταβλητή, και

το μήκος του πέλματος του δοντιού (l_{ent2}), γιατί με αυτό τον τρόπο προστίθεται μια ακόμα ελευθερία στη σχεδίαση του πέλματος του δοντιού.

Μια άλλη μεταβλητή η οποία φαίνεται στο σχήμα (5.2), είναι το πάχος των τμημάτων σιδήρου (r_{yoke}). Το πάχος αυτό πρέπει να επιλεγεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μην είναι αναλογικά μικρό, σε σχέση με τις μαγνητικές ροές ώστε να μην εμφανιστούν φαινόμενα κορεσμού του σιδήρου και αύξηση των απωλειών. Τέλος, πολύ σημαντική μεταβλητή είναι το ποσοστό γωνίας του τμήματος σιδήρου επί του πολικού βήματος (r_{arc1}), συντελεστής ο οποίος ελέγχει το ποσοστό του πολικού βήματος το οποίο θα καλύψει η επιφάνεια του τμήματος σιδήρου. Μεταβάλλοντας την γωνία των τμημάτων, μεταβάλλεται η μαγνητική επαγωγή του κινητήρα επομένως και η αποδιδόμενη ροπή.

Εκτός από τις μεταβλητές του πίνακα (5.2), οι οποίες θα αποτελέσουν τις μεταβλητές σχεδίασης της παραμετροποιημένης σχεδίασης της μηχανής και κατ'επέκταση τις μεταβλητές βελτιστοποίησης του εξελικτικού αλγορίθμου, υπάρχουν και κάποιες σταθερές οι οποίες αποτελούν βασικό κομμάτι της σχεδίασης. Οι σταθερές αυτές είναι, η απόσταση, μεταξύ της περιμέτρου του άξονα της μηχανής, και της βάσης του δοντιού (s_{yoke}). Η τιμή που επιλέχθηκε είναι ανάλογη του πάχους των κύριων δοντιών του κινητήρα. Μία άλλη σταθερά σχεδίασης, είναι το πάχος του διακένου (air_gap) το οποίο είναι ίσο με 0,7 mm. Η τιμή αυτή έχει δικαιολογηθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, καθώς είναι το μικρότερο πάχος που μπορεί να επιτευχθεί στο εργαστήριο, κοιτώντας πάντα και την ασφαλή λειτουργία της μηχανής.

5.2 Υπολογισμός ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών μηχανών

Μετά την επιλογή των μεταβλητών και τη σχεδίαση των γεωμετριών των κινητήρων, ακολουθεί ο υπολογισμός των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών. Τα βασικότερα μεγέθη είναι, η αποδιδόμενη μέγιστη ροπή του κινητήρα και η κυμάτωση αυτής, μεγέθη σημαντικά καθώς η διαμόρφωση της πίστας του διαγωνισμού έχει επιβάλει συγκεκριμένες απαιτήσεις ροπής. Επιπλέον, η τιμή της αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης είναι πολύ σημαντική, επειδή η χρησιμοποιούμενη τροφοδοσία του Πυρφόρου-II θέτει ένα συγκεκριμένο όριο στην απαίτηση του κινητήρα σε τάση. Βασικό παράγοντα αποτελεί επίσης η αρμονική παραμόρφωση της τάσης, καθώς αν η τιμή της είναι υψηλή, θα προκαλέσει αρνητικές ροπές οι οποίες θα έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών. Τέλος από τα πιο σημαντικά ονομαστικά μεγέθη ενός κινητήρα είναι οι απώλειες και το βάρος του. Ένα υψηλό επίπεδο απωλειών μπορεί να καταστήσει τον κινητήρα μη αποδοτικό επομένως και μη κατάλληλο. Ακριβώς το ίδιο ισχύει για το βάρος του του κινητήρα, το οποίο αν είναι μεγάλο θα προκαλέσει πρόβλημα διότι ο κινητήρας προορίζεται να ενσωματωθεί στο πίσω τροχό του αυτοκινήτου.

Οι προσομοιώσεις, οι οποίες έγιναν για την εύρεση των ηλεκτρομαγνητικών μεγεθών των κινητήρων, πραγματοποιήθηκαν μέσω δύο λογισμικών. Το πρώτο είναι το λογισμικό αριθμητικής ολοκλήρωσης διαφορικών εξισώσεων MATLAB και το δεύτερο είναι το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων FEMM.



Σχήμα 5.3 Διάγραμμα διεργασιών για τον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών των κινητήρων

Στο σχήμα (5.3), παρουσιάζεται ο αλγόριθμος ο οποίος ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό των αναγκαίων μεγεθών. Κάθε βήμα αποτελεί και διαφορετικό μέρος του κώδικα, ο οποίος γράφτηκε στο λογισμικό MATLAB. Το πρόγραμμα ξεκινάει με τον ορισμό των μεταβλητών και των σταθερών σχεδίασης. Ακολουθεί η σχεδίαση των γεωμετριών στο πρόγραμμα FEMM.

Μετά τη σχεδίαση πραγματοποιείται επίλυση του μαγνητικού προβλήματος στο λογισμικό FEMM το οποίο επιστρέφει τα απαραίτητα αποτελέσματα, τα οποία είναι απαραίτητα. Με το πέρας του προηγούμενου βήματος, πραγματοποιείται ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών του κινητήρα μέσω συγκεκριμένων βημάτων και διαδικασιών. Αναλυτικότερη περιγραφή των διαδικασιών αυτών γίνεται στην συνέχεια του κεφαλαίου.

Είσοδος παραμέτρων σχεδίασης

Σε αυτό το στάδιο γίνεται καθορισμός των παραμέτρων των κινητήρων. Οι παράμετροι αυτοί είναι οι μεταβλητές και οι σταθερές που έχουν αναφερθεί κατά την σχεδίαση των κινητήρων. Τέλος γράφονται τα υποπρογράμματα που θα χρησιμοποιηθούν για την περαιτέρω βελτίωση της σχεδίασης των κινητήρων.

Πίνακας 5.3: Παράμετροι και υποπρογράμματα σχεδίασης γεωμετριών του κώδικα

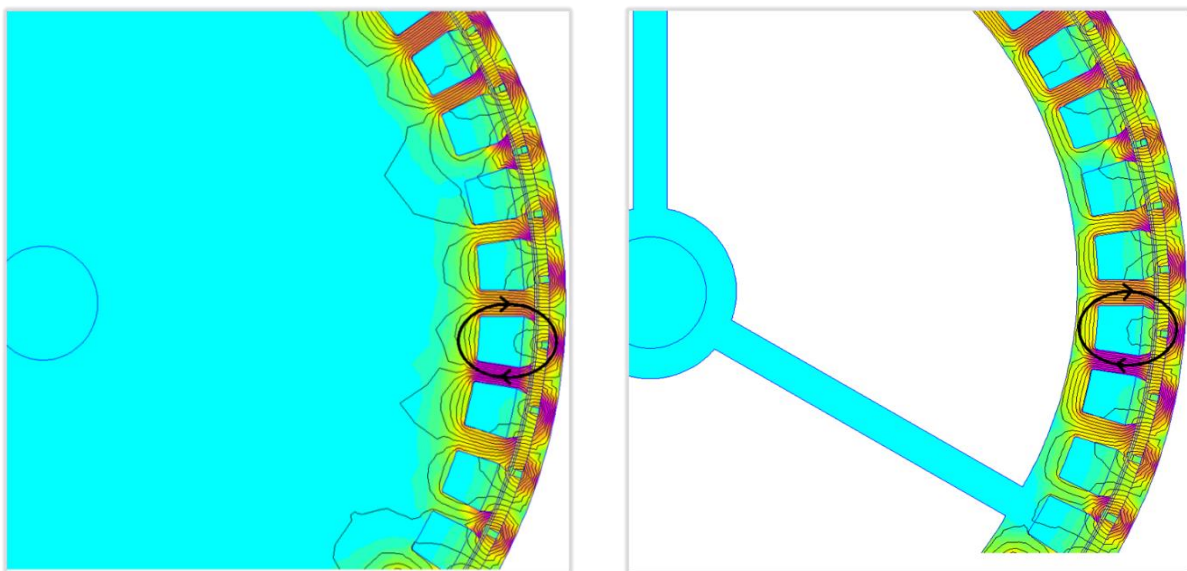
Παράμετροι	Υποπρογράμματα
Αριθμός Αυλάκων	Δημιουργία κενού αέρος
Αριθμός πόλων	Δημιουργία ανοιχτού δοντιού
Ενεργό μήκος κινητήρα	Δημιουργία μαγνήτη/τμήματος σιδήρου βάση εμβαδού
Διάμετρος διακένου	Δημιουργία μαργαρίτας
Χωρικό ρεύμα αύλακας	
Πυκνότητα Πλέγματος	
Στροφές κινητήρα	
Πάχος διακένου	
Πλάτος δοντιού	
Αριθμός τυλιγμάτων	
Ποσοστό πληρότητας Αύλακας	
Βήμα γωνίας υπολογισμών	

Στον πίνακα (5.3), γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των βασικότερων παραμέτρων σχεδίασης των γεωμετριών και τα υποπρογράμματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν. Από τις βασικότερες παραμέτρους είναι ο αριθμός αυλάκων και πόλων της μηχανής, το ενεργό μήκος και η διάμετρος διακένου της. Οι στροφές του κινητήρα αποτελούν βασικό χαρακτηριστικό του υπολογισμού των απωλειών σιδήρου, λόγω της σχέσης αναλογίας που υπάρχει μεταξύ της ηλεκτρικής συχνότητας και των απωλειών αυτών. Το χωρικό ρεύμα, η πληρότητά της αύλακας και ο αριθμός των τυλιγμάτων επηρεάζουν την αποδιδόμενη ροπή, διότι όσο περισσότερο αυξάνεται η πεπλεγμένη ροή τόσο μεγαλύτερη είναι και η αποδιδόμενη ροπή. Τέλος οι παράμετροι, πυκνότητα πλέγματος και βήμα γωνίας υπολογισμών συνδέονται με τη ακρίβεια των υπολογισμών του προγράμματος. Περισσότερη ανάλυση για την πυκνότητα πλέγματος γίνεται σε επόμενο κεφάλαιο.

Σε αυτό το σημείο θα γίνει ανάλυση των τεσσάρων υποπρογραμμάτων, με τη σειρά την οποία αναφέρονται στον πίνακα (5.3).

Δημιουργία κενού αέρος

Ένα από τα σημαντικότερα υποπρογράμματα είναι η δημιουργία κενών αέρος στο σώμα του στάτη του κινητήρα, λαμβάνοντας υπόψιν την αποφυγή της μείωσης της αντοχής του κινητήρα. Μέσω αυτής της διεργασίας επιτυγχάνεται σημαντική μείωση του βάρους και των απωλειών σιδήρου, μέσω της αντικατάστασης μεγάλου μέρους του σιδήρου του στάτη με κενό αέρος. Συνήθως αυτού του είδους οι διεργασίες πραγματοποιούνται σε μηχανές, οι οποίες έχουν τον στάτη τους στο εσωτερικό και τον δρομέα στο εξωτερικό τους. Σε αυτές τις γεωμετρίες υπάρχει αρκετός όγκος σιδήρου, ανάμεσα στον άξονα του κινητήρα και τα δόντια του στάτη, ο οποίος δεν προσφέρει καμία βελτίωση στην απόδοση του κινητήρα. Αντιθέτως ο όγκος αυτός προσθέτει αχρείαστο βάρος στον κινητήρα. Για την βαθύτερη κατανόηση της βελτίωσης που φέρει η δημιουργία κενών αέρος παρατίθεται το σχήμα (5.4).

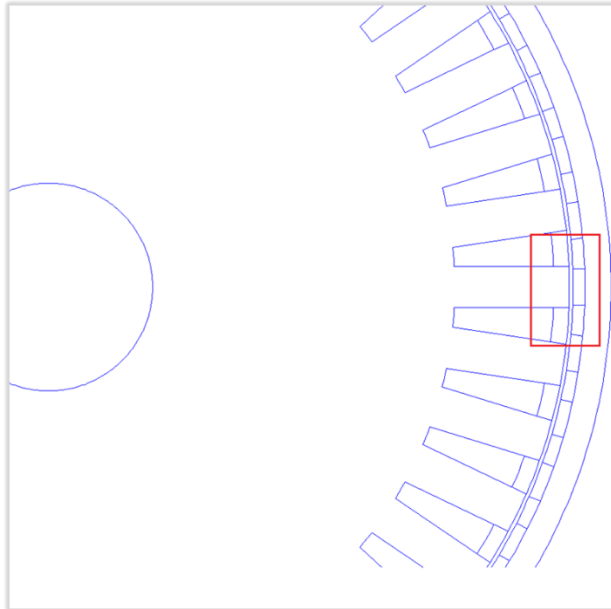


Σχήμα 5.4 Διαφορά στάτη κινητήρα πριν και μετά τη δημιουργία κενών αέρος.

Στο παραπάνω σχήμα, αριστερά παρατηρείται ο στάτης κινητήρα χωρίς κενά αέρος και στα δεξιά ο ίδιος κινητήρας μετά την δημιουργία κενών αέρος. Στους δύο κινητήρες, η διαφορά των χρωμάτων, των διάφορων περιοχών του στάτη και του δρομέα απεικονίζουν την διαφορά της τιμής της πυκνότητας μαγνητικής ροής. Στα μέρη όπου η μαγνητική ροή είναι πιο πυκνή, το χρώμα τείνει να γίνει μωβ ενώ εκεί που η ροή είναι πιο αραιή το χρώμα τείνει να γίνει γαλάζιο. Οι μαύρες γραμμές γύρω από τις αύλακες των κινητήρων, συμβολίζουν τις μαγνητικές ροές. Με την δημιουργία των κενών παρατηρείται καλύτερη κατανομή των μαγνητικών ροών λόγω της έλλειψης σιδήρου στον οποίο να μπορούν να ξεφύγουν οι ροές. Το επιπλέον υλικό το οποίο αφαιρείται, όπως φαίνεται στο σχήμα (5.4) δεν επηρεάζει αρνητικά τις διαδρομές των μαγνητικών ροών, συνεπώς δεν επηρεάζει αισθητά τα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά των κινητήρων. Συμπερασματικά η δημιουργία κενών αέρος στο σώμα του στάτη, βοηθάει την μείωση του βάρους και των απωλειών μιας μηχανής.

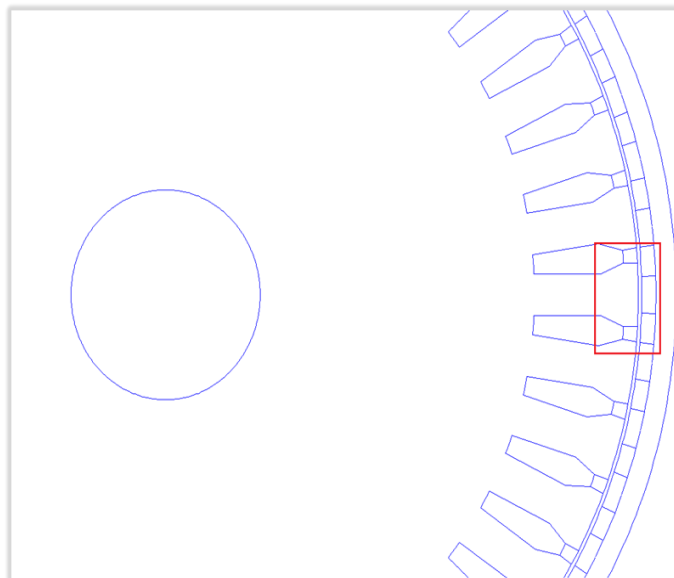
Διαμόρφωση πέλματος δοντιού

Μέσω του κώδικα, δόθηκε η επιλογή δημιουργίας πέλματος δοντιού. Η διαφορά των δοντιών με πέλμα και των δοντιών χωρίς, έγκειται στην επιπρόσθετη επεξεργασία του τελικού τμήματος του δοντιού, με αποτέλεσμα το δόντι πλέον να μην έχει το ίδιο πάχος σε όλο το μήκος του.



Σχήμα 5.5 Γεωμετρία δοντιού χωρίς πέλμα

Στο σχήμα (5.5), παρουσιάζεται η απλή γεωμετρία σάτη, με ίδιο πάχος δοντιού σε όλο το μήκος του. Η χρήση τέτοιου είδους δοντιών, βοηθάει στη πιο εύκολη σχεδίαση του κινητήρα στο πρόγραμμα FEMM και αντίστοιχα στην πιο εύκολη κατασκευή του κινητήρα. Επιπροσθέτως το κόστος κατασκευής παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, λόγω του μικρού χρόνου περάτωσης της κατασκευής του σάτη.



Σχήμα 5.6 Γεωμετρία δοντιού με πέλμα

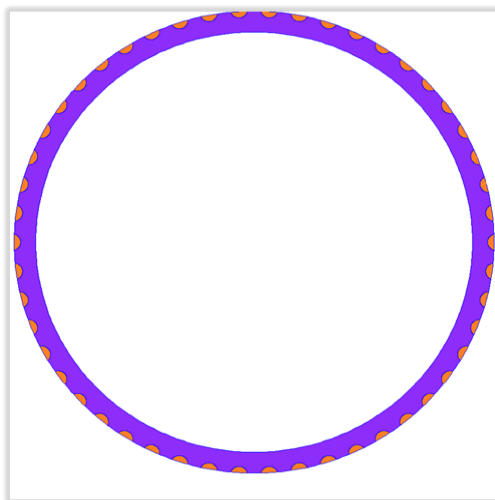
Αντίστοιχα στο σχήμα (5.6), αναπαρίσταται μια γεωμετρία στάτη κινητήρα, με χρήση δοντιών με πέλμα. Όπως παρατηρείται, η μορφολογία του δοντιού είναι αρκετά διαφορετική. Η προσθήκη πέλματος στο δόντι, προσφέρει μια καλύτερη επεξεργασία των δοντιών, βοηθώντας με αυτό το τρόπο στην βελτίωση της κυμάτωσης της ροπής και του αρμονικού περιεχομένου του κινητήρα. Οι μηχανές για τις οποίες θεωρείται απαραίτητη η δημιουργία πέλματος δοντιού είναι οι μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, καθώς μόνο με αυτόν τον τρόπο μπορεί να επιτευχθεί βελτίωση της μαγνητικής επαγωγής της μηχανής. Βέβαια το μειονέκτημα το οποίο προστίθεται, είναι η αύξηση της πολυπλοκότητας της κατασκευής του κινητήρα και επομένως αύξηση του χρόνου ολοκλήρωσης της κατασκευής του. Η αύξηση αυτή στο χρόνο κατασκευής φέρει σαν αποτέλεσμα και την αύξηση του κόστους κατασκευής της.

Δημιουργία μαγνήτη βάση εμβαδού

Βάσει της παραμετροποίησης του κώδικα, έχει δοθεί η επιλογή να αλλάζει το εμβαδό του μαγνήτη με δύο παραμέτρους. Η μία παράμετρος είναι το ποσοστό της γωνίας του μαγνήτη ως προς την γωνία του πολικού βήματος και η δεύτερη είναι το πάχος του. Από την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε, έγινε γρήγορα αντιληπτό ότι οι αλλαγές στην επιφάνεια του μαγνήτη και κατά επέκταση στον όγκο του, προκαλούν μεγάλες αλλαγές στην ροπή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το πεδίο του δρομέα να διογκώνεται και να μειώνεται με γρήγορους ρυθμούς, κάτι που δεν ευνοεί την λεπτομερή ανάλυση της μηχανής. Εξαιτίας αυτού του προβλήματος δημιουργήθηκε ένα υποπρόγραμμα, το οποίο μπορεί να κρατάει σταθερό το εμβαδό του μαγνήτη και να μεταβάλλει αυτόματα το πάχος του καθώς ο χρήστης δίνει την απαίτηση του για τη γωνία.

Δημιουργία μαργαρίτας

Τελευταίο υποπρόγραμμα το οποίο δημιουργήθηκε είναι αυτό της δημιουργίας μαργαρίτας. Με τον όρο μαργαρίτα περιγράφεται η δημιουργία των εσοχών του δρομέα που φαίνονται στο σχήμα (5.7). Αυτή η επιλογή συμβάλλει στην περαιτέρω μείωση του βάρους του κινητήρα, καθώς επίσης και στην μείωση της ροπής αδράνειάς του.

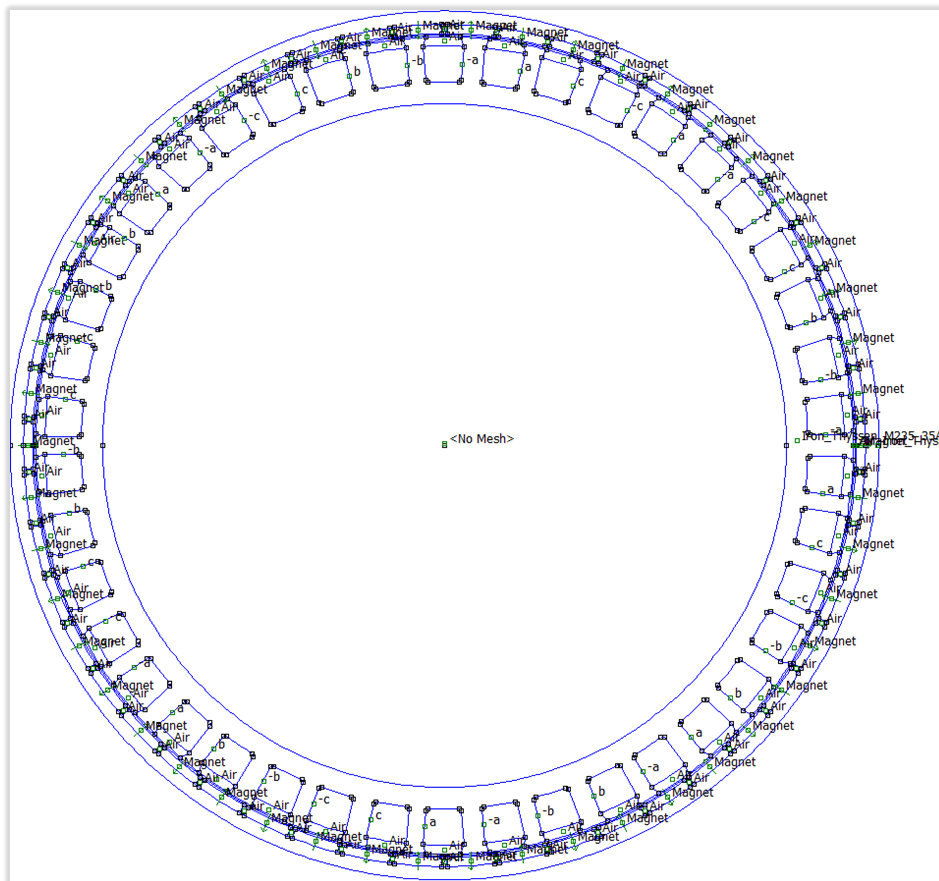


Σχήμα 5.7 Δρομέας κινητήρα με εμφανή τα μέρη που αφαιρέθηκαν

Ο λόγος για τον οποίο μπορεί να γίνει αυτή η αφαίρεση υλικού, χωρίς την επιρροή των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών του κινητήρα, ακολουθεί την ίδια αρχή με την αιτία που η προσθήκη κενών αέρος στο στάτη της μηχανής δεν επηρεάζει τα χαρακτηριστικά αυτής. Στα σημεία αυτά στη μηχανή επιφανειακών μαγνητών, δεν υπάρχει μαγνητική ροή η οποία να επηρεαστεί αν αφαιρεθεί σίδηρος. Ενώ στη μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης στις συγκεκριμένες θέσεις υπάρχει λαμαρίνα η οποία δεν αποτελεί μέρος του μαγνητικού κυκλώματος, οπότε η επεξεργασία της δεν επιφέρει αλλαγές στη απόδοση της μηχανής.

Σχεδίαση ηλεκτροκινητήρα

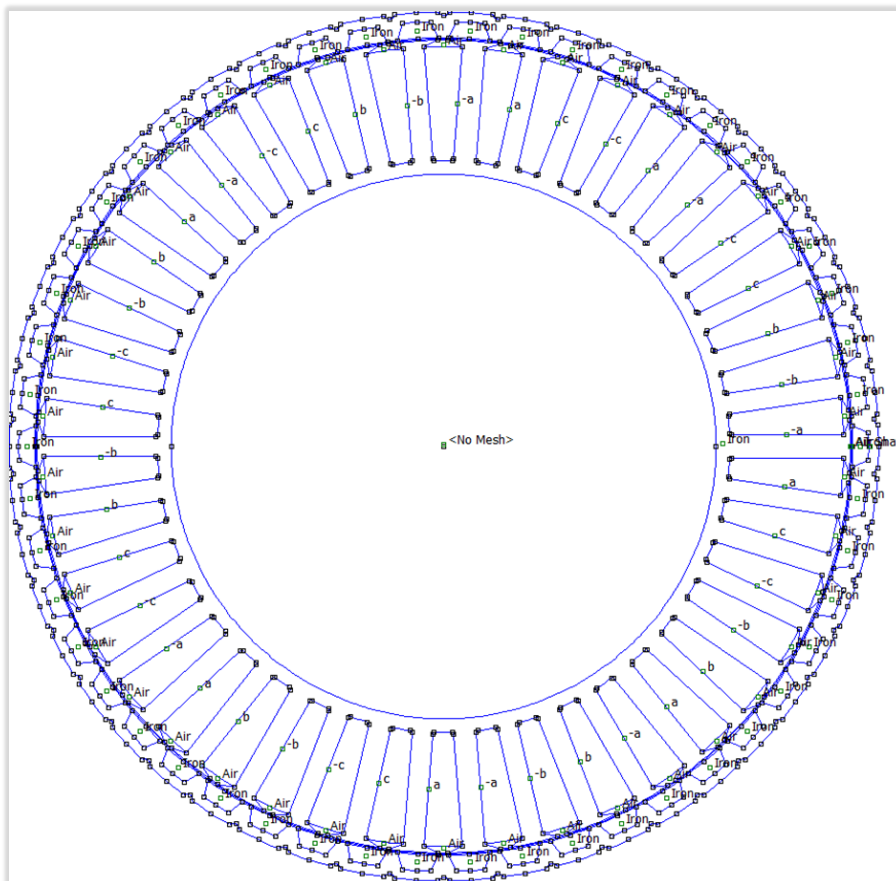
Σε αυτό το στάδιο υλοποιούνται οι γεωμετρίες των κινητήρων, ώστε ύστερα να επιλυθούν τα μαγνητικά προβλήματα τα οποία θα προκύψουν με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Συγκεκριμένα, πρώτα δημιουργήθηκε ένα αρχείο, στο λογισμικό MATLAB, στο οποίο έγινε αρχικοποίηση των μεταβλητών και των σταθερών οι οποίες είναι απαραίτητες για την σχεδίαση των κινητήρων, όπως αυτές έχουν αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στη συνέχεια γράφτηκε κώδικας στο λογισμικό MATLAB, ο οποίος δέχεται τις τιμές των μεταβλητών αυτών και στέλνοντας τις απαραίτητες εντολές στο λογισμικό FEMM, γίνεται αυτόματη σχεδίαση των γεωμετριών στον προεπεξεργαστή του FEMM.



