



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

## ΕΥΡΩΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΟΧΗΜΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Γ. ΓΚΙΤΣΟΣ

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2020





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

## ΕΥΡΩΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΟΧΗΜΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Γ. ΓΚΙΤΣΟΣ

**Επιβλέπων :** Αντώνιος Γ. Κλαδάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου 2020.

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

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

.....  
Αντώνιος Αντωνόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

.....  
Δημήτριος Γ. Γκίτσος

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

Copyright © Δημήτριος Γ. Γκίτσος, 2020

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 την προσαρμογή του σχεδιασμού ενός ηλεκτρικού κινητήρα μονίμων μαγνητών, που έχει ήδη σχεδιαστεί για εφαρμογή σε συγκεκριμένο ηλεκτρικό όχημα, προκειμένου να επικαιροποιηθεί η μελέτη στα νέα δεδομένα, που έχουν προκύψει για το όχημα, να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις των ενδεχομένων ατελειών της κατασκευής και να μελετηθεί η ευρωστία υπό αντίξοες συνθήκες.

Αρχικά, αναλύονται τα επί μέρους υποσυστήματα του κινητήρα, οι ιδιότητες των υλικών κατασκευής του, τα κριτήρια επιλογής υλικών και οι διάφορες πιθανές διαμορφώσεις. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στους μόνιμους μαγνήτες, οι οποίοι θα μελετηθούν εκτενώς στη συνέχεια. Θεμελιώνεται το ισοδύναμο κύκλωμα σε πλαίσιο δύο αξόνων dq, και γίνεται μια ανάλυση αυτού του κυκλώματος, ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τον έλεγχο και τα όρια λειτουργίας του κινητήρα. Επίσης, περιγράφονται οι αρχές βελτιστοποίησης και εύρωστου σχεδιασμού.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η προκαταρκτική διερεύνηση ευρωστίας του σχεδιασμού της μηχανής και τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Προτείνονται κατάλληλες τροποποιήσεις, που περιορίζουν την επίπτωση των κατασκευαστικών ανοχών ή απλοποιούν την κατασκευαστική διαδικασία. Επίσης, προσδιορίζονται τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά που θα εξεταστούν περαιτέρω και εξετάζεται ο τρόπος που αυτά επηρεάζουν τη λειτουργία της μηχανής.

Σε επόμενο στάδιο, γίνεται η ανάλυση της μηχανής, με χρήση αλγορίθμων ανάλυσης γεωμετρίας. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν, εισάγονται σε προσομοίωση του κύκλου φόρτισης. Προτείνεται μεθοδολογία αξιολόγησης κινητήρων για χρήση σε ηλεκτρικά οχήματα, με κριτήρια την επίδοση, την απόδοση, τη μάζα και την ποιότητα ισχύος και χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των διαφόρων κινητήρων που εξετάζονται και την επιλογή του βέλτιστου κινητήρα.

Ακολουθεί ανάλυση ευαισθησίας σε σφάλματα μονίμων μαγνητών. Μελετάται η επίδραση των μεταβολών θερμοκρασίας, καθώς και η επίδραση της ανακριβούς τοποθέτησης των μαγνητών, για δύο διαφορετικά υλικά μαγνήτη. Τελικά, επιλέγεται το υλικό που εμφανίζει τη βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης, ακόμα και στις πιο αντίξοες συνθήκες.

Τέλος, συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα, καθώς και τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας.

Για την παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά Matlab, Simulink και FEMM.

Λέξεις Κλειδιά: Shell Eco Marathon “Urban Concept”, κινητήρας μονίμων μαγνητών, ηλεκτρικό όχημα, μαγνητικά υλικά, αγωγή υλικά, κίνηση οχήματος, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, βαθμός απόδοσης, κύκλος φόρτισης, εύρωστος σχεδιασμός, απομαγνήτιση μονίμων μαγνητών, ανάλυση ευαισθησίας

## Abstract

This thesis undertakes the modification of a designed permanent magnet electric motor, that is already designed for use in a specific electric vehicle and aims to update the design, according to new needs, minimize any possible negative effect of the manufacturing process tolerance and investigate robustness, under adverse conditions.

Initially, there is a presentation of the motor sub-systems, the material properties, the criteria for choosing the right materials and the different topologies, that can be used. Emphasis is given in permanent magnets, because they will be examined in detail, at later stages. A dq-axis equivalent circuit is founded, in order to get some useful conclusions about motor control and operating limits. Furthermore, principles of optimization and robustness are described.

After that, there is a presentation of a preliminary robustness research and results. Some first adjustments are proposed, that restrict the impact of the manufacturing process tolerance and simplify manufacturing process. Furthermore, there is a presentation of the characteristics that are under research and how they affect the motor operation.

In a next level, the motor is analyzed, using geometry analysis algorithms. The results are used to simulate the motion of the car in an actual operating cycle. A method for evaluating motors used for electric vehicles is proposed, taking into account criteria of performance, efficiency, mass and power quality. The method is used to evaluate different motors.

The following step is a parameter sensitiveness analysis about deficiencies of permanent magnets. Effects of temperature variance and inaccurate magnet position are calculated, using two different magnet materials. The material having the optimum objective function value, under worst conditions, is chosen for the application.

Finally, the main results, as well as the main conclusions are collected.

Software used for this thesis is Matlab, Simulink and FEMM.

Kew words: Shell Eco Marathon “Urban Concept”, PMSM, electric vehicle, magnetic materials, electrical conductors, car motion, finite element method, motor efficiency, operating cycle, robust design, demagnetization of permanent magnets, sensitivity analysis

## Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους βοήθησαν για την εκπόνησή της και όσους με βοήθησαν συνολικά στη φοίτησή μου στη Σχολή.

Ευχαριστώ τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας, Καθηγητή κ. Αντώνιο Κλαδά, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου μια τόσο ενδιαφέρουσα εργασία, καθώς και για την εύστοχη καθοδήγησή του. Τον ευχαριστώ, επίσης, για τις γνώσεις που μου μετέδωσε κατά τη φοίτησή μου στο Πολυτεχνείο.

Ευχαριστώ το Μέλος Ε.ΔΙ.Π του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών & Ηλεκτρονικών Ισχύος, κ. Παναγιώτη Ροβολή, για την υποστήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές, που μου έδωσε κατά την εκπόνηση της εργασίας, αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια φοίτησής μου στη σχολή.

Ευχαριστώ τον Τεχνικό του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών & Ηλεκτρονικών Ισχύος, κ. Παναγιώτη Ζάννη, για την άρτια καθοδήγησή του επί των τεχνικών θεμάτων.

Ευχαριστώ, επίσης, τους εθελοντές της ομάδας Prometheus-Eco-Racing, για την άψογη συνεργασία τους και τη βοήθειά τους κατά τον καθορισμό των απαιτήσεων της εφαρμογής.

Ιδιαίτερα, ευχαριστώ τους συμφοιτητές μου και μέλη της ομάδας Prometheus-Eco-Racing, Θανάση Κουμπούλη και Αλέξανδρο Μπενετάτο. Η συνεργασία μας και τα συμπληρωματικά ερευνητικά ενδιαφέροντά μας, βοήθησαν στη διεύρυνση των τομέων μελέτης της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστώ το συμφοιτητή φίλο και συνάδελφο, Παναγιώτη Λάμπρο, για τη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια φοίτησής μου στη σχολή.

Ευχαριστώ τον καθηγητή μου κατά τη φοίτησή μου στη ΣΤΥΑ και νυν Επίκουρο Καθηγητή (ΕΠΣ) του ΕΜΠ, Γεώργιο Κιόκε. Το πάθος του και ο ενθουσιασμός του κατά την εκπαιδευτική διαδικασία, καθώς και η ακαδημαϊκή του πορεία ήταν και είναι μια πηγή έμπνευσης για εμένα.

Ευχαριστώ, για όλα, το φίλο μου, συνάδελφο και καθηγητή μου κατά τη φοίτησή μου στη ΣΤΥΑ, Μοσχίδη Αλέξιο.

Ευχαριστώ την οικογένειά μου, για τη φιλομάθεια την οποία μου ενέπνευσε.

Τέλος, ευχαριστώ τη Μαρία για την υποστήριξη και την υπομονή της κατά τη διάρκεια συγγραφής της εργασίας.

## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή .....	13
1.1 Σκοπός Της Εργασίας.....	13
1.2 Δομή Της Εργασίας .....	13
Κεφάλαιο 2 Θεωρητικό Υπόβαθρο .....	15
2.1 Ηλεκτροκίνηση .....	15
2.2 Σύγχρονος Ηλεκτρικός Κινητήρας Μονίμων Μαγνητών.....	16
2.3 Δομή Σύγχρονου Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών .....	17
2.4 Κατασκευαστικά Υλικά Ηλεκτρικών Μηχανών .....	18
2.4.1 Μαγνητικά Υλικά.....	18
2.4.1.1 Μη Μαγνητικά Υλικά .....	19
2.4.1.2 Σιδηρομαγνητικά Υλικά .....	19
2.4.1.2.1 Μαλακά Σιδηρομαγνητικά Υλικά .....	23
2.4.1.2.2 Σκληρά Σιδηρομαγνητικά Υλικά .....	23
2.4.1.2.2.1 Απομαγνήτιση Μονίμων Μαγνητών (Μη Αναστρέψιμη).....	24
2.4.2 Αγωγοί.....	25
2.4.2.1 Μονωτικά Υλικά (Electrical Insulators) .....	26
2.4.2.2 Αγώγιμα Υλικά (Electrical Conductors) .....	26
2.4.2.2.1 Εξάρτηση Της Ειδικής Αγωγιμότητας Από Τη Θερμοκρασία .....	26
2.4.2.2.2 Επιδερμικό Φαινόμενο Και Φαινόμενο Γειτνίασης (Skin Effect And Proximity Effect).....	27
2.4.2.2.3 Δινορεύματα Στους Σιδηρομαγνητικούς Πυρήνες (Eddy Currents) .....	28
2.4.3 Επιλογή Υλικών .....	28
2.4.3.1 Μαγνητικό Κύκλωμα .....	28
2.4.3.1.1 Σώμα Στάτη και Δρομέα .....	28
2.4.3.1.2 Μόνιμοι Μαγνήτες .....	29
2.4.3.1.2.1 Πρώτες Ύλες .....	29
2.4.3.1.2.2 Είδη Κατεργασίας.....	30
2.4.3.1.2.3 Σύγκριση Μονίμων Μαγνητών .....	32
2.4.3.2 Ηλεκτρικό κύκλωμα.....	32
2.4.3.2.1 Τύλιγμα Στάτη.....	32
2.4.3.2.2 Μονώσεις.....	32
2.5 Εναλλακτικές Διαμορφώσεις Κινητήρα.....	33
2.5.1 Τοπολογίες Μαγνητών.....	33



2.5.1.1 Επιφανειακοί Μαγνήτες (Surface Mounted Permanent Magnets) .....	34
2.5.1.2 Ένθετοι Μαγνήτες (Surface Embedded Permanent Magnets) .....	35
2.5.1.3 Εσωτερικοί Μαγνήτες (Inner Magnets).....	35
2.5.2 Τύλιγμα Στάτη.....	36
2.5.2.1 Συντελεστής Πληρότητας Αύλακος .....	37
2.5.2.2 Τρόποι Διανομής Τυλίγματος .....	37
2.5.2.2.1 Τύλιγμα Με Επικάλυψη Μεταξύ Των Φάσεων .....	37
2.5.2.2.1.1 Συγκεντρωμένο Τύλιγμα (Concentrated Winding)....	38
2.5.2.2.1.2 Κατανεμημένο Τύλιγμα (Distributed Winding) .....	39
2.5.2.2.1.3 Κατανεμημένο Τύλιγμα Κλασματικού Βήματος (Multi-Layer, Distributed Fractional Winding). .....	40
2.5.2.2.1.4 Βροχοτύλιγμα Και Κυματοτύλιγμα .....	43
2.5.2.2.2 Τύλιγμα Χωρίς Επικάλυψη Φάσεων.....	43
2.6 Ισοδύναμο Κύκλωμα Κινητήρα .....	45
2.6.1 Υπολογισμός Ισχύος-Ροπής.....	48
2.6.1.1 Βέλτιστη Αξιοποίηση Ρεύματος (Max Torque Per Ampere).49	
2.6.2 Όριο ΑΗΕΔ - Εξασθένιση Πεδίου (Flux Weakening) .....	51
2.6.3 Συμπεράσματα - Όρια Λειτουργίας Κινητήρα.....	52
2.7 Προβλήματα Βελτιστοποίησης (Optimization Problems).....	53
2.7.1 Βελτιστοποίηση Συναρτήσεων Μιας Μεταβλητής.....	53
2.7.2 Βελτιστοποίηση Συναρτήσεων Πολλών Μεταβλητών .....	53
2.7.2.1 Προβλήματα ελαχιστοποίησης – Συνάρτηση Κόστους.....	54
2.7.2.2 Η Μέθοδος Των Βαρών.....	54
2.8 Εύρωστος Σχεδιασμός (Robust Design).....	55
2.8.1 Εύρωστία Της Συνάρτησης Κόστους.....	55
2.8.2 Εύρωστία Των Περιορισμών (Robustness Of Constrains).....	56
Κεφάλαιο 3 Αρχική Σχεδίαση.....	57
3.1 Η Αρχική Μηχανή .....	57
3.1.1 Τρόπος Επιλογής Αρχικής Μηχανής.....	57
3.1.2 Στοιχεία Αρχικής Μηχανής.....	58
3.2 Επικαιροποίηση Μελέτης .....	58
3.3 Καθορισμός Απαιτήσεων Ροπής Στους Τροχούς .....	59
3.3.1 Επίδραση Στρεφόμενης Μάζας Στην Επιτάχυνση Του Οχήματος .....	59
3.3.2 Υπολογισμός Ισοδύναμης Μάζας Οχήματος .....	61
3.3.3 Υπολογισμός Χαρακτηριστικών Κινητήρα.....	62
3.4 Επανεξέταση Τυλίγματος.....	63
3.4.1 Τοποθέτηση Πηνίων Σε Σειρά.....	63

3.4.2	Αύξηση Συντελεστή Πληρότητας.....	64
3.5	Επανεξέταση Μαγνητικού Κυκλώματος.....	65
3.5.1	Μείωση Μαγνητικού Κυκλώματος-Μείωση Μάζας.....	65
3.5.2	Μείωση Ροής Σκέδασης Μεταξύ Των Μαγνητών.....	66
3.5.3	Μηχανική Σύνδεση Μεταξύ Άξονα Και Δρομέα.....	66
3.5.4	Μηχανική Ένωση Μεταξύ Στάτη Και Κελύφους .....	67
3.6	Εξέταση Μονίμων Μαγνητών .....	68
3.6.1	Μελέτη Επιδόσεων Σε Απομαγνήτιση (NdFeB) ....	Error! Bookmark not defined.
3.6.2	Μελέτη Σφάλματος Κατά Την Τοποθέτηση Μαγνητών.....	Error! Bookmark not defined.
3.7	Σύνοψη.....	71
<b>Κεφάλαιο 4 Σχεδίαση Μηχανής Με Χρήση Λογισμικού Πεπερασμένων Στοιχείων.....</b>		
<b>72</b>		
4.1	Πεδιακή Ανάλυση Με Τη Μέθοδο Των Πεπερασμένων Στοιχείων ...	72
4.2	Το Λογισμικό FEMM.....	72
4.2.1	Μαγνητοστατικά Προβλήματα.....	73
4.2.2	Οριακές Συνθήκες.....	74
4.3	Ο Κινητήρας Στο Λογισμικό FEMM .....	74
4.3.1	Γεωμετρία Μηχανής .....	74
4.3.2	Οριακές Συνθήκες (Για Το Δεδομένο Πρόβλημα) .....	75
4.3.3	Περιοχές και Ιδιότητες Υλικών .....	75
4.4	Ανάλυση Μηχανής Με Το Λογισμικό FEMM.....	79
4.4.1	Λειτουργική Κατάσταση .....	79
4.4.2	Προσομοίωση Σύγχρονης Περιστροφής .....	79
4.4.3	Υπολογισμός Ροπής.....	80
4.4.4	Υπολογισμός ΑΗΕΔ .....	81
4.4.5	Υπολογισμός Απωλειών.....	82
4.4.5.1	Υπολογισμός Απωλειών Χαλκού.....	82
4.4.5.2	Υπολογισμός Αρμονικών Μαγνητικού Πεδίου .....	83
4.4.5.3	Υπολογισμός Απωλειών Λόγω Εγγύτητας Και Επιδερμικού Φαινομένου .....	84
4.4.5.4	Υπολογισμός Απωλειών Πυρήνα.....	84
4.4.6	Υπολογισμός Μάζας.....	85
4.4.7	Εξαγωγή Καμπύλης Ταχύτητας-Ροπής T-N.....	86
4.4.8	Ονομαστική Λειτουργική Κατάσταση.....	89
4.4.9	Χάρτης Απόδοσης Κινητήρα .....	89
4.5	Ενεργειακή Αξιολόγηση Σε Ένα Γύρο Πίστας.....	90
4.5.1	Πίστα Διαγωνισμού.....	90

4.5.2 Προσομοίωση Οχήματος .....	91
4.5.3 Προσομοίωση Οδηγού .....	91
4.5.4 Προσομοίωση Κινητήρα .....	92
4.5.5 Αποτέλεσμα Προσομοίωσης.....	92
4.6 Συνάρτηση Κόστους-Βέλτιστος Κινητήρας.....	92
4.7 Επιλογή Διαμόρφωσης .....	93
4.8 Αποτελέσματα Ανάλυσης .....	98
4.8.1 Ονομαστική Λειτουργία .....	98
4.8.2 Καμπύλες.....	101
4.8.2.1 Καμπύλες Μέγιστης Ροπής Ανά Ampere (MTPA) .....	101
4.8.2.2 Καμπύλες Ροπής-Ταχύτητας (T-N).....	102
4.8.3 Βέλτιστη Απόδοση .....	105
4.8.4 Ενεργειακή Αξιολόγηση Σε Ένα Γύρο Πίστας.....	105
4.8.5 Παράμετροι Κινητήρα .....	108
4.8.5.1 Χαρακτηριστικά Τυλίγματος .....	108
4.8.5.2 Μάζα Κινητήρα .....	108
4.9 Παρατηρήσεις .....	109
4.9.1 Επίδραση Μάζας Στην Ενεργειακή Απόδοση Του Οχήματος....	109
4.9.2 Επίδραση Συντελεστή Πληρότητας Στην Ενεργειακή Απόδοση Του Οχήματος.....	110
4.9.3 Επίδραση Αριθμού Εν Σειρά Ελιγμάτων Στην Ενεργειακή Απόδοση Του Οχήματος .....	111
<b>Κεφάλαιο 5 Ανάλυση Ευρωστίας Και Ανάλυση Ευαισθησίας Μηχανής Σε Σφάλματα Μονίμων Μαγνητών .....</b>	<b>113</b>
5.1 Ομοιόμορφη Απομαγνήτιση Λόγω Αύξησης Θερμοκρασίας.....	113
5.2 Σφάλμα Τοποθέτησης Μαγνητών.....	116
5.3 Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα.....	119
5.3.1 Επίδραση Θερμοκρασίας Στην Ένεργειακή Κατανάλωση Του Οχήματος.....	119
5.3.2 Επίδραση Υλικού Στην Ενεργειακή Απόδοση Του Οχήματος Και Το Κόστος Σε Συνάρτηση Της Θερμοκρασίας Μαγνήτη .....	119
5.3.3 Επίδραση Σφάλματος Τοποθέτησης Στην Κυμάτωση Ροπής ....	120
5.3.4 Επίδραση Υλικού Στην Κυμάτωση Ροπής Και Το Κόστος Σε Συνάρτηση Του Σφάλματος Τοποθέτησης .....	121
5.3.5 Επιλογή Βέλτιστου Μαγνήτη Για Την Εφαρμογή .....	122
5.3.6 Συγκριτική Μελέτη Κινητήρων .....	122
<b>Κεφάλαιο 6: Σύνοψη Και Συμπεράσματα .....</b>	<b>124</b>
6.1 Εισαγωγή.....	124

<b>6.2 Αποτελέσματα .....</b>	<b>124</b>
<b>6.2.1 Μεθοδολογία.....</b>	<b>124</b>
<b>6.2.2 Ο Τελικός Κινητήρας .....</b>	<b>125</b>
<b>6.3 Συμπεράσματα .....</b>	<b>126</b>
<b>6.3.1 Επίδραση Μάζας Στην Ενεργειακή Απόδοση Του Οχήματος....</b>	<b>126</b>
<b>6.3.2 Επίδραση Συντελεστή Πληρότητας Στην Ενεργειακή Απόδοση     Του Οχήματος.....</b>	<b>127</b>
<b>6.3.3 Επίδραση Αριθμού Εν Σειρά Ελιγμάτων Στην Ενεργειακή     Απόδοση Του Οχήματος .....</b>	<b>127</b>
<b>6.3.4 Επίδραση Θερμοκρασίας Στην Ενεργειακή Απόδοση Του     Οχήματος.....</b>	<b>128</b>
<b>6.3.5 Επίδραση Σφάλματος Τοποθέτησης Στην Κυμάτωση Ροπής ....</b>	<b>128</b>
<b>6.3.6 Σύγκριση Αρχικού Και Τελικού Κινητήρα .....</b>	<b>129</b>
<b>6.4 Πρωτότυπη Συνεισφορά Της Εργασίας .....</b>	<b>129</b>
<b>6.5 Προτάσεις Για Περαιτέρω Διερεύνηση .....</b>	<b>130</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>131</b>
<b>Παράρτημα .....</b>	<b>134</b>
<b>Κατασκευαστικές Επιλογές Τυλίγματος Για Συντελεστή Πληρότητας 48-     63% .....</b>	<b>134</b>

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Σκοπός Της Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η επανασχεδίαση ενός ήδη σχεδιασμένου σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών. Η νέα σχεδίαση στοχεύει στη βελτιστοποίηση του κινητήρα με κριτήρια επίδοσης, απόδοσης, μάζας, ποιότητας ισχύος και ευρωστίας, μεταβάλλοντας κατά το ελάχιστο δυνατό την αρχική σχεδίαση.

Ο κινητήρας, που βελτιστοποιείται, έχει σχεδιαστεί για χρήση στο διαγωνισμό εξοικονόμησης ενέργειας “Shell Eco Marathon”, στην κατηγορία “UrbanConcept”. Ο κινητήρας έχει σχεδιαστεί με επιφανειακούς μαγνήτες, καταναεμημένο τύλιγμα απλής στρώσης και πρόκειται να τροφοδοτηθεί από μπαταρίες 48V μέσω αντιστροφεία. [1]

Η κατηγορία “UrbanConcept”, αφορά οχήματα με χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά των οχημάτων “δρόμου” (πόλης). Στα πλαίσια του διαγωνισμού, τα οχήματα διαγωνίζονται με σκοπό την χρήση ελάχιστης ενέργειας για να διανύσουν μια συγκεκριμένη διαδρομή, ενώ υπάρχουν και χρονικοί περιορισμοί για κάθε κομμάτι της διαδρομής. [2]

### 1.2 Δομή Της Εργασίας

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγή, που έχει ως σκοπό να κατατοπίσει τον αναγνώστη σχετικά με το περιεχόμενο και τη δομή της εργασίας.

Το δεύτερο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη βιβλιογραφική θεωρητική προσέγγιση της μηχανής μόνιμου μαγνήτη. Αρχικά, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και η δομή της μηχανής. Στη συνέχεια, αναλύονται εις βάθος οι ιδιότητες των κατασκευαστικών υλικών, ώστε στο επόμενο βήμα να προσδιοριστούν τα κατάλληλα υλικά για κάθε δομικό μέρος της μηχανής. Έπειτα, αναλύονται οι διάφορες τοπολογίες μαγνητών και οι πιθανές διαμορφώσεις του τυλίγματος του στάτη. Κατόπιν, θεμελιώνεται το ισοδύναμο κύκλωμα, αναλύονται κάποιες τεχνικές ελέγχου που σχετίζονται με την παρούσα εφαρμογή και ορίζονται ποιοτικά τα όρια λειτουργίας ενός σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών. Τέλος, αναφέρονται οι αρχές βελτιστοποίησης και εύρωστου σχεδιασμού.

Στο τρίτο κεφάλαιο εντοπίζονται τα βασικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του οχήματος και του κινητήρα. Κατά τον υπολογισμό, ή εκτίμηση των

χαρακτηριστικών αυτών, δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην ακρίβεια, με σκοπό την επίτευξη κατασκευαστικής ευρωστίας και απλότητας. Τέλος, εντοπίζονται πιθανά σφάλματα, οι επιπτώσεις των οποίων αναλύονται σε επόμενα κεφάλαια.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η λειτουργία του λογισμικού FEMM και διάφορες μεθοδολογίες για να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά του κινητήρα. Με τη χρήση των μεθοδολογιών παράγεται ένα πλήθος χαρακτηριστικών για τις πιθανές τοπολογίες. Στη συνέχεια, με το λογισμικό Simulink, για κάθε τοπολογία κινητήρα προσομοιώνεται η κίνηση του οχήματος στην πίστα, και υπολογίζεται η κατανάλωση σε Km/Kwh. Οι κινητήρες αξιολογούνται με κριτήρια επίδοσης, απόδοσης, μάζας και ποιότητας ισχύος και επιλέγεται η βέλτιστη διαμόρφωση.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει μια σύγκριση δύο εναλλακτικών υλικών μονίμου μαγνήτη. Γίνεται ανάλυση ευαισθησίας και ευρωστίας σε σφάλματα μονίμου μαγνήτη και συγκεκριμένα σε απομαγνήτιση λόγω αύξησης θερμοκρασίας και σε ανακριβή τοποθέτηση των μαγνητών. Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν επιλέγεται το βέλτιστο υλικό για την εφαρμογή.

Στο έκτο κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της εργασίας και αναφέρονται τα σημεία καινοτομίας της. Η εργασία ολοκληρώνεται με μια σειρά προτάσεων προς περαιτέρω διερεύνηση.

## Κεφάλαιο 2

### Θεωρητικό Υπόβαθρο

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η βιβλιογραφική-θεωρητική προσέγγιση της μηχανής μονίμου μαγνήτη και των αρχών βελτιστοποίησης και εύρωστου σχεδιασμού. Η θεωρητική προσέγγιση κατέχει εξέχουσα σημασία, καθώς δεν είναι δυνατόν να εκπονηθεί μια μελέτη ευρωστίας, χωρίς την κατανόηση των φαινομένων, των ιδιοτήτων των διαφόρων υλικών και των αρχών λειτουργίας των μηχανών.

Πιο συγκεκριμένα, αναλύονται οι ιδιότητες των υλικών, τίθενται τα κριτήρια αξιολόγησης των υλικών, εντοπίζονται υλικά και γίνεται μια πρώτη αξιολόγηση. Έπειτα, εξετάζονται οι κατάλληλες τοπολογίες και διαμορφώσεις και αναφέρονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε περίπτωσης. Εν συνεχεία, θεμελιώνεται το ισοδύναμο κύκλωμα, αναλύονται οι τεχνικές ελέγχου που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια της εργασίας και καθορίζονται ποιοτικά τα όρια λειτουργίας του κινητήρα. Τέλος, παρουσιάζονται οι αρχές βελτιστοποίησης και ευρωστίας.

### 2.1 Ηλεκτροκίνηση

Ο σύγχρονος πολιτισμός αντιμετωπίζει πλέον, σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα, τα οποία τον ωθούν να ψάχνει συνεχώς πιο οικολογικούς τρόπους για την κάλυψη των αναγκών του.

Ο συμβατικός τρόπος κίνησης, κατά τους περασμένους αιώνες, ήταν οι κινητήρες καύσης. Οι κινητήρες αυτοί λειτουργούν καίγοντας κάποιο καύσιμο, συνήθως ορυκτό, και μέσω κατάλληλης διάταξης μετατρέπουν την παραγόμενη θερμότητα σε κίνηση.

Η διαδικασία αυτή απαιτεί μια πολύπλοκη διάταξη, με πολλά μεταλλικά μέρη, τα οποία τρίβονται μεταξύ τους. Επίσης, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, απαιτούν ένα ισχυρό σύστημα ψύξης. Ακόμα, απαιτούν συχνή συντήρηση, όπως για παράδειγμα η αντικατάσταση λιπαντικών ελαίων και στεγανωτικών υλικών. Επιπλέον, για την εκκίνηση μιας τέτοιας μηχανής, εκτός από το καύσιμο, απαιτείται και η χρήση κάποιας άλλης πηγής ενέργειας για να τροφοδοτεί ενεργειακά τη μηχανή μέχρι να μπορεί να αυτοσυντηρηθεί. Τελευταίο και σημαντικότερο, η ενεργειακή απόδοση αυτών των κινητήρων είναι αρκετά χαμηλή και κυμαίνεται στο 30-35%.

Ο ηλεκτροκινητήρας, από την άλλη, εκμεταλλεύεται την αλληλεπίδραση δύο μαγνητικών πεδίων, αποφεύγοντας το ενδιάμεσο στάδιο της θερμότητας. Επίσης, κατασκευαστικά είναι ιδιαίτερα απλός και εμφανίζει ελάχιστες τριβές μεταξύ μετάλλων. Το σύστημα ψύξης εξαρτάται από την εφαρμογή, αλλά, σε κάθε περίπτωση, δεν είναι τόσο ισχυρό, όσο θα ήταν σε μια θερμική μηχανή. Επίσης, λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών και ελαχίστων τριβών, οι ηλεκτροκινητήρες είναι ιδιαίτερος αξιόπιστοι, ενώ έχουν και δυνατότητα εκκίνησης, χωρίς να χρειάζονται υποβοήθηση. Τέλος, το σημαντικότερο πλεονέκτημα του ηλεκτροκινητήρα, έναντι των κινητήρων καύσης, είναι ότι η ενεργειακή απόδοση κυμαίνεται στο 90%.

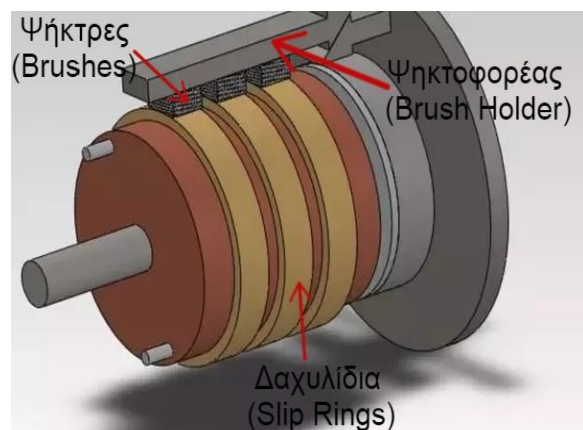
## 2.2 Σύγχρονος Ηλεκτρικός Κινητήρας Μονίμων Μαγνητών

Η συμβατική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την ηλεκτροκίνηση, απαιτεί τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου μέσω ηλεκτρομαγνήτη. Με τη σύγχρονη τεχνολογία, υπάρχει η δυνατότητα λεπτομερούς κατεργασίας μονίμων μαγνητών υψηλής ενεργειακής περιεκτικότητας. Τα πλεονεκτήματα που εμφανίζουν οι μόνιμοι μαγνήτες, σε σχέση με τους συμβατικούς ηλεκτρομαγνήτες, καθιστούν τους σύγχρονους ηλεκτρικούς κινητήρες μονίμων μαγνητών (Σ.Κ.Μ.Μ) ένα από τα πιο επίκαιρα θέματα της επιστημονικής έρευνας, σχετικά με την κίνηση. [3]

Σχήμα 2. 1 Δακτυλιοφόρος Δρομέας



α) δρομέας με δαχτυλίδια



β) συνολική διάταξη

Οι συμβατικοί ηλεκτρομαγνήτες απαιτούν την ύπαρξη μιας πηγής τροφοδοσίας για να λειτουργήσουν. Πιο συγκεκριμένα, ένας ηλεκτρομαγνήτης που είναι τοποθετημένος στο δρομέα μιας ηλεκτρικής μηχανής, απαιτεί μια στρεφόμενη πηγή τροφοδοσίας. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια διάταξη, που μεταφέρει το ρεύμα στο δρομέα, μέσω τριβής, καθώς η μηχανή περιστρέφεται. Αυτή η διάταξη, για τους σύγχρονους κινητήρες, αποτελείται από



“δακτυλίους” (slip rings), που είναι προσαρτημένοι στο δρομέα και αποτελούν τους ακροδέκτες του ηλεκτρομαγνήτη του δρομέα, και τις ψήκτρες (brushes) που είναι προσαρτημένες στο στάτη και πιέζονται μέσω ελατηρίων, ώστε να εφάπτονται στους δακτυλίους του δρομέα, δημιουργώντας έτσι μια αγωγίμη διαδρομή μεταξύ της πηγής τροφοδοσίας και του ηλεκτρομαγνήτη (σχήμα 2.1). Τέλος, λόγω της διέλευσης ρεύματος, στους ηλεκτρομαγνήτες εμφανίζονται ωμικές απώλειες.

Με την αντικατάσταση όλης της διάταξης με έναν μόνιμο μαγνήτη, μπορούμε να έχουμε τη δημιουργία του ίδιου μαγνητικού πεδίου, με αυξημένη απόδοση και αξιοπιστία. Επίσης, οι Σ.Κ.Μ.Μ. λόγω της απουσίας του χαλκού στο δρομέα εμφανίζουν μικρότερη μάζα και μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος.

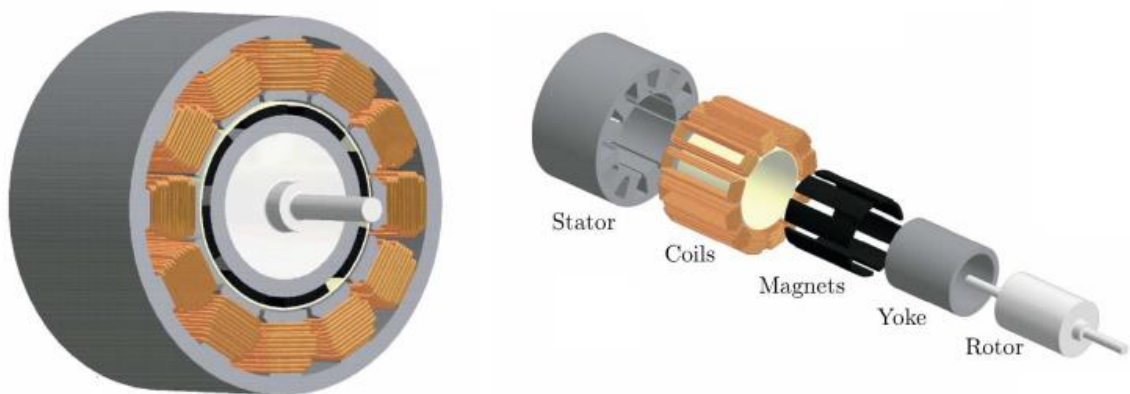
Μέχρι στιγμής, παρά τα πλεονεκτήματά τους, δεν μονοπωλούν την αγορά, διότι εμφανίζουν και κάποια μειονεκτήματα. Η κατασκευή τους, λόγω των μονίμων μαγνητών, είναι αρκετά περίπλοκη. Η τοποθέτηση κάθε μαγνήτη στο δρομέα γίνεται ξεχωριστά και απαιτεί υψηλή ακρίβεια. Επίσης, το κόστος των μονίμων μαγνητών είναι υψηλότερο. Τέλος, υπάρχει ο κίνδυνος της απομαγνήτισης των μονίμων μαγνητών, που μπορεί να οφείλεται σε αντίθετα μαγνητικά πεδία, σε υπερθέρμανση και σε μηχανική καταπόνηση.

## 2.3 Δομή Σύγχρονου Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών

Τα κυριότερα μέρη ενός Σ.Κ.Μ.Μ, όπως φαίνονται στο σχήμα 2.2 είναι:

- Σώμα Στάτη
- Τύλιγμα Στάτη
- Σώμα Δρομέα
- Μόνιμοι Μαγνήτες
- Άξονας

Σχήμα 2. 2 Δομή ηλεκτροκινητήρα μονίμων μαγνητών



## 2.4 Κατασκευαστικά Υλικά Ηλεκτρικών Μηχανών

Τα βασικά μέρη του κινητήρα πρέπει να είναι κατασκευασμένα από κατάλληλα υλικά, που θα δημιουργούν το μαγνητικό πεδίο και θα το κατευθύνουν, ώστε να επιτευχθεί η ηλεκτρομηχανική μετατροπή.

Στην ενότητα αυτή αναλύονται οι ιδιότητες των υλικών και εξετάζονται τα διάφορα φαινόμενα που εμφανίζονται στη λειτουργία μιας μηχανής. [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14]

### 2.4.1 Μαγνητικά Υλικά

Όταν δύο διαφορετικά υλικά βρεθούν εντός ηλεκτρικού πεδίου ίδιας έντασης (H), δεν εμφανίζουν την ίδια μαγνητική επαγωγή (B). Αυτό συμβαίνει, διότι κάθε υλικό “δυσκολεύει” την ανάπτυξη του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του. Ο δείκτης που χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό των υλικών, με βάση τις μαγνητικές του ιδιότητες, είναι η μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$  (permeability). Η μαγνητική επαγωγή, που αναπτύσσεται εντός του υλικού, δίνεται από τον τύπο:

$$B = \mu H$$

Η μαγνητική διαπερατότητα εκφράζει την ευκολία με την οποία αναπτύσσεται ένα μαγνητικό πεδίο, εντός του υλικού. Η μονάδα μέτρησης της μαγνητικής διαπερατότητας είναι H/m. Η μαγνητική διαπερατότητα του κενού είναι:

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ H/m.}$$

Είθισται, η μαγνητική διαπερατότητα οποιουδήποτε άλλου υλικού να εκφράζεται ως σύγκριση με τη μαγνητική διαπερατότητα του κενού, σύμφωνα με τον τύπο:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Το μέγεθος που προκύπτει ονομάζεται σχετική μαγνητική διαπερατότητα και μπορεί πολύ εύκολα να δώσει ένα μέτρο σύγκρισης της δυνατότητας μαγνήτισης διαφορετικών υλικών. Για την κατασκευή ενός ηλεκτρικού κινητήρα, εκμεταλλευόμαστε τη μεγάλη σχετική διαπερατότητα, που εμφανίζουν τα σιδηρομαγνητικά υλικά, ενώ αξιοποιούμε και ιδιότητες υλικών με μικρή μαγνητική διαπερατότητα, τα οποία μπορούμε να αποκαλούμε “μη μαγνητικά υλικά” στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

### 2.4.1.1 Μη Μαγνητικά Υλικά

Μη μαγνητικά υλικά ονομάζουμε τα υλικά, τα οποία εμφανίζουν χαμηλή σχετική διαπερατότητα, δηλαδή κοντά στη μονάδα. Τα υλικά αυτά έχουν σταθερή συμπεριφορά ανεξαρτήτως της εντάσεως του μαγνητικού πεδίου. Τα πιο συνηθισμένα μη μαγνητικά υλικά στους ηλεκτρικούς κινητήρες είναι ο αέρας και ο χαλκός.

### 2.4.1.2 Σιδηρομαγνητικά Υλικά

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά χαρακτηρίζονται από υψηλή σχετική διαπερατότητα. Σε τέτοια υλικά συναντάμε τιμές σχετικής διαπερατότητας στην περιοχή  $10^4$ - $10^5$ , αλλά ειδικά κράματα μπορεί να φτάσουν ακόμα και  $10^6$ . Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι ο σίδηρος, το κοβάλτιο και το νικέλιο.

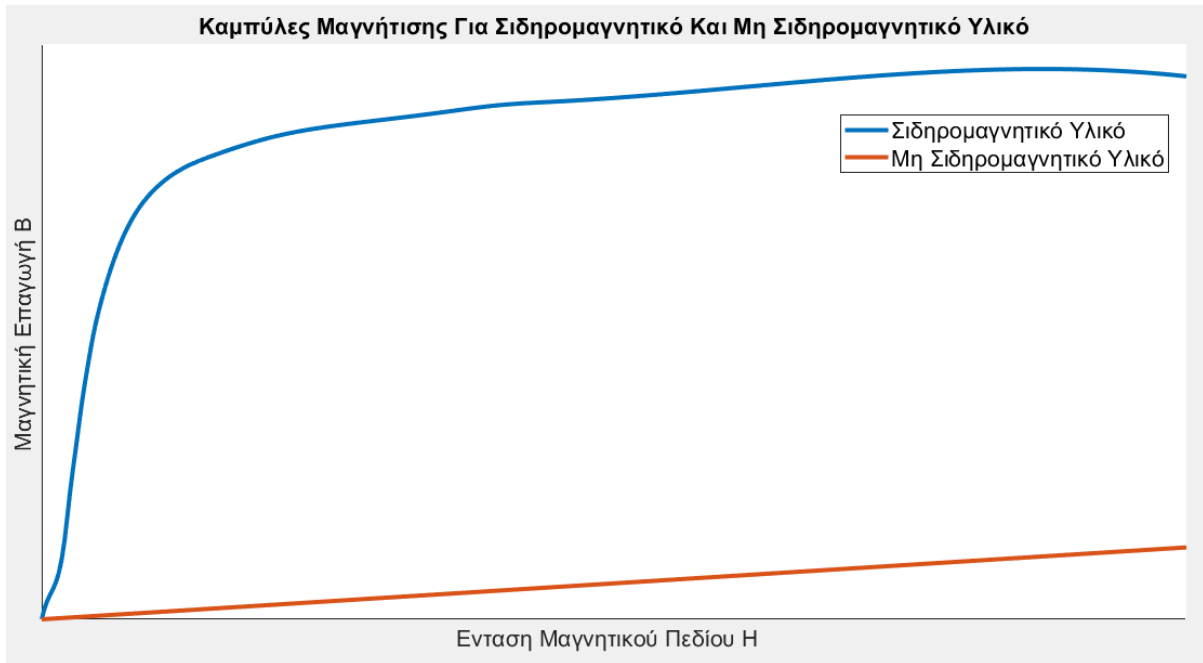
Το χαρακτηριστικό αυτό οφείλεται στη μοριακή δομή του υλικού. Κάθε μόριο δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο, το οποίο έχει την τάση να ευθυγραμμίζεται με τα αντίστοιχα των γειτονικών μορίων. Χωρίς την παρουσία εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, το υλικό “χωρίζεται” σε περιοχές, εντός των οποίων, το μαγνητικό πεδίο είναι παράλληλο. Το μαγνητικό πεδίο κάθε περιοχής έχει διαφορετική κατεύθυνση και συνολικά το υλικό δείχνει αμαγνήτιστο. Όταν το υλικό εκτεθεί σε μαγνητικό πεδίο  $H$ , το πεδίο των επιμέρους περιοχών ευθυγραμμίζεται με “ευκολία”, δημιουργώντας μια μαγνητική επαγωγή  $B$ . Όταν η μαγνητική επαγωγή του υλικού υπερβεί κάποιο όριο, το υλικό θα παραμείνει μαγνητισμένο ακόμα και μετά την απομάκρυνση του μαγνητικού πεδίου. Όσο πιο μεγάλης έντασης είναι το πεδίο  $H$ , τόσο πιο πολλές περιοχές θα ευθυγραμμιστούν σε αυτήν την κατεύθυνση. Όταν ευθυγραμμιστούν πολλές τέτοιες περιοχές, το υλικό αρχίζει να εμφανίζει μια αντίσταση στη δημιουργία μαγνητικής επαγωγής  $B$ . Μειώνεται δηλαδή η επιτρεπτότητα του υλικού. Αν το υλικό βρεθεί σε πολύ ισχυρό μαγνητικό πεδίο  $H$  και ευθυγραμμιστούν όλες οι περιοχές, δεν μπορεί πλέον να αυξηθεί η μαγνητική επαγωγή  $B$  εντός του υλικού. Αυτή η κατάσταση ονομάζεται κορεσμός.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά μπορούν να αποτυπωθούν γραφικά σε ένα διάγραμμα  $B$ - $H$ , το οποίο ονομάζεται καμπύλη μαγνήτισης. Στο διάγραμμα 2.1 παρατίθενται οι καμπύλες μαγνήτισης ενός μη μαγνητικού υλικού και ενός σιδηρομαγνητικού υλικού.

Εύκολα παρατηρούμε τη σταθερή συμπεριφορά του μη μαγνητικού υλικού. Επίσης, παρατηρούμε τη μεταβολή στη συμπεριφορά του σιδηρομαγνητικού

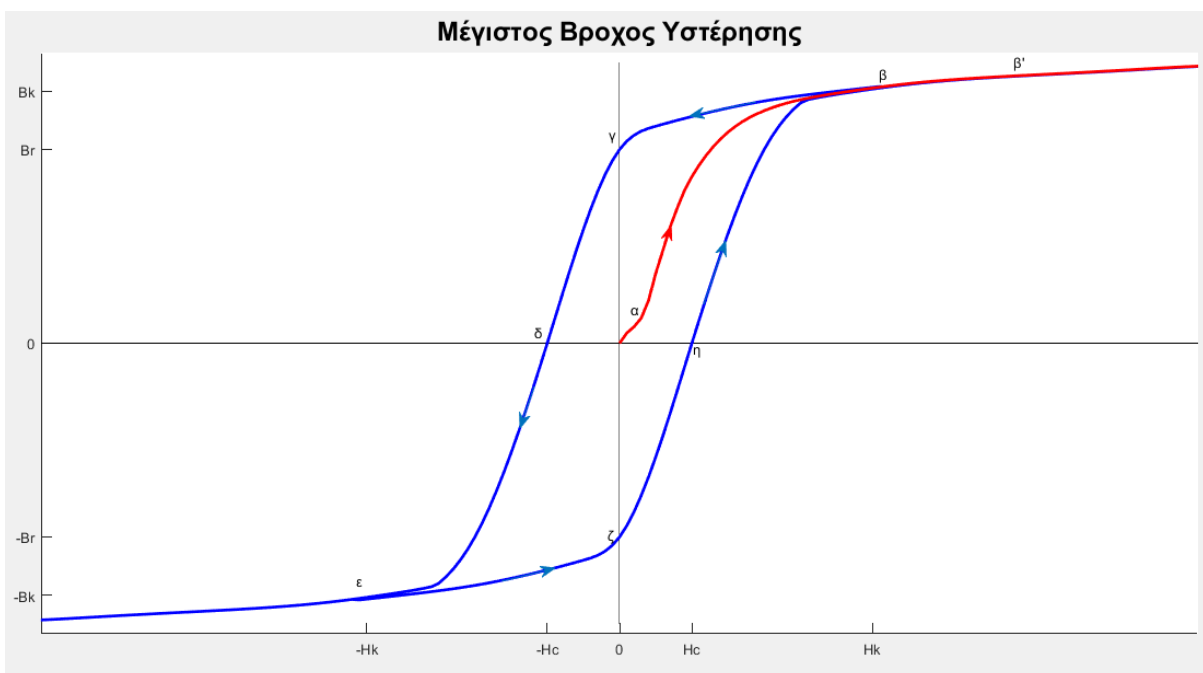
υλικού. Για πεδίο μικρής έντασης παρουσιάζει μεγάλη επιτρεπτότητα, ενώ για πιο ισχυρό πεδίο εμφανίζει κορεσμό.

Διάγραμμα 2. 1



Μια πιο ακριβής συμπεριφορά των σιδηρομαγνητικών υλικών αποτυπώνεται καλύτερα με ένα αντίστοιχο διάγραμμα 4 τεταρτημορίων, όπως αυτή του διαγράμματος 2.2.

Διάγραμμα 2. 2 Μέγιστος βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού



Για την κατανόηση του διαγράμματος παρακολουθούμε τη μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής του υλικού  $B$ , συναρτήσει της έντασης ηλεκτρικού πεδίου  $H$ .

- Αρχικά για  $H=0$  έχουμε  $B=0$ . Αυξάνοντας το  $H$  σε μικρές τιμές, οι περιοχές εντός του υλικού αρχίζουν να ευθυγραμμίζονται και έτσι αυξάνεται το  $B$ . Το τμήμα  $Oa$  της καμπύλης είναι μια αντιστρεπτή μεταβολή. Αυτό σημαίνει ότι αν σταδιακά απομακρυνθεί το  $H$ , το  $B$  θα επιστρέψει στο  $0$ , ακολουθώντας την ίδια καμπύλη.  
Στη συνέχεια, αυξάνουμε περαιτέρω το  $H$ , ξεπερνώντας το σημείο  $a$ . Η μεταβολή ακολουθεί την καμπύλη  $ab$ . Το  $B$  συνεχίζει να αυξάνεται. Αρχικά με ταχύτερο ρυθμό, ενώ όσο η καμπύλη πλησιάζει στο σημείο  $\beta$  ο ρυθμός μειώνεται. Στο σημείο  $\beta$ , όπου έχουμε ένταση  $H_k$  και επαγωγή  $B_k$ , όλες οι περιοχές έχουν προσανατολιστεί και το υλικό βρίσκεται σε κατάσταση μαγνητικού κόρου. Η μεταβολή στο τμήμα  $ab$  της καμπύλης είναι μη αντιστρεπτή. Η καμπύλη  $Oa\beta$  είναι η καμπύλη αρχικής μαγνήτισης.
- Αυξάνουμε ακόμα περισσότερο το  $H$ . Σε αυτήν την περιοχή, το σιδηρομαγνητικό υλικό είναι κορεσμένο και λειτουργεί ως μη μαγνητικό υλικό. Η μαγνητική επαγωγή του μπορεί να προσεγγιστεί από την εξίσωση:

$$B = B_k + \mu_0(H - H_k)$$

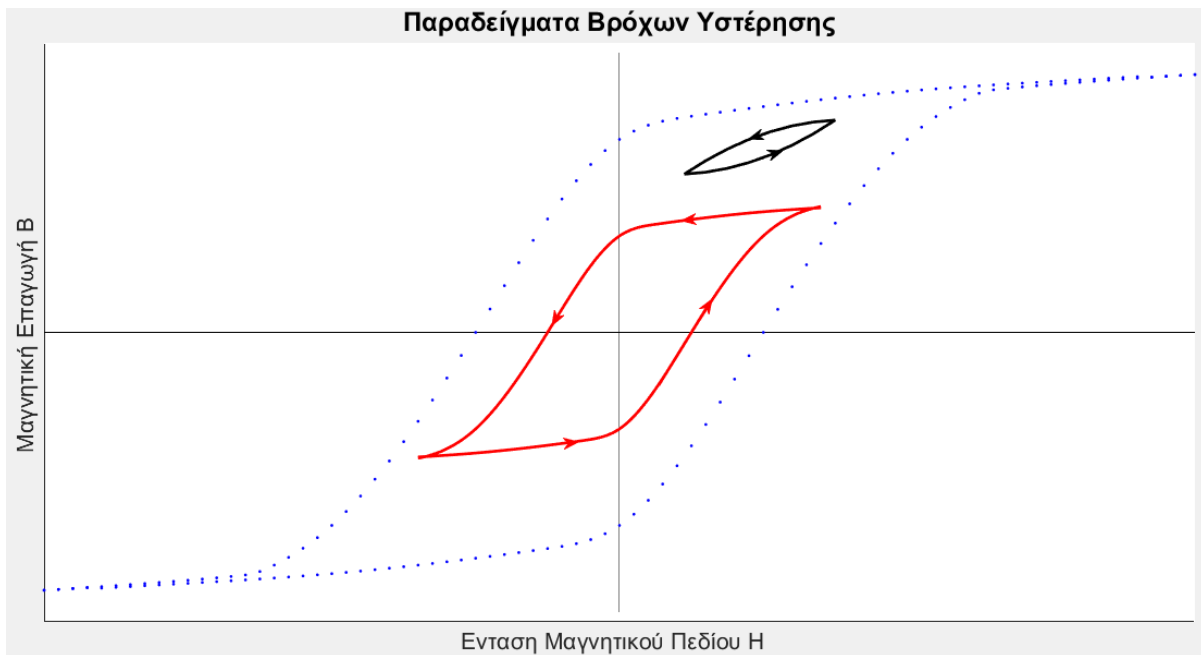
Η μεταβολή αυτή είναι αντιστρεπτή. Μειώνοντας το  $H$ , η μεταβολή ακολουθεί την καμπύλη  $\beta\beta'$ .

- Όταν το  $H$  γίνει μικρότερο από το  $H_k$  η μεταβολή ακολουθεί την καμπύλη  $\beta\gamma$ . Για  $H=0$  η μαγνητική επαγωγή δε μηδενίζεται, αλλά παίρνει την τιμή  $B_r$ , η οποία ονομάζεται παραμένουσα μαγνητική επαγωγή ή παραμένουσα μαγνήτιση. Αυτό συμβαίνει, διότι πολλές περιοχές παραμένουν μαγνητισμένες αυθόρμητα, ακόμα και μετά την απομάκρυνση της έντασης μαγνητικού πεδίου.
- Στη συνέχεια, αυξάνουμε το  $H$  προς την αντίθετη κατεύθυνση. Η μεταβολή ακολουθεί την καμπύλη  $\gamma\delta$ . Στο σημείο  $\delta$ , έχουμε πλήρη απομαγνήτιση του υλικού. Η καμπύλη  $\gamma\delta$  ονομάζεται καμπύλη απομαγνήτισης. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου  $H_c$ , για την οποία μηδενίζεται η μαγνητική επαγωγή, λέγεται συνεχούσα ή απομαγνητίζουσα δύναμη (coercive force).
- Αυξάνοντας την ένταση του πεδίου, η μεταβολή ακολουθεί την καμπύλη  $\delta\epsilon$ . Στο σημείο  $\epsilon$ , όπου  $H=H_k$  και  $B=B_k$  εμφανίζεται ξανά το φαινόμενο του μαγνητικού κορεσμού.
- Σε μια περαιτέρω αύξηση του  $H$ , το υλικό συμπεριφέρεται όπως στον κορεσμό του 1ου τεταρτημρίου.

