



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

## ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΕΛΚΥΣΤΗΡΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σάββας Κ. Μαϊόπουλος

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

Αθήνα, Αύγουστος 2023





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

## ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΕΛΚΥΣΤΗΡΑ

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σάββας Κ. Μαιόπουλος

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 28<sup>η</sup> Αυγούστου 2023.

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

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

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

Αθήνα, Αύγουστος 2023

.....  
Σάββας Κ. Μαϊόπουλος

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

Copyright © Σάββας Κ. Μαϊόπουλος, 2023.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη μελέτη και τη σχεδίαση ενός ηλεκτρικού κινητήρα για εφαρμογή σε ανελκυστήρα. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για την σχεδίαση ενός 20πολικού σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών με διανεμημένα επικαλυπτόμενα τυλίγματα που θα λειτουργεί σε αργές στροφές με υψηλές απαιτήσεις ροπής (120 ΣΑΛ, 300Nm).

Στην αρχή, γίνεται μια εκτεταμένη αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο των αντικειμένων που πρόκειται να αναλυθούν στην παρούσα εργασία. Πιο συγκεκριμένα, δίνεται έμφαση στους δύο κυρίαρχους τύπους ανελκυστήρων με βάση την αρχή λειτουργίας τους και γίνεται σύγκριση. Επιπλέον, γίνεται εμβάθυνση στις ηλεκτρικές μηχανές, παρουσιάζοντας τις διαφορετικές τους κατηγορίες. Επιλέγεται η Σύγχρονη Μηχανή Μονίμων Μαγνητών (ΣΜΜΜ) για τη συγκεκριμένη χρήση και κατόπιν παρουσιάζεται όλο το θεωρητικό υπόβαθρο που χρειάζεται για την σχεδίαση μιας ΣΜΜΜ.

Στην συνέχεια, διεξάγεται μηχανική ανάλυση για τον καθορισμό των προδιαγραφών του ηλεκτρικού κινητήρα που θα χρησιμοποιηθεί, μέσω ενός μοντέλου ανελκυστήρα στο Matlab Simulink. Αφού καθοριστούν οι προδιαγραφές, εφαρμόζονται προκαταρκτικές μέθοδοι σχεδίασης για την βασική διαστασιολόγηση του, οδηγώντας στη δημιουργία μιας ΣΜΜΜ που θα αποτελέσει αφετηρία για την σχεδίαση στα πεπερασμένα στοιχεία.

Έπειτα, πραγματοποιείται μια εμπειριστατωμένη ανάλυση της μεθοδολογίας των πεπερασμένων στοιχείων για τις ΣΜΜΜ, με την χρήση του λογισμικού FEMM σε συνεργασία με το MATLAB. Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, παρουσιάζονται διάφορα αναλυτικά μοντέλα που στοχεύουν στην αξιολόγηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών των μηχανών. Η έρευνα επικεντρώνεται σε αναλύσεις ευαισθησίας των παραμέτρων της μεθόδου, αξιολογώντας τόσο την ακρίβεια των αποτελεσμάτων όσο και τον υπολογιστικό χρόνο. Η συνολική προσέγγιση έχει ως στόχο την δημιουργία ενός αποτελεσματικού εργαλείου για την σχεδίαση και αξιολόγηση υποψήφιων ΣΜΜΜ.

Στην πρακτική εφαρμογή των εργαλείων και των μεθοδολογιών που αναπτύχθηκαν, πραγματοποιείται μια διαδικασία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης της γεωμετρίας του δρομέα σε δύο στάδια: στο πρώτο, δημιουργείται ένα σύνολο γεωμετριών πάχους μιας λαμαρίνας και βελτιστοποιούνται μέσω του μετώπου Pareto. Στο δεύτερο, οι καλύτερες γεωμετρίες από το πρώτο στάδιο, μετατρέπονται σε κινητήρες και αξιολογούνται μέσω μιας αντικειμενικής συνάρτησης, καταλήγοντας στον τελικό κινητήρα.

Τέλος, αναλύεται ο επιλεγμένος βέλτιστος κινητήρας, αποτυπώνοντας πληθώρα διαγραμμάτων με όλα τα λειτουργικά του χαρακτηριστικά, όπως η ροπή και οι απώλειες. Επιβεβαιώνεται η καταλληλότητα του για την παρούσα εφαρμογή, διασφαλίζοντας την αποτελεσματικότητά του σε διάφορες λειτουργικές συνθήκες. Κλείνοντας, διατυπώνονται τα συμπεράσματα της μελέτης, υπογραμμίζεται η επιστημονική συνεισφορά της και δίνονται προτάσεις για μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Μηχανικοί ανελκυστήρες, Σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών, Ανάλυση ευαισθησίας, Πεπερασμένα στοιχεία, Σχεδίαση ηλεκτρικής μηχανής, Πλεγματοποίηση, Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, Μέτωπο Pareto, Αντικειμενική συνάρτηση



## **ABSTRACT**

The scope of this diploma thesis entails the study and design of an electric motor intended for application in traction elevators. Specifically, it concerns the design of a 20-pole permanent magnet synchronous motor with distributed overlapping windings that will operate at slow speeds with high torque requirements (120 RPM, 300Nm).

Initially, a comprehensive examination of the theoretical underpinnings of this study is given. Notably, a comparative analysis between the two predominant types of elevators based on their operational principles is outlined. In addition, an in-depth study of electric machines is provided, presenting their different categories. After rigorous deliberation, Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) was selected for the specific use and all the theoretical background required for its design is presented.

Then, a mechanical analysis is carried out to determine the specifications of the electric motor to be used, through an elevator model in Matlab Simulink. With the motor specifications established, preliminary design methods are employed to dimension the motor, leading to the creation of a PMSM that meets the requirements.

Subsequently, an in-depth analysis of the finite element methodology for PMSMs is carried out by applying the FEMM software in conjunction with MATLAB. During the analysis, several analytical models are presented that aim to evaluate the functional characteristics of the machines. The research focuses on sensitivity analyses of the method parameters, evaluating both the accuracy of the results and the computational time. The overall approach aims to provide an efficacious toolkit for the purpose of designing and evaluating potential motor candidates.

In the application of the tools and methodologies developed above, a two-stage multi-criteria optimization process of the runner's geometry is carried out. Initially, a set of one-lamination-thickness geometries is created and optimized using the Pareto front. Subsequently, in the ensuing stage, the most optimal geometries are transformed into motors and evaluated using an objective function, leading to the final optimized motor.

In conclusion, the chosen optimal motor is analyzed, presenting a variety of diagrams to illustrate its operational characteristics, such as torque and energy losses. Its suitability for the current application is confirmed, ensuring its effectiveness under various operational scenarios. The study's findings are articulated, its scientific contribution is highlighted, and recommendations for future research are provided.

## **KEY WORDS**

Traction elevators, Permanent magnet synchronous machine, Sensitivity analysis, Finite element analysis, Electrical machine design, Meshing, Multicriteria optimization, Pareto front, Objective function





## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία σηματοδοτεί την λήξη μιας συναρπαστικής περιόδου της ζωής μου, η οποία δε θα ήταν δυνατή χωρίς την υποστήριξη, την καθοδήγηση και την εμπιστοσύνη πολλών ανθρώπων.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Αντώνιο Κλαδά, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου την εργασία αυτή, καθώς και για τις πολύτιμες γνώσεις που μου έδωσε κατά την φοίτησή μου στο Πολυτεχνείο.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Υποψήφιο Διδάκτορα Γεώργιο Σακκά, ο οποίος υπήρξε “οδηγός” στην επιστημονική αναζήτηση. Οι συζητήσεις μας αποτέλεσαν πηγή έμπνευσης και καθοδήγησης.

Ένα θερμό ευχαριστώ στην ερευνητική ομάδα “Προμηθέας”. Μέσα από αυτήν την εμπειρία, ξεδιπλώθηκε το ενδιαφέρον μου για τους ηλεκτρικούς κινητήρες και καλλιέργησα την αγάπη για την τεχνολογία και την καινοτομία.

Οι συνάδελφοι από την Motor Oil Renewable Energy, διαδραμάτισαν ουσιαστικό ρόλο στα τελευταία βήματα των προπτυχιακών σπουδών μου, βοηθώντας με να συνδυάσω την εργασία και τη σχολή με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο. Τα πρώτα μου βήματα στο επαγγελματικό πεδίο σημαδεύτηκαν από την αφοσίωση και την υποστήριξή τους.