Σχήμα 5.8 Παράδειγμα αυτοματοποιημένης σχεδίασης μέσω MATLAB, μηχανής επιφανειακών μόνιμων μαγνητών

Στο σχήμα (5.8), παρουσιάζεται η γεωμετρία μηχανής επιφανειακών μόνιμων μαγνητών, με 42 αύλακες και 50 πόλους. Στη γεωμετρία φαίνονται οι αύλακες, στις οποίες έχουν οριστεί οι κατάλληλες φάσεις, με τις κατάλληλες πολικότητες τους, όπως αυτές έχουν

οριστεί από το σχήμα (4.4) του κεφαλαίου 4. Επίσης αναδεικνύεται η κατανομή των μαγνητών στο δρομέα της μηχανής με την κατάλληλη κατεύθυνση μαγνήτισης. Τέλος παρατηρείται ένας μεγάλος κύκλος στο μέσο του στάτη με την ονομασία, χωρίς πλέγμα (No Mesh). Ο κύκλος αυτός θα θεωρηθεί από το πρόγραμμα σαν κενός χώρος. Κάτι το οποίο στην πράξη δεν ισχύει καθώς αποτελεί το σώμα του στάτη. Όμως για την βελτίωση του χρόνου και της απόδοσης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, επιλέχθηκε αυτή η σχεδιαστική προσέγγιση του στάτη χωρίς όμως να προστεθεί περιθώριο λάθους καθώς και στην πραγματικότητα το μεγαλύτερο μέρος του κύκλου θα αποτελείται από κενά αέρος.



Σχήμα 5.9 Παράδειγμα αυτοματοποιημένης σχεδίασης μέσω MATLAB, μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Στο σχήμα (5.9), παρουσιάζεται η γεωμετρία της μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Στο σχήμα φαίνεται, η κατανομή των φάσεων στις αύλακες, με την σωστή πολικότητα, και εδώ σε πλήρη συμφωνία με το σχήμα (4.4) του κεφαλαίου 4. Στο δρομέα εμφανίζονται τα τμήματα σιδήρου τα οποία αντικαθιστούν στην ουσία τους μαγνήτες του προηγούμενου τύπου μηχανής. Όπως παρατηρείται και από το σχήμα έχει ληφθεί υπόψιν η δημιουργία των δοντιών και των τμημάτων σιδήρου του δρομέα με τέτοιο τρόπο ώστε να αυξάνεται η μαγνητική επαγωγή της μηχανής και να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αποδιδόμενη ροπή.^[13] Τέλος χρησιμοποιήθηκε όπως και στη μηχανή μόνιμων μαγνητών η ίδια σχεδιαστική αρχή για την βελτίωση της απόδοσης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Αυτή είναι, ο ορισμός του άξονα της μηχανής και ενός μέρους του σώματος του στάτη σαν κενή περιοχή. Πάλι με προσοχή ώστε να μην υπάρξουν αποκλίσεις των υπολογισμών από την απλούστευση αυτή.

Όπως παρατηρείται από τα δύο σχήματα, η μηχανή μεταβλητής αντίστασης έχει αισθητά μεγαλύτερη επιφάνεια αυλάκων, λόγω της έλλειψης ενός δευτέρου πεδίου στο στάτη για την

δημιουργία ροπής. Επομένως όλο το βάρος της δημιουργίας ροπής, πέφτει στο πεδίο του στάτη, οπότε και η ανάγκη σε χαλκό αυξάνει άμεσα και την ανάγκη σε χώρο στις αύλακες. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα την μεγάλη διαφορά σε απώλειες σιδήρου, στις δύο μηχανές.

Επίλυση προβλήματος

Πριν αναλυθούν οι διαδικασίες που εκτελούνται για την επίλυση του ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος το οποίο έχει παρουσιαστεί παραπάνω, χρειάζεται πρώτα να ληφθεί υπόψιν ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, ο οποίος είναι η ακρίβεια του πλέγματος του λογισμικού FEMM.

Για την εύρεση των απαιτούμενων ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών των κινητήρων ακολουθείται μια συγκεκριμένη διαδικασία. Η διαδικασία αυτή ξεκινάει με την αυτοματοποιημένη σχεδίαση του κινητήρα στο προεπεξεργαστή του FEMM. Έπειτα το πρόγραμμα διακριτοποιεί την περιοχή του προβλήματος χρησιμοποιώντας τριγωνικά στοιχεία. Σε κάθε στοιχείο, η λύση προσεγγίζεται με γραμμική παρεμβολή των τιμών του δυναμικού στις κορυφές του τριγώνου. Το πρόβλημα της γραμμικής άλγεβρας σχηματίζεται με ελαχιστοποίηση του μέτρου του σφάλματος ανάμεσα στην πραγματική διαφορική εξίσωση και τη προσεγγιστική διαφορική εξίσωση. Η επίλυση του προγράμματος FEMM γίνεται σε μαγνητοστατικά προβλήματα και βασίζεται στην επίλυση των εξισώσεων του Maxwell σύμφωνα με τις οποίες ισχύει:

$$\nabla * \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (5.1)$$

$$\nabla * \mathbf{B} = 0 \quad (5.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (5.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu \left(\mathbf{J} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \quad (5.4)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις οι (5.2) και (5.4) αφορούν το μαγνητικό πεδίο, όπου στην περίπτωση του μαγνητοστατικού προβλήματος οι όροι που σχετίζονται με τη μεταβολή του μεγέθους στο χρόνο μηδενίζονται, οπότε οι σχέσεις απλοποιούνται και γίνονται:

$$\nabla * \mathbf{B} = 0 \quad (5.5)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu * \mathbf{J} \quad (5.6)$$

Επίσης ισχύει η σχέση $\mathbf{B} = \mu * \mathbf{H}$ με το μ να συμβολίζει τη διαπερατότητα του κάθε υλικού. Για την εύρεση του μαγνητικού πεδίου απαιτείται ο υπολογισμός του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού \mathbf{A} , καθώς ισχύει η σχέση:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (5.7)$$

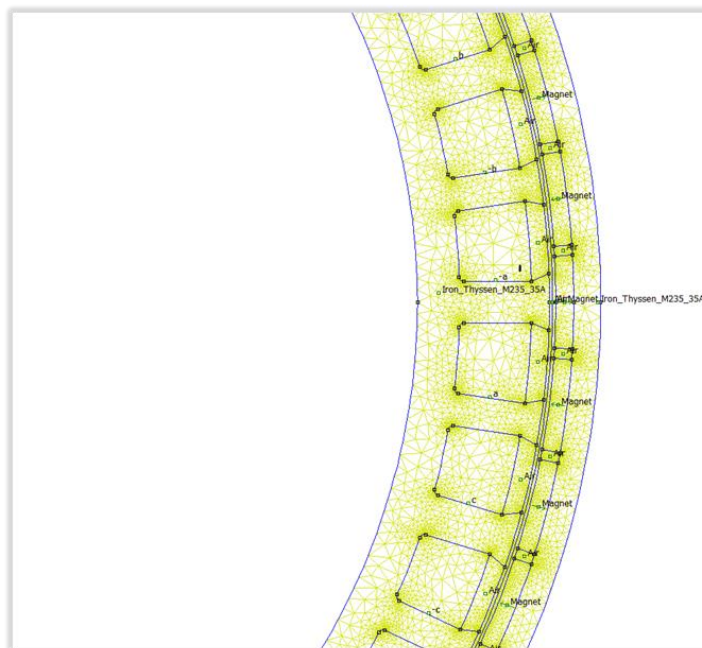
Οπότε με αντικατάσταση στη (5.5) και θεωρώντας ιστροπικό μέσο έχουμε τη σχέση:

$$\frac{1}{\mu} * \nabla^2 * \mathbf{A} = \mathbf{J} \quad (5.8)$$

Έχοντας γνωστή τη ρευματική κατανομή, μέσω του προγράμματος FEMM γίνεται η επίλυση και η εύρεση του διανυσματικού δυναμικού \mathbf{A} . Για την εύρεση της τελικής λύσης από τις εξισώσεις του Maxwell είναι απαραίτητη η γνώση των οριακών συνθηκών του προβλήματος. Οι οριακές συνθήκες οι οποίες χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα είναι :

1. **Dirichlet** : Οι οριακές συνθήκες Dirichlet, δηλώνουν την τιμή του δυναμικού \mathbf{A} πάνω στο όριο της επιφάνειας.
2. **Neumann** : Σε αυτές τις οριακές συνθήκες ορίζεται η κάθετη παράγωγος του δυναμικού στο όριο.
3. **Robin** : Αυτές οι οριακές συνθήκες αποτελούν συνδυασμό των δύο παραπάνω.
4. **Περιοδικές**: Η συνθήκη αυτή καθορίζει τη σχέση μεταξύ δύο ορίων. Τα όρια σε αυτή την περίπτωση έχουν την ίδια τιμή.
5. **Αντιπεριοδικές** : Η αντιπεριοδική είναι η δυική της προηγούμενης συνθήκης. Οπότε το ένα όριο έχει αντίθετη τιμή από ότι το άλλο όριο.

Με τη λύση του προβλήματος έχουμε και τα αποτελέσματα για τα χαρακτηριστικά του κινητήρα στη συγκεκριμένη θέση του δρομέα και με τη συγκεκριμένη διέγερση των τυλιγμάτων. Τέλος η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται τόσες φορές όσες έχουν οριστεί ώστε να προκύψουν όλα τα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά του κινητήρα που χρειάζονται, με την μέγιστη ακρίβεια. Όπως διαφαίνεται από τη πορεία που ακολουθεί ο κώδικας ώστε να μας δώσει τα αποτελέσματα που θέλουμε, η ακρίβεια της πλεγματοποίησης είναι υψίστης σημασίας καθώς επηρεάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων μας. [16][17][18]

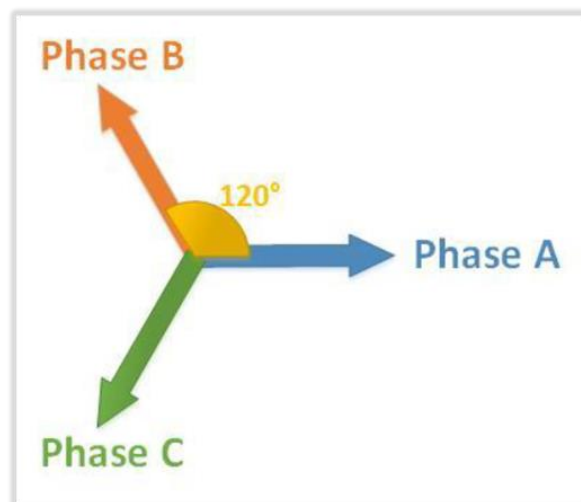


Σχήμα 5.10 Πλεγματοποίηση γεωμετρίας κινητήρα στο λογισμικό FEMM

Στο σχήμα (5.10), απεικονίζεται η πλεγματοποίηση ενός τμήματος της γεωμετρίας του κινητήρα μόνιμων μαγνητών. Και στους δύο τύπους μηχανών η ακρίβεια της πλεγματοποίησης των γεωμετριών κρατήθηκε σε αρκετά υψηλό επίπεδο, με την διατήρηση του ορίου ελάχιστης γωνίας των στοιχείων να είναι 30 μοίρες, επιλογή που έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία 24 – 60 χιλιάδων τριγωνικών στοιχείων και περίπου 50 – 100 χιλιάδων σημείων ένωσης. Στη συγκεκριμένη γεωμετρία του σχήματος (5.10) ο αριθμός των τριγωνικών στοιχείων είναι 32189 και ο αριθμός των ενώσεων 69845. Με την πυκνότητα της πλεγματοποίησης να είναι μεγαλύτερη σε σημεία όπου υπάρχει συνωστισμός κόμβων σχεδίασης. Το εύρος των τιμών του αριθμού των τριγωνικών στοιχείων οφείλεται στη διαφορά της επιφάνειας που καταλαμβάνει η κάθε γεωμετρία που σχεδιάζεται.

Υπολογισμός ροπής

Για τον υπολογισμό της ροπής της μηχανής, δημιουργήθηκε κώδικας ο οποίος μέσω του λογισμικού FEMM, να υπολογίζει τη ροπή που αναπτύσσεται στο διάκενο της μηχανής μέσω του τανυστή τάσης του Maxwell. Για τον υπολογισμό της εν λόγω ροπής τίθεται η πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες της φάσης A μέγιστη. Επίσης λόγω της διαφοράς γωνίας που έχουν οι τρεις φάσεις όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (5.11), η πυκνότητα ρεύματος της κάθε φάσης ορίζεται από τις εξισώσεις (5.9),(5.10) και (5.11).



Σχήμα 5.11 Διαδοχή φάσεων τριφασικού ρεύματος^[6]

Στο σχήμα (5.11), απεικονίζονται οι τρεις φάσεις A,B και C του ρεύματος με την κατάλληλη ηλεκτρική μετατόπιση. Η μετατόπιση αυτών είναι 120 ηλεκτρικές μοίρες. Αυτή έχει ληφθεί υπόψιν κατά τον υπολογισμό των πυκνοτήτων ρεύματος της κάθε φάσης.

$$J_a = \sqrt{2} * J_{rms} * ff * \cos(f) \quad (5.9)$$

$$J_b = \sqrt{2} * J_{rms} * ff * \cos(f + 120) \quad (5.10)$$

$$J_c = \sqrt{2} * J_{rms} * ff * \cos(f + 240) \quad (5.11)$$

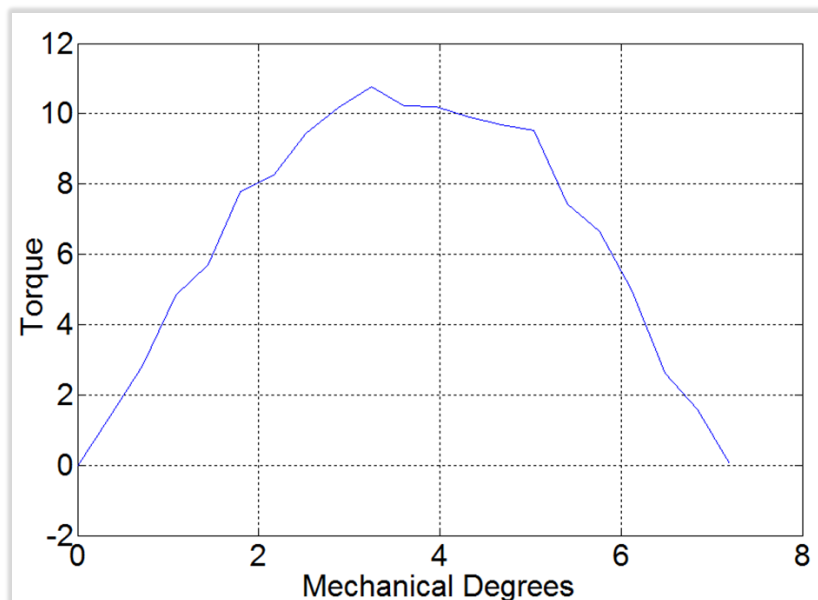
όπου $J_{rms} = 4 \frac{A}{mm^2}$, f είναι η συχνότητα του ρεύματος, και ff δηλώνει το ποσοστό πληρότητας της αύλακας από το πηνίο.

Η πληρότητα της αύλακας έχει προστεθεί σαν όρος στις παραπάνω εξισώσεις ώστε να αποφευχθεί η ανάγκη διαχωρισμού της επιφάνειας της αύλακας σχεδιαστικά. Προσθέτοντας αυτόν τον όρο, πλέον όλη η επιφάνεια της αύλακας ορίζεται, από το πρόγραμμα, ότι έχει ίση πυκνότητα ρεύματος, παρότι στην πράξη δεν είναι όλη γεμάτη χαλκό. Αφού έχουν ορισθεί οι πυκνότητες ρευμάτων για τις τρεις φάσεις μέσω των εξισώσεων (5.9), (5.10) και (5.11) επιλέγουμε και περιστρέφουμε τον δρομέα κατά θ_m μηχανικές μοίρες, οι οποίες αποτελούν και το λεγόμενο βήμα των επαναλήψεων. Σε κάθε περιστροφή του δρομέα μετριέται η ροπή της μηχανής. Το βήμα της περιστροφής του δρομέα ορίζεται ως:

$$Step = \frac{2 * r_arc}{iterations} \quad (5.12)$$

όπου r_arc συμβολίζει το πολικό βήμα της μηχανής, το οποίο είναι ίσο με τη διαίρεση των 360 μοιρών με τον αριθμό των πόλων της μηχανής, και η μεταβλητή $iterations$ συμβολίζει τον αριθμό των επαναλήψεων της διαδικασίας και ως επέκταση τις φορές περιστροφής του δρομέα. Ο αριθμός των επαναλήψεων είναι 20, αριθμός ικανοποιητικός για την διατήρηση της ακρίβειας των μετρήσεων και την βελτίωση του χρόνου της διαδικασίας.

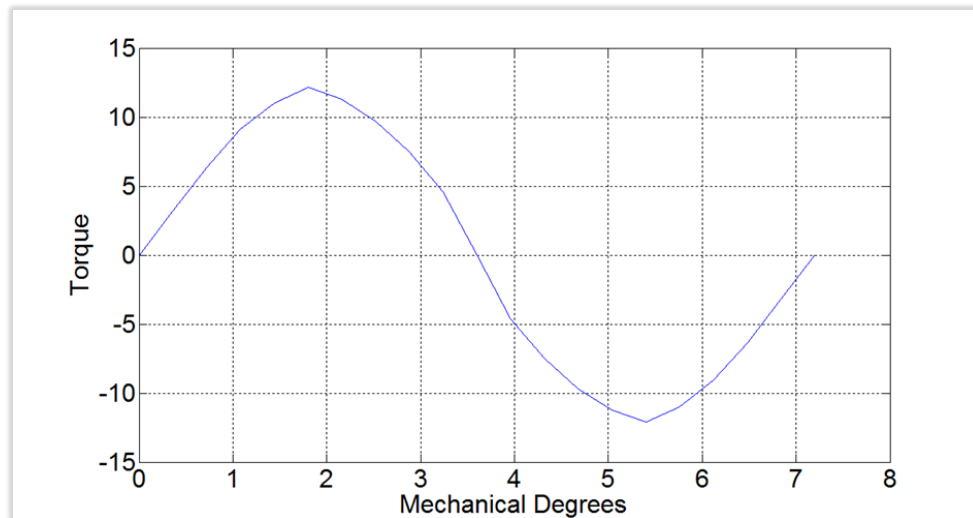
Με το τέλος αυτής της διαδικασίας έχουμε πλέον δύο ξεχωριστούς πίνακες. Ο ένας περιέχει τις τιμές της ροπής του κινητήρα σε κάθε επανάληψη και ο άλλος τις μοίρες κατά τις οποίες είχε στραφεί ο δρομέας.



Σχήμα 5.12 Διάγραμμα ροπής – γωνιάς δρομέα μηχανής μόνιμων μαγνητών

Στο σχήμα (5.12), παρατηρείται η γραφική αναπαράσταση των δύο προαναφερθέντων πινάκων με άξονες τις μηχανικές μοίρες και τη ροπή του κινητήρα. Είναι γνωστό ότι οι τη μέγιστη ροπή τους, οι μηχανές μόνιμων μαγνητών την παρουσιάζουν στις 90 ηλεκτρικές μοίρες. Πράγμα το οποίο φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, καθώς το μέγιστο παρατηρείται

στις 3,6 μηχανικές μοίρες, και μετατρέποντας τις μηχανικές σε ηλεκτρικές, έχουμε 90 μοίρες. Τέλος όπως φαίνεται έχει επιτευχθεί η απόδοση ροπής 10.5 Nm από τη μηχανή.



Σχήμα 5.13 Διάγραμμα ροπής – γωνιάς δρομέα μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Στο σχήμα (5.13), παρουσιάζεται αντίστοιχα η γραφική αναπαράσταση της ροπής σε σχέση με τις μηχανικές μοίρες περιστροφής του δρομέα του κινητήρα μεταβλητής αντίστασης. Στο σχεδιάγραμμα αυτό διαφαίνεται η επιρροή της εκτυπότητας καθώς πλέον η μέγιστη ροπή του κινητήρα παρουσιάζεται στις 1,8 μηχανικές μοίρες ή αλλιώς στις 45 ηλεκτρικές μοίρες. Τέλος και σε αυτή τη γεωμετρία επιτεύχθηκε η απόδοση ροπής 10,5 Nm από τον κινητήρα.

Ο τύπος μετατροπής των μηχανικών μοιρών, στις αντίστοιχες ηλεκτρικές σε μία ηλεκτρική μηχανή είναι ο εξής:

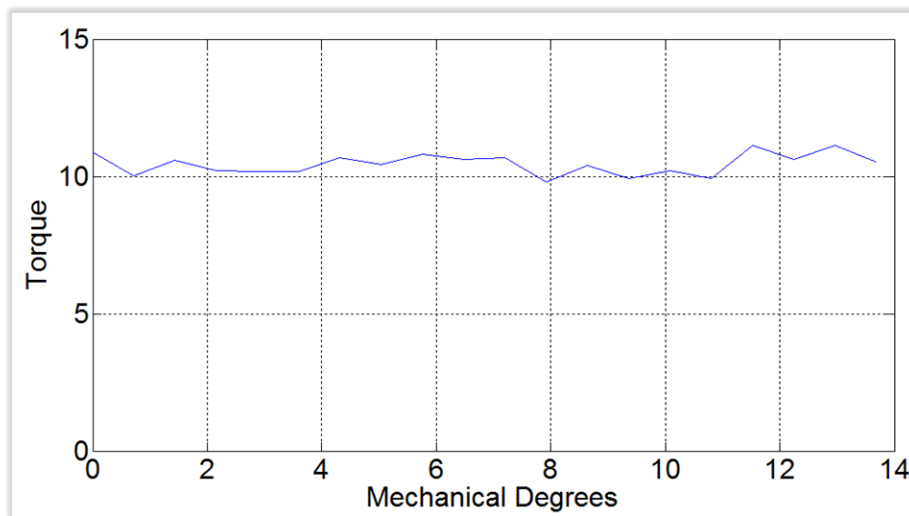
$$\theta_e = \frac{P}{2} * \theta_m \quad (5.13)$$

όπου P συμβολίζει τον αριθμό των πόλων της μηχανής, θ_e τις ηλεκτρικές μοίρες και θ_m τις μηχανικές μοίρες.

Προσδιορισμός κυμάτωσης ροπής

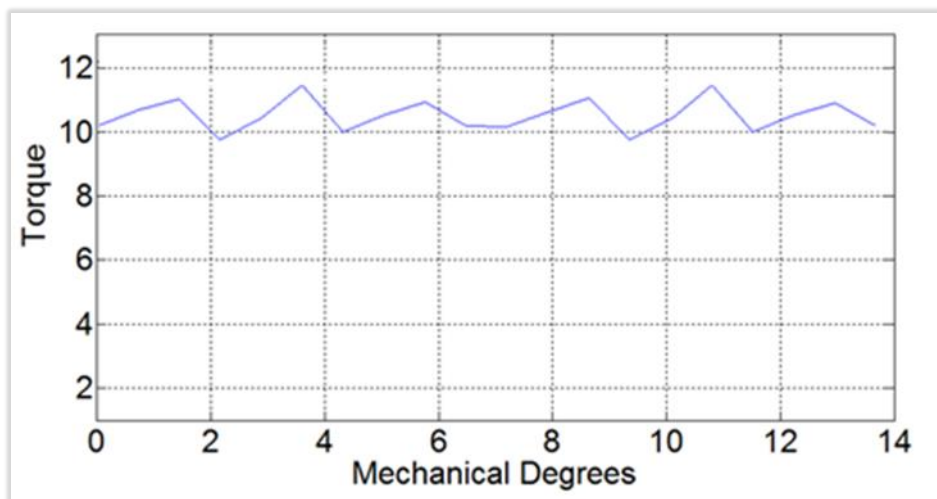
Για τον υπολογισμό της κυμάτωσης ροπής, θέτουμε πάλι τις πυκνότητες των ρευμάτων με μέγιστη τη πυκνότητα ρεύματος της φάσης A οπότε με τις σχέσεις (5.9), (5.10) και (5.11) υπολογίζουμε τις πυκνότητες ρεύματος και των άλλων δύο φάσεων. Έπειτα τοποθετούμε τον δρομέα στην θέση όπου παρουσιάστηκε η μέγιστη ροπή. Αυτό σημαίνει ότι για τη μηχανή επιφανειακών μόνιμων μαγνητών ο δρομέας μετακινείται κατά 3,6 μηχανικές μοίρες και για τη μηχανή μεταβλητής μαγνητικής ο δρομέας μετακινείται κατά 1,8 μηχανικές μοίρες. Έπειτα πραγματοποιείται σύγχρονη περιστροφή του δρομέα με τις πυκνότητες των ρευμάτων. Αυτό σημαίνει ότι με την περιστροφή του δρομέα κατά θ_m μηχανικές μοίρες, 'στρέφουμε' και τις πυκνότητες ρεύματος κατά τις αντίστοιχες ηλεκτρικές μοίρες θ_e . Οι ηλεκτρικές μοίρες

αντιστοιχούν στην μεταβλητή f των εξισώσεων (5.9),(5.10) και (5.11). Σε κάθε επανάληψη καταχωρούνται σε πίνακες οι τιμές της ροπής, των μηχανικών μοιρών περιστροφής και η πεπλεγμένη ροή της μηχανής.



Σχήμα 5.14 Διάγραμμα κυμάτωσης ροπής μηχανής επιφανειακών μόνιμων μαγνητών

Στο σχήμα (5.14), παρουσιάζεται η κυμάτωση ροπής της μηχανής μόνιμων μαγνητών. Όπως φαίνεται και από το σχήμα η κυμάτωση της μηχανής είναι σε ικανοποιητικά επίπεδα της τάξης του 9%. Αυτό σημαίνει ότι η κυμάτωση ροπής ξεκινά από ένα ικανοποιητικά υψηλό επίπεδο το οποίο θα αποτελέσει πολύ καλή βάση για τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης που θα χρησιμοποιηθεί.



Σχήμα 5.15 Διάγραμμα κυμάτωσης ροπής μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Στο σχήμα (5.15), αντίστοιχα είναι το σχεδιάγραμμα της κυμάτωσης ροπής της μηχανής μεταβλητής αντίστασης το οποίο βρίσκεται εξίσου σε ικανοποιητικό επίπεδο της τάξης του 12%. Ποσοστό αρκετά χαμηλό για αυτό το τύπο μηχανών.^[12] Το οποίο θα αποτελέσει μια πολύ καλή βάση για την περαιτέρω βελτιστοποίηση της μηχανής.

Ο τύπος υπολογισμού της κυμάτωσης ροπής είναι ο εξής:

$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{sum}} * 100\% \quad (5.14)$$

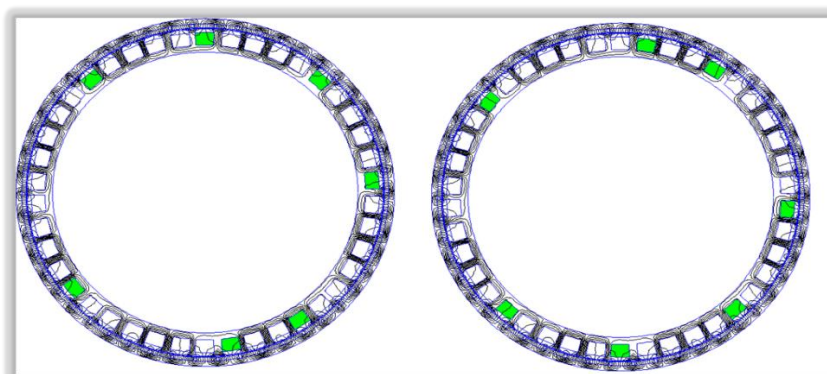
όπου T_{max} είναι η μέγιστη ροπή που επιτεύχθηκε κατά την σύγχρονη περιστροφή του δρομέα και των πυκνοτήτων, T_{min} είναι η ελάχιστη τιμή της ροπής και T_{sum} είναι το άθροισμα όλων των ροπών που προέκυψαν κατά την διαδικασία.