- Μειώνοντας το  $H$  μέχρι το  $0$  και αυξάνοντας στην αντίθετη φορά μέχρι την τιμή  $H_k$ , η καμπύλη ακολουθεί συμμετρική πορεία, ως προς το κέντρο των αξόνων.
- Η κλειστή διαδρομή βγδεζιβ ονομάζεται μέγιστος βρόχος μαγνητικής υστέρησης. Δεν μπορούν να υπάρξουν σημεία λειτουργίας του υλικού, έξω από αυτόν τον βρόχο.

Ένα υλικό μπορεί να λειτουργεί και σε έναν μικρότερο βρόχο (minor loop), όπως στα παραδείγματα του διαγράμματος 2.3.

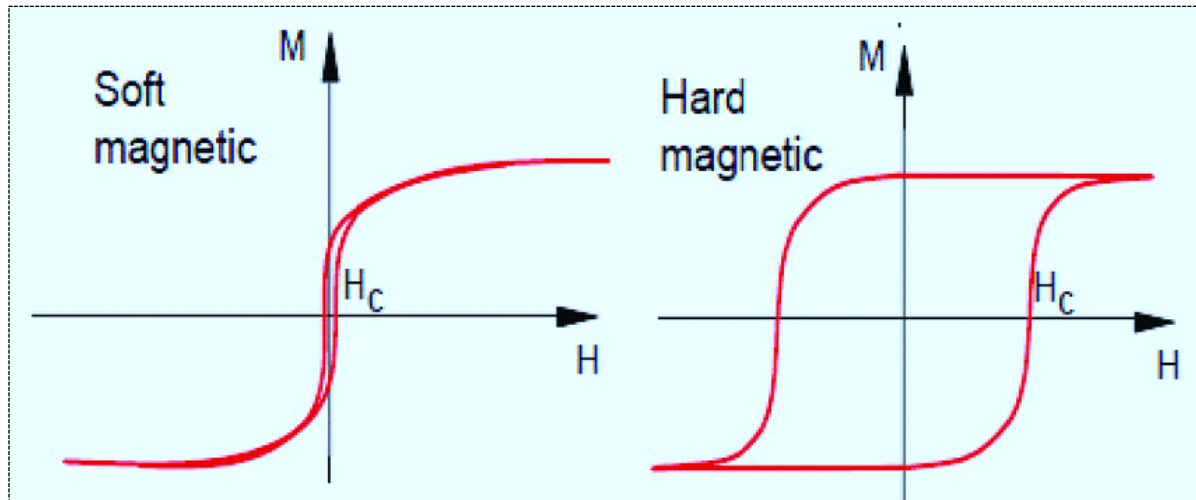
Διάγραμμα 2. 3 Παραδείγματα Βρόχων Υστέρησης Σιδηρομαγνητικού Υλικού



Η μελέτη του βρόχου υστέρησης είναι σημαντική και για έναν ακόμη λόγο. Εφαρμόζοντας τα κατάλληλα μαγνητικά πεδία, ώστε να σχηματιστεί ένας βρόχος, η ενέργεια που δαπανούμε, ανά μονάδα όγκου, ισούται με το εμβαδόν του βρόχου.

Με κριτήριο την ενέργεια, που χρειάζεται να δαπανήσουμε για ένα βρόχο, τα σιδηρομαγνητικά υλικά χωρίζονται σε 2 κατηγορίες. Τα μαλακά (soft) υλικά, τα οποία απαιτούν μικρό ποσό ενέργειας, και τα σκληρά (hard), τα οποία απαιτούν μεγάλα ποσά ενέργειας. Στο διάγραμμα 2.4 παρουσιάζονται, ποιοτικά, βρόχοι υστέρησης για μαλακό και σκληρό σιδηρομαγνητικό υλικό.

Διάγραμμα 2. 4 Καμπύλες μαγνήτισης μαλακού και σκληρού σιδηρομαγνητικού υλικού



#### 2.4.1.2.1 Μαλακά Σιδηρομαγνητικά Υλικά

Τα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά μπορούν να μαγνητιστούν και να απομαγνητιστούν εύκολα, δηλαδή καταναλώνοντας μικρό ποσό ενέργειας. Στις ηλεκτρικές μηχανές, χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των σωμάτων δρομέα και στάτη. Αξιολογούμε αυτά τα υλικά με δύο κριτήρια.

- Το πρώτο είναι η μαγνητική επαγωγή του κόρου. Μια μεγάλη τιμή μαγνητικής επαγωγής κόρου αυξάνει τις επιδόσεις της μηχανής και την πυκνότητα ισχύος.
- Το δεύτερο κριτήριο είναι το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης. Όσο πιο μικρό το εμβαδόν, τόσο αυξάνεται η απόδοση της μηχανής.

#### 2.4.1.2.2 Σκληρά Σιδηρομαγνητικά Υλικά

Τα σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται δύσκολα, δηλαδή απαιτείται η κατανάλωση μεγάλου ποσού ενέργειας. Όταν μαγνητιστούν μέχρι την περιοχή του κόρου, παραμένουν σε κορεσμό ακόμα και μετά την απομάκρυνση του πεδίου. Αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται ως μόνιμοι μαγνήτες.

- Τα κριτήρια για την αξιολόγηση των σκληρών μαγνητικών υλικών είναι δύο:
- Το πρώτο είναι η παραμένουσα μαγνήτιση. Υψηλή τιμή παραμένουσας μαγνήτισης αυξάνει τις επιδόσεις της μηχανής και την πυκνότητα ισχύος.
  - Το δεύτερο κριτήριο είναι η αντοχή του μαγνήτη στην μόνιμη απομαγνήτιση. Το φαινόμενο της απομαγνήτισης αναλύεται παρακάτω.

Οι μόνιμοι μαγνήτες αντικαθιστούν όλο και περισσότερο τους ηλεκτρομαγνήτες, διότι εμφανίζουν ελάχιστες απώλειες ενέργειας κατά τη λειτουργία της μηχανής. Το κόστος κατασκευής ενός μαγνήτη συνήθως είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο κόστος ενός ηλεκτρομαγνήτη, ενώ ένα ακόμα μειονέκτημα των μόνιμων μαγνητών σε σχέση με τους ηλεκτρομαγνήτες, είναι, ότι οι μόνιμοι μαγνήτες δε μας δίνουν τη δυνατότητα ελέγχου. Αυτό σημαίνει ότι σε μια μηχανή θα πρέπει είτε το πεδίο του δρομέα, είτε το πεδίο του στάτη να δημιουργείται από ηλεκτρομαγνήτη.

#### **2.4.1.2.2.1 Απομαγνήτιση Μόνιμων Μαγνητών (Μη Αναστρέψιμη)**

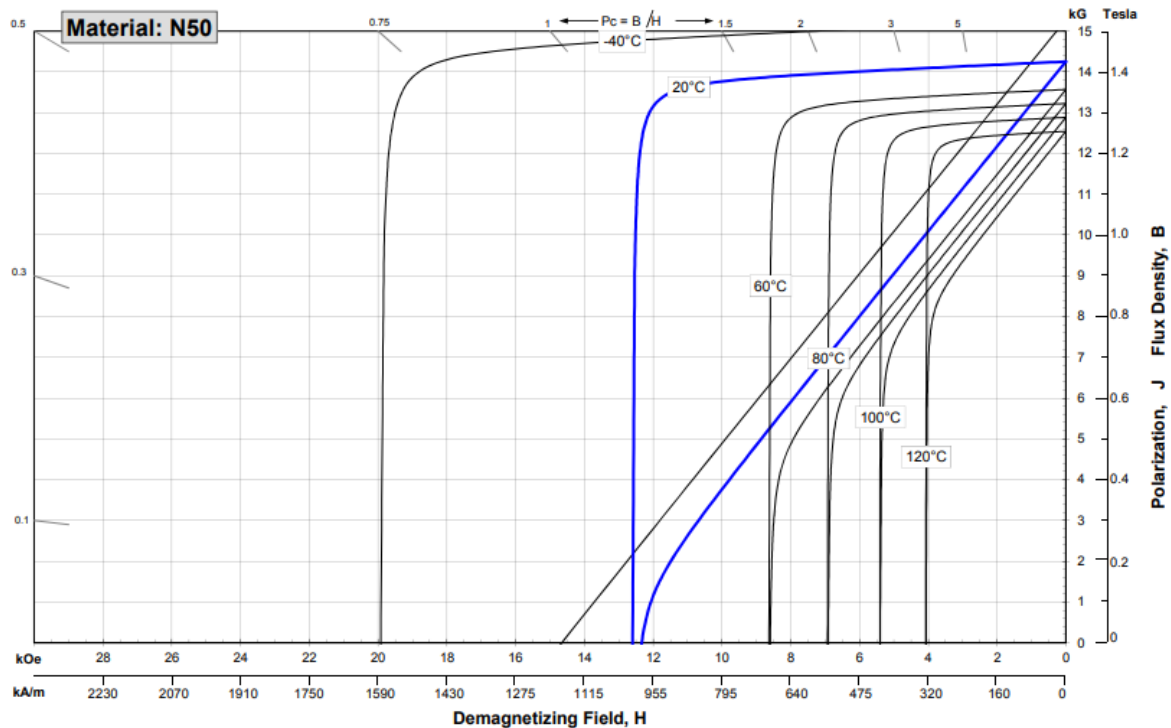
Απομαγνήτιση, σε ένα μόνιμο μαγνήτη, ονομάζουμε τη μείωση της παραμένουσας μαγνήτισής του. Οι κύριες αιτίες απομαγνήτισης είναι η έκθεση σε ισχυρό πεδίο απομαγνήτισης και η αύξηση της θερμοκρασίας. Οι μηχανισμοί απομαγνήτισης περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

Παρατηρώντας την καμπύλη απομαγνήτισης του μόνιμου μαγνήτη του διαγράμματος 2.4, βλέπουμε ότι ο μαγνήτης παραμένει σε κορεσμό ακόμα και για αρνητικές τιμές έντασης πεδίου. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, οι μεταβολές στον κορεσμό είναι αντιστρεπτές. Ένα πεδίο μεγάλης έντασης, όμως, μπορεί να οδηγήσει το μαγνήτη κάτω από το γόνατο κορεσμού και τότε η μεταβολή γίνεται μη αναστρέψιμη. Ο μαγνήτης χάνει ένα ποσό της ενέργειάς του και δεν μπορεί να το αναπληρώσει, εκτός αν βρεθεί σε συνθήκες αρχικής φόρτισης. Καθώς απομακρύνεται το πεδίο, η επαγωγή αυξάνεται γραμμικά και παράλληλα με τη γραμμή του κορεσμού και τελικά, όταν απομακρυνθεί πλήρως το εξωτερικό πεδίο, η παραμένουσα μαγνήτιση έχει μειωθεί.

Η άλλη αιτία απομαγνήτισης είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού. Στο διάγραμμα 2.5 παρουσιάζονται καμπύλες απομαγνήτισης ενός υλικού για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του υλικού, τόσο πιο εύκολα θα βρεθεί στο γόνατο κορεσμού, και κινδυνεύει να υποστεί μόνιμη απομαγνήτιση. Όταν η θερμοκρασία επανέλθει σε φυσιολογικά επίπεδα, η παραμένουσα μαγνήτιση αυξάνεται, αλλά δεν μπορεί να φτάσει την αρχική τιμή, λόγω της ενέργειας που έχασε, όταν βρέθηκε εκτός κορεσμού. Η αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από κάποιο όριο, προκαλεί πλήρη απομαγνήτιση του υλικού, χωρίς την παρουσία κάποιου εξωτερικού πεδίου. Το όριο αυτό ονομάζεται θερμοκρασία Curie. Σε αυτή τη θερμοκρασία αλλάζει η δομή του υλικού, με αποτέλεσμα να χάνει τις σιδηρομαγνητικές του ιδιότητες και να συμπεριφέρεται ως μη μαγνητικό υλικό. Όταν η θερμοκρασία επανέλθει, το υλικό ανακτά τις σιδηρομαγνητικές του ιδιότητες, αλλά προφανώς έχει χάσει όλη την αποθηκευμένη ενέργεια που είχε.



Διάγραμμα 2. 5 Καμπύλες απομαγνήτισης ενός υλικού για διάφορες θερμοκρασίες



Πηγή: <https://www.arnoldmagnetics.com/>

## 2.4.2 Αγωγοί

Κατ' αντιστοιχία με τα μαγνητικά υλικά, όταν δύο διαφορετικά υλικά εκτεθούν στο ίδιο ηλεκτρικό πεδίο  $E$ , αναπτύσσουν διαφορετική πυκνότητα ρεύματος  $J$ . Η διαφορετική αυτή συμπεριφορά οφείλεται, κατά κύριο λόγο, στα ελεύθερα ηλεκτρόνια του κάθε υλικού. Χωρίς την παρουσία κάποιου ηλεκτρικού πεδίου, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται τυχαία, και μακροσκοπικά δεν παρατηρούμε κάποια κίνηση ηλεκτρικών φορτίων. Όταν το υλικό βρεθεί εντός ηλεκτρικού πεδίου, η κίνηση των ελευθέρων ηλεκτρονίων γίνεται προσανατολισμένη. Η προσανατολισμένη κίνηση των ηλεκτρονίων ονομάζεται ηλεκτρικό ρεύμα.

Είναι προφανές, ότι όσο πιο πυκνά ελεύθερα ηλεκτρόνια περιέχει το υλικό, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος. Ο δείκτης που χρησιμοποιούμε για το χαρακτηρισμό των υλικών, ανάλογα με τις ηλεκτρικές του ιδιότητες, είναι η ειδική αγωγιμότητα  $\gamma$  και εκφράζεται σε  $S/m$ . Με αυτό το κριτήριο, τα υλικά χωρίζονται σε 2 μεγάλες κατηγορίες, τα μονωτικά υλικά και τα αγωγά υλικά.

### 2.4.2.1 Μονωτικά Υλικά (Electrical Insulators)

Τα μονωτικά υλικά είναι τα υλικά τα οποία έχουν μικρή τιμή ειδικής αγωγιμότητας, δηλαδή δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη ηλεκτρικού ρεύματος. Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των ηλεκτρικών μηχανών, ώστε να μην έχουμε διέλευση ρεύματος από τους αγωγούς προς το σώμα της μηχανής ή προς γειτονικούς αγωγούς.

### 2.4.2.2 Αγώγιμα Υλικά (Electrical Conductors)

Τα αγώγιμα υλικά είναι τα υλικά που έχουν μεγάλη τιμή ειδικής αγωγιμότητας, δηλαδή επιτρέπουν την ανάπτυξη ρεύματος στο εσωτερικό τους. Τα πιο συνηθισμένα αγώγιμα υλικά είναι τα μέταλλα.

#### 2.4.2.2.1 Εξάρτηση Της Ειδικής Αγωγιμότητας Από Τη Θερμοκρασία

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η συμπεριφορά των αγώγιμων υλικών σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Τα θετικά ιόντα του μετάλλου ταλαντώνονται γύρω από τη θέση τους. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία του μετάλλου, τόσο πιο έντονη είναι και η ταλάντωση. Κατά την προσανατολισμένη κίνησή τους, τα ηλεκτρόνια συγκρούονται με τα θετικά ιόντα. Μια αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται συχνότερες συγκρούσεις, δηλαδή “δυσκολία” ανάπτυξης ρεύματος. Από τα παραπάνω, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι, η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα των μεταλλικών αγωγών μειώνεται, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία.

Πρακτικά, η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός μετάλλου σε μια θερμοκρασία  $\theta^{\circ}\text{C}$  προσεγγίζεται επαρκώς από τις εξισώσεις:

$$\gamma_{\theta} = \frac{1}{\rho_{\theta}}$$

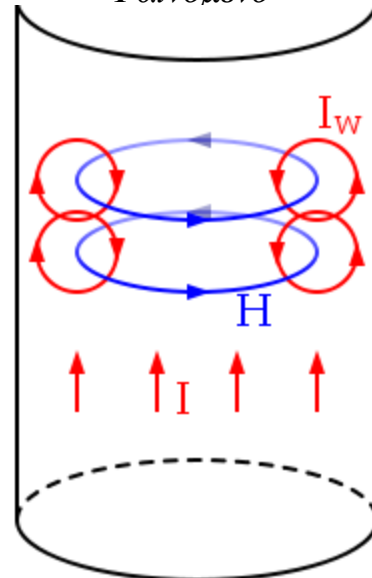
$$\rho_{\theta} = \rho_{20}[1 + \alpha(\theta - 20)]$$

όπου:  $\gamma_{\theta}$  η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του μετάλλου σε θερμοκρασία  $\theta^{\circ}\text{C}$   
 $\rho_{\theta}$  η ειδική αντίσταση του μετάλλου σε  $\Omega \text{ m}$  σε θερμοκρασία  $\theta^{\circ}\text{C}$   
 $\rho_{20}$  η ειδική αντίσταση του μετάλλου στους  $20^{\circ}\text{C}$   
 $\alpha$  ο θερμοκρασιακός συντελεστής του μετάλλου σε  $\text{C}^{-1}$

### 2.4.2.2 Επιδερμικό Φαινόμενο Και Φαινόμενο Γειτνίασης (Skin Effect And Proximity Effect)

Όταν ένας αγωγός διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, δημιουργείται στο εσωτερικό του ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Λόγω της αυτεπαγωγής του αγωγού, το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει στο εσωτερικό του αγωγού ρεύματα, τα οποία αντιστέκονται στη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου. Το φαινόμενο απεικονίζεται οπτικά στο σχήμα 2.3. Αν θεωρήσουμε μία κυκλική διατομή στο εσωτερικό του αγωγού, το πεπλεγμένο ρεύμα του δακτυλίου δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο  $H$ . Μια αύξηση του πεπλεγμένου ρεύματος έχει ως αποτέλεσμα μια αύξηση του μαγνητικού πεδίου  $H$ . Στον αγωγό επάγονται τα ρεύματα  $I_w$  που αντιτίθενται στη μεταβολή αυτή. Εντός του δακτυλίου, τα επαγόμενα ρεύματα αντιτίθενται στο  $I$ , ενώ τα ρεύματα εκτός του δακτυλίου συντάσσονται με το  $I$ . Τελικά, το ρεύμα δε ρέει ομοιόμορφα μέσα στον αγωγό, αλλά είναι πυκνότερο όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται επιδερμικό φαινόμενο.

Σχήμα 2. 3 Επιδερμικό Φαινόμενο



Ο δείκτης που χρησιμοποιούμε για να συγκρίνουμε 2 υλικά ονομάζεται βάθος επιδερμίδας (skin depth). Ξεκινώντας από την εξωτερική επιφάνεια, όπου έχουμε τη μέγιστη πυκνότητα, και κινούμενοι προς το κέντρο του αγωγού, η πυκνότητα ρεύματος μειώνεται. Το βάθος επιδερμίδας ορίζεται ως το βάθος, στο οποίο η πυκνότητα ισούται με το 37% ( $1/e$ ) της μέγιστης, και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}}$$

όπου:  $\omega$  γωνιακή συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος σε  $s^{-1}$   
 $\mu$  μαγνητική διαπερατότητα σε  $H/m$   
 $\gamma$  ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα σε  $S/m$

Ο αγωγός επιδεικνύει αντίστοιχη συμπεριφορά όταν βρεθεί σε μεταβαλλόμενο πεδίο που οφείλεται σε κάποιον γειτονικό αγωγό. Όταν οι 2 αγωγοί A και B έχουν ρεύμα ίδιας κατεύθυνσης, και συμβεί μια μεταβολή του ρεύματος στον αγωγό A, το ρεύμα του B θα εμφανίζει μειωμένη πυκνότητα κοντά στον A και αυξημένη πυκνότητα μακριά από τον A, ακριβώς με τον ίδιο

μηχανισμό του επιδερμικού φαινομένου. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο γειτνίασης.

### **2.4.2.2.3 Δινορεύματα Στους Σιδηρομαγνητικούς Πυρήνες (Eddy Currents)**

Η παρουσία εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου, εκτός από την επαγωγή ρευμάτων στους κύριους αγωγούς, μπορεί να επάγει ρεύματα και σε μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά, τα οποία εμφανίζουν αγώγιμες ιδιότητες. Αυτό, έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη δινορευμάτων και επομένως τη δημιουργία θερμικών απωλειών. Είναι εμφανές ότι, όσο πιο μικρό είναι το πάχος του υλικού, τόσο μικρότερη ποσότητα μαγνητικής ροής διέρχεται μέσα από το υλικό, τόσο μικρότερη τάση επάγεται και τόσο πιο μικρές θα είναι οι απώλειες λόγω δινορευμάτων.

## **2.4.3 Επιλογή Υλικών**

Για την επιλογή των υλικών θα χωρίσουμε τη μηχανή σε 2 επιμέρους κυκλώματα, το μαγνητικό κύκλωμα και το ηλεκτρικό κύκλωμα.

### **2.4.3.1 Μαγνητικό Κύκλωμα**

Το μαγνητικό κύκλωμα αποτελείται από το σώμα στάτη, το σώμα δρομέα και τους μόνιμους μαγνήτες.

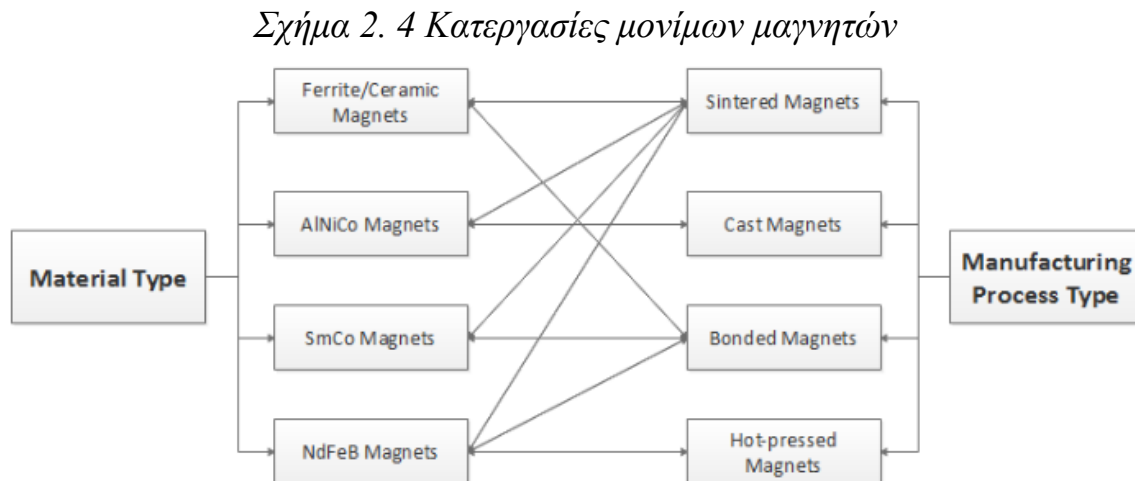
#### **2.4.3.1.1 Σώμα Στάτη και Δρομέα**

Το πιο κοινό υλικό, που χρησιμοποιείται στην κατασκευή ηλεκτρικών μηχανών, είναι ο σίδηρος, ο οποίος μπορεί να αναμειχθεί με πυρίτιο. Μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν κράματα νικελίου ή κράματα κοβαλτίου, που είτε εμφανίζουν κορεσμό για υψηλότερες τιμές μαγνητικής επαγωγής, είτε εμφανίζουν μικρότερο βρόχο υστέρησης. Τα υλικά αυτά έχουν δύσκολη κατεργασία και πολύ υψηλό κόστος, γι' αυτό χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές. Για τη μείωση των απωλειών δινορευμάτων, συνήθως το σώμα του στάτη αποτελείται από λεπτές «φέτες» (lamination). Όσο πιο μικρό το πάχος της «φέτας», τόσο μειώνονται οι απώλειες, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται το κατασκευαστικό κόστος.

### 2.4.3.1.2 Μόνιμοι Μαγνήτες

Οι μόνιμοι μαγνήτες κατασκευάζονται από σκληρά μαγνητικά υλικά και τοποθετούνται στο δρομέα της μηχανής, ώστε, με την περιστροφή του δρομέα, να παράγεται περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

Το σχήμα 2.4 συνδέει τα διάφορα υλικά κατασκευής με το είδος κατεργασίας που απαιτείται για την κατασκευή τους.



*Πηγή: <http://www.advancedmagnets.com/>*

#### 2.4.3.1.2.1 Πρώτες Ύλες

Ο φερρίτης εμφανίζει μεγάλη συνεχούσα δύναμη  $H_c$  250KA/m, μικρή παραμένουσα μαγνήτιση 0.4T και μικρή ενεργειακή πυκνότητα 40KJ/m<sup>3</sup>. Σαν πρώτη ύλη είναι αρκετά φθηνή, ενώ και η κατεργασία είναι εύκολη. Είναι ο πιο κοινός τύπος μαγνήτη, αφού εμφανίζει μικρό κόστος και μεγάλη ανθεκτικότητα. Η χαμηλή τιμή παραμένουσας μαγνήτισης, όμως, τον καθιστά ακατάλληλο για εφαρμογές υψηλών επιδόσεων.

Τα κράματα σιδήρου αλουμινίου (Al), νικελίου (Ni) και κοβαλτίου (Co) ονομάζονται AlNiCos. Οι μαγνήτες αυτοί εμφανίζουν υψηλή παραμένουσα μαγνήτιση και αντοχή στη θερμοκρασία, όμως, ταυτόχρονα, εμφανίζουν πολύ μικρή συνεχούσα δύναμη και είναι ευάλωτοι σε ξένα μαγνητικά πεδία. Το κράμα που θεωρείται να έχει τις καλύτερες μαγνητικές ιδιότητες είναι το AlNiCo9, με ενεργειακή πυκνότητα 70KJ/m<sup>3</sup>, παραμένουσα μαγνήτιση 1T και συνεχούσα δύναμη 120KA/m.

Οι μαγνήτες σαμαρίου-κοβαλτίου (SmCo) και Νεοδυμίου-Σιδήρου-Βορίου (NdFeB) είναι οι λεγόμενοι μαγνήτες σπάνιων γαιών. Το σαμάριο και το νεοδύμιο, εμφανίζουν μια «μεροληψία» στην κατεύθυνση της μαγνήτισης, που ονομάζεται ανισοτροπία και εμφανίζουν υψηλή παραμένουσα μαγνήτιση, αλλά και χαμηλή θερμοκρασία Curie. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, χρησιμοποιούμε κράματα σπάνιων γαιών και σιδηρομαγνητικών υλικών. Όταν το σιδηρομαγνητικό υλικό μαγνητιστεί προς την κατάλληλη κατεύθυνση, εμφανίζει μεγάλη αντοχή στην απομαγνήτιση, λόγω της μεροληψίας των σπάνιων γαιών.

Οι ακριβείς ιδιότητες των μαγνητών σαμαρίου-κοβαλτίου εξαρτώνται από την ακριβή σύσταση του κράματος. Τυπικά αναφέρεται ότι, παρουσιάζουν ενεργειακή πυκνότητα έως και  $240\text{KJ/m}^3$ , παραμένουσα μαγνήτιση έως και  $1.15\text{T}$  και συνεχούσα δύναμη  $1300\text{KA/m}$ . Το σημαντικότερο πλεονέκτημά τους, έναντι των υπόλοιπων μαγνητών αυτής της κατηγορίας, είναι η ανθεκτικότητα που επιδεικνύουν στις υψηλές θερμοκρασίες, ενώ το μειονέκτημα είναι ότι το σαμάριο και το κοβάλτιο είναι σπάνιες και ακριβές πρώτες ύλες. Ανάλογα με την αναλογία του κράματος, υπάρχουν οι μαγνήτες SmCo (1:5) και οι μαγνήτες SmCo (2:17).

Οι μαγνήτες νεοδυμίου-σιδήρου-βορίου (NdFeB) είναι μαγνήτες με τη μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα. Η πυκνότητα αυτή μπορεί να φτάσει έως και  $440\text{KJ/m}^3$ , η παραμένουσα μαγνήτιση έως και  $1.4\text{T}$  και η συνεχούσα δύναμη έως και  $2000\text{KA/m}$ . Το μειονέκτημά τους, έναντι των μαγνητών SmCo, είναι η έντονη μείωση των επιδόσεων με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Όπως είναι εμφανές, οι μαγνήτες σπάνιων γαιών αποτελούν την καταλληλότερη επιλογή για τη ζητούμενη εφαρμογή, οπότε θα αναλυθούν οι αντίστοιχες τεχνικές κατεργασίας.

#### 2.4.3.1.2.2 Είδη Κατεργασίας

Η πυροσυσσωμάτωση (sintering) ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία:

- Οι πρώτες ύλες κονιορτοποιούνται σε όσο το δυνατόν μικρότερους κόκκους.
- Οι κόκκοι (κρυσταλλικές δομές) ευθυγραμμίζονται με τη χρήση ενός μαγνητικού πεδίου και συμπιέζονται, ώστε να μην μπορεί να χαθεί η ευθυγράμμιση.
- Το συμπαγές υλικό θερμαίνεται σε υψηλή θερμοκρασία ( $1000^\circ\text{C}$ ) για μία ώρα. Μέσα από αυτή τη διαδικασία συρρικνώνεται και αυξάνεται η πυκνότητά του.

- Στη συνέχεια ψύχεται και δέχεται κάποιες θερμικές κατεργασίες, ώστε να αποκτήσει τις απαιτούμενες μαγνητικές ιδιότητες, ανάλογα με την εφαρμογή.
- Οι μαγνήτες νεοδυμίου οξειδώνονται, όταν βρεθούν σε επαφή με τον αέρα. Γι' αυτό το λόγο, πρέπει να επικαλυφθούν, είτε από κάποιο μέταλλο που δεν οξειδώνεται, είτε από εποξική ρητίνη. Οι μαγνήτες σαμαρίου δε χρειάζονται κάποια επικάλυψη.

Αυτή η μέθοδος εμφανίζει τις υψηλότερες επιδόσεις.

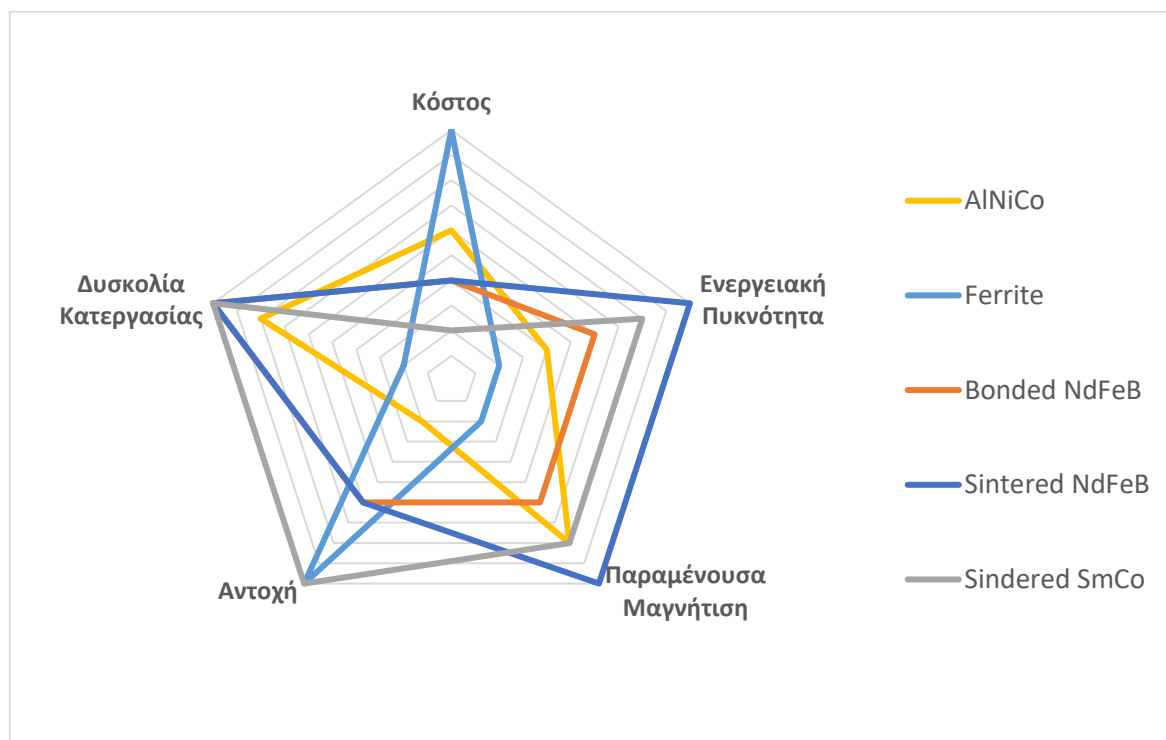
Εκτός από την κατεργασία της πυροσυσσωμάτωσης, υπάρχει και η δυνατότητα **δημιουργίας μεταλλουργικών δεσμών (bonding)**.

Στη διαδικασία αυτή, οι πρώτες ύλες ρευστοποιούνται και κατόπιν ψύχονται βίαια με ειδικό μηχανισμό, ώστε να κονιορτοποιηθούν.

- Αν η σκόνη συμπιεστεί με ρητίνη, δημιουργείται ένας ισοτροπικός μαγνήτης, ο οποίος είναι πιο αδύναμος, αλλά πιο ευέλικτος στη χρήση του.
- Εναλλακτικά, περνάει από μια διαδικασία θερμής συμπίεσης. Ο τρόπος συμπίεσης δημιουργεί κατάλληλο προσανατολισμό της κρυσταλλικής δομής και το υλικό γίνεται ανισοτροπικό.

Αυτή η μέθοδος εμφανίζει μειωμένες επιδόσεις, αλλά, δίνει τη δυνατότητα κατασκευής μαγνητών σε διάφορα σχήματα.

Διάγραμμα 2. 6 Σύγκριση διαφόρων τύπων μαγνητών



### 2.4.3.1.2.3 Σύγκριση Μονίμων Μαγνητών

Στο διάγραμμα 2.6 δίνεται μια οπτική σύγκριση των διαφόρων τύπων μαγνητών.

### 2.4.3.2 Ηλεκτρικό κύκλωμα

Το ηλεκτρικό κύκλωμα αποτελείται από το τύλιγμα του στάτη και τις διάφορες μονώσεις.

#### 2.4.3.2.1 Τύλιγμα Στάτη

Το τύλιγμα του στάτη κατασκευάζεται συνήθως από αγωγούς χαλκού. Ο χαλκός είναι το επικρατέστερο μέταλλο στην κατασκευή αγωγών, επειδή είναι από τα πιο αγωγιμα μέταλλα, ενώ είναι και αρκετά φθηνότερος από μέταλλα με αντίστοιχη αγωγιμότητα.

#### 2.4.3.2.2 Μονώσεις

Κάθε αγωγός, για να μην έρχεται σε επαφή με τους γειτονικούς αγωγούς, περιβάλλεται από κάποιο μονωτικό υλικό. Κλασικά υλικά για τέτοιου είδους μόνωση είναι το PVC ( $10^{-13}$  S/m) και το Enoflex. Οι μονώσεις κατηγοριοποιούνται σε κλάσεις, ανάλογα με τη θερμοκρασία στην οποία προβλέπεται να λειτουργούν. Τυπικά αναφέρεται ότι, υπάρχουν 4 κλάσεις μόνωσης, με κωδικούς A,B,F και H και κάθε κλάση επιτρέπει υψηλότερες θερμοκρασίες από την προηγούμενη. Η περαιτέρω ανάλυση δεν κρίνεται σκόπιμη, διότι η εφαρμογή δεν ευνοεί την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών.

Μονωτικά υλικά χρησιμοποιούνται, επίσης, για να διαχωρίσουν το ηλεκτρικό κύκλωμα από το σώμα της μηχανής. Αυτό συμβαίνει σε 2 σημεία:

1. Μεταξύ των τοιχωμάτων της αύλακας και του τυλίγματος του στάτη.
2. Στους ακροδέκτες της μηχανής, σε όποιο σημείο διέρχονται κοντά από το σώμα ή το κέλυφος.

Για αυτό το είδος μόνωσης χρησιμοποιούνται, κατά κύριο λόγο, μίκα ( $10^{-15}$  S/m), βακελίτης ( $10^{-8}$  S/m) και Nomex ( $10^{-15}$  S/m).

Ειδικά σε εφαρμογές χαμηλής τάσης, όπως αυτή που μελετάται στην παρούσα εργασία, τα πιο σημαντικά κριτήριά κατά την επιλογή μονωτικού υλικού είναι οι



θερμικές ιδιότητες, οι μηχανικές ιδιότητες και ο όγκος. Πρακτικά είναι πολύ πιο εύκολο να συμβεί ένα σφάλμα λόγω μηχανικών ή θερμικών καταπονήσεων, παρά από διάσπαση της μόνωσης λόγω χαμηλής ικανότητας μόνωσης.

## 2.5 Εναλλακτικές Διαμορφώσεις Κινητήρα

Ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες, υπάρχει μια ποικιλία κατασκευαστικών διαμορφώσεων των Σ.Κ.Μ.Μ.

Στην ενότητα αυτή εξετάζονται οι διάφορες διαμορφώσεις και θεμελιώνεται ένα ισοδύναμο κύκλωμα. [1] [15] [16] [17] [18]

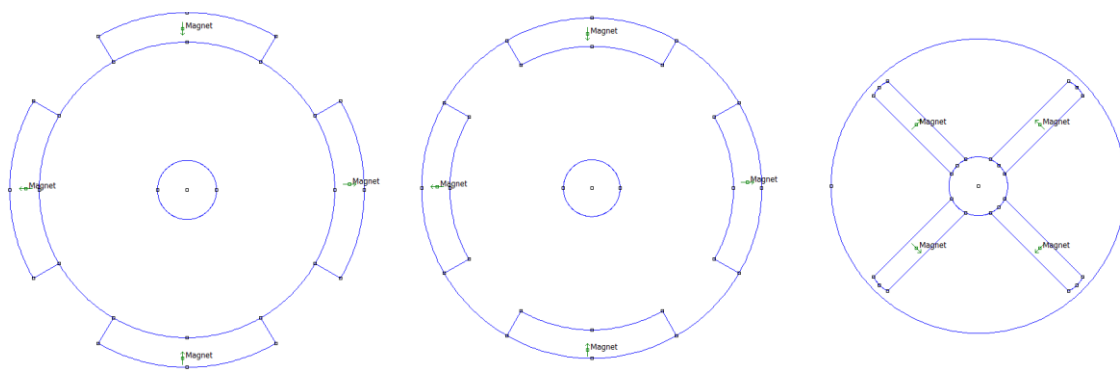
### 2.5.1 Τοπολογίες Μαγνητών

Ανάλογα με τη θέση του μαγνήτη στο δρομέα, υπάρχουν τρεις βασικές τοπολογίες:

1. «επιφανειακοί μαγνήτες»
2. «ένθετοι μαγνήτες»
3. «εσωτερικοί μαγνήτες»

Οι τοπολογίες φαίνονται στο σχήμα 2.5.

Σχήμα 2. 5 Αναπαραστάσεις τοπολογιών δρομέα ανάλογα με τη θέση του μαγνήτη



α) Επιφανειακοί Μαγνήτες

β) Ένθετοι Μαγνήτες

γ) Εσωτερικοί Μαγνήτες

### 2.5.1.1 Επιφανειακοί Μαγνήτες (Surface Mounted Permanent Magnets)

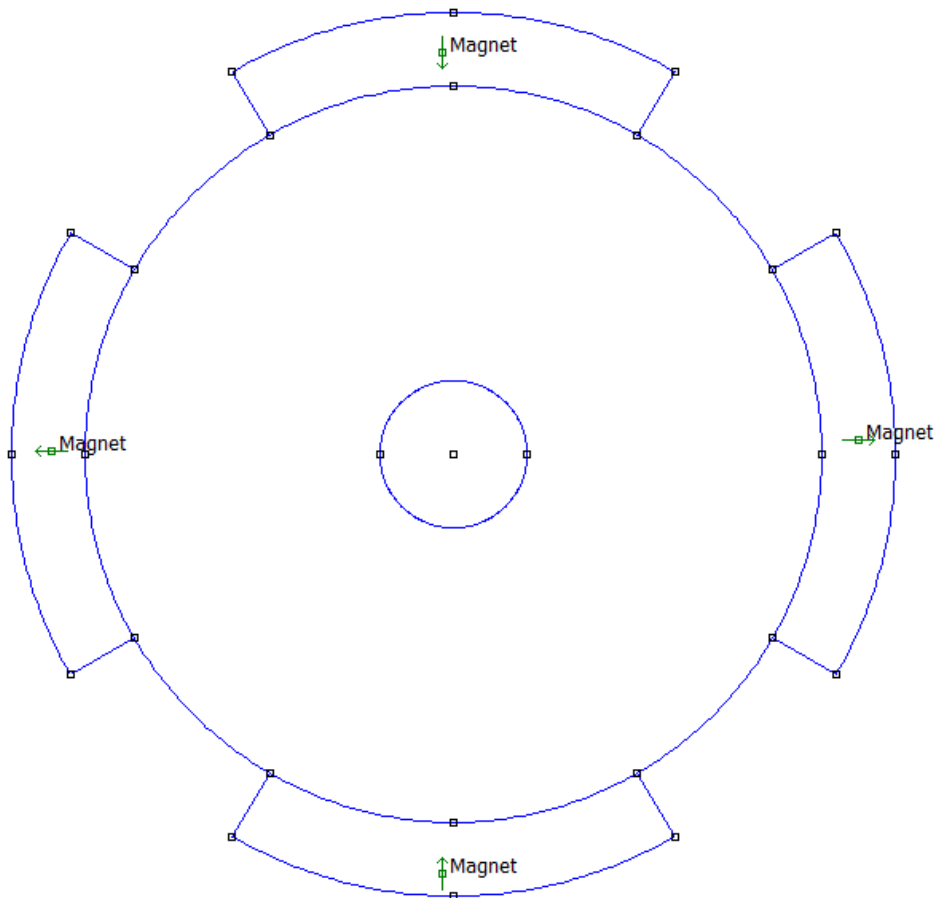
Σε αυτήν την τοπολογία, οι μαγνήτες τοποθετούνται στην επιφάνεια του δρομέα. Η συγκεκριμένη τοπολογία παρουσιάζει κατασκευαστική απλότητα, οπότε, και μειωμένο κατασκευαστικό κόστος.

Επίσης, σε εφαρμογές με ανάγκη υψηλών επιδόσεων και αυξημένης πυκνότητας ισχύος, είναι σημαντική η ελαχιστοποίηση της μαγνητικής ροής, που ρέει μεταξύ των μαγνητών, παρακάμπτοντας το στάτη. Η ροή αυτή ονομάζεται ροή σκέδασης. Ουσιαστικά, λόγω του αέρα που υπάρχει μεταξύ των μαγνητών, είναι ευκολότερο για τη μαγνητική ροή να περνάει στο στάτη, παρά να ρέει μεταξύ των μαγνητών.

Η εκτυπότητα είναι σχεδόν ασήμαντη, αφού ο μαγνήτης εμφανίζει ελαφρώς μεγαλύτερη επιτρεπτότητα από τον αέρα.

Το μεγάλο πρόβλημα αυτής της διάταξης είναι η ακαταλληλότητα για κινητήρες υψηλών στροφών, καθώς υπάρχει κίνδυνος αποκόλλησης, λόγω των φυγόκεντρων δυνάμεων που αναπτύσσονται στο δρομέα. Η διάταξη φαίνεται λεπτομερώς στο σχήμα 2.6.

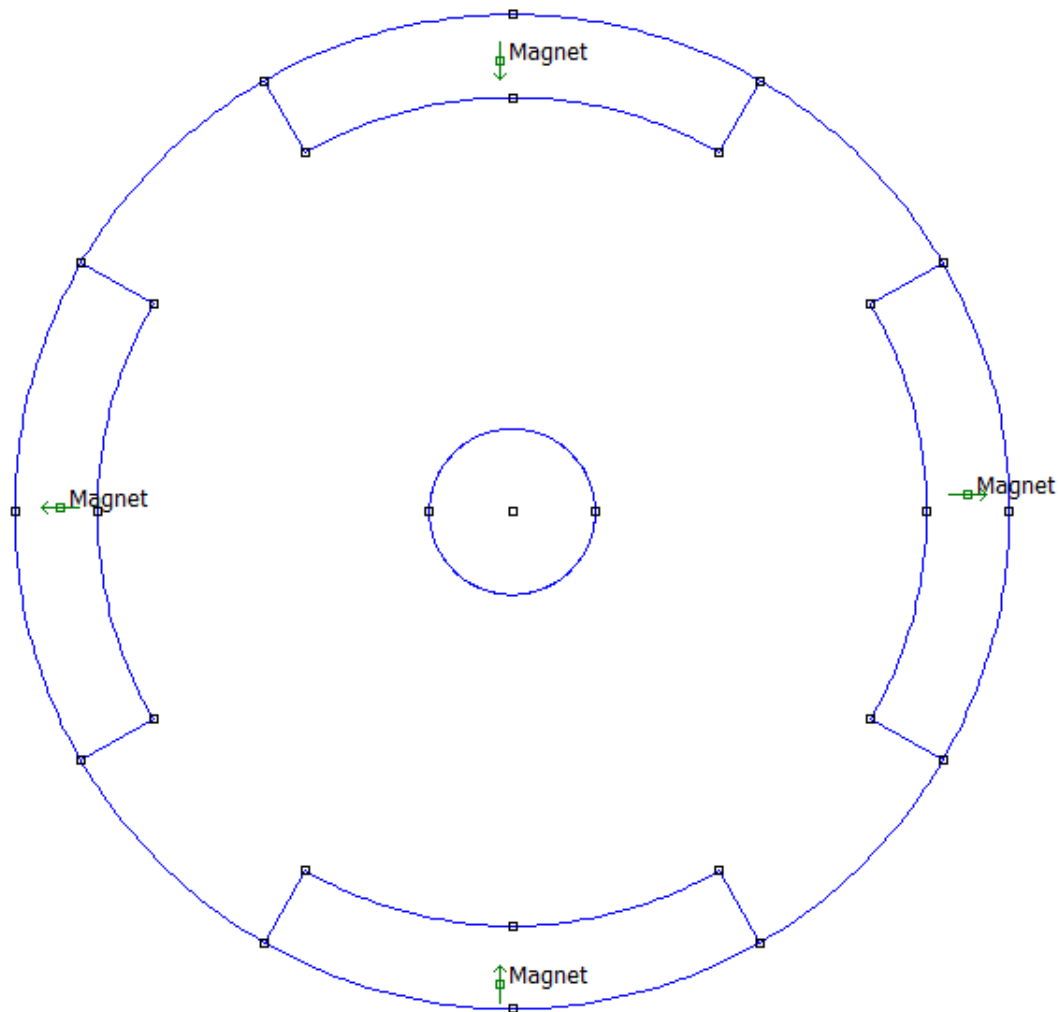
Σχήμα 2. 6 Αναπαράσταση δρομέα επιφανειακών μαγνητών



### 2.5.1.2 Ένθετοι Μαγνήτες (Surface Embedded Permanent Magnets)

Η διαφορά των ένθετων με τους επιφανειακούς μαγνήτες, είναι ότι, μεταξύ των μαγνητών υπάρχει σίδηρος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ροής σκεδάσεως, καθώς και την αύξηση της εκτυπότητας του δρομέα. Η διάταξη φαίνεται λεπτομερώς στο σχήμα 2.7.

Σχήμα 2. 7 Αναπαράσταση δρομέα ένθετων μαγνητών



### 2.5.1.3 Εσωτερικοί Μαγνήτες (Inner Magnets)

Σε αυτή τη διάταξη οι μαγνήτες τοποθετούνται στο εσωτερικό του σώματος του δρομέα.

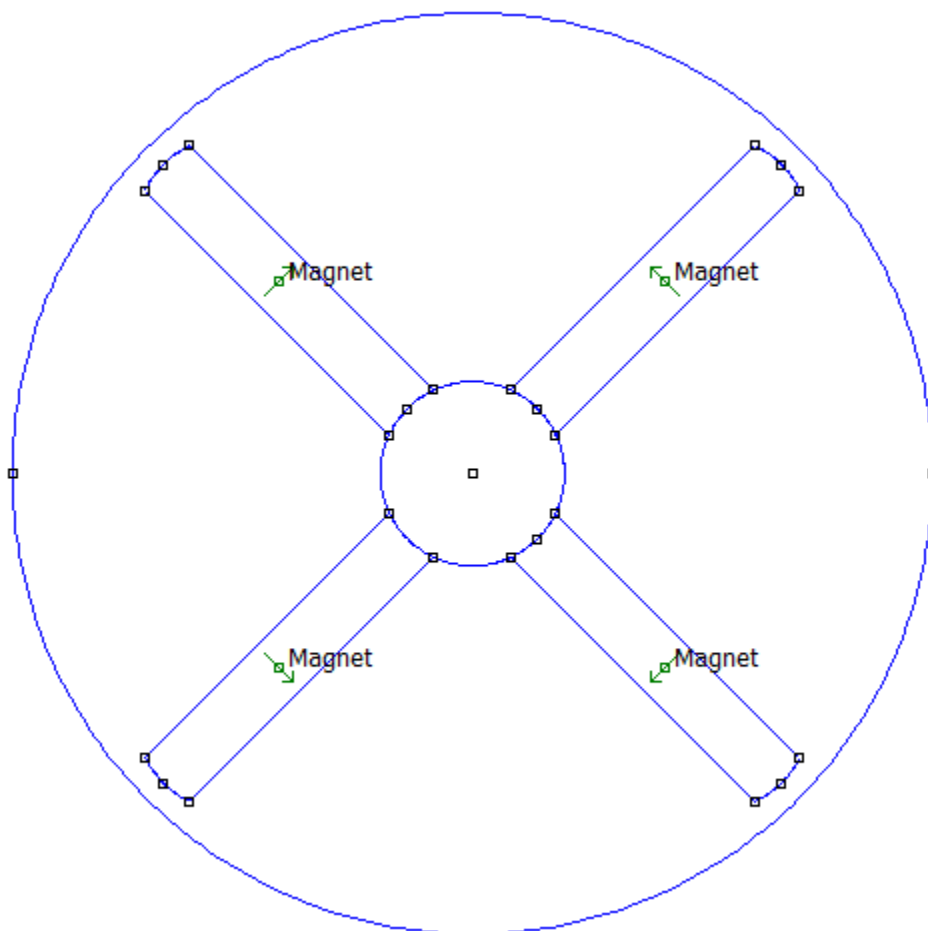
Αυτό εισάγει σημαντική πολυπλοκότητα και κόστος κατασκευής, καθώς πρέπει να γίνει ειδική διαμόρφωση στο σώμα του δρομέα.

Εμφανίζει υψηλή εκτυπότητα και αυξημένη ροή σκέδασης σε σχέση με τις προηγούμενες τοπολογίες.

Αυτή η τοπολογία έχει πλεονέκτημα σε εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων για δύο λόγους. Πρώτον, γιατί οι μαγνήτες προστατεύονται από τις φυγόκεντρες δυνάμεις και δεύτερον, λόγω εκτυπότητας, αυξάνεται το εύρος ταχυτήτων, για τις οποίες μπορούμε να πετύχουμε λειτουργία μέγιστης ροπής. Η σχέση μεταξύ της εκτυπότητας, της μεγιστοποίησης ροπής και της ανάγκης μείωσης ροπής σε υψηλές ταχύτητες θα αναλυθεί στην [ενότητα 2.6 \(ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα\)](#).

Υπάρχουν πολλές πιθανές διατάξεις για τοποθέτηση μαγνητών στο εσωτερικό του δρομέα, μία από αυτές φαίνεται στο σχήμα 2.8.

*Σχήμα 2. 8 Αναπαράσταση δρομέα εσωτερικών μαγνητών*



## 2.5.2 Τύλιγμα Στάτη

Τα δύο κύρια χαρακτηριστικά του τυλίγματος του στάτη είναι ο συντελεστής πληρότητας και ο τρόπος διανομής του στις αύλακες του στάτη.

### 2.5.2.1 Συντελεστής Πληρότητας Αύλακος

Είναι εμφανές, ότι δεν μπορεί μια αύλακα να είναι πλήρης χαλκού. Αυτό οφείλεται στα κενά μεταξύ αγωγών, στα μονωτικά υλικά και σε τυχόν υλικά στήριξης του τυλίγματος. Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του τυλίγματος, το οποίο δεν μπορούμε να αμελήσουμε, είναι ο συντελεστής πληρότητας αύλακος (fill factor), που υπολογίζεται από τον τύπο:

$$ff_{cu} = \frac{A_{cu}}{A_{slot}}$$

Όπου:  $A_{cu}$  το εμβαδόν χαλκού στην αύλακα και  
 $A_{slot}$  το εμβαδόν της αύλακας

Είναι κρίσιμο, ειδικά στις εφαρμογές υψηλής πυκνότητας ισχύος, ο συντελεστής πληρότητας αύλακος να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερος. Συνήθως ο συντελεστής κυμαίνεται μεταξύ 40% και 60%.