Είμαι ευγνώμον για τους φίλους και συμφοιτητές που μοιράστηκαν μαζί μου αυτά τα φοιτητικά χρόνια, που ήταν γεμάτα από δημιουργία, γέλια, προκλήσεις και αξέχαστες στιγμές. Τους ευχαριστώ για την παρέα, τη συμπαράσταση και την υποστήριξη.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου, γιατί ήταν οι πιο λαμπεροί σηματοδότες, που μου έδειξαν την κατεύθυνση, αλλά με αφήσαν να φτιάξω το δικό μου δρόμο.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Σκοπός της εργασίας.....	1
1.2	Δομή της εργασίας.....	1

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1	Ανελκυστήρες .....	3
2.1.1	Ιστορική αναδρομή.....	3
2.1.2	Είδη ανελκυστήρων - Αρχή λειτουργίας.....	4
2.1.2.1	Υδραυλικοί ανελκυστήρες.....	4
2.1.2.2	Μηχανικοί ανελκυστήρες (Με τροχαλία τριβής).....	6
2.1.3	Επιλογή αρχής λειτουργίας για την παρούσα εφαρμογή.....	8
2.1.4	Σχέση μετάδοσης.....	9
2.2	Ηλεκτρικές μηχανές .....	10
2.2.1	Τα βασικά είδη ηλεκτρικών μηχανών σε κινητήρια συστήματα... ..	11
2.2.2	Αξιολόγηση κινητήρων και επιλογή.....	13
2.2.3	Συνολικό ηλεκτρομηχανικό σύστημα.....	14
2.3	Σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών (ΣΜΜΜ).....	14
2.3.1	Ισοδύναμο κύκλωμα - Πλαίσιο $\alpha\beta 0, dq0$ - Καμπύλη ροπής.....	14
2.3.2	Προδιαγραφές υλικών-Συνολική δομή ΣΜΜΜ.....	19
2.3.2.1	Υλικό δρομέα-στάτη - Μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά... ..	19
2.3.2.2	Μόνιμοι μαγνήτες - Σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά.....	20
2.3.2.3	Επιλογή μαγνήτη N42M.....	22
2.3.2.4	Μαγνήτιση μονίμων μαγνητών.....	22
2.3.2.5	Υλικό τυλίγματος στάτη.....	24
2.3.2.6	Υλικό άξονα.....	26
2.3.2.7	Περίληψη επιλογών.....	26
2.3.3	Τοπολογία δρομέα.....	26
2.3.3.1	Δρομέας με επιφανειακά τοποθετημένους μαγνήτες.....	26
2.3.3.2	Δρομέας με ένθετα τοποθετημένους μαγνήτες.....	27
2.3.3.3	Δρομέας με εσωτερικά τοποθετημένους μαγνήτες.....	27
2.3.4	Τύλιγμα στάτη.....	28
2.3.5	Φαινόμενα και απώλειες.....	30
2.3.5.1	Απώλειες χαλκού.....	30
2.3.5.2	Απώλειες πυρήνα.....	31
2.3.5.3	Κορεσμός.....	33
2.3.5.4	Σκέδαση.....	34
2.3.5.5	Επιδερμικό φαινόμενο.....	34
2.3.5.6	Φαινόμενο γειτνίασης.....	35

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΗΣ

3.1	Προδιαγραφές ανελκυστήρα.....	37
3.1.1	Απαιτήσεις εγκατάστασης ανελκυστήρων.....	37
3.1.2	Βασικές μηχανολογικές παράμετροι.....	38
3.1.3	Ανάλυση κύκλου λειτουργίας.....	44
3.2	Βασικές αρχές σχεδιασμού ΣΜΜΜ.....	48
3.2.1	Βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης.....	48
3.2.1.1	Ειδική ηλεκτρική φόρτιση.....	48
3.2.1.2	Ειδική μαγνητική φόρτιση.....	49
3.2.1.3	Μηχανική φόρτιση (οριακή τάση διακένου).....	49
3.2.1.4	Πυκνότητα ρεύματος τυλίγματος.....	49
3.2.1.5	Ισχύς εξόδου μηχανής.....	51
3.2.1.6	Ηλεκτρομαγνητική ροπή.....	52
3.3	Προκαταρκτική σχεδίαση - Χρήση αναλυτικών μεθόδων.....	52
3.3.1	Διαστάσεις μηχανής.....	52
3.3.2	Συχνότητα λειτουργίας - Πόλοι μηχανής.....	54
3.3.3	Ηλεκτρική φόρτιση - Μαγνητεγερτική δύναμη.....	55
3.3.4	Συνδεσμολογία τυλίγματος .....	56

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (2D-FEA)

4.1	Εισαγωγή.....	59
4.2	Πεδιακή ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.....	60
4.3	Το λογισμικό FEMM.....	60
4.4	Μαγνητοστατικά προβλήματα.....	61
4.5	Οριακές συνθήκες.....	62
4.6	Αξιολόγηση κινητήρων.....	64
4.7	Μεθοδολογία ανάλυσης.....	65
4.7.1	Ανάλυση ευαισθησίας επιλογών πλεγματοποίησης.....	66
4.7.2	Διάγραμμα ροής για την εξέταση ενός κινητήρα.....	67
4.7.2.1	Είσοδος παραμέτρων σχεδίασης.....	67
4.7.2.2	Κατασκευή γεωμετρίας στο FEMM.....	70
4.7.2.3	Εύρεση εσωτερικής γωνίας $\delta$ για μέγιστη ροπή (ΜΤΡΑ)...	70
4.7.2.4	Προσομοίωση μιας σύγχρονης ηλεκτρικής περιστροφής... ..	70
4.7.2.5	Υπολογισμός μάζας.....	72
4.7.2.6	Μέτρηση ροπής.....	72
4.7.2.7	Μέτρηση πεπλεγμένης ροής στα τυλίγματα.....	73
4.7.2.8	Μέτρηση επαγόμενης τάσης.....	73
4.7.2.9	Μέτρηση απωλειών.....	74

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>**

### **ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ - ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ**

5.1	Σχεδίαση πρώτης μηχανής και αξιολόγηση.....	79
5.2	Εναλλακτικές διαμορφώσεις δρομέα.....	82
5.3	Πρόβλημα βελτιστοποίησης.....	83
5.4	Διατύπωση προβλήματος βελτιστοποίησης.....	84
5.5	Πολυκριτηριακή βελτιστοποίησης – Μέτωπο Pareto.....	90
5.5.1	Επιλογή Pareto.....	91
5.5.2	Αντικειμενική συνάρτηση.....	92

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>**

### **ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΡΙΣΤΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ**

6.1	Τελικός κινητήρας.....	95
6.1.1	Κενό φορτίο ( $0A/mm^2$ ).....	96
6.1.2	Ονομαστική λειτουργία ( $4A/mm^2$ ).....	100
6.1.3	Υπερφόρτιση ( $9.5A/mm^2$ ).....	103
6.2	Συνολικά αποτελέσματα μηχανής.....	105
6.2.1	Χάρτης ρευμάτων και τάσεων.....	105
6.2.2	Καμπύλη μέγιστης ροπής ανά Ampere (ΜΤΡΑ).....	107
6.2.3	Χάρτης απόδοσης.....	108

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>**

### **ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

7.1	Σύνοψη.....	111
7.2	Κύρια Συμπεράσματα.....	111
7.3	Η συνεισφορά της εργασίας στην επιστήμη.....	112
7.4	Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.....	113