Το ποσοστό της κυμάτωσης της ροπής μας δείχνει πόσο ποιοτική θα είναι η απόδοση της ροπής στην πράξη. Αν και το μεγαλύτερο μέρος αυτών των ταλαντώσεων απορροφώνται από τον άξονα, είναι πάντα καλύτερο να έχουμε μια εποπτική αντίληψη του μεγέθους της κυμάτωσης της ροπής καθώς αυτή οδηγεί σε αυξημένες απώλειες και σε μηχανικές καταπονήσεις.

Υπολογισμός ΗΕΔ και της αρμονικής παραμόρφωσής της

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη ορίζεται ως το πηλίκο του έργου ανά μονάδα ηλεκτρικού φορτίου κατά μήκος μιας κλειστής ηλεκτρικής διαδρομής, το οποίο χρειάζεται να αποδοθεί στη μονάδα του φορτίου ώστε αυτό να διατρέξει έναν πλήρη κύκλο στη διαδρομή αυτή. Η ΗΕΔ μετριέται σε μονάδες: ενέργεια προς φορτίο, δηλαδή σε (V), στο διεθνές σύστημα μονάδων. Πρακτικά είναι η τάση που αποδίδει μία ηλεκτρική μηχανή κατά την λειτουργία γεννήτριας.

Κατά την λειτουργία κινητήρα εμφανίζεται το δυαδικό ανάλογο αυτού του μεγέθους, η αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη ισούται με τη μεταβολή της πεπλεγμένης ροής στο χρόνο. Δηλαδή μπορεί να υπολογιστεί από τον πολλαπλασιασμό της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα και του πηλίκου του διαφορικού της πεπλεγμένης ροής με το διαφορικό της γωνίας. Για την εύρεση της πεπλεγμένης ροής σε κάθε περιστροφή του δρομέα, μέσω του προγράμματος FEMM, πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η μαγνητική ροή, για τον υπολογισμό της οποίας πρέπει να επιλεχθούν οι αύλακες της φάσης A και να υπολογιστεί το μαγνητικό δυναμικό A.



Σχήμα 5.16 Στιγμιότυπο μηχανής επιφανειακών μόνιμων μαγνητών με επιλεγμένες τις αύλακες της φάσης A

Στο σχήμα (5.16), δίνεται ένα παράδειγμα επιλογής των αυλάκων της φάσης A, στη γεωμετρία της μηχανής μόνιμων μαγνητών. Αφού υπολογιστούν οι τιμές του διανυσματικού

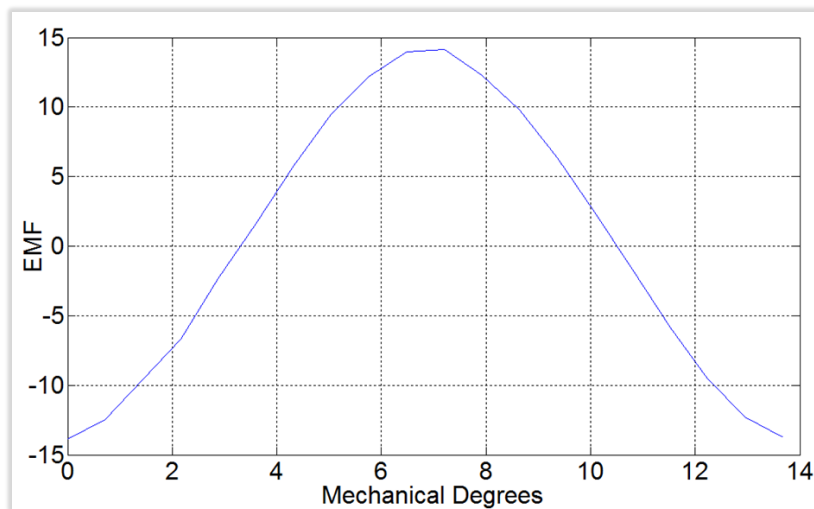
δυναμικού για της φάσης +A και -A τότε με βάση τον παρακάτω τύπο υπολογίζεται η μαγνητική ροή που δημιουργείται λόγω της φάσης A.

$$\Phi_A = \frac{(A_{plus} - A_{minus}) * N_i}{S_{slot}} \quad (5.15)$$

όπου, A_{plus} είναι η τιμή του διανυσματικού δυναμικού για την φάση +A, A_{minus} είναι η τιμή του διανυσματικού δυναμικού για την φάση -A, N_i είναι ο αριθμός των σπειρών και S_{slot} είναι η επιφάνεια της αύλακας. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται τόσες φορές όσες ορίζει ο αριθμός επαναλήψεων. Έπειτα χρησιμοποιώντας τον τύπο (5.16) υπολογίζεται η αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη.

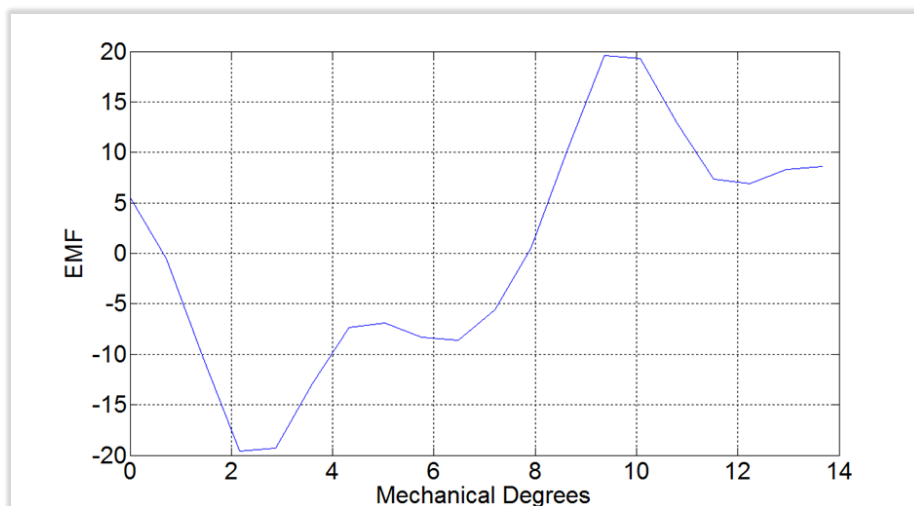
$$EMF = \frac{2\pi * n_s}{60} * \frac{\Phi_A(t+1) - \Phi_A(t)}{d\theta} \quad (5.16)$$

όπου, n_s συμβολίζει τις στροφές της μηχανής σε στροφές ανά λεπτό και Φ_A συμβολίζει τη μαγνητική ροή της φάσης A.



Σχήμα 5.17 Κυματομορφή αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης μηχανής επιφανειακών μόνιμων μαγνητών

Στο σχήμα (5.17), απεικονίζεται η κυματομορφή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης της μηχανής μόνιμων μαγνητών. Και πάλι η τιμή και αυτού του μεγέθους βρίσκεται μέσα στα όρια καθώς έχει οριστεί σαν κατάλληλη τιμή της τάσης με βάση την υπάρχουσα τροφοδοσία η τιμή των 11V.



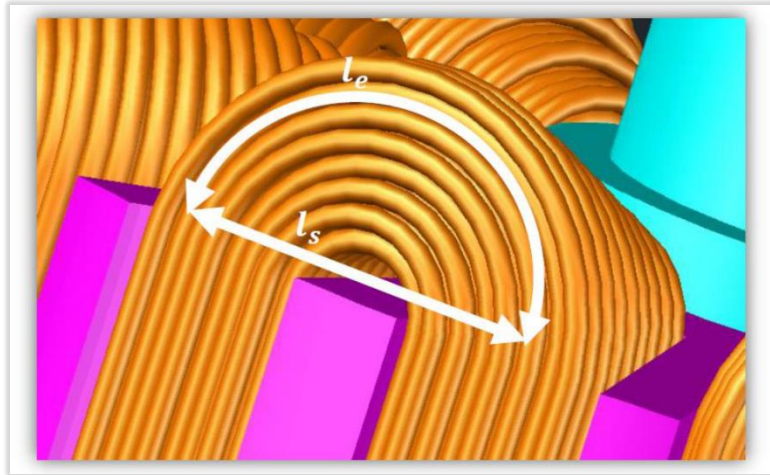
Σχήμα 5.18 Κυματομορφή αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Η κυματομορφή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης για τη μηχανή μεταβλητής αντίστασης φαίνεται στο σχήμα (5.18) στο οποίο γίνεται εμφανές το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης, με την 3^η αρμονική να κατέχει ένα μεγάλο ποσοστό της συνολικής τάσης. Επίσης παρατηρείται ότι η τάση είναι κάπως αυξημένη κάτι το οποίο μπορεί να ρυθμιστεί με την μείωση του αριθμού των σπειρωμάτων.

Από τα παραπάνω σχήματα δεν μπορεί να βγει συμπέρασμα για την τιμή της ενεργού τιμής της ηλεκτρεγερτικής δύναμης (EMF) καθώς περιλαμβάνουν μια σειρά από αρμονικές παραμορφώσεις. Επομένως για τον υπολογισμό της ενεργού τιμής δημιουργήθηκε κώδικας ο οποίος κάνει μετασχηματισμό Fourier του σήματος της ηλεκτρεγερτικής δύναμης (EMF) και έτσι μπορούμε πλέον να ξεχωρίσουμε τις διαφορετικές αρμονικές και να κρατήσουμε μόνο τη θεμελιώδη που μας ενδιαφέρει.

Υπολογισμός ωμικών απωλειών

Για τον υπολογισμό των ωμικών απωλειών των μηχανών είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η αντίσταση των πηνίων. Στην αρχή υπολογίζεται το μήκος της μιας σπείρας, έπειτα με πολλαπλασιασμό με τον αριθμό των σπειρών βρίσκεται το μήκος του κάθε πηνίου της φάσης A, και τέλος πολλαπλασιάζοντας με τον Έχοντας το μήκος των καλωδίων και τη διατομή των καλωδίων, όπως και την ειδική αντίσταση του χαλκού υπολογίζονται οι ωμικές απώλειες της μηχανής.



Σχήμα 5.19 Άκρα τυλίγματος ηλεκτρικής μηχανής^[6]

Γίνεται σαφές από το σχήμα ότι το μήκος των άκρων των τυλιγμάτων δεν ισούται με την απλή απόσταση των δύο αυλάκων λόγω την καμπύλωσης που υφίστανται το τύλιγμα για την τοποθέτηση του μέσα στην αυλάκα. Ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του πραγματικού μήκους της μιας σπείρας είναι ο (5.17):

$$l_{wire} = 2 * l_e + 2 * L \quad (5.17)$$

$$l_e = 1.2 * l_s \quad (5.18)$$

όπου l_s είναι το κανονικό μήκος ανάμεσα σε δύο αυλάκες, l_e το πραγματικό μήκος στα άκρα του τυλίγματος όπως φαίνεται και στο σχήμα (5.19) και L το ενεργό μήκος της μηχανής. Από τον τύπο (5.17) έχουμε το μήκος της μιας σπείρας. Οπότε για να βρούμε το μήκος όλων των πηνίων της φάσης A πολλαπλασιάζουμε με τον αριθμό των σπειρών (N_t) σε ένα πηνίο και με τον αριθμό των αυλάκων της φάσης A (s) όπως φαίνεται στον παρακάτω τύπο:

$$l_A = N_t * l_{wire} * s \quad (5.19)$$

Έχοντας το μήκος της φάσης A βρίσκουμε την αντίσταση της φάσης A ως εξής:

$$R_A = \frac{l_A * \rho_c}{w_{cros}} \quad (5.20)$$

όπου ρ_c είναι η ειδική αντίσταση του χαλκού και w_{cros} η διατομή των καλωδίων. Η ειδική αντίσταση του χαλκού βρέθηκε από τον τύπο (5.21) λόγω της αλλαγής της αντίστασης ενός υλικού με βάση τη θερμοκρασία του υλικού.

$$\rho_c = \rho_{0c} * (1 + a_{copper} * (T_{n0} - T_0)) \quad (5.21)$$

όπου, $p_{0c} = 1,72 * 10^{-5} \Omega mm$, a_{copper} είναι σταθερά μεταβολής της αντίστασης, $T_0 = 20^\circ C$ και $T_{n0} = 70^\circ C$. Τελικά οι συνολικές ωμικές απώλειες προκύπτουν από τον τύπο:

$$R_{losses} = 3 * I^2 * (R_A) \quad (5.22)$$

όπου I είναι το ρεύμα γραμμής το οποίο υπολογίζεται από τον τύπο (5.23), ως το γινόμενο της πυκνότητας ρεύματος, επί το ποσοστό πληρότητας της αύλακας από χαλκό και του πηλίκου της επιφάνειας της αύλακας με τον αριθμό των τυλιγμάτων.

$$I = J * ff * \frac{S_{slot}}{N_i} \quad (5.23)$$

όπου J είναι η πυκνότητα ρεύματος, ff ο συντελεστής πληρότητας της αύλακας, S_{slot} η επιφάνεια της αύλακας και n ο αριθμός των ελιγμάτων στην αύλακα.

Υπολογισμός απωλειών πυρήνα

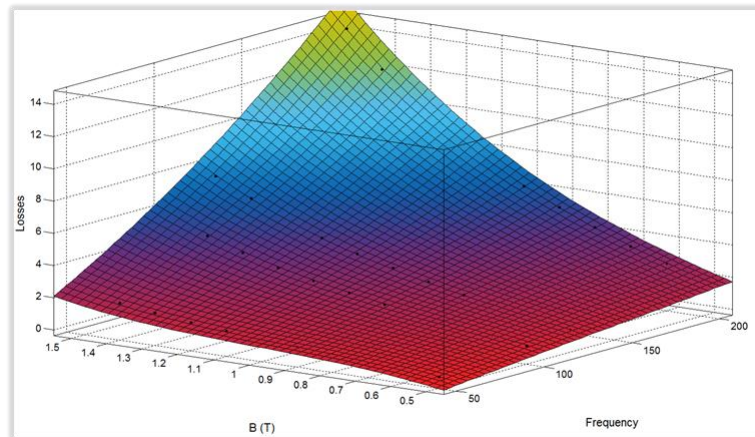
Για τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα, χρησιμοποιήθηκε η καμπύλη απωλειών του σιδήρου που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των μηχανών. Στον πίνακα (5.4) συνοψίζονται οι τιμές απωλειών του σιδήρου M235 για τιμές συχνότητας 50 Hz, 100 Hz, 125 Hz και 200 Hz.

Πίνακας 5.4: Απώλειες M235-35A για διάφορες συχνότητες και εντάσεις μαγνητικού πεδίου (W/kg)

B(T)	f = 50 Hz	f = 100 Hz	f = 125 Hz	f = 200 Hz
0.5	0.33	0.77	1.0156	1.88
0.6	0.45	1.04	1.2953	2.55
0.7	0.57	1.34	1.7719	3.3
0.8	0.71	1.66	2.2	4.13
0.9	0.85	2.01	2.6703	5.03
1	1.02	2.39	3.1828	6.03
1.1	1.19	2.81	3.7484	7.13
1.2	1.4	3.3	4.4047	8.39
1.3	1.64	3.88	5.1813	9.88
1.4	1.95	4.61	6.1859	11.93
1.5	2.27	5.36	7.2344	14.14
1.6	2.59	6.22		
1.7	2.92			
1.8	3.13			

Παίρνοντας τις τιμές του πίνακα (5.4) και βάζοντας τις σαν είσοδο στην εφαρμογή Προσαρμογής Καμπύλης (Curve Fitting) του προγράμματος MATLAB αποκτάται μια εξίσωση δύο μεταβλητών. Κατά την εκτέλεση το πρόγραμμα μέσω του βαθμού ευαισθησίας που έχει επιλεγεί, προσπαθεί να βρει την καταλληλότερη επιφάνεια η οποία θα περιέχει τα σημεία του παραπάνω πίνακα, σε τρεις διαστάσεις. Αφού βρεθεί η επιφάνεια αυτή το πρόγραμμα παρέχει την εξίσωση η οποία περιγράφει την παραπάνω επιφάνεια. Στην εξίσωση αυτή η μία μεταβλητή

είναι η συχνότητα και η άλλη η ένταση του μαγνητικού πεδίου. Στο σχήμα (5.20), παρουσιάζεται η επιφάνεια που έφτιαξε το πρόγραμμα Προσαρμογής Καμπύλης. Η εξίσωση η οποία περιγράφει αυτή την επιφάνεια είναι η (5.24).



Σχήμα 5.20 Απεικόνιση Προσαρμογής Καμπύλης (Curve Fitting)

$$F(f, B) = p_{00} + p_{10} * f + p_{01} * B + p_{20} * f^2 + p_{11} * B * f + p_{02} * B^2 + p_{30} * f^3 + p_{21} * f^2 * B + p_{12} * f * B^2 + p_{03} * B^3 \quad (5.24)$$

Πίνακας 5.5 Μεταβλητές εξίσωσης επιφάνειας απωλειών σιδήρου

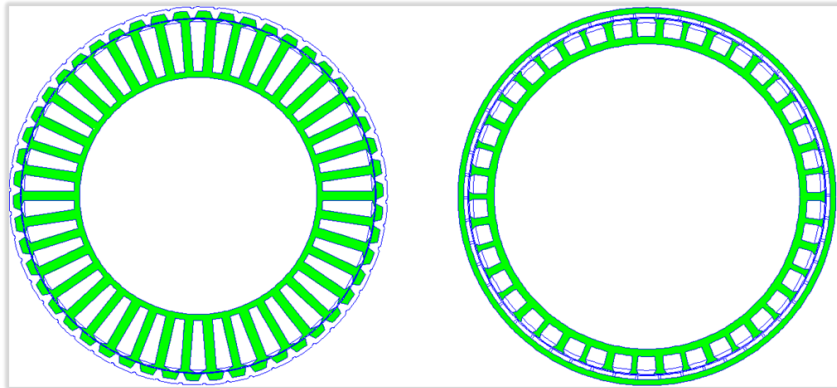
Μεταβλητές	Σύμβολο
Συχνότητα	f
Πυκνότητα μαγνητικού πεδίου	B
Απώλειες	F
Σταθερές	$p_{i,j}$

Με την παραπάνω εξίσωση (5.24) υπολογίζονται οι απώλειες του πυρήνα (F) σε οποιοδήποτε σημείο, αρκεί να είναι γνωστή η συχνότητα και η ένταση του μαγνητικού πεδίου. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στην επίλυση του προβλήματος το πρόγραμμα FEMM διακρίτοποιεί την περιοχή του προβλήματος χρησιμοποιώντας τριγωνικά στοιχεία. Μέσω του κώδικα είναι δυνατή η χρησιμοποίηση των χαρακτηριστικών αυτών των τριγωνικών στοιχείων. Χαρακτηριστικά των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν είναι η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου και το εμβαδό τους. Γνωρίζοντας τα δύο αυτά χαρακτηριστικά του κάθε τριγώνου και με τη βοήθεια της εξίσωσης των απωλειών του σιδήρου (5.24) υπολογίστηκαν οι απώλειες πυρήνα των μηχανών.

Υπολογισμός βάρους

Για τον υπολογισμό του βάρους των μηχανών χρησιμοποιήθηκε μια άλλη επιλογή που δίνει το πρόγραμμα FEMM. Κατά την δημιουργία των γεωμετριών των μηχανών, στο προεπεξεργαστή του προγράμματος, οι διάφορες περιοχές έχουν κάποιες ιδιότητες όπως είναι

το χαρακτηριστικό τους όνομα. Επιλέγοντας την κάθε περιοχή μέσω του FEMM μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η επιφάνεια αυτής της περιοχής.



Σχήμα 5.21 Επιλογή σιδήρου της μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (αριστερά) και της μηχανής μόνιμων μαγνητών (δεξιά)

Επιλέγοντας όπως φαίνεται στο σχήμα (5.21) τις περιοχές του σιδήρου της μηχανής μέσω του FEMM υπολογίζεται η επιφάνεια του σιδήρου (C_{iron}) και έπειτα με πολλαπλασιασμό με το ενεργό μήκος της μηχανής (L) προκύπτει ο όγκος του. Τέλος το βάρος του σιδήρου (W_{iron}) υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τον όγκο του με την πυκνότητα του σιδήρου (d_{iron}). Όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$W_{iron} = C_{iron} * L * d_{iron} \quad (5.25)$$

Όσο αφορά το βάρος των μαγνητών (W_{magnet}), στην μηχανή μόνιμων μαγνητών, υπολογίζεται με αντίστοιχο τρόπο.

$$W_{magnet} = C_{magnet} * L * d_{magnet} \quad (5.26)$$

όπου C_{magnet} είναι η συνολική επιφάνεια των μαγνητών και d_{magnet} είναι η πυκνότητα των εν λόγω μαγνητών.

Τέλος υπολογίζεται το βάρος του χαλκού (W_{cop}). Έχοντας από τον υπολογισμό της αντίστασης το μήκος του χαλκού της μηχανής (L_{cop}), πολλαπλασιάζοντας με την διατομή του καλωδίου (C_{wire}) προκύπτει ο όγκος του χαλκού και πολλαπλασιάζοντας με την πυκνότητα αυτού (d_{copper}) τελικά υπολογίζεται το βάρος του.

$$W_{cop} = L_{cop} * C_{wire} * d_{copper} \quad (5.27)$$

Τελικά το βάρος της κάθε μηχανής ισούται με το άθροισμα του βάρους του σιδήρου, των μαγνητών και του χαλκού της μηχανής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

6.1 Εισαγωγή

Μέχρι στιγμής έχουν παρουσιαστεί οι διαδικασίες και οι μέθοδοι υπολογισμού που χρησιμοποιήθηκαν κατά την παραμετροποιημένη σχεδίαση των κινητήρων. Το επόμενο στάδιο είναι η βελτιστοποίηση των γεωμετριών των μηχανών που έχουν σχεδιαστεί. Πριν γίνει παρουσίαση της μεθόδου που ακολουθήθηκε για την βελτιστοποίηση των κινητήρων, θα γίνει αναφορά και ανάλυση των μεθόδων βελτιστοποίησης που υπάρχουν και το λόγο για τον οποίο τελικά επιλέχθηκε η συγκεκριμένη μέθοδος που ακολουθήθηκε.

6.2 Θεμελιώδεις αρχές βελτιστοποίησης

Με τον όρο βελτιστοποίηση γίνεται αναφορά στην διαδικασία της εύρεσης και σύγκρισης εφικτών λύσεων, σε ένα πρόβλημα, μέχρι να μην μπορεί να βρεθεί κάποια καλύτερη λύση. Όσο αφορά την επίλυση του προβλήματος, αυτή βασίζεται σε ένα σύνολο αποφάσεων που μπορούν να παρθούν και αξιολογήσεων των επιπτώσεων κάθε απόφασης.

Για παράδειγμα σε ένα απλό πρόβλημα αγοράς αυτοκινήτου με εφικτές δύο λύσεις. Η πρώτη λύση είναι η αγορά ενός ακριβού αυτοκινήτου (A) με πολύ καλή αξιοπιστία και η δεύτερη λύση είναι η επιλογή ενός φτηνότερου αυτοκινήτου (B) με μειωμένη εξίσου αξιοπιστία. Σε αυτό το παράδειγμα οι αποφάσεις που μπορούν να παρθούν είναι είτε η αγορά του αυτοκινήτου A είτε η επιλογή του αυτοκινήτου B. Οι επιπτώσεις των αποφάσεων αυτών είναι αντίστοιχα, για την επιλογή A είναι το αυξημένο κόστος με αντάλλαγμα την αξιοπιστία, ενώ για την επιλογή B είναι το μειωμένο κόστος με αντάλλαγμα το μικρότερο χρόνο ζωής του αυτοκινήτου. ^{[17][18]}

Αν κάθε μια από τις εναλλακτικές αποφάσεις, οι οποίες ικανοποιούν τους περιορισμούς, μπορεί να περιγραφεί από ένα σύνολο (x_1, x_2, \dots, x_n) και αν για κάθε τέτοια περιγραφή μπορεί να αντιστοιχιστεί ένα πραγματικό μέτρο επίδοσης, τότε ως βέλτιστη θεωρείται η απόφαση που μεγιστοποιεί το μέτρο της επίδοσης.

Στο παράδειγμα με την επιλογή αμαξιού, τα (x_1, x_2) είναι αντίστοιχα η τιμή του αυτοκινήτου και η αξιοπιστία του. Αν ήταν εφικτό να αντιστοιχιστεί ένα μέτρο επίδοσης τότε η βέλτιστη απόφαση θα ήταν αυτή που θα είχε το μέγιστο μέτρο επίδοσης.

Σύμφωνα με τον ορισμό του Pierre:

Ένα σύστημα είναι βέλτιστο ως προς ένα δεδομένο μέτρο επίδοσης και ένα δεδομένο σύνολο περιορισμών, εφόσον λειτουργεί/αποδίδει τουλάχιστον ίσα αν όχι καλύτερα από κάθε σύστημα που ικανοποιεί τους ίδιους περιορισμούς

Ο πληρέστερος από τους σύγχρονους ορισμούς του συστήματος είναι αυτός των Mays and Tung :

Ως σύστημα ορίζεται ένα σύνολο ανεξάρτητων μεταξύ τους στοιχείων που αλληλοεπιδρούν, το οποίο χαρακτηρίζεται από: (α) ένα σύνορο που καθορίζει αν ένα στοιχείο ανήκει στο σύστημα ή στο περιβάλλον, (β) αλληλοεπιδράσεις με το περιβάλλον (είσοδοι-έξοδοι), και (γ) σχέσεις μεταξύ των στοιχείων του και των εισόδων-εξόδων.

Βελτιστοποίηση πραγματικών συναρτήσεων

Κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης πραγματικών συναρτήσεων προσπαθούμε να ελαχιστοποιήσουμε τη τιμή της στοχικής συνάρτησης. Μια πραγματική συνάρτηση $f(x)$ ορισμένη στο $D \subseteq \mathbb{R}^n$ παρουσιάζει τοπικό ελάχιστο στο σημείο $x^* \in D$ όταν υπάρχει περιοχή $D_0 \subseteq D$ του x^* τέτοια ώστε για κάθε $x \in D_0$ να ισχύει:

$$f(x^*) \leq f(x) \quad (6.1)$$

Όταν επιπλέον ισχύει $D_0 \equiv D$ τότε το σημείο x^* καλείται ολικό ελάχιστο. Έστω $P = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ το βαθμωτό μέτρο επίδοσης ενός συστήματος, όπου $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ είναι μια πραγματική συνάρτηση ορισμένη στο πεδίο D και $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ το διάνυσμα στήλη των ανεξάρτητων μεταβλητών. Το μέτρο f καλείται στοχική συνάρτηση, ενώ οι συνιστώσες του x καλούνται μεταβλητές απόφασης του συστήματος. Το πεδίο ορισμού της συνάρτησης καλείται εφικτή περιοχή και συμβολίζεται με D . Το πεδίο τιμών, ονομάζεται χώρος αποτίμησης και συμβολίζεται με F . Θεωρώντας το μέτρο επίδοσης ως βαθμωτό μέγεθος, σε κάθε διάνυσμα x αντιστοιχεί μια πραγματική τιμή $P = f(x)$. Η τιμή αυτή αντιπροσωπεύει ένα κριτήριο του υπό μελέτη συστήματος, ως προς τις μεταβλητές εισόδου. Με βάση τα παραπάνω, το πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται ως εξής:

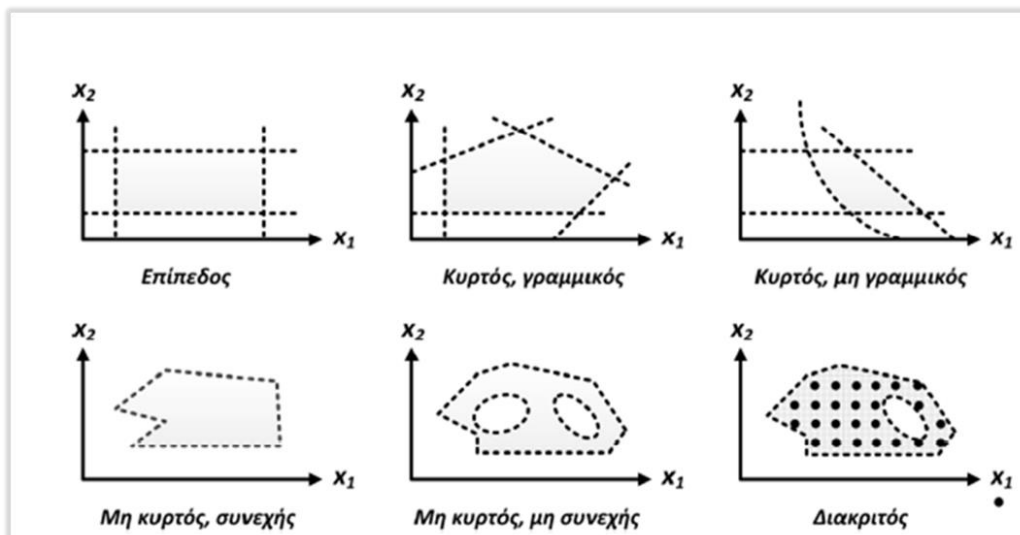
$$\min P = f(x), x \in D \quad (6.2)$$

Περιορισμοί προβλήματος

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω τα προβλήματα βελτιστοποίησης υπόκεινται σε κάποιους περιορισμούς στην αναζήτηση των ανεξάρτητων μεταβλητών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο χώρος D να περιορίζεται, κάτι που μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα τον αποκλεισμό ενός ολικού ελαχίστου της στοχικής συνάρτησης. Σε περίπτωση έλλειψης περιορισμών το πεδίο ορισμού D ταυτίζεται με το \mathbb{R}^n .