Η γεωμετρία της αύλακος, το σχήμα του αγωγού και ο τρόπος κατασκευής και τοποθέτησης του τυλίγματος, επηρεάζουν, εντόνως, αυτό το χαρακτηριστικό.

Υπάρχουν πολλές εναλλακτικές κατασκευαστικές δυνατότητες για την διανομή του τυλίγματος στις αύλακες του στάτη. Η βασική διάκριση γίνεται με το κριτήριο της επικάλυψης μεταξύ των φάσεων.

### 2.5.2.2 Τρόποι Διανομής Τυλίγματος

Η διάκριση στον τρόπο διανομής τυλίγματος γίνεται με βάση την ύπαρξη ή τη μη ύπαρξη επικάλυψης μεταξύ των φάσεων.

#### 2.5.2.2.1 Τύλιγμα Με Επικάλυψη Μεταξύ Των Φάσεων

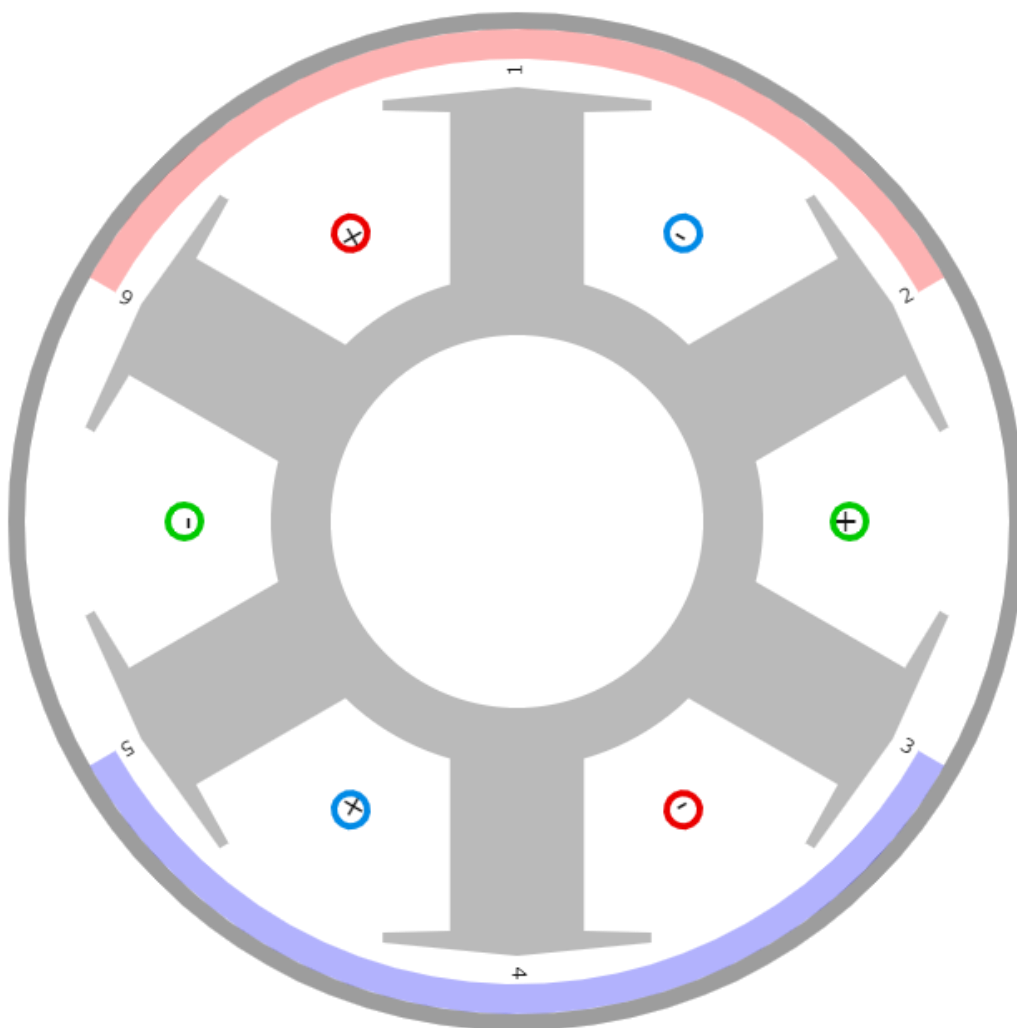
Στην κατηγορία αυτή, ανάλογα με τον αριθμό των αυλάκων ανά πόλο και φάση και τον αριθμό των στρώσεων, ονομάζουμε το τύλιγμα είτε «συγκεντρωμένο» (concentrated), είτε «κατανεμημένο» (distributed), είτε «κλασματικού βήματος κατανεμημένο σε πολλές στρώσεις» (multi-layer, distributed fractional winding).

Επίσης, το τύλιγμα μπορεί να διαπερνά τη μηχανή, είτε σχηματίζοντας βρόχους, οπότε ονομάζεται βροχοτύλιγμα, είτε σχηματίζοντας κύματα, οπότε ονομάζεται κυματοτύλιγμα.

### 2.5.2.2.1 Συγκεντρωμένο Τύλιγμα (Concentrated Winding)

Συγκεντρωμένο χαρακτηρίζεται ένα τύλιγμα, όταν διέρχεται από μία αύλακα, ανά πόλο και φάση. Αυτή η κατανομή δίνει την υψηλότερη μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ), αλλά παρουσιάζει και έντονο αρμονικό περιεχόμενο. Στο σχήμα 2.9 φαίνεται η κατανομή του τυλίγματος σε τριφασική μηχανή 2 πόλων και 6 αυλάκων.

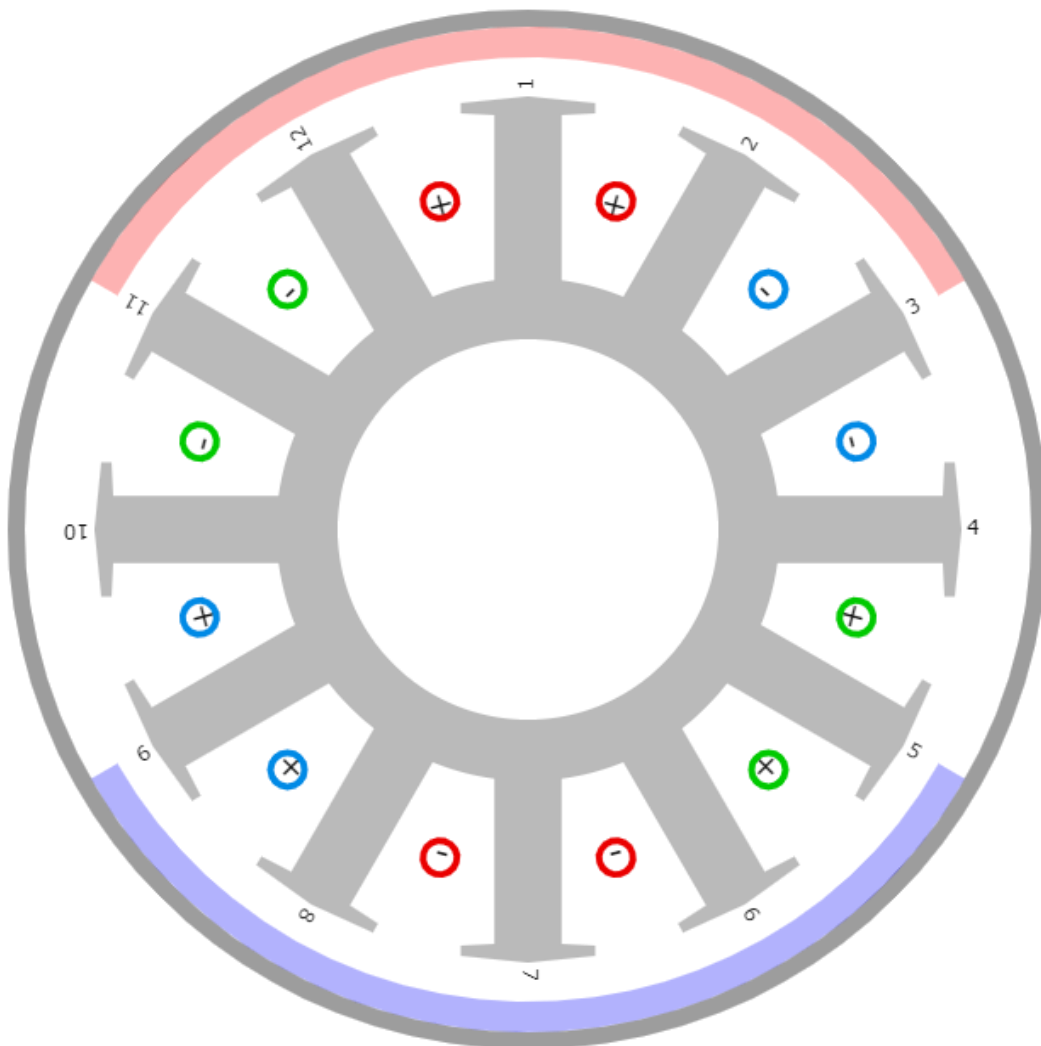
Σχήμα 2. 9 Χωροθέτηση συγκεντρωμένου τυλίγματος σε μηχανή 2 πόλων και 6 αυλάκων



### 2.5.2.2.1.2 Κατανεμημένο Τύλιγμα (Distributed Winding)

Κατανεμημένο χαρακτηρίζεται ένα τύλιγμα, όταν κατανέμεται σε περισσότερες της μίας αύλακας ανά πόλο και φάση. Σε αυτήν την περίπτωση, τα ελίγματα κάθε φάσης δεν έχουν τον ίδιο προσανατολισμό, με αποτέλεσμα η παραγόμενη ΜΕΔ να είναι ελαφρώς μειωμένη, αλλά ταυτόχρονα να εμφανίζει και μειωμένο αρμονικό περιεχόμενο.

Σχήμα 2. 10 Χωροθέτηση συγκεντρωμένου τυλίγματος σε μηχανή 2 πόλων και 12 αυλάκων



Σε αυτήν την περίπτωση θα πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$Q = m q P$$

Όπου Q: οι αύλακες της μηχανής

m: ο αριθμός των φάσεων

q: ο αριθμός αυλάκων ανά φάση και πόλο

P: ο αριθμός των πόλων

Ο συντελεστής απομείωσης πλάτους (σε σύγκριση με το συγκεντρωμένο τύλιγμα) δίνεται από τον τύπο:

$$K_{b,n} = \frac{\sin\left(\frac{nq\gamma}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{n\gamma}{2}\right)}$$

Όπου n: η τάξη της αρμονικής

γ: το βήμα αύλακος σε ηλεκτρικές μοίρες

Στο σχήμα 2.10 φαίνεται η κατανομή τυλίγματος σε μια τριφασική μηχανή 2 πόλων και 12 αυλάκων.

### 2.5.2.2.1.3 Κατανεμημένο Τύλιγμα Κλασματικού Βήματος (Multi-Layer, Distributed Fractional Winding).

Για εφαρμογές που απαιτείται περαιτέρω βελτίωση του αρμονικού περιεχομένου, θα πρέπει οι αύλακες να χωριστούν σε πολλαπλές στρώσεις. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να γίνουν διάφοροι συνδυασμοί σε κάθε αύλακα, ώστε να πετύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Σε αυτήν την περίπτωση ορίζουμε έναν ακόμα συντελεστή μείωσης του πλάτους, το συντελεστή βήματος, για τον οποίο ισχύει:

$$K_{p,n} = \cos\left(\frac{\pi - p}{2}\right)$$

Όπου p το κλασματικό βήμα σε ηλεκτρικές μοίρες.

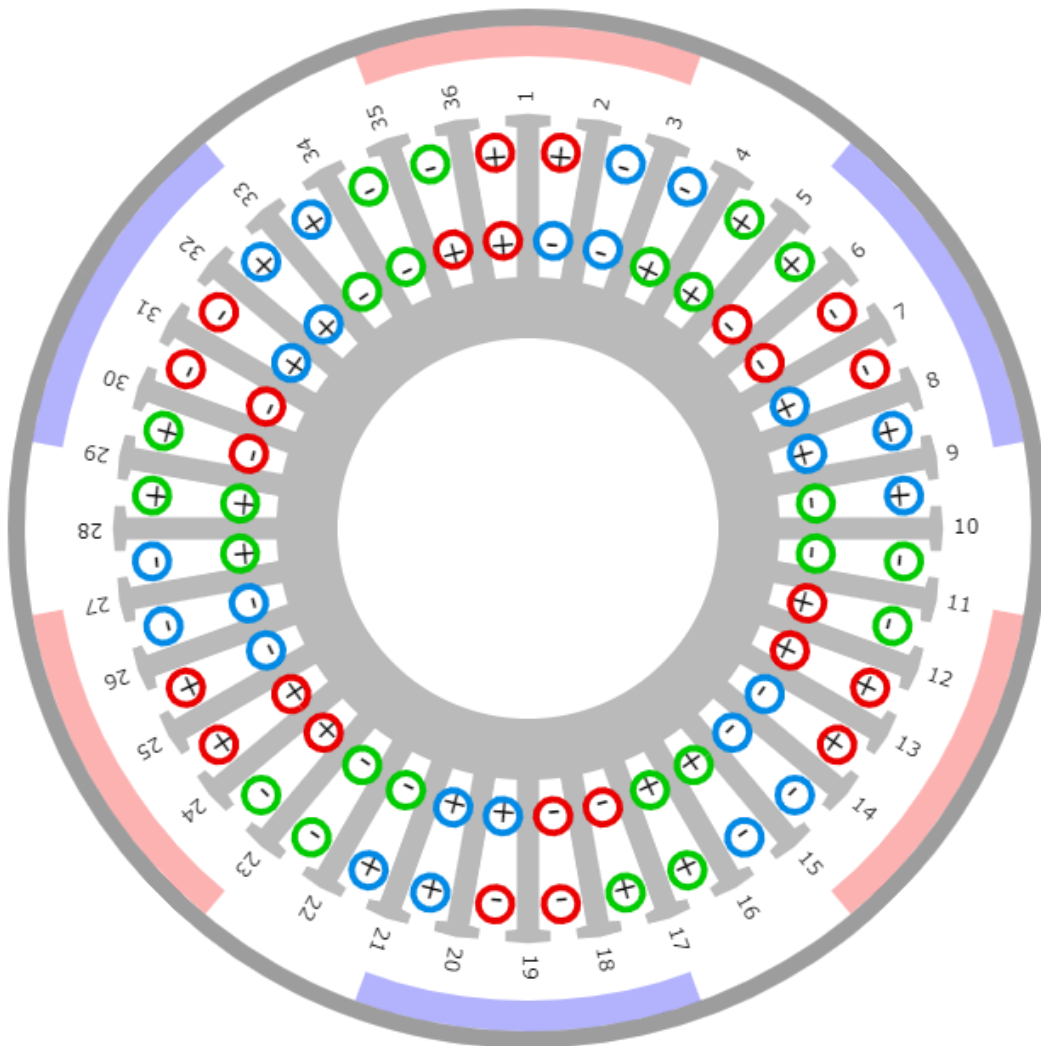
Προφανώς, ο συνολικός συντελεστής τυλίγματος, δίνεται από τη σχέση:

$$K_{w,n} = K_{b,n} \cdot K_{p,n}$$



Στο σχήμα 2.11, φαίνεται η κατανομή τυλίγματος σε μια τριφασική μηχανή 6 πόλων και 36 αυλάκων, με κλασματικό βήμα 5/6.

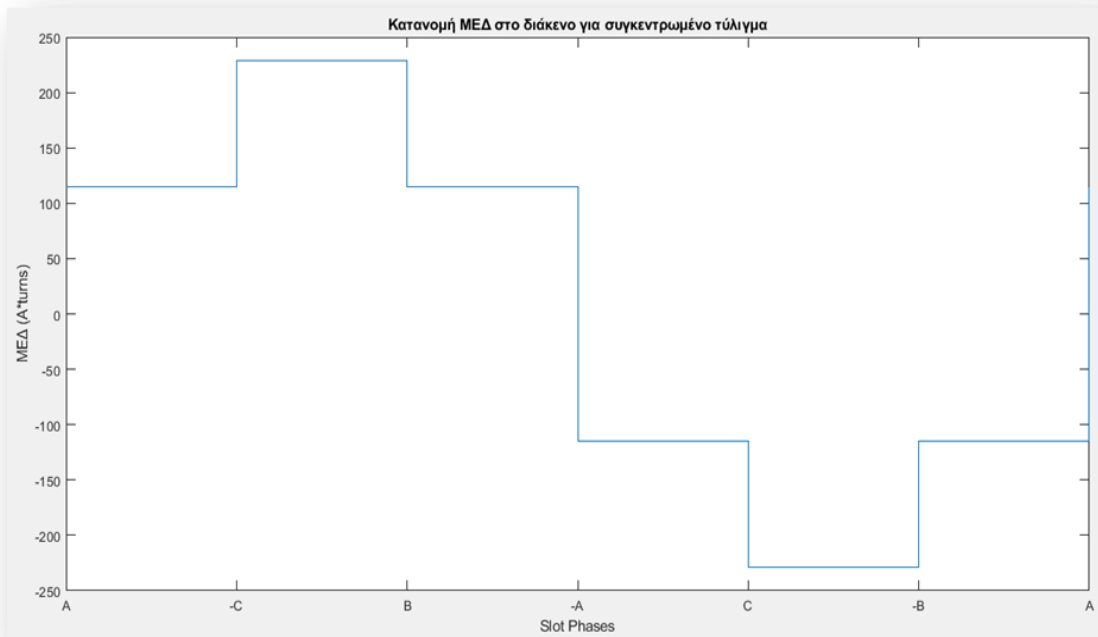
*Σχήμα 2. 11 Χωροθέτηση συγκεντρωμένου τυλίγματος διπλής στρώσης κλασματικού βήματος 5/6 σε μηχανή 6 πόλων και 36 αυλάκων*



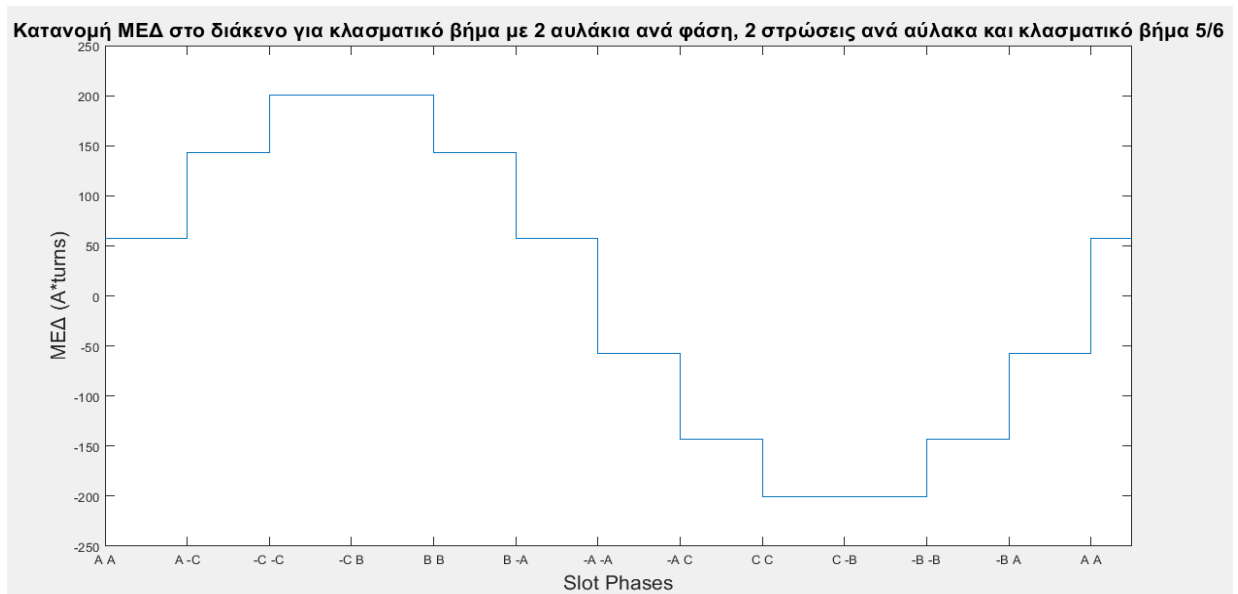
Η επίδραση της κατανομής του τυλίγματος γίνεται εμφανής στα διαγράμματα 2.7 και 2.8.

Διακρίνουμε ότι το συγκεντρωμένο τύλιγμα δίνει μεγαλύτερη ΜΕΔ, ενώ το κατανεμημένο με κλασματικό βήμα δίνει μειωμένο αρμονικό περιεχόμενο.

Διάγραμμα 2. 7 Κατανομή ΜΕΔ στο διάκενο για συγκεντρωμένο τύλιγμα



Διάγραμμα 2. 8 Κατανομή ΜΕΔ κατανεμημένου τυλίγματος κλασματικού βήματος



#### 2.5.2.2.1.4 Βροχοτύλιγμα Και Κυματοτύλιγμα

Το τύλιγμα με επικάλυψη φάσεων μπορεί να διαπερνά το στάτη, είτε σε βρόχους (βροχοτύλιγμα), είτε σε κύματα (κυματοτύλιγμα). Το κριτήριο για την επιλογή είναι οι επικαλύψεις που συμβαίνουν συνολικά στο τύλιγμα της μηχανής. Συνήθως, για 2πολικές και 4πολικές μηχανές χρησιμοποιούμε αποκλειστικά βροχοτύλιγμα, για 6πολικές και 8πολικές είναι ισοδύναμα, ενώ για μηχανές με 10 και επιπλέον πόλους χρησιμοποιούμε αποκλειστικά κυματοτύλιγμα.

#### 2.5.2.2.2 Τύλιγμα Χωρίς Επικάλυψη Φάσεων

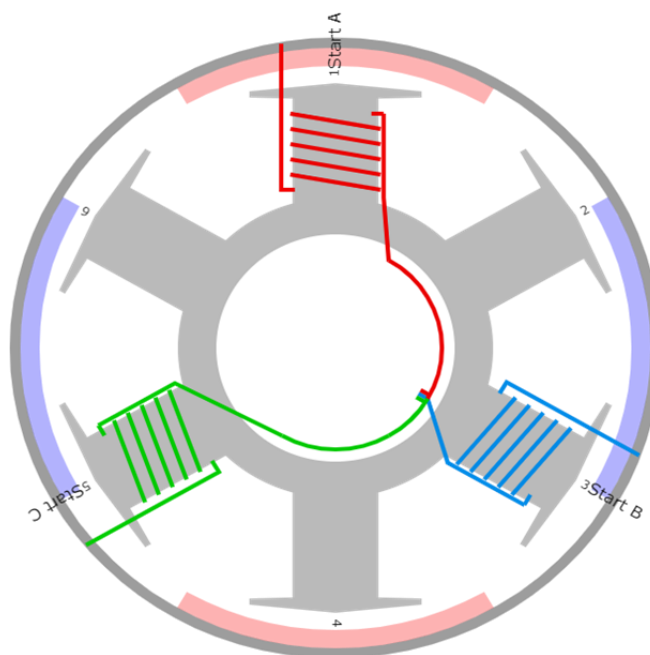
Αυτό το είδος είναι στην πραγματικότητα ένας συνδυασμός συγκεντρωμένου τυλίγματος με κλασματικό βήμα.

Κάθε αυλάκι μπορεί να έχει μία ή περισσότερες στρώσεις τυλίγματος. Τα ελίγματα τυλίγονται γύρω από ένα δόντι, κάτι που προσφέρει κατασκευαστική απλότητα.

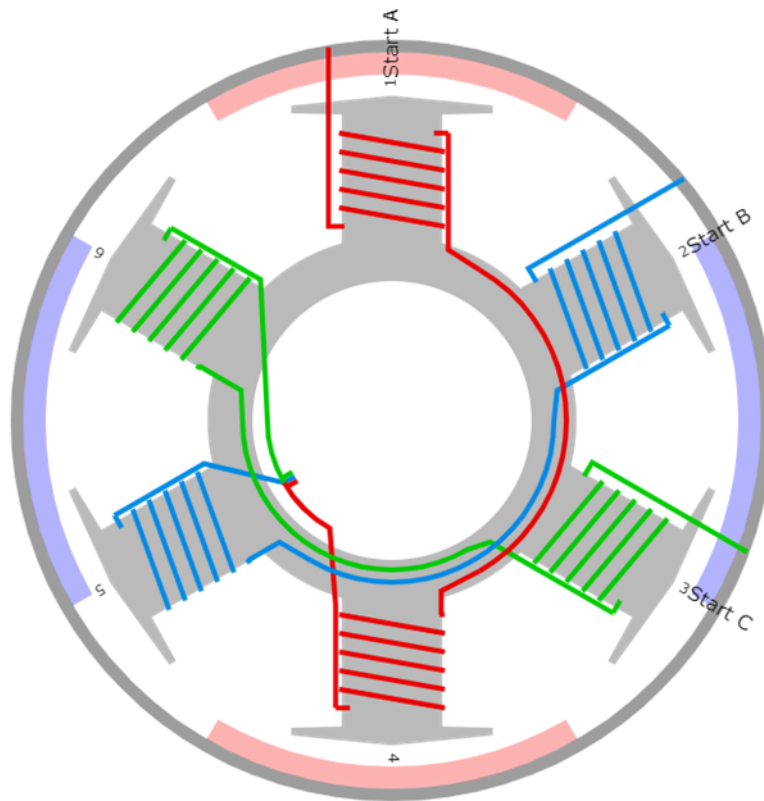
Το μειονέκτημα αυτής της διαμόρφωσης είναι ότι μπορεί να υπάρξει μόνο για συγκεκριμένους συνδυασμούς πόλων-αυλάκων-κλασματικού βήματος.

Στα σχήματα 2.12 και 2.13 φαίνεται η κατανομή των τυλιγμάτων τριφασικών μηχανών 4 πόλων και 6 αυλάκων, χωρίς επικάλυψη μεταξύ των φάσεων, για μία και 2 στρώσεις ανά αύλακα, αντίστοιχα.

Σχήμα 2. 12 Παράδειγμα τυλίγματος χωρίς επικάλυψη μονής στρώσης



Σχήμα 2. 13 Παράδειγμα τυλίγματος χωρίς επικάλυψη διπλής στρώσης



### 2.5.2.2.3 Σύγκριση Τυλιγμάτων

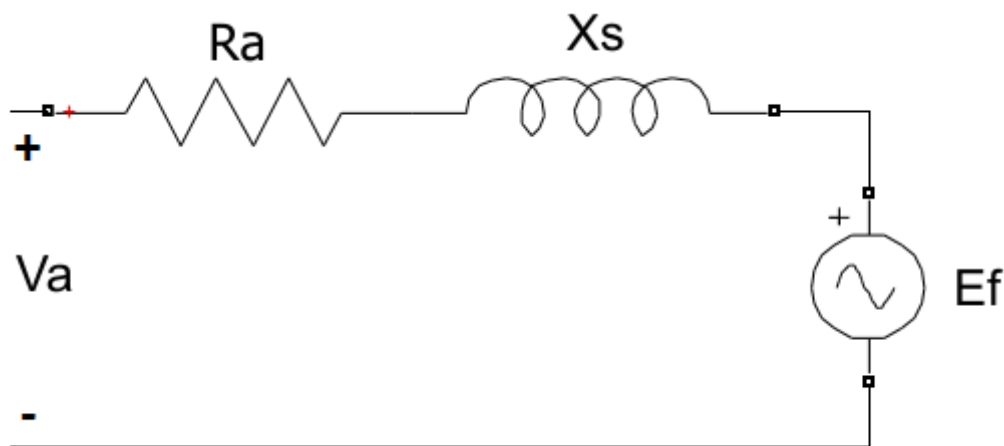
Έχοντας αναφέρει τη διαμόρφωση των διαφόρων ειδών τυλιγμάτων, καταλήγουμε στην παρακάτω σύγκριση:

- Το πλεονέκτημα των τυλιγμάτων με επικάλυψη φάσεων είναι ότι δίνουν μεγάλη ευελιξία, λόγω των πολλών δυνατών συνδυασμών που προσφέρουν. Το μειονέκτημα είναι οι επικαλύψεις, οι οποίες δυσκολεύουν τη χωροθέτηση, καθώς και οι μεγάλες κεφαλές τυλίγματος.
- Το τύλιγμα χωρίς επικάλυψη φάσεων είναι ευκολότερο κατασκευαστικά, αλλά περιορίζει σημαντικά το εύρος των δυνατών επιλογών, που σχετίζονται με τα ζεύγη πόλων, τον αριθμό αυλάκων και το κλασματικό βήμα.

## 2.6 Ισοδύναμο Κύκλωμα Κινητήρα

Στην προσπάθεια μας να περιγράψουμε τη λειτουργία του κινητήρα με απλές εξισώσεις, μπορούμε να το θεωρήσουμε ισοδύναμο ανά φάση με το κύκλωμα του σχήματος 2.14. [1] [3] [5] [19] [20] [21] [22] [23]

Σχήμα 2. 14 Ισοδύναμο Ανά Φάση Κύκλωμα



$$V_a = V_{max} \cos \omega t (\omega t + \delta)$$
$$V_b = V_{max} \cos \omega t \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} + \delta \right)$$
$$V_c = V_{max} \cos \omega t \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} + \delta \right)$$

Ως γωνία ισχύος  $\delta$ , ορίζεται η σχετική γωνία μεταξύ των πεδίων στρεφόμενου στάτη και δρομέα.

Το σύστημα αυτό εμφανίζει μεγάλη πολυπλοκότητα, λόγω των χρονομεταβλητών ποσοτήτων τάσεων και ρευμάτων.

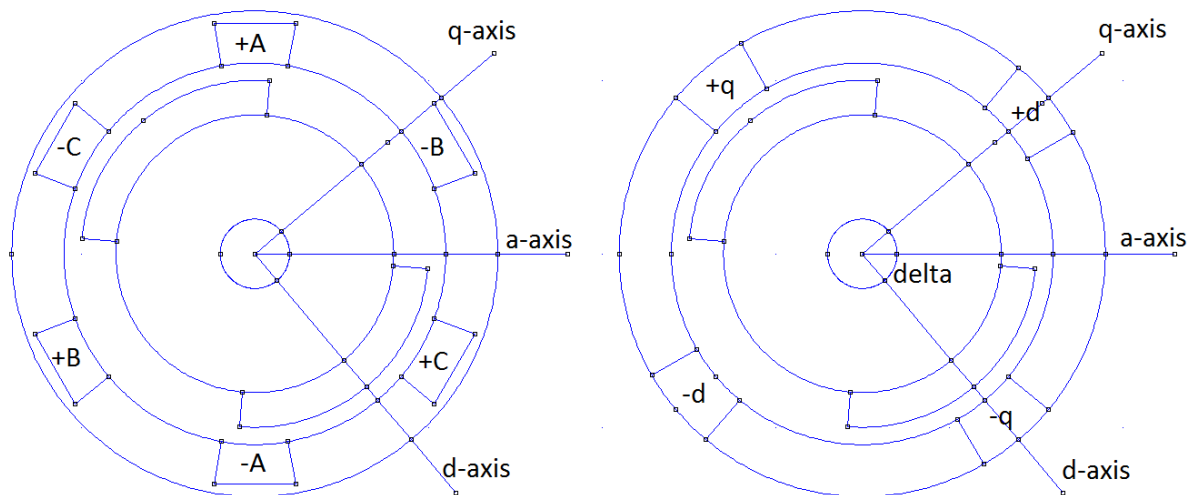
Για να ξεπεράσουμε αυτήν την πολυπλοκότητα, χρησιμοποιούμε ένα μαθηματικό μετασχηματισμό, εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι τα μαγνητικά πεδία στάτη και δρομέα στρέφονται με την ίδια ταχύτητα. Ο μετασχηματισμός αυτός ονομάζεται μετασχηματισμός Park και μετασχηματίζει τις χρονομεταβλητές ποσότητες από το ακίνητο abc του στάτη σε χρονοσταθερές ποσότητες στο στρεφόμενο πλαίσιο dq του δρομέα.

Ο μετασχηματισμός οπτικοποιείται στο σχήμα 2.15. Σαν άξονα d ορίζουμε τον άξονα του μαγνήτη, ενώ σαν άξονα q ορίζουμε τον άξονα που προπορεύεται κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες. Η ακολουθία των φάσεων στο στάτη είναι τέτοια, ώστε να προκαλεί στρεφόμενο πεδίο κατά τη θετική φορά. Επίσης, σαν άξονα

ενός τυλίγματος, θεωρούμε τον άξονα στον οποίο προκαλεί μαγνητική ροή, όταν διαρρέεται από ρεύμα.

Μετά τη χρήση μετασχηματισμού, ουσιαστικά έχουμε 2 στρεφόμενα και κάθετα μεταξύ τους, τυλίγματα στο στάτη. Ο άξονας κάθε τυλίγματος, συμπίπτει με τους αντίστοιχους άξονες του δρομέα.

Σχήμα 2. 15 Μετασχηματισμός Park



Ο μετασχηματισμός της τάσης αποτυπώνεται μαθηματικά με τους παρακάτω πίνακες:

$$\begin{bmatrix} Vd \\ Vq \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix}$$

Η γωνία  $\theta = \omega t$  είναι η στιγμιαία γωνία του δρομέα.

Όπως ορίστηκε ο μετασχηματισμός, οι πεπλεγμένες ροές dq υπολογίζονται ως εξής:

$$\Lambda_d = \Lambda_{pm} + L_d I_d$$

$$\Lambda_q = L_q I_q$$

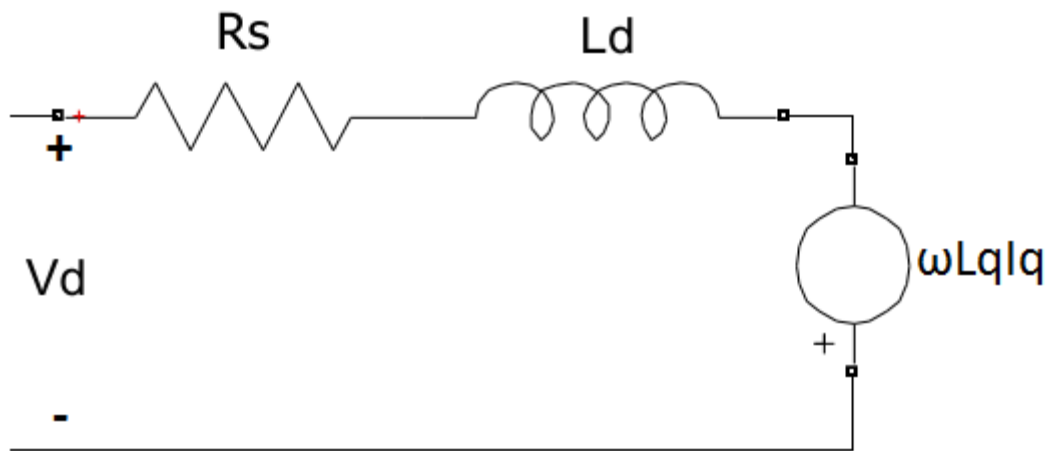
Οι παρακάτω εξισώσεις μπορούν να προκύψουν είτε μετασχηματίζοντας όλες τις ποσότητες από το σύστημα abc στο dq, είτε και από τη μελέτη του σχήματος

2.15.

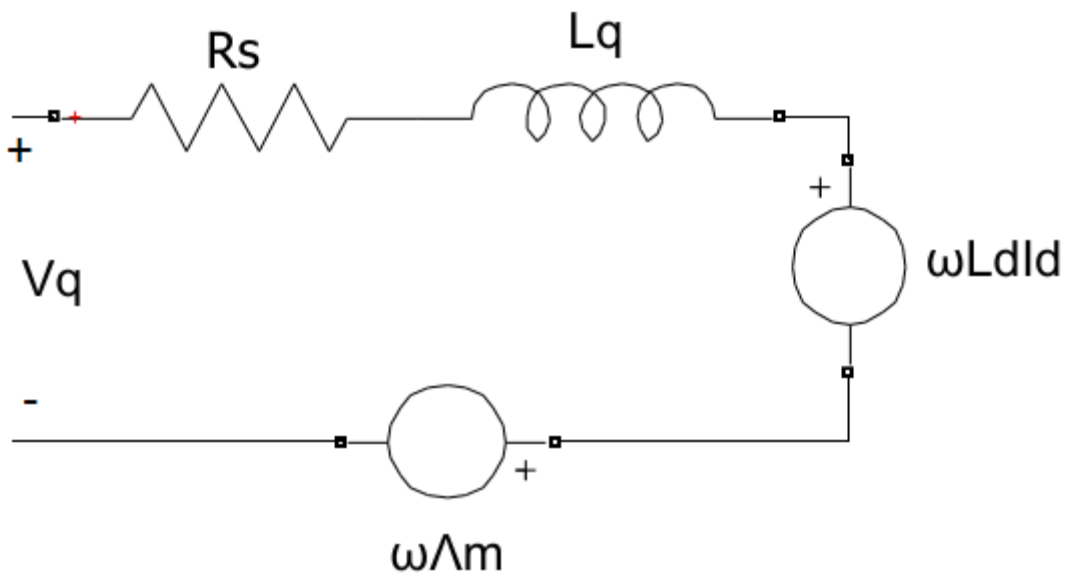
$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_d \frac{d}{dt} & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_s + L_q \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Lambda m \end{bmatrix}$$

Οι εξισώσεις αυτές αποτυπώνονται στα ισοδύναμα κυκλώματα που φαίνονται στα σχήματα 2.16 και 2.17.

Σχήμα 2. 16 Ισοδύναμο Κύκλωμα d Άξονα

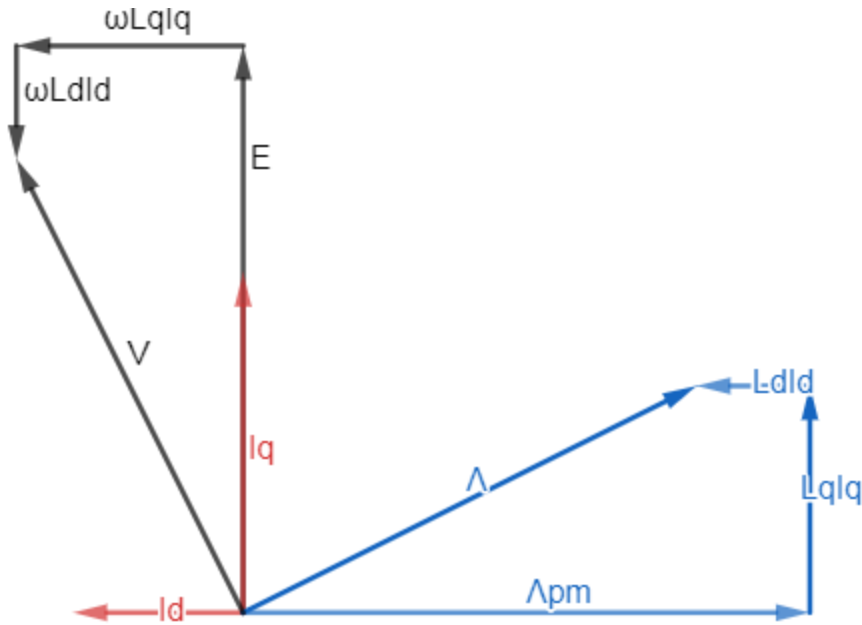


Σχήμα 2. 17 Ισοδύναμο Κύκλωμα q Άξονα



Το διάγραμμα 2.9 είναι ένα διανυσματικό διάγραμμα, για το οποίο έχει υποτεθεί  $L_d=L_q$  και  $\delta>90^\circ$ .

Διάγραμμα 2. 9 Διανυσματικό Διάγραμμα Σ.Κ.Μ.Μ.



### 2.6.1 Υπολογισμός Ισχύος-Ροπής

Η ηλεκτρομαγνητική ισχύς που παράγεται, συναρτήσει των ποσοτήτων dq, προκύπτει από τα ισοδύναμα κυκλώματα ως εξής:

$$P_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\omega \Lambda_d I_q - \omega \Lambda_q I_d)$$

$$P_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \omega [\Lambda_m I_q + (L_d - L_q) I_d I_q]$$

Ο όρος  $3/2$ , προκύπτει επειδή ο μετασχηματισμός abc-dq, όπως ορίστηκε, δε διατηρεί την ενέργεια και ο όρος  $P/2$  προκύπτει, γιατί ο μετασχηματισμός έχει οριστεί σε ένα ζεύγος πόλων.

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\Lambda_m I_q + (L_d - L_q) I_d I_q]$$

Αυτή είναι η πιο συνηθισμένη έκφραση της ροπής στο σύστημα αναφοράς dq.



Χρήσιμα συμπεράσματα προκύπτουν, αν αντικαταστήσουμε τα ρεύματα  $I_d$  και  $I_q$  ως εξής:

$$\begin{aligned} I_d &= I_s \cos \delta \\ I_q &= I_s \sin \delta \end{aligned}$$

όπου:  $I_s$  το ρεύμα του στάτη.

Η έκφραση που προκύπτει για τη ροπή είναι η ακόλουθη:

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega} = \frac{3P}{2} \left[ \Lambda_m I_s \sin \delta + \frac{(L_d - L_q) I_s^2 \sin 2\delta}{2} \right]$$

Παρατηρώντας την έκφραση της ροπής, βλέπουμε τα εξής:

1. Η ροπή αποτελείται από 2 συνιστώσες:
  - Τη ροπή διεγέρσεως  $\Lambda_m I_s \sin \delta$  που οφείλεται στη ροή του μαγνήτη.
  - Τη ροπή εκτυπότητας, που οφείλεται στην εκτυπότητα του δρομέα, δηλαδή στη διαφορά μεταξύ  $L_d$  και  $L_q$ .
2. Η μηχανή λειτουργεί:
  - Ως κινητήρας για  $\delta < 180^\circ$
  - Ως γεννήτρια για  $\delta > 180^\circ$

### 2.6.1.1 Βέλτιστη Αξιοποίηση Ρεύματος (Max Torque Per Ampere)

Για την εξαγωγή περισσότερων συμπερασμάτων, βρίσκουμε την έκφραση που υπολογίζει τη ροπή/Ampere:

$$\frac{T_{em}}{I_s} = \frac{P_{em}}{\omega} = \frac{3P}{2} \left[ \Lambda_m \sin \delta + \frac{(L_d - L_q) I_s \sin 2\delta}{2} \right]$$

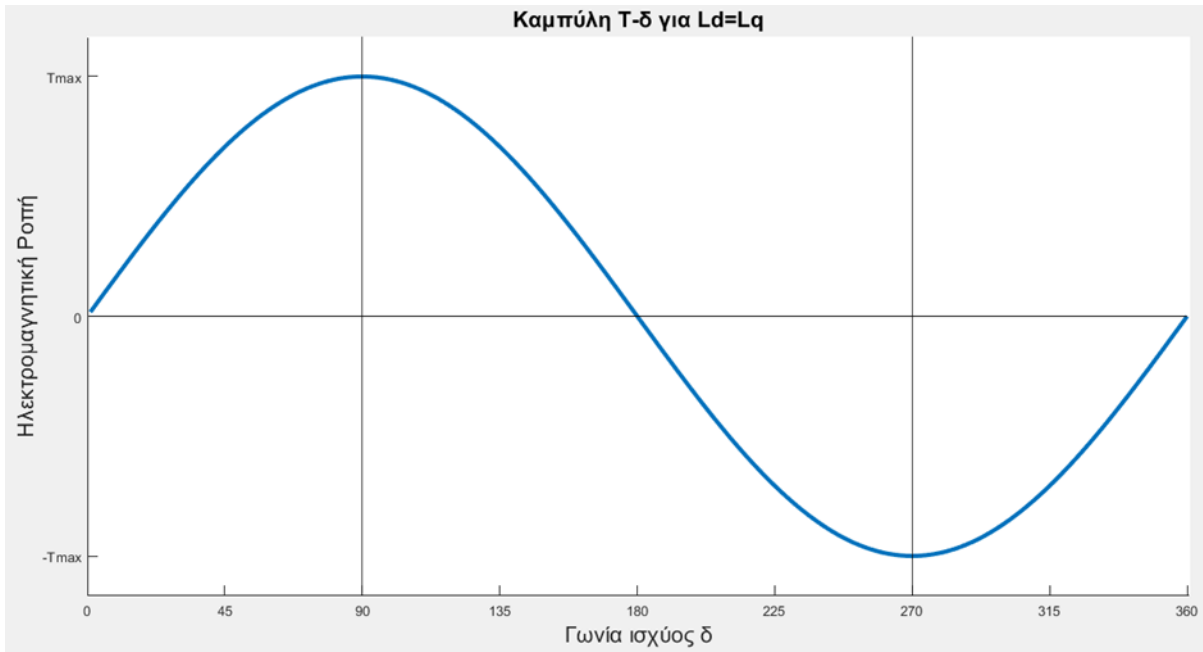
Σε εφαρμογές που υπάρχει απαίτηση για μέγιστο βαθμό απόδοσης, είναι κρίσιμο να αξιοποιούμε το ρεύμα του στάτη με βέλτιστο τρόπο. Μέσω αυτής της έκφρασης, μπορούμε να υπολογίσουμε τη γωνία  $\delta$ , για την οποία αναπτύσσεται η μέγιστη ροπή/Ampere.

Το πρόσημο του όρου  $(L_d - L_q)$  είναι σημαντικό, γιατί καθορίζει αν η γωνία  $\delta$  θα πρέπει να είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη των  $90^\circ$ . Πιο συγκεκριμένα, διακρίνουμε 3 περιπτώσεις:

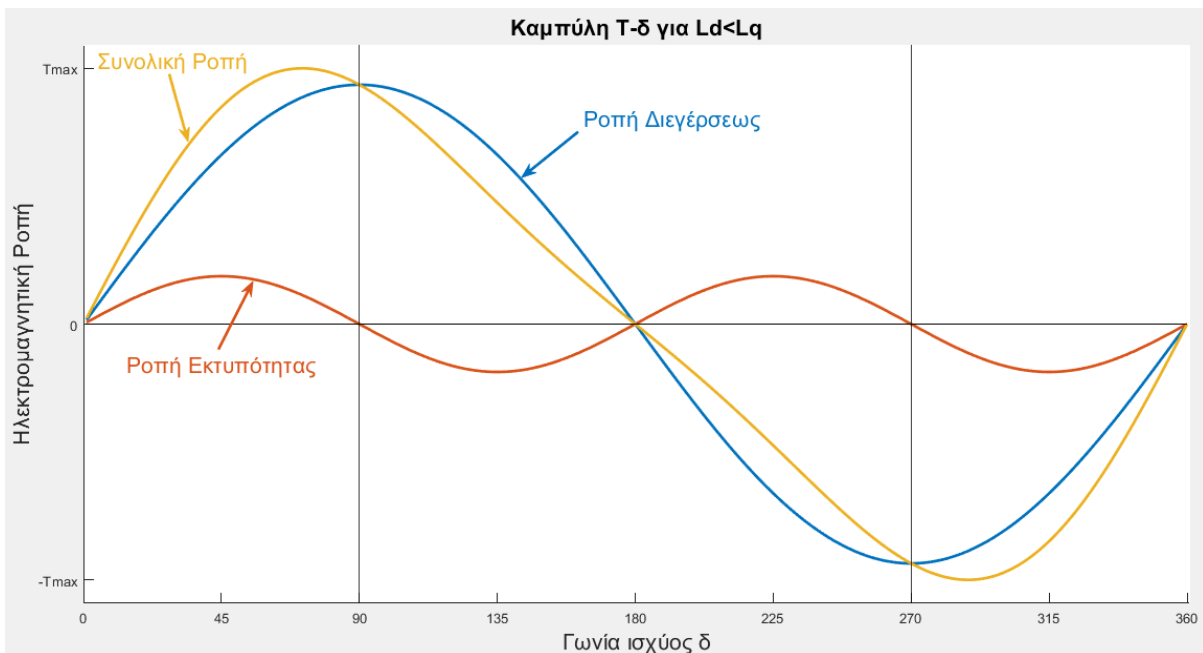
1.  $L_d = L_q$ . Σε αυτήν την περίπτωση η συνιστώσα εκτυπότητας μηδενίζεται και επομένως η ροπή μεγιστοποιείται για  $\delta = 90^\circ$ .
2.  $L_d > L_q$ . Σε αυτήν την περίπτωση η ροπή μεγιστοποιείται για  $\delta < 90^\circ$ .
3.  $L_d < L_q$ . Σε αυτήν την περίπτωση η ροπή μεγιστοποιείται για  $\delta > 90^\circ$ .

Τα διαγράμματα 2.10-2.12 απεικονίζουν ποιοτικά τις κυματομορφές για κάθε περίπτωση.

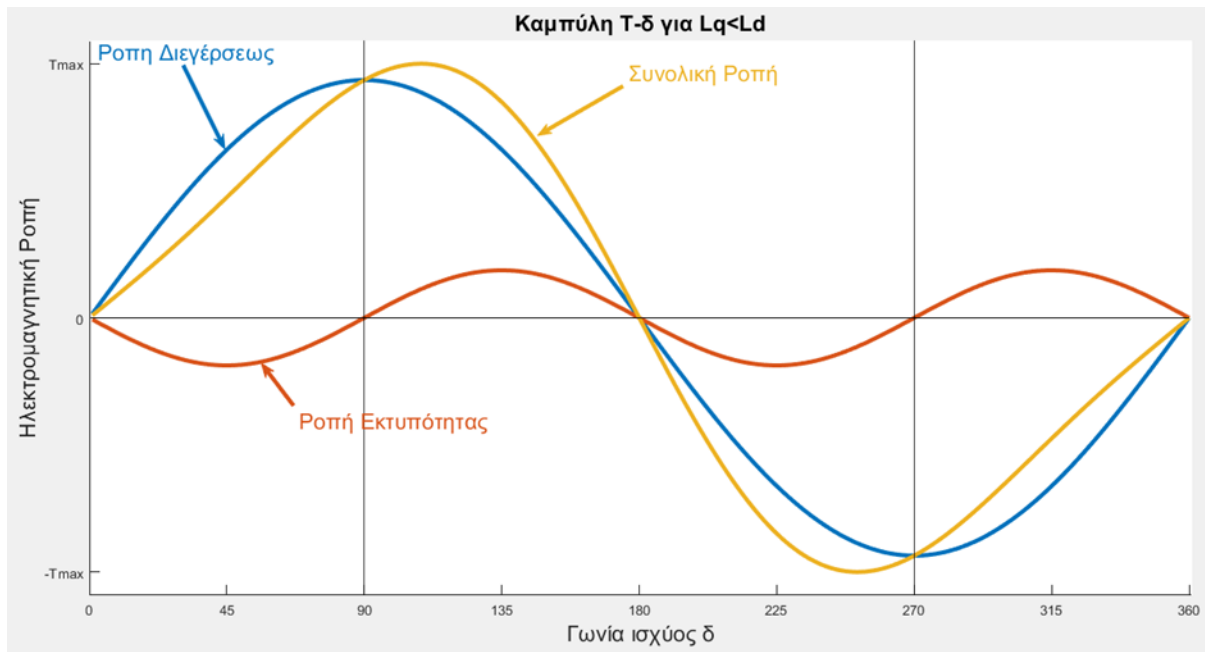
Διάγραμμα 2. 10 Καμπύλη Ροπής-Γωνίας  $\delta$  για  $Ld=Lq$



Διάγραμμα 2. 11 Καμπύλη Ροπής-Γωνίας  $\delta$  για  $Ld < Lq$



Διάγραμμα 2. 12 Καμπύλη Ροπής-Εσωτερικής Γωνίας  $\delta$  για  $Ld > Lq$



Για τον προσδιορισμό της βέλτιστης γωνίας  $\delta$ , μηδενίζουμε την παράγωγο, ως προς  $\delta$ , της ροπής/Ampere. Η έκφραση που προκύπτει είναι:

Για πραγματικά μεγέθη

$$\text{βέλτιστη γωνία } \delta = \arccos \left( -\frac{\Lambda m}{4(Ld - Lq)is} \pm \sqrt{\frac{1}{2} + \left(\frac{\Lambda m}{4(Ld - Lq)is}\right)^2} \right)$$

Για μεγέθη στο ανά μονάδα σύστημα

$$\text{βέλτιστη γωνία } \delta = \arccos \left( -\frac{1}{4(Ld - Lq)is} \pm \sqrt{\frac{1}{2} + \left(\frac{1}{4(Ld - Lq)is}\right)^2} \right)$$

## 2.6.2 Όριο ΑΗΕΔ - Εξασθένιση Πεδίου (Flux Weakening)

Στην περίπτωση που ο κινητήρας τροφοδοτείται μέσω αντιστροφέα, υπάρχει μια κρίσιμη τιμή τροφοδοσίας, την οποία ο αντιστροφέας δεν μπορεί να ξεπεράσει. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα του κινητήρα, τόσο αυξάνεται και η ΑΗΕΔ. Η ταχύτητα για την οποία η ΑΗΕΔ ισούται με τη μέγιστη τάση

τροφοδοσίας, ονομάζεται ταχύτητα βάσης. Για ταχύτητα μεγαλύτερη της βάσης, ο αντιστροφείας δεν μπορεί να τροφοδοτήσει τον κινητήρα με ρεύμα υπό βέλτιστη γωνία. Σε μια τέτοια περίπτωση, ακολουθούμε τον παρακάτω συλλογισμό:

Από το διανυσματικό διάγραμμα και από όσα ειπώθηκαν για τη ροπή, παρατηρούμε ότι:

- Το ρεύμα  $I_q$  συνδέεται κυρίως με την ανάπτυξη ροπής.
- Το ρεύμα  $I_d$  συνδέεται κυρίως με την ανάπτυξη τάσης. Συγκεκριμένα, όταν το ρεύμα  $I_d$  δίνει ροή στην κατεύθυνση του μαγνήτη, έχουμε αύξηση της τάσης, ενώ στην αντίθετη περίπτωση έχουμε μείωση.