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>**

### **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Βιβλιογραφία.....	115
-------------------	-----



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο στόχος της εργασίας μου είναι να σχεδιάσω και να αναλύσω έναν σύγχρονο κινητήρα μονίμων μαγνητών για εφαρμογή σε σύστημα ανελκυστήρα. Το σύστημα δεν εμπεριέχει κιβώτιο ταχυτήτων και έτσι καθορίζεται το πρόβλημα σχεδιασμού ενός κινητήρα με μεγάλες απαιτήσεις ροπής και χαμηλές στροφές. Η τροφοδοσία του θα γίνεται μέσω αντιστροφέα που τροφοδοτείται από τριφασική παροχή χαμηλής τάσης (230/400V). Αφού καθοριστεί αναλυτικά το μηχανικό πρόβλημα και εξαχθούν τα αποτελέσματα για την διαστασιολόγηση του κινητήρα, ξεκινάει η διαδικασία σχεδιομελέτης. Η σχεδιομελέτη του κινητήρα θα δοθεί με τον καθορισμό της βέλτιστης γεωμετρίας, λαμβάνοντας υπ' όψη πολλαπλά κριτήρια όπως η απόδοση, η κυμάτωση ροπής, το κόστος των υλικών και η συνολική αρμονική παραμόρφωση της τάσης. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, υιοθετείται μια διαδικασία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης που επικεντρώνεται κυρίως στην γεωμετρία του δρομέα, αποτελούμενη από δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει τη δημιουργία μιας σειράς διαφορετικών γεωμετριών δρομέων, με εξέταση «ανά λαμαρίνα», οι οποίες αξιολογούνται με βάση το μέτωπο Pareto. Αυτή η πολυκριτηριακή προσέγγιση επικεντρώνεται σε δύο κυρίαρχα χαρακτηριστικά επίδοσης: την κυμάτωση της ροπής και τη μέση ροπή, καθώς αυτά, επηρεάζουν σημαντικά την λειτουργικότητα του κινητήρα. Σε επόμενο στάδιο, οι γεωμετρίες-λαμαρίνες που αποδεικνύονται ως βέλτιστες στο πρώτο στάδιο, μετατρέπονται σε κινητήρες με διαφορετικά μήκη, ώστε κάθε κινητήρας να παράγει στην ονομαστική του λειτουργία (δηλαδή με πυκνότητα ρεύματος  $4\text{A/mm}^2$ ) την τιμή ροπής που προέκυψε από την μηχανική ανάλυση. Στο τελικό στάδιο, γίνεται μια εκτενέστερη ανάλυση, όπου εφαρμόζεται η αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης. Αυτή, επικεντρώνεται σε περισσότερα χαρακτηριστικά, πέραν των δύο βασικών που εξετάστηκαν προηγουμένως δηλαδή την κυμάτωση της ροπής και τη μέση ροπή. Η αξιολόγηση των επιπλέον χαρακτηριστικών, είναι χρονοβόρα και απαιτητική, ωστόσο, είναι αναγκαία για την εξασφάλιση της ολοκληρωμένης βελτιστοποίησης του σχεδιασμένου κινητήρα.

### 1.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα υποενοότητα παρουσιάζει τις βασικές πτυχές της διπλωματικής εργασίας, προκειμένου ο αναγνώστης να κατανοήσει το θέμα και τον τρόπο οργάνωσης της. Η εργασία χωρίζεται σε επτά κεφάλαια, όπως παρακάτω:

- Στο **Κεφάλαιο 2**, εξετάζεται το θεωρητικό πλαίσιο των ανελκυστήρων, με κατανόηση των δύο κυρίαρχων τύπων βάση της αρχής λειτουργίας τους (υδραυλικού και μηχανικού). Μετά από αξιολόγηση, επιλέγεται η εφαρμογή με μηχανικό ανελκυστήρα (ή αλλιώς ανελκυστήρας τριβής) χωρίς μειωτήρα (κιβώτιο ταχυτήτων). Επιπλέον στο πλαίσιο αυτού του κεφαλαίου, διερευνώνται λεπτομερώς οι ηλεκτρικές μηχανές, παρουσιάζονται οι

διάφορες κατηγορίες τους και γίνεται επιλογή του σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη, για την εν λόγω εφαρμογή. Ακολουθεί μια περιεκτική παρουσίαση των βασικών τους δομικών στοιχείων, με αναλυτική περιγραφή και δικαιολόγηση των υλικών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Τέλος, το κεφάλαιο καταπιάνεται με την ανάλυση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα εντός ενός ηλεκτρικού κινητήρα, τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την σχεδίαση.

- Στο **Κεφάλαιο 3** αναπτύσσεται η μηχανική ανάλυση της εφαρμογής, διεξάγοντας τους υπολογισμούς, με στόχο την παραγωγή όλων των απαιτούμενων προδιαγραφών που πρέπει να πληροί ένας ηλεκτρικός κινητήρας για την εν λόγω εφαρμογή. Η διαδικασία περιλαμβάνει την διερεύνηση του κύκλου φόρτισης του κινητήρα, μέσω ενός μοντέλου ανελκυστήρα που αναπτύχθηκε στο Matlab Simulink. Εφόσον οι προδιαγραφές του κινητήρα καθοριστούν, εφαρμόζονται θεωρίες προκαταρκτικής σχεδίασης και μέθοδοι σχεδίασης για την επίτευξη μιας πρωταρχικής διαστασιολόγησης του κινητήρα, μέσω αναλυτικών μεθόδων. Τελικά, αυτή η ανάλυση οδηγεί στη διαμόρφωση των βασικών χαρακτηριστικών μιας Σύγχρονης Μηχανής Μονίμων Μαγνητών (ΣΜΜΜ), που θα ικανοποιεί τις καθορισμένες προδιαγραφές.

- Στο **Κεφάλαιο 4** αναλύεται λεπτομερώς η μεθοδολογία ανάλυσης ηλεκτρικών μηχανών με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιείται το λογισμικό FEMM (Finite Element Method Magnetics), σε συνδυασμό με το περιβάλλον προγραμματισμού MATLAB. Γίνεται αναλυτική επισκόπηση των διαδοχικών σταδίων στα οποία διεξάγεται η ανάλυση μιας ηλεκτρικής μηχανής. Παρουσιάζονται διάφορα αναλυτικά μοντέλα που αποσκοπούν στην απόκτηση των αποτελεσμάτων για την αξιολόγηση κάθε μηχανής που σχεδιάζεται. Ταυτόχρονα, πραγματοποιούνται αναλύσεις ευαισθησίας στις παραμέτρους των μεθόδων προσομοίωσης, οι οποίες λαμβάνουν υπ' όψη την ακρίβεια της μεθόδου καθώς και τον υπολογιστικό χρόνο. Έτσι καθορίζεται ένα αποτελεσματικό και γρήγορο εργαλείο με το οποίο αξιολογούνται οι υποψήφιες μηχανές.

- Στο **Κεφάλαιο 5**, προς επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της προκαταρκτικής σχεδίασης (Κεφ. 3) σχεδιάζονται οι πρώτες μηχανές και αξιολογούνται με τα εργαλεία που αναπτύχθηκαν στο Κεφ. 4. Στη συνέχεια εφαρμόζεται μια διαδικασία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης στη γεωμετρία του δρομέα, αποτελούμενη από δύο στάδια. Αρχικά, δημιουργείται ένα σύνολο γεωμετριών-λαμαρινών όπου βελτιστοποιούνται μέσω του μετώπου Pareto. Στη συνέχεια, οι βέλτιστες υποψήφιες γεωμετρίες λαμαρινών μετατρέπονται σε κινητήρες, και εισάγονται στο δεύτερο στάδιο αξιολόγησης όπου χρησιμοποιείται αντικειμενική συνάρτηση. Από το δεύτερο στάδιο προκύπτει τελικά ο βελτιστοποιημένος κινητήρας.

- Στο **Κεφάλαιο 6**, υλοποιείται μια εμπειριστατωμένη παρουσίαση του τελικού βέλτιστου κινητήρα. Η ανάλυση περιλαμβάνει πληθώρα αναλυτικών διαγραμμάτων, αποτυπώνοντας σε βάθος όλα τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του, όπως η ροπή, οι ενεργειακές απώλειες, η συνολική μάζα, ο χάρτης απόδοσης και πολλά άλλα μεγέθη. Επίσης, επιβεβαιώνεται πρακτικά η επάρκεια του κινητήρα, καθώς αυτός αποδεικνύεται να είναι κατάλληλος για τη λειτουργία υπό φυσιολογικές συνθήκες, αλλά και σε συνθήκες υπερφόρτωσης.

- Στο **Κεφάλαιο 7**, διατυπώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την τρέχουσα μελέτη. Επιπρόσθετα, αξιοποιείται η επιστημονική προσφορά της εργασίας και παράλληλα παρουσιάζονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

- Στο **Κεφάλαιο 8**, παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε σε όλη την έκταση της εργασίας.



## ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

### 2.1 ΑΝΕΛΚΥΣΤΗΡΕΣ

Ανελκυστήρας είναι μια μόνιμη εγκατεστημένη συσκευή ανύψωσης που εξυπηρετεί καθορισμένα επίπεδα και έχει θάλαμο προσιτό στους χρήστες που κινείται μεταξύ κατακόρυφων οδηγών ή οδηγών με κλίση μικρότερη από 15° ως προς την κατακόρυφο. [1]

#### 2.1.1 Ιστορική αναδρομή

Οι ανελκυστήρες αποτελούν σημαντικό κομμάτι της καθημερινότητάς μας εδώ και πολλά χρόνια, και η εξέλιξή τους έχει οδηγήσει σε πιο αποδοτικούς και ασφαλής σχεδιασμούς, καθιστώντας τους πιο αξιόπιστους και βολικούς για τους χρήστες. Η ιστορία των ανελκυστήρων χρονολογείται από την αρχαιότητα. Ξεκινώντας από την κατασκευή του Πύργου της Βαβέλ που πιστεύεται ότι κατασκευάστηκε μετά τον μεγάλο κατακλυσμό το 2.300 π.Χ., όπου χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή τροχαλίες με χειροκίνητα βίντσι. Ωστόσο, μόνο μετά τη Βιομηχανική Επανάσταση του 19ου αιώνα, οι ανελκυστήρες άρχισαν να μοιάζουν με τις σύγχρονες μηχανές που γνωρίζουμε σήμερα. Το 1853, ο Αμερικανός εφευρέτης Elisha Otis δημιούργησε τον ανελκυστήρα ασφαλείας, ο οποίος ασφάλιζε την καμπίνα σε περίπτωση που κοβόταν το σχοινί ανύψωσης. Αυτή η εφεύρεση έφερε επανάσταση στη βιομηχανία και κατέστησε δυνατή την ασφαλή χρήση των ανελκυστήρων σε ψηλά κτήρια. Το 1885, ο πρώτος ανελκυστήρας επιβατών εγκαταστάθηκε σε ένα πολυκατάστημα της Νέας Υόρκης και στις αρχές του 1900, οι ανελκυστήρες έγιναν πιο συνηθισμένοι σε κτήρια γραφείων, ξενοδοχεία και πολυκατοικίες.

Μια αξιοσημείωτη εξέλιξη στις αρχές του 20ου αιώνα ήταν η δημιουργία του αυτόματου ανελκυστήρα, που επέτρεπε στους επιβάτες να πατούν απλώς ένα κουμπί για να επιλέξουν τον όροφο τους, αντί να χρειάζεται να χειρίζονται χειροκίνητα έναν μοχλό. Αυτή η καινοτομία έκανε τους ανελκυστήρες πιο φιλικούς προς το χρήστη και βοήθησε στη διάδοση της χρήσης τους σε δημόσια κτήρια.

Στα μέσα του 20ου αιώνα, οι ανελκυστήρες έγιναν ακόμη πιο γρήγοροι και πιο αποτελεσματικοί με την εισαγωγή υδραυλικών συστημάτων και συστημάτων έλξης, τα οποία μπορούσαν να φτάσουν σε μεγαλύτερα ύψη από τα προηγούμενα σχέδια ανελκυστήρων. Στις δεκαετίες του 1970 και του 1980, οι ανελκυστήρες άρχισαν να ενσωματώνουν πιο προηγμένη τεχνολογία, όπως μικροεπεξεργαστές και ηλεκτρονικά χειριστήρια, γεγονός που τους έκανε πιο αξιόπιστους και ευκολότερους στη συντήρηση. Τα τελευταία χρόνια, οι ανελκυστήρες είναι στο επίκεντρο της καινοτομίας στον τομέα του βιώσιμου σχεδιασμού, με την ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων ανελκυστήρων που μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας.

Συνολικά, η ιστορία των ανελκυστήρων είναι μια ιστορία συνεχούς βελτίωσης, με γνώμονα την ανάγκη παροχής ασφαλούς και αποτελεσματικής κάθετης μεταφοράς. [2]

### 2.1.2 Είδη ανελκυστήρων - Αρχή λειτουργίας

Η διάκριση των ανελκυστήρων γίνεται με βάση συγκεκριμένα κριτήρια. Ακολουθεί ο συνοπτικός πίνακας για τα είδη των ανελκυστήρων με βάση τα παραπάνω κριτήρια.

**Πίνακας 2.1:** Διάκριση ανελκυστήρων [1]

ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΔΙΑΚΡΙΣΗΣ	ΕΙΔΗ ΑΝΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ
ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Με τροχαλία τριβής, τύμπανο και αλυσίδα</li> <li>• Υδραυλικοί</li> </ul>
ΧΕΙΡΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Απλός</li> <li>• Αυτόματος               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Αυτόματος κατά μία κατεύθυνση</li> <li>○ Αυτόματος ανόδου-καθόδου (full collective-selective)</li> </ul> </li> </ul>
ΧΡΗΣΗ ΑΝΕΛΚΥΣΤΗΡΑ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ατόμων</li> <li>• Φορτίων               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Εργοστασίων</li> <li>○ Γκαράζ</li> <li>○ Μικρών φορτίων</li> <li>○ Φαγητών</li> </ul> </li> </ul>
ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μιας ταχύτητας</li> <li>• Δύο ταχυτήτων</li> <li>• Συνεχούς ρύθμισης ταχύτητας</li> </ul>

Η αρχή λειτουργίας αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά κριτήρια διαχωρισμού των ανελκυστήρων, έτσι στα πλαίσια αυτής της εργασίας, θα επικεντρωθούμε σε αυτό το κριτήριο.