Ανάλογα με τους περιορισμούς που έχουν τεθεί, μεταβάλλεται η γεωμετρία του πεδίου ορισμού, οπότε και γίνεται απαραίτητη η διαφορετική προσέγγιση της λύσης του προβλήματος. Οι κατηγορίες που προκύπτουν είναι οι εξής:

- Συνεχή και διακριτά
- Γραμμικά και μη γραμμικά
- Κυρτά και μη κυρτά



Σχήμα 6.1 Αποτυπώσεις χώρων αναζήτησης^[5]

Στο σχήμα (6.1), παρουσιάζονται διαφορετικές διαμορφώσεις χώρων αναζήτησης, με άξονες τις μεταβλητές βελτιστοποίησης. Όπως φαίνεται και στα σχήματα η εξίσωση βελτιστοποίησης αποτελείται από δύο μεταβλητές και οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν τους περιορισμούς του προβλήματος. Ανάλογα με τους περιορισμούς που τίθενται κάθε φορά, αλλάζει η μορφολογία του χώρου αναζήτησης του προβλήματος.

Γενικώς, η κυρτότητα δηλώνει ότι κάθε γραμμικός συνδυασμός μεταξύ των σημείων, εγγυάται τη γέννηση νέων σημείων εντός του χώρου αναζήτησης. Όταν μια μη γραμμική συνάρτηση είναι κυρτή, η επιφάνεια απόκρισης περιλαμβάνει ένα και μόνο ακρότατο, που αντιστοιχεί και στην ολικώς βέλτιστη λύση. Αντίθετα όταν δεν υπάρχει κυρτότητα, το αποτέλεσμα είναι μια πιο πολύπλοκη γεωμετρία με πολλαπλά ακρότατα.

6.3 Κλασική βελτιστοποίηση

Για την διατύπωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης χρειάζονται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η στοχική συνάρτηση και οι περιορισμοί που έχει. Επίσης έχουμε θεωρήσει ότι η συνάρτηση αυτή είναι βαθμωτό μέγεθος και το πρόβλημα ανάγεται στην εύρεση των ανεξάρτητων μεταβλητών. Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος είναι η εξής:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (6.3)$$

$$\min P = f(x), x \in D \quad (6.4)$$

$$g_i(x) \otimes b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6.5)$$

όπου x είναι οι μεταβλητές απόφασης, $f()$ η στοχική συνάρτηση, $g_i()$ οι συναρτήσεις αριστερού μέλους των περιορισμών, το σύμβολο \otimes σημαίνει είτε \leq , είτε $=$, είτε \geq και b_i οι συντελεστές δεξιού μέλους των περιορισμών. Γενικά για την επίλυση προβλημάτων

βελτιστοποίησης ακολουθείται μια διαδικασία τυπικών βημάτων. Αυτή παρουσιάζεται παρακάτω:

1. Σχηματοποίηση υπό μελέτη συστήματος
2. Καθορισμός μεταβλητών απόφασης
3. Καθορισμός συνάρτησης στόχου
4. Μαθηματική έκφραση φυσικών διεργασιών – Κατάρτιση περιορισμών
5. Διάσπαση ή απλοποίηση του προβλήματος
6. Επίλυση με εφαρμογή τεχνικής βελτιστοποίησης
7. Έλεγχος αποτελεσμάτων – Ανάλυση ευαισθησίας

Για τον γραμμικό προγραμματισμό, όπως και για κάθε τεχνική μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης ο κύριος στόχος είναι ο εντοπισμός μιας μονοσήμαντης λύσης του προβλήματος. Αυτό είναι και το βασικό μειονέκτημα, καθώς σε πολύπλοκα συστήματα η χρήση ενός και μόνο κριτηρίου βελτιστοποίησης είναι μη ρεαλιστική αντιμετώπιση του προβλήματος.^{[17][18]}

6.4 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση

Τα προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης είναι πολύ διαφορετικά από αυτά της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης. Πλέον μιλάμε για πολλαπλά κριτήρια τα οποία πρέπει να ελεγχθούν ως προς την επίδοσή τους, δεχόμενοι ότι η ελαχιστοποίηση του ενός μπορεί να προκαλέσει μεγιστοποίηση κάποιου άλλου. Επίσης δεν γίνεται πλέον αναζήτηση ενός μοναδικού ακροτάτου σαν λύση του προβλήματος, αλλά ενός συνόλου σημείων. Κατά αναλογία με την μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση, το πρόβλημα της πολυκριτηριακής ορίζεται ως εξής:

$$P = [P_1, P_2, \dots, P_m]^T = f(x) \quad (6.6)$$

όπου $f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)]^T$ συνάρτηση-διάνυσμα στήλη ορισμένη στο $D \subseteq R^n$ και $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ το διάνυσμα των ανεξάρτητων μεταβλητών. Οι συνιστώσες $P_i = f_i(x)$ της διανυσματικής συνάρτησης είναι οι αποτιμήσεις m κριτηρίων του συστήματος. Έτσι το πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, διατυπώνεται ως εξής:

$$\min f(x), x \in D \quad (6.7)$$

Υπό τους περιορισμούς:

$$l_i \leq x_i \leq u_i \quad (6.8)$$

και συχνά

$$l_j \leq P_j \leq u_j \quad (6.9)$$

Αν το κάθε κριτήριο μπορεί να ελαχιστοποιηθεί χωρίς να επηρεάσει την ελαχιστοποίηση κάποιου άλλου, δηλαδή αν κάθε κριτήριο μπορεί να ελαχιστοποιηθεί ανεξάρτητα από όλα τα άλλα κριτήρια, το πρόβλημα μετασχηματίζεται σε επίλυση m -μονοκριτηριακών προβλημάτων. Αν όμως τα κριτήρια είναι αντικρουόμενα κάθε σημείο δεν είναι βέλτιστο για τουλάχιστον ένα κριτήριο. Άρα δεν υπάρχει μονοσήμαντα ορισμένη λύση για το πρόβλημα.

6.5 Κυριαρχία

Στα περισσότερα πολυκριτηριακά προβλήματα γίνεται αναφορά στην κυριαρχία της μιας λύσης πάνω σε μια άλλη. Μια λύση x_1 κυριαρχεί μια άλλη x_2 όταν ισχύουν δύο συνθήκες. Πρώτον, η λύση x_1 δεν είναι χειρότερη της λύσης x_2 σε κανένα από τα κριτήρια του προβλήματος. Δεύτερον, η λύση x_1 είναι ισχυρά καλύτερη από την λύση x_2 σε τουλάχιστον ένα κριτήριο. Οι σχέσεις κυριαρχίας που μπορεί να προκύψουν ανάμεσα σε δύο λύσεις είναι οι εξής:

- Αν $f(a) < f(b)$ τότε το a κυριαρχεί ισχυρώς το b
- Αν $f(a) \leq f(b)$ τότε το a κυριαρχεί ασθενώς το b
- Αν $f(a) \sim f(b)$ τότε το a είναι αδιάφορο του b

Επομένως ένα σημείο x^ είναι βέλτιστο, εφόσον δεν υπάρχει άλλο εφικτό σημείο $x \in D$ ούτως ώστε $f(x) \leq f(x^*)$, δηλαδή δεν υπάρχει εφικτό σημείο που να κυριαρχεί επί του x^* .*

Ο παραπάνω ορισμός μας δίνει όμως μία λύση ως βέλτιστη κάτι το οποίο δεν γίνεται στα πολυκριτηριακά προβλήματα. Η λύση αυτή ονομάζεται ουτοπικό διάνυσμα. Ένας πιο σωστός ορισμός είναι ο παρακάτω.

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

Από τον τελευταίο ορισμό προκύπτει ότι η βέλτιστη λύση δεν είναι μόνο μία. Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι συνήθως θα υπάρχει ένα σύνολο λύσεων οι οποίες μεταξύ τους δεν υπάρχει κάποια που να κυριαρχεί κάποια άλλη, αλλά όλο το σύνολο αυτών των λύσεων κυριαρχούν οποιαδήποτε άλλη λύση του προβλήματος. Αυτό το σύνολο μη-κυριαρχημένων λύσεων ονομάζεται Pareto set. Η απεικόνιση όλων αυτών των λύσεων στο μ -διάστατο πεδίο αποτίμησης ορίζει ένα υποσύνολο που ονομάζεται μέτωπο Pareto. Κάθε τέτοιο σημείο, 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. Προφανώς γίνεται εμφανές ότι στο τέλος έχουμε παραπάνω από μία λύσεις για το εκάστοτε πρόβλημα και έρχεται η στιγμή που πρέπει να επιλεγεί μόνο μία λύση. Για την επιλογή αυτή πρέπει να προστεθούν κάποια επιπλέον κριτήρια και περιορισμοί από τον σχεδιαστή, ώστε να καταστεί εφικτή η επιλογή της προτιμότερης λύσης. Επομένως παρά την βελτιστοποίηση που έγινε η τελική απόφαση παραμένει υποκειμενική.^{[17][18]}

Για την επίλυση της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται διάφοροι αλγόριθμοι. Οι κυριότερες κατηγορίες είναι:

- Αλγόριθμοι που βασίζονται σε αναλογικές μεθόδους. Σε αυτή την κατηγορία γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων κάθε φορά με βάση τον υπολογισμό της παραγώγου του πεδίου αποτίμησης, πράγμα που δεν είναι πάντα εφικτό, λόγω πιθανόν ασυνεχειών και μη παραγωγισιμότητας.
- Αλγόριθμοι αριθμητικών μεθόδων. Σε αυτή τη κατηγορία το βέλτιστο αναζητείται μέσα από πεπερασμένους υποψηφίους, υπολογίζοντας για καθέναν από αυτούς το αποτέλεσμα της συνάρτησης στόχου. Λόγω της απλότητας εφαρμόζονται σε περιπτώσεις μικρού υπολογιστικού κόστους.
- Αλγόριθμοι στοχαστικών μεθόδων, που προτιμώνται σε περιπτώσεις πολύ μεγάλου χώρου αναζήτησης, όπου και εφαρμόζονται πολύπλοκες διαδικασίες. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι γενετικοί και εξελικτικοί αλγόριθμοι, όπως αυτοί που επιλέξαμε στην περίπτωση μας.

6.6 Εξελικτικοί αλγόριθμοι

Οι περισσότεροι εξελικτικοί αλγόριθμοι βασίζονται τόσο στον τρόπο με τον οποίο εξελίσσονται και διαγωνίζονται τα είδη στην φύση, όσο και στον τρόπο με τον οποίο βελτιώνεται το εκάστοτε είδος αποκτώντας κάποια χαρακτηριστικά τα οποία δημιουργούνται με το πέρασμα των γενεών. Με βάση λοιπόν τη φύση δημιουργούνται αλγόριθμοι οι οποίοι προσομοιώνουν την εξέλιξη πληθυσμών, οι οποίοι στην ουσία αποτελούνται από τις λύσεις του πολυκριτηριακού προβλήματος. Οι υπολογιστικές διαδικασίες οι οποίες ακολουθούνται αφορούν κυρίως:

- Τη φυσική διαλογή, σύμφωνα με την οποία τα ισχυρότερα μέλη ενός πληθυσμού είναι πιο πιθανό να επιζήσουν.
- Την αναπαραγωγή ή ανασυνδυασμό, σύμφωνα με την οποία κάποια χαρακτηριστικά των γονέων μεταφέρονται στα παιδιά μέσω της διαδικασίας της διασταύρωσης.
- Την μετάλλαξη σύμφωνα με την οποία τυχαίες αλλαγές συμβαίνουν στα χαρακτηριστικά των απογόνων οδηγώντας σε διαφοροποίηση των ειδών.

Ο πληθυσμός, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αποτελείται από ένα σύνολο ατόμων όπου κάθε άτομο δεν είναι τίποτα άλλο από μία εφικτή λύση του προβλήματος. Για κάθε άτομο η

θέση του στο χώρο απαρτίζει τα γενετικά του χαρακτηριστικά. Όπως και στη φύση έτσι και εδώ έχουμε τις διαδικασίες της μετάλλαξης και της διασταύρωσης. Η μετάλλαξη αφορά την τυχαία μεταβολή κάποιων χαρακτηριστικών ενός ατόμου ενώ η διασταύρωση αφορά η διαιώνιση κάποιων χαρακτηριστικών των γονέων μέσω των παιδιών.

Το μέγεθος του πληθυσμού επιλέγεται από το χρήστη και δεν αλλάζει συνήθως κατά την διαδικασία της βελτιστοποίησης. Η πρώτη γενιά δημιουργείται με τυχαίο τρόπο. Έπειτα σε κάθε άτομο του πρώτου πληθυσμού αντιστοιχίζεται και μια πιθανότητα επιβίωσης καθώς και μία πιθανότητα ζευγαρώματος ανάλογα με το πόσο καλά χαρακτηριστικά έχει. Ανάλογα με τις πιθανότητες ζευγαρώματος των ατόμων αντιγράφονται τα πιο ικανά στη λεγόμενη δεξαμενή ζευγαρώματος, ενώ είναι πιθανό πολλές φορές να μεταφερθούν εκεί και όχι και τόσο ικανά άτομα. Μέτρο της ικανότητας επιβίωσης είναι ο βαθμός καταλληλότητας. Οι συνηθέστεροι μηχανισμοί επιλογής είναι οι εξής:

- Επιλογή μέσω του «τροχού της ρουλέτας». Σε αυτή τη διαδικασία διαμορφώνεται ένας εικονικός τροχός, με πλήθος εγκοπών όσο και το μέγεθος του πληθυσμού, ενώ το πλάτος κάθε εγκοπής είναι ανάλογο του βαθμού καταλληλότητας κάθε ατόμου, έτσι ώστε κάθε άτομο να έχει μη μηδενική πιθανότητα επιλογής.
- Επιλογή με διαγωνισμό. Επιλέγονται τυχαία δύο ή περισσότερα μέλη του πληθυσμού, και το ισχυρότερο εξ αυτών αντιγράφεται στο βοηθητικό σύνολο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται τόσες φορές όσες απαιτείται για να συμπληρωθεί το μέγεθος του πληθυσμού.
- Εκλεκτισμός. Η τρέχουσα βέλτιστη λύση στον πληθυσμό αντιγράφεται πάντοτε στη δεξαμενή ζευγαρώματος, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος να χαθεί εξαιτίας της τυχαιότητας της διαδικασίας επιλογής.
- Επιλογή βαθμολόγησης. Η μέθοδος αυτή μειώνει την πίεση της επιλογής όταν η διασπορά των τιμών της συνάρτησης κόστους είναι μεγάλη και την αυξάνει σε αντίθετη περίπτωση με σκοπό την αντιμετώπιση του φαινομένου της πρώιμης σύγκλισης.
- Επιλογή σταθερής κατάστασης. Αντικαθίστανται λίγα άτομα σε κάθε γενιά σε αντίθεση με τις προηγούμενες μεθόδους. Ένας μικρός αριθμός των λιγότερο κατάλληλων ατόμων αντικαθίστανται από απογόνους των πιο ισχυρών χρωμοσωμάτων.

Αφού ολοκληρωθεί διαδικασία της επιλογής, και έχουν καθοριστεί τα άτομα του νέου πληθυσμού εφαρμόζεται η διαδικασία της διασταύρωσης. Από την δεξαμενή ζευγαρώματος επιλέγονται τυχαία ζεύγη ατόμων, τα οποία θα αποτελέσουν τους γονείς, μέσω του τελεστή διασταύρωσης, ανταλλάσσουν την γενετική τους πληροφορία, ώστε να παράγουν ισχυρότερους απογόνους, με δεδομένο ότι οι ισχυρότερες γονιδιακές δομές αντιγράφονται στις επόμενες γενεές. Για την απομίμηση του στοχαστικού χαρακτήρα της αντίστοιχης φυσικής διαδικασίας ορίζεται μια πιθανότητα διασταύρωσης της τάξης του 60-90%. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι διασταύρωσης, οι βασικότερες παρουσιάζονται παρακάτω:

- Διασταύρωση ενός σημείου
- Αριθμητική διασταύρωση
- Ευρετική διασταύρωση
- Διασταύρωση δέντρου

Μετά τη διασταύρωση του πληθυσμού, έρχεται η μετάλλαξη κάποιων ατόμων του πληθυσμού. Η διαδικασία αυτή επιφέρει τυχαίες τροποποιήσεις σε ένα πολύ μικρό ποσοστό του πληθυσμού, αποσκοπώντας στην αύξηση της ποικιλίας του πληθυσμού. Η συχνότητα της μετάλλαξης είναι της τάξης του 0.1-1%, ώστε να μην επιβραδύνεται η πορεία της σύγκλισης. Τα κυριότερα είδη μετάλλαξης είναι τα εξής:

- Ομοιόμορφη μετάλλαξη
- Οριακή μετάλλαξη
- Ανομοιόμορφη μετάλλαξη

Με το πέρας της μετάλλαξης ολοκληρώνεται η διαδικασία της δημιουργίας του νέου πληθυσμού. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού το οποίο έχει θέσει ο χρήστης την αρχή.^{[17][18]}

6.6.1 Ο αλγόριθμος SPEA-II

Ο αλγόριθμος SPEA-II είναι στην ουσία η εξέλιξη του αλγορίθμου SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm). Το νέο μοντέλο είναι μια προσπάθεια για εξάλειψη των μειονεκτημάτων του πρόγονού του. Οι βασικές διαφορές ανάμεσα στους δύο αλγόριθμους είναι:

- Η βελτιωμένη διαδικασία αποτίμησης βαθμών καταλληλότητας, η οποία λαμβάνει υπόψη για κάθε άτομο του πληθυσμού τον αριθμό των ατόμων που κυριαρχεί αλλά και τον αριθμό των ατόμων που κυριαρχεί.
- Η εκτίμηση της πυκνότητας των γειτονικών ατόμων, η οποία δίνει την δυνατότητα για μια πιο σωστή πορεία της διαδικασίας αναζήτησης.
- Περικοπή του εξωτερικού συνόλου, έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη οριακές λύσεις.

Ο αλγόριθμος αυτός λειτουργεί, δημιουργώντας ένα εξωτερικό αρχείο το οποίο έχει πάντα σταθερό μέγεθος. Δημιουργεί στην αρχή τον πρώτο πληθυσμό, έχοντας το εξωτερικό αρχείο άδειο. Έπειτα υπολογίζονται οι βαθμοί καταλληλότητας. Όλα τα μέλη του πληθυσμού τα οποία δεν κυριαρχούνται από κάποιο άλλο αντιγράφονται στο εξωτερικό αρχείο. Οποιοδήποτε κυριαρχημένο άτομο ή κάποιο το οποίο εμφανίζεται πάνω από μία φορά διαγράφεται από το αρχείο. Έπειτα αν το αρχείο έχει λιγότερα άτομα από ότι είναι το μέγεθος του, τότε συμπληρώνει τη διαφορά με τα καταλληλότερα κυριαρχημένα άτομα του πληθυσμού. Ένα από την άλλη το μέγεθος του αρχείου είναι μικρότερο από τον αριθμό των ατόμων που επιλέχθηκαν από τον πληθυσμό τότε επιλέγονται αυτά τα άτομα τα οποία βρίσκονται στις πιο πυκνές περιοχές του χώρου. Στη συνέχεια ελέγχεται αν έχουν εκπληρωθεί τα κριτήρια τερματισμού. Αν δεν ικανοποιήθηκαν τα κριτήρια τερματισμού πραγματοποιούνται οι διαδικασίες της διασταύρωσης και της μετάλλαξης του πληθυσμού. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να εκπληρωθούν τα κριτήρια τερματισμού. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθούνται.^{[19][20]}

Βήμα 1: Είσοδος μεγέθους πληθυσμού, μεγέθους αρχείου, μέγιστου αριθμού γενεών.

Βήμα 2: Αρχικοποίηση. Δημιουργία πρώτου πληθυσμού και κενού αρχείου.

Βήμα 3: Απόδοση βαθμών καταλληλότητας.

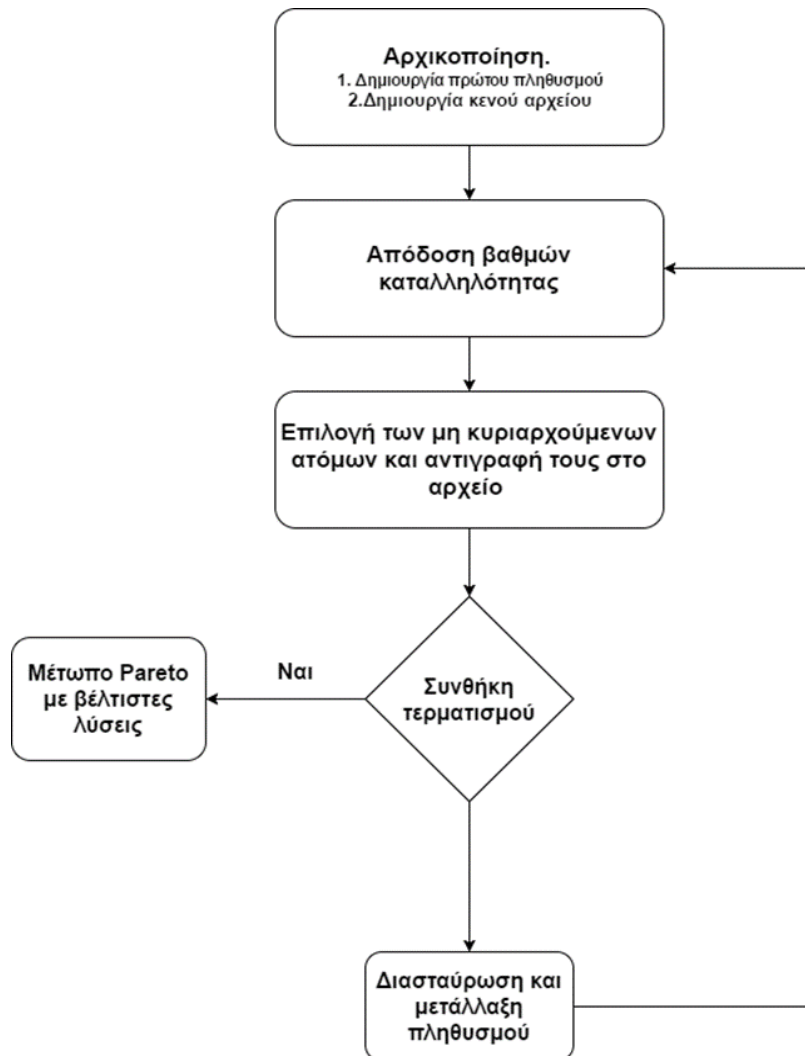
Βήμα 4: Επιλογή καταλληλότερων ατόμων του πληθυσμού και αντιγραφεί τους στο αρχείο.

Βήμα 5: Τερματισμός. Έλεγχος ικανοποίησης των κριτηρίων τερματισμού.

Βήμα 6: Διασταύρωση. Επιλογή ατόμων για διασταύρωση.

Βήμα 7: Διαφοροποίηση πληθυσμού. Επιλογή ατόμων για μετάλλαξη.

Για τον υπολογισμό των βαθμών καταλληλότητας πρέπει πρώτα να υπολογιστούν, η δύναμη του κάθε ατόμου, και η ωμή ή αλλιώς απλή καταλληλότητα. Για τον υπολογισμό της δύναμης του κάθε ατόμου υπολογίζεται το πλήθος των ατόμων το οποίο κυριαρχεί το συγκεκριμένο άτομο. Για τον υπολογισμό της απλής καταλληλότητας του κάθε ατόμου αθροίζονται οι δυνάμεις των ατόμων που κυριαρχούν το συγκεκριμένο άτομο. Είναι όμως αρκετά συχνό φαινόμενο να υπάρχουν πολλά άτομα τα οποία έχουν ίδιο μέγεθος απλής καταλληλότητας. Για αυτό το λόγο υπολογίζεται η εκτίμηση της πυκνότητας του κάθε ατόμου. Για τον υπολογισμό της πυκνότητας, πρώτα δημιουργείται για κάθε άτομο μία λίστα η οποία περιέχει το μέτρο της απόστασης του ατόμου από τα άλλα άτομα. Αυτή έπειτα ταξινομείται κατά αύξουσα σειρά και επιλέγουμε την απόσταση του ατόμου από το k -οστό άτομο. Το k ισούται με τη στρογγυλοποίηση της τετραγωνικής ρίζας του αθροίσματος του μεγέθους του πληθυσμού και του μεγέθους του αρχείου. Τελικά η πυκνότητα ισούται με το αντίστροφο αυτής της απόστασης.



Σχήμα 6.2 Δομικό διάγραμμα αλγορίθμου SPEA-II

Στο σχήμα (6.2), πραγματοποιείται αναπαράσταση του διαγράμματος ροής, των διαδικασιών που ακολουθούνται κατά την εκτέλεση του εξελικτικού αλγορίθμου SPEA-II, όπως αυτές παρουσιάζονται στα βήματα εκτέλεσής του.

6.6.2 Αλγόριθμος PESA-II

Ο δεύτερος αλγόριθμος ο οποίος ελέγχθηκε και τελικά προτιμήθηκε είναι ο PESA-II (Pareto Enveloped-based Selection Algorithm). Ο αλγόριθμος αυτός είναι η εξέλιξη της παλαιότερης έκδοσης PESA. Η διαφορά που παρουσιάζει σε σχέση με τον αλγόριθμο SPEA-II, είναι η διαφορετική προσέγγιση της απονομής βαθμών καταλληλότητας καθώς και τις διαφορετικές επιλογής των γονέων για τη διασταύρωση του πληθυσμού.

Ο PESA-II στην αρχή του προβλήματος δημιουργεί ένα αντικειμενικό χώρο με άξονες τα κριτήρια τα οποία πρέπει να ελαχιστοποιηθούν. Αυτόν τον χώρο τον διαιρεί σε υπέρ-κουτιά. Έπειτα υπολογίζεται η συνάρτηση κόστους για κάθε μέλος του αρχικού πληθυσμού και αντιγράφονται τα μέλη του πληθυσμού τα οποία δεν κυριαρχούνται σε ένα εξωτερικό αρχείο.