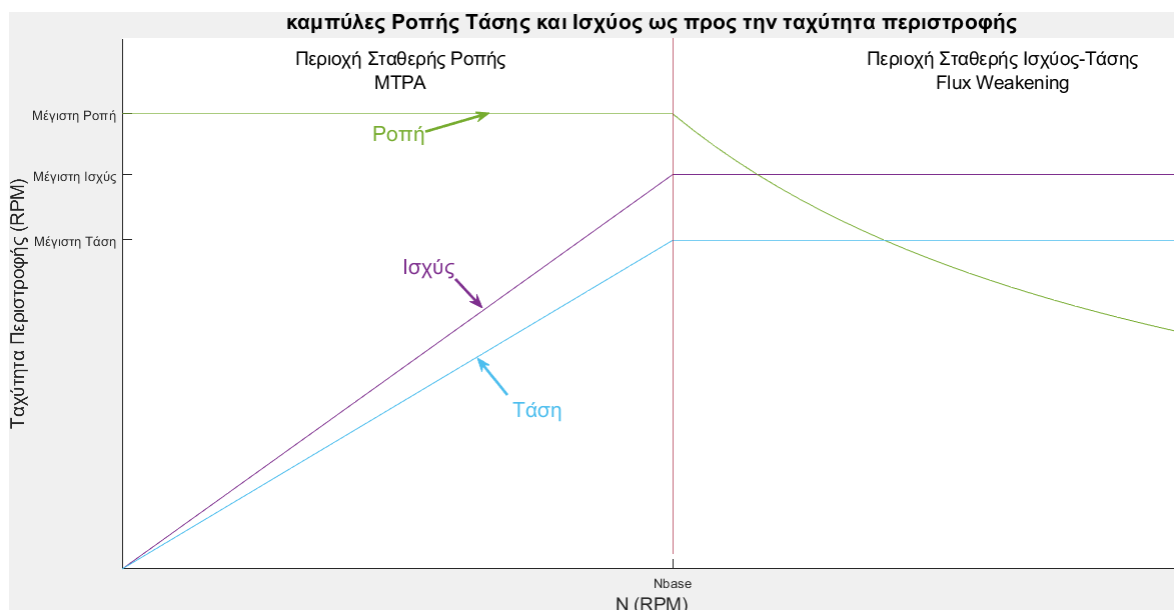
Επομένως, για να οδηγήσουμε τον κινητήρα σε μεγαλύτερες ταχύτητες, θα πρέπει να τροφοδοτήσουμε με μια αρνητική συνιστώσα  $I_d$ , ώστε να μειωθεί η ΑΗΕΔ. Αυτό έχει ως συνέπεια:

- Για δεδομένη τιμή ρεύματος, το «κόστος» που πληρώνουμε είναι η μείωση του  $I_q$  και επομένως και της ροπής.
- Για δεδομένη ροπή, το «κόστος» είναι οι αυξημένες ωμικές απώλειες στα τυλίγματα της μηχανής.

### 2.6.3 Συμπεράσματα - Όρια Λειτουργίας Κινητήρα

Λαμβάνοντας υπόψιν, ότι η τιμή του ρεύματος έχει ένα ανώτατο όριο, λόγω ανάπτυξης θερμοκρασιών στα τυλίγματα, καταλαβαίνουμε, ότι ξεπερνώντας την ταχύτητα βάσης, όσο αυξάνονται οι στροφές, τόσο μειώνεται και η μέγιστη ροπή.

Διάγραμμα 2. 13 Όρια λειτουργίας Σ.Κ.Μ.Μ.



Αυτό, ισοδύναμα, μπορεί να εκφραστεί με όρους ισχύος. Έχοντας μέγιστη τάση τροφοδοσίας και μέγιστο ρεύμα στα τυλίγματα, η ισχύς τροφοδοσίας είναι και αυτή μέγιστη. Λόγω διατήρησης ισχύος, η αύξηση της ταχύτητας συνεπάγεται μείωση της ροπής, κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η ισχύς εξόδου να παραμένει σταθερή και μέγιστη.

Ποιοτικά, τα όρια λειτουργίας ενός κινητήρα φαίνονται στο διάγραμμα 2.13.

## 2.7 Προβλήματα Βελτιστοποίησης (Optimization Problems)

Ως πρόβλημα βελτιστοποίησης (optimization problem) ορίζουμε ένα πρόβλημα στο οποίο επιδιώκεται η μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση μιας ποσότητας, η οποία ονομάζεται αντικειμενική και εξαρτάται από έναν πεπερασμένο αριθμό μεταβλητών εισόδου. Οι μεταβλητές εισόδου μπορούν είτε να είναι ανεξάρτητες είτε να υπόκεινται σε έναν ή περισσότερους περιορισμούς (constrains). [25] [26]

### 2.7.1 Βελτιστοποίηση Συναρτήσεων Μιας Μεταβλητής

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μιας μεταβλητής έχει τη μορφή  $Z=f(x)$ . Η μεταβλητή  $x$  μπορεί να μην υπόκειται σε περιορισμούς ή να υπόκειται σε περιορισμό της μορφής  $\alpha \leq x \leq \beta$ .

Η ποσότητα  $z=f(x)$  ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση και έχει πεδίο ορισμού το  $D \subseteq R$ , όπως αυτό προκύπτει από τους περιορισμούς της μεταβλητής  $x$ .

Μια αντικειμενική συνάρτηση  $f(x)$  εμφανίζει τοπικό (local) ελάχιστο στο σημείο  $x_0$ , αν υπάρχει ένα μικρό διάστημα με κέντρο το  $x_0$ , τέτοιο ώστε  $f(x) \geq f(x_0)$ , για κάθε  $x$  για το οποίο ορίζεται η συνάρτηση σε αυτό το διάστημα. Αν  $f(x) \geq f(x_0)$  για κάθε  $x$ , στο οποίο ορίζεται η συνάρτηση, τότε το ελάχιστο στο σημείο  $x_0$ , εκτός από τοπικό είναι και ολικό (global). Αντίστοιχα ορίζονται τα τοπικά και ολικά μέγιστα.

### 2.7.2 Βελτιστοποίηση Συναρτήσεων Πολλών Μεταβλητών

Σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλών μεταβλητών η αντικειμενική συνάρτηση έχει τη μορφή  $Z=f(X)$ , δηλαδή εξαρτάται από έναν πεπερασμένο

αριθμό μεταβλητών εισόδου  $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ . Το πεδίο ορισμού  $D \subseteq R^n$  της συνάρτησης  $Z$  προκύπτει από περιορισμούς, στους οποίους υπόκεινται οι μεταβλητές  $X_i, i=1,2,\dots,n$ .

Ως γειτονία, ακτίνας  $\epsilon$ , περί το  $\hat{X}$ , ονομάζουμε το εσωτερικό χωρίο και το όριο μιας σφαίρας  $n$  διαστάσεων και ακτίνας  $\epsilon$  με κέντρο το  $\hat{X}$ .

Μια αντικειμενική συνάρτηση  $f(X)$  εμφανίζει μέγιστο στο σημείο  $\hat{X}$ , αν υπάρχει γειτονία ακτίνας  $\epsilon$ , περί το  $\hat{X}$  τέτοια ώστε  $f(X) \leq f(\hat{X})$ , για κάθε  $X$  της γειτονίας ακτίνας  $\epsilon$ , για το οποίο ορίζεται η συνάρτηση. Αν η συνθήκη ικανοποιείται για κάθε θετική τιμή ακτίνας  $\epsilon$ , τότε η συνάρτηση έχει ολικό μέγιστο στο  $\hat{X}$ .

### 2.7.2.1 Προβλήματα ελαχιστοποίησης – Συνάρτηση Κόστους

Στην περίπτωση, όπου επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση της  $Z=f(X)$  η συνάρτηση  $Z$  ονομάζεται και συνάρτηση κόστους.

Το πεδίο ορισμού της συνάρτησης  $Z$  εκφράζεται από ένα σύνολο περιορισμών. Σε αυτήν την περίπτωση, το πρόβλημα μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως εξής:

$$\min(Z) = f(X)$$

με περιορισμούς:

$$g_1(X) \leq 0$$

$$g_2(X) \leq 0$$

.....

$$g_m(X) \leq 0$$

### 2.7.2.2 Η Μέθοδος Των Βαρών

Σε προβλήματα όπου το πλήθος των μεταβλητών εισόδου είναι μεγάλο, μπορούμε να ορίσουμε το διάνυσμα  $X$  ως ένα περιορισμένο πλήθος κριτηρίων βελτιστοποίησης, με βάση τα οποία θα αξιολογήσουμε το τελικό αποτέλεσμα.

Στο δεδομένο πρόβλημα, οι μεταβλητές εισόδου που σχετίζονται με τις διαστάσεις του κινητήρα, τις ιδιότητες των υλικών κατασκευής, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και την πίστα του διαγωνισμού είναι ιδιαίτερα

πολυπληθείς και είναι ιδιαίτερα δύσκολα να τις αντιστοιχίσουμε απευθείας σε μια συνάρτηση κόστους. Αντί του πλήθους αυτού μπορούμε να ορίσουμε το διάνυσμα  $X$  ως το πλήθος κάποιων κριτηρίων αξιολόγησης που σχετίζονται με την επίδοση, την απόδοση και την ποιότητα ισχύος του κινητήρα και τα οποία εξαρτώνται από τις μεταβλητές εισόδου.

Η μέθοδος των βαρών συνίσταται στη στάθμιση των κριτηρίων βελτιστοποίησης  $X$ , μέσω κάποιων προεπιλεγμένων συντελεστών βαρύτητας  $W$ . Η συνάρτηση κόστους τότε μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$\min (Z) = \sum_{i=1}^n W_i \cdot f_i(x)$$

όπου:  $w_i$  οι συντελεστές βαρύτητας, οι οποίοι δηλώνουν τη σημασία των επί μέρους κριτηρίων

$f_i(x)$  οι αντικειμενικές συναρτήσεις των επί μέρους κριτηρίων, εκφρασμένες σε ποσοστό επί τοις εκατό.

Για τους συντελεστές βαρύτητας θα πρέπει να ικανοποιείται ο περιορισμός:

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1$$

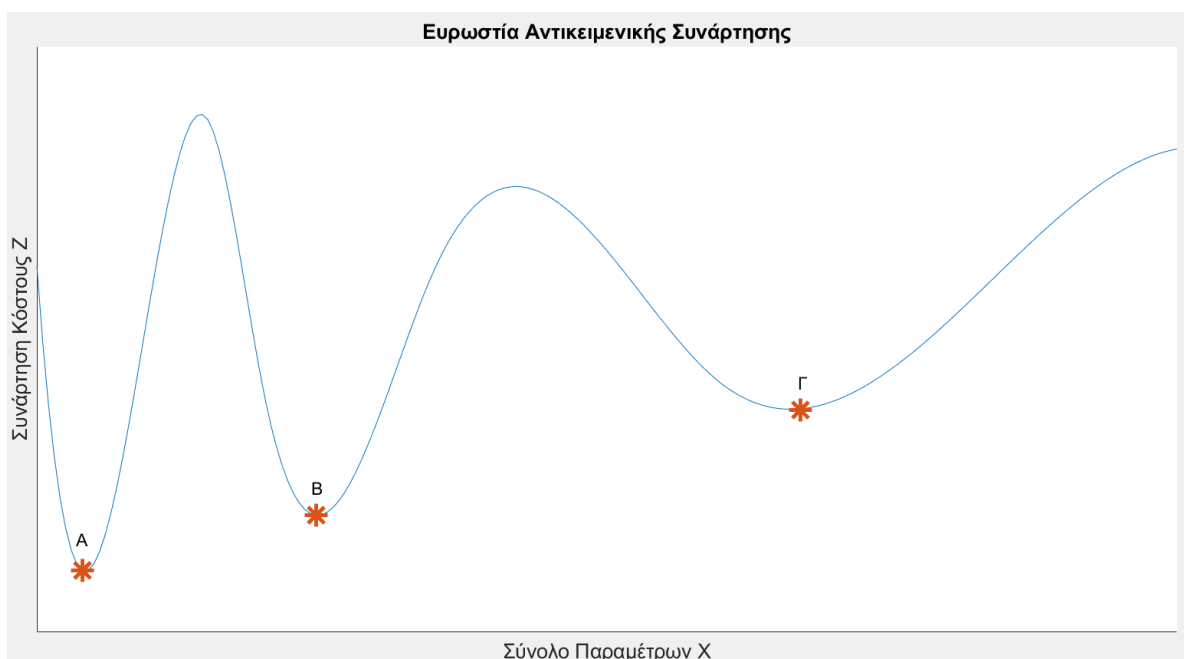
## 2.8 Εύρωστος Σχεδιασμός (Robust Design)

Κατά καιρούς έχουν διατυπωθεί διάφοροι ορισμοί για την ευρωστία. Ο Taguchi, πρωτοπόρος στον εύρωστο σχεδιασμό, όρισε την ευρωστία ως «την κατάσταση, στην οποία η τεχνολογία, το προϊόν ή η διαδικασία είναι κατ'ελάχιστον ευαίσθητα σε παράγοντες που προκαλούν διακύμανση (είτε κατά την κατασκευαστική διαδικασία, είτε κατά τη χρήση), και γήρανση, με το ελάχιστο ανά μονάδα κατασκευαστικό κόστος». [24]

### 2.8.1 Εύρωστία Της Συνάρτησης Κόστους

Η ιδέα του εύρωστου σχεδιασμού παρουσιάζεται στο διάγραμμα 2.14. Ενώ η συνάρτηση κόστους έχει ολικό ελάχιστο στο σημείο A, παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία σε μεταβολές των παραμέτρων  $X$ . Το σημείο B είναι τοπικό ελάχιστο, όμως παρουσιάζει μικρότερη ευαισθησία σε μεταβολές των παραμέτρων  $X$ . Τέλος, το σημείο Γ είναι το μέγιστο μεταξύ των τοπικών ελαχίστων, παρουσιάζει, όμως, τη μικρότερη ευαισθησία.

Διάγραμμα 2. 14 Ευρωστία αντικειμενικής συνάρτησης

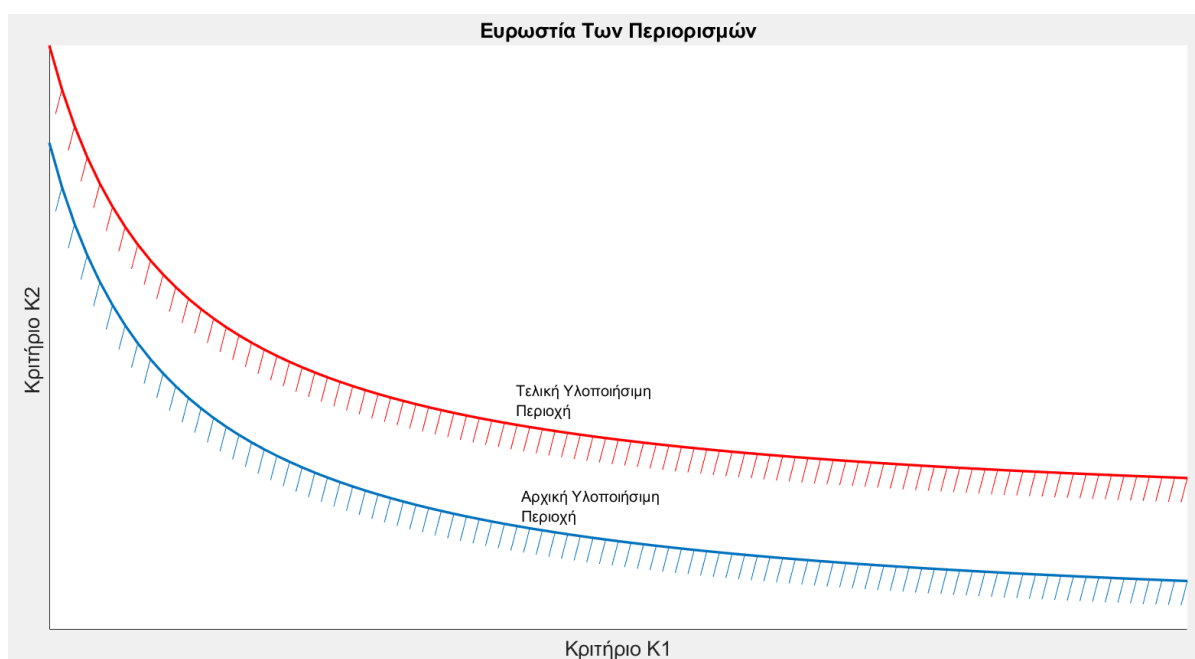


## 2.8.2 Εύρωστία Των Περιορισμών (Robustness Of Constrains)

Με τον όρο ευρωστία των περιορισμών εννοούμε, ότι οι παράμετροι σχεδίασης  $X$  ορίζονται ώστε να ικανοποιούν τους περιορισμούς παρά τις όποιες διακυμάνσεις ενδέχεται να προκύψουν.

Το παραπάνω ισοδυναμεί με μία μείωση της υλοποιήσιμης περιοχής των περιορισμών και αποτυπώνεται οπτικά στο διάγραμμα 2.15.

Διάγραμμα 2. 15 Μεταβολή υλοποιήσιμης περιοχής για λόγους ευρωστίας





## Κεφάλαιο 3

### Αρχική Σχεδίαση

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αρχικής μελέτης, καταγράφονται οι τρέχουσες εκτιμήσεις των χαρακτηριστικών του οχήματος και προσδιορίζονται τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του κινητήρα. Στη συνέχεια, γίνεται ανάλυση των επιπτώσεων διαφόρων κατασκευαστικών χαρακτηριστικών στη λειτουργία του κινητήρα. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στα επιμέρους χαρακτηριστικά, ώστε η μελέτη και η τελική κατασκευή να έχουν τη μικρότερη δυνατή απόκλιση. Τέλος, προτείνονται τροποποιήσεις, με γνώμονα την ευρωστία του σχεδιασμού, την ανταπόκριση του κινητήρα στις νέες απαιτήσεις, την επίτευξη κατασκευαστικής απλότητας και την πρόβλεψη πιθανών σφαλμάτων.

### 3.1 Η Αρχική Μηχανή

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζεται, συνοπτικά, ο τρόπος επιλογής της αρχικής μηχανής και τα αποτελέσματα που προέκυψαν. [1]

#### 3.1.1 Τρόπος Επιλογής Αρχικής Μηχανής

Αρχικά, αποφασίστηκε ότι, λόγω της εφαρμογής, η καλύτερη επιλογή είναι οι επιφανειακοί μαγνήτες και το κατανεμημένο τύλιγμα μονής στρώσης, με παράλληλη συνδεσμολογία τυλιγμάτων ανά πόλο. Έπειτα, έγιναν κάποιες υποθέσεις για τα χαρακτηριστικά του οχήματος και καθορίστηκαν οι απαιτήσεις της ονομαστικής λειτουργίας και η απαίτηση για μέγιστη ροπή, όπως φαίνονται στον πίνακα 3.1.

*Πίνακας 3. 1 Απαιτήσεις κινητήρα σύμφωνα με την αρχική μελέτη*

<b>Ονομαστική Ροπή</b>	<b>10Nm</b>
<b>Μέγιστη Ροπή</b>	<b>50Nm</b>
<b>Ονομαστική Ταχύτητα Περιστροφής</b>	<b>450RPM</b>

Μέσα από σύγκριση διαφόρων γεωμετριών, έγινε επιλογή με κριτήρια την ελαχιστοποίηση της μάζας και τη μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης. Τέλος, η επιλεγμένη μηχανή πέρασε από μια διαδικασία βελτιστοποίησης της μικρογεωμετρίας.

### 3.1.2 Στοιχεία Αρχικής Μηχανής

Τα πλήρη στοιχεία της αρχικής μηχανής παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2.

*Πίνακας 3. 2 Πλήρη στοιχεία αρχικής μηχανής*

<b>Αριθμός Αυλάκων</b>	<b>48</b>
<b>Αριθμός Πόλων</b>	<b>8</b>
<b>Αύλακες ανά πόλο και φάση</b>	<b>2</b>
<b>Ενεργό Μήκος</b>	<b>50mm</b>
<b>Διάμετρος Διακένου</b>	<b>132mm</b>
<b>Πάχος Διακένου</b>	<b>0.7mm</b>
<b>Διάμετρος Στάτη</b>	<b>200mm</b>
<b>Ενεργά εν σειρά ελίγματα ανά αύλακα</b>	<b>36</b>
<b>Συντελεστής Πληρότητας</b>	<b>42%</b>
<b>Μάζα Μηχανής</b>	<b>13.06Kg</b>
<b>Ονομαστική Ροπή</b>	<b>10Nm</b>
<b>Ονομαστική Ταχύτητα</b>	<b>450RPM</b>
<b>Ονομαστικό Ρεύμα</b>	<b>2.34A ή 1.6A/mm<sup>2</sup></b>
<b>Ονομαστικός Βαθμός Απόδοσης</b>	<b>92.69%</b>
<b>Κυμάτωση Ροπής</b>	<b>6.57%</b>
<b>Μέγιστη Ροπή</b>	<b>68Nm</b>
<b>Ρεύμα για Μέγιστη Ροπή</b>	<b>7.6A ή 12A/mm<sup>2</sup></b>

### 3.2 Επικαιροποίηση Μελέτης

Αρχικά, για τον καθορισμό των απαιτήσεων της μηχανής, σε ροπή και στροφές, έγιναν κάποιες υποθέσεις των χαρακτηριστικών του οχήματος. Αυτές στηρίχτηκαν είτε στις προδιαγραφές του διαγωνισμού, είτε σε τυπικές τιμές του κάθε χαρακτηριστικού. Έκτοτε, ο σχεδιασμός του οχήματος έχει προχωρήσει αρκετά και μπορούμε να έχουμε ακριβέστερες εκτιμήσεις αυτών των χαρακτηριστικών. Οι αλλαγές αυτές φαίνονται στον πίνακα 3.3.

Η μεθοδολογία υπολογισμού ροπών τροποποιήθηκε, ώστε να συμπεριλάβει την επίδραση των στρεφόμενων μαζών στην επιτάχυνση του οχήματος.

Επίσης, μετά από επικοινωνία με εταιρεία κατασκευής μαγνητών, προσδιορίστηκαν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα χαρακτηριστικά των μαγνητών.

Πίνακας 3. 3 Επικαιροποίηση χαρακτηριστικών οχήματος

Κατασκευαστικό Χαρακτηριστικό	Αρχική Υπόθεση	Τρέχουσα Εκτίμηση
Μάζα οχήματος χωρίς τον οδηγό	140Kg	120Kg (ως χειρότερη περίπτωση)
Διάμετρος ζάντας με ελαστικό	0.4191 m	0.55m
Ονομαστική Ταχύτητα Οχήματος	35Km/h	30Km/h
Χρόνος Επιτάχυνσης σε ευθεία	30sec	25sec
Χρόνος Επιτάχυνσης σε ανηφόρα	60sec	50sec
Τεχνική Ελέγχου Αντιστροφέα	SPWM	SVM
Μαγνήτες	N42	N50

Ακόμα, μελετήθηκε λεπτομερώς η κίνηση του οχήματος και προσδιορίστηκε με μεγαλύτερη ακρίβεια η ονομαστική ταχύτητα του οχήματος. Ο τρόπος παρουσιάζεται στη συνέχεια, στην [ενότητα 4.5 \(ενεργειακή αξιολόγηση σε ένα γύρο πίστας\)](#).

Τέλος, πριν κατασκευαστεί η μηχανή, κρίνεται απαραίτητη μια μελέτη ευρωστίας του σχεδιασμού της μηχανής. Συγκεκριμένα, θα μελετηθεί η συμπεριφορά της μηχανής σε διάφορες περιπτώσεις απομαγνήτισης.

### 3.3 Καθορισμός Απαιτήσεων Ροπής Στους Τροχούς

#### 3.3.1 Επίδραση Στρεφόμενης Μάζας Στην Επιτάχυνση Του Οχήματος

Οι στρεφόμενες μάζες θεωρούνται το κρισιμότερο σημείο στο σχεδιασμό των οχημάτων. Για να κατανοήσουμε την κρισιμότητα των στρεφόμενων μαζών, αρκεί να σκεφτούμε ότι κατά την επιτάχυνση, η συνολική μάζα του οχήματος αποθηκεύει ενέργεια, λόγω μεταφορικής κίνησης, αλλά η μάζα των στρεφόμενων μερών αποθηκεύει επιπλέον ενέργεια, λόγω περιστροφικής κίνησης. [27]

Συγκεκριμένα, η ενέργεια που έχει αποθηκευμένη μια στρεφόμενη μάζα που κινείται με το όχημα είναι:

$$E = \frac{1}{2} m u^2 + \frac{1}{2} I \omega_{μάζας}^2$$

όπου:  $m$  η μάζα σε Kg

$u$  η μεταφορική ταχύτητα του οχήματος σε m/s

$I$  η ροπή αδράνειας της μάζας σε Kg m<sup>2</sup>

$\omega$  μάζας η γωνιακή ταχύτητα της μάζας σε 1/s

Η γωνιακή ταχύτητα της μάζας και η γωνιακή ταχύτητα του τροχού συνδέονται με μία σχέση μετάδοσης  $n$ .

$$n = \frac{\omega_{μάζας}}{\omega_{\text{τροχού}}}$$

Αν θεωρήσουμε ότι ο τροχός κυλά χωρίς ολίσθηση, η γραμμική και η γωνιακή ταχύτητα συνδέονται με τη σχέση:

$$u = \omega_{\text{τροχού}} \cdot R_{\text{τροχού}} = \frac{\omega_{μάζας}}{n} R_{\text{τροχού}}$$

$$\omega_{μάζας} = \frac{n \cdot u}{R_{\text{τροχού}}}$$

Επομένως, η συνολική κινητική ενέργεια μπορεί να εκφραστεί ως:

$$E = \frac{1}{2} m u^2 + \frac{1}{2} \frac{I \cdot n^2}{R_{\text{τροχού}}^2} u^2$$

$$E = \frac{1}{2} \left( m + \frac{I \cdot n^2}{R_{\text{τροχού}}^2} \right) u^2$$

$$E = \frac{1}{2} (m + m_{\text{λόγω περιστροφής}}) u^2$$

Όπου  $m_{\text{λόγω περιστροφής}} = \frac{I \cdot n^2}{R_{\text{τροχού}}^2}$

Ως συμπέρασμα από τα παραπάνω, μπορούμε να απλοποιήσουμε τη μελέτη επιτάχυνσης του οχήματος, αρκεί να προσθέσουμε μια μάζα, η οποία θα αποθηκεύει τόση ενέργεια, όση θα αποθήκευαν τα στρεφόμενα μέρη.

### 3.3.2 Υπολογισμός Ισοδύναμης Μάζας Οχήματος

Τα κύρια στρεφόμενα μέρη του οχήματος είναι τα ελαστικά, οι ζάντες, τα δισκόφρενα και ο δρομέας του κινητήρα.

Η ροπή αδράνειας του δρομέα προσεγγίζεται από τον τύπο:

$$I_{\text{δρομέα}} \approx \frac{1}{2} m(R^2 + r^2) = 0.0393 \text{ Kg m}^2$$

όπου:  $R \approx 132\text{mm}$  η εξωτερική ακτίνα του δρομέα  
 $r \approx 21\text{mm}$  η εσωτερική ακτίνα του δρομέα  
 $m \approx 4.4\text{Kg}$  η μάζα του δρομέα

Λαμβάνοντας υπόψιν, ότι ο λόγος μετάδοσης κίνησης μεταξύ κινητήρα τροχού είναι 1:1 ( $n=1$ ), η επιπλέον στρεφόμενη μάζα, λόγω περιστροφής του δρομέα είναι:

$$m_{\text{δρομέα λόγω περιστροφής}} = \frac{I_{\text{δρομέα}} \cdot n^2}{R_{\text{τροχού}}^2} \approx 0.5\text{Kg}$$

Για τα λοιπά στρεφόμενα μέρη ο υπολογισμός θα γίνει βάση τυπικών συντελεστών, αφού τα χαρακτηριστικά δεν είναι πλήρως ορισμένα.

Ο υπολογισμός φαίνεται στον πίνακα 3.4.

Πίνακας 3. 4 Πρόσθετες μάζες λόγω ροπής αδράνειας

	Εκτιμώμενη Μάζα (Kg)	Συντελεστής	Πρόσθετη Μάζα (Kg)
Ελαστικά	5.6	1	5.6
Ζάντες	12	0.6	7.2
Δισκόπλακες	10	0.2	2

Προφανώς, για τα ελαστικά, τις ζάντες και τις δισκόπλακες ισχύει ότι  $n=1$ .

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η τρέχουσα εκτίμηση για τη μάζα του οχήματος 120Kg και τη μάζα του οδηγού 70Kg, η ισοδύναμη μάζα οχήματος υπολογίζεται  $M \approx 205\text{Kg}$ .

### 3.3.3 Υπολογισμός Χαρακτηριστικών Κινητήρα

Σε αυτό το σημείο ακολουθείται η μεθοδολογία που περιγράφεται στην αρχική μελέτη [1], με μοναδική διαφοροποίηση τον υπολογισμό ισοδύναμης μάζας κατά την επιτάχυνση του οχήματος.

Για την αποφυγή επαναλήψεων θα αναφερθεί μόνο η τελική εξίσωση, με την τροποποίηση που προτάθηκε.

$$T_{κιν} = [(m_{οχήματος} + m_{οδηγού})g(\sin\theta + \mu\cos\theta) + Ma + \frac{1}{2}C_d\rho Au^2] \cdot R_{τροχού}$$

Όπου:

$m_{οχήματος} = 120\text{Kg}$  η μάζα του οχήματος

$m_{οδηγού} = 70\text{Kg}$  η μάζα του οδηγού

$g = 9.806 \text{ m/s}^2$  η επιτάχυνση λόγω βαρύτητας

$\theta$  η γωνία κλίσης του δρόμου

$\mu = 0.012$  ή  $0.015$  ο συντελεστής τριβής κύλισης, για πορεία και εκκίνηση αντίστοιχα

$M = 205\text{Kg}$  η ισοδύναμη μάζα του οχήματος κατά την επιτάχυνση

$a$  η επιτάχυνση του οχήματος σε  $\text{m/s}^2$

$C_d = 0.3$  ο αεροδυναμικός συντελεστής του οχήματος

$\rho = 1.225\text{Kg/m}^3$  η πυκνότητα του αέρα

$A = 1.25\text{m}^2$  η μετωπική επιφάνεια του οχήματος

$u$  η ταχύτητα του οχήματος σε  $\text{m/s}$

$R_{τροχού} = 0.275\text{m}$  η ακτίνα του τροχού του οχήματος

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 3.5.

Πίνακας 3. 5 Υπολογισμός απαιτήσεων κινητήρα

Λειτουργικό Χαρακτηριστικό	Αρχική Υπόθεση	Τρέχουσα Εκτίμηση
<b>Ονομαστική Ταχύτητα οχήματος</b>	35Km/h	30Km/h
<b>Ονομαστικές Στροφές Κινητήρα</b>	450RPM	300RPM
<b>Ονομαστική ροπή (ονομαστική ταχύτητα σε ευθεία)</b>	10Nm	11Nm
<b>Ονομαστική Ισχύς</b>	471W	350W
<b>Ροπή για εκκίνηση σε ευθεία</b>	21Nm	27Nm
<b>Ροπή για πορεία σε ανηφόρα κλίσης 5%</b>	31Nm	38Nm
<b>Ροπή για εκκίνηση σε ανηφόρα κλίσης 5%</b>	34Nm	43Nm

## 3.4 Επανεξέταση Τυλίγματος

### 3.4.1 Τοποθέτηση Πηνίων Σε Σειρά

Η αρχική σχεδίαση προέβλεπε 4 παράλληλα τυλίγματα ανά φάση. Η παραλληλία των τυλιγμάτων τα καθιστά ευαίσθητα σε κατασκευαστικές ατέλειες, όπως για παράδειγμα το φαινόμενο γειτνίασης, η εκκεντρότητα του δρομέα και η τοπική απομαγνήτιση. Κάτι τέτοιο έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται ρεύματα μεταξύ των παράλληλων κλάδων και τελικά να αυξάνονται οι απώλειες χαλκού.

Η εν σειρά συνδεσμολογία, αντιθέτως, δεν αντιμετωπίζει αυτό το πρόβλημα και γι' αυτό πλεονεκτεί, ειδικά σε εφαρμογές που ο κινητήρας οδηγείται από ηλεκτρικούς μετατροπείς.

Με τα παραπάνω δεδομένα, θεωρήθηκε σκόπιμο το τύλιγμα να τοποθετηθεί εν σειρά. Παίρνοντας αυτήν την απόφαση, χρειάζεται να γίνουν κάποιες επιπλέον τροποποιήσεις.

Σύμφωνα με την αρχική μελέτη, το τύλιγμα κάθε φάσης είχε 36 ενεργά ελίγματα ανά αυλάκι και πόλο, και 2 αυλάκια ανά πόλο και φάση. Επομένως, είχε 72 ενεργά εν σειρά ελίγματα ανά φάση.

Η παραγόμενη ΑΗΕΔ στο τύλιγμα είναι ανάλογη των ενεργών εν σειρά ελιγμάτων και της ταχύτητας και θέλουμε να παραμείνει σταθερή. Τα νέα εν σειρά ελίγματα ανά φάση υπολογίζονται ως εξής:

$$\text{Νέα εν σειρά Ελίγματα ανά φάση} = \frac{72 * 450}{300} \approx 108$$

Με αυτή τη συνδεσμολογία, το τύλιγμα διέρχεται από 2 αυλάκια/πόλο, οπότε τα ενεργά εν σειρά ελίγματα σε κάθε αύλακα  $N_s$  είναι:

$$N_s = \frac{108 \text{ ενεργά εν σειρά ελίγματα}}{4 \text{ πόλοι} * 2 \text{ αυλάκια/πόλο}} \approx 13$$

Αυτή η τιμή είναι η αρχική τιμή της μελέτης και ενδέχεται να τροποποιηθεί ανάλογα με τα αποτελέσματα και τα κριτήρια που θα τεθούν στη συνέχεια. Σε κάθε περίπτωση, όμως, η αρχική και η τελική τιμή δε θα απέχουν πολύ.

Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι, μια μικρή αύξηση της τάσης είναι επιτρεπτή, διότι η αρχική μελέτη είχε υποθέσει τεχνική ελέγχου SPWM, ενώ τελικά η τεχνική ελέγχου θα είναι η SVM, η οποία επιτρέπει μια αύξηση 15% στην τάση, σε σχέση με την τεχνική SPWM.

### 3.4.2 Αύξηση Συντελεστή Πληρότητας

Η ποσότητα του χαλκού σε κάθε αυλάκι, επηρεάζει τη λειτουργία της μηχανής, σύμφωνα με τον παρακάτω συλλογισμό:

Θεωρώντας σταθερά αμπερελίγματα σε κάθε αυλάκι, αυξάνουμε το συντελεστή πληρότητας. Πλέον, η ίδια ποσότητα ρεύματος διέρχεται από έναν αγωγό μεγαλύτερης διατομής. Αυτό οδηγεί σε μειωμένες απώλειες χαλκού, σύμφωνα με τους τύπους:

$$P_{cu} = I^2 R$$
$$R = \rho_{\theta} \frac{L}{S}$$

όπου:  $P_{cu}$  οι απώλειες χαλκού  
 $L$  το μήκος του  
 $S$  η διατομή του

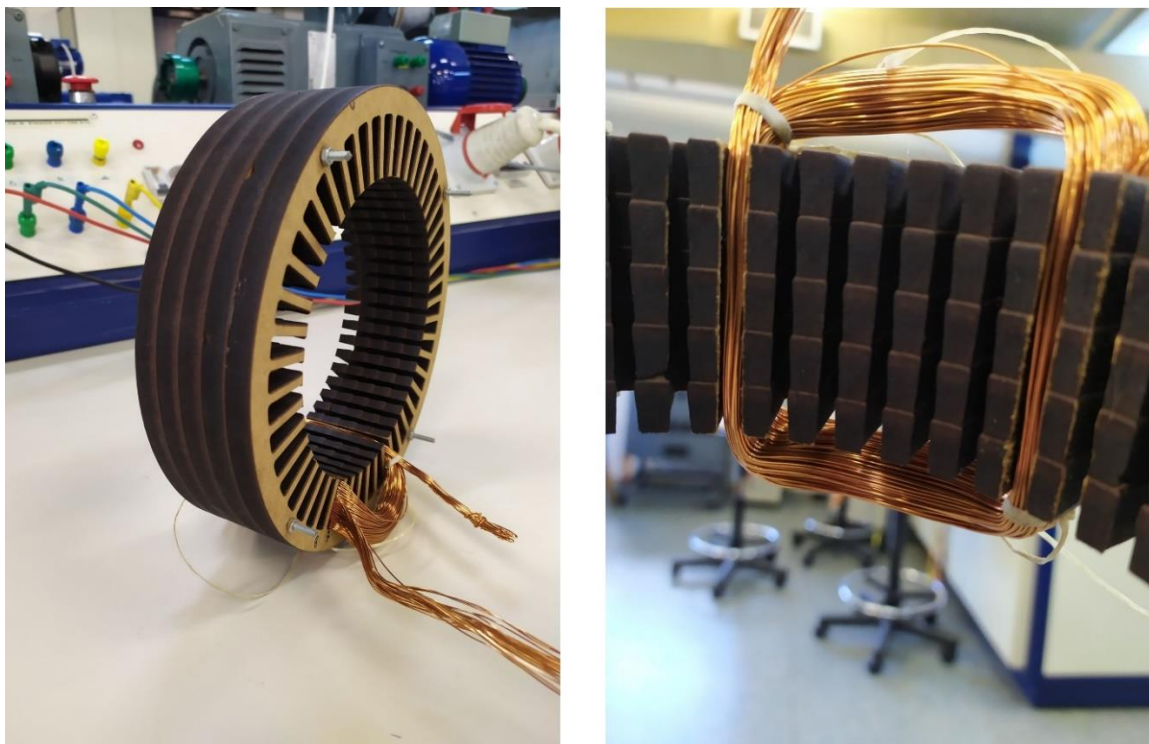
Ο εκ των προτέρων υπολογισμός του συντελεστή πληρότητας, έχει μεγάλα περιθώρια σφάλματος, καθώς εξαρτάται από τη γεωμετρία της αύλακος, τη γεωμετρία του αγωγού, τα χαρακτηριστικά των μονωτικών υλικών και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του χαλκού. Συνήθως, ο συντελεστής πληρότητας κυμαίνεται μεταξύ 40-60%. [17] [28]

Για τη διερεύνηση της ευρωστίας του συντελεστή πληρότητας, κατασκευάστηκε ένα ξύλινο ομοίωμα της μηχανής. Μέσα από δοκιμές, υπολογίστηκε ότι ο συντελεστής πληρότητας αύλακος μπορεί να αυξηθεί έως και στο 60%, με τοποθέτηση προδιαμορφωμένου τυλίγματος, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1.

Για το υπόλοιπο της εργασίας, θα θεωρούμε συντελεστή πληρότητας 50%, όμως είναι σαφές, ότι αντικειμενικός σκοπός της κατασκευής θα πρέπει να είναι η μεγιστοποίηση του συντελεστή. Επίσης, για να τονιστεί η κρισιμότητα του συντελεστή πληρότητας, θα παρουσιαστούν αποτελέσματα και για συντελεστή πληρότητας 60%.



*Εικόνα 3. 1 Τοποθέτηση τυλίγματος σε ομοίωμα του κινητήρα*



### **3.5 Επανεξέταση Μαγνητικού Κυκλώματος**

Παρά το φαινομενικό πλεονέκτημα της αύξησης της ποσότητας χαλκού, εμφανίζεται ένα σημαντικό μειονέκτημα: Η αύξηση της μάζας της μηχανής. Διατηρώντας, όμως, το συμπέρασμα, ότι μπορούμε να πετύχουμε συντελεστή πληρότητας 50%, ακολουθούμε τον παρακάτω συλλογισμό.

#### **3.5.1 Μείωση Μαγνητικού Κυκλώματος-Μείωση Μάζας**

Αυτή τη φορά, αυξάνουμε το συντελεστή πληρότητας, μειώνοντας το εμβαδόν της αύλακας και διατηρώντας σταθερή την ποσότητα του χαλκού. Για τη μείωση του εμβαδού της αύλακας, ουσιαστικά προσθέτουμε σίδηρο στο αυλάκι, αυξάνοντας την απόσταση της αύλακας από την εξωτερική ακτίνα του στάτη.

Πλέον, η ίδια μαγνητική ροή διέρχεται από μεγαλύτερη επιφάνεια στο ζύγωμα του στάτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μη επαρκή αξιοποίηση του σιδήρου, καθώς και αυξημένες απώλειες σιδήρου, λόγω του αυξημένου όγκου.

Στη συνέχεια, μειώνουμε την ποσότητα του σιδήρου, μειώνοντας την εξωτερική ακτίνα του στάτη. Για να διατηρήσουμε σταθερή την επιφάνεια

διέλευσης της μαγνητικής ροής, αρκεί η αρχική απόσταση αύλακος-εξωτερικής ακτίνας στάτη να ισούται με την τελική.

Συνοψίζοντας τις παραπάνω αλλαγές, έχοντας λάβει υπόψιν την εμπειρία που αποκτήθηκε από την πραγματική τοποθέτηση τυλίγματος στο ομοίωμα της μηχανής, έχουν προταθεί αλλαγές, οι οποίες δεν επηρεάζουν το ηλεκτρικό και το μαγνητικό κύκλωμα, μειώνουν, όμως, τη μάζα της μηχανής. Το εμβαδόν χαλκού εντός της αύλακας είναι ίδιο με την αρχική μελέτη.

Ένα ακόμα κέρδος που προκύπτει από αυτήν τη μεταβολή είναι η μείωση του μήκους δοντιών στάτη. Τα δόντια είναι το σημείο στο οποίο εμφανίζονται οι μεγαλύτερες τιμές μαγνητικής επαγωγής, αφού είναι ουσιαστικά η στενωπός της μαγνητικής ροής. Επομένως, εκεί δημιουργείται και το μεγαλύτερο μέρος των απωλειών υστέρησης. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι η μείωση του μήκους των δοντιών συνεπάγεται και μείωση των απωλειών υστέρησης και δινορευμάτων.

### **3.5.2 Μείωση Ροής Σκέδασης Μεταξύ Των Μαγνητών**

Όπως αναφέρθηκε στην [ενότητα 2.5.1.1 \(επιφανειακοί μαγνήτες\)](#), οι κινητήρες επιφανειακών μαγνητών εμφανίζουν υψηλή πυκνότητα ισχύος, λόγω της μειωμένης σκέδασης μεταξύ των μονίμων μαγνητών. Για να εκμεταλλευτούμε ακόμα καλύτερα αυτό το πλεονέκτημα, αλλά και να μειώσουμε ελαφρώς τη μάζα της μηχανής, μπορούμε να αφαιρέσουμε σίδηρο μεταξύ των μαγνητών, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1. Σε κάθε περίπτωση, μια τέτοια επέμβαση στο μαγνητικό κύκλωμα δεν πρέπει να είναι έντονη, γιατί στενεύει το δρόμο της μαγνητικής ροής στο δρομέα και αυξάνει την κυμάτωση ροπής.

### **3.5.3 Μηχανική Σύνδεση Μεταξύ Άξονα Και Δρομέα**

Για τη σύνδεση του άξονα πάνω στο δρομέα εξετάστηκαν δύο μέθοδοι.

Η πρώτη μέθοδος είναι η συστολή του άξονα, μέσω ψύξης, και η τοποθέτησή του εντός του δρομέα.. Καθώς ο άξονας θα επιστρέφει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, θα διασταλεί και θα σφηνώσει εντός του δρομέα.

Αυτή η μέθοδος είναι απλή κατασκευαστικά, ενέχει όμως έναν κίνδυνο. Όταν ο άξονας επιστρέφει σε φυσικές διαστάσεις, θα πρέπει να πιέζει επαρκώς το δρομέα, ώστε να μην υπάρχει σχετική κίνηση, αλλά ταυτόχρονα να μην ασκεί μεγάλη πίεση, για να μην «τσαλακωθεί» η μαγνητική λαμαρίνα του δρομέα.

Η δεύτερη μέθοδος είναι η διαμόρφωση του δρομέα με σφηνόδρομο, ώστε να εξασφαλιστεί η σχετική ακινησία δρομέα-άξονα. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει

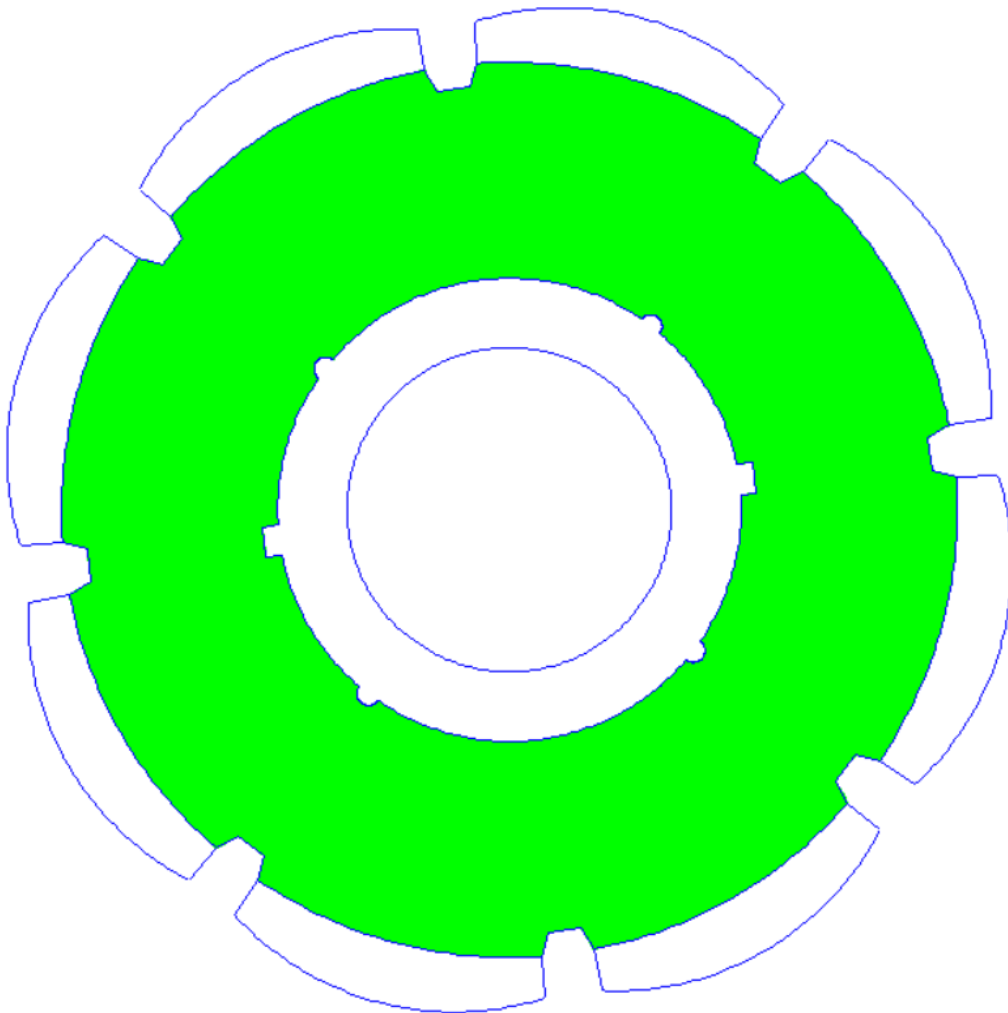
μεγαλύτερη κατασκευαστική πολυπλοκότητα, δεν εμφανίζει όμως κάποιον άλλον κατασκευαστικό κίνδυνο.

Τελικά αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν σφηνόδρομοι και προτείνονται 2 εναλλακτικές λύσεις:

1. 4 συμμετρικά τοποθετημένοι κυκλικοί σφηνόδρομοι ακτίνας 1.5mm
2. 2 αντιδιαμετρικά τοποθετημένοι τετραγωνικοί σφηνόδρομοι πλευράς 4mm

Οι τρόποι σύνδεσης φαίνονται επίσης στο σχήμα 3.1.

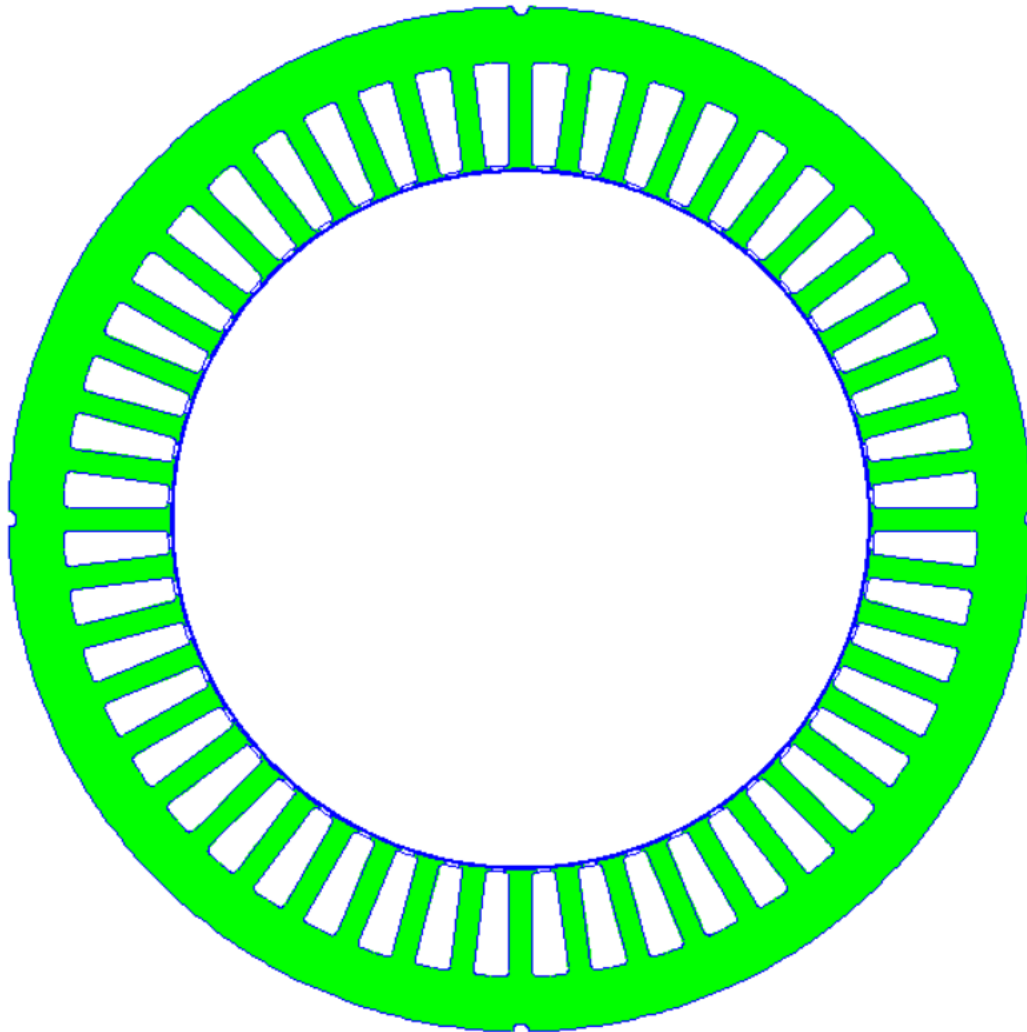
*Σχήμα 3. 1 Αναπαράσταση δρομέα μηχανής*



### 3.5.4 Μηχανική Ένωση Μεταξύ Στάτη Και Κελύφους

Για τη στερέωση της μηχανής εντός του κελύφους της, έχουν σχεδιαστεί 4 ραβδώσεις-εσοχές στην εξωτερική επιφάνεια του στάτη. Οι ραβδώσεις-εσοχές είναι ημικυκλικές με ακτίνα 1.5mm. Η διαμόρφωση που προκύπτει φαίνεται στο σχήμα 3.2.