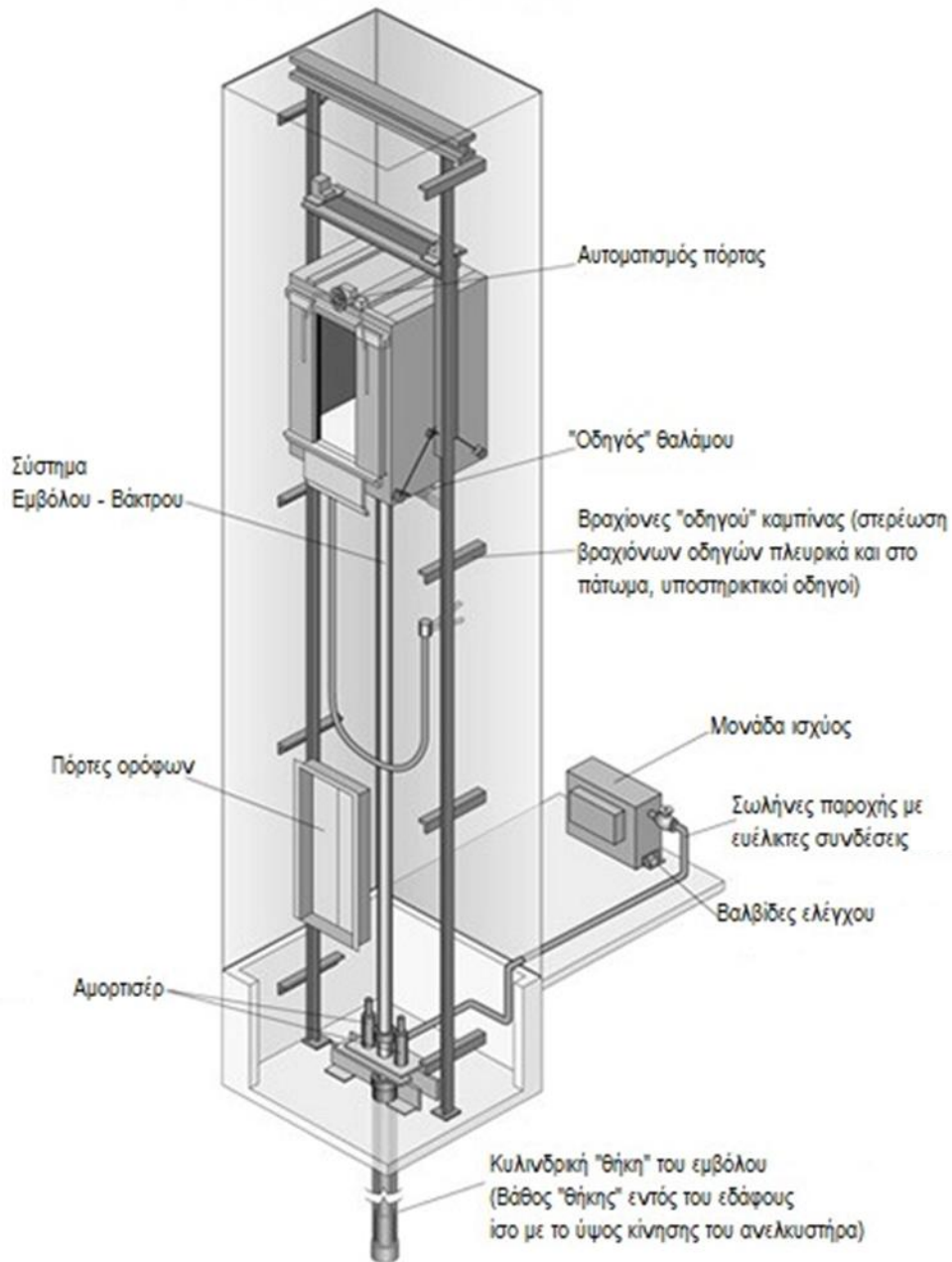
#### 2.1.2.1 Υδραυλικοί Ανελκυστήρες

Η λειτουργία τους έγκειται σε μία αντλία που κινείται από έναν ηλεκτροκινητήρα (επαγωγής) ο οποίος μεταφέρει το υδραυλικό ρευστό (το οποίο συνήθως είναι ελαιώδες) από το ντεπόζιτο του προς τον κύλινδρο, ο οποίος με τη σειρά του ωθεί το θάλαμο του ανελκυστήρα προς το επιθυμητό επίπεδο. Στη συνέχεια, όταν το ασανσέρ φτάσει στον όροφο που θέλουμε να σταματήσει, τότε ενεργοποιούνται οι ειδικοί αισθητήρες και «ειδοποιούν» την αντλία να σταματήσει να μεταφέρει το ρευστό προς τον κύλινδρο, ενώ ταυτόχρονα η βαλβίδα διοχέτευσης του κλείνει αποτρέποντας την επιστροφή του υγρού στο ντεπόζιτο, με αποτέλεσμα να σταματάει η κίνηση του ασανσέρ στο επίπεδο που επιθυμούμε. Μάλιστα οι αισθητήρες αυτοί είναι τόσο σύγχρονης τεχνολογίας, που εξασφαλίζουν την έγκαιρη παύση της κίνησης του ασανσέρ, ώστε αυτό να σταματάει ομαλά και με ακρίβεια στον όροφο που επιλέγεται.

Ωστόσο διαθέτοντας κυλινδρικά έμβολα με υδραυλική κίνηση, μπορούν να εξυπηρετήσουν μόνο κτήρια με χαμηλές ανάγκες μετακίνησης, καθώς κάνουν μέχρι 8 στάσεις και έχουν μικρότερη ταχύτητα κίνησης σε σχέση με τους μηχανικούς ανελκυστήρες. Παρόλο που οι υδραυλικοί ανελκυστήρες χρησιμοποιούνται σχεδόν κατά κανόνα στις μονοκατοικίες, είναι εφικτό να εγκατασταθούν και σε μικρές επιχειρήσεις με μειωμένες ανάγκες μετακίνησης μεταξύ των ορόφων. [3],[4]

Οι υδραυλικοί ανελκυστήρες είναι η καλύτερη λύση για τις οικίες και τα κτήρια με λίγους ορόφους και περιορισμένη χρήση.

## ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΣ ΑΝΕΛΚΥΣΤΗΡΑΣ



Σχήμα 2.1: Υδραυλικός ανελκυστήρας & κύρια μέρη του

### Πλεονεκτήματα υδραυλικών ανελκυστήρων:

- Στους υδραυλικούς ανελκυστήρες δεν χρειάζεται να υπάρχει φρεάτιο. Αυτό σημαίνει ότι δεν χρειάζεται να βρεθούν νέοι χώροι που δεσμεύουν την όλη αρχιτεκτονική δομή του κτηρίου. Για παράδειγμα το μηχανοστάσιο μπορεί να τοποθετηθεί είτε στο υπόγειο είτε σε κάποιον ενδιάμεσο όροφο, χωρίς πρόβλημα.
- Ο υδραυλικός ανελκυστήρας επίσης έχει αθόρυβη λειτουργία και δεν προκαλεί κραδασμούς αφού κινείται ομαλά στην επιτάχυνση στην επιβράδυνση και στην ισοστάθμιση.

- Σε αντίθεση με τους μηχανικούς ανελκυστήρες, το βάρος δεν καταπονεί ενδιάμεσα μέρη ή την οροφή παρά μόνο το έδαφος.
- Σε γενικές γραμμές, απαιτεί λιγότερη συντήρηση και μπορεί να διατηρηθεί σε άριστη κατάσταση αρκετά χρόνια, εμφανίζοντας λίγες φθορές.
- Εξαιτίας της ειδικής βαλβίδας, αν γίνει διακοπή ρεύματος, οι επιβάτες απεγκλωβίζονται στην επόμενη στάση, ομαλά και φυσικά, χωρίς την βοήθεια άλλου προσώπου. [5]

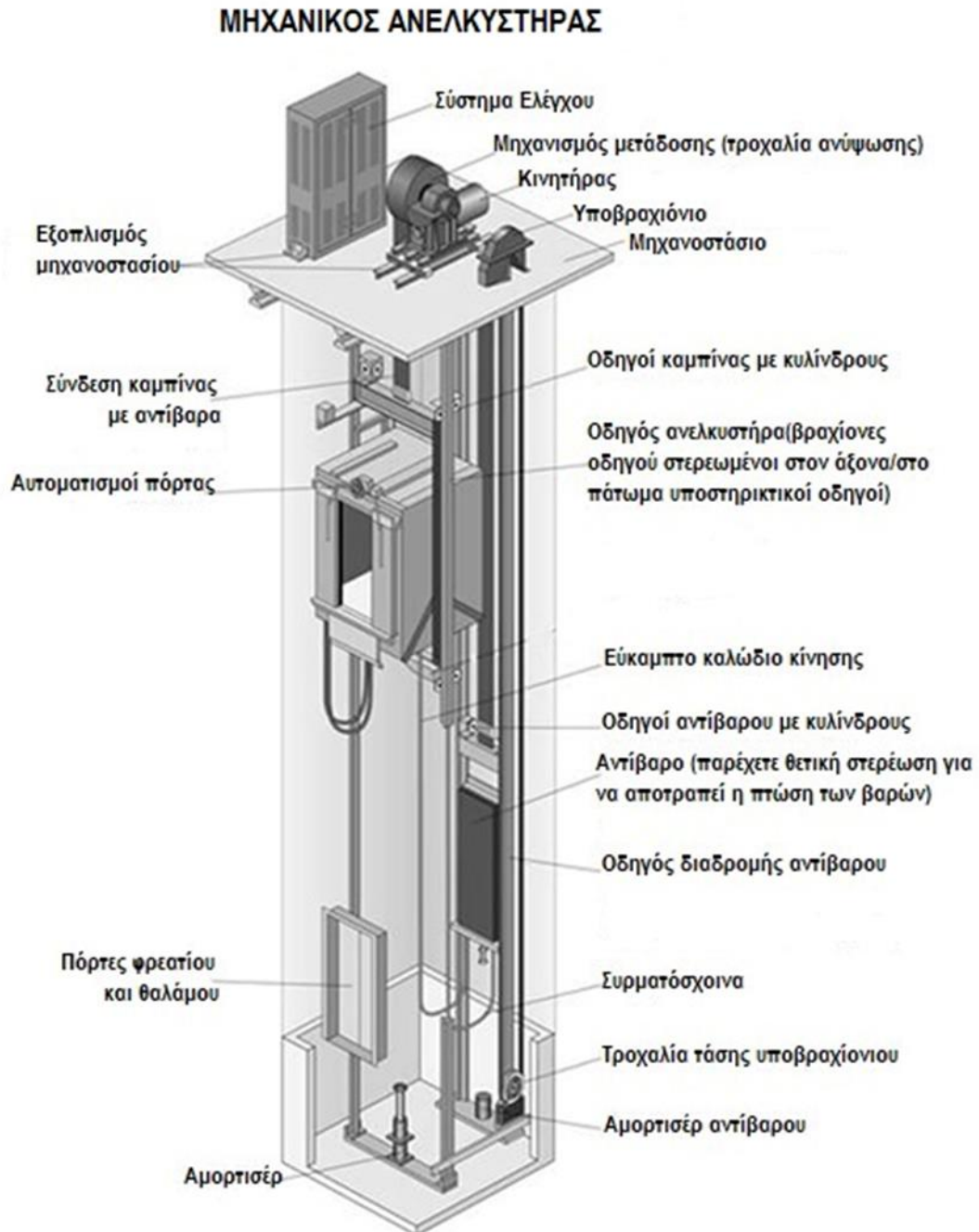
#### **Μειονεκτήματα υδραυλικών ανελκυστήρων :**

- Έχει υψηλή κατανάλωση ενέργειας κατά την άνοδο.
- Έχει περιορισμό στο ύψος των κτιρίων που μπορεί να εγκατασταθεί.
- Έχει περιορισμό στην ταχύτητα που μπορεί να φτάσει.
- Έχει περιορισμό στις ζεύξεις που μπορεί να εκτελέσει.
- Το φιλικό για το περιβάλλον λάδι είναι πολύ ακριβό.
- Δεν αντέχει σε μεγάλη συχνότητα εκκινήσεων λόγω υπερθέρμανσης του λαδιού. [5]