Κάθε μέλος του αρχείου τοποθετείται ανάλογα με την συνάρτηση κόστους του στον αντικειμενικό χώρο επομένως και σε κάποιο υπέρ-κουτί. Πλέον οι βαθμοί καταλληλότητας δεν αποδίδονται ατομικά σε κάθε μέλος αλλά σε κάθε υπέρ-κουτί του χώρου. Οι βαθμοί αυτοί προσδιορίζονται από τον αριθμό των ατόμων που περιέχονται σε κάθε υπέρ-κουτί. Πλέον οι βαθμοί αυτοί δεν ονομάζονται βαθμοί καταλληλότητας αλλά συντελεστές συμπίεσης. Αυτοί οι συντελεστές χρησιμοποιούνται για την επιλογή των γονέων για την διασταύρωση του πληθυσμού. Τα βήματα τα οποία ακολουθούνται στον αλγόριθμο αυτό φαίνονται παρακάτω.^[21]

Βήμα 1: Δημιουργία πρώτου πληθυσμού και δημιουργία κενού αρχείου.

Βήμα 2: Εύρεση μη-κυριαρχημένων μελών του πληθυσμού και αντιγραφή τους στο αρχείο. Έλεγχος για υπερχείλιση του αρχείου.

Βήμα 3: Δημιουργία αντικειμενικού χώρου και διαίρεση αυτού σε υπέρ-κουτιά. Απονομή συντελεστών συμπίεσης σε κάθε υπέρ-κουτί ανάλογα με τα μέλη που έχει.

Βήμα 4: Έλεγχος για ικανοποίηση των κριτηρίων και τερματισμός.

Βήμα 5: Επιλογή γονέων και διασταύρωση.

Βήμα 6: Επιλογή και μετάλλαξη μελών από τον πληθυσμό. Επιστροφή στο βήμα 2.

Η διαφορετική προσέγγιση στην επιλογή γονέων καθιστά πιθανό να επιλεγεί ένα υπέρ-κουτί το οποίο περιέχει λιγότερα μέλη από ότι ένα το οποίο περιέχει περισσότερα. Για να γίνει πιο κατανοητή η προσέγγιση αυτή δίνεται παρακάτω μια σύγκριση με του αλγορίθμου SPEA με τον PESA.

Έστω ότι έχουμε μία προσέγγιση του μετώπου Pareto με b κατειλημμένα υπέρ-κουτιά, με n_i μέλη σε κάθε κουτί και συνολικά P μέλη στα υπέρ-κουτιά, έτσι ώστε

$$\sum_{i=1}^b n_i = P \quad (6.10)$$

Υποθέτοντας τώρα ότι ένα υπέρ-κουτί (j) έχει τα περισσότερα μέλη έστω g μέλη, και έστω ότι το υπέρ κουτί (i) έχει τα λιγότερα μέλη έστω h μέλη. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του αλγορίθμου SPEA, η πιθανότητα να επιλεγεί ένα μέλος από το κουτί που έχει τα λιγότερα μέλη είναι:

$$p_1 = 1 - \left(\frac{P-h}{P}\right)^2 \quad (6.11)$$

και η πιθανότητα για το κουτί με περισσότερα μέλη είναι:

$$p_2 = \left(\frac{g}{P}\right)^2 \quad (6.12)$$

η αναλογία των δύο πιθανοτήτων είναι:

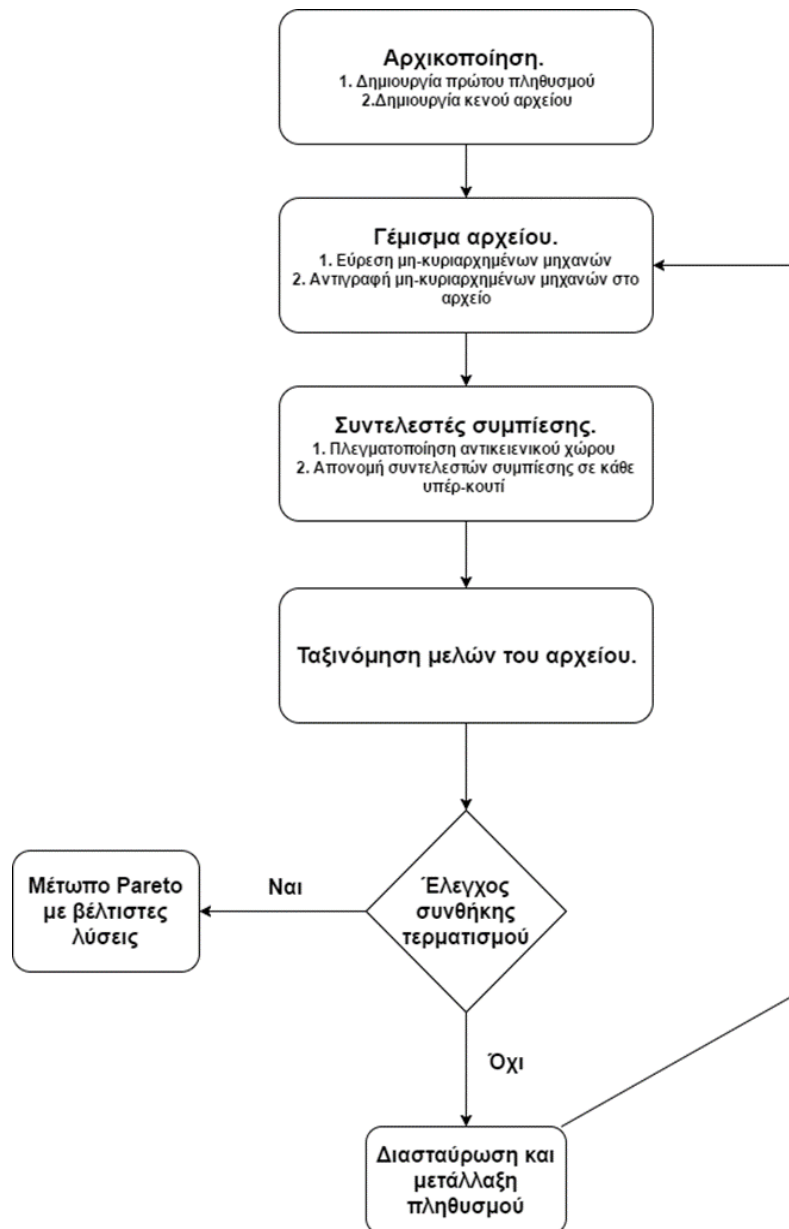
$$ratio = \frac{2 * P * h - h^2}{g^2} \quad (6.13)$$

Από την αναλογία αυτή φαίνεται ότι όταν το g είναι αρκετά μεγάλο σε σχέση με το h τότε η επιλογή ενός απομονωμένου μέλους μικραίνει απότομα. Σε αντίθεση χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του αλγορίθμου PESA η αναλογία των δύο πιθανοτήτων γίνεται:

$$ratio = 2 * b - 1 \quad (6.14)$$

ο τύπος αυτός όπως φαίνεται είναι ανεπηρέαστος από τον αριθμό των μελών που περιέχονται σε κάθε κουτί.

Για βαθύτερη κατανόηση θα δείξουμε πώς επιλέγονται τα μέλη στην εξής περίπτωση. Έστω ότι ο αριθμός των υπέρ-κουτιών είναι 2 και έστω ότι το ένα κουτί περιέχει 9 μέλη ενώ το άλλο μόνο 1. Τότε με βάση το αλγόριθμο SPEA η επιλογή του απομονωμένου μέλους είναι 0,19 ενώ η πιθανότητα να επιλεγεί οποιοδήποτε από τα άλλα εννιά μέλη είναι 0,81. Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο PESA η πιθανότητα να επιλεγεί το απομονωμένο μέλος είναι 0,75 ενώ η επιλογή οποιοδήποτε από τα εννιά μέλη είναι 0,25. Οπότε γίνεται σαφές ότι στον αλγόριθμο PESA η επιλογή κάποιου πιο απομονωμένου μέλους, ως γονέα, είναι αισθητά μεγαλύτερη από αυτή στον αλγόριθμο SPEA.

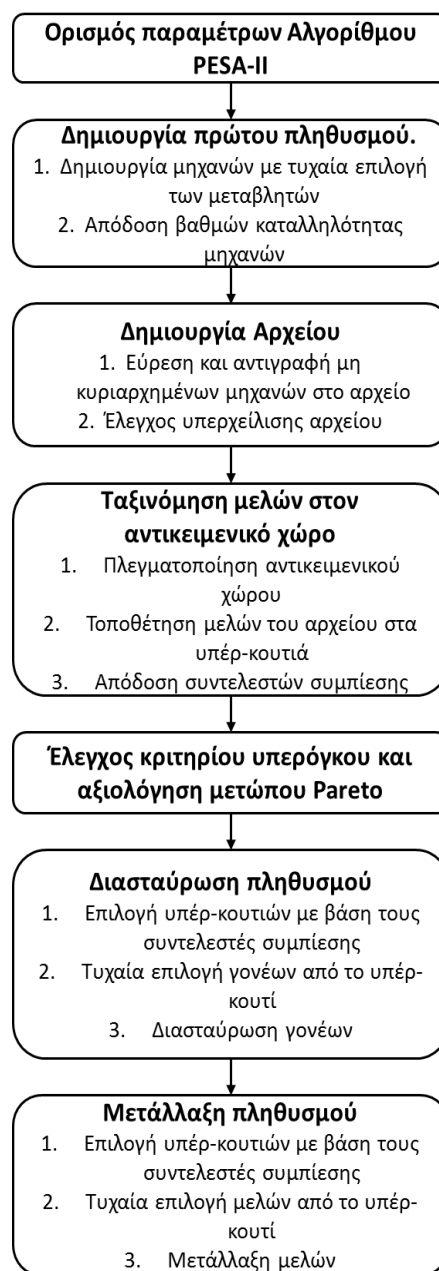


Σχήμα 6.3 Δομικό διάγραμμα αλγορίθμου PESA-II

Στο σχήμα (6.3), όπως και για τον αλγόριθμο SPEA, παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα λειτουργίας του εξελικτικού αλγορίθμου PESA-II. Όπως είναι φανερό, οι δύο αλγόριθμοι έχουν ίδια δομή λειτουργίας, με βασικότερες διαφορές, τον τρόπο με τον οποίο γίνεται απόδοση βαθμών κυριαρχίας των μελών του πληθυσμού και τον τρόπο με τον οποίο επιλέγονται τα μέλη του πληθυσμού, για τις διαδικασίες της διασταύρωσης και της μετάλλαξης του, πριν την εκκίνηση της επόμενης επανάληψης. Επί της ουσίας στον αλγόριθμο PESA-II η επιλογή δεν στηρίζεται, απόλυτα πάνω στα μέλη του πληθυσμού, στηρίζεται κυρίως στις θέσεις τις οποίες καταλαμβάνουν στον αντικειμενικό χώρο του προβλήματος.

6.7 Βελτιστοποίηση μηχανών

Για την βελτιστοποίηση των μηχανών, επιλέχθηκε ο αλγόριθμος PESA-II, καθώς κατέχει καλύτερα κριτήρια επιλογής μηχανών για την εξέλιξη και μετάλλαξη του πληθυσμού των μηχανών που θα δημιουργείται κάθε φορά. Τα βασικά εργαλεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ήταν, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο εξελικτικός αλγόριθμος PESA-II και τα προγράμματα MATLAB και FEMM. Στο κεφάλαιο 4 της παρούσας εργασίας έγινε εκτενής παρουσίαση της παραμετροποιημένης σχεδίασης των κινητήρων καθώς και των διαδικασιών που ακολουθήθηκαν για τον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών τους.



Σχήμα 6.4 Δομικό διάγραμμα αλγορίθμου βελτιστοποίησης

Στο σχήμα (6.4), αναδεικνύεται η συνολική διαδικασία λειτουργίας του εξελικτικού πολύ-κριτηριακού αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε για την βελτιστοποίηση των αρχικών γεωμετρικών των δύο διαφορετικών τύπων μηχανών. Η διαδικασία ξεκινάει με την απόδοση τιμών στις σταθερές λειτουργίας του αλγορίθμου. Κάποιες από αυτές τις σταθερές είναι, ο αριθμός επαναλήψεων τις διαδικασίας, το ποσοστό μετάλλαξης του πληθυσμού καθώς και το ποσοστό διασταύρωσής του, ο αριθμός μεταβλητών βελτιστοποίησης και ο αριθμός των κριτηρίων βελτιστοποίησης. Αναλυτικότερη παρουσίαση των μεταβλητών του αλγορίθμου γίνεται σε παρακάτω κεφάλαιο. Έπειτα ακολουθεί η δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού μηχανών και ο λεπτομερής υπολογισμός των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών τους. Αφού υπολογιστούν τα χαρακτηριστικά των μηχανών, αποδίδονται σε αυτές οι βαθμοί εξουσίας τους. Εν ακολουθία δημιουργείται ο τρισδιάστατος αντικειμενικός χώρος και τμηματοποιείται σε τρισδιάστατα υπέρ-κουτιά στα οποία τοποθετούνται οι μηχανές με βάση του βαθμούς εξουσίας τους. Από τον πληθυσμό επιλέγονται οι μη κυριαρχημένες μηχανές και δημιουργείται το εξωτερικό αρχείο στο οποίο τοποθετούνται. Έπειτα ελέγχεται το κριτήριο του υπερόγκου, το οποίο θα εξηγηθεί παρακάτω, και επίσης ελέγχεται το μέτωπο Pareto, ώστε να ελεγχθεί αν έχει φτάσει η βελτιστοποίηση στο τέλος της. Ακολουθούν οι διαδικασίες της διασταύρωσης και της μετάλλαξης του πληθυσμού. Από το εξωτερικό αρχείο επιλέγονται οι μηχανές που θα αποτελέσουν τους γονείς, και γίνεται διασταύρωση των μεταβλητών τους ώστε να προκύψει μια καινούρια μηχανή με τη διαιώνιση των καλύτερων χαρακτηριστικών των γονέων. Αντίστοιχα με τον ίδιο τρόπο επιλέγονται μηχανές, των οποίων οι μεταβλητές θα μεταλλαχθούν για να προκύψουν νέες μηχανές. Στις δύο περιπτώσεις, της διασταύρωσης και μετάλλαξης του πληθυσμού, αν ο αριθμός των μηχανών του αρχείου είναι μικρότερος από τον αριθμό των μηχανών που απαιτούνται για τις δύο διαδικασίες τότε επιλέγονται μηχανές από όλο τον πληθυσμό. Με το πέρας και αυτών των διαδικασιών έχει τελειώσει η πρώτη επανάληψη της βελτιστοποίησης, η οποία αν δεν έχει φτάσει στο τέλος της με βάση τα κριτήρια που έχουν οριστεί, η διαδικασία επαναλαμβάνεται και πάλι.

6.7.1 Κριτήριο υπερόγκου

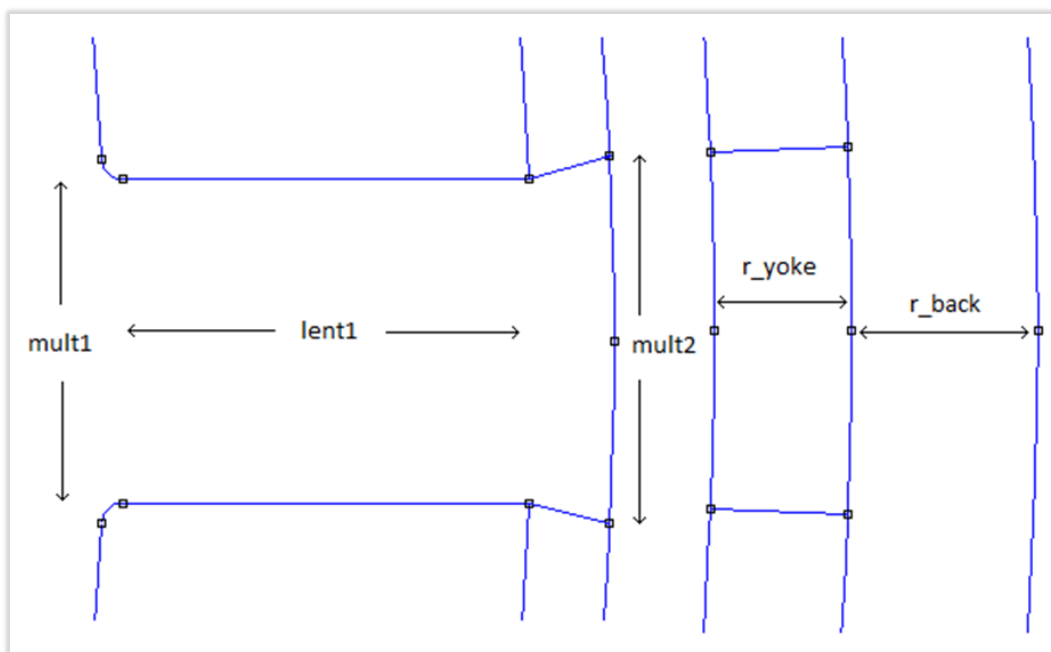
Το κριτήριο του υπερόγκου είναι μία μέθοδος η οποία βοηθάει να ελέγξουμε αν η βελτιστοποίηση έχει προσεγγίσει τις βέλτιστες τιμές. Από την βελτιστοποίηση προκύπτει η καμπύλη Pareto, με τις μη κυριαρχούμενες και μέχρι εκείνη τη στιγμή βέλτιστες λύσεις. Όπως σχηματίζεται η καμπύλη στον n -διάστατο χώρο, όπου n είναι οι συναρτήσεις κόστους της βελτιστοποίησης, αν θέσουμε ένα σημείο αναφοράς μπορεί να υπολογιστεί ο όγκος μεταξύ των επιπέδων παράλληλων στους άξονες που αντιστοιχούν στις n συναρτήσεις, και της καμπύλης Pareto, όσο ο όγκος αυξάνει τόσο καλύτερη είναι η προσέγγισή μας. Ο λόγος για αυτό είναι ότι όσο αυξάνει ο όγκος, μετακινείται το μέτωπο Pareto προς χαμηλότερα επίπεδα, πιο κοντά σε τιμές μικρότερες της μονάδας, άρα η βελτιστοποίηση έχει προσεγγίσει καλύτερες λύσεις. Για να κρίνουμε αν έχει νόημα να συνεχιστεί η υπολογιστική διαδικασία για παραπάνω επαναλήψεις, πρέπει να δούμε το ρυθμό μεταβολής του υπερόγκου. Συγκεκριμένα, όσο ο υπερόγκος μεταξύ των διαδοχικών επαναλήψεων παίρνει πολύ διαφορετικές τιμές, η βελτιστοποίηση δεν έχει προσεγγίσει τις βέλτιστες λύσεις, ενώ όταν σταδιακά ο υπερόγκος τείνει σε μία ορισμένη τιμή, δεν έχει νόημα να περιμένουμε πολύ καλύτερα αποτελέσματα.

6.7.2 Εύρος μεταβλητών των μηχανών

Στο κεφάλαιο 4 αναφέρθηκαν οι μεταβλητές σχεδίασης των μηχανών. Πριν την εκκίνηση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, έγινε εκτενής ανάλυση και υπολογισμός των μεταβολών που προκύπτουν στα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά των μηχανών, λόγω της μεταβολής των τιμών των διάφορων μεταβλητών σχεδίασης. Από αυτή την ανάλυση προέκυψαν τα όρια αυτών των μεταβλητών. Οι περιορισμοί η οποίοι έθεσαν τα όρια αυτά, είναι καταρχήν η δημιουργία μηχανών με την απαιτούμενη αποδιδόμενη ροπή χωρίς αυτή να ξεφεύγει από κάποια λογικά πλαίσια. Επίσης όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, κάποιες μεταβλητές έχουν συγκεκριμένα όρια, καθώς αν αυτά ξεπεραστούν δημιουργούνται μη υλοποιήσιμες γεωμετρίες, ένα απλό παράδειγμα είναι το πάχος των μαγνητών το οποίο αν ξεπεράσει κάποια όρια καθιστά τον κινητήρα μη συμπαγή. Επίσης λόγω τις γεωμετρίας του στάτη και του αριθμού των δοντιών του, το πάχος αυτών δεν μπορεί να ξεπερνάει κάποια συγκεκριμένη τιμή, καθώς δεν θα μπορεί να σχεδιαστεί κινητήρας. Παρακάτω γίνεται παρουσίαση των μεταβλητών σχεδίασης και του εύρους της κάθε μίας.

6.7.2.1 Μηχανή μόνιμων μαγνητών

Πρώτα θα παρουσιαστούν οι μεταβλητές και τα όρια αυτών για την μηχανή επιφανειακών μόνιμων μαγνητών.



Σχήμα 6.5 Απεικόνιση των μεταβλητών πάνω στη μηχανή μόνιμων μαγνητών

Στο σχήμα (6.5), παρουσιάζεται ξανά η τοπολογία του δοντιού, με εμφανή την επιλογή δημιουργίας πέλματος, του στάτη της μηχανής, καθώς και η μορφολογία του δρομέα. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, οι μεταβλητές που επιλέχθηκαν επηρεάζουν την γεωμετρία του δοντιού, επομένως άμεσα την γεωμετρία των αυλάκων της μηχανής, και την γεωμετρία των

μαγνητών του δρομέα καθώς και το πάχος αυτού. Ειδικότερα, η μεταβλητή (lent1) μεταβάλλει το μήκος του σώματος του δοντιού, άμεσα και το μήκος της αύλακας. Οι μεταβλητές (mult1) και (mult2) μεταβάλλουν το πάχος του σώματος και το πέλματος του δοντιού, επομένως και την επιφάνεια της αύλακας καθώς μικρές τιμές του συντελεστή αυτού σημαίνουν λεπτό δόντι και μεγάλη επιφάνεια αύλακας για σταθερή διάμετρο διακένου της μηχανής. Η μεταβλητή (r_yoke) μεταβάλλει το πάχος του μαγνήτη και τέλος η μεταβλητή (r_back) μεταβάλλει το πάχος του σώματος του δρομέα. Εκτός από αυτές τις πέντε μεταβλητές που φαίνονται στο σχήμα επιλέχθηκαν και τέσσερις ακόμα. Το ενεργό μήκος της μηχανής (L), η διάμετρος διακένου (D), το ποσοστό γωνίας μαγνήτη επί του πολικού βήματος της μηχανής (r_arc1) και ο συντελεστής πάχους του ενδιάμεσου δοντιού (tooth_prc) είναι οι μεταβλητές αυτές. Στον πίνακα (6.1) συνοψίζονται οι μεταβλητές αυτές μαζί με το εύρος τιμών τους.

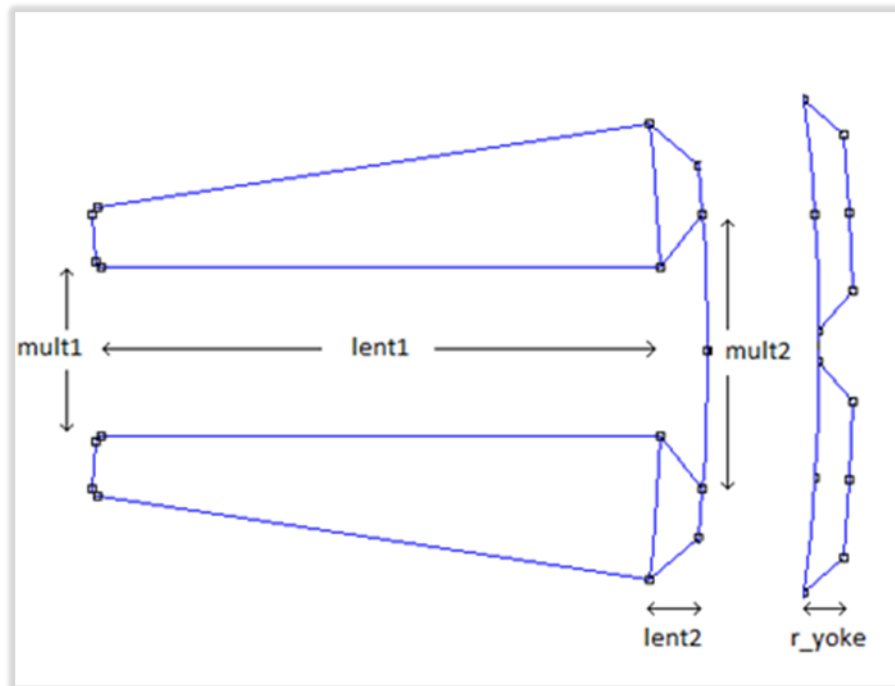
Πίνακας 6.1: Μεταβλητές μηχανής μόνιμων επιφανειακών μαγνητών

Μεταβλητές	Σύμβολο	Εύρος
Διάμετρος Διακένου	D	130 - 200
Ενεργό μήκος μηχανής	L	30 - 50
Μήκος δοντιού	lent1	4 - 18
Πάχος δρομέα	r_back	2 - 8
Πάχος μαγνήτη	r_yoke	1 - 5
Ποσοστό γωνίας μαγνήτη επί πολικού βήματος	r_arc1	0,4 - 0,9
Συντελεστής πάχους ενδιάμεσου δοντιού	tooth_prc	0,4 - 0,9
Συντελεστής πάχους δοντιού	mult1	1 - 8
Συντελεστής πάχους πέλματος δοντιού	mult2	1,2 - 8

Στον πίνακα (6.1) παρουσιάζονται οι μεταβλητές του σχήματος (6.5) μαζί με το εύρος τιμών της κάθε μίας. Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του υποκεφαλαίου, οι τιμές προέκυψαν μετά από έλεγχο της επίπτωσης στα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά της μηχανής μικρών μεταβολών των μεταβλητών αυτών. Τα εύρη των μεταβλητών επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε οι μηχανές που θα προκύπτουν να είναι στα όρια αποδιδόμενης ροπής που χρειάζονται, λαμβάνοντας βέβαια υπόψιν την διεύρυνση των ορίων ώστε να μην υπάρξει πιθανότητα εγκλωβισμού της βελτιστοποίησης λόγω στενών ορίων. Με αντίστοιχη λογική και πάντα σε συνδυασμό με το εύρος των υπόλοιπων μεταβλητών, καθώς και με την εμπειρία που έχει αποκτηθεί από παλιότερους κινητήρες επιλέχθηκαν οι τιμές των μεταβλητών που επηρεάζουν τη μορφολογία του δοντιού και της αύλακας. ^{[6][9]} Όσο αφορά το πάχος του μαγνήτη τα όρια τέθηκαν με βάση τον περιορισμό της δημιουργίας μη συμπαγών μηχανών, όταν το πάχος των μαγνητών είναι μεγάλο. Τέλος για το συντελεστή πάχους ενδιάμεσου δοντιού (tooth_prc) και του ποσοστού γωνίας μαγνήτη (r_arc1) τα όρια ξεκινάνε από αρκετά χαμηλές τιμές και φτάνουν στο ανώτατο εφικτό όριο.

6.7.2.2 Μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Σε αυτό το υποκεφάλαιο, παρουσιάζονται οι μεταβλητές βελτιστοποίησης της μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης και τα αντίστοιχα εύρη τιμών τους. Η επιλογή των μεταβλητών κινήθηκε στις ίδιες βάσεις με την επιλογή των μεταβλητών της μηχανής μόνιμων μαγνητών.