*Σχήμα 3. 2 Αναπαράσταση στάτη μηχανής*



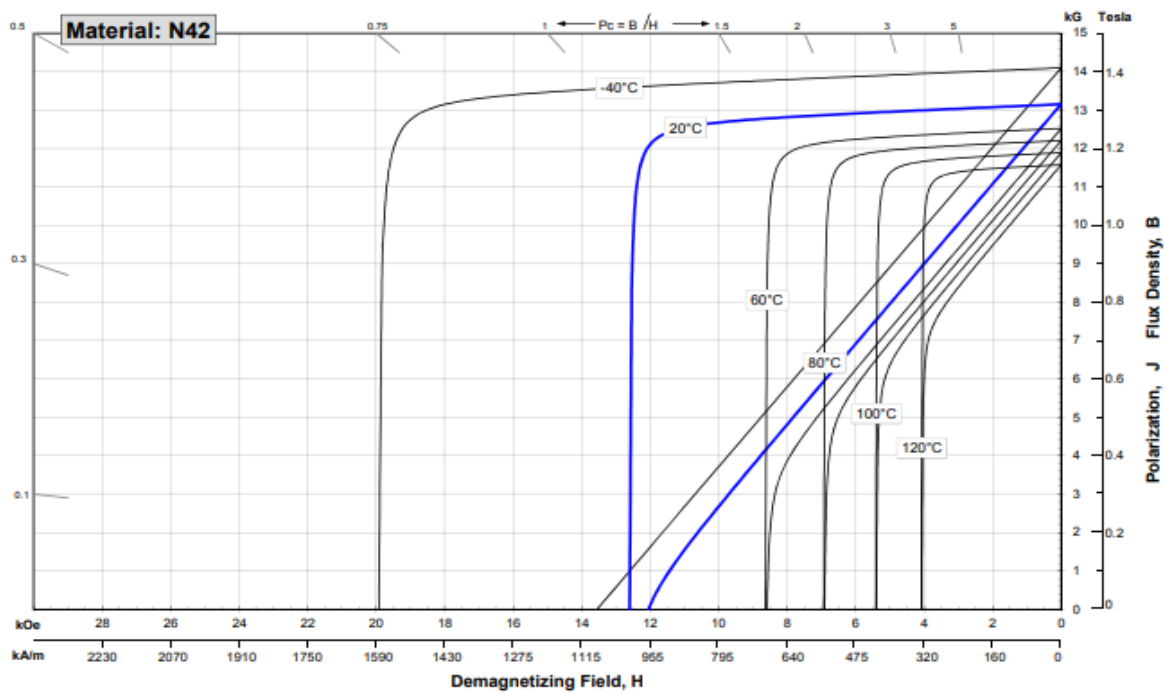
### 3.6 Εξέταση Μονίμων Μαγνητών

Στην αρχική σχεδίαση έχουν επιλεγεί μαγνήτες νεοδυμίου (sintered), τύπου N42. Η καμπύλη απομαγνήτισης τους φαίνεται στο διάγραμμα 3.1.

Τελικά, αποφασίστηκε η χρήση των μαγνητών N50, οι οποίοι εμφανίζουν καλύτερα μαγνητικά χαρακτηριστικά και για τους οποίους η κατασκευάστρια

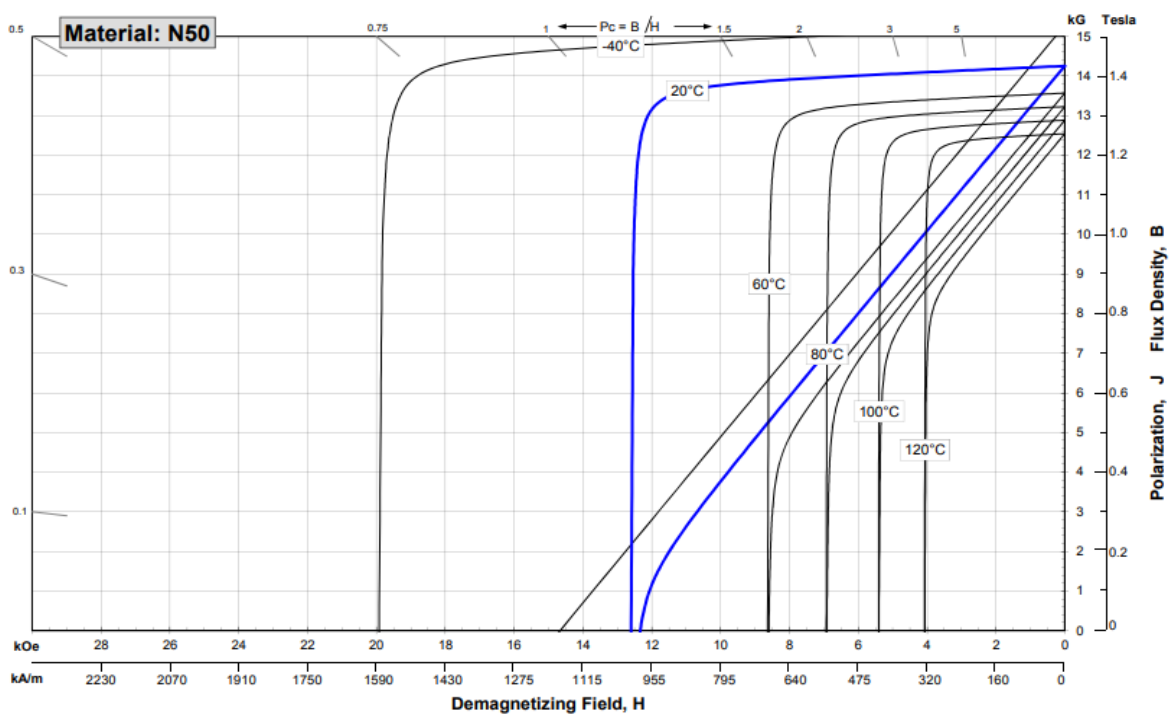
εταιρεία έδωσε τα στοιχεία του πίνακα 3.6. Μια τυπική καμπύλη απομαγνήτισης φαίνεται στο διάγραμμα 3.2.

Διάγραμμα 3. 1 Καμπύλες Απομαγνήτισης N42



Πηγή: <https://www.arnoldmagnetics.com/>

Διάγραμμα 3. 2 Καμπύλες Απομαγνήτισης N50



Πηγή: <https://www.arnoldmagnetics.com/>

*Πίνακας 3. 6 Στοιχεία Κατασκευάστριας Εταιρείας Για Μαγνήτες N50*

<b>Θερμοκρασία <math>T_w</math></b>	<b>80°C</b>
<b>Παραμένουσα Μαγνήτιση <math>B_r</math></b>	<b>1.17-1.21T</b>
<b>Συνεχούσα Δύναμη <math>H_{cb}</math></b>	<b>868KA/m</b>
<b>Συνεχούσα Δύναμη <math>H_{cj}</math></b>	<b>955KA/m</b>

Όπου:  $H_{cb}$  είναι το πεδίο το οποίο μηδενίζει τη μαγνητική επαγωγή και  $H_{cj}$  είναι το πεδίο, για το οποίο υπάρχει πλήρης αποπροσανατολισμός των κρυσταλλικών δομών.

Όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι μαγνήτες NdFeB είναι αρκετά ευαίσθητοι στην αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης, κατά την τοποθέτηση των μαγνητών στο στάτη ελλοχεύει ένας κίνδυνος. Επειδή οι μαγνήτες είναι επιφανειακοί, είναι δύσκολο να τοποθετηθούν ακριβώς στην κατάλληλη θέση. Γι' αυτό το λόγο κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια ανάλυση ευαισθησίας ως προς τη θερμοκρασία μαγνήτη και την ακρίβεια τοποθέτησης.

Η ανάλυση ευαισθησίας θα πραγματοποιηθεί και για εναλλακτικό μαγνήτη SmCo, ο οποίος γνωρίζουμε ότι είναι ανθεκτικότερος στην απομαγνήτιση.

Εν τέλει θα γίνει σύγκριση των 2 ειδών μαγνητών. Η επιλογή του κατάλληλου υλικού γίνεται με κριτήρια ευρωστίας, δηλαδή επιλέγεται αυτός που αποδίδει καλύτερα υπό τις πιο αντίξοες συνθήκες.

Σύμφωνα με εταιρίες κατασκευής, μια ποιοτική λύση μαγνήτη SmCo είναι ο SmCo<sub>32</sub> (2:17). Ο αριθμός 32 σχετίζεται με την ενεργειακή πυκνότητα, ενώ ο λόγος 2:17 δείχνει την αναλογία των βασικών στοιχείων του κράματος. Τα χαρακτηριστικά φαίνονται στον πίνακα 3.7.

*Πίνακας 3. 7 Στοιχεία SmCo<sub>32</sub> (2:17)*

<b>Θερμοκρασία</b>	<b>20°C</b>
<b>Παραμένουσα Μαγνήτιση <math>B_r</math></b>	<b>1.12-1.15T</b>
<b>Συνεχούσα Δύναμη <math>H_{cb}</math></b>	<b>712KA/m</b>
<b>Συνεχούσα Δύναμη <math>H_{cj}</math></b>	<b>1200KA/m</b>
<b>Μέγιστη Θερμοκρασία</b>	<b>300°C</b>
<b>Μείωση Παραμένουσας Μαγνήτισης Λόγω Θερμοκρασίας</b>	<b>0.03% / °C</b>

### 3.7 Σύνοψη

Σε αυτό το κεφάλαιο προτάθηκαν κάποιες αλλαγές στο μαγνητικό και το ηλεκτρικό κύκλωμα και εντοπίστηκαν τα σημεία πάνω στα οποία θα επικεντρωθεί η έρευνα.

Ειδικά, σύμφωνα με την ενότητα 3.5.1 (μείωση μαγνητικού κυκλώματος-μείωση μάζας) προτείνονται οι εξής δύο διαμορφώσεις προς διερεύνηση:

1. Η διάμετρος του στάτη μειώνεται από 200mm σε 195mm, το εμβαδόν αύλακος μειώνεται από 133.236mm<sup>2</sup> σε 121.219mm<sup>2</sup>, ενώ το εμβαδόν χαλκού/αύλακα παρέμεινε πρακτικά σταθερό  $\approx 56\text{mm}^2/\text{αύλακα}$ . Η μάζα της μηχανής εκτιμάται ότι θα μειωθεί περίπου 1Kg.
2. Η διάμετρος του στάτη μειώνεται από 200mm σε 190mm, το εμβαδόν αύλακος μειώνεται από 133.236mm<sup>2</sup> σε 99.4457mm<sup>2</sup>, ενώ το εμβαδόν χαλκού/αύλακα μειώνεται σε  $\approx 50\text{mm}^2/\text{αύλακα}$ . Η μάζα της μηχανής εκτιμάται ότι θα μειωθεί περίπου 2Kg.

Στο εξής, οι δύο διαμορφώσεις θα αναφέρονται με την εξωτερική διάμετρο του στάτη, δηλαδή «διαμόρφωση διαμέτρου στάτη 195mm» και «διαμόρφωση διαμέτρου στάτη 190mm».

## **Κεφάλαιο 4**

### **Σχεδίαση Μηχανής Με Χρήση Λογισμικού Πεπερασμένων Στοιχείων**

#### **4.1 Πεδιακή Ανάλυση Με Τη Μέθοδο Των Πεπερασμένων Στοιχείων**

Το ισοδύναμο κύκλωμα, που θεμελιώθηκε στην [ενότητα 2.6 \(ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα\)](#), δεν είναι παρά μόνο μια προσέγγιση της μηχανής. Ανάλογα με τη ζητούμενη ακρίβεια, μπορούμε να φτιάξουμε είτε πιο απλά, είτε πιο σύνθετα ισοδύναμα κυκλώματα.

Η ακριβής λειτουργία μιας ηλεκτρικής μηχανής μπορεί να προσδιοριστεί μέσω των διαφορικών εξισώσεων, που περιγράφουν το μαγνητικό πρόβλημα. Η επίλυση, όμως, των εξισώσεων αυτών, γίνεται ιδιαίτερα περίπλοκη, όταν το πρόβλημα παρουσιάζει μια σύνθετη γεωμετρία.

Για να ξεπεράσουμε τα παραπάνω προβλήματα χρησιμοποιούμε τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος αυτή χωρίζει το συνολικό πρόβλημα σε μικρές περιοχές, που ονομάζονται στοιχεία (elements), δημιουργώντας ένα πλέγμα (meshing). Το πρόβλημα στην κάθε περιοχή λύνεται ξεχωριστά και η λύση του συνολικού προβλήματος συντίθεται από τις επιμέρους λύσεις. Η επίλυση πρέπει να περάσει από μια επαναληπτική διαδικασία, διότι κάθε αλλαγή σε ένα στοιχείο επηρεάζει τις οριακές συνθήκες διπλανών στοιχείων.

Η επίλυση του προβλήματος θα γίνει με το ελεύθερο λογισμικό FEMM.

#### **4.2 Το Λογισμικό FEMM**

Το λογισμικό FEMM είναι ένα ελεύθερο λογισμικό, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων χαμηλής συχνότητας. Μαζί με το λογισμικό FEMM μπορεί κανείς να βρει και εγχειρίδιο, το οποίο εξηγεί τη λειτουργία του λογισμικού. Εκεί, βρίσκουμε τις παρακάτω πληροφορίες, σχετικά με τον τρόπο, με τον οποίο επιλύει τα προβλήματα. [29]



## 4.2.1 Μαγνητοστατικά Προβλήματα

Μαγνητοστατικά ονομάζουμε τα προβλήματα, στα οποία τα πεδία παραμένουν αμετάβλητα με το χρόνο. Σε αυτήν την περίπτωση θα πρέπει η ένταση μαγνητικού πεδίου ( $H$ ) και η μαγνητική επαγωγή ( $B$ ) να υπακούουν τις εξισώσεις του Maxwell:

$$\nabla \times H = J$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

Ταυτόχρονα, θα πρέπει να ισχύει και η καταστατική εξίσωση κάθε υλικού:

$$B = \mu H$$

Αν το υλικό δεν είναι γραμμικό, η επιτρεπτότητα  $\mu$  εκφράζεται συναρτήσει της μαγνητικής επαγωγής:

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

Το λογισμικό FEMM προσδιορίζει το μαγνητικό πεδίο, που ικανοποιεί τις τρεις παραπάνω εξισώσεις, μέσω του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού  $A$ . Τα  $B$  και  $A$  συνδέονται μέσω της εξίσωσης:

$$B = \nabla \times A$$

Ο ορισμός αυτός, εξακολουθεί να υπακούει στις προηγούμενες σχέσεις, και έτσι προκύπτει ότι:

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

Το πλεονέκτημα, που προκύπτει από τη χρήση του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού  $A$  είναι, ότι περιλαμβάνει όλες τις παραπάνω σχέσεις μέσα σε μία εξίσωση. Προσδιορίζοντας το  $A$ , μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν και τα  $B$  και  $H$ .

## 4.2.2 Οριακές Συνθήκες

Για να εξασφαλιστεί ότι το πρόβλημα έχει μοναδική λύση, πρέπει να προσδιοριστούν κατάλληλες οριακές συνθήκες. Οι συνθήκες αυτές ανήκουν σε μία από τις παρακάτω κατηγορίες:

- **Dirichlet:** Σε αυτού του τύπου τις συνθήκες, ορίζεται εξαρχής μια τιμή δυναμικού  $A$  σε ένα σύνορο. Η πιο κοινή χρήση αυτής της συνθήκης είναι ο ορισμός  $A=0$ , εκεί που δε θέλουμε να περνάει μαγνητική ροή, δηλαδή στις εξωτερικές επιφάνειες της μηχανής.
- **Neuman:** Αυτή η συνθήκη προσδιορίζει το μέτρο της κάθετης παραγώγου του  $A$  σε ένα σύνορο. Στα μαγνητικά προβλήματα η ομογενής συνθήκη Neuman  $\partial A/\partial n=0$ , χρησιμοποιείται στα σύνορα υπερβολικά διαπερατών μετάλλων, αναγκάζοντας τη ροή να διασχίσει κάθετα το σύνορο.
- **Robin:** Είναι μια σύνθεση των παραπάνω, περιγράφοντας μια σχέση μεταξύ του διανυσματικού δυναμικού  $A$  και της κάθετης παραγώγου του.
- **Περιοδικές:** Αυτή η συνθήκη συνδέει δύο σύνορα μεταξύ τους. Τα αντίστοιχα σημεία κάθε συνόρου τίθενται ίσα.
- **Αντιπεριοδικές:** Αυτή η συνθήκη συνδέει δύο σύνορα μεταξύ τους. Τα αντίστοιχα σημεία κάθε συνόρου τίθενται ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς.

## 4.3 Ο Κινητήρας Στο Λογισμικό FEMM

Για να αναλυθεί ο κινητήρας, με το λογισμικό FEMM, πρέπει να σχεδιαστεί η γεωμετρία του, να οριστούν οι οριακές συνθήκες και οι ιδιότητες των υλικών. Ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια μπορούν να καθοριστούν, επίσης, διάφορες παράμετροι, που σχετίζονται με το διαχωρισμό του προβλήματος σε πεπερασμένα στοιχεία. Προφανώς, όσο μεγαλύτερη ακρίβεια ζητάμε, τόσο πιο αργός γίνεται ο υπολογισμός της λύσης.

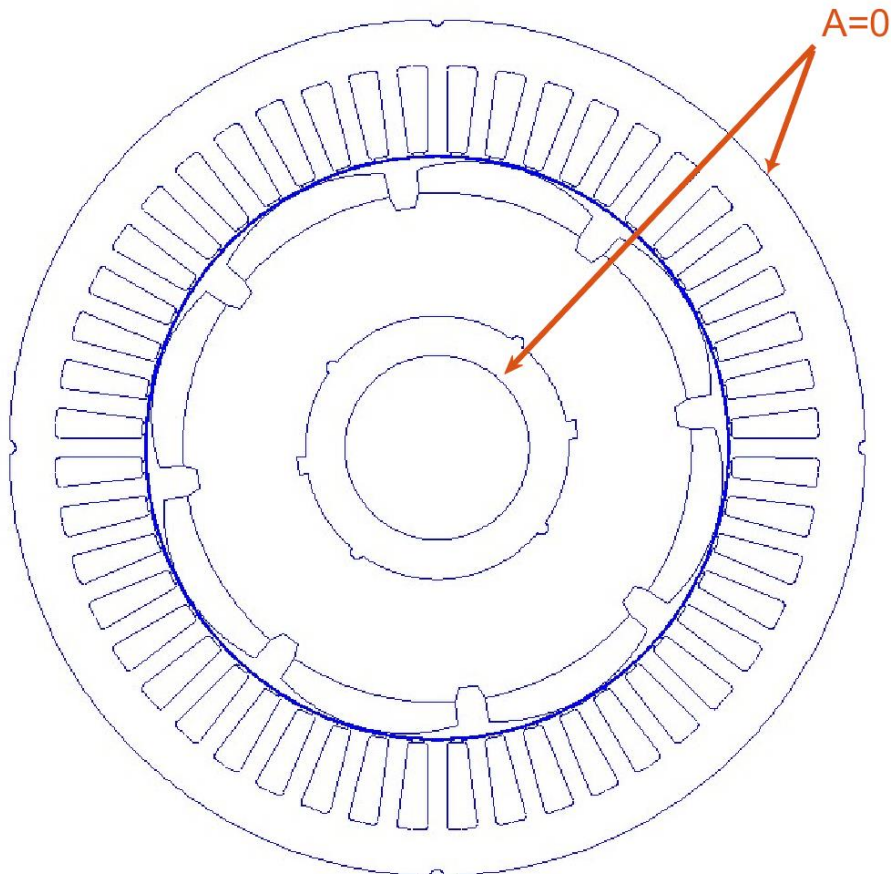
### 4.3.1 Γεωμετρία Μηχανής

Αρχικά, η γεωμετρία εισήχθη στο λογισμικό, σύμφωνα με την αρχική μελέτη. Σύμφωνα με τη μελέτη του προηγούμενου κεφαλαίου, εισάγονται όλες οι αλλαγές. Οι δύο κύριες διαμορφώσεις προκύπτουν από την [ενότητα 3.7 \(σύνοψη\)](#).

### 4.3.2 Οριακές Συνθήκες (Για Το Δεδομένο Πρόβλημα)

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, οι μόνες οριακές συνθήκες που χρειάζονται, είναι να ορίσουμε  $A=0$  στην εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια της μηχανής, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1.

Σχήμα 4. 1 Αποτύπωση οριακών συνθηκών στη μηχανή



### 4.3.3 Περιοχές και Ιδιότητες Υλικών

#### Αύλακια-Τύλιγμα Στάτη

Οι φάσεις στο τύλιγμα του στάτη έχουν την ακολουθία 'Α' '-C' 'B' '-A' 'C' '-B', η οποία δημιουργεί στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο κατά τη θετική φορά περιστροφής.

Ανάλογα τις ανάγκες κάθε προβλήματος, ορίζουμε την πυκνότητα ρεύματος σε κάθε αύλακα. Η σχέση που συνδέει την πυκνότητα ρεύματος στην αύλακα, με την πυκνότητα ρεύματος στο χαλκό είναι:

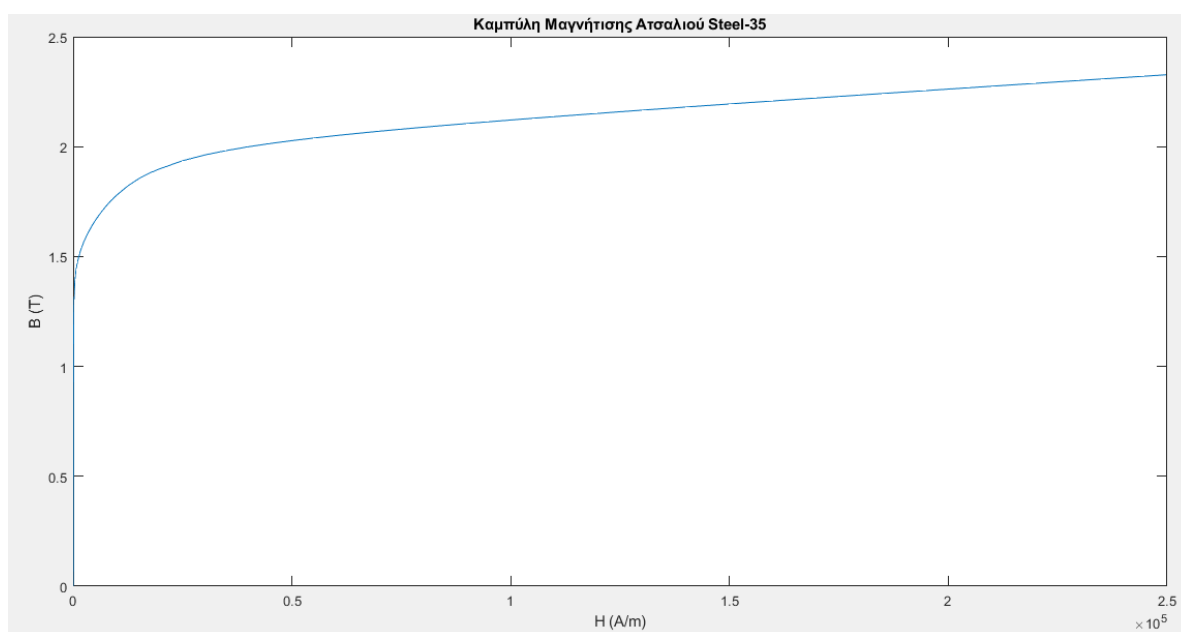
$$J_{slot} = J_{cu} \cdot ff$$

Για τα αυλάκια θα θεωρήσουμε επιτρεπτότητα αέρα, εφόσον η μισή επιφάνεια είναι πράγματι αέρας, ενώ ο χαλκός έχει και αυτός  $\mu_r=1$ .

### Σώμα Στάτη και Δρομέα

Ως υλικό κατασκευής ορίζεται ατσάλινη λαμαρίνα πάχους 0.35mm. Η καμπύλη μαγνήτισης του υλικού φαίνεται στο διάγραμμα 4.1.

*Διάγραμμα 4. 1 Καμπύλη Μαγνήτισης Ατσαλιού Steel35*



### Μαγνήτες

Για να ορίσουμε τους μαγνήτες, το λογισμικό απαιτεί είτε μια καμπύλη B-H, είτε μια γραμμική σχέση μεταξύ τους και την ένταση πεδίου απομαγνήτισης.

Για να προσδιορίσουμε όσο γίνεται καλύτερα τα χαρακτηριστικά των μαγνητών, θα γίνει μια εκτίμηση της θερμοκρασίας τους κατά τη λειτουργία.

Όπως θα επαληθεύσουμε στη συνέχεια, οι απώλειες δρομέα είναι πολύ χαμηλές. Αυτό συμβαίνει για τους εξής τρεις λόγους:

1. Ο κινητήρας στρέφεται με χαμηλή ταχύτητα και ο αέρας του διακένου δεν εμφανίζει ιδιαίτερη αντίσταση.
2. Δεν υπάρχει τύλιγμα στο δρομέα, άρα δεν υπάρχουν και απώλειες χαλκού.
3. Το μαγνητικό πεδίο στο σώμα του δρομέα είναι πρακτικά σταθερό, άρα υπάρχουν ελάχιστες απώλειες δινορευμάτων και υστέρησης.

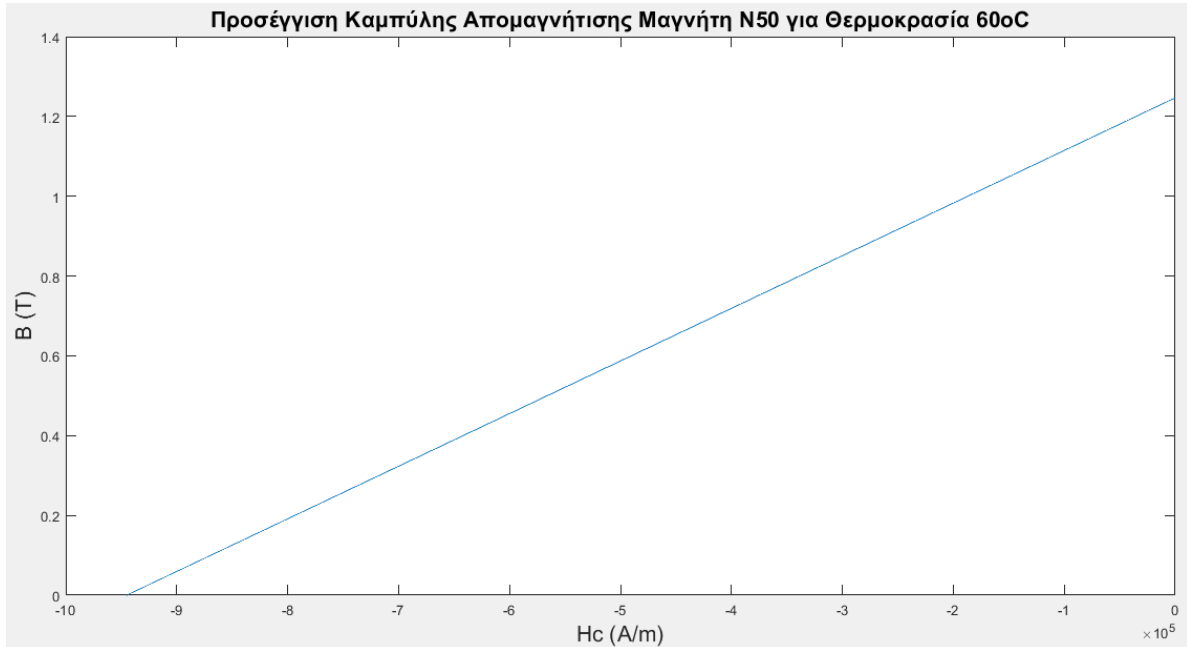
Εκτιμούμε, λοιπόν, ότι η θερμοκρασία των μαγνητών δε θα ξεπεράσει σε καμία περίπτωση τους 60°C.

Σύμφωνα με αυτά που είδαμε στην ενότητα [3.6 \(εξέταση μονίμων μαγνητών\)](#), προσεγγίζουμε τα χαρακτηριστικά του μαγνήτη ως εξής:

- Σύμφωνα με τα στοιχεία του κατασκευαστή, σε θερμοκρασία 80°C, ο μαγνήτης εμφανίζει παραμένουσα μαγνήτιση περίπου 1.2T. Σε θερμοκρασία 60°C θεωρούμε, ότι ο μαγνήτης θα εμφανίζει παραμένουσα μαγνήτιση περίπου 1.25T.
- Θεωρούμε ότι ο μαγνήτης θα λειτουργεί εντός γραμμικής περιοχής. Θα πρέπει να προσδιορίσουμε, λοιπόν, μια γραμμική σχέση μεταξύ B-H, η οποία θα δίνει παραμένουσα μαγνήτιση 1.25T.
- Τελικά, στο λογισμικό ορίστηκαν τα χαρακτηριστικά  $H_{cb}=945\text{KA/m}$  και  $m_r=1.05$ .

Η καμπύλη απομαγνήτισης φαίνεται στο διάγραμμα 4.2.

*Διάγραμμα 4. 2 Προσέγγιση Καμπύλης Απομαγνήτισης Μαγνήτη N50 στους 60°C*



## Άξονας-Ραβδώσεις-Σφηνόδρομοι-Σφήνες

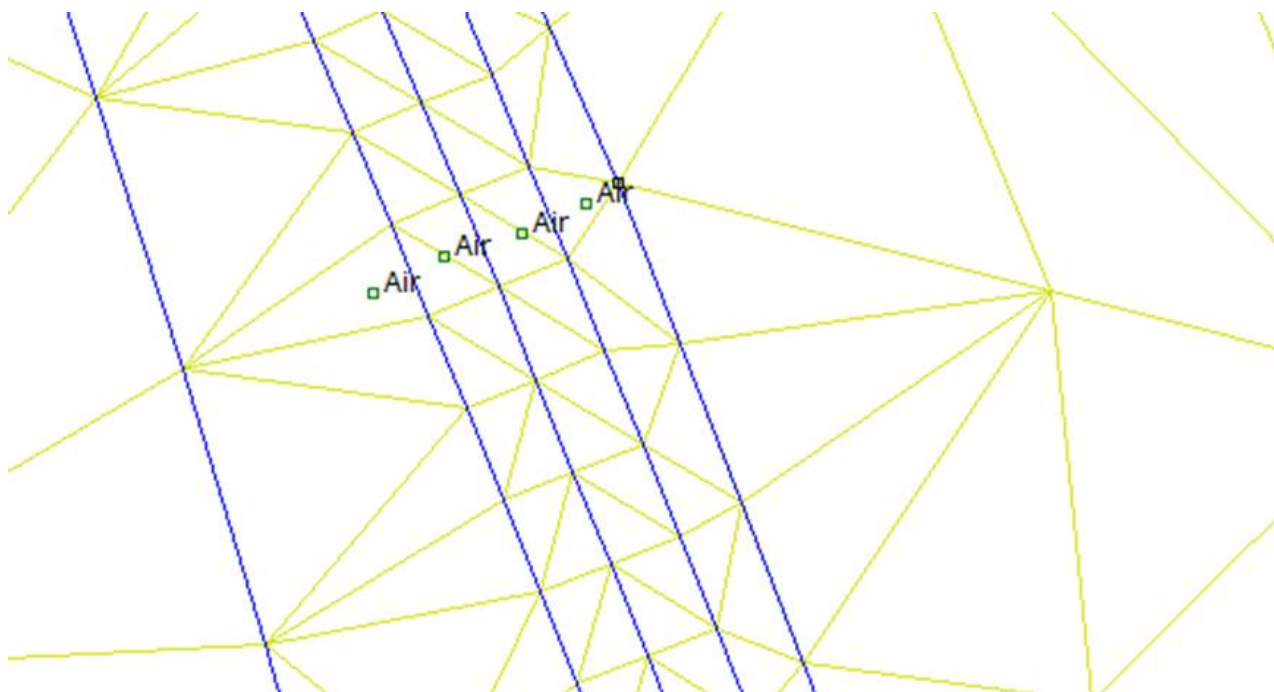
Στην προσομοίωση εισάγονται και τα 2 είδη σφηνόδρομων στον άξονα, ώστε να υπολογιστεί η χειρότερη δυνατή περίπτωση. Τα ακριβή υλικά της σφήνας και του άξονα δεν είναι πλήρως καθορισμένα, αλλά έχουν πολύ μικρή επίδραση στη λύση του προβλήματος, αφού το μαγνητικό πεδίο είναι ανίσχυρο σε εκείνη την περιοχή. Τυπικά, θεωρήθηκε ως υλικό ο καθαρός σίδηρος, όπως και στην αρχική σχεδίαση.

## Διάκενο

Το πιο σημαντικό κομμάτι της μηχανής είναι το διάκενο, καθώς εκεί γίνεται η ηλεκτρομηχανική μετατροπή. Γι' αυτό το λόγο, υπάρχει ανάγκη αυξημένης ακρίβειας υπολογισμού, δηλαδή πυκνότερου πλέγματος. Αυτό μπορούμε να το πετύχουμε δημιουργώντας πολλές γραμμές διακένου. Ως υλικό διακένου ορίζεται ο αέρας με τη γνωστή διαπερατότητα  $\mu r=1$ .

Στο σχήμα 4.2 βλέπουμε σε μεγέθυνση το διάκενο και διακρίνουμε το πυκνότερο πλέγμα, το οποίο θα μας δώσει καλύτερη ακρίβεια στη λύση.

Σχήμα 4. 2 Πλεγματοποίηση διακένου



## 4.4 Ανάλυση Μηχανής Με Το Λογισμικό FEMM

Έχοντας πλέον ορίσει τη γεωμετρία, τις οριακές συνθήκες, τις ιδιότητες των υλικών, μπορούμε να προχωρήσουμε στην επίλυση του προβλήματος. [29]

### 4.4.1 Λειτουργική Κατάσταση

Ως λειτουργική κατάσταση, ορίζουμε το ζεύγος  $(J, \delta)$ , όπου  $J$  η ενεργός πυκνότητα ρεύματος στις άυλακες της μηχανής και  $\delta$  η γωνία ροπής, όπως αυτή ορίστηκε στην [ενότητα 2.6 \(ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα\)](#). Οι λειτουργικές καταστάσεις είναι ουσιαστικά αυτές που διαφοροποιούνται ανάλογα με την επιθυμητή λειτουργία της μηχανής. Για κάθε ενδιαφέρουσα λειτουργική κατάσταση ζητούνται η ροπή, η τάση, οι απώλειες και ο βαθμός απόδοσης.

### 4.4.2 Προσομοίωση Σύγχρονης Περιστροφής

Για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων μιας λειτουργικής κατάστασης, δεν αρκεί μια προσομοίωση. Στο λογισμικό FEMM, μια προσομοίωση αντιστοιχεί σε ένα στιγμιότυπο του προβλήματος. Στην πραγματικότητα, όμως, κατά τη σύγχρονη περιστροφή των πεδίων, η ροή του μαγνήτη κάποιες φορές «συναντά» σίδηρο, μεγάλης διαπερατότητας, και διαπερνά κάθετα το διάκενο, ενώ άλλες φορές «συναντά» αυλάκι, μικρής διαπερατότητας, οπότε στρίβει ελαφρώς, για να συναντήσει το σίδηρο, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η διαδρομή της ροής στο διάκενο, άρα και η αντίσταση του μαγνητικού κυκλώματος.

Με βάση τα παραπάνω, είναι εμφανές, ότι η λύση για ένα στιγμιότυπο δεν αρκεί, για να αντιπροσωπεύσει μια λειτουργική κατάσταση. Αντιθέτως, για μια λειτουργική κατάσταση, γίνονται πολλές προσομοιώσεις, σε εύρος μιας ηλεκτρικής περιστροφής.

Για ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια, με ελάχιστο κόστος σε μικρό υπολογιστικό χρόνο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μαθηματική παρεμβολή “Spline”. Η μέθοδος αυτή παίρνει ως δεδομένα τα αρχικά σημεία και δημιουργεί την πιο ομαλή καμπύλη, που διέρχεται από αυτά.

### 4.4.3 Υπολογισμός Ροπής

Ο υπολογισμός της ροπής, για ένα στιγμιότυπο, γίνεται μέσω του τανυστή Maxwell.

Η μέση ηλεκτρομαγνητική δύναμη, ανά μονάδα ενεργού μήκους, του μαγνητικού κυκλώματος υπολογίζεται μέσω επικαμπύλιου ολοκληρώματος, πάνω σε μια γραμμή του διακένου, σύμφωνα με τη σχέση:

$$F_t = \frac{1}{\mu_0} \oint \vec{B}_n \vec{B}_t dl$$

Επομένως, η δύναμη που αναπτύσσεται για ενεργό μήκος L είναι:

$$F_t = \frac{L}{\mu_0} \oint \vec{B}_n \vec{B}_t dl$$

Τελικά, η ηλεκτρομαγνητική ροπή, που παράγει η μηχανή, υπολογίζεται ως εξής:

$$T_{em} = \frac{r \cdot L}{\mu_0} \oint \vec{B}_n \vec{B}_t dl$$

όπου:  $\vec{B}_n$  η ακτινική συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής  
 $\vec{B}_t$  η εφαπτομενική συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής  
r η ακτίνα της επιλεγμένης γραμμής διακένου  
L το ενεργό μήκος της μηχανής

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο του λογισμικού, μπορούμε να εξάγουμε ασφαλέστερα αποτελέσματα, αν χρησιμοποιηθεί μια μέθοδος στάθμισης των επιμέρους ροπών. Σε αυτήν την περίπτωση, το βάρος στάθμισης κάθε ροπής εξαρτάται από τη γεωμετρία του δρομέα. Η μέθοδος αυτή αναφέρεται ως “torque via weighted stress tensor”.

Σε μια σύγχρονη περιστροφή, υπολογίζουμε την κυματομορφή της ροπής, τη μέση τιμή της και την κυμάτωσή της.

Η κυμάτωση ροπής ορίζεται ως εξής:

$$Tripple = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{mean}}$$



#### 4.4.4 Υπολογισμός ΑΗΕΔ

Η πεπλεγμένη ροή, μιας φάσης, μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια του διανυσματικού δυναμικού.

$$\Lambda = \frac{L \cdot N_{slot} \cdot (P - N)}{S_{slot}}$$

όπου:  $P = \int_{J+} \vec{A} dV$  το ολοκλήρωμα του διανυσματικού δυναμικού στις αύλακες θετικής φοράς

$N$  η αντίστοιχη ποσότητα στις αύλακες αρνητικής φοράς

Η παραγόμενη ΑΗΕΔ, σε κάποια φάση της μηχανής, προκύπτει ως εξής, από το νόμο του Faraday:

$$E = \frac{d\Lambda}{dt}$$

Θεωρώντας ταχύτητα περιστροφής 1RPM μπορούμε να βρούμε το χρόνο  $dt$  μεταξύ 2 διαδοχικών στιγμιότυπων της σύγχρονης περιστροφής. Για κάθε λειτουργική κατάσταση, επομένως, σε μία πλήρη περιστροφή, υπολογίζουμε την κυματομορφή της παραγόμενης  $\frac{AHE\Delta}{RPM}$ , για κάθε φάση. Για κάθε ταχύτητα  $N$ , που μας ενδιαφέρει, μπορούμε να υπολογίσουμε την ΑΗΕΔ ως εξής:

$$E_N = N \cdot \frac{AHE\Delta}{RPM}$$

Μέσω των κυματομορφών, υπολογίζουμε την rms τιμή. Επίσης, χρησιμοποιώντας τον fast fourier transformation (fft), μπορούμε να εντοπίσουμε τις τάξεις αρμονικών και να υπολογίσουμε τον συντελεστή παραμόρφωσης τάσης THD  $v$  %, σύμφωνα με τον τύπο:

$$THD V \% = \frac{\sum_{i=2}^{\text{μέγιστη τάξη αρμονικής}} V_{rms,i}}{V_{rms,1}}$$

## 4.4.5 Υπολογισμός Απωλειών

### 4.4.5.1 Υπολογισμός Απωλειών Χαλκού

Η αντίσταση κάθε φάσης σε θερμοκρασία 20° C υπολογίζεται από τον τύπο:

$$R_{phase_{20}} = \frac{L_{φάσης}}{\gamma_{Cu 20^{\circ}C} \cdot d}$$

όπου:  $\gamma$  η ειδική αγωγιμότητα του χαλκού  $58 \cdot 10^6 S/m$   
 $d$  η συνολική διατομή μιας ομάδας αγωγών σε  $m^2$   
 $L_{φάσης}$  το μήκος τυλίγματος μιας φάσης σε  $m$ .

Η διατομή  $d$  ορίστηκε ως διατομή ομάδας αγωγών. Σε περίπτωση που η διατομή που προκύπτει είναι μεγάλη, οι μηχανικές ιδιότητες του χαλκού καθιστούν αδύνατη τη διαδικασία της περιέλιξης. Σε μια τέτοια περίπτωση, αντί να χρησιμοποιηθεί ένας χοντρός αγωγός διατομής  $d$  χρησιμοποιούνται  $n$  λεπτοί παράλληλοι αγωγοί διατομής  $d/n$ .

$$d = \frac{A_{slot} \cdot f f}{N_{slot}}$$

Το μήκος φάσης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$L_{φάσης} = \frac{P}{2} N_{slot} \cdot q \cdot 2 \cdot l$$

Όπου  $P=8$  ο αριθμός των πόλων

$N_{slot}$  στα ενεργά εν σειρά ελίγματα/αύλακα

$q=2$  αυλάκια/πόλο και φάση

$l$  το μήκος του αγωγού, που απαιτείται για να διαπεράσει το ενεργό μήκος της μηχανής ( $L$ ) + η μέση απόσταση μεταξύ 2 διαδοχικών αυλάκων της ίδιας φάσης που έχουν τον ίδιο αγωγό ( $W$ ) + η απαιτούμενη καμπύλωση του αγωγού στην κεφαλή του τυλίγματος.

Αρχικά, το μήκος  $l$  είχε προσεγγιστεί σύμφωνα με τον τύπο:

$$l = L + 1.2W$$

Κατά τις δοκιμές τυλίγματος επί του δοκιμίου είδαμε ότι η αρχική εκτίμηση ήταν υπερβολικά αισιόδοξη. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, η προσέγγιση θα γίνεται ως εξής:

$$l = L + 1.6W$$

Για τον ακριβή υπολογισμό της αντίστασης κάθε φάσης, πρέπει να οριστεί και μια θερμοκρασία λειτουργίας.

Λαμβάνοντας υπόψιν, ότι:

1. δεν έχει γίνει θερμική μελέτη και ακόμα δεν έχουν γίνει σαφή τα μονωτικά υλικά και οι θερμοαγωγιμες ιδιότητές τους,
2. το προφίλ οδήγησης της μηχανής δεν είναι πλήρως γνωστό, απαιτεί, όμως, συχνές εκκινήσεις και επιταχύνσεις, ενώ και κατά τη διάρκεια της επιβράδυνσης ο κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια, φορτίζοντας τη μπαταρία,

η θερμοκρασία λειτουργίας των τυλιγμάτων στα πλαίσια της εργασίας θεωρείται 80°C, αντί των 60°C της αρχικής μελέτης.

$$R_{phase_{80}} = R_{phase_{20}} \cdot (1 + a(80 - 20))$$

όπου  $a=0.004/^{\circ}C$

Η ενεργός τιμή του φασικού ρεύματος υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{phase,rms} = \frac{J_{slot,rms} \cdot A_{slot}}{N_{slot}}$$

Τελικά, οι συνολικές απώλειες χαλκού στις 3 φάσεις της μηχανής υπολογίζονται ως εξής:

$$P_{cu} = 3 \cdot I_{phase,rms}^2 \cdot R_{phase_{80}}$$

#### 4.4.5.2 Υπολογισμός Αρμονικών Μαγνητικού Πεδίου

Για να υπολογιστούν οι απώλειες που σχετίζονται με αρμονικά φαινόμενα του μαγνητικού πεδίου ακολουθούμε την εξής διαδικασία:

1. Σε μια σύγχρονη ηλεκτρική περιστροφή, για κάθε στιγμιότυπο αποθηκεύουμε το μαγνητικό πεδίο κάθε στοιχείου του πλέγματος.
2. Μέσω fft, υπολογίζουμε για κάθε στοιχείο, το πλάτος της μαγνητικής επαγωγής για κάθε τάξη αρμονικών.

### 4.4.5.3 Υπολογισμός Απωλειών Λόγω Εγγύτητας Και Επιδερμικού Φαινομένου

Οι απώλειες λόγω εγγύτητας και επιδερμικών φαινομένων μπορούν να αμεληθούν, καθώς η επιδερμίδα χαλκού στην επιθυμητή συχνότητα είναι 13.6mm, ενώ η ακτίνα του αγωγού, σε καμία περίπτωση, δε θα ξεπεράσει το 1.17mm.

Παρόλα αυτά, θα υπολογιστούν, ώστε να επαληθευθεί ο εν λόγω ισχυρισμός.

Οι απώλειες αυτές, μπορούν να υπολογιστούν, για ένα στοιχείο, ανά μονάδα όγκου, σύμφωνα με το παρακάτω μοντέλο:

$$P_{prox} = \sum_{i=1}^{\text{μέγιστη τάξη αρμονικών}} C_{prox} f^2_i B^2_i$$

Όπου:  $C_{prox}$  ένας συντελεστής του τυλίγματος

$f$  η εκάστοτε συχνότητα του πεδίου

$B$  η μέγιστη τιμή του μαγνητικού πεδίου στην εκάστοτε συχνότητα

$$C_{prox} = \frac{f f \cdot \pi^2 \cdot \frac{d}{n} \cdot \gamma_{80^\circ C}}{8}$$

Πολλαπλασιάζοντας με τον όγκο κάθε στοιχείου και αθροίζοντας τις απώλειες όλων των στοιχείων, βρίσκουμε τις απώλειες λόγω εγγύτητας και επιδερμικού φαινομένου.

### 4.4.5.4 Υπολογισμός Απωλειών Πυρήνα

Για τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα θα χρειαστούμε ξανά τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από τον fft.

Οι απώλειες πυρήνα, ανά μονάδα όγκου, για ένα στοιχείο, μπορούν να προσεγγιστούν επαρκώς από το μοντέλο:

$$P_{core} = P_{hysteresis} + P_{eddy} = \sum_{i=1}^{\text{μέγιστη τάξη αρμονικών}} (C_h f_i B_i^2 + C_e f_i^2 B_i^2)$$

όπου για λαμαρίνα πάχους 0.35mm ισχύουν προσεγγιστικά:

$$Ch = 143 \frac{W}{m^3 T^2 Hz}$$

$$Ce = 0.53 \frac{W}{m^3 T^2 Hz^2}$$

Πολλαπλασιάζοντας με τον όγκο κάθε στοιχείου και αθροίζοντας τις απώλειες όλων των στοιχείων, υπολογίζουμε τις απώλειες πυρήνα.

#### 4.4.6 Υπολογισμός Μάζας

Το λογισμικό μπορεί με μεγάλη ακρίβεια να υπολογίσει τον όγκο του κάθε υλικού. Βάσει του όγκου και της πυκνότητας κάθε υλικού, υπολογίζεται η συνολική μάζα της μηχανής.

Ειδικός υπολογισμός πρέπει να γίνει για τη μάζα του χαλκού. Γνωρίζοντας το μήκος του αγωγού, από την προηγούμενη ενότητα, και τη διατομή μιας ομάδας αγωγών, μπορούμε να υπολογίσουμε τον όγκο του χαλκού.

Ως πυκνότητα κάθε υλικού θα χρησιμοποιηθούν οι ίδιες τιμές με την αρχική σχεδίαση, ώστε να αναδειχθεί και η επίδραση των αλλαγών στο μαγνητικό κύκλωμα και στο τύλιγμα του στάτη. Οι πυκνότητες των υλικών φαίνονται στον πίνακα 4.1.

*Πίνακας 4. 1 Πυκνότητες των υλικών της μηχανής. [1]*

Στοιχείο Μηχανής	Υλικό κατασκευής	Πυκνότητα [ $kg/m^3$ ]
Σώμα στάτη	Σίδηρος	7870
Σώμα δρομέα	Σίδηρος	7870
Τύλιγμα	Χαλκός	8930
Μαγνήτης	NdFeB	7650
Άξονας	Ανοξειδωτος χάλυβας	7750

#### 4.4.7 Εξαγωγή Καμπύλης Ταχύτητας-Ροπής T-N

Για να εξάγουμε μια καμπύλη T-N:

1. Λύνουμε το πρόβλημα για ένα εύρος λειτουργικών καταστάσεων, οι οποίες παρουσιάζουν ενδιαφέρον.
2. Με κάποια μέθοδο μαθηματικής παρεμβολής, βρίσκουμε τα αποτελέσματα για ενδιάμεσες λειτουργικές καταστάσεις.
3. Βρίσκουμε την καμπύλη ΜΤΡΑ(Maximum Torque Per Ampere), δηλαδή, για κάθε πυκνότητα ρεύματος εντοπίζουμε τη γωνία  $\delta$ , για την οποία έχουμε μεγιστοποίηση της ροπής.
4. Ορίζουμε τα ενδιαφέροντα ζεύγη σημείων λειτουργίας (T,N).
5. Για κάθε ταχύτητα και λειτουργική κατάσταση βρίσκουμε την ΑΗΕΔ.
6. Για κάθε σημείο (T,N) βρίσκουμε τη λειτουργική κατάσταση που εξασφαλίζει την απαιτούμενη ροπή με τις ελάχιστες δυνατές απώλειες και ΑΗΕΔ μικρότερη της μέγιστης τάσης τροφοδοσίας.

##### Επιλογή Λειτουργικών Καταστάσεων Για Προσομοίωση

Στην αρχική μελέτη εξετάστηκε ένα μεγάλο εύρος λειτουργικών καταστάσεων. Στα πλαίσια αυτής της μελέτης θεωρήθηκε σκόπιμο να γίνουν πυκνές προσομοιώσεις στα σημεία, στα οποία υπάρχει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Οι λειτουργικές καταστάσεις που προσομοιώνονται είναι οι εξής:

$$J_{\text{slot}} = [ 0.001 \quad 0.25 \quad 0.5 \quad 0.75 \quad 1 \quad 1.5 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 ]$$
$$\delta = [ 90:95 \quad 97.5 \quad 100:5:130 \quad 140:10:180 ]$$

Για κάθε ζεύγος λειτουργικών καταστάσεων προκύπτουν όλα τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

##### Δημιουργία Πυκνότερων Αποτελεσμάτων Μέσω Παρεμβολής

Η πολυπλοκότητα του προβλήματος και ο υπολογιστικός χρόνος, που απαιτείται, καθιστούν αδύνατη την πυκνότερη προσομοίωση λειτουργικών καταστάσεων. Η μέθοδος που χρησιμοποιούμε για τη δημιουργία πυκνότερου πλέγματος αποτελεσμάτων είναι η παρεμβολή “spline” σε 2 διαστάσεις.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ως είσοδο:

1. Τις αρχικές λειτουργικές καταστάσεις (J, $\delta$ ).
2. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε λειτουργική κατάσταση.
3. Τις λειτουργικές καταστάσεις, στις οποίες θέλουμε να υπολογίσουμε τα αποτελέσματα, μέσω της μεθόδου.

Από τη μέθοδο παρεμβολής εξήχθησαν αποτελέσματα για τις λειτουργικές καταστάσεις:

$$J_{\text{slot}} = [ 0 : 0.1 : 5 ]$$
$$\delta = [ 90 : 0.1 : 180 ]$$

### Εύρεση Καμπύλης MTPA (Maximum Torque Per Ampere)

Για να εξασφαλίσουμε τη λειτουργία της μηχανής υπό βέλτιστο βαθμό απόδοσης, θα χρησιμοποιηθεί η τεχνική ελέγχου MTPA. Η τεχνική αυτή τροφοδοτεί τη μηχανή με κατάλληλο τρόπο, ώστε να αποδίδει την απαιτούμενη ροπή με το ελάχιστο δυνατό ρεύμα, ελαχιστοποιώντας έτσι τις απώλειες χαλκού.

Ισοδύναμα, μπορούμε να πούμε, ότι για δεδομένη τιμή ρεύματος στη μηχανή, η γωνία ρυθμίζεται, ώστε να μεγιστοποιείται η ροπή.

Με βάση τα παραπάνω, για κάθε πυκνότητα ρεύματος  $J$ , βρίσκουμε τη βέλτιστη γωνία  $\delta$ , για την οποία μεγιστοποιείται η ροπή του κινητήρα. Η καμπύλη που προκύπτει ονομάζεται καμπύλη MTPA.

Λόγω του έντονου κορεσμού στον άξονα  $d$ , αναμένουμε η μεγιστοποίηση να συμβαίνει για γωνία  $\delta$  ελαφρώς μεγαλύτερη των  $90^\circ$ . Γι' αυτό και επιλέχθηκαν λειτουργικές καταστάσεις που θα μας δώσουν μεγάλη ακρίβεια αποτελεσμάτων, στην περιοχή που υπάρχει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

### Ορισμός Λειτουργικών Σημείων T-N

Τα λειτουργικά σημεία που παρουσιάζουν ενδιαφέρον ορίζονται από τους παρακάτω πίνακες:

$$T = [ 0:0.1:9.9 \quad 10:0.2:19.8 \quad 20:1:34 \quad 35:5:70 ] \text{ (Nm)}$$
$$N = [ 0.01 \quad 5 \quad 10 \quad 20:20:500 ] \text{ (RPM)}$$

Οι ροπές επιλέχθηκαν με κριτήριο να εξετάζεται όλο το εύρος που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας, δίνοντας ιδιαίτερη σημασία στις χαμηλές ροπές, όπου θα είναι και η συχνότερη λειτουργία.