#### **2.1.2.2 Μηχανικοί Ανελκυστήρες (Με τροχαλία τριβής)**

Οι μηχανικοί ανελκυστήρες, επίσης γνωστοί ως ανελκυστήρες τριβής ή έλξης έχουν βασικό εξάρτημα τον κινητήρα στον άξονα του οποίου είναι προσαρμοσμένη η τροχαλία τριβής. Τα συρματόσχοινα της τροχαλίας καταλήγουν από τη μία πλευρά στο θάλαμο και από την άλλη στο αντίβαρο. Αυτό αποτελεί και τη βασική αρχή λειτουργίας των μηχανικών ανελκυστήρων. Πολλές φορές παρεμβάλλονται επιπλέον τροχαλίες (παρεκκλίσεως) για την καλύτερη μετάδοση της κίνησης. Οι κινητήρες μπορεί να έχουν μειωτήρα (Geared) ή να μην έχουν (Gearless) και να αναπτύσσουν μία ή δύο ταχύτητες. Συνίσταται η οδήγηση της μηχανής από Inverter (VVVF) για τέλεια λειτουργικά αποτελέσματα. Για την ασφαλή λειτουργία των μηχανικών ανελκυστήρων υπάρχει ο ρυθμιστής ή περιοριστήρας ταχύτητας (ρεγουλατόρος), ο οποίος θέτει σε λειτουργία τη συσκευή αρπάγης και ακινητοποιεί τον ανελκυστήρα σε περίπτωση που ο θάλαμος υπερβεί κατά ένα ποσοστό το όριο ταχύτητάς του.[5]

Οι μηχανικοί ανελκυστήρες βρίσκουν κυρίως εφαρμογή όπου απαιτούνται μεγάλες διαδρομές και υψηλές ταχύτητες. Αποτελούν τον αρχαιότερο από πλευράς δομής και ταυτόχρονα τον πιο εξελιγμένο τεχνολογικά τύπο ανελκυστήρα. Μάλιστα, η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος τις περασμένες δεκαετίες επέτρεψε τον έλεγχο των ηλεκτροκινητήρων (λειτουργία VVVF Inverter) και δημιούργησε νέα δεδομένα υπέρ των μηχανικών ανελκυστήρων.



**Σχήμα 2.2:** Μηχανικός ανελκυστήρας & κύρια μέρη του

**Πλεονεκτήματα μηχανικού ανελκυστήρα:**

- Εξοικονόμηση ενέργειας (έως και 35%).
- Δεν έχει περιορισμό στο ύψος των κτιρίων που μπορεί να εγκατασταθεί.
- Δεν έχει περιορισμό στην ταχύτητα που μπορεί να φτάσει.
- Δεν έχει περιορισμό στις ζεύσεις που μπορεί να εκτελέσει.
- Είναι φιλικός για το περιβάλλον.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής του ανελκυστήρα.
- Η απλή λειτουργία και αξιοπιστία μειώνουν σημαντικά τα έξοδα επισκευών
- Δεν χρειάζεται μηχανοστάσιο (τύπος MRL).

**Μειονεκτήματα μηχανικού ανελκυστήρα:**

- Δύσκολη εγκατάσταση.
- Ο θάλαμος είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο, στο ίδιο φρεάτιο, υδραυλικό ανελκυστήρα, λόγω παρουσίας αντίβαρου.
- Δεν υπάρχει ενσωματωμένος μηχανισμός απεγκλωβισμού σε περίπτωση διακοπής ρεύματος.
- Υψηλό κόστος εγκατάστασης έναντι του υδραυλικού.
- Δεν έχει ευελιξία στον σχεδιασμό κτιρίων και εξοικονόμηση χώρου στην περίπτωση του μηχανοστασίου.

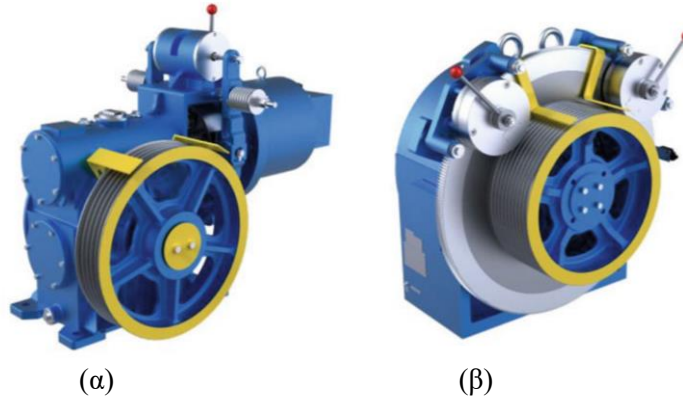
**2.1.3 Επιλογή αρχής λειτουργίας για την παρούσα εφαρμογή****Πίνακας 2.2:** Σύγκριση τύπων ανελκυστήρων

<b>Χαρακτηριστικά</b>	<b>Μηχανικοί ανελκυστήρες</b>	<b>Υδραυλικοί ανελκυστήρες</b>
Αρχή λειτουργίας	Τριβή	Υδραυλική πίεση
Κατάλληλοι για πολύροφα κτήρια	Ναι	Όχι
Απαιτούν μηχανοστάσιο	Όχι	Ναι
Ταχύτητα κίνησης	Υψηλή	Χαμηλή
Ακρίβεια θέσης	Καλή	Καλή
Κόστος εγκατάστασης	Υψηλό	Χαμηλό
Συντήρηση και επισκευές	Σχετικά εύκολες	Περίπλοκες
Κόστος συντήρησης και ανταλλακτικών	Χαμηλό	Υψηλό
Προσβασιμότητα για συντήρηση και επισκευές	Εύκολη	Δύσκολη
Ευκολία ενσωμάτωσης στον σχεδιασμό του κτιρίου	Περιορισμένη	Εύκολη
Απόκριση σε έκτακτες καταστάσεις	Περιορισμένη	Καλή
Κατανάλωση Ενέργειας	Χαμηλή	Υψηλή
Δυνατότητες σε Χωρητικότητα	Μεγάλη ικανότητα	Περιορισμένη
Διάρκεια Ζωής	Μεγάλη	Σχετικά μεγάλη
Αθόρυβη Λειτουργία	Ναι	Όχι

Με βάση την ανάλυση των χαρακτηριστικών και των πλεονεκτημάτων κάθε είδους ανελκυστήρα, συμπεραίνεται ότι οι μηχανικοί ανελκυστήρες εμφανίζουν πολλά πλεονεκτήματα και είναι κατάλληλοι για ποικίλες εφαρμογές. Έτσι, στην παρούσα εφαρμογή θα χρησιμοποιηθεί ο παραπάνω τύπος ανελκυστήρα.

### 2.1.4 Σχέση μετάδοσης

Τα τελευταία χρόνια, με τη βιομηχανία ανελκυστήρων να αναπτύσσεται σταθερά, το ποσοστό των μηχανών έλξης χωρίς μειωτήρα (κιβώτιο ταχυτήτων) αυξάνεται συνεχώς. Σε σύγκριση με την παραδοσιακή μηχανή έλξης με γρανάζια, η απευθείας μετάδοση χωρίς μειωτήρα έχει μοναδικά πλεονεκτήματα.



Σχήμα 2.3: α) με μειωτήρα β) χωρίς μειωτήρα [6]

Παρακάτω ακολουθεί μια αναλυτική σύγκριση των δύο συστημάτων κίνησης ως προς την απόδοση, τον όγκο και τις ανάγκες συντήρησης:

- **Απόδοση**

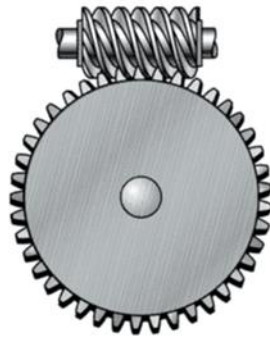
Η διαμεσολάβηση του κιβωτίου ταχυτήτων στο σύστημα εισάγει μηχανικές απώλειες. Λόγω τριβών στα δόντια των γραναζιών υπάρχει κατά κύριο λόγο απώλεια της ενέργειας σε θερμότητα. Επίσης, σε σύστημα με μειωτήρα, χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο ασύγχρονη μηχανή η οποία εκ φύσεως έχει μικρότερο βαθμό απόδοσης από την σύγχρονη μονίμων μαγνητών, ενώ ταυτόχρονα υστερεί και σε λειτουργικές δυνατότητες αναγέννησης ενέργειας. Όταν ο ανελκυστήρας κινείται προς την φορά που ενοείται από την βαρύτητα, η σύγχρονη μηχανή μπορεί να λειτουργήσει ως γεννήτρια για την αναγέννηση ισχύος.