Σχήμα 6.6 Απεικόνιση των μεταβλητών πάνω στη μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Στο σχήμα (6.6), απεικονίζεται η μορφολογία των δοντιών του στάτη της μηχανής μεταβλητής αντίστασης, με εμφανή τη δημιουργία πέλματος δοντιού. Επίσης φαίνεται η γεωμετρία των τμημάτων σιδήρου του δρομέα. Όπως και στο άλλο τύπο μηχανής έτσι και σε αυτόν, σαν μεταβλητές βελτιστοποίησης επιλέχθηκαν το μήκος του σώματος του δοντιού (l_{ent1}), το πάχος σώματος δοντιού ($mult1$) και το πάχος πέλματος δοντιού ($mult2$) λόγω της επιρροής που έχουν τόσο στις μαγνητικές ροές, μέσω του δοντιού, όσο και στην επιφάνεια της αύλακας άρα και στη παραγωγή ροπής. Προστέθηκε σαν μεταβλητή επίσης το μήκος του πέλματος του δοντιού (l_{ent2}), καθώς στις μηχανές μεταβλητής αντίστασης διαδραματίζει μεγάλο ρόλο η επίτευξη μεγάλης διαφοράς της μαγνητικής επαγωγής ανάμεσα στις θέσεις μέγιστης και ελάχιστης μαγνητικής ροής. Επομένως χρειάζεται παραπάνω ελευθερία σχεδίασης του δοντιού. Η τελευταία μεταβλητή η οποία εμφανίζεται στο σχήμα είναι αυτή του πάχους των τμημάτων σιδήρου του δρομέα (r_{yoke}). Εκτός από αυτές, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις μεταβλητές. Το ενεργό μήκος της μηχανής (L), η διάμετρος διακένου (D), το ποσοστό γωνίας μαγνήτη επί του πολικού βήματος της μηχανής (r_{arc1}) και ο συντελεστής πάχους του ενδιάμεσου δοντιού ($tooth_prc$).

Πίνακας 6.2: Μεταβλητές μηχανής μεταβλητής αντίστασης

Μεταβλητές	Σύμβολο	Εύρος
Ενεργό μήκος μηχανής	L	35 - 85
Διάμετρος Διακένου	D	240 - 360
Μήκος δοντιού	lent1	10 - 40
Μήκος άκρης δοντιού	lent2	2 - 6
Συντελεστής πάχους δοντιού	mult1	1,2 - 8
Συντελεστής πάχους άκρης δοντιού	mult2	1,2 - 10
Πάχος τμήματος σιδήρου	r_yoke	2 - 7
Ποσοστό τμήματος σιδήρου επί πολικού βήματος	r_arc1	0,4 - 0,9
Συντελεστής ενδιάμεσου δοντιού	tooth_prc	0,4 - 0,9

Στον πίνακα (6.2), παρουσιάζονται τα εύρη των μεταβλητών βελτιστοποίησης της μηχανής μεταβλητής αντίστασης. Ο τρόπος επιλογής των ορίων αυτών ακολούθησε την ίδια βάση με αυτόν για τις μεταβλητές της μηχανής μονίμων μαγνητών. Οι τιμές του ενεργού μήκους (L) και τη διαμέτρου του διακένου (D) επιλέχθηκαν με βάση την απαίτηση συγκεκριμένης αποδιδόμενης ροπής, η οποία έχει υπολογιστεί στο κεφάλαιο 4. Οι τιμές αυτών των μεταβλητών είναι μεγαλύτερες από αυτές του άλλου τύπου μηχανής καθώς δεν υπάρχει τρόπος δημιουργίας ενός δευτέρου μαγνητικού πεδίου και όλη η δημιουργία ροπής οφείλεται στο πεδίο του στάτη. Στις μεταβλητές σχεδίασης των δοντιών του στάτη δόθηκαν μεγάλα όρια ώστε να καλυφθούν όσο το δυνατόν περισσότερες μορφολογίες δοντιού, καθώς στόχος είναι η επίτευξη μεγάλης διαφοράς μαγνητικής επαγωγής της μηχανής, και για να πραγματοποιηθεί αυτό δόθηκε η επιλογή στον αλγόριθμο, δημιουργίας μεγάλου εύρους δοντιών. Για το πάχος των τμημάτων σιδήρου (r_yoke), όπως και στις μηχανές μονίμων μαγνητών, το ανώτατο όριο επιλέχθηκε με προσοχή ώστε οι κινητήρες που θα σχεδιαστούν να είναι συμπαγής και υλοποιήσιμοι. Τέλος για το συντελεστή πάχους ενδιάμεσου δοντιού (tooth_prc) και του ποσοστού γωνίας σιδήρου (r_arc1) τα όρια ξεκινάνε από αρκετά χαμηλές τιμές και φτάνουν στο ανώτατο εφικτό όριο.

6.8 Κριτήρια βελτιστοποίησης

Για την επιλογή των κριτηρίων βελτιστοποίησης των μηχανών, στηριχθήκαμε πάνω στις απαιτήσεις για χαμηλές απώλειες των μηχανών, επίτευξη μιας συγκεκριμένης τιμής ροπής, την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης καθώς και τη μείωση της κυμάτωσης της ροπής. Μία υπενθύμιση είναι ότι στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούμε θέλουμε την ελαχιστοποίηση των κριτηρίων οπότε κάθε κριτήριο για τις μηχανές μας φτιάχτηκε ώστε να πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Τα τρία κριτήρια της βελτιστοποίησης των μηχανών φαίνονται παρακάτω.

Με την ελαχιστοποίηση των κριτηρίων αυτών προσβλέπουμε στην μεγιστοποίηση της αποδιδόμενης ροπής, την ελαχιστοποίηση των απωλειών και τη ελαχιστοποίηση των αρμονικών φαινομένων και της κυμάτωσης της ροπής.

$$\text{Κριτήριο ροπής: } T_{obj} = \frac{T_0}{T} \quad (6.15)$$

$$\text{Κριτήριο απωλειών: } L_{obj} = \frac{L}{L_0} \quad (6.16)$$

$$\text{Κριτήριο αρμονικού περιεχομένου: } H_{obj} = 0.5 * \left(\frac{THD}{THD_0} \right) + 0.5 * \left(\frac{T_{ripple}}{T_{ripple0}} \right) \quad (6.17)$$

όπου τα μεγέθη με δείκτη το μηδέν είναι οι τιμές αναφοράς, οι οποίες πάρθηκαν σε κάθε είδος μηχανής ανάλογα με τα αποτελέσματα της προκαταρκτικής σχεδίασης.

6.9 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης

Πριν παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των βελτιστοποιήσεων, θα γίνει μια σύντομη αναφορά στις βασικές σταθερές του αλγορίθμου PESA-II και στις τιμές που τους αποδόθηκαν. Οι βασικότερες σταθερές του αλγορίθμου είναι:

- Αριθμός μεταβλητών απόφασης
- Αριθμός κριτηρίων βελτιστοποίησης
- Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων
- Μέγεθος πληθυσμού
- Μέγεθος εξωτερικού αρχείου
- Αριθμός διασταυρώσεων
- Αριθμός μεταλλάξεων

Αριθμός μεταβλητών απόφασης

Αποτελεί τον αριθμό των μεταβλητών που θα αλλάζουν κατά τις επαναλήψεις του αλγορίθμου. Στην περίπτωση της βελτιστοποίησης κινητήρων οι μεταβλητές αυτές αποτελούν τις μεταβλητές σχεδίασης των γεωμετριών των μηχανών.

Αριθμός κριτηρίων βελτιστοποίησης

Τα κριτήρια βελτιστοποίησης, όπως έχει αναφερθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο αφορούν τους τομείς στους οποίους εστιάζεται η διαδικασία βελτιστοποίησης των κινητήρων.

Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων

Όπως δηλώνει και το όνομα της σταθεράς αυτής, αφορά τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων που θα κάνει η διαδικασία ανεξαιρέτως αν έχουμε τα αποτελέσματα που θέλουμε ή όχι.

Μέγεθος πληθυσμού

Το μέγεθος του πληθυσμού αναφέρεται στο μέγεθος του αρχικού και κάθε μεταγενέστερου πληθυσμού μηχανών που θα προκύψει.

Μέγεθος εξωτερικού αρχείου

Εδώ ορίζεται το μέγεθος που θα έχει το αρχείο το οποίο θα περιέχει τις μη κυριαρχημένες μηχανές που προκύπτουν από την διαδικασία βελτιστοποίησης.

Αριθμός διασταυρώσεων και Μεταλλάξεων

Με βάση το μέγεθος του πληθυσμού και με την επιλογή ενός ποσοστού διαχωρισμού, προκύπτει ο αριθμός των διασταυρώσεων που θα πραγματοποιούνται σε κάθε επανάληψη της διαδικασίας. Ο αριθμός των μεταλλάξεων που θα λαμβάνουν χώρα προκύπτει από την απλή αφαίρεση του αριθμού των διασταυρώσεων από τη τιμή του μεγέθους του πληθυσμού.

Πίνακας 6.3: Σταθερές εξελικτικού αλγορίθμου

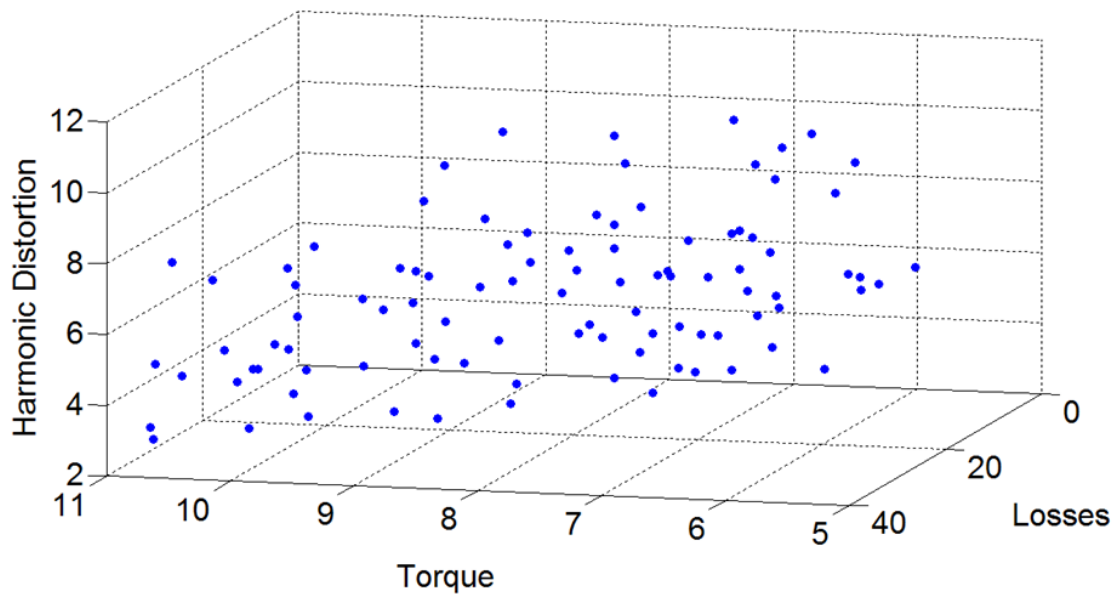
	Μηχανή μόνιμων μαγνητών	Μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης
Αριθμός μεταβλητών απόφασης	9	9
Αριθμός κριτηρίων βελτιστοποίησης	3	3
Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων	100	100
Μέγεθος πληθυσμού	50	50
Μέγεθος εξωτερικού αρχείου	150	150
Αριθμός διασταυρώσεων	36	36
Αριθμός μεταλλάξεων	14	14

Στον πίνακα (6.3) συνοψίζονται οι τιμές των σταθερών του, που είναι απαραίτητες για τη λειτουργία του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων αποφασίστηκε να είναι 100 και το μέγεθος του πληθυσμού 50 μέλη. Οι αριθμοί αυτοί εξασφαλίζουν την σωστή λειτουργία και την δημιουργία ενός ικανοποιητικού αριθμού μελών ώστε να μην υπάρξει εγκλωβισμός των λύσεων σε κάποιο τοπικό ακρότατο. Επίσης το μέγεθος του εξωτερικού αρχείου επιλέχθηκε να είναι αρκετά υψηλό ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ποικιλία βέλτιστων λύσεων.

6.9.1 Μέτωπα Pareto

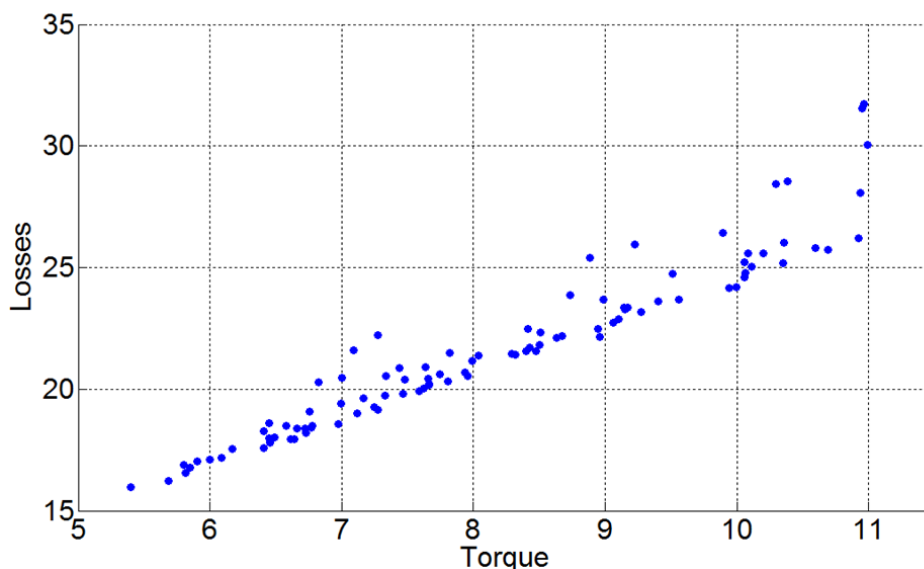
Με το τέλος της επαναληπτικής διαδικασίας βελτιστοποίησης προέκυψαν οι βέλτιστες λύσεις, για κάθε τύπο μηχανής, σχηματίζοντας έτσι και τα αντίστοιχα μέτωπα Pareto για κάθε μία από αυτές. Τα μέτωπα αυτά παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα. Για την καλύτερη κατανόηση των μετώπων Pareto έχουν προστεθεί και οι προβολές των τρισδιάστατων γραφημάτων σε δύο διαστάσεις.

6.9.1.1 Μηχανή μόνιμων μαγνητών



Σχήμα 6.7 Μέτωπο Pareto μηχανής μόνιμων μαγνητών σε τρεις διαστάσεις

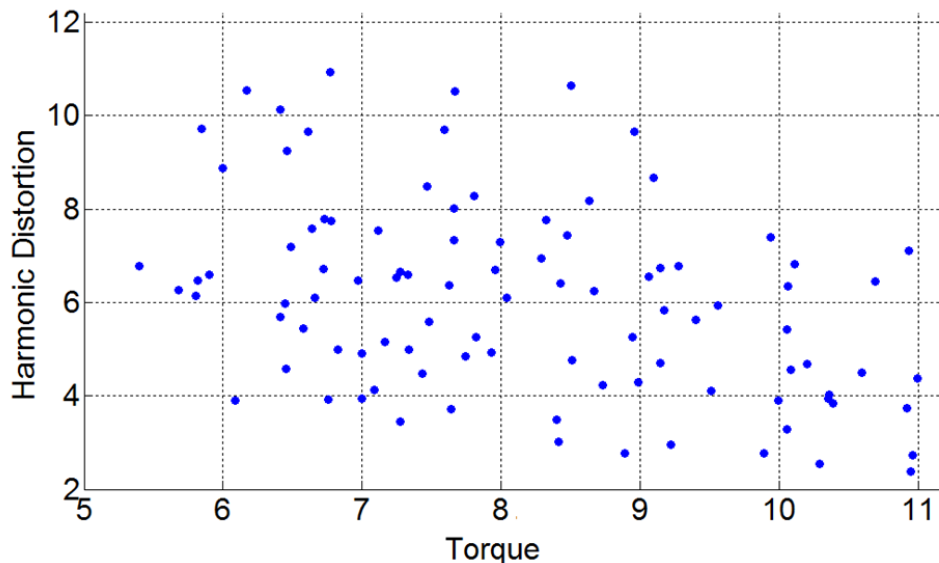
Στο σχήμα (6.7), απεικονίζεται το μέτωπο Pareto των βέλτιστων λύσεων που προέκυψαν από την διαδικασία βελτιστοποίησης για τη μηχανή επιφανειακών μόνιμων μαγνητών. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί και από το σχήμα, υπάρχει μια ομοιόμορφη κατανομή των βέλτιστων λύσεων σε όλο το αντικειμενικό χώρο του προβλήματος. Αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος δεν εγκλωβίστηκε σε κάποιο συγκεκριμένο τοπικό ακρότατο. Καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων γίνεται μέσω των δισδιάστατων απεικονίσεων του μετώπου Pareto.



Σχήμα 6.8 Διάγραμμα Ροπής-Απωλειών μετώπου Pareto μηχανής μόνιμων μαγνητών

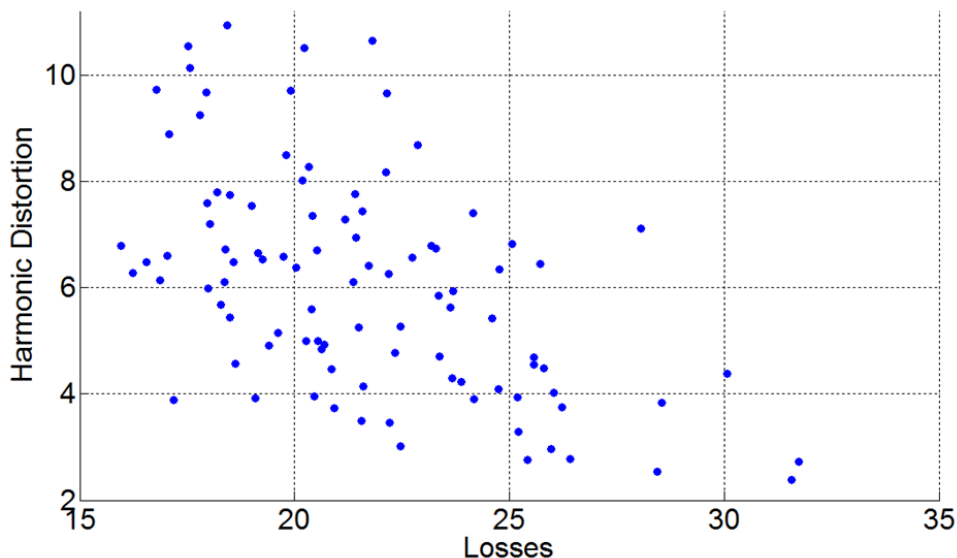
Από το σχήμα (6.8) παρατηρείται μία αναλογική τάση, ανάμεσα στη αποδιδόμενη ροπή και τις συνολικές απώλειες της μηχανής κάτι αναμενόμενο. Εφόσον το μέτωπο Pareto περιέχει τις

βέλτιστες λύσεις, αυτό σημαίνει ότι κάθε γεωμετρία του μετώπου αυτού αποδίδει την μέγιστη ροπή για τις ανάλογες απώλειες που έχει. Η αναλογική τάση αυτή είναι λογική καθώς όσο μεγαλύτερες απώλειες υπάρχουν, τόσο μεγαλύτερο ρεύμα γραμμής υπάρχει άρα παράγεται και περισσότερη ροπή. Μερικά σημεία ξεφεύγουν από αυτήν και σε αυτό ευθύνεται το τρίτο κριτήριο της βελτιστοποίησης, το οποίο είναι το αρμονικό περιεχόμενο. Κατά την βελτιστοποίηση δεν αναζητούνται λύσεις οι οποίες είναι βέλτιστες στα κριτήρια της ροπής και των απωλειών μόνο, αλλά λύσεις οι οποίες είναι ταυτόχρονα βέλτιστες και στο κριτήριο του αρμονικού περιεχομένου, οπότε είναι αναμενόμενη η απόκλιση αυτή.



Σχήμα 6.9 Διάγραμμα Ροπής-Αρμονικής παραμόρφωσης μετώπου Pareto μηχανής μόνιμων μαγνητών

Από το σχήμα (6.9), δεν προκύπτει κάποιος άμεσος συσχετισμός ανάμεσα στη παραγόμενη ροπή και το αρμονικό περιεχόμενο. Αυτό το οποίο έχει άμεση σχέση με το αρμονικό περιεχόμενο είναι η γεωμετρία του κινητήρα και όχι η ροπή. Καθώς έχει παρατηρηθεί κατά την διαδικασία της ανάλυσης ευαισθησίας ότι μικρές αλλαγές στη γεωμετρία του κινητήρα επηρεάζουν αισθητά το αρμονικό περιεχόμενο ενώ αυτές οι αλλαγές μπορούν να αφήσουν ανεπηρέαστη τη ροπή. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η αλλαγή της μορφολογίας του πέλματος του δοντιού, Καθώς το πέλμα του δοντιού έχει άμεση σχέση με τις διαδρομές των μαγνητικών ροών επομένως και με το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης.

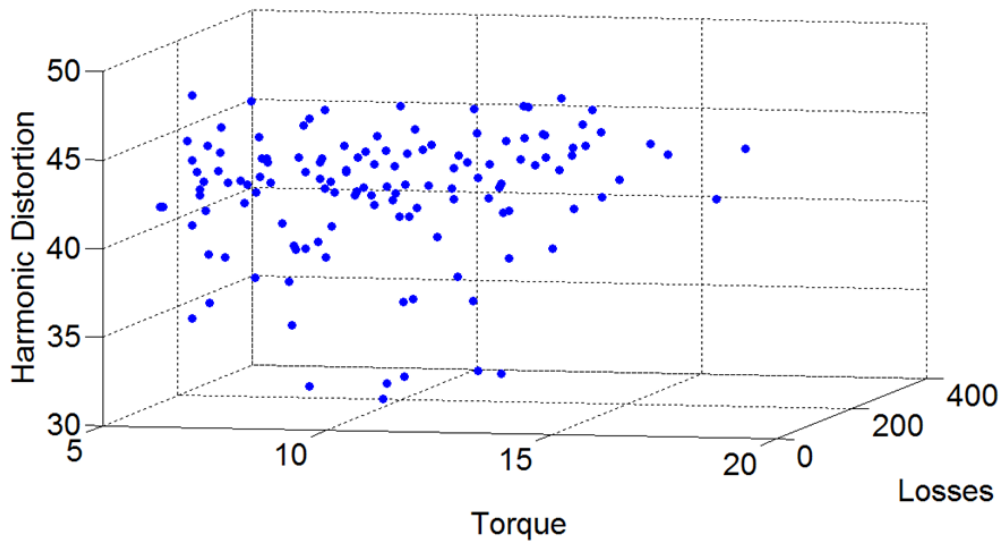


Σχήμα 6.10 Διάγραμμα Απωλειών -Αρμονικής παραμόρφωσης μετώπου Pareto μηχανής μόνιμων μαγνητών

Στο σχήμα (6.10) εμφανίζεται μια κάπως πιο ευδιάκριτη εξάρτηση των απωλειών και της αρμονικής παραμόρφωσης. Παρατηρούμε ότι όσο παραμένουν οι απώλειες σε χαμηλό επίπεδο, επομένως και η ροπή, τότε εμφανίζονται τόσο μικρές τιμές του ποσοστού του αρμονικού περιεχομένου όσο και υψηλές τιμές. Όμως, καθώς αυξάνονται οι απώλειες, επομένως και η τάση, εμφανίζεται μία πτωτική πορεία των τιμών του αρμονικού περιεχομένου.

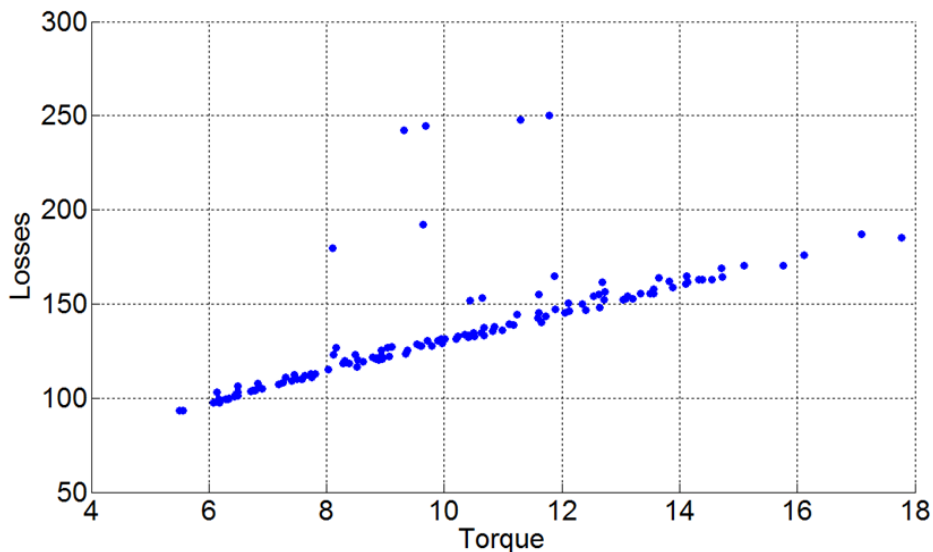
Από τα μέτωπα Pareto παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος έχει συγκλίνει και αυτό γίνεται αντιληπτό από δύο ενδείξεις. Η πρώτη είναι ότι στο σχήμα (6.8) όπου υφίστανται αντικρουόμενα κριτήρια ο αλγόριθμος έχει βρει τη γραμμή της τάσης μεταξύ αυτών. Η δεύτερη βρίσκεται στις δισδιάστατες απεικονίσεις που υπάρχουν μη αντικρουόμενα κριτήρια, σε αυτές ο αλγόριθμος έχει βρει λύσεις σε όλο το εύρος του πεδίου αποτίμησης.

6.9.1.2 Μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης



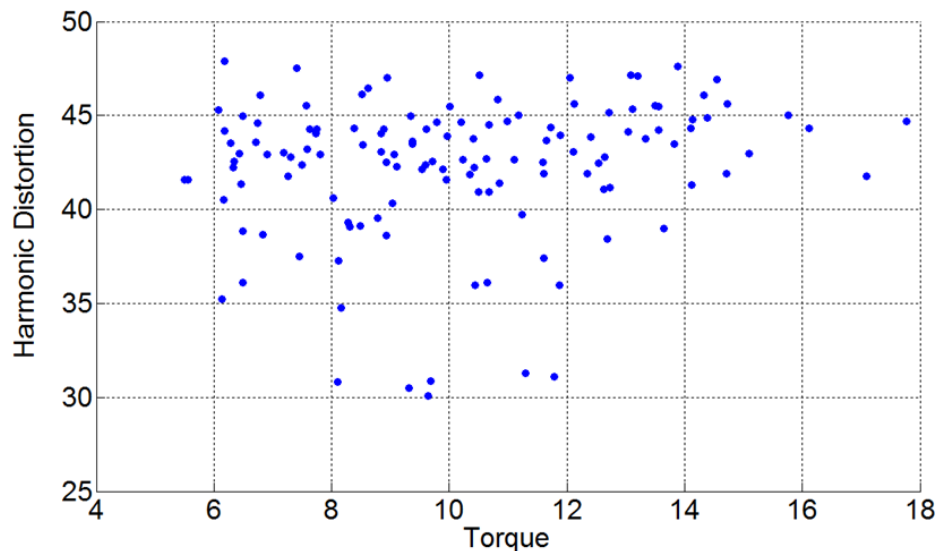
Σχήμα 6.11 Μέτωπο Pareto μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης σε τρεις διαστάσεις

Στο σχήμα (6.11), απεικονίζεται το μέτωπο Pareto των βέλτιστων λύσεων που προέκυψαν από την διαδικασία βελτιστοποίησης για τη μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί και από το σχήμα, υπάρχει μια ομοιόμορφη κατανομή των βέλτιστων λύσεων κυρίως στην περιοχή με αποδιδόμενη ροπή κοντά στην τιμή που απαιτείται, περιοχή η οποία είναι μεγαλύτερης σημασίας για την έρευνα αυτή. Αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος δεν εγκλωβίστηκε σε κάποιο συγκεκριμένο τύπο γεωμετριών. Καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων γίνεται μέσω των δισδιάστατων απεικονίσεων του μετώπου Pareto.