Οι ταχύτητες επιλέχθηκαν, ώστε να υπάρχει ένα πυκνό πλέγμα μέχρι τις 500RPM. Ως μέγιστο όριο τέθηκαν οι 500RPM, καθώς αντιστοιχούν σε ταχύτητα οχήματος περίπου 50Km/h, κάτι που δεν είναι επιθυμητό, αλλά είναι και σχεδόν αδύνατο να επιτευχθεί στα πλαίσια του διαγωνισμού.

## Υπολογισμός ΑΗΕΔ

Για κάθε ζεύγος λειτουργικής κατάστασης-ταχύτητας υπολογίζεται η ΑΗΕΔ, όπως περιγράφηκε στην [ενότητα 4.4.4 \(υπολογισμός ΑΗΕΔ\)](#). Αυτό το βήμα έχει μεγάλη σημασία, διότι ο αντιστροφέας μπορεί να τροφοδοτήσει τη μηχανή σε ένα εύρος τάσεων.

Ο αντιστροφέας ελέγχεται με την τεχνική SVM (Space Vector Modulation). Η μέγιστη τάση εξόδου συνδέεται με την τάση της μπαταρίας μέσω της σχέσης:

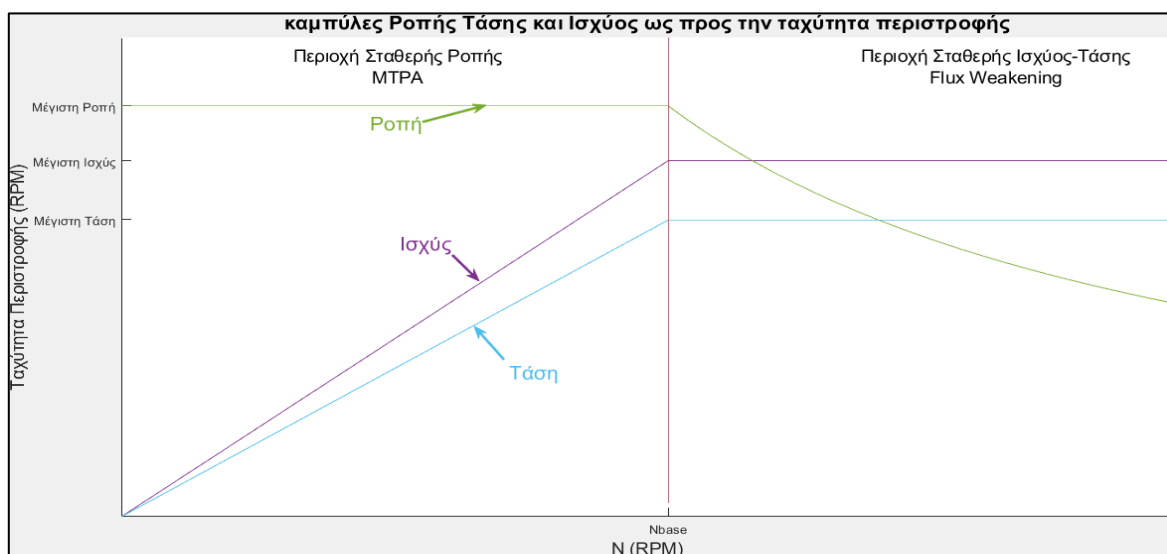
$$V_{\varphi, ενεργό} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{6}}$$

Όπου  $V_{dc}$  η τάση της μπαταρίας.

Η τάση της μπαταρίας τυπικά είναι 48V. Από την εμπειρία των προηγούμενων ετών στο διαγωνισμό, ξέρουμε ότι πριν την εκκίνηση η μπαταρία είναι φορτισμένη στα 54.6V και εκφορτίζεται σταδιακά και ελαφρώς κατά τον αγώνα. Μπορούμε, με αρκετή ασφάλεια, να θεωρήσουμε, ότι η τάση της μπαταρίας δε θα πέσει ποτέ κάτω από τα 49V, επομένως η ΑΗΕΔ δε θα πρέπει σε καμία περίπτωση να ξεπεράσει την τιμή  $49 / \sqrt{6} = 20V$ .

Καθώς η ταχύτητα αυξάνεται, αυξάνεται και η ΑΗΕΔ. Για ταχύτητες, που υπό βέλτιστη γωνία  $\delta$ , παραβιάζεται η παραπάνω συνθήκη, θα πρέπει η γωνία  $\delta$  να αυξηθεί. Η αύξηση της γωνίας  $\delta$  (για γωνίες  $90^\circ$ - $180^\circ$ ) αυξάνει ουσιαστικά το ρεύμα  $I_d$  στην κατεύθυνση  $-d$ , μειώνοντας τη ροή στον  $d$  άξονα, άρα και την ΑΗΕΔ. Μια τέτοια περίπτωση δεν είναι ιδιαίτερα επιθυμητή, καθώς το ρεύμα  $I_d$  δε δημιουργεί ροπή, αλλά δημιουργεί απώλειες χαλκού και κατά συνέπεια μειώνεται ο βαθμός απόδοσης. Η λειτουργία αυτή ονομάζεται εξασθένιση πεδίου (flux weakening).

*Διάγραμμα 4. 3 Όρια λειτουργίας Σ.Κ.Μ.Μ.*





Τα διαγράμματα T-N θα βρίσκονται εντός των ορίων που έχουν αναλυθεί στην [ενότητα 2.6.3 \(όρια λειτουργίας κινητήρα\)](#), το οποίο επαναλαμβάνεται για τη διευκόλυνση του αναγνώστη.

#### 4.4.8 Ονομαστική Λειτουργική Κατάσταση

Η λειτουργική κατάσταση, που αποδίδει 11Nm και 300RPM, σύμφωνα με τον έλεγχο ΜΤΡΑ, είναι η ονομαστική λειτουργική κατάσταση. Η κατάσταση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς είναι το σημείο, στο οποίο αναμένεται να λειτουργεί ο κινητήρας στο μεγαλύτερο κομμάτι της διαδρομής.

Αν και η ονομαστική λειτουργία είναι αρκετά σημαντική, δεν επαρκεί για την αξιολόγηση κινητήρα στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Εφόσον, οι κανόνες του διαγωνισμού απαιτούν συχνές στάσεις και εκκινήσεις, είναι σημαντικό να μελετηθεί η συμπεριφορά του κινητήρα σε ένα ευρύτερο φάσμα λειτουργικών σημείων T-N. Γι' αυτό το λόγο κρίνεται απαραίτητη η εξαγωγή ενός χάρτη απόδοσης.

#### 4.4.9 Χάρτης Απόδοσης Κινητήρα

Έχοντας βρει τη βέλτιστη λειτουργική κατάσταση (J,δ) για κάθε λειτουργικό σημείο (T-N), υπολογίζουμε το βαθμό απόδοσης κάθε σημείου και τον τοποθετούμε στο διάγραμμα T-N. Το διάγραμμα που προκύπτει ονομάζεται χάρτης απόδοσης.

Ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται ως:

$$BA = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{losses}}$$

όπου:  $P_{out} = \frac{T \cdot N \cdot 2\pi}{60}$  η ισχύς εξόδου του κινητήρα

$P_{in}$  η ισχύς εισόδου του κινητήρα

$P_{losses}$  το άθροισμα των απωλειών που αναφέρονται στην [ενότητα 4.4.5 \(υπολογισμός απωλειών\)](#).

## 4.5 Ενεργειακή Αξιολόγηση Σε Ένα Γύρο Πίστας

Για να μπορέσει να υπάρξει ένα αντικειμενικό κριτήριο αξιολόγησης, δημιουργήθηκε μια προσομοίωση της κίνησης του οχήματος στην πίστα, με τη βοήθεια του λογισμικού Simulink.

Τα 4 βασικά κομμάτια της προσομοίωσης είναι:

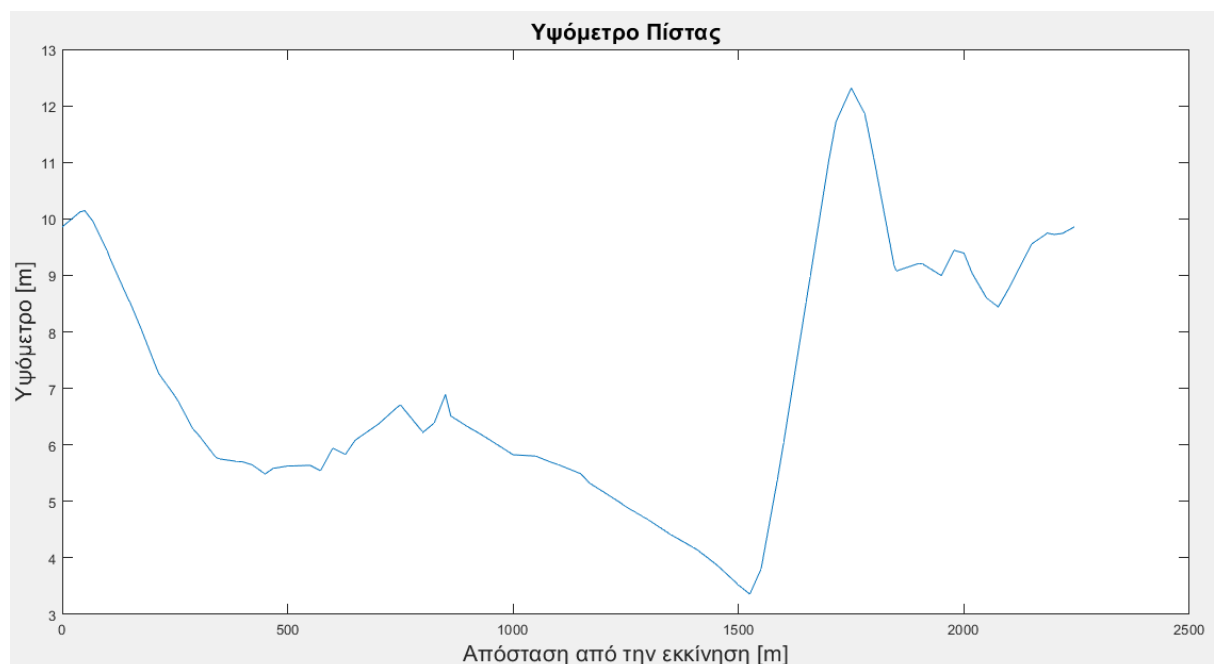
1. Πίστα Διαγωνισμού
2. Οχημα
3. Οδηγός
4. Κινητήρας

### 4.5.1 Πίστα Διαγωνισμού

Ως πίστα διαγωνισμού χρησιμοποιήθηκε η πίστα, στην οποία διαγωνίστηκε η ομάδα το 2016. Τα απαιτούμενα στοιχεία της πίστας είναι το μήκος και το υψόμετρο κάθε σημείου.

Στο διάγραμμα 4.4 φαίνεται στον άξονα x η απόσταση από την εκκίνηση και στον άξονα y το υψόμετρο του σημείου.

Διάγραμμα 4. 4 Χαρακτηριστικά πίστας Shell Eco Marathon Europe 2016



## 4.5.2 Προσομοίωση Οχήματος

Η επιτάχυνση του οχήματος προκύπτει από την παρακάτω σχέση, σύμφωνα και με όσα ειπώθηκαν στην [ενότητα 3.3.3 \(υπολογισμός χαρακτηριστικών κινητήρα\)](#).

$$\alpha = \frac{du}{dt} = \frac{\frac{T_{κιν}}{R_{τροχού}} - (m_{οχήματος} + m_{οδηγού})g(\sin\theta + \mu\cos\theta) - \frac{1}{2}C_d\rho Au^2}{M}$$

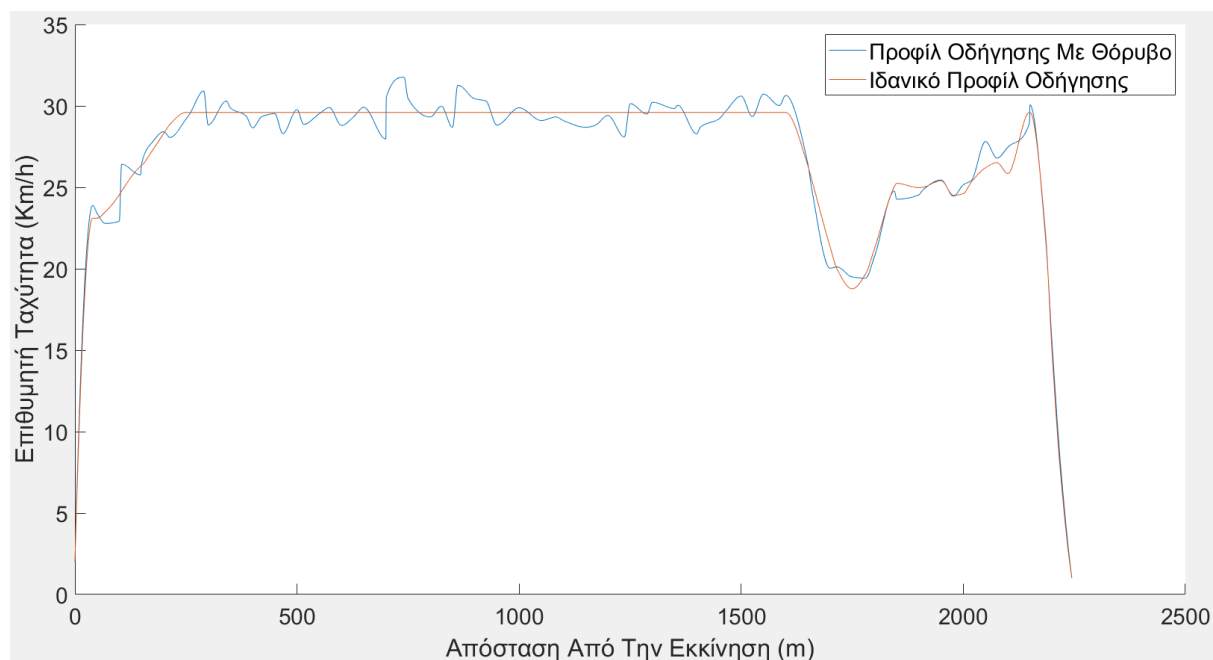
## 4.5.3 Προσομοίωση Οδηγού

Για το προφίλ οδήγησης θα πρέπει να γνωρίζουμε ότι η μέση ταχύτητα κίνησης του οχήματος πρέπει να είναι >25Km/h. Επίσης, το όχημα πρέπει σε κάθε γύρο να κάνει μία στάση τριών δευτερολέπτων.

Μέσα από μια διαδικασία βελτιστοποίησης, προέκυψαν οι επιθυμητές ταχύτητες του οχήματος, για κάθε σημείο της πίστας.

Στη συνέχεια στην κυματομορφή των επιθυμητών ταχυτήτων προστίθεται λευκός γκαουσιανός θόρυβος, ο οποίος προσομοιώνει τις μικρές μεταβολές της ταχύτητας που οφείλονται σε αναγκαστικές μεταβολές ταχύτητας λόγω συνωστισμού ή λόγω σφαλμάτων χειρισμού. Τα δύο προφίλ οδήγησης φαίνονται στο διάγραμμα 4.5.

Διάγραμμα 4. 5 Προφίλ οδήγησης για βέλτιστη απόδοση με και χωρίς θόρυβο



Ένας ελεγκτής PI συγκρίνει το θορυβώδες προφίλ οδήγησης με τη στιγμιαία ταχύτητα και δίνει την κατάλληλη εντολή ροπής στον κινητήρα.

Ο θόρυβος ορίζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορεί να αναπαραχθεί ή να μεταβληθεί κατά βούληση του χρήστη, ώστε κάθε κινητήρας να αξιολογηθεί σε ένα εύρος θορύβων, αλλά και όλοι οι κινητήρες να αξιολογηθούν κάτω από όμοιες συνθήκες.

#### 4.5.4 Προσομοίωση Κινητήρα

Για την προσομοίωση του κινητήρα χρησιμοποιήθηκε το block “Mapped Motor” του Simulink, το οποίο παίρνει ως είσοδο τη στιγμιαία ταχύτητα και την επιθυμητή ροπή και μέσω του χάρτη απόδοσης υπολογίζει την καταναλισκόμενη ισχύ.

#### 4.5.5 Αποτέλεσμα Προσομοίωσης

Το τελικό αποτέλεσμα της προσομοίωσης είναι η κατανάλωση του οχήματος σε Km/Kwh, στα πρότυπα του συστήματος αξιολόγησης του διαγωνισμού.

Επίσης, καταμετράται η μέση ταχύτητα, ώστε να διασφαλιστεί ότι ξεπερνάει το όριο των 25Km/h. Σε περίπτωση που δεν τηρείται ο περιορισμός πρέπει να τροποποιηθεί κατάλληλα το προφίλ οδήγησης, προφανώς με αρνητικές συνέπειες στην κατανάλωση του οχήματος.

### 4.6 Συνάρτηση Κόστους-Βέλτιστος Κινητήρας

Για το πρόβλημα της επιλογής βέλτιστου κινητήρα ορίζονται τα κριτήρια βελτιστοποίησης:

$$X=[T_{max}, Km/KWh, MotorMass, THD\%, Tripple\%]^T$$

Όπου: **T<sub>max</sub>** η μέγιστη ροπή, που μπορεί να παράξει ο κινητήρας,

**Km/KWh** η ενεργειακή απόδοση του οχήματος, δηλαδή η απόσταση που διανύει το όχημα καταναλώνοντας 1KWh σε ένα εύρος προσομοιώσεων.

**MotorMass** η μάζα του κινητήρα,

**THD%**, ο συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης της κυματομορφής της τάσης, σε ονομαστική λειτουργία και

**Tripple%** η κυμάτωση της ροπής σε ονομαστική λειτουργία.

Επίσης, ορίζονται οι αντικειμενικές συναρτήσεις των επί μέρους κριτηρίων:

$$f(\mathbf{x}) = \left[ \frac{70 - T_{max}}{20}, \frac{100 - \frac{Km}{KWh}}{50}, \frac{MotorMass - 5}{15}, \frac{THD\% - 5}{15}, \frac{Tripple\% - 5}{5} \right]^T$$

Οι συναρτήσεις ορίστηκαν ώστε:

- Ένας κινητήρας με  $\mathbf{X}=[70, 100, 5, 5, 5]^T$  να έχει  $f(\mathbf{x})=[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$  και
- Ένας κινητήρας με  $\mathbf{X}=[50, 50, 20, 20, 10]^T$  να έχει  $f(\mathbf{x})=[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$

Το διάνυσμα βαρών ορίζεται:

$$\mathbf{W}(\mathbf{x}) = [0 \ 0.75 \ 0.1 \ 0.05 \ 0.1]$$

Τελικά, η συνάρτηση κόστους έχει την έκφραση:

$$\min Z = \frac{100 - \frac{Km}{KWh}}{66.67} + \frac{MotorMass - 5}{150} + \frac{THD\% - 5}{300} + \frac{Tripple\% - 5}{50}$$

Με περιορισμούς:

$$\begin{aligned} T_{max} &\geq 50Nm \\ Km/KWh &\geq 50 \\ MotorMass &\leq 20Kg \\ THD\% &\leq 20\% \\ Tripple\% &\leq 10\% \end{aligned}$$

## 4.7 Επιλογή Διαμόρφωσης

Σε αυτό το στάδιο θα πρέπει να γίνει η επιλογή ανάμεσα στις 2 διαμορφώσεις που προτάθηκαν, στην [ενότητα 3.7 \(σύνοψη\)](#).

Ο αριθμός των εν σειρά ελιγμάτων ανά αύλακα δεν έχει καθοριστεί σαφώς, γι' αυτό, για κάθε διαμόρφωση, γίνονται δοκιμές με  $N_{slot}=\{12,13,14\}$ , σύμφωνα με την [ενότητα 3.4 \(επανεξέταση τυλίγματος\)](#).

Στον πίνακα 4.2 καταγράφονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν:

Πίνακας 4. 2 Αξιολόγηση Κινητήρων

	Nslot	Tmax	Km/KWh	MotorMass	THD%	Tripple%	Z
«διαμόρφωση διαμέτρου στάτη 195mm»	12	68	84,53	12,05	12,75	6,68	0,3386
	13	68	84,55	12,05	12,75	6,68	0,3382
	14	68	84,49	12,05	12,75	6,68	0,3391
«διαμόρφωση διαμέτρου στάτη 190mm»	12	63	81,92	11	12,25	7,24	0,3803
	13	63	81,30	11	12,25	7,24	0,3895
	14	63	79,84	11	12,25	7,24	0,4113

Η τελική επιλογή, σύμφωνα με τη συνάρτηση κόστους, είναι η «διαμόρφωση διαμέτρου στάτη 195mm».

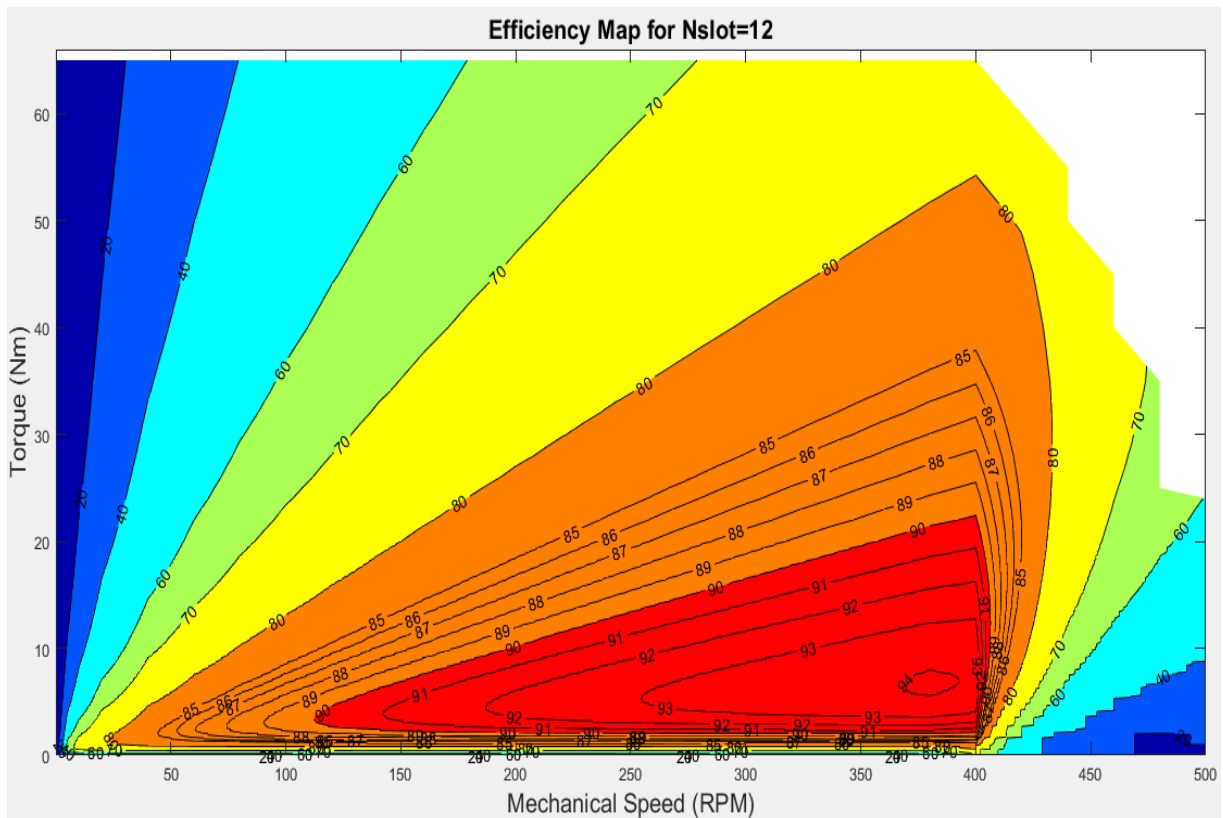
Επίσης, τα αποτελέσματα για 12, 13 και 14 εν σειρά ελίγματα/αυλάκι είναι παρόμοια. Αυτό εξηγείται αν παρατηρήσουμε τα τους χάρτες απόδοσης στα διαγράμματα 4.6-4.8.

Ο κινητήρας με 12 εν σειρά ελίγματα ανά αυλάκι (διάγραμμα 4.6) εισέρχεται στην περιοχή εξασθένισης πεδίου σε ταχύτητες μεγαλύτερες των 400RPM, η οποία μεταφράζεται σε 41.5Km/h και είναι ακατόρθωτη στα πλαίσια του διαγωνισμού.

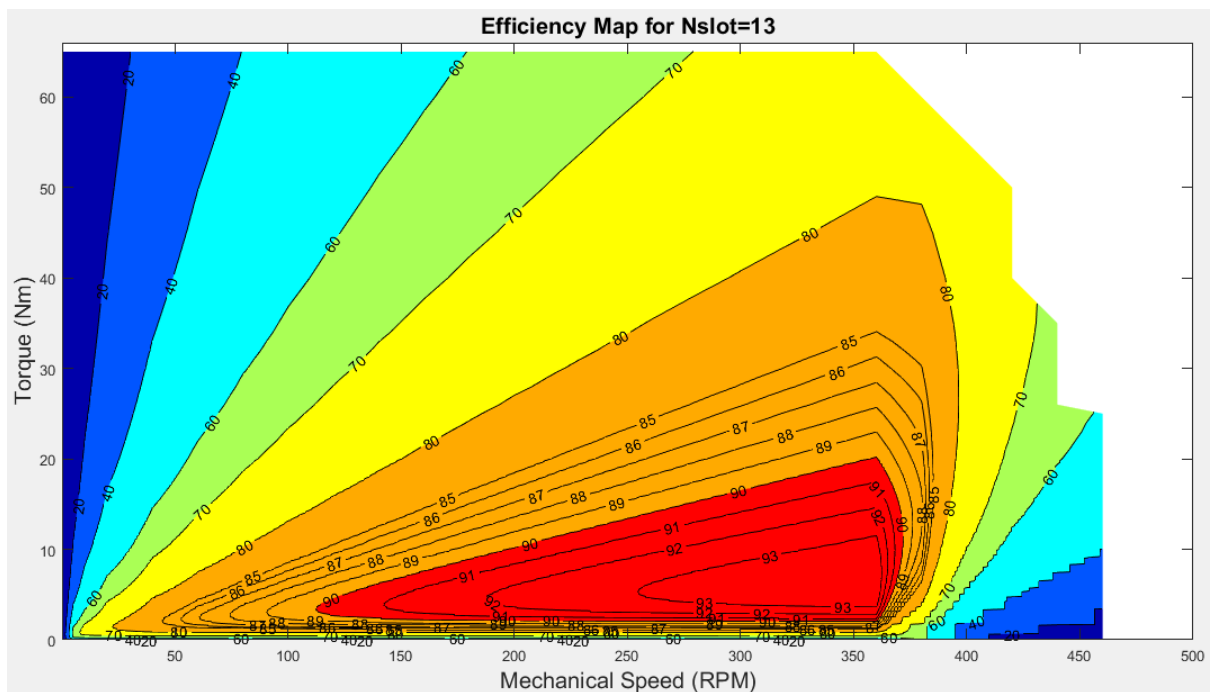
Ο κινητήρας με 13 εν σειρά ελίγματα ανά αυλάκι (διάγραμμα 4.7) εισέρχεται στην περιοχή εξασθένισης πεδίου σε ταχύτητες μεγαλύτερες των 360RPM, η οποία μεταφράζεται σε 37.5Km/h και είναι μια ταχύτητα στην οποία δεν αναμένεται ποτέ να βρεθεί το όχημα.

Ο κινητήρας με 14 εν σειρά ελίγματα ανά αυλάκι εισέρχεται στην περιοχή εξασθένισης πεδίου σε ταχύτητες μεγαλύτερες των 340RPM, η οποία μεταφράζεται σε 35Km/h, μια ταχύτητα που ενδέχεται να βρεθεί το όχημα.

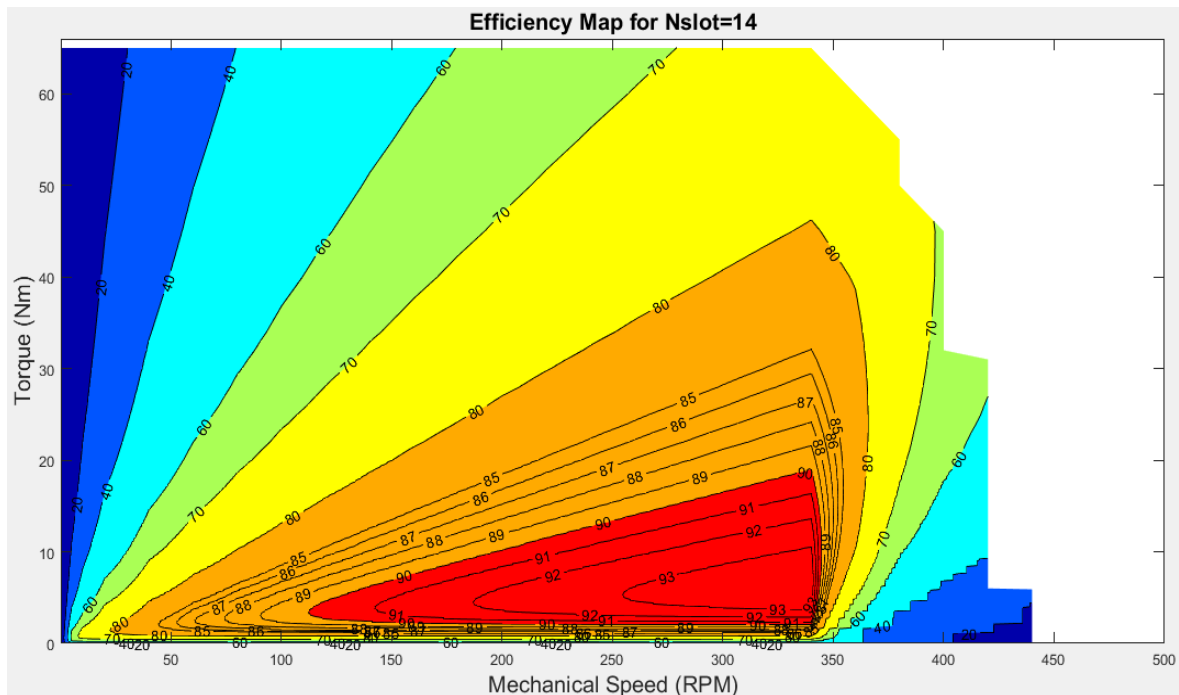
Διάγραμμα 4. 6 Χάρτης απόδοσης κινητήρα 195mm με Nslot=12



Διάγραμμα 4. 7 Χάρτης απόδοσης κινητήρα 195mm με Nslot=13



Διάγραμμα 4. 8 Χάρτης απόδοσης κινητήρα 195mm με Nslot=14



Οι διαφορές που προκύπτουν από την αλλαγή του αριθμού των ενεργών εν σειρά ελιγμάτων ανά αύλακα είναι:

1. Με την αύξηση του αριθμού ενεργών εν σειρά ελιγμάτων μειώνεται η διάμετρος των αγωγών και οι απώλειες λόγω εγγύτητας-επιδερμικού φαινομένου. Το φαινόμενο αυτό έχει ελάχιστη επίδραση. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για ονομαστική λειτουργία (11Nm, 300RPM) οι απώλειες για 12,13 και 14 εν σειρά ελιγμάτων ανά αυλάκι είναι 30.32W, 30.13W και 29.97W.
2. Με την αύξηση του αριθμού εν σειρά ελιγμάτων αυξάνεται η πιθανότητα ο κινητήρας να εισέλθει στην περιοχή εξασθένισης πεδίου και να μειωθεί δραστικά η απόδοσή του. Αυτός είναι και ο λόγος που ο κινητήρας με Nslot=14 εμφανίζει μειωμένη επίδοση.

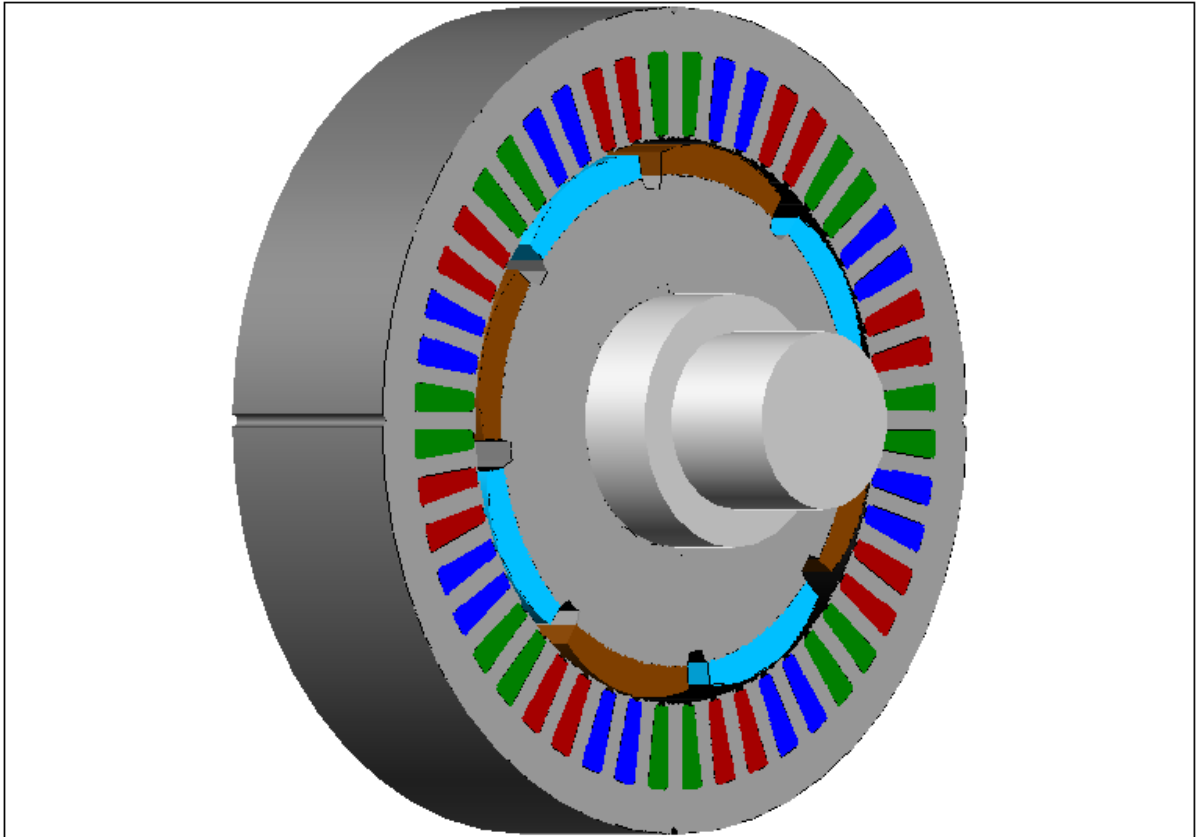
Λαμβάνοντας υπόψιν, ότι:

1. το όχημα μπορεί να κινηθεί με μέση ταχύτητα 25Km/h, χωρίς να ξεπεράσει στιγμιαία τα 37.5Km/h,
2. οι υψηλές ταχύτητες είναι ανεπιθύμητες, διότι αυξάνονται ραγδαία οι αεροδυναμικές απώλειες(οι οποίες σχετίζονται με το τετράγωνο της ταχύτητας),
3. χρησιμοποιώντας περισσότερα ελίγματα, το ρεύμα γραμμής είναι μικρότερο και συνεπώς η μπαταρία, ο αντιστροφείας και τα καλώδια τροφοδοσίας έχουν καλύτερη συμπεριφορά και



αποφασίστηκε, ότι η τελική επιλογή είναι «διαμόρφωση διαμέτρου στάτη 195mm» με  $N_{slot}=13$ . Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται το τρισδιάστατο μοντέλο του κινητήρα.

*Σχήμα 4. 3 Τρισδιάστατο μοντέλο κινητήρα σχεδιασμένο στο λογισμικό AutoCAD*



## 4.8 Αποτελέσματα Ανάλυσης

### 4.8.1 Ονομαστική Λειτουργία

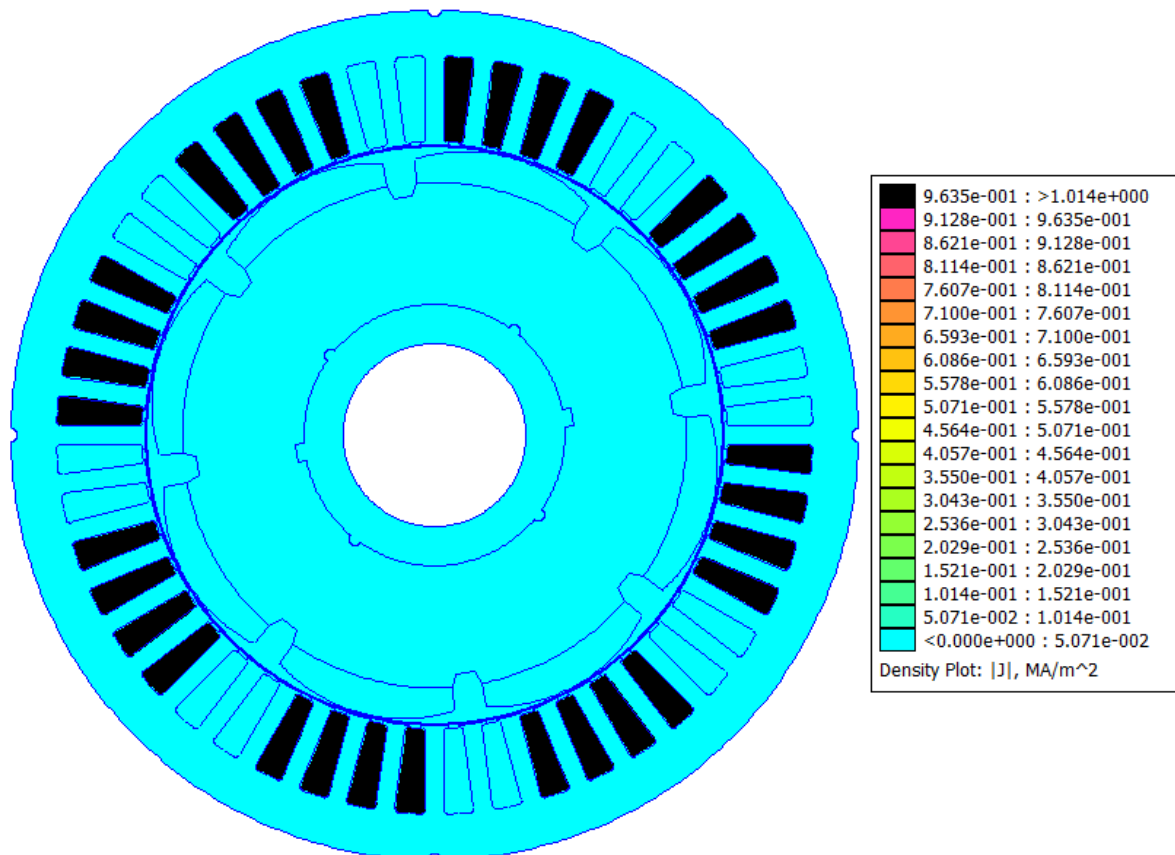
Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, που προέκυψαν για ονομαστική λειτουργία.

Σε πρώτο στάδιο, εντοπίζουμε ότι για ονομαστική ροπή (11Nm) και ονομαστική ταχύτητα (300 RPM) θα πρέπει ο κινητήρας να τροφοδοτηθεί με ενεργό πυκνότητα ρεύματος  $J_{slot}=0.82A/mm^2$  υπό γωνία  $\delta=91^\circ$ .

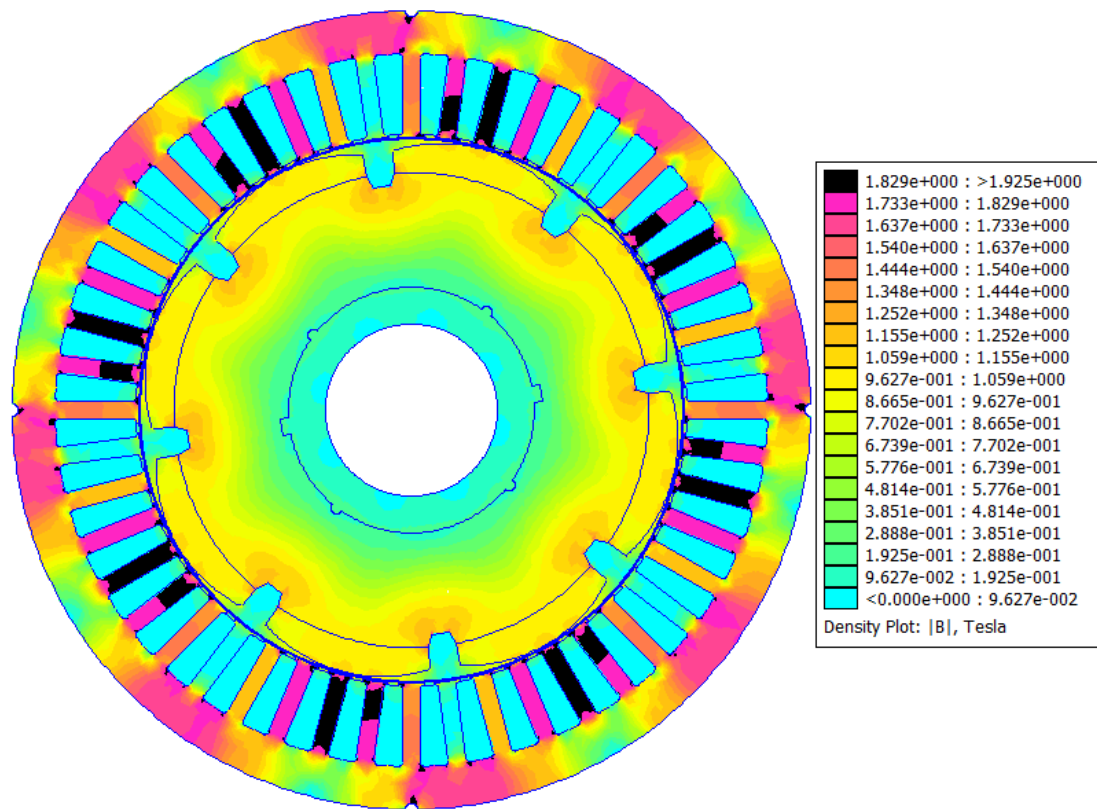
Το ρεύμα γραμμής είναι 7.08Ampere.

Στα σχήματα 4.4 και 4.5 απεικονίζονται η πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη και η μαγνητική επαγωγή του κινητήρα, αντίστοιχα, για το στιγμιότυπο  $t=0$  της ονομαστικής λειτουργίας.

Σχήμα 4. 4 Πυκνότητα ρεύματος στις άλακες στο στιγμιότυπο  $t=0$  της ονομαστικής λειτουργίας

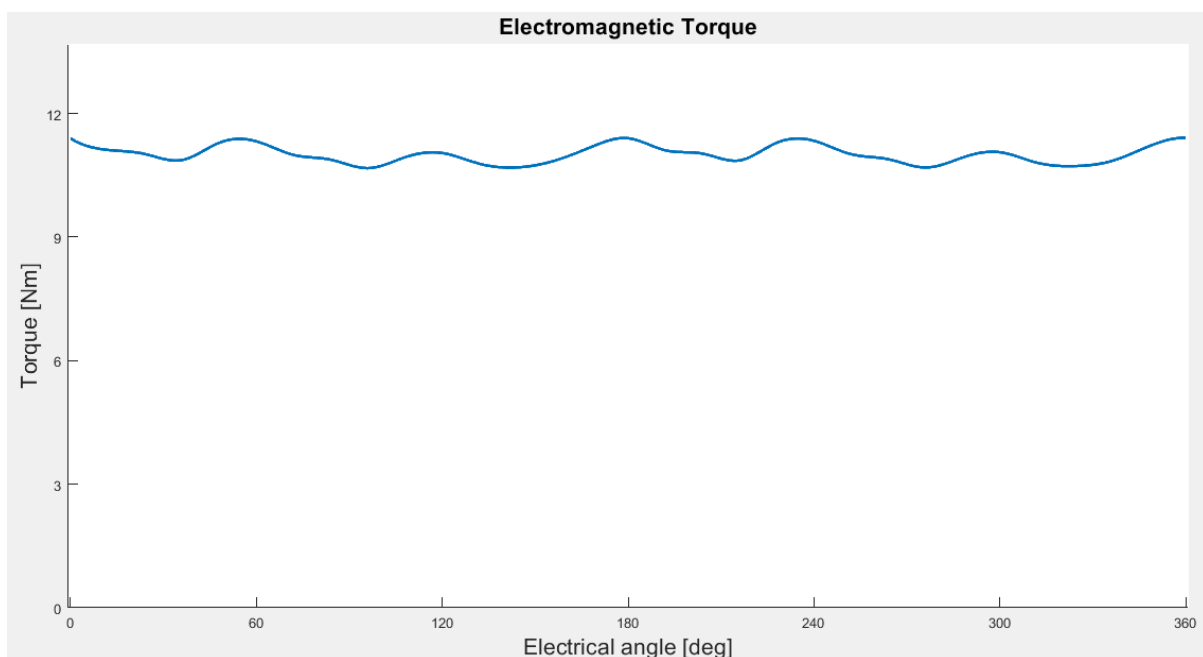


Σχήμα 4. 5 Μαγνητική επαγωγή κινητήρα στο στιγμιότυπο  $t=0$  της ονομαστικής λειτουργίας



Ο υπολογισμός της ονομαστικής ροπής έγινε σε μια σύγχρονη περιστροφή. Η ονομαστική ροπή υπολογίστηκε 11 Nm, με κυμάτωση 6.68%. Η κυματομορφή της ροπής για μία ηλεκτρική περιστροφή φαίνεται στο διάγραμμα 4.9.

Διάγραμμα 4. 9 Ροπή ονομαστικής λειτουργίας για μια ηλεκτρική περιστροφή



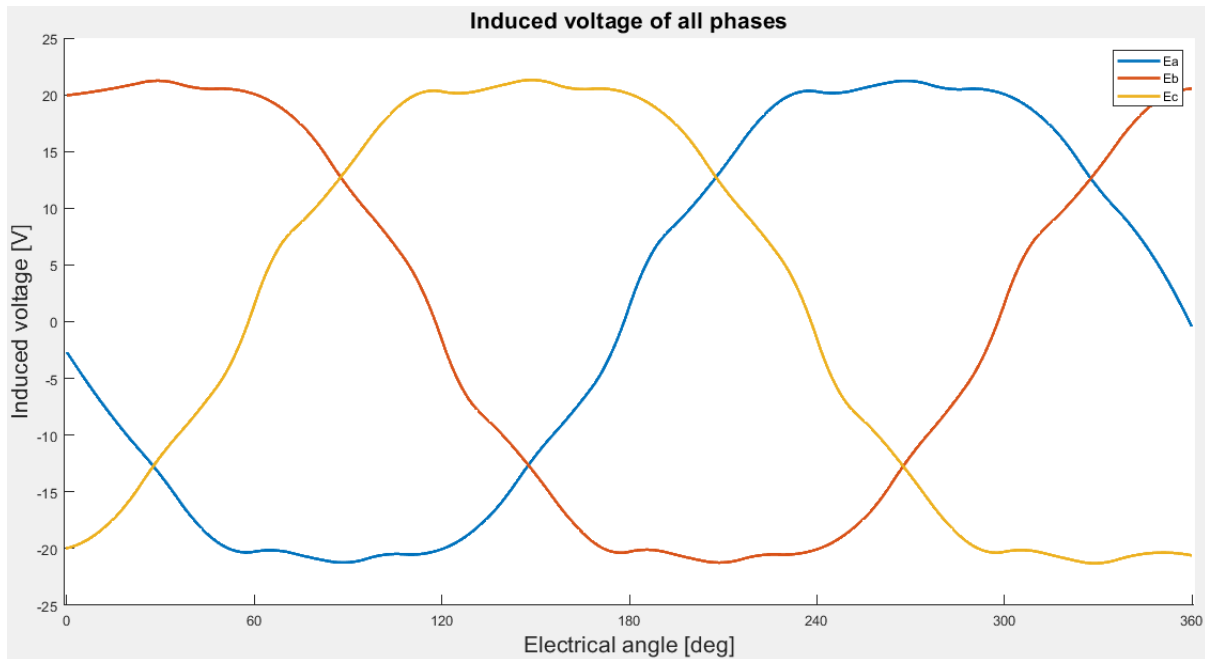
Η ενεργός τιμή της ΑΗΕΔ (φασική) υπολογίστηκε 16.34V.

Οι κυματομορφές των 3 φασικών τάσεων φαίνονται στο διάγραμμα 4.10.

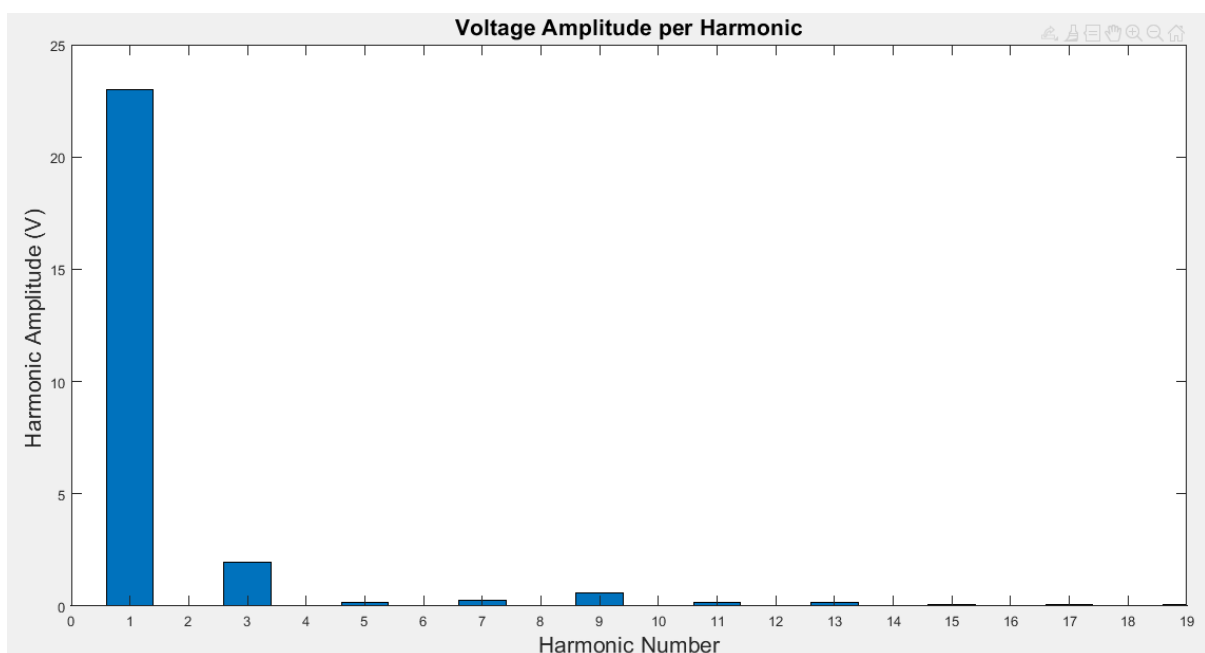
Ο συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης φασικής τάσης THDv υπολογίστηκε 12.75%.

Οι αρμονικές της τάσης και τα πλάτη τους φαίνονται στο διάγραμμα 4.11.

*Διάγραμμα 4. 10 Φασική ΑΗΕΔ σε μία ηλεκτρική περιστροφή σε ονομαστική λειτουργία*



*Διάγραμμα 4. 11 Αρμονικό περιεχόμενο ΑΗΕΔ σε ονομαστική λειτουργία*



Οι απώλειες ονομαστικής λειτουργίας φαίνονται στον πίνακα 4.3:

*Πίνακας 4. 3 Απώλειες ονομαστικής λειτουργίας*

Είδος Απωλειών	Ισχύς Απωλειών (W)
Χαλκού	22.61
Υστέρησης	5.83
Δινορευμάτων	0.56
Γεινίασης-Επιδερμικού Φαινομένου	1.13
Σύνολο	30.13

Η απόδοση του κινητήρα στην ονομαστική λειτουργία είναι 92.25%.