- **Όγκος**

Λόγω της ύπαρξης μιας σειράς μηχανισμών μετάδοσης, το σύστημα με μειωτήρα καταλαμβάνει μεγαλύτερο χώρο. Ως εκ τούτου, κατά τη διαδικασία κατασκευής, τα κτήρια σχεδιάζονται με μηχανοστάσιο MR (Machine Room), το οποίο τοποθετείται στην κορυφή του φρεατίου, για να τοποθετηθούν μέσα σε αυτό, η μηχανή έλξης, το κιβώτιο ταχυτήτων και άλλοι μηχανισμοί μετάδοσης. Αυτό σπαταλά τη διαθέσιμη επιφάνεια στο κτήριο. Από την άλλη σε σύστημα κίνησης χωρίς μηχανισμό μετάδοσης χρησιμοποιείται συχνά η τεχνολογία των MRL (Machine Room-Less) ανελκυστήρων. Οι ανελκυστήρες αυτοί διακρίνονται από την απουσία ενός παραδοσιακού μηχανοστασίου, καθιστώντας την εγκατάστασή τους ιδανική για κτήρια που θέλουν να εξοικονομήσουν χώρο. Αφενός, εξοικονομείται σημαντικός χώρος στο κτήριο, καθώς δεν χρειάζεται το παραδοσιακό μηχανοστάσιο, και αφετέρου, προσφέρεται μια πιο αθόρυβη λειτουργία, βελτιώνοντας την εμπειρία των χρηστών.

- **Ανάγκες συντήρησης**

Ένα σύστημα με κιβώτιο ταχυτήτων, απαιτεί ένα περίπλοκο σύστημα λίπανσης, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι τριβές που θα προκαλέσουν απώλειες σε θερμότητα καθώς και φθορά στα γρανάζια. Συχνά, σε εφαρμογές που χρησιμοποιούν κιβώτια ταχυτήτων (μειωτήρες), κατά την λειτουργία τους, προκύπτει, ότι αποτελούν και την αχίλλειο πτέρνα σε θέμα αστοχιών. Υπάρχουν περιστατικά από διαρροές καθώς και φθορές στα γρανάζια. Έτσι, γίνεται εμφανής η ανάγκη για τακτική συντήρηση, η οποία περιλαμβάνει συχνή αλλαγή του λιπαντικού και έλεγχο, γεγονός το οποίο αυξάνει το κόστος της συντήρησης αλλά και τις επιπτώσεις στο περιβάλλον. [6]



**Σχήμα 2.4:** Ατέρμονας κοχλίας με γρανάζι (κορώνα)

Τα παραπάνω προτερήματα του συστήματος κίνησης απευθείας μετάδοσης, σε απόδοση, εξοικονόμηση ενέργειας και χώρου (χωρίς μηχανοστάσιο (MRL) μας οδηγούν στην επιλογή του για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

## 2.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Η ηλεκτρική μηχανή αποτελεί μία διάταξη που έχει την δυνατότητα μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική και το αντίστροφο. Μια τέτοια συσκευή, όταν χρησιμοποιείται για την μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική ονομάζεται κινητήρας, ενώ για το αντίστροφο γεννήτρια. Σχεδόν όλες οι υπάρχουσες γεννήτριες και κινητήρες μετατρέπουν την ενέργεια από την μια μορφή στην άλλη μέσω της δράσης ενός μαγνητικού πεδίου. [7]

Οι ηλεκτροκινητήρες διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο της μετάδοσης της κίνησης (ευθύγραμμοι, περιστροφικοί), την γεωμετρία τους (ακτινικής, αξονικής ροής), τον τρόπο τροφοδοσίας τους (εναλλασσόμενου, συνεχούς ρεύματος), τις λειτουργικές τους ιδιότητες (ασύγχρονοι, σύγχρονοι) καθώς και τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά (δρομέας κλωβού, μονίμων μαγνητών κ.α.).





**Σχήμα 2.5:** Σχηματική αναπαράσταση των τύπων ηλεκτρικών κινητήρων ανάλογα με την σχεδίαση στάτη-δρομέα και την αρχή λειτουργίας τους

### 2.2.1 Τα βασικά είδη ηλεκτρικών μηχανών σε κινητήρια συστήματα

- **Η μηχανή συνεχούς ρεύματος (ΣΡ)**

Η λειτουργία στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος βασίζεται στην συνεχή τάση, μέσω της οποίας τροφοδοτούνται τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα. Η μηχανή ΣΡ έχει δύο τυλίγματα, το τύλιγμα διέγερσης στον στάτη, το οποίο πρακτικά αποτελεί έναν ηλεκτρομαγνήτη που παράγει ένα σταθερό πεδίο και το τύλιγμα τυμπάνου στο δρομέα. Το τύλιγμα τυμπάνου αποτελείται από μια ειδική διαμόρφωση βροχοτυλίγματος ή κυματοτυλίγματος, οι άκρες του οποίου καταλήγουν σε επαφές που αποκαλούνται συλλέκτης. Πάνω στον συλλέκτη ολισθαίνουν οι ψήκτρες και μέσω μηχανικού τρόπου γίνεται μεταγωγή τυλιγμάτων καθώς ο δρομέας στρέφεται, ώστε να διατηρούνται κάθετα τα πεδία του δρομέα και του στάτη (τυμπάνου και διέγερσης). Η διαμόρφωση της μηχανής μπορεί να έχει παραλλαγές ως προς την συνδεσμολογία των δύο τυλιγμάτων, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της εφαρμογής και τις ανάγκες ροπής-στροφών (σύνδεση σειράς, παράλληλη, ξένη). Η μηχανή ΣΡ αποτέλεσε μία από τις πρώτες μορφές ηλεκτροκινητήρα που χρησιμοποιήθηκε σε εφαρμογές κίνησης, λόγω της απλότητας στον έλεγχο της οδήγησής της. Ωστόσο, οι αυξημένες ανάγκες συντήρησης του μηχανικού συστήματος συλλέκτη – ψηκτρών καθώς και η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος έκαναν την μηχανή ΣΡ λιγότερο δελεαστική σε σχέση με τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος.

- **Η μηχανή επαγωγής ή ασύγχρονη μηχανή**

Η ασύγχρονη μηχανή λόγω της απλότητας της κατασκευής της, του χαμηλού κόστους, της ελάχιστης συντήρησης και της μεγάλης συγκέντρωσης ισχύος, είναι ο πιο διαδεδομένος κινητήρας στη βιομηχανία. Αποτελείται από τριφασικό τύλιγμα στον στάτη και χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με την διαμόρφωση του δρομέα (τυλιγμένου δρομέα και δρομέα βραχυκυκλωμένου κλωβού). Τα παραπάνω είδη του δρομέα και οι διαφορετικές

διαμορφώσεις του, επηρεάζουν την απόδοση του κινητήρα, την καμπύλη ροπής στροφών, την ολίσθηση καθώς και τα ρεύματα εκκίνησης. Τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα στον στάτη και ονομάζεται επαγωγικός, γιατί το ρεύμα διέγερσης του δρομέα δημιουργείται από επαγωγή, αντί να παρέχεται με ηλεκτρική σύνδεση από κάποια πηγή. Το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο που παράγει ο στάτης, αλληλοεπιδρά με το τύλιγμα του δρομέα και του επάγει τάση η οποία προκαλεί ρεύμα στο βραχυκυκλωμένο τύλιγμα. Έτσι, ο δρομέας παράγει το δικό του πεδίο, το οποίο αλληλοεπιδρά με αυτό του στάτη και προκαλεί ροπή. Τα δύο πεδία περιστρέφονται σύγχρονα, όμως η μάζα του δρομέα περιστρέφεται με ελαφρώς μικρότερη ταχύτητα από αυτή του σύγχρονου πεδίου. Άρα υπάρχει μια ολίσθηση του πεδίου πάνω στο δρομέα και για αυτό λέγεται και ασύγχρονος. Οι πλειοψηφία τους είναι τύπου δρομέα κλωβού, αφού έχει εξαιρετικά απλούστερη -και άρα οικονομικότερη- κατασκευή, όμως η απόδοσή της είναι 80-90%, ενώ επίσης έχει ανάγκη κατανάλωσης αέργου ισχύος (ανάγκη πυκνωτών αντιστάθμισης για βελτίωση του συντελεστή ισχύος).