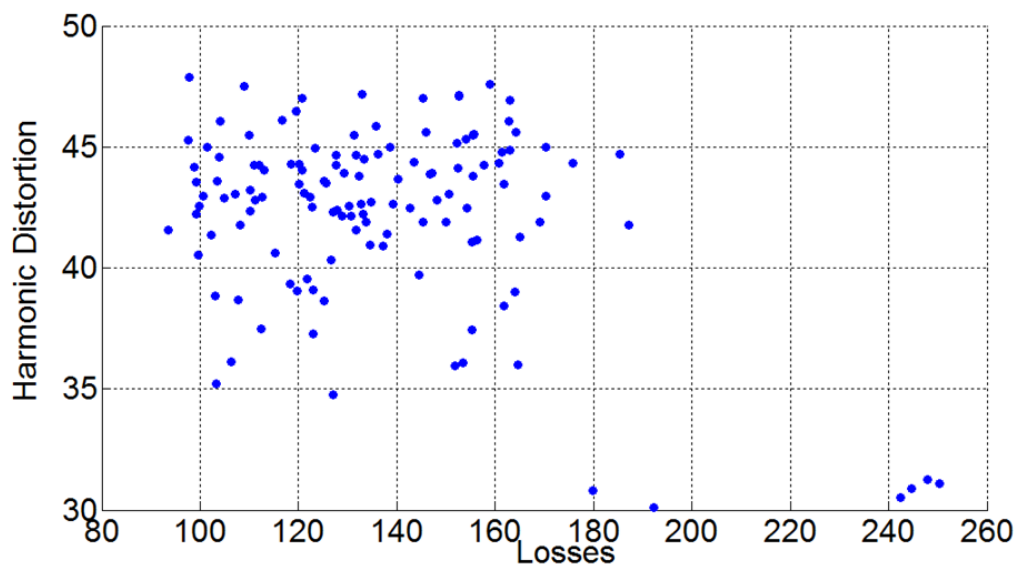
Σχήμα 6.12 Διάγραμμα Ροπής-Απωλειών μετώπου Pareto μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Όπως και στη μηχανή μόνιμων μαγνητών, έτσι και εδώ στο σχήμα (6.12) παρατηρούμε μια αναλογική τάση ανάμεσα στις απώλειες και την αποδιδόμενη ροπή. Το αποτέλεσμα αυτό και σε αυτό το είδος μηχανής ήταν αναμενόμενο. Βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι παρατηρείται μία πιο απότομη κλίση σε σχέση με αυτή των μόνιμων μαγνητών. Κάτι που οφείλεται στην έλλειψη ενός δεύτερου μαγνητικού πεδίου. Επίσης παρατηρούνται αποκλίσεις από την αναλογική τάση οι οποίες οφείλονται στην ύπαρξη του τρίτου κριτηρίου.



Σχήμα 6.13 Διάγραμμα Ροπής-Αρμονικής παραμόρφωσης μετώπου Pareto μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Στο σχήμα (6.13), παρουσιάζεται η δισδιάστατη απεικόνιση του μετώπου Pareto με άξονες τη ροπή και το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης. Όπως ήταν αναμενόμενο το αρμονικό περιεχόμενο είναι αρκετά υψηλό σε αυτό το τύπο μηχανών σε όλο το εύρος των τιμών της ροπής. Το ποσοστό φαίνεται να ακολουθεί μια σχεδόν σταθερή τάση με την τιμή του να βρίσκεται κυρίως εκατέρωθεν των τιμών 37% και 47%.



Σχήμα 6.14 Διάγραμμα Απωλειών -Αρμονικής παραμόρφωσης μετώπου Pareto μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Στο σχήμα (6.14), παρουσιάζεται η δισδιάστατη απεικόνιση του μετώπου Pareto με άξονες τις απώλειες και το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης. Από το σχήμα δεν παρατηρείται κάποια αναλογική τάση ανάμεσα στις απώλειες και το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης. Οι λύσεις είναι ομοιόμορφα κατανομημένες στο χώρο με εξαίρεση κάποιες μεμονωμένες ακραίες λύσεις.

Όπως στις μηχανές με επιφανειακούς μαγνήτες έτσι και στις μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης δεν υπάρχει κάποια τάση ανάμεσα στη ροπή και το αρμονικό περιεχόμενο καθώς επίσης και ανάμεσα στις απώλειες και το αρμονικό περιεχόμενο. Αποτέλεσμα αναμενόμενο καθώς όπως και στη μόνιμων μαγνητών μία μικρή αλλαγή στη μορφολογία των δοντιών μπορεί να επιφέρει μεγάλη αλλαγή στο αρμονικό περιεχόμενο και μικρή έως καμία αλλαγή στη ροπή και στις απώλειες.

Τέλος παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος έχει συγκλίνει, και αυτό γίνεται αντιληπτό από το σχήμα 6.132 όπου έχω αντικρουόμενα κριτήρια ο αλγόριθμος έχει βρει τη γραμμή της τάσης μεταξύ αυτών. Επίσης στις δισδιάστατες απεικονίσεις μη αντικρουόμενων κριτηρίων ο αλγόριθμος έχει βρει λύσεις σε όλο το εύρος το πεδίο αποτίμησης.

6.9.2 Πίνακες αποτελεσμάτων βελτιστοποιήσεων

Από την διαδικασία βελτιστοποίησης των δύο κινητήρων, προέκυψαν δύο πλήθη βελτιστοποιημένων γεωμετριών. Από αυτά επιλέχθηκαν οι βέλτιστες γεωμετρίες που πληρούν τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς που έχουν τεθεί από το διαγωνισμό και από τις επιμέρους διαδικασίες σχεδίασης. Οι βασικότεροι περιορισμοί για την επιλογή των μηχανών των παρακάτω πινάκων είναι:

1. Η ροπή να βρίσκεται κοντά στο επίπεδο που έχει οριστεί ως αναγκαίο. Τα όρια της αναζήτησης ήταν, η ροπή να μην είναι μικρότερη των 10 Nm και να μην ξεπερνάει τα 12 Nm.
2. Η αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη να μην ξεπερνάει τα 18 V.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πίνακες με τις μηχανές που πληρούν τα παραπάνω κριτήρια για τους δύο διαφορετικούς τύπους μηχανών. Συγκεκριμένα, στον πίνακα (6.4) συνοψίζονται οι μηχανές επιφανειακών μόνιμων μαγνητών, οι οποίες πληρούν τα παραπάνω κριτήρια και στο πίνακα (6.5) συνοψίζονται αντίστοιχα οι μηχανές μεταβλητής αντίστασης.

Μηχανή μόνιμων μαγνητών

Πίνακας 6.4: Χαρακτηριστικά βέλτιστων μηχανών μόνιμων μαγνητών

	Βάρος (Kg)	Απώλειες (W)	Ροπή (Nm)	Κυμάτωση ροπής (%)	EMF (V)	THD (%)	Απόδοση (%)
Μηχανή 1	2.96	26.35	10.70	6.54	10.05	0.98	92.73
Μηχανή 2	3.56	25.30	10.30	9.97	10.54	0.86	92.74
Μηχανή 3	5.25	22.96	10.40	12.80	17.49	3.99	93.43

Μηχανή 4	5.13	23.87	10.80	6.77	16.52	4.37	93.43
Μηχανή 5	3.97	24.45	10.72	15.95	13.54	4.60	93.23
Μηχανή 6	2.92	26.09	10.23	6.54	10.03	0.98	92.50
Μηχανή 7	4.74	23.25	10.64	11.83	16.30	3.07	93.50

Από τον πίνακα (6.4) παρατηρείται ότι όλες έχουν παραπλήσιο ποσοστό απόδοσης. Αρχικά η Μηχανή 3, η Μηχανή 4, και η Μηχανή 7 παρότι παρουσιάζουν τα υψηλότερα ποσοστά απόδοσης, απορρίφθηκαν λόγω του υψηλού επιπέδου της τάσης, και του αρκετά υψηλού βάρους. Ακολούθως αποκλείστηκε η Μηχανή 5 λόγω της υψηλής κυμάτωσης ροπής η οποία αναμένεται να αυξηθεί ακόμα περισσότερο κατά το χαμηλό φορτίο. Από τις εναπομένουσες τρεις μηχανές απορρίφθηκαν οι μηχανές 2 και 6. Η Μηχανή 6 απορρίφθηκε επειδή παρουσιάζει την μικρότερη απόδοση από τις τρεις μηχανές και αποδίδει και την μικρότερη ροπή. Τελικά προτιμήθηκε η Μηχανή 1 από τη Μηχανή 2 καθώς η δεύτερη παρουσιάζει μεγαλύτερη κυμάτωση ροπής από την πρώτη και επίσης έχει μεγαλύτερο βάρος, χαρακτηριστικό πολύ βασικό για την ενσωμάτωση του κινητήρα στο τροχό του οχήματος. Η Μηχανή 1, με τη σειρά της παρουσιάζει την μικρότερη κυμάτωση ροπής από όλες τις μηχανές του πίνακα (6.4), επίσης έχει αποδιδόμενη ροπή και τιμή ηλεκτρεγερτικής δύναμης στα επιθυμητά επίπεδα τα οποία θεωρούνται βέλτιστα για την εφαρμογή αυτή.

Μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Πίνακας 6.5: Χαρακτηριστικά βέλτιστων μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

	Βάρος (Kg)	Απώλειες (W)	Ροπή (Nm)	Κυμάτωση ροπής (%)	EMF (V)	THD (%)	Απόδοση(%)
Μηχανή 1	12.08	122.10	10.4	14.65	10.24	48.94	72.62
Μηχανή 2	11.16	125.44	10.8	8.41	11.33	40.24	73.01
Μηχανή 3	11.23	127.63	10.66	10.92	10.04	46.78	72.41
Μηχανή 4	11.87	124.64	10.9	9.39	9.86	49.47	73.31
Μηχανή 5	12.59	128.31	10.7	10.23	11.91	42.31	72.38
Μηχανή 6	11.72	129.08	10.6	11.92	10.19	43.29	72.01

Οι αντίστοιχες βέλτιστες γεωμετρίες της μηχανής μεταβλητής αντίστασης παρουσιάζονται στον πίνακα (6.5). Από τις μηχανές αυτές απορρίφθηκε η Μηχανή 1 λόγω της μεγάλης κυμάτωσης ροπής που παρουσιάζει και του υψηλού αρμονικού περιεχομένου της τάσης της. Για τους ίδιους λόγους απορρίφθηκαν οι Μηχανές 3 και 4, με ποσοστά αρμονικής

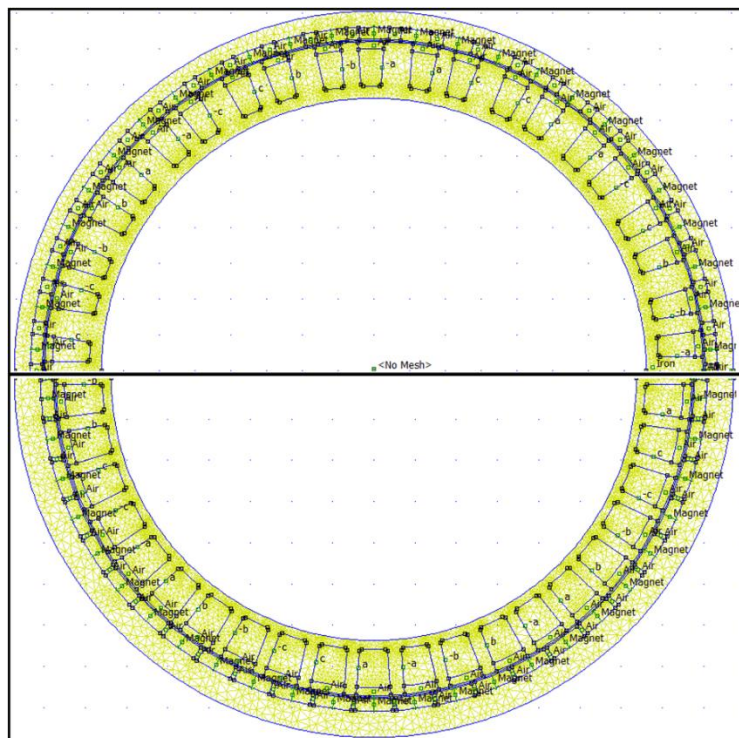
παραμόρφωσης κοντά στο 50%. Από τις εναπομένουσες μηχανές επιλέχθηκε η Μηχανή 2 επειδή παρουσιάζει υψηλότερο βαθμό απόδοσης, χαμηλότερο αρμονικό περιεχόμενο, χαμηλότερες απώλειες και μικρότερο βάρος.

6.9.3 Παρουσίαση γεωμετριών και ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών των κινητήρων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι γεωμετρίες και τα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά των τελικών βέλτιστων γεωμετριών, οι οποίες επιλέχθηκαν για τους δύο τύπους μηχανών. Αρχικά πραγματοποιείται σύγκριση των γεωμετριών και των χαρακτηριστικών των βέλτιστων με των αρχικών γεωμετριών για κάθε τύπο κινητήρα ξεχωριστά, για την ανάδειξη των αποτελεσμάτων της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Στην συνέχεια γίνεται παρουσίαση της απόδοσης και της λειτουργίας των βέλτιστων γεωμετριών σε τρεις διαφορετικές λειτουργίες. Η πρώτη είναι η λειτουργία των μηχανών στο υψηλό φορτίο, η δεύτερη είναι η λειτουργία στο χαμηλό φορτίο και η τελευταία είναι η λειτουργία στο φορτίο όπου παρουσιάζει την βέλτιστη απόδοση ο κάθε κινητήρας. Τέλος γίνεται σύγκριση των δύο κινητήρων και αιτιολογείται η επιλογή του καλύτερου κινητήρα.

6.9.3.1 Προκαταρκτική και βέλτιστη γεωμετρία μηχανής επιφανειακών μόνιμων μαγνητών

Στο κεφάλαιο αυτό αναδεικνύονται οι διαφορές και οι ομοιότητες της προκαταρκτικής και της βέλτιστης μηχανής επιφανειακών μόνιμων μαγνητών.



Σχήμα 6.18 Πλεγματοποίηση αρχικής και βέλτιστης γεωμετρίας μηχανής επιφανειακών μόνιμων μαγνητών

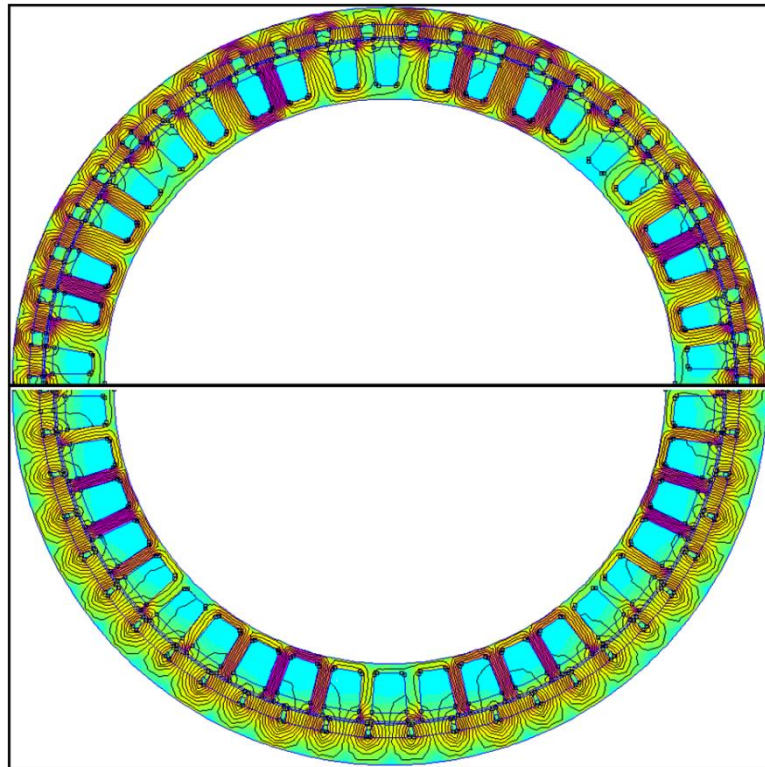
Στο σχήμα (6.18) απεικονίζονται, η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε σαν πρότυπο για την διαδικασία βελτιστοποίησης (κάτω μέρος του σχήματος) και βέλτιστη γεωμετρία που προέκυψε από τη διαδικασία αυτή (πάνω μέρος του σχήματος). Το επίπεδο ακρίβειας της πλεγματοποίησης παρέμεινε στα ίδια επίπεδα με τη βέλτιστη γεωμετρία να έχει 27954 τριγωνικά στοιχεία και την αρχική γεωμετρία να έχει 27453. Μεγάλη διαφορά εντοπίζεται στο πάχος των δοντιών των δύο γεωμετριών, με αυτό της βέλτιστης γεωμετρίας να είναι μεγαλύτερο. Στην αρχική γεωμετρία χρησιμοποιήθηκε μικρότερη διάμετρος διακένου, ακολουθώντας τις τιμές της προκαταρκτικής σχεδίασης και επίσης σχεδιάστηκε δρομέας με μεγαλύτερο πάχος. Τέλος γίνεται αισθητή και η διαφορά στο ποσοστό του πολικού βήματος το οποίο αποτελείται από μαγνήτη, με τη βέλτιστη γεωμετρία να χρησιμοποιεί μικρότερο σε μήκος μαγνήτη και σχεδόν ίδιου πάχους.

Πίνακας 6.6: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αρχικής και βέλτιστης τοπολογίας μηχανής επιφανειακών μόνιμων μαγνητών

	Αρχική γεωμετρία	Βέλτιστη γεωμετρία
Ενεργό μήκος (mm)	43	33
Διάμετρος διακένου (mm)	154	183
Μήκος σώματος δοντιού (mm)	9.2	10.37
Πάχος σώματος κύριου δοντιού (mm)	3.32	7.89
Πάχος σώματος ενδιάμεσου δοντιού (mm)	2.98	4.8
Ποσοστό πάχους ενδιάμεσου δοντιού (%)	90	61.3
Πάχος μαγνήτη (mm)	3.05	3.336
Ποσοστό γωνίας μαγνήτη επί πολικού βήματος (%)	0.9	71
Πάχος δρομέα (mm)	6.4	4.5
Επιφάνεια αύλακας (mm ²)	68	65.46
Διατομή καλωδίου (mm ²)	2.84	2.71
Αριθμός ελιγμάτων	12	12

Στον παραπάνω πίνακα (6.6), αναγράφονται τα βασικά μεγέθη σχεδίασης των δύο γεωμετριών. Η τελική γεωμετρία παρουσιάζει μεγαλύτερο λόγο διαμέτρου διακένου και ενεργού μήκους μηχανής, με τη διάμετρο να είναι μεγαλύτερη κατά 19mm και το ενεργό μήκος μικρότερο κατά 10mm, το συνολικό βάρος όμως των μηχανών δεν είναι εν τέλει τόσο διαφορετικό. Επίσης οι δύο γεωμετρίες έχουν μεγάλη διαφορά στο ποσοστό δημιουργίας άνισων δοντιών κοντά στο 30%. Η επιφάνεια αύλακας διατηρήθηκε στα ίδια επίπεδα παρά την μεγάλη διαφορά, τόσο στη διάμετρο διακένου, όσο και στο ποσοστό του πάχους του ενδιάμεσου δοντιού, καθώς ταυτόχρονα αυξήθηκε το πάχος των δοντιών πάνω από δύο φορές, με άμεση συνέπεια τη διατήρηση επίσης και της διατομής των καλωδίων. Τέλος παρότι

το πάχος των μαγνητών δεν παρουσιάζει αισθητή διαφορά, το ποσοστό γωνίας του μαγνήτη επί του πολικού βήματος μειώθηκε κατά 20%.



Σχήμα 6.19 Κατανομή μαγνητικών ροών αρχικής και βέλτιστης γεωμετρίας μηχανής επιφανειακών μόνιμων μαγνητών

Στο σχήμα (6.19), παρουσιάζεται η κατανομή των μαγνητικών ροών στην αρχική (κάτω μέρος σχήματος) και στη βέλτιστη (πάνω μέρος σχήματος) γεωμετρία της μηχανής μόνιμων μαγνητών. Από το σχήμα παρατηρείται καλύτερη κατανομή στη βέλτιστη γεωμετρία καθώς και μεγαλύτερη πυκνότητα μαγνητικής ροής στα διάφορα σημεία του κινητήρα. Αυτή η καλύτερη κατανομή δικαιολογεί μικρότερο ποσοστό αρμονικού περιεχομένου της μηχανής. Επίσης γίνονται πάλι εμφανείς οι διαφορές στη σχεδίαση των δύο μηχανών, με την αρχική γεωμετρία να χρησιμοποιεί μεγαλύτερη διάμετρο διακένου και μεγαλύτερους μαγνήτες, ενώ η βέλτιστη γεωμετρία χρησιμοποιεί μεγαλύτερα σε πάχος δόντια καθώς επίσης και με μεγαλύτερη διαφορά πάχους ενδιάμεσου και κύριου δοντιού.

6.9.3.2 Ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά των μηχανών επιφανειακών μόνιμων μαγνητών

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει σύγκριση των βασικών μεγεθών των δύο κινητήρων μόνιμων μαγνητών καθώς και παρουσίαση της απόδοσης και της μεταβολής των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών της βέλτιστης μηχανής, η οποία έχει επιλεγεί, για τρεις διαφορετικές φορτίσεις της.

Πίνακας 6.7: Ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά αρχικής και βέλτιστης μηχανής επιφανειακών μόνιμων μαγνητών

	Αρχική γεωμετρία	Βέλτιστη γεωμετρία
Πυκνότητα ρεύματος (A/mm ²)	4	4
Αρμονικό περιεχόμενο (%)	5.96	0.98
Αντί-ΗΕΔ (V)	10.13	10.05
Ροπή (Nm)	10.3	10.7
Κυμάτωση Ροπής (%)	10.86	6.54
Βάρος Χαλκού (kg)	0.72	0.60
Βάρος σιδήρου (kg)	1.90	1.98
Βάρος δρομέα (kg)	0.44	0.38
Συνολικό Βάρος (kg)	3.06	2.96
Απώλειες Χαλκού (W)	28.83	22.22
Απώλειες Σιδήρου (W)	4.78	4.13
Συνολικές απώλειες (W)	33.61	26.35
Απόδοση κινητήρα (%)	90.59	92.73

Από τον πίνακα (6.7), γίνεται αντιληπτή η βελτίωση της απόδοσης της μηχανής με την αρχική να έχει απόδοση 90.59% και την βέλτιστη γεωμετρία να αποδίδει 92.73%, η ολική απόδοση της μηχανής αυξήθηκε κατά 2.14%. Γίνεται σαφής μια γενική βελτίωση του κινητήρα σε όλους τους τομείς. Μεγαλύτερη βελτίωση παρουσιάζεται στον τομέα της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης, με πτώση 4.98%. Σημαντική είναι και η βελτίωση της κυμάτωσης της ροπής, από 10.86% σε 6.54%, η οποία όσο μεγαλύτερη είναι τόσο περισσότερες απώλειες προστίθενται και τόσο μειώνεται η απόδοση του κινητήρα. Στο βάρος των δύο μηχανών δεν υπάρχει αισθητή διαφορά, παρόλα αυτά παρατηρείται μείωση των απωλειών τόσο του σιδήρου όσο και του χαλκού, της τάξης του 21.6%.

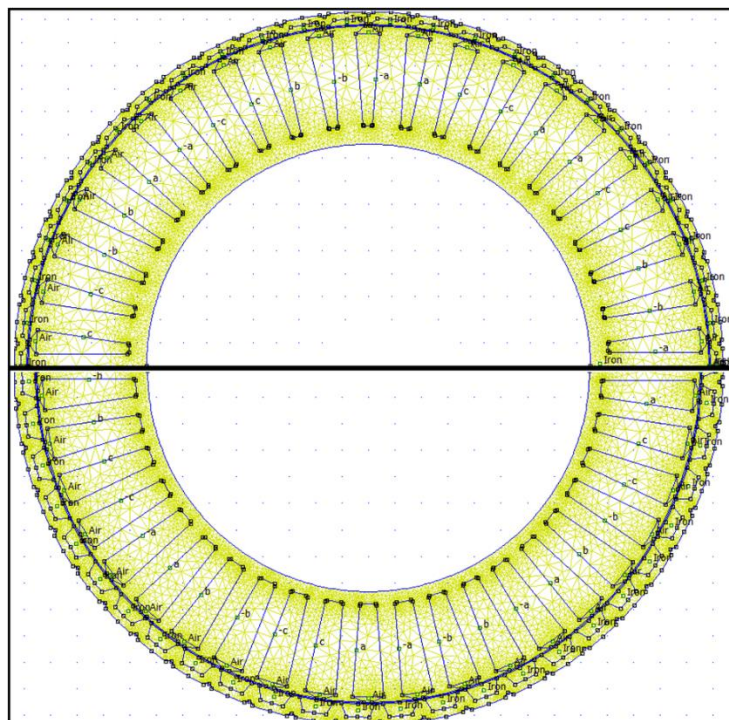
Πίνακας 6.7: Ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά βέλτιστης γεωμετρίας μηχανής επιφανειακών μόνιμων μαγνητών σε διάφορα σημεία λειτουργίας

	Υψηλό φορτίο	Χαμηλό φορτίο	Βέλτιστο φορτίο
Πυκνότητα ρεύματος (A/mm ²)	4	1	1.7
Αρμονικό περιεχόμενο (%)	0.98	0.92	0.92
Αντί-ΗΕΔ (V)	10.05	9.912	9.88
Ροπή (Nm)	10.7	2.8	4.62
Κυμάτωση Ροπής (%)	6.54	24.2	13.75
Βάρος Χαλκού (kg)	1.98	1.98	1.98
Βάρος σιδήρου (kg)	0.60	0.60	0.60
Βάρος δρομέα (kg)	0.38	0.38	0.38
Συνολικό Βάρος (kg)	2.96	2.96	2.96
Απώλειες Χαλκού (W)	22.22	1.39	4.02
Απώλειες Σιδήρου (W)	4.13	4.11	4.1
Συνολικές απώλειες (W)	26.35	5.5	8.12
Απόδοση κινητήρα (%)	92.73	94.11	94.7

Η απόδοση του κινητήρα και τα υπόλοιπα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά του, για τα τρία διαφορετικά σημεία λειτουργίας του, συνοψίζονται στο πίνακα (6.7). Το υψηλό φορτίο, αφορά τις στιγμές της εκκίνησης και της ανηφόρας του αγώνα, όπου η απαίτηση ροπής είναι ίση με 10,5 Nm. Το χαμηλό φορτίο αναφέρεται στο υπόλοιπο μέρος της πίστας όπου η απαιτούμενη ροπή έχει υπολογιστεί και έχει βρεθεί ίση με 2,5 Nm. Τέλος το βέλτιστο φορτίο είναι η φόρτιση στην οποία έχει την μέγιστη απόδοσή του ο κινητήρας, η τιμή αποδιδόμενη ροπής για αυτή τη φόρτιση βρέθηκε ίση με 4,62 Nm. Όπως φαίνεται από τον πίνακα το αρμονικό περιεχόμενο μειώνεται καθώς μειώνεται η πυκνότητα ρεύματος. Επίσης φαίνεται ότι στις μικρότερες φορτίσεις ο κινητήρας παρουσιάζει μεγάλη αύξηση της κυμάτωσης ροπής. Παρά την αύξηση της κυμάτωσης ροπής ο κινητήρας παρουσιάζει αύξηση της απόδοσής του κατά το χαμηλό φορτίο, αποτέλεσμα πολύ θετικό καθώς αυτή η φόρτιση χρειάζεται στο μεγαλύτερο μέρος της διαδρομής. Η μέγιστη βέβαια απόδοση της μηχανής είναι το 94.7% και εμφανίζεται όταν η τροφοδοσία παρέχει πυκνότητα ρεύματος $1.7 \frac{A}{mm^2}$. Λόγω των μεγάλων υπομετρικών διαφορών που παρουσιάζει η διαδρομή αναμένεται να εμφανιστεί αρκετές φορές η ανάγκη απόδοση μεγαλύτερης ροπής από αυτής του χαμηλού φορτίου και ίσης με αυτής του βέλτιστου. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα η μηχανή να λειτουργεί στις φορτίσεις όπου εμφανίζει την καλύτερη απόδοσή της.