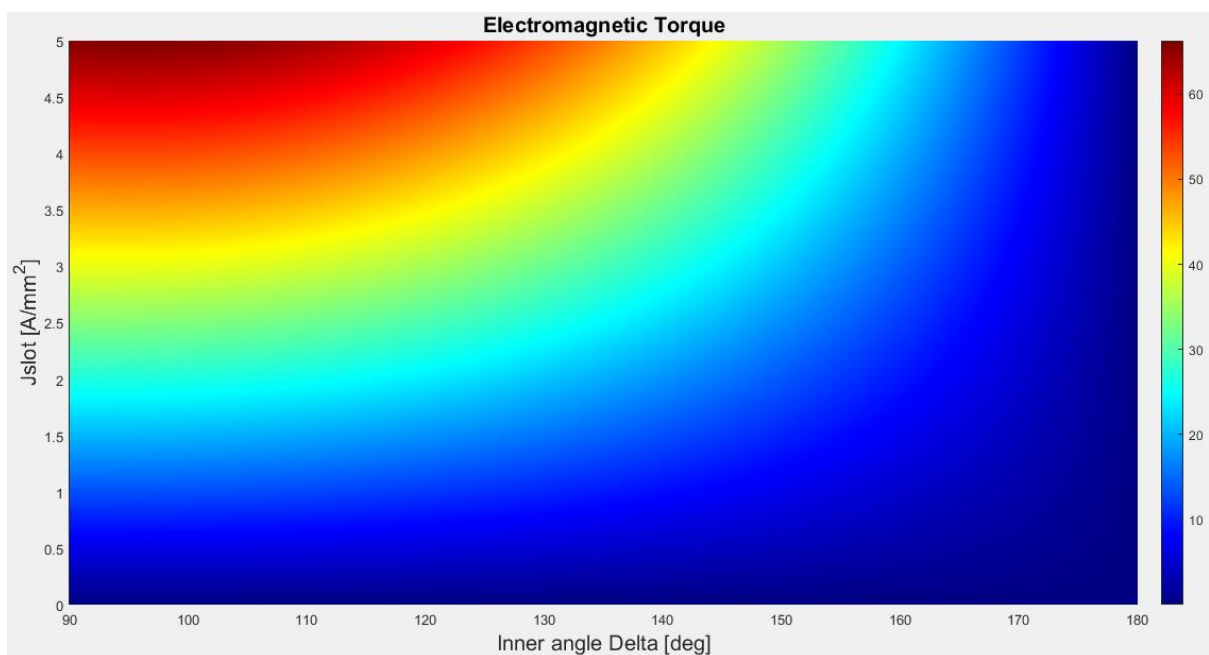
## 4.8.2 Καμπύλες

### 4.8.2.1 Καμπύλες Μέγιστης Ροπής Ανά Ampere (MTPA)

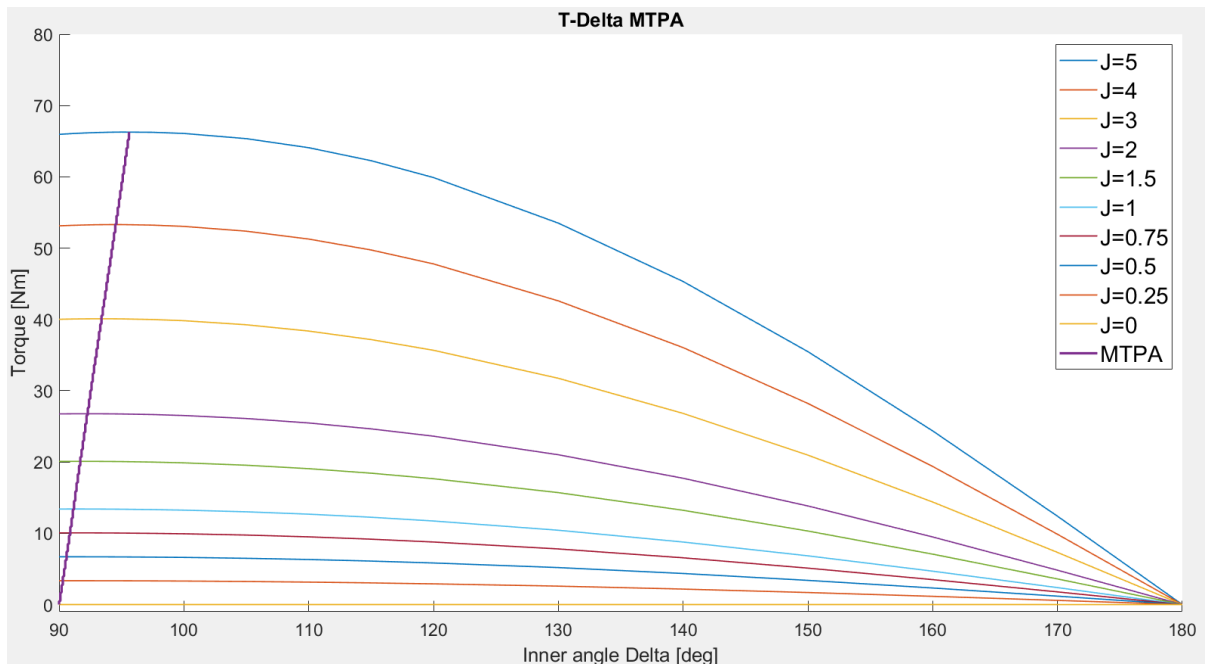
Στο διάγραμμα 4.12 αποτυπώνονται οι ροπές για κάθε λειτουργική κατάσταση.

Στο διάγραμμα 4.13 φαίνονται η καμπύλη MTPA και οι καμπύλες T-δ για διακριτές τιμές πυκνότητας ρεύματος.

*Διάγραμμα 4. 12 Χάρτης ροπών για κάθε λειτουργική κατάσταση (J,δ)*



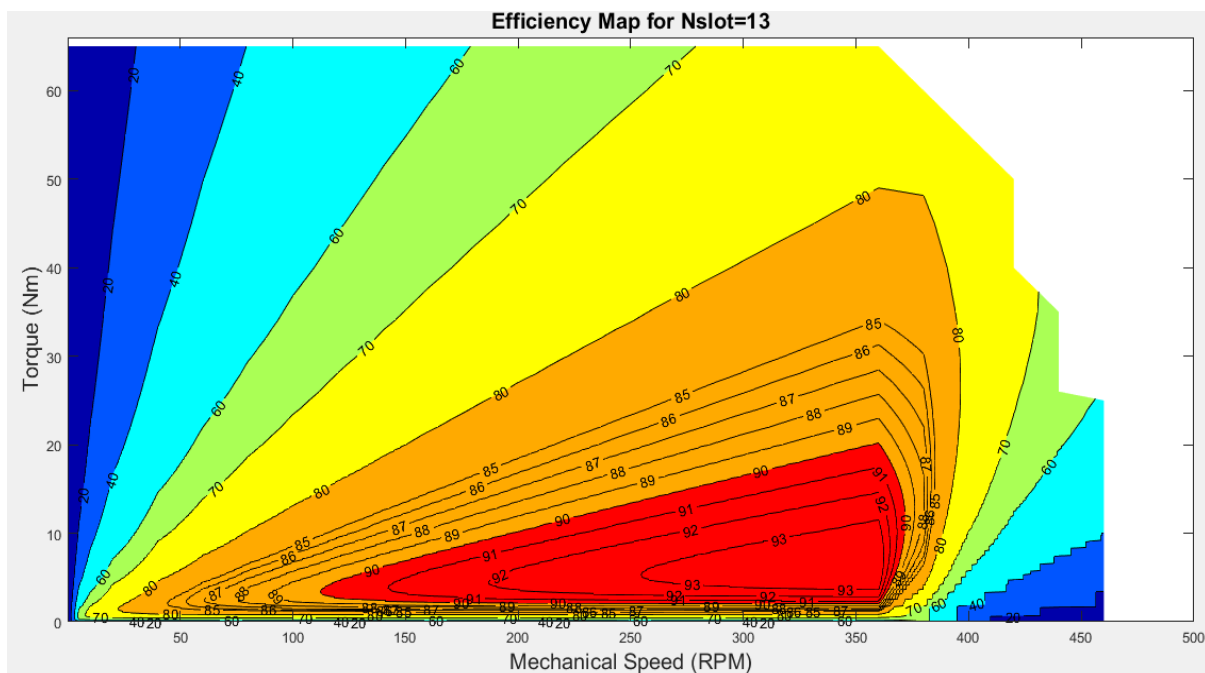
Διάγραμμα 4. 13 Καμπύλες T-δ για διακριτές τιμές πυκνότητας ρεύματος και καμπύλη MTPA



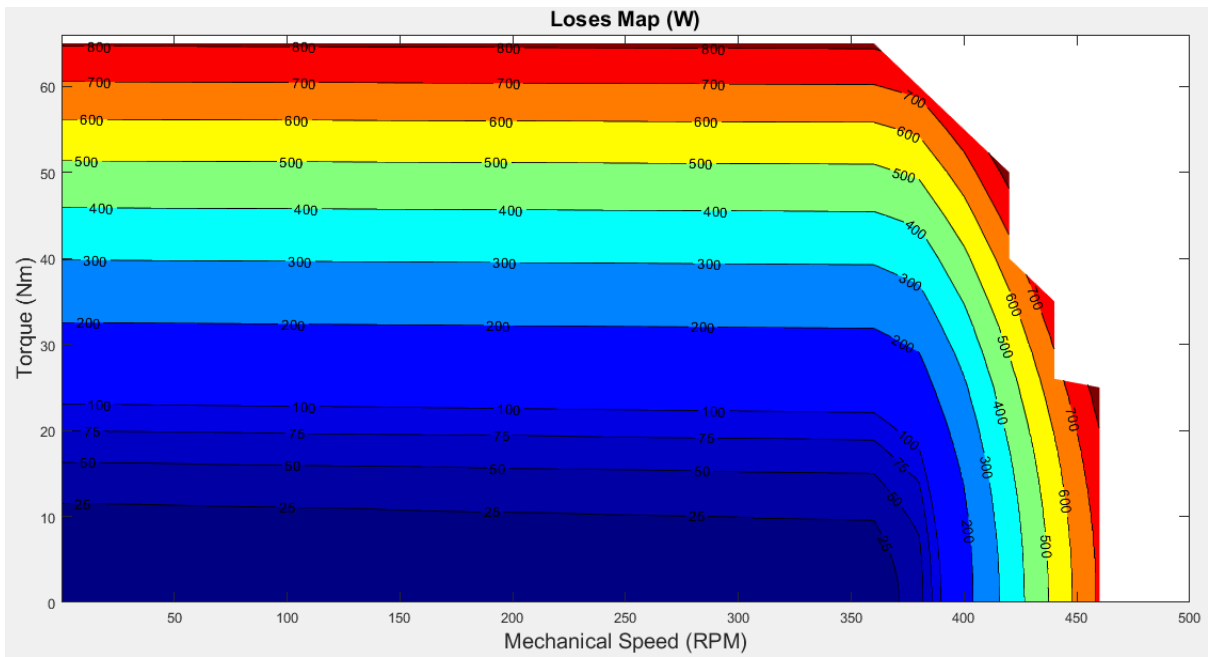
#### 4.8.2.2 Καμπύλες Ροπής-Ταχύτητας (T-N)

Στα διαγράμματα 4.14 - 4.18 παρουσιάζονται με τη σειρά ο βαθμός απόδοσης, οι ενεργειακές απώλειες, η ισχύς εξόδου, η πυκνότητα ρεύματος και η ΑΗΕΔ, για κάθε λειτουργικό σημείο (T,N).

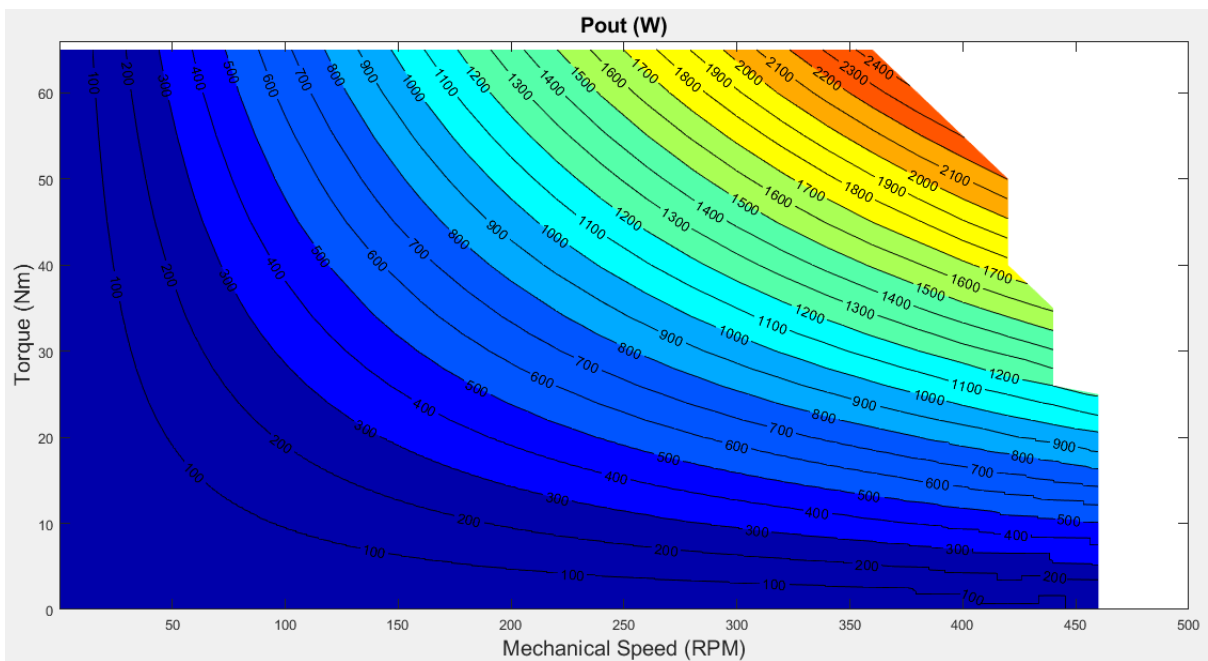
Διάγραμμα 4. 14 Χάρτης απόδοσης κινητήρα



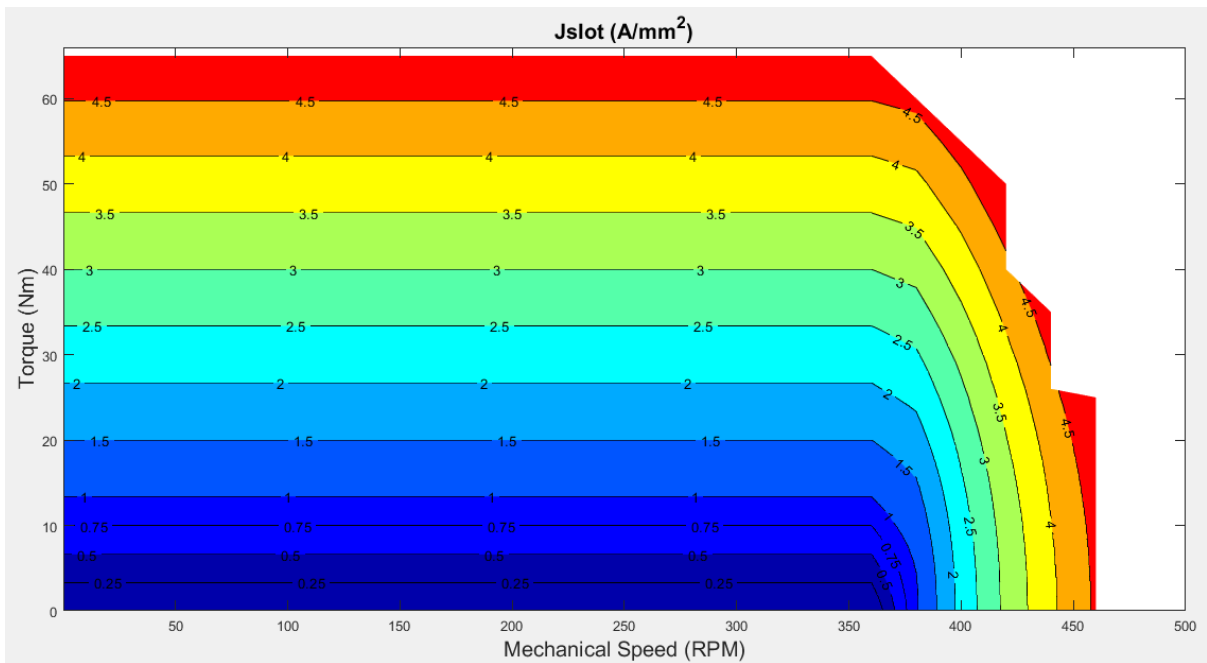
Διάγραμμα 4. 15 Χάρτης απωλειών κινητήρα



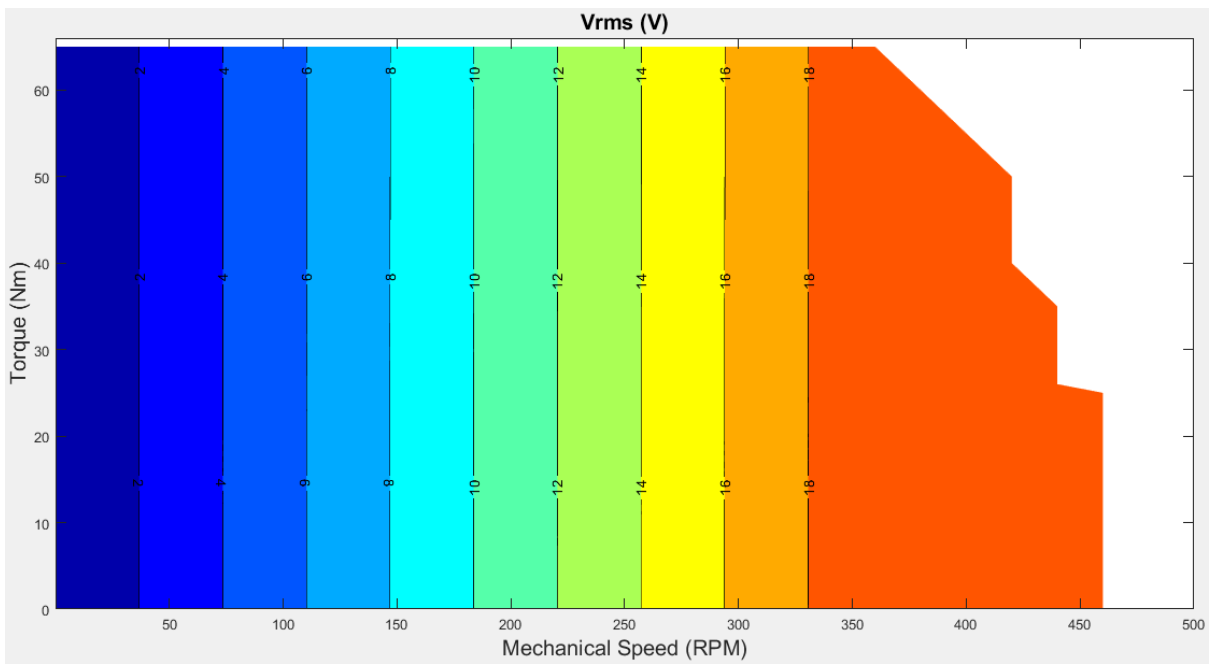
Διάγραμμα 4. 16 Χάρτης ισχύος εξόδου κινητήρα



Διάγραμμα 4. 17 Χάρτης πυκνότητας ρεύματος κινητήρα, για βέλτιστη απόδοση



Διάγραμμα 4. 18 Χάρτης ΑΗΕΔ κινητήρα





### 4.8.3 Βέλτιστη Απόδοση

Η βέλτιστη απόδοση του κινητήρα είναι 93.96% και εμφανίζεται για φορτίο 6.45Nm και ταχύτητα 360RPM. Η λειτουργική κατάσταση σε αυτήν την περίπτωση είναι:

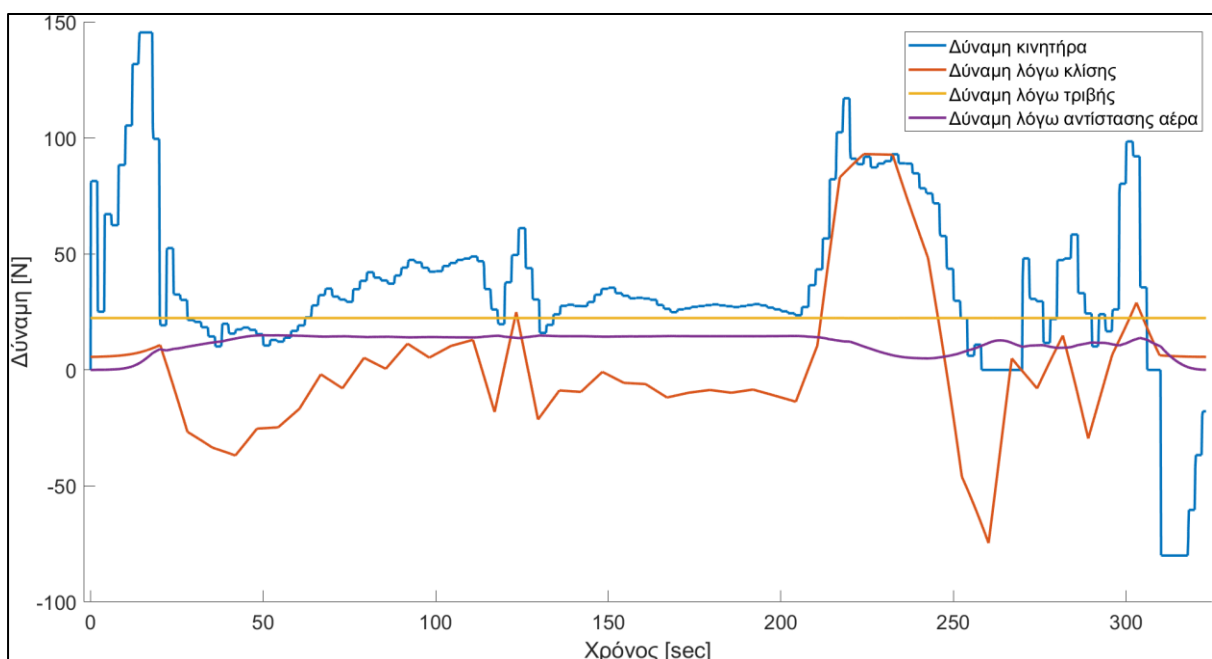
- Ενεργός Πυκνότητα Ρεύματος 0.48A/mm<sup>2</sup>
- Γωνία  $\delta=90.6^\circ$

### 4.8.4 Ενεργειακή Αξιολόγηση Σε Ένα Γύρο Πίστας

Από την προσομοίωση της κίνησης του οχήματος στην πίστα, προέκυψαν τα διαγράμματα 4.19-4.24, τα οποία απεικονίζουν:

1. Δυνάμεις που ασκούνται στο όχημα
2. Επιτάχυνση οχήματος
3. Επιθυμητή ταχύτητα και ταχύτητα οχήματος χωρίς θόρυβο
4. Επιθυμητή ταχύτητα και ταχύτητα οχήματος με ψευδοτυχαίο θόρυβο
5. Ενεργειακή κατανάλωση με και χωρίς ψευδοτυχαίο θόρυβο

Διάγραμμα 4. 19 Δυνάμεις που ασκούνται στο όχημα



Στο διάγραμμα 4.19 παρατηρούμε ότι:

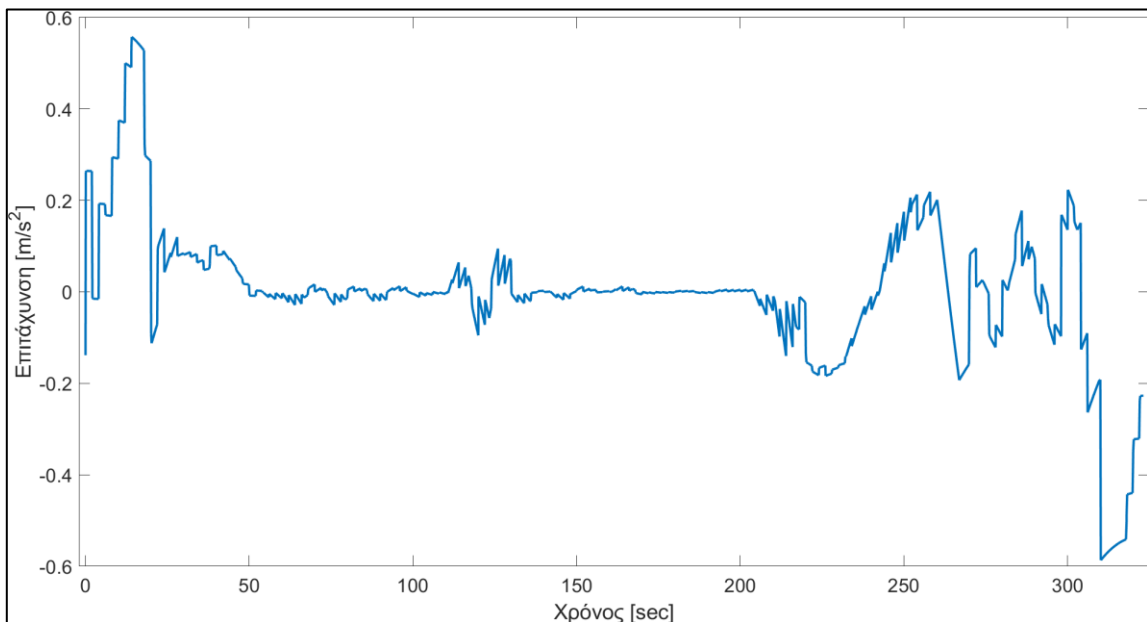
1. Η δύναμη λόγω κλίσης έχει έντονες μεταβολές λόγω της κλίσης του οδοστρώματος.
2. Η δύναμη λόγω τριβής παραμένει πρακτικά σταθερή.

3. Η αντίσταση του αέρα αυξάνεται ραγδαία με την αύξηση της ταχύτητας.

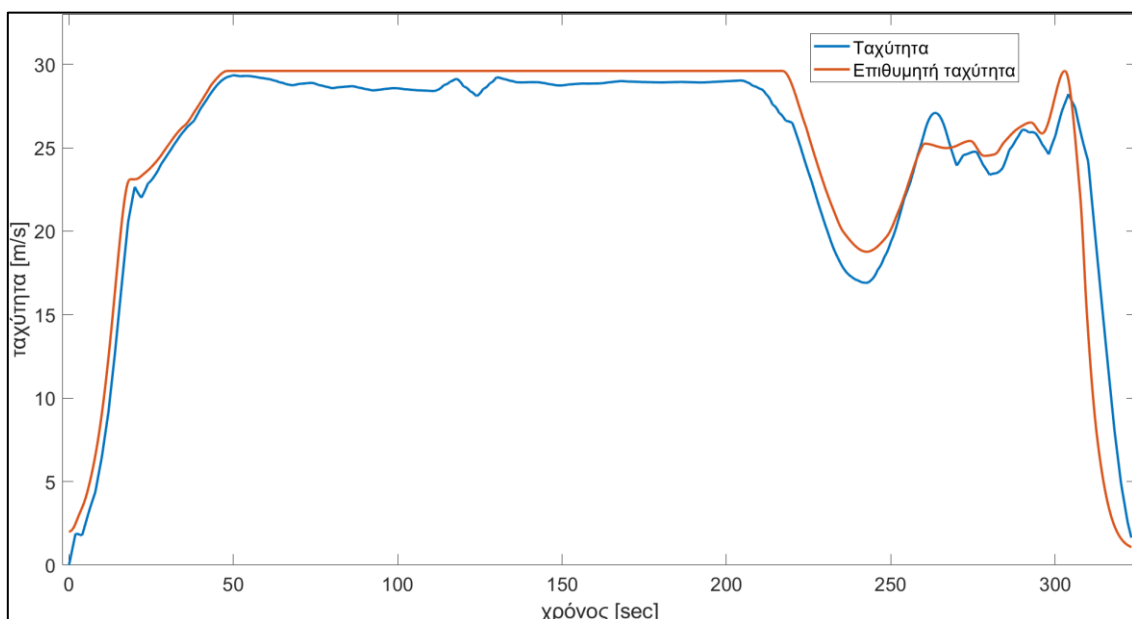
Στα διαγράμματα 4.20-4.22 παρατηρούμε με χρονική σειρά:

1. Αρχική επιτάχυνση
2. Σταθερή ταχύτητα στο επίπεδο σημείο της πίστας
3. Επιβράδυνση που οφείλεται στην ανηφόρα της πίστας
4. Επιτάχυνση με το τέλος της ανηφόρας
5. Τελική επιβράδυνση

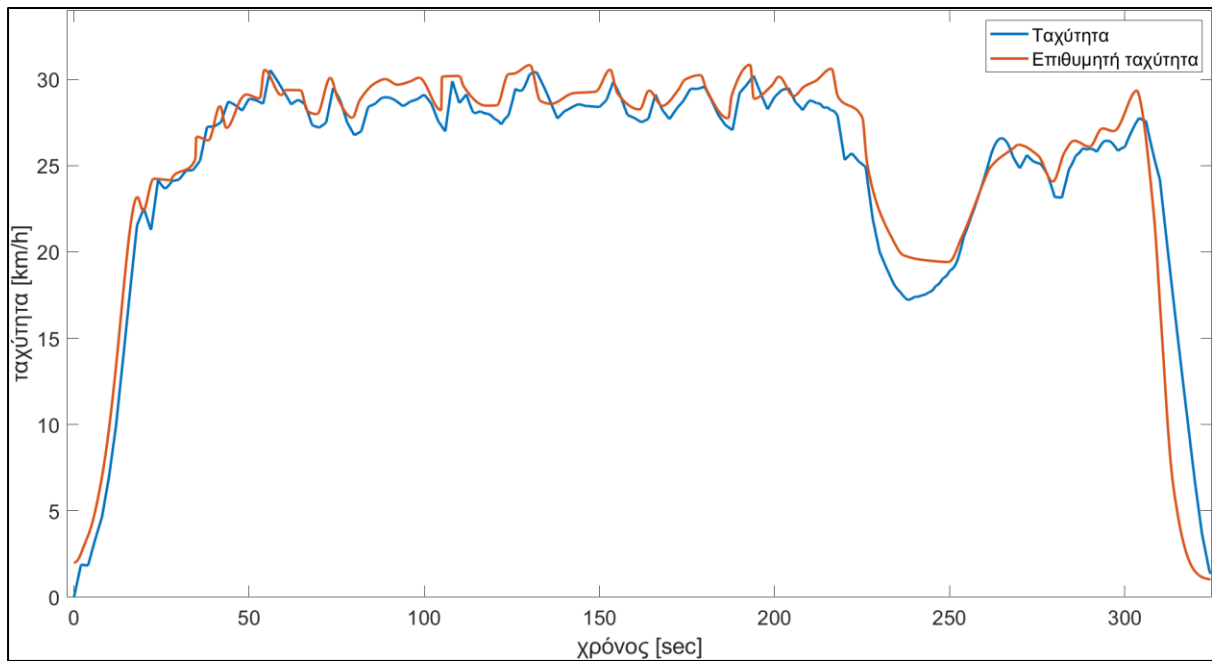
*Διάγραμμα 4. 20 Επιτάχυνση οχήματος*



*Διάγραμμα 4. 21 Ταχύτητα οχήματος χωρίς θόρυβο*

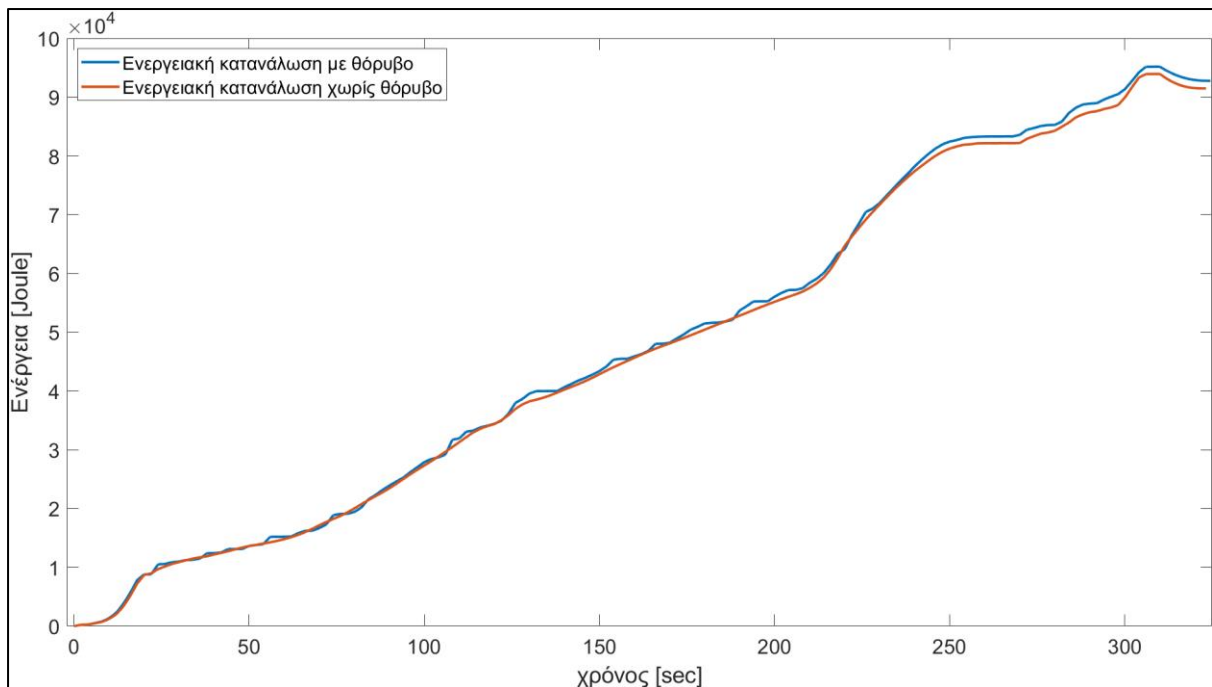


Διάγραμμα 4. 22 Ταχύτητα οχήματος με θόρυβο



Τέλος, στο διάγραμμα 4.23 παρατηρούμε την επίπτωση που μπορεί να έχουν οι αυξομειώσεις ταχύτητας στην ενεργειακή κατανάλωση του οχήματος.

Διάγραμμα 4. 23 Τελική ενεργειακή κατανάλωση οχήματος με και χωρίς θόρυβο



Τα σημαντικά αποτελέσματα της προσομοίωσης συνοψίζονται στους πίνακες 4.4 και 4.5.

*Πίνακας 4. 4 Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς θόρυβο*

<b>Μέση Ταχύτητα</b>	25.00 Km/h
<b>Ενεργειακή Απόδοση</b>	88.31 Km/KWh
<b>Ενεργειακή Απόδοση Με Ιδανικό Κινητήρα</b>	103.1 Km/KWh
<b>Απόδοση Κινητήρα Στον Κύκλο Φόρτισης</b>	85.65%

*Πίνακας 4. 5 Αποτελέσματα προσομοίωσης με θόρυβο*

<b>Μέση Ταχύτητα</b>	25.00 Km/h
<b>Ενεργειακή Απόδοση</b>	84.55 Km/KWh
<b>Ενεργειακή Απόδοση Με Ιδανικό Κινητήρα</b>	103.1 Km/KWh
<b>Απόδοση Κινητήρα Στον Κύκλο Φόρτισης</b>	82.00%

## **4.8.5 Παράμετροι Κινητήρα**

### **4.8.5.1 Χαρακτηριστικά Τυλίγματος**

Τα χαρακτηριστικά τυλίγματος υπολογίστηκαν ως εξής:

Μέση απόσταση μεταξύ 2 διαδοχικών αυλάκων ίδιας φάσης  $W=6\text{cm}$

Ενεργό Μήκος  $L=5\text{cm}$

Μήκος μισού ελίγματος  $l=0.146\text{m}$

Τελικά προκύπτει ότι:

1. Λφάσης= 30.368m
2. Διατομή ομάδας αγωγών  $d= 4.316\text{mm}^2$
3. Ωμική Αντίσταση/φάση  $R_{\text{phase}}=0.1504\Omega$

### **4.8.5.2 Μάζα Κινητήρα**

Στον πίνακα 4.6 παρουσιάζεται η μάζα των επιμέρους κομματιών και η συνολική μάζα του κινητήρα.

Πίνακας 4. 6 Μάζα Κινητήρα

Μέρος	Ποκνότητα Kg/m <sup>3</sup>	Όγκος m <sup>3</sup>	Μάζα Kg
Σώμα Στάτη	7870	0.000520805	4.10
Τύλιγμα Στάτη	8930	0.000393232	3.51
<b>Στάτης (Συνολικά)</b>			<b>7.61</b>
Μαγνήτης	7650	0.000117373	0.90
Σώμα Δρομέα	7870	0.000378657	2.98
Άξονας	7750	0.000073620	0.56
<b>Δρομέας (Συνολικά)</b>			<b>4.44</b>
<b>Συνολική Μάζα Μηχανής</b>			<b>12.05</b>

## 4.9 Παρατηρήσεις

Από τη μελέτη που έγινε, προέκυψαν κάποια συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση ορισμένων χαρακτηριστικών του κινητήρα στην επίδοση του οχήματος. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι η μάζα, ο συντελεστής πληρότητας και ο αριθμός των εν σειρά ελιγμάτων.

### 4.9.1 Επίδραση Μάζας Στην Ενεργειακή Απόδοση Του Οχήματος

Πίνακας 4. 7 Επίδραση της μάζας στην επίδοση του οχήματος

Μάζα Οχήματος (Kg)	Ενεργειακή Απόδοση (Km/KWh)
110	91.94
115	90.21
117	89.49
119	88.62
120	88.31
121	88.00
123	87.31
125	86.45
130	84.93

Παρατηρούμε ότι για κάθε 1Kg, η επίδοση μεταβάλλεται κατά 300-400m.

## 4.9.2 Επίδραση Συντελεστή Πληρότητας Στην Ενεργειακή Απόδοση Του Οχήματος

Για να αναδειχθεί η σημασία του συντελεστή πληρότητας αύλακος, στον πίνακα 4.8 γίνεται μια σύγκριση μεταξύ της ενεργειακής κατανάλωσης του οχήματος με συντελεστή 50% και συντελεστή 60%.

Στον υπολογισμό λήφθηκε υπόψιν η προσθήκη μάζας χαλκού, ώστε να αυξηθεί ο συντελεστής πληρότητας. Η μάζα αυτή υπολογίστηκε περίπου 1Kg.

*Πίνακας 4. 8 Επίδραση συντελεστή πληρότητας στην επίδοση του οχήματος*

<b>Συντελεστής Πληρότητας</b>	<b>50%</b>	<b>60%</b>
<b>Μέση Ταχύτητα</b>	25.00 Km/h	25.00Km/h
<b>Ενεργειακή Απόδοση</b>	84.55 Km/KWh	86.39 Km/KWh
<b>Ενεργειακή Απόδοση Με Ιδανικό Κινητήρα</b>	103.1 Km/KWh	102.7 Km/KWh
<b>Απόδοση Κινητήρα Στον Κύκλο Φόρτισης</b>	82,00%	84,11%
<b>Συνάρτηση Κόστους Z</b>	0,3382	0,3106

Η αύξηση του συντελεστή πληρότητας από 50% σε 60%, βελτιώνει την επίδοση κατά περίπου 1.84Km, δηλαδή κατά 2.17% και μειώνει τη συνάρτηση κόστους κατά 8.16%.

Δε πρέπει, επίσης, να ξεχνάμε, ότι η αύξηση του συντελεστή πληρότητας βελτιώνει και τις απώλειες χαλκού με αποτέλεσμα ο κινητήρας να λειτουργεί σε μικρότερη θερμοκρασία. Η μικρότερη θερμοκρασία μεταφράζεται σε:

1. Μειωμένη αντίσταση τυλίγματος, κάτι που οδηγεί σε περαιτέρω μείωση των απωλειών και ακόμα χαμηλότερη θερμοκρασία
2. Μείωση του κινδύνου απομαγνήτισης

Από αυτή τη μελέτη προκύπτει ένα βασικό συμπέρασμα για την κατασκευή του κινητήρα. Παρά το γεγονός ότι στη μελέτη θεωρήθηκε συντελεστής πληρότητας 50%, αντικειμενικός σκοπός της κατασκευής είναι η μεγιστοποίηση του εν λόγω συντελεστή.

### 4.9.3 Επίδραση Αριθμού Εν Σειρά Ελιγμάτων Στην Ενεργειακή Απόδοση Του Οχήματος

Για να αναδειχθεί η σημασία του αριθμού των εν σειρά ελιγμάτων, στον πίνακα 4.9, γίνεται μια σύγκριση μεταξύ της ενεργειακής επίδοσης του οχήματος, για διάφορες τιμές ενεργών εν σειρά ελιγμάτων ανά αύλακα. Στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε ψευδοτυχαίος θόρυβος διαφορετικής ισχύος.

*Πίνακας 4. 9 Επίδραση ενεργών εν σειρά ελιγμάτων στην επίδοση του οχήματος για διάφορες περιπτώσεις θορύβου*

<b>Ενεργά Εν Σειρά Ελίγματα Ανά Αύλακα</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
<b>Ενεργειακή Απόδοση (Km/KWh) χωρίς θόρυβο</b>	88.31	88.31	88.31	88.31	88.15	78.78	63.12	49.98
<b>Ενεργειακή Απόδοση (Km/KWh) με χαμηλό θόρυβο</b>	86.24	86.24	86.24	86.24	85.12	77.62	65.15	53.63
<b>Ενεργειακή Απόδοση (Km/KWh) με έντονο θόρυβο</b>	79.10	78.92	76.30	72.03	66.90	66.57	62.72	57.52
<b>Ενεργειακή Απόδοση Με Ιδανικό Κινητήρα (Km/KWh) χωρίς θόρυβο</b>	103.1	103.1	103.1	103.1	103.1	103.1	103.1	103.1
<b>Ενεργειακή Απόδοση Με Ιδανικό Κινητήρα (Km/KWh) με χαμηλό θόρυβο</b>	102.6	102.6	102.6	102.6	102.6	102.6	102.6	102.6
<b>Ενεργειακή Απόδοση Με Ιδανικό Κινητήρα (Km/KWh) με έντονο θόρυβο</b>	101	101	101	101	101	101	101	101
<b>Απόδοση Κινητήρα Στον Κύκλο Φόρτισης % χωρίς θόρυβο</b>	85.65	85.65	85.65	85.65	85.50	76.41	61.22	48.48
<b>Απόδοση Κινητήρα Στον Κύκλο Φόρτισης % με χαμηλό θόρυβο</b>	84.05	84.05	84.05	84.05	82.96	75.65	63.50	52.27
<b>Απόδοση Κινητήρα Στον Κύκλο Φόρτισης % με έντονο θόρυβο</b>	78.31	78.13	75.54	71.32	66.24	65.91	62.10	56.95

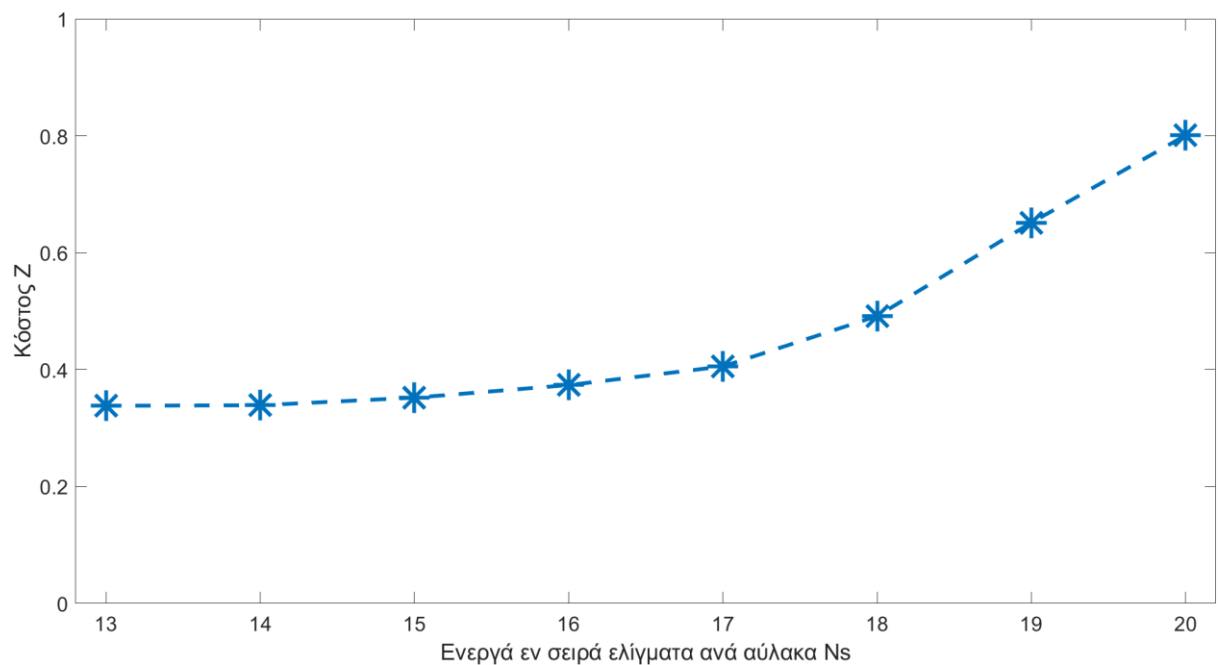
Από τον πίνακα 4.9 παρατηρούμε, ότι για  $N_s=13$  ο κινητήρας αποκρίνεται επαρκώς σε όλο το εύρος θορύβων που εξετάστηκαν, δηλαδή είναι εύρωστος ως προς τις μεταβολές της επιθυμητής ταχύτητας.

Στον πίνακα 4.10 και στο διάγραμμα 4.24 φαίνεται η επίδραση του αριθμού των ενεργών εν σειρά ελιγμάτων ανά αύλακα στη συνάρτηση κόστους.

*Πίνακας 4. 10 Επίδραση ενεργών εν σειρά ελιγμάτων ανά αύλακα στη συνάρτηση κόστους*

Ns	Συνάρτηση Κόστους Z	Αύξηση Κόστους
13	0,3382	
14	0,3391	0,27%
15	0,3521	4,11%
16	0,3736	10,47%
17	0,4055	19,90%
18	0,4916	45,36%
19	0,6515	92,64%
20	0,8008	136,78%

*Διάγραμμα 4. 24 Επίδραση ενεργών εν σειρά ελιγμάτων ανά αύλακα στη συνάρτηση κόστους*





## Κεφάλαιο 5

# Ανάλυση Ευρωστίας Και Ανάλυση Ευαισθησίας Μηχανής Σε Σφάλματα Μονίμων Μαγνητών

Σε αυτό το κεφάλαιο συγκρίνονται 2 εναλλακτικά υλικά μονίμου μαγνήτη. Τα υλικά αυτά είναι το «NdFeB τύπου N50» και το «SmCo τύπου SmCo32 (2:17)» και γίνεται επιλογή με κριτήρια ευρωστίας. [30] [31]

Οι ιδιότητες των υλικών αυτών έχουν αναφερθεί στην [ενότητα 3.6](#).

Τα υλικά μελετώνται σε δύο προβληματικές καταστάσεις: Την απομαγνήτιση λόγω αύξησης θερμοκρασίας και την εσφαλμένη-ανακριβή τοποθέτηση. Γίνεται σύγκριση μεταξύ των 2 υλικών στις προβληματικές συνθήκες και τελικά επιλέγεται το υλικό που ανταποκρίνεται καλύτερα ακόμα και στις δυσμενέστερες συνθήκες. Για τη μελέτη αυτή χρησιμοποιούνται οι μεθοδολογίες που αναλύθηκαν στην [ενότητα 4.4 \(ανάλυση μηχανής με το λογισμικό FEMM\)](#).

### 5.1 Ομοιόμορφη Απομαγνήτιση Λόγω Αύξησης Θερμοκρασίας

Σε αυτήν την ενότητα εξετάζεται η επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας λειτουργίας των μονίμων μαγνητών στην επίδοση του κινητήρα.

Θεωρούμε ότι η παραμένουσα μαγνήτιση  $B_r$  και η συνεχούσα δύναμη  $H_c$  των μαγνητών N50 δίνεται από τους τύπους:

$$B_{r_{N50}}(\theta) = 1.20 - 0.002 \cdot (\theta - 60) \text{ για } \theta < 80$$

$$H_{c_{N50}}(\theta) = \frac{B_r(\theta) \cdot 10^7}{1.05 \cdot 4\pi} \text{ για } \theta < 80$$

Αντίστοιχα για μαγνήτη SmCo32 (2:17)

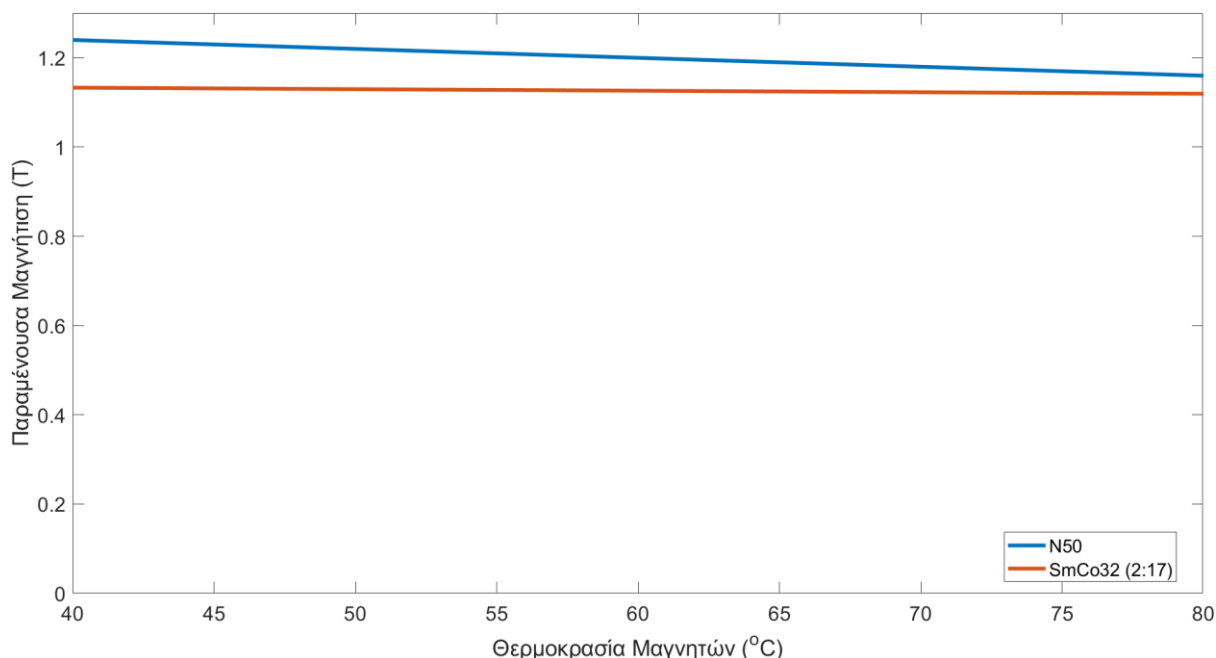
$$B_{r_{SmCo32 (2:17)}}(\theta) = 1.14 - 0.0003 \cdot 1.14(\theta - 20)$$

$$H_{c_{SmCo32 (2:17)}}(\theta) = \frac{B_r(\theta) \cdot 10^7}{1.1 \cdot 4\pi}$$

Για τα 2 εναλλακτικά υλικά, ο κινητήρας προσομοιώθηκε σε ένα εύρος θερμοκρασιών από 40 έως και 80°C.

Στο διάγραμμα 5.1 φαίνεται η μεταβολή της παραμένουσας μαγνήτισης κάθε υλικού σε συνάρτηση της θερμοκρασίας.

Διάγραμμα 5. 1 Μεταβολή της παραμένουσας μαγνήτισης, σε συνάρτηση της θερμοκρασίας



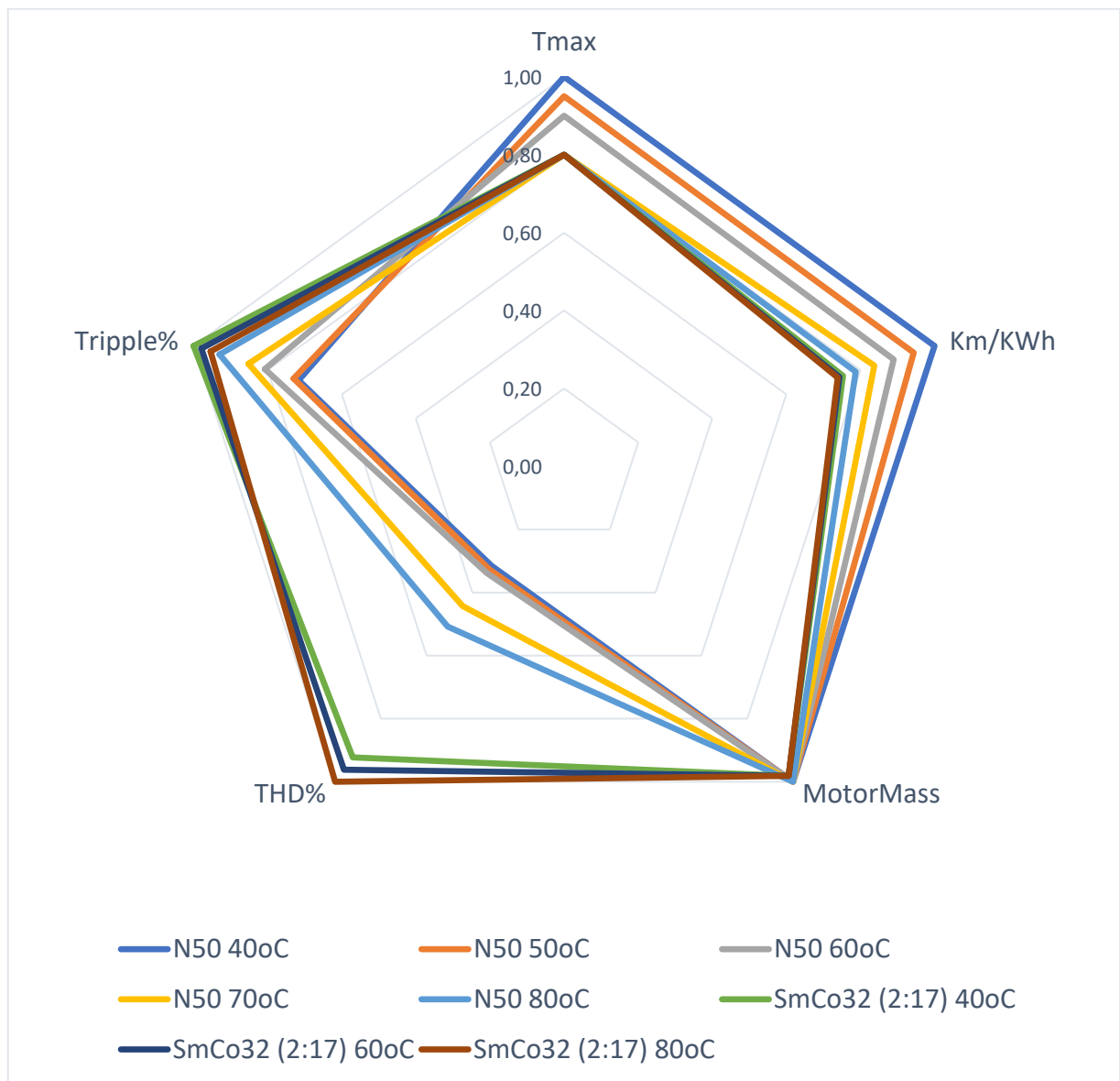
Το διάγραμμα 5.2 είναι ένα κανονικοποιημένο διάγραμμα Taguchi, στο οποίο αποτυπώνονται τα κριτήρια αξιολόγησης για κάθε υλικό και θερμοκρασία λειτουργίας. Το «0» της κλίμακας αντιπροσωπεύει τους περιορισμούς που έχουν τεθεί, ενώ το «1» της κλίμακας είναι η βέλτιστη τιμή που παρατηρήθηκε. Στο διάγραμμα παρατηρούμε ότι και τα 2 υλικά τηρούν την ευρωστία των περιορισμών για όλο το εύρος θερμοκρασιών. Επίσης, βλέπουμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την ενεργειακή απόδοση του οχήματος, η οποία αποτελεί το σημαντικότερο κριτήριο της εφαρμογής. Ταυτόχρονα βελτιώνεται η κυμάτωση ροπής και η παραμόρφωση της τάσης, κριτήρια τα οποία είναι δευτερεύουσας σημασίας στην εφαρμογή.

Τέλος, στο διάγραμμα 5.3 φαίνεται η μεταβολή της συνάρτησης κόστους σε συναρτήση της θερμοκρασίας, για τα 2 είδη μαγνήτη. Εκεί παρατηρούμε, ότι:

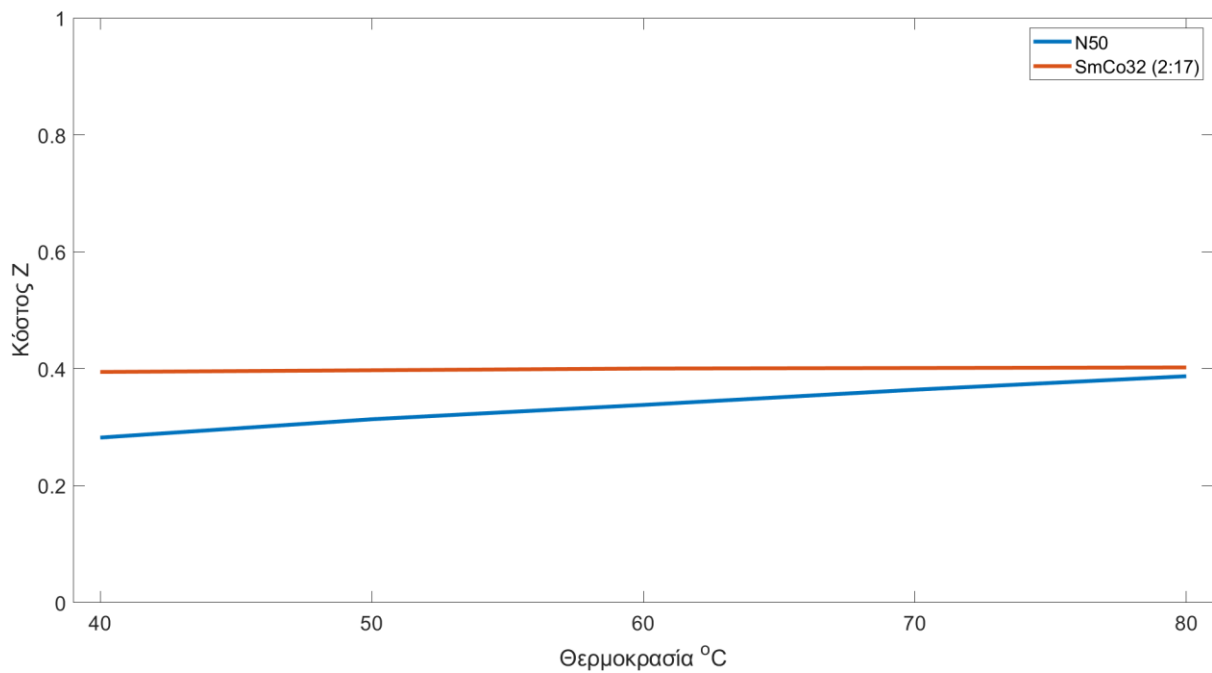
- Για το μαγνήτη N50 η συνάρτηση κόστους μεταβάλλεται αισθητά. Αυτό συμβαίνει, διότι η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την τιμή του σημαντικότερου κριτηρίου αξιολόγησης, της ενεργειακής απόδοσης του οχήματος.
- Για το μαγνήτη SmCo32 (2:17) η συνάρτηση κόστους αυξάνεται ελαφρώς.

Επίσης, από το διάγραμμα 5.3 συμπεραίνουμε ότι οι μαγνήτες N50 είναι καταλληλότεροι για την εφαρμογή. Αν και ο κινητήρας είναι πιο ευαίσθητος στην αύξηση της θερμοκρασίας, είναι εύρωστος σε όλο το εύρος θερμοκρασιών, ενώ ταυτόχρονα η συνάρτηση κόστους έχει μικρότερη τιμή, ακόμη και στην ακραία θερμοκρασία των 80°C.

Διάγραμμα 5. 2 Κανονικοποιημένο διάγραμμα Taguchi για εύρος θερμοκρασιών και εναλλακτικά υλικά μαγνήτη.



Διάγραμμα 5. 3 Κόστος σε συνάρτηση της θερμοκρασίας

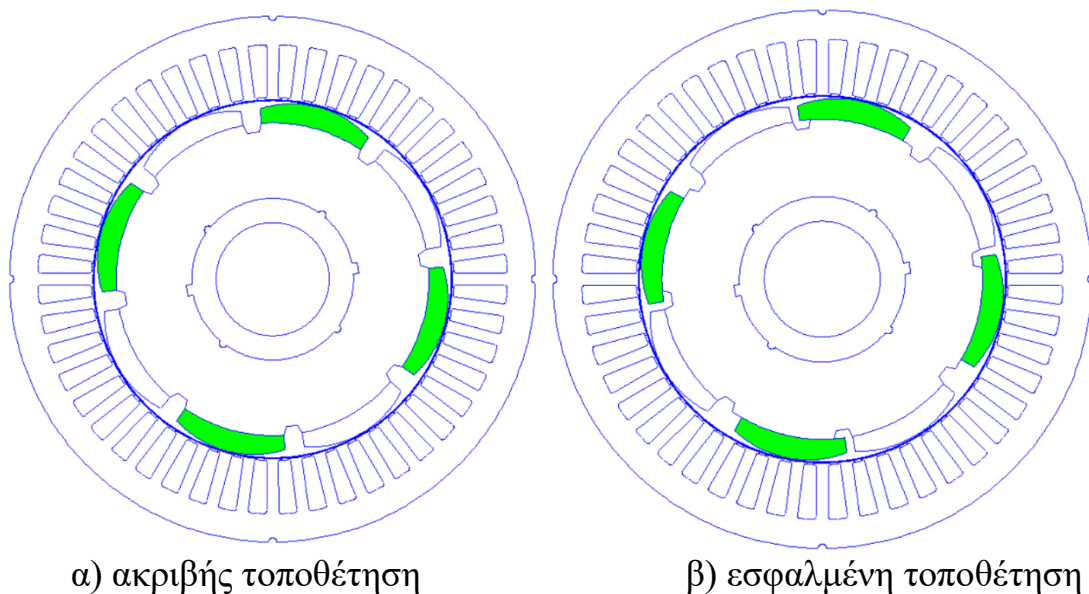


## 5.2 Σφάλμα Τοποθέτησης Μαγνητών

Σε αυτήν την ενότητα εξετάζεται η επίδραση της ακρίβειας τοποθέτησης των μονίμων μαγνητών στη συνάρτηση κόστους.

Στα σχήματα 5.1α και 5.1β αναπαρίστανται η ακριβής και ανακριβής τοποθέτηση των μονίμων μαγνητών.

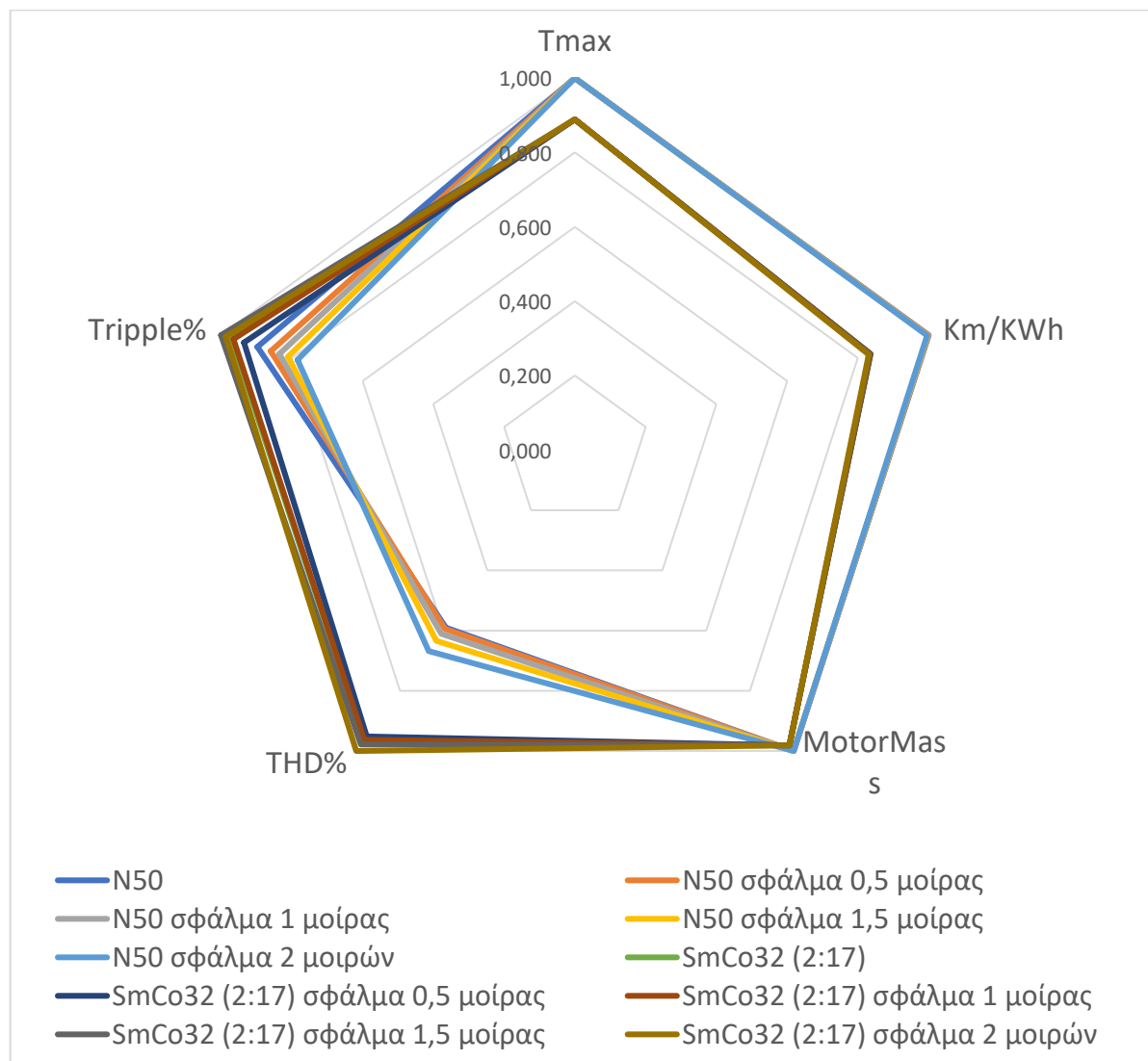
Σχήμα 5. 1 Ακρίβεια τοποθέτησης μαγνητών



Στο συγκεκριμένο κινητήρα η γεωμετρία του δρομέα δεν αφήνει μεγάλα περιθώρια σφάλματος. Γι' αυτό, το σφάλμα μελετάται σε εύρος 2 μηχανικών μοιρών.

Το διάγραμμα 5.4 είναι ένα κανονικοποιημένο διάγραμμα Taguchi, στο οποίο αποτυπώνονται τα κριτήρια αξιολόγησης για κάθε υλικό και σφάλμα τοποθέτησης. Το «0» της κλίμακας αντιπροσωπεύει τους περιορισμούς που έχουν τεθεί, ενώ το «1» της κλίμακας είναι η βέλτιστη τιμή που παρατηρήθηκε. Στο διάγραμμα παρατηρούμε ότι και τα 2 υλικά τηρούν την ευρωστία των περιορισμών για όλο το εύρος θερμοκρασιών.

Διάγραμμα 5. 4 Κανονικοποιημένο διάγραμμα Taguchi για εύρος σφαλμάτων τοποθέτησης και εναλλακτικά υλικά μαγνήτη.

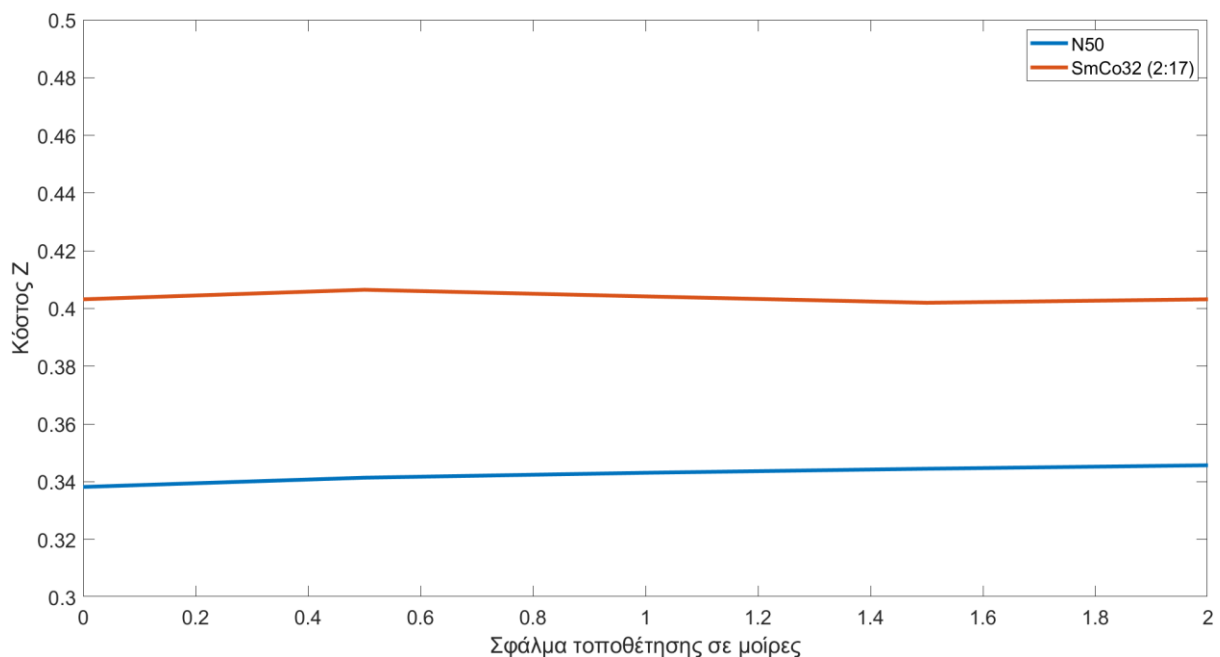


Τέλος, στο διάγραμμα 5.5 φαίνεται η μεταβολή της συνάρτησης κόστους σε συναρτήση του σφάλματος τοποθέτησης, για τα 2 είδη μαγνήτη. Παρατηρούμε ότι:

- Για το μαγνήτη N50 το κόστος αυξάνεται όσο αυξάνεται το σφάλμα. Αυτό συμβαίνει λόγω της αύξησης της κυμάτωσης ροπής. Η μεταβολή κόστους είναι μικρή διότι η κυμάτωση ροπής είναι κριτήριο με χαμηλή βαρύτητα.
- Για το μαγνήτη SmCo32 (2:17) το κόστος παραμένει πρακτικά σταθερό. Αυτό συμβαίνει διότι ο πυρήνας είναι ακόρεστος και δεν επηρεάζεται η κυμάτωση ροπής.

Επίσης, στο διάγραμμα 5.5 παρατηρούμε ότι τα υλικά εμφανίζουν παρόμοια ευαισθησία σε αυτό το είδος σφάλματος και ότι ο μαγνήτης N50 είναι καταλληλότερος για την εφαρμογή.

Διάγραμμα 5. 5 Κόστος σε συνάρτηση του σφάλματος τοποθέτησης



## 5.3 Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα

### 5.3.1 Επίδραση Θερμοκρασίας Στην Ενεργειακή Κατανάλωση Του Οχήματος

Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την παραμένουσα μαγνήτιση με αποτέλεσμα ο κινητήρας να χρειάζεται μεγαλύτερες τιμές ρεύματος, να αυξάνονται οι ωμικές απώλειες και να μειώνεται η ενεργειακή απόδοση του οχήματος.

Στον πίνακα 5.1 φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας στην ενεργειακή απόδοση του οχήματος για τους 2 τύπους μαγνήτη, καθώς και η σύγκριση με την αναμενόμενη θερμοκρασία των 60°C.

Πίνακας 5. 1 Επίδραση θερμοκρασίας στην ενεργειακή απόδοση

Θερμοκρασία Μαγνήτη	N50		SmCo32 (2:17)	
	Km/KWh	Μεταβολή	Km/KWh	Μεταβολή
40°C	88,83	+5,06%	79,24	+0,47%
50 °C	86,65	+2,48%		
60 °C	84,55		78,87	
70 °C	82,52	-2,40%		
80 °C	80,57	-4,71%	78,79	-0.10%

Από τον πίνακα βλέπουμε ότι ο μαγνήτης N50 έχει μια υπολογίσιμη μεταβολή της επίδοσης στο εύρος των πιθανών θερμοκρασιών, σε αντίθεση με το μαγνήτη SmCo32 (2:17), ο οποίος έχει πρακτικά σταθερή συμπεριφορά.

### 5.3.2 Επίδραση Υλικού Στην Ενεργειακή Απόδοση Του Οχήματος Και Το Κόστος Σε Συνάρτηση Της Θερμοκρασίας Μαγνήτη

Στους πίνακες 5.2 και 5.3 φαίνονται, για ένα εύρος θερμοκρασιακών μεταβολών, οι μεταβολές που θα προέκυπταν με την αντικατάσταση μαγνήτη N50 από μαγνήτη SmCo32 (2:17) στην ενεργειακή απόδοση και στο κόστος, αντίστοιχα.

Πίνακας 5. 2 Επίδραση υλικού μαγνήτη στην ενεργειακή απόδοση σε συναρτήση της θερμοκρασίας

	N50	SmCo32 (2:17)	
Θερμοκρασία Μαγνήτη	Km/KWh	Km/KWh	Μείωση Επίδοσης
40 °C	88,83	79,24	10,80%
60 °C	84,55	78,87	6,72%
80 °C	80,57	78,79	2,21%

Πίνακας 5. 3 Επίδραση υλικού μαγνήτη στο κόστος σε συναρτήση της θερμοκρασίας

	N50	SmCo32 (2:17)	
Θερμοκρασία Μαγνήτη	Κόστος Z	Κόστος Z	Αύξηση Κόστους
40 °C	0,282	0,395	40,07%
60 °C	0,3382	0,4032	19,22%
80 °C	0,387	0,402	3,88%

Αν και το υλικό SmCo32 (2:17) είναι ανθεκτικότερο στην αύξηση θερμοκρασίας, τελικά το N50 κρίνεται καταλληλότερο. Αυτό συμβαίνει διότι:

1. Το κέρδος της ενεργειακής απόδοσης έχει μεγάλη βαρύτητα για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.
2. Η χρήση N50 πλεονεκτεί σε όλο το εύρος θερμοκρασιών, ακόμα και για θερμοκρασία 80°C, η οποία είναι ακραία περίπτωση για δρομέα αργών στροφών.

### 5.3.3 Επίδραση Σφάλματος Τοποθέτησης Στην Κυμάτωση Ροπής

Για κινητήρα μαγνήτη N50 η εσφαλμένη τοποθέτηση των μαγνητών επηρεάζει κυρίως την κυμάτωση ροπής του κινητήρα. Αντίθετα, για μαγνήτη SmCo32 (2:17) η κυμάτωση ροπής μένει πρακτικά σταθερή.

Στον πίνακα 5.4 φαίνεται η επίδραση του σφάλματος τοποθέτησης στην κυμάτωση ροπής για τους 2 τύπους μαγνήτη, καθώς και η σύγκριση με την ακριβή τοποθέτηση.



Πίνακας 5. 4 Επίδραση σφάλματος τοποθέτησης στην κυμάτωση ροπής

Σφάλμα σε μοίρες	N50		SmCo32 (2:17)	
	Tripple%	Μεταβολή	Tripple%	Μεταβολή
0	6,68		6,41	
0,5	6,82	+2,10%	6,54	+2,03%
1	6,91	+3,44%	6,43	+0,31%
1,5	7,00	+4,79%	6,3	-1,72%
2	7,10	+6,29%	6,35	-0,94%

### 5.3.4 Επίδραση Υλικού Στην Κυμάτωση Ροπής Και Το Κόστος Σε Συνάρτηση Του Σφάλματος Τοποθέτησης

Στους πίνακες 5.5 και 5.6 φαίνονται για ένα εύρος σφαλμάτων τοποθέτησης μαγνήτη, οι μεταβολές που θα προέκυπταν με την αντικατάσταση μαγνήτη N50 από μαγνήτη SmCo32 (2:17) στην κυμάτωση ροπής και στο κόστος αντίστοιχα.

Πίνακας 5. 5 Επίδραση υλικού μαγνήτη στην κυμάτωση ροπής σε συνάρτηση του σφάλματος τοποθέτησης

Σφάλμα σε μοίρες	N50	SmCo32 (2:17)	
	Tripple%	Tripple%	Μείωση Κυμάτωσης
0	6,68	6,41	4,04%
0,5	6,82	6,54	4,11%
1	6,91	6,43	6,95%
1,5	7,00	6,3	10,00%
2	7,10	6,35	10,56%

Πίνακας 5. 6 Επίδραση υλικού μαγνήτη στο κόστος ροπής σε συνάρτηση του σφάλματος τοποθέτησης

Σφάλμα σε μοίρες	N50	SmCo32 (2:17)	
	Κόστος Z	Κόστος Z	Αύξηση Κόστους
0	0,3382	0,4032	19,22%
0,5	0,3414	0,4065	19,07%
1	0,3431	0,4042	17,81%
1,5	0,3445	0,4020	16,69%
2	0,3457	0,4032	16,63%

Παρατηρούμε ότι, για δεδομένο σφάλμα, ο μαγνήτης N50 προκαλεί μεγαλύτερη κυμάτωση ροπής σε σχέση με τον μαγνήτη SmCo32 (2:17).

Αν και το υλικό SmCo<sub>32</sub> (2:17) είναι ανθεκτικότερο στο σφάλμα τοποθέτησης, τελικά το N50 κρίνεται καταλληλότερο. Αυτό συμβαίνει διότι:

1. Με τη χρήση N50 η κυμάτωση ροπής είναι αρκετά μακριά από τους περιορισμούς.
2. Η διαφορά στην κυμάτωση ροπής για τα 2 υλικά είναι μικρή.
3. Το κέρδος της ενεργειακής απόδοσης έχει πολύ μεγαλύτερη βαρύτητα στη συγκεκριμένη εφαρμογή.

### 5.3.5 Επιλογή Βέλτιστου Μαγνήτη Για Την Εφαρμογή

Από την ανάλυση που έγινε στις προηγούμενες ενότητες καταλληλότερο υλικό κρίνεται ο μαγνήτης NdFeB τύπου N50, αφού πλεονεκτεί σε όλο το εύρος θερμοκρασιών και σφαλμάτων, ενώ ταυτόχρονα ο κινητήρας είναι εύρωστος ως προς τους περιορισμούς που έχουν τεθεί.

### 5.3.6 Συγκριτική Μελέτη Κινητήρων

Σε αυτό το σημείο θα γίνει μια συγκριτική μελέτη μεταξύ των παρακάτω κινητήρων:

1. Κινητήρας «195mm, N50», ο κινητήρας διαμέτρου 195mm, με μαγνήτη N50, σε θερμοκρασία 60°C, χωρίς σφάλμα τοποθέτησης. Ο βέλτιστος κινητήρας που σχεδιάστηκε.
2. Κινητήρας «195mm, SmCo<sub>32</sub> (2:17)»
3. Κινητήρας «190mm, N50»
4. Κινητήρας «195mm N50, 80°C»
5. Κινητήρας «195mm SmCo<sub>32</sub> (2:17), 80°C»
6. Κινητήρας «195mm, N50, σφάλμα τοποθέτησης 2 μοιρών»
7. «Αρχικός κινητήρας», ο κινητήρας που σχεδιάστηκε στην [1] και αποτέλεσε το σημείο έναρξης της παρούσας εργασίας.

Τα αποτελέσματα για τους παραπάνω κινητήρες συνοψίζονται στον πίνακα 5.1 και στο διάγραμμα 5.6.

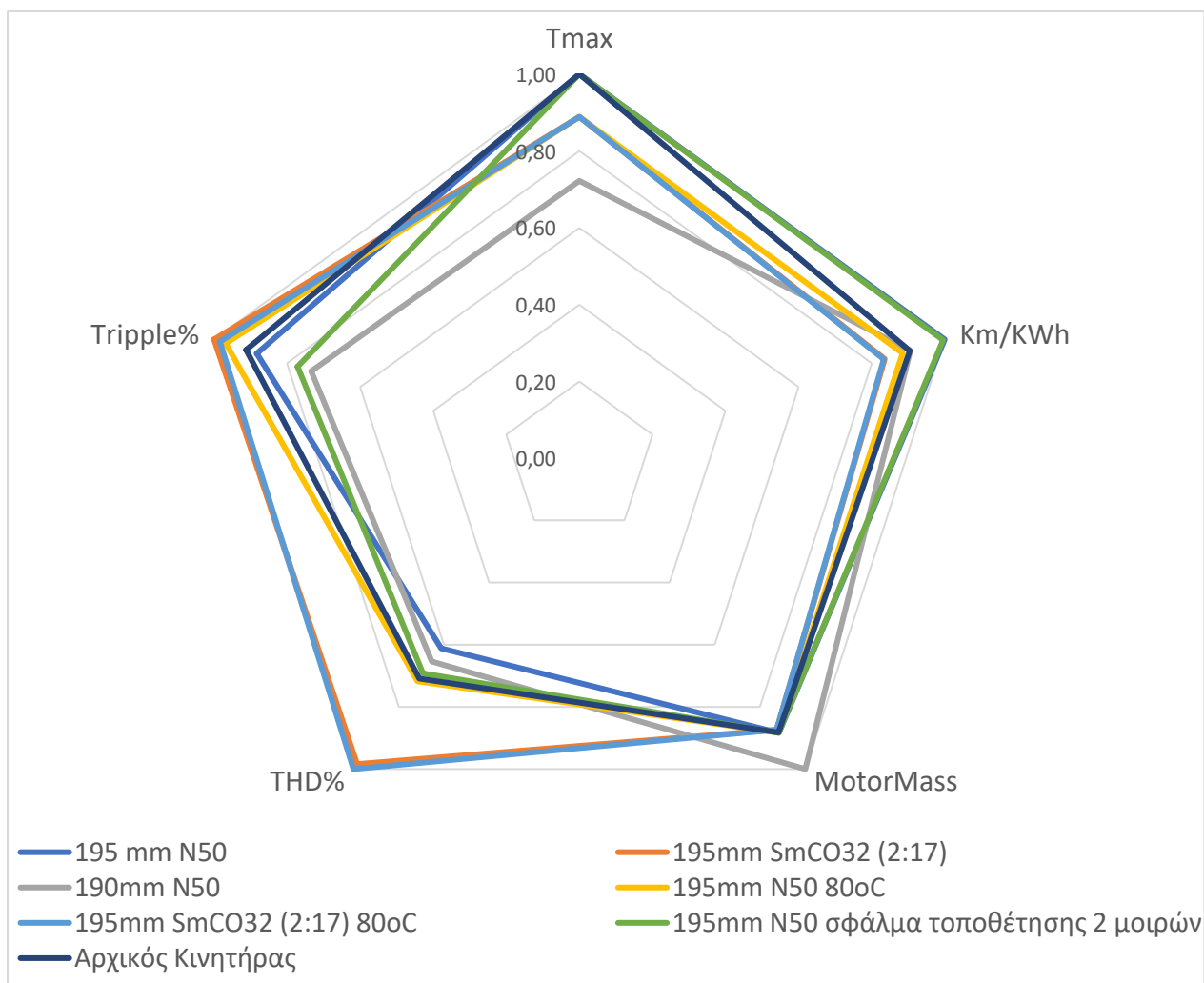
Στον πίνακα 5.5 αποτυπώνονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν για κάθε κριτήριο αξιολόγησης και το τελικός κόστος. Αξίζει να σχολιαστεί, ότι ο τελικός κινητήρας εμφανίζει κόστος 11.4% μικρότερο σε σχέση με τον αρχικό κινητήρα.

Το διάγραμμα 5.6 είναι ένα κανονικοποιημένο διάγραμμα Taguchi. Το «0» της κλίμακας αντιπροσωπεύει τους περιορισμούς (χειρότερη περίπτωση), ενώ το «1» της κλίμακας αντιπροσωπεύει τη βέλτιστη τιμή που εντοπίστηκε.

Πίνακας 5. 7 Συγκριτική Μελέτη Κινητήρων

	Tmax	KWh/Km	MotorMass	THD%	Tripple%	Z
<b>195 mm N50</b>	68	84,55	12,05	12,75	6,68	0,3382
<b>195mm SmCO32 (2:17)</b>	66	78,87	12,14	8,33	6,24	0,4004
<b>190mm N50</b>	63	81,30	11,00	12,25	7,24	0,3895
<b>195mm N50 80oC</b>	66	80,57	12,05	11,49	6,36	0,3873
<b>195mm SmCO32 (2:17) 80oC</b>	66	78,79	12,14	8,14	6,30	0,4022
<b>195mm N50 σφάλμα τοποθέτησης 2 μοιρών</b>	68	84,40	12,05	11,79	7,10	0,3456
<b>Αρχικός Κινητήρας</b>	68	81,25	12,06	11,59	6,57	0,3817

Διάγραμμα 5. 6 Συγκριση κινητήρων με κανονικοποιημένο διάγραμμα Taguchi



## Κεφάλαιο 6: Σύνοψη Και Συμπεράσματα

### 6.1 Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τον εύρωστο σχεδιασμό ενός κινητήρα επιφανειακών μαγνητών για χρήση σε όχημα εξοικονόμησης ενέργειας. Ο σκοπός της μελέτης είναι η τροποποίηση ενός ήδη σχεδιασμένου κινητήρα, ώστε να ανταποκρίνεται κατά βέλτιστο τρόπο στις νέες απαιτήσεις και να είναι εύρωστος σε θερμοκρασιακές μεταβολές και κατασκευαστικά σφάλματα.

### 6.2 Αποτελέσματα

#### 6.2.1 Μεθοδολογία

Στο πρώτο βήμα γίνεται μια προκαταρκτική μελέτη, ώστε να υπολογιστούν οι απαιτήσεις της εφαρμογής σε ροπή και στροφές.

Στη συνέχεια, γίνεται μια διερεύνηση σχετικά με το συντελεστή πληρότητας και με βάση τα αποτελέσματα προτείνονται τροποποιήσεις, οι οποίες μειώνουν τη μάζα της μηχανής και απλοποιούν την κατασκευαστική διαδικασία. Προτείνονται δύο γεωμετρίες.

Έπειτα, γίνεται μελέτη του κύκλου φόρτισης, ώστε να δημιουργηθεί μια προσομοίωση της εφαρμογής και ορίζεται η «αντικειμενική συνάρτηση». Γίνεται ανάλυση των γεωμετριών, τα αποτελέσματα εισάγονται στην προσομοίωση και μέσω της «αντικειμενικής συνάρτησης», γίνεται η επιλογή της βέλτιστης γεωμετρίας και του αριθμού των ενεργών εν σειρά ελιγμάτων ανά αύλακα.

Τέλος, γίνεται μια μελέτη ευρωστίας σε θερμοκρασιακές μεταβολές και κατασκευαστικές ατέλειες. Συγκρίνεται η συμπεριφορά μαγνητών NdFeb και SmCo και γίνεται η επιλογή του βέλτιστου υλικού με κριτήρια ευρωστίας.

## 6.2.2 Ο Τελικός Κινητήρας

Τα χαρακτηριστικά του κινητήρα συγκεντρώνονται στους πίνακες 6.1-6.4.

*Πίνακας 6. 1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Κινητήρα*

<b>Τοπολογία Μαγνητών</b>	<b>Επιφανειακοί</b>
<b>Αριθμός Αυλάκων</b>	48
<b>Αριθμός Πόλων</b>	8
<b>Αύλακες Ανά Πόλο Και Φάση</b>	2
<b>Αριθμός Φάσεων</b>	3
<b>Ενεργό Μήκος</b>	50mm
<b>Διάμετρος Διακένου</b>	132mm
<b>Πάχος Διακένου</b>	0.7mm
<b>Διάμετρος Στάτη</b>	195mm
<b>Μάζα Μηχανής</b>	12.05Kg

*Πίνακας 6. 2 Χαρακτηριστικά Τυλίγματος*

<b>Τοπολογία Τυλίγματος</b>	<b>Κατανεμημένο Βροχτούλιγμα Απλής Στρώσης Με Επικάλυψη Μεταξύ Των Φάσεων</b>
<b>Ενεργά Εν Σειρά Ελίγματα Ανά Αύλακα</b>	13
<b>Μήκος Τυλίγματος</b>	30.368m/φάση
<b>Διατομή Ομάδας Αγωγών</b>	4.3161mm <sup>2</sup>
<b>Συντελεστής Πληρότητας</b>	50%
<b>Αντίσταση Τυλίγματος</b>	0.1504 Ω
<b>Μονωτικό Περιβλήμα Αγωγών</b>	Enoflex 180
<b>Μονωτικό Μεταξύ Αγωγού Και Σώματος Κινητήρα</b>	Nomex

Οι διαθέσιμες επιλογές για την κατασκευή του τυλίγματος παρατίθενται στο [Παράρτημα](#).

Πίνακας 6. 3 Χαρακτηριστικά Μαγνητών

<b>Τύπος Μαγνήτη</b>	<b>N50 (NdFeB)</b>
<b>Θερμοκρασία T<sub>w</sub></b>	80°C
<b>Παραμένουσα Μαγνήτιση B<sub>r</sub></b>	1.17-1.21T
<b>Συνεχούσα Δύναμη H<sub>cb</sub></b>	868KA/m
<b>Συνεχούσα Δύναμη H<sub>cj</sub></b>	955KA/m

Πίνακας 6. 4 Λειτουργικά Χαρακτηριστικά

<b>Ονομαστική Ροπή</b>	<b>11Nm</b>
<b>Ονομαστική Ταχύτητα</b>	300RPM
<b>Ονομαστικό Ρεύμα</b>	0.82A/mm <sup>2</sup> αύλακος 1.64A/mm <sup>2</sup> χαλκού 7.08A ρεύμα αγωγού
<b>Ονομαστικός Βαθμός Απόδοσης</b>	92.25%
<b>Ονομαστική Κυμάτωση Ροπής</b>	6.68%
<b>Μέγιστη Ροπή</b>	68Nm
<b>Ρεύμα για Μέγιστη Ροπή</b>	5A/mm <sup>2</sup> αύλακος 10A/mm <sup>2</sup> χαλκού 43.16A ρεύμα αγωγού
<b>Ενεργειακή Απόδοση Οχήματος Στον Κύκλο Φόρτισης</b>	84.55 Km/KWh
<b>Απόδοση Κινητήρα Στον Κύκλο Φόρτισης</b>	82.00%

## 6.3 Συμπεράσματα

Σε αυτήν την ενότητα συνοψίζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν κατά την εκπόνηση της εργασίας.

### 6.3.1 Επίδραση Μάζας Στην Ενεργειακή Απόδοση Του Οχήματος

Η μάζα του κινητήρα και κατ' επέκτασιν ολόκληρου του οχήματος παίζει σημαντικό ρόλο στην ενεργειακή απόδοση του οχήματος.

Για κάθε 1Kg που προστίθεται ή αφαιρείται από το όχημα, η ενεργειακή απόδοση μειώνεται ή αυξάνεται, αντίστοιχα, κατά  $\approx 350\text{m/KWh}$ .

Η μείωση μαγνητικού κυκλώματος έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση μάζας κινητήρα κατά 1Kg, δηλαδή 7.7% της αρχικής μάζας κινητήρα και 0.82% της αρχικής μάζας οχήματος. Η εξοικονόμηση ενέργειας αυξάνεται κατά 0.35% και το κόστος μειώνεται κατά 1.52%.

### **6.3.2 Επίδραση Συντελεστή Πληρότητας Στην Ενεργειακή Απόδοση Του Οχήματος**

Ο συντελεστής πληρότητας των αυλάκων είναι ο πιο κρίσιμος παράγοντας στην ενεργειακή απόδοση του κινητήρα και κατ' επέκτασιν του οχήματος.

Μια αύξηση 10% του συντελεστή αύξησε την ενεργειακή απόδοση κατά περίπου 1.84Km/KWh, δηλαδή κατά 2.17%, παρά την αύξηση της μάζας κατά 1Kg. Το κόστος μειώνεται κατά 8.16%

Η τελική τιμή του συντελεστή πληρότητας αύλακος θα προσδιοριστεί κατά την κατασκευαστική διαδικασία, όμως, θα πρέπει να καταβληθεί προσπάθεια, ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή τιμή.

### **6.3.3 Επίδραση Αριθμού Εν Σειρά Ελιγμάτων Στην Ενεργειακή Απόδοση Του Οχήματος**

Η αύξηση του αριθμού των εν σειρά ελιγμάτων αυξάνει την ΑΗΕΔ στα τυλίγματα και περιορίζει το εύρος ταχυτήτων, για τις οποίες ο κινητήρας λειτουργεί με έλεγχο μέγιστης ροπής ανά Ampere (MTPA), δηλαδή με το βέλτιστο τρόπο, για κάθε λειτουργικό σημείο T-N. Αν ο κινητήρας βρεθεί σε ταχύτητα που χρειάζεται έλεγχος εξασθένησης πεδίου (Flux Weakening), η απόδοση του κινητήρα μειώνεται δραστικά.

Σε εφαρμογές μέγιστης ενεργειακής απόδοσης είναι κρίσιμο να προβλεφθεί με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια το εύρος των επιθυμητών ταχυτήτων και να προσδιοριστεί κατάλληλα ο αριθμός των εν σειρά ελιγμάτων, ώστε να εφαρμόζεται ο έλεγχος MTPA σε όλο το εύρος ταχυτήτων.

Για τον κινητήρα που σχεδιάστηκε, μια αύξηση του αριθμού των εν σειρά ελιγμάτων, σε σχέση με την ενδεδειγμένη, μπορεί να αυξήσει το κόστος κατά 0.27%, στην καλύτερη περίπτωση, ή ακόμα και να θέσει τον κινητήρα εκτός προδιαγραφών. Αντίστοιχα, μια μείωση του αριθμού επιβαρύνει τον αντιστροφέα και τις μπαταρίες, κάτι ιδιαίτερα ανεπιθύμητο.

### 6.3.4 Επίδραση Θερμοκρασίας Στην Ενεργειακή Απόδοση Του Οχήματος

Κατά την ανάλυση ευαισθησίας σε θερμοκρασιακές μεταβολές εξήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Στην περίπτωση N50, η ενεργειακή απόδοση του οχήματος μειώνεται κατά περίπου 2.5% για κάθε 10 °C αύξησης της θερμοκρασίας.
2. Στην περίπτωση SmCo32 (2:17) η ενεργειακή απόδοση μειώνεται κατά περίπου 0.1% για κάθε 20 °C.
3. Με τη χρήση SmCo32 (2:17) θα εμφανιζόταν αύξηση στην ενεργειακή απόδοση και το κόστος κατά 6.7% και 19.2%, αντίστοιχα, στην αναμενόμενη θερμοκρασία λειτουργίας.  
Σε χαμηλές θερμοκρασίες οι τιμές αυτές μπορούν να φτάσουν έως και 10.8% και 40%, αντίστοιχα.  
Σε υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να φτάσουν έως και 2.2% 3.9%, αντίστοιχα.
4. Η χρήση N50 φαίνεται να πλεονεκτεί, καθώς τηρεί τους περιορισμούς που έχουν τεθεί και εμφανίζει μικρότερο κόστος σε όλο το εύρος θερμοκρασιών.

### 6.3.5 Επίδραση Σφάλματος Τοποθέτησης Στην Κυμάτωση Ροπής

Η ανάλυση ευαισθησίας στην ακρίβεια τοποθέτησης του μαγνήτη οδήγησε στα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Στην περίπτωση χρήσης N50 η κυμάτωση αυξάνεται κατά 1.5% έως 2%, για κάθε 0.5 της μοίρας που αποκλίνει ο μαγνήτης από τη θέση που τοποθετείται ιδανικά.
2. Στην περίπτωση χρήσης SmCo32 (2:17) η κυμάτωση μεταβάλλεται ελάχιστα και κυμαίνεται γύρω από την τιμή ακριβούς τοποθέτησης.
3. Η χρήση SmCo32 (2:17) μειώνει την κυμάτωση ροπής κατά 4%, σε σχέση με τη χρήση N50, αυξάνει όμως το κόστος κατά 19.2% στην περίπτωση ακριβούς τοποθέτησης.  
Στην περίπτωση μέγιστου σφάλματος η κυμάτωση ροπής μειώνεται κατά 10.6%, ενώ το κόστος αυξάνεται κατά 16.6%.
4. Ο μαγνήτης N50 φαίνεται να πλεονεκτεί, αφού η κυμάτωση ακόμα και στη χειρότερη περίπτωση είναι 7.1%, αρκετά μικρότερη από τον περιορισμό του 10% που τέθηκε, ενώ το κόστος είναι αρκετά μικρότερο.



### 6.3.6 Σύγκριση Αρχικού Και Τελικού Κινητήρα

Οι κυριότερες μεταβολές μεταξύ της αρχικής και τελικής σχεδίασης είναι η αφαίρεση περίπου 1Kg μαγνητικής λαμαρίνας και η προσθήκη περίπου 1Kg χαλκού.

Από αυτήν την αλλαγή προέκυψαν τα παρακάτω 2 οφέλη:

1. Η μείωση του όγκου της μηχανής
2. Η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης του κινητήρα.

Ο όγκος, οι διαστάσεις και το σχήμα της μηχανής παίζουν σημαντικό ρόλο στη χωροθέτηση του κινητήρα πάνω στο όχημα. Η διάμετρος μειώθηκε από 200mm σε 195mm, δηλαδή κατά 2.5%. Το ενεργό μήκος παρέμεινε σταθερό 50mm. Ο όγκος μειώθηκε από 1570,8cm<sup>3</sup> σε 1493,2 cm<sup>3</sup>, δηλαδή κατά 4.94%.

Η ενεργειακή απόδοση του κινητήρα, που είναι και το βασικότερο κριτήριο της εφαρμογής, αυξήθηκε κατά 4.06%. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση κόστους κατά 11.4% σε σχέση με τον αρχικό κινητήρα.

### 6.4 Πρωτότυπη Συνεισφορά Της Εργασίας

Τα κυριότερα σημεία πρωτότυπης συνεισφοράς της εργασίας είναι:

1. Μοντελοποίηση υψηλής ακρίβειας, η οποία λαμβάνει υπόψη πληροφορίες, που συνοδεύουν τα εμπορικά υλικά, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν.
2. Ανάπτυξη αλγορίθμου ανάλυσης κινητήρα, ο οποίος εντοπίζει το βέλτιστο τρόπο τροφοδότησης του κινητήρα, σύμφωνα με τους ελέγχους MTPA και Flux Weakening. Ο απαιτούμενος χρόνος για τον τερματισμό του αλγόριθμου μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με το διαθέσιμο χρόνο και την επιθυμητή ακρίβεια. Επίσης, ο αλγόριθμος είναι αποζευγμένος από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, τον αριθμό των εν σειρά ελιγμάτων ανά αύλακα και το ενεργό μήκος του κινητήρα.
3. Μελέτη του κύκλου φόρτισης, ώστε να καθοριστούν με ακρίβεια τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του κινητήρα, τη διαμόρφωση της βέλτιστης στρατηγικής του οδηγού του οχήματος, αλλά και τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης του οχήματος.

4. Πρόταση μεθοδολογίας αξιολόγησης κινητήρων. Η μεθοδολογία δύναται να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές διαφορετικών απαιτήσεων, αλλάζοντας συντελεστές βαρύτητας, σύμφωνα με το ζητούμενο της εκάστοτε εφαρμογής.
5. Ανάλυση ευαισθησίας του κινητήρα σε μεταβολές της θερμοκρασίας και κατασκευαστικά σφάλματα.
6. Λήψη σχεδιαστικών αποφάσεων με συνδυασμό κριτηρίων ευρωστίας και βελτιστοποίησης.

## 6.5 Προτάσεις Για Περαιτέρω Διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας αναδεικνύονται τα παρακάτω θέματα για διερεύνηση:

1. Κατασκευή μηχανής και αξιολόγηση σχεδιαστικών προτάσεων που σχετίζονται με την απλοποίηση κατασκευής.
2. Πειραματική επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών του κινητήρα, ώστε να προσδιοριστεί κατά πόσον η θεωρητική σχεδίαση μπορεί να συμβαδίσει με την πρακτική εφαρμογή. Τα σφάλματα και οι αποκλίσεις που θα προκύψουν πρέπει να ερμηνευτούν και να καταγραφούν με μορφή «σχεδιαστικών οδηγιών».
3. Προσομοίωση της κίνησης του οχήματος, λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα υποσυστήματα (αντιστροφέας, μπαταρία, σύστημα μετρήσεων, κέντρο μάζας οχήματος και κατανομή της μάζας στους τροχούς, χρόνος αντίδρασης οδηγού).

## Βιβλιογραφία

[1] Γ. Βαμβακάς, Η. Αντωνακάκης, “Σχεδίαση Ηλεκτρικού Κινητήρα για Χρήση σε Όχημα Εξοικονόμησης Ενέργειας”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2019.

[2] <https://www.shell.com/make-the-future/shell-ecomarathon.html>

[3] R. Krishnan, “Electric Motor Drives: Modeling Analysis and Control”, Prentice Hall, 2001

[4] Ι. Τσαλαμέγκας, Α. Ρουμελιώτης, “Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία, Τόμος Α΄, Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία και Κύματα”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2017

[5] Ι. Τσαλαμέγκας, Α. Ρουμελιώτης, “Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία, Τόμος Β΄, Στατικά και Μόνιμα Πεδία”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2016

[6] F. Bloch, T. Waeckerle and H. Fraisse, "The use of iron-nickel and iron-cobalt alloys in electrical engineering, and especially for electrical motors," *2007 Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo*, Nashville, TN, 2007, pp. 394-401, doi: 10.1109/EEIC.2007.4562649.

[7] S.O. Kasap, “Principles of electronic materials and devices”, McGraw-Hill, 2002

[8] Cullity, B. D.; Graham, C. D. (2008). Introduction to Magnetic Materials. Wiley-IEEE. p. 489. ISBN 0-471-47741-9.

[9] <https://www.magnetapplications.com/> , Μάιος 2020

[10] <https://www.magnetshop.com/>, Μάιος 2020

[11] <http://www.advancedmagnets.com/>, Μάιος 2020

[12] <https://www.duramag.com/>, Μάιος 2020

[13] <https://www.birmingham.ac.uk/research/activity/metallurgy-materials> , Μάιος 2020

[14] <https://www.arnoldmagnetics.com/> , Μάιος 2020

[15] J. Pyrhonen, T. Jokinen, V. Hrabovcova, “Design of rotating electrical machines”, John Wiley & Sons, Ltd, 2008

[16] Λ. Δαρδαμάνης, “Σχεδίαση και βελτιστοποίηση σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2016.

[17] Χ. Κρασόπουλος, “Σχεδίαση και κατασκευή κινητήρα μονίμων μαγνητών για πρότυπο ηλεκτρικό όχημα”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2013.

[18] Κ. Λάσκαρης, “Σχεδιασμός και κατασκευή κινητήρων μονίμων μαγνητών ηλεκτρικά οχήματα”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2013.

[19] S. Chapman, “Electric machinery fundamentals”, The McGraw-Hill Companies Inc, 2005

[20] A.E. Fitzgerald, C. Kingsley, S. Umans, “Electric machinery fundamentals”, The McGraw-Hill Companies Inc, 2003

[21] Ong, C.-M, “Dynamic simulation of electric machinery: Using MATLAB/SIMULINK”, Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall PTR, 1998

[22] N. Mohan, T. Undeland, W. Robbins, “Power Electronic Converters, Applications and Design», John Wiley & Sons, Ltd, 2002

[23] Σ. Μανιάς, «Ηλεκτρονικά Ισχύος», Εκδόσεις Συμεών, 2017

[24] G. Taguchi, S. Chowdhury, S. Taguchi, Robust Engineering, McGraw–Hill, New York, 2000

[25] R. Bronson, G. Naadimuthu, “Schaum's Outline of Theory and Problems of Operations Research”, The McGraw-Hill Companies Inc, 1997

[26] Α. Σαρηγιαννίδης, “Βέλτιστος Σχεδιασμός και Διαχείριση Συστημάτων Κίνησης Ηλεκτρικών Οχημάτων”, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2016.

[27] C. Kittel, W. Knight, M. Ruderman, A. Helmholz, B. Moyer, "Berkeley Physics Course, Volume 1, MECHANICS", The McGraw-Hill Companies Inc, 1973

[28] F. Libert and J. Soulard, "Manufacturing Methods of Stator Cores with Concentrated Windings," *2006 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives - PEMD 2006*, The Contarf Castle, Dublin, Ireland, 2006, pp. 676-680.

[29] D. Meeker, "Finite Element Method Magnetics, Version 4.2, User's Manual", 2015

[30] Z. Ren, J. Ma, Y. Qi, D. Zhang and C. S. Koh, "Managing Uncertainties of Permanent Magnet Synchronous Machine by Adaptive Kriging Assisted Weight Index Monte Carlo Simulation Method," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, doi: 10.1109/TEC.2020.3009249.

[31] C. L. Sabioni, M. F. O. Ribeiro and J. A. Vasconcelos, "Robust Design of an Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Generator Based on Many-Objective Optimization Approach," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 54, no. 3, pp. 1-4, March 2018, Art no. 8101704, doi: 10.1109/TMAG.2017.2766229.

## Παράρτημα

### Κατασκευαστικές Επιλογές Τυλίγματος Για Συντελεστή Πληρότητας 48-63%

Αριθμός Παράλληλων Αγωγών	Διάμετρος Αγωγού	Διατομή Αγωγού	Συντελεστής Πληρότητας	Διατομή Ομάδας	Αντίσταση τυλίγματος
3	1,4	1,54	0,535	4,618	0,141
5	1,12	0,99	0,571	4,926	0,132
6	1	0,79	0,546	4,712	0,138
7			0,637	5,498	0,118
9	0,8	0,50	0,524	4,524	0,144
10			0,582	5,027	0,129
12	0,67	0,35	0,490	4,231	0,153
13			0,531	4,583	0,142
14			0,572	4,936	0,132
15			0,613	5,288	0,123
17	0,56	0,25	0,485	4,187	0,155
18			0,514	4,433	0,146
19			0,542	4,680	0,139
20			0,571	4,926	0,132
21			0,599	5,172	0,126
22			0,628	5,419	0,120

Οι διαθέσιμοι αγωγοί αναζητήθηκαν στο: <http://cablel.com/>, Ιούλιος 2020

[Επιστροφή στα Χαρακτηριστικά Τυλίγματος](#)