6.9.3.3 Προκαταρκτική και βέλτιστη γεωμετρία μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Όπως και για τη μηχανή μόνιμων μαγνητών, σε αυτό το κεφάλαιο αναδεικνύονται οι διαφορές και οι ομοιότητες της προκαταρκτικής και της βέλτιστης μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης.



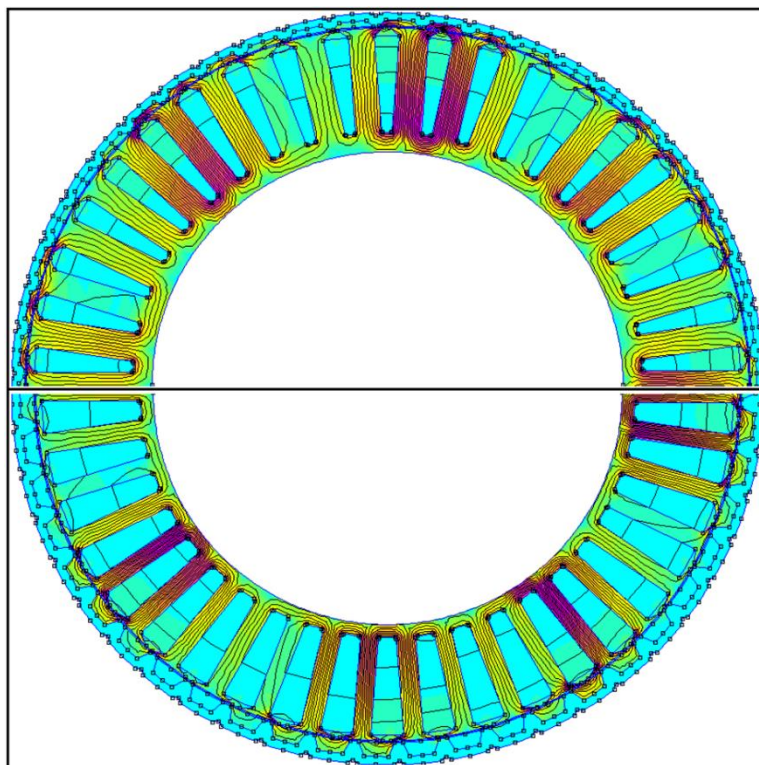
Σχήμα 6.20 Πλεγματοποίηση αρχικής και βέλτιστης γεωμετρίας μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Στο σχήμα (6.20) παρουσιάζονται, η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε σαν πρότυπο για την διαδικασία βελτιστοποίησης (κάτω μέρος του σχήματος) και η βέλτιστη γεωμετρία που προέκυψε από τη διαδικασία αυτή (πάνω μέρος του σχήματος). Η ακρίβεια του πλέγματος παρέμεινε στα ίδια επίπεδα, για την διαφύλαξη της ακρίβειας των μετρήσεων. Ο αριθμός τριγωνικών στοιχείων της βέλτιστης γεωμετρίας ανήλθε στα 55883 και της αρχικής γεωμετρίας στα 57853. Η τοπολογία του πάνω μέρους του σχήματος έχει αρκετές διαφορές με αυτή του κάτω μέρους. Καταρχήν η διάμετρος διακένου είναι αρκετά μεγαλύτερη και το πάχος των κομματιών σιδήρου του δρομέα αισθητά μικρότερο. Μια ακόμα διαφορά των δύο γεωμετριών είναι το πάχος των δοντιών και κατ' επέκταση η επιφάνεια των αυλάκων. Παρά τις διαφορές, παρατηρείται όμοιος τρόπος δημιουργίας άνισων δοντιών, με το πάχος των ενδιάμεσων να ταυτίζεται σχεδόν με αυτό των κύριων δοντιών και στις δύο μηχανές.

Πίνακας 6.8: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αρχικής και βέλτιστης τοπολογίας μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

	Αρχική γεωμετρία	Βέλτιστη γεωμετρία
Ενεργό μήκος (mm)	36	34
Διάμετρος διακένου (mm)	250	294
Μήκος σώματος κύριου δοντιού (mm)	35	40
Μήκος σώματος ενδιάμεσου δοντιού (mm)	2	3.2
Πάχος σώματος κύριου δοντιού (mm)	7	11.9
Πάχος σώματος ενδιάμεσου δοντιού (mm)	6.3	10.7
Ποσοστό πάχους ενδιάμεσου δοντιού (%)	90	90
Πάχος τμήματος σιδήρου δρομέα (mm)	5	2.48
Ποσοστό γωνίας μαγνήτη επί πολικού βήματος (%)	80	88
Επιφάνεια αύλακας (mm ²)	319	288
Διατομή καλωδίου (mm ²)	20	18
Αριθμός ελιγμάτων	8	8

Στον παραπάνω πίνακα (6.8), αποτυπώνονται οι τιμές των βασικών μεταβλητών σχεδίασης των δύο τοπολογιών και γίνεται μια ποσοτική κατανόηση των διαφορών των δύο γεωμετριών του σχήματος (6.20). Το ενεργό μήκος των μηχανών το οποίο δεν φαίνεται στο σχήμα είναι σχετικά ίσο. Όσο αφορά τη διάμετρο διακένου, αυτή της βέλτιστης γεωμετρίας είναι μεγαλύτερη κατά 44 mm. Διαφορά παρατηρείται στη μορφή των δοντιών τόσο στο μήκος, με αυτά της βέλτιστης μηχανής να είναι μεγαλύτερα κατά 4 mm, όσο και στο πάχος αυτών, το οποίο πάλι είναι μεγαλύτερο στη βέλτιστη γεωμετρία κατά 4 mm. Η μεταβλητή που επηρεάζει τη δημιουργία άνισων δοντιών παραμένει στην ίδια τιμή, χωρίς επομένως να αλλάζει αισθητά η κατανομή των αυλάκων στο στάτη. Τέλος υπάρχει μια μικρή μείωση της επιφάνειας της αύλακας λόγω της αύξησης του πάχους των δοντιών της μηχανής.



Σχήμα 6.21 Κατανομή μαγνητικών ροών αρχικής και βέλτιστης γεωμετρίας μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Στο σχήμα (6.21), παρουσιάζεται η κατανομή των μαγνητικών ροών στην αρχική (κάτω μέρος σχήματος) και στη βέλτιστη (πάνω μέρος σχήματος) γεωμετρία της μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Από το σχήμα παρατηρείται καλύτερη κατανομή στη βέλτιστη γεωμετρία καθώς και μεγαλύτερη πυκνότητα μαγνητικής ροής στα διάφορα σημεία του κινητήρα. Αυτή η καλύτερη κατανομή δικαιολογεί μικρότερο ποσοστό αρμονικού περιεχομένου της μηχανής. Επίσης γίνονται πάλι εμφανείς οι διαφορές στη σχεδίαση των δύο μηχανών, με την βέλτιστη γεωμετρία να χρησιμοποιεί μεγαλύτερη διάμετρο, μακρύτερα και πιο μεγάλα σε πάχος δόντια με μικρότερες αύλακες, και με ίδια σχεδίαση άνισων δοντιών και στις δύο μηχανές.

6.9.3.4 Ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά των μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει σύγκριση των βασικών μεγεθών των δύο κινητήρων μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης καθώς και παρουσίαση της απόδοσης και της μεταβολής των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών της βέλτιστης μηχανής, η οποία έχει επιλεγεί, για τρεις διαφορετικές φορτίσεις της.

Πίνακας 6.9: Ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά αρχικής και βέλτιστης μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

	Αρχική γεωμετρία	Βέλτιστη γεωμετρία
Πυκνότητα ρεύματος (A/mm ²)	4	4
Αρμονικό περιεχόμενο (%)	45.73	40.24
Αντί-ΗΕΔ (V)	9.82	11.33
Ροπή (Nm)	10.7	10.8
Κυμάτωση Ροπής (%)	13.58	8.41
Βάρος Χαλκού (kg)	3.76	3.01
Βάρος σιδήρου (kg)	5.76	7.28
Βάρος δρομέα (kg)	1.73	0.87
Συνολικό Βάρος (kg)	11.25	11.16
Απώλειες Χαλκού (W)	138.98	114.49
Απώλειες Σιδήρου (W)	13.38	10.95
Συνολικές απώλειες (W)	152.36	125.44
Απόδοση κινητήρα (%)	68.77	73.01

Από τον παραπάνω πίνακα (6.9), γίνεται εμφανή η βελτίωση στην γενική απόδοση της μηχανής, με τον αρχικό κινητήρα να έχει απόδοση 68,77% και το βέλτιστο κινητήρα να έχει απόδοση 73,01%, μεγαλύτερη κατά 4,24%. Γενικότερα εμφανίζεται βελτίωση σε όλα τα χαρακτηριστικά του κινητήρα. Το ποσοστό του αρμονικού περιεχομένου έχει μειωθεί κατά 5,49% λόγω της καλύτερης τοπολογίας του στάτη και του δρομέα. Επίσης και η κυμάτωση ροπής σημείωσε πτώση της τάξης του 5,17%. Το βάρος της μηχανής παρέμεινε στο ίδιο επίπεδο, με ταυτόχρονη όμως μείωση των απωλειών του κινητήρα κατά 17,67%.

Πίνακας 6.10: Ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά βέλτιστης γεωμετρίας μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης σε διάφορα σημεία λειτουργίας

	Υψηλό φορτίο	Χαμηλό φορτίο	Βέλτιστο φορτίο
Πυκνότητα ρεύματος (A/mm ²)	4	2	3.2
Αρμονικό περιεχόμενο (%)	40.24	40.24	40.24
Αντί-ΗΕΔ (V)	11.33	5.90	9.35
Ροπή (Nm)	10.8	2.8	7.32
Κυμάτωση Ροπής (%)	8.41	12.83	10.96
Βάρος Χαλκού (kg)	3.01	3.01	3.01
Βάρος σιδήρου (kg)	7.28	7.28	7.28
Βάρος δρομέα (kg)	0.8730	0.8730	0.8730
Συνολικό Βάρος (kg)	11.16	11.16	11.16
Απώλειες Χαλκού (W)	114.49	28.62	73.27
Απώλειες Σιδήρου (W)	10.95	3.92	7.94
Συνολικές απώλειες (W)	125.44	32.54	81.21
Απόδοση κινητήρα (%)	73.01	72.99	74.11

Η απόδοση του κινητήρα και τα υπόλοιπα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά του, για τρία διαφορετικά σημεία λειτουργίας του, συνοψίζονται στο πίνακα (6.10). Το υψηλό φορτίο, αφορά τις στιγμές της εκκίνησης και της ανηφόρας του αγώνα, όπου η απαίτηση ροπής είναι ίση με 10,5 Nm. Το χαμηλό φορτίο αναφέρεται στο υπόλοιπο μέρος της πίστας όπου η απαιτούμενη ροπή έχει υπολογιστεί και έχει βρεθεί ίση με 2,5 Nm. Τέλος το βέλτιστο φορτίο είναι η φόρτιση στην οποία έχει την μέγιστη απόδοσή του ο κινητήρας, η τιμή αποδιδόμενη ροπής για αυτή τη φόρτιση βρέθηκε ίση με 7,32 Nm. Όπως γίνεται φανερό από τον πίνακα ο κινητήρας παρουσιάζει μια μικρή πτώση στη απόδοση του στο χαμηλό φορτίο καθώς το υψηλό φορτίο βρίσκεται πολύ κοντά στη φόρτιση βέλτιστης λειτουργίας του κινητήρα. Το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης παραμένει αμετάβλητο και στις τρεις φορτίσεις. Η κυμάτωση ροπής παρουσιάζει μια μικρή αύξηση της τάξης του 4,42% για το χαμηλό φορτίο και του 2,55% για το φορτίο βέλτιστης λειτουργίας. Καθώς μειώνεται το ρεύμα γραμμής μειώνονται αντίστοιχα και οι απώλειες χαλκού, αισθητή πτώση σημειώνουν σε αντίθεση με τη μηχανή μόνιμων μαγνητών και οι απώλειες σιδήρου καθώς σε αυτό τον τύπο κινητήρα δεν υπάρχουν μαγνήτες ώστε να παράγουν συνεχώς ένα μαγνητικό πεδίο επομένως και συνεχόμενη παραγωγή απωλειών πυρήνα.

6.9.4 Τελική επιλογή

Με το πέρας της διαδικασίας βελτιστοποίησης των μηχανών επιφανειακών μόνιμων μαγνητών και των μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, προέκυψαν τα μέτωπα Pareto των διαδικασιών αυτών με τις βέλτιστες γεωμετρίες για κάθε τύπο. Από αυτά επιλέχθηκαν οι καταλληλότεροι κινητήρες, ένας από κάθε τύπο, για την εφαρμογή τους στο σύστημα κίνησης του Πυρφόρου-II.

Από τους δύο αυτούς κινητήρες ανταγωνιστικότερη επιλογή αποτελεί ο κινητήρας μόνιμων μαγνητών, η απόδοση του οποίου είναι αρκετά υψηλότερη από αυτή του κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, με τη διαφορά στην απόδοση να βρίσκεται στο 19.72%.

Για την συγκεκριμένη εφαρμογή, η μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης αποδείχτηκε ακατάλληλη, καθώς η απαίτηση σε ενέργεια είναι χαμηλή της τάξης των (~450W), παράγοντας ο οποίος επηρεάζει αισθητά την απόδοση αυτών των κινητήρων^{[25][26]}. Η ταυτόχρονη απαίτηση χαμηλής ταχύτητας στροφών, λόγω της τοποθέτησης του κινητήρα στον τροχό του οχήματος μείωσε ακόμα περισσότερο την απόδοση αυτού του τύπου μηχανής. Επιπροσθέτως αποδείχτηκε ότι η κατασκευή στάτη παρόμοιου με αυτού της μηχανής μόνιμων μαγνητών προσφέρει μεγάλα οφέλη στη κυμάτωση ροπής του κινητήρα, κρατώντας την σε πολύ χαμηλά επίπεδα για το είδος της^{[12][27]}, με ταυτόχρονη όμως μείωση της απόδοσης της μηχανής. Στη μείωση της κυμάτωσης ροπής βοήθησε και η επιλογή μεγάλου αριθμού πόλων και αυλάκων, καθώς έτσι γίνεται καλύτερη κατανομή των μαγνητικών ροών στο χώρο.

Τελικά για την παρούσα εφαρμογή επιλέγεται η βέλτιστη γεωμετρία της μηχανής επιφανειακών μόνιμων μαγνητών, η οποία παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και τα χαρακτηριστικά της οποίας παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα (6.11).

Πίνακας 6.11: Ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά επιλεγθείσας μηχανής

	Υψηλό φορτίο	Χαμηλό φορτίο
Πυκνότητα ρεύματος (A/mm ²)	4	1
Αρμονικό περιεχόμενο (%)	0.98	0.92
Αντί-ΗΕΔ (V)	10.05	9.912
Ροπή (Nm)	10.7	2.8
Κυμάτωση Ροπής (%)	6.54	24.2
Βάρος Χαλκού (kg)	1.98	1.98
Βάρος σιδήρου (kg)	0.60	0.60
Βάρος δρομέα (kg)	0.38	0.38
Συνολικό Βάρος (kg)	2.96	2.96
Απώλειες Χαλκού (W)	22.22	1.39
Απώλειες Σιδήρου (W)	4.13	4.11
Συνολικές απώλειες (W)	26.35	5.5
Απόδοση κινητήρα (%)	92.73	94.11

Όπως είναι φανερό και από τον πίνακα (6.11), η μηχανή που επιλέχθηκε παρουσιάζει αρκετά μικρές απώλειες ίσες με 26.35 W και αρκετά μεγάλο ποσοστό απόδοσης της τάξης του 92.73% και ένα αρκετά χαμηλό ποσοστό αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης, μικρότερο της μονάδας. Αυτό το οποίο επίσης είναι πολύ σημαντικό, είναι η αύξηση της απόδοσης του κινητήρα στο χαμηλό φορτίο, εφόσον η φόρτιση αυτή είναι πιο κοντά στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας της μηχανής, καθώς στο μεγαλύτερο διάστημα της διαδρομής η απαιτούμενη ροπή, επομένως και το απαιτούμενο φορτίο θα είναι ίσο με το χαμηλό φορτίο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας σχεδιάστηκαν και βελτιστοποιήθηκαν μέσω ενός πολυκριτηριακού εξελικτικού αλγορίθμου δύο διαφορετικοί τύποι σύγχρονων μηχανών για πρότυπο ηλεκτρικό όχημα. Μια μηχανή επιφανειακών μόνιμων μαγνητών και μια μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Από αυτή τη διαδικασία εξετάστηκαν τα συγκριτικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα για τις δύο γεωμετρίες και τις διαμορφώσεις που προέκυψαν, και αναδείχθηκε η καταλληλότητα της προτεινόμενης διαδικασίας βελτιστοποίησης ηλεκτρικών κινητήρων.

7.1 Κυριότερα συμπεράσματα

- Σχεδιάστηκε και βελτιστοποιήθηκε μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης 42 αυλάκων και 50 πόλων και συγκρίθηκε με αντίστοιχη μηχανή μόνιμων επιφανειακών μαγνητών ημιτονικής τάσεως τροφοδοσίας.
- Η βελτιστοποιημένη μηχανή επιφανειακών μόνιμων μαγνητών έχει απόδοση 92.73% σε ονομαστική λειτουργία και εξαιρετικά χαμηλή αρμονική παραμόρφωση της επαγόμενης τάσης (<1%), διατηρώντας ταυτόχρονα το βάρος της σε χαμηλά επίπεδα δεδομένου του τύπου της εφαρμογής (2,9 Kg).
- Η Βελτιστοποιημένη μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης έχει χαμηλή απόδοση 73% σε ονομαστική απόδοση και εμφανίζει περιορισμένη κυμάτωση ροπής για το είδος της μηχανής (8.4%).
- Η διαμόρφωση των μηχανών με 42 αυλάκες και 50 πόλους μπορεί να προσφέρει μεγάλα οφέλη στους τομείς της κυμάτωσης ροπής και της αρμονικής παραμόρφωσης της επαγόμενης τάσης.
- Η κυμάτωση ροπής είναι ένας παράγοντας αρκετά ευμετάβλητος, καθώς επηρεάζεται έντονα από πολύ μικρές αλλαγές στα τοπικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αυλάκων του κινητήρα.
- Η επιλογή ημιτονικής τριφασικής τάσης για τη τροφοδοσία μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης προσφέρει αισθητή βελτίωση στη κυμάτωση ροπής της μηχανής αλλά εμφανίζει χαμηλή απόδοση στην ονομαστική λειτουργία της.
- Παρατηρήθηκε ότι στη γεωμετρία με 42 αυλάκες και 50 πόλους δεν είναι εφικτή η υλοποίηση τυλίγματος διπλής στρώσης συμβατού με τους περιορισμούς μεγέθους της μηχανής.
- Σε εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας και χαμηλής ισχύος, οι μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης παρουσιάζουν χαμηλή απόδοση.

- Επιβεβαιώθηκε η χρησιμότητα δημιουργίας πέλματος δοντιού στις μηχανές μεταβλητής αντίστασης για την αύξηση της απόδοσης τους, λόγω της εξάρτησης αυτής από την επαγωγή.
- Παρατηρήθηκε η ανάγκη δημιουργίας σταθερού πάχους πέλματος δοντιού για την καλύτερη απόδοση του κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης.
- Η πλήρως παραμετροποιημένη σχεδίαση που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί ισχυρό εργαλείο για την σύγκριση τοπολογιών με διαφορετικές παραμέτρους κατά την αναζήτηση της βέλτιστης γεωμετρίας.
- Κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης αναδείχθηκε η πολυπλοκότητα που εισάγουν οι πολλές παράμετροι βελτιστοποίησης επιβαρύνοντας σημαντικά τον χρόνο επίλυσης και εισάγοντας επιπλέον τοπικά ελάχιστα στα οποία οι χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι πιθανόν να εγκλωβιστούν.
- Η χρησιμοποίηση μεγάλου πληθυσμού και ταυτόχρονα μεγάλου εξωτερικού αρχείου στους αλγορίθμους βελτιστοποίησης βοηθάει την αποφυγή εγκλωβισμού της διαδικασίας σε κάποιο τοπικό ελάχιστο/μέγιστο, με μειονέκτημα την αύξηση του χρόνου ολοκλήρωσης της διαδικασίας.

7.2 Σημεία επιστημονικής συνεισφοράς

- Διερευνήθηκε η καταλληλότητα των πολυκριτηριακών εξελικτικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης στη διαδικασία σχεδίασης πολύ-πολικών μηχανών μόνιμων μαγνητών και μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης.
- Διερευνήθηκε ο καταλληλότερος αριθμός μεταβλητών βελτιστοποίησης σε σχέση με το μέγεθος του αρχείου καθώς και με το μέγεθος του πληθυσμού ανάλυσης.
- Αναπτύχθηκε μια μέθοδος που καταλήγει μετά από περιορισμένο αριθμό βημάτων σε βέλτιστη γεωμετρία χωρίς την ύπαρξη σημαντικών παραδοχών και θεωρητικών υποθέσεων.
- Εξετάστηκε η ηλεκτρική μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης σε διαμόρφωση κινητήρα τροχού με ημιτονική τροφοδοσία.

7.3 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση

- Ένα σημαντικό θέμα για περαιτέρω διερεύνηση είναι η πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων για τους δύο κινητήρες.
- Η διερεύνηση αντίστοιχου κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης με χρήση παλμικής τροφοδοσίας.

Βιβλιογραφία:

1. C.C. Chan, K.T. Chau, *Modern electric vehicle technology*, University of Hong Kong, Oxford University Press.
2. Husain Iqbal, *Electric and hybrid vehicles: design fundamentals*, New York, CRC Press, 2003.
3. www.alternative-energy-news.info/technology/transportation/electric-cars
4. www.afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work
5. Ίρις Ειρήνη Κ. Κουκουβίνη, Μοντελοποίηση, Πειραματική Επιβεβαίωση Και Βελτιστοποίηση Γεωμετρίας Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών, Διπλωματική εργασία, Αθήνα, Οκτώβριος 2016, ΕΜΠ.
6. Χρήστος Θ. Κρασόπουλος, Σχεδίαση και κατασκευή κινητήρα μονίμων μαγνητών για πρότυπο ηλεκτρικό όχημα, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2013, ΕΜΠ.
7. M. Zeraoulia, M.E.H. Benbouzid, D. Diallo, Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 55, Issue: 6, Nov. 2006.
8. Nasser Hashernnia, Behzad Asaei, Comparative Study of Using Different Electric Motors in the Electric Vehicles, *Proceedings of the 2008 18th International Conference on Electrical Machines*, pages 1– 8, 2008 (DOI: 10.1109/ICELMACH.2008.4800157).
9. Ηλίας Α. Καραφυλλάκης, Σχεδίαση κινητηρίου συστήματος για πρότυπο ηλεκτρικό όχημα, Διπλωματική εργασία, Αθήνα, 2015,ΕΜΠ.
10. R. Krishnan, *Switched reluctance motor drives, modeling, simulation, analysis, design and applications*, CRC Press,2001.
11. H. M. Amreiz, B. C. Mecrow, C. Weiner, Switched reluctance machines with simple hoop windings, 2002 International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (Conf. Publ. No. 487), Pages: 522 - 527,2002 (DOI: 10.1049/cp:20020171).
12. S. P. Nikam, R. Vandana and B. G. Fernandes, "A High Torque Density Permanent Magnet Free Motor for In-wheel Electric Vehicle Application," *IEEE Trans. on Industry Application*, vol. 48, no. 6, pp. 2287-2295, Nov. 2012.
13. B. C. Mecrow, E. A. El-Kharashi, J. W. Finch, A. G. Jack, Segmental rotor switched reluctance motors with single-tooth windings, *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, Volume: 150, Issue: 5, pages 591 – 599, 2003 (DOI: 10.1049/ip-epa:20030366).
14. R. Vandana, Naresh Vattikuti, B. G. Fernandes, A Novel High Power Density Segmented Switched Reluctance Machine, 2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, pages 1 – 7, 2008 (DOI: 10.1109/08IAS.2008.66).
15. www.emotor.com
16. Nicola Bianchi, *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements*, CRC Press,2005.

17. Μίνωα Η. Μπενιακάρ, Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση κινητήρων με θεώρηση των απωλειών των μόνιμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, 2014, ΕΜΠ.
18. Γεώργιος Μ. Ποτηριάδης, Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση κινητήρα μόνιμων μαγνητών για πρόωση πλοίου, Διπλωματική εργασία, Αθήνα, 2013, ΕΜΠ.
19. E. Zitzler, M. Laumanns, and L. Thiele. SPEA2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm for multiobjective optimization, *Evolutionary Methods for Design, Optimisation, and Control*, CIMNE, pages 95- 100, 2002.
20. Sokratis Sofianopoulos, George Tambouratzis, Studying the spea2 algorithm for optimising a pattern-recognition based machine translation system, *Computational Intelligence in Multicriteria Decision-Making (MDCM)*, 2011 IEEE Symposium on, pages 97-104, 2011.
21. David W. Corne, Nick R. Jerram, Joshua D. Knowles, Martin J. Oates, PESA-II: Region-based Selection in Evolutionary Multiobjective Optimization, *Proceedings of the 3rd Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, pages 283-290, 2001.
22. <http://www.shell.com/energy-and-innovation/shell-ecomarathon.html>
23. <http://www.arnoldmagnetics.com/en-us/Products/Neodymium-Magnets>
24. Ευφροσύνη Θεοδώρου, Σχεδίαση και πειραματική επιβεβαίωση κινητήρα μόνιμων μαγνητών για εφαρμογή ηλεκτροκίνησης, Διπλωματική εργασία, Αθήνα, 2011, ΕΜΠ.
25. M. Hasegawa, N. Tanaka, A. Chiba, T. Fukao, The operation analysis and efficiency improvement of switched reluctance motors with high silicon steel, *Proceedings of the Power Conversion Conference-Osaka 2002*, Volume: 3, Pages: 981 – 986, 2002.
26. Hiroaki Hayashi, Kensaku Nakamura, Akira Chiba, Tadashi Fukao, Kanokvate, Efficiency Improvements of Switched Reluctance Motors With High-Quality Iron Steel and Enhanced Conductor Slot Fill, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Volume: 24, Pages: 819 – 825, 2009.
27. Tsuyoshi Higuchi, Kazuaki Suenaga, Takashi Abe, Torque ripple reduction of novel segment type Switched reluctance motor by increasing phase number, *2009 International Conference on Electrical Machines and Systems*, Pages: 1 – 4, 2009.