- **Η σύγχρονη μηχανή**

Η σύγχρονη μηχανή αποτελείται από ένα τριφασικό τύλιγμα στάτη και έναν δρομέα με σταθερή διέγερση. Στον στάτη της μηχανής -όμοια με την ασύγχρονη- εφαρμόζεται ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων που προκαλούν στο εσωτερικό της μηχανής στρεφόμενο πεδίο. Το σταθερό πεδίο του δρομέα αλληλοεπιδρά με αυτό του στάτη, τείνοντας να ευθυγραμμιστεί. Επειδή όμως το πεδίο του στάτη περιστρέφεται συνεχώς, το πεδίο του δρομέα (και ο ίδιος ο δρομέας) προσπαθεί συνεχώς να το ακολουθήσει, παράγοντας έτσι ροπή. Οι γωνία μεταξύ των δύο πεδίων είναι καθοριστικής σημασίας για την ανάπτυξη ροπής, αφού όπως είδαμε και με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, η βέλτιστη αξιοποίησή τους πραγματοποιείται όταν τα πεδία βρίσκονται κάθετα. Το σταθερό πεδίο του δρομέα μπορεί να επιτευχθεί είτε με τύλιγμα διέγερσης, το οποίο θα διαρρέεται από σταθερό ρεύμα (=σταθερό πεδίο), είτε μέσω μονίμων μαγνητών. Στην περίπτωση του τυλίγματος διέγερσης, απαιτείται δακτυλιοφόρος δρομέας με 2 επαφές όπου θα εφαρμόζεται συνεχής τάση. Αυτό έχει ως επακόλουθο απώλειες στο τύλιγμα του δρομέα, καθώς και ανάγκες συντήρησης στο μηχανικό σύστημα δακτυλίων – ψηκτρών.

- **Η σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών (Σ.Μ.Μ.Μ.)**

Στην περίπτωση των μονίμων μαγνητών, το σταθερό πεδίο επιτυγχάνεται χωρίς τα παραπάνω μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν στον δακτυλιοφόρο δρομέα, γεγονός που αυξάνει την απόδοση των Σύγχρονων Μηχανών Μονίμων Μαγνητών (Σ.Μ.Μ.Μ.). Παλαιότερα, η τεχνολογία των μονίμων μαγνητών ήταν λιγότερο ανεπτυγμένη. Υπήρχαν προβλήματα με την ποιότητα και τη σταθερότητα των μαγνητικών υλικών, καθιστώντας τους λιγότερο αξιόπιστους για βιομηχανική χρήση. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχουν σημειωθεί σημαντικές βελτιώσεις στην τεχνολογία των μονίμων μαγνητών. Οι νέοι μαγνήτες όπως οι νεοδυμίου-σιδήρου-βορίου (NdFeB) προσφέρουν υψηλή ισχύ και απόδοση, ενώ έχουν μειωθεί τα προβλήματα λόγω της ευαισθησίας τους σε απομαγνήτιση. Αυτός ο συνδυασμός απόδοσης, αξιοπιστίας και χαμηλού κόστους έχει οδηγήσει στην αυξημένη χρήση των μονίμων μαγνητών στους ηλεκτρικούς κινητήρες.

- **Η μηχανή μαγνητικής αντίστασης**

Οι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης ανήκουν στην οικογένεια των σύγχρονων μηχανών. Αποτελούνται από το τριφασικό τύλιγμα στάτη (όμοια με τις σύγχρονες και τις ασύγχρονες), αλλά ο δρομέας δεν έχει τύλιγμα, ούτε μαγνήτες. Ο δρομέας έχει τέτοια γεωμετρία, ώστε η διέλευση της μαγνητικής ροής του στάτη να διευκολύνεται από κάποιες οδούς και από κάποιες άλλες όχι. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, το υλικό του δρομέα να προσπαθεί να ευθυγραμμιστεί με την ροή επιλέγοντας την οδό με την μικρότερη μαγνητική αντίσταση. Το χαρακτηριστικό που έχει ο δρομέας, να παρουσιάζει διαφορετική μαγνητική αντίσταση καθώς στρέφεται, ονομάζεται εκτυπότητα. Έτσι γίνεται εμφανές ότι ενώ σε όλες τις προηγούμενες μηχανές είχαμε την αλληλεπίδραση δύο πεδίων για παραγωγή ροπής, σε αυτή την περίπτωση υπάρχει μόνο το πεδίο του στάτη. Σημαντικά μειονεκτήματα αυτού του τύπου είναι η χαμηλή πυκνότητα ισχύος ως προς το βάρος και τον όγκο, ο περιορισμένος βαθμός απόδοσης και ο πολύπλοκος έλεγχος. Ο δρομέας στρέφεται και πάλι στην σύγχρονη ταχύτητα γι' αυτό οι σχεδιαστές, συνδυάζουν το συγκεκριμένο είδος μηχανών με την προσθήκη μαγνητών, επιδιώκοντας έτσι την εκμετάλλευση πλεονεκτημάτων των ΣΜΜΜ.

### 2.2.2 Αξιολόγηση κινητήρων και επιλογή

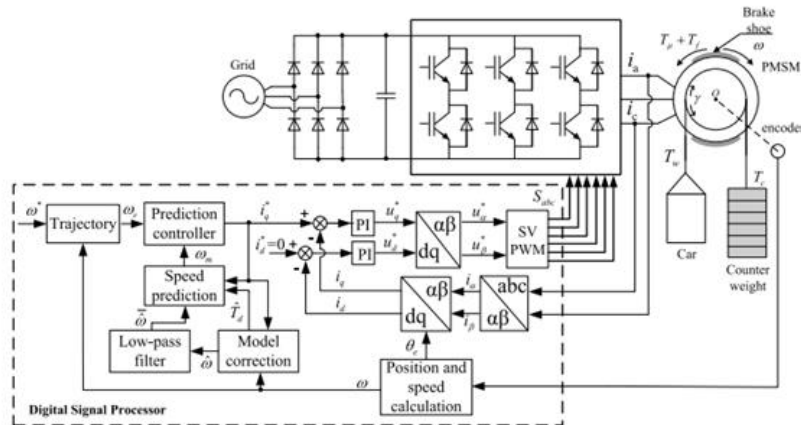
Στην επιλογή κινητήρων για εφαρμογές, υπάρχουν πολλοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη, όπως η απόδοση, η πολυπλοκότητα στον έλεγχο, η διάρκεια ζωής και το κόστος. Η κάθε τεχνολογία κινητήρα παρουσιάζει μοναδικά πλεονεκτήματα και αδυναμίες, και επομένως είναι κρίσιμο να γίνει μια περιεκτική αξιολόγηση προτού ληφθεί μια απόφαση. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται μια συγκριτική ανάλυση διαφόρων τύπων κινητήρων, βασιζόμενη σε διάφορα κριτήρια, με σκοπό να παράσχει μια ολοκληρωμένη εικόνα των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών της κάθε τεχνολογίας.

**Πίνακας 2.3:** Αξιολόγηση κινητήρων

Κριτήριο	DC Κινητήρας	Κινητήρας Επαγωγής	Κινητήρας Μονίμων Μαγνητών	Κινητήρας Μαγνητικής αντίστασης
Απόδοση	4	3	5	2
Έλεγχος	3	4	5	2
Αξιοπιστία	3	4	4	3
Κόστος	4	4	3	5
Πυκνότητα Ισχύος	3	4	4	4
Ανάγκη Συντήρησης	3	4	3	4
Αντοχή/Διάρκεια Ζωής	4	3	4	4
Απόδοση Κινητήρα σε Μεταβλητές Συνθήκες Φορτίου	4	5	5	4
Δυνατότητα Αναγεννητικής Πέδησης	5	4	5	3
Συμβατότητα με Ελεγκτές Ανελκυστήρα	4	5	4	3
<b>Σύνολο</b>	<b>37</b>	<b>40</b>	<b>42</b>	<b>34</b>

### 2.2.3 Συνολικό ηλεκτρομηχανικό σύστημα

Στις παραπάνω ενότητες παρουσιάστηκαν οι δύο κατηγορίες των ανελκυστήρων ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους και έγινε επιλογή του μηχανικού ανελκυστήρα χωρίς κιβώτιο. Ο κινητήρας που επιλέχθηκε είναι Σύγχρονος μονίμων μαγνητών. Για την οδήγησή του είναι απαραίτητη η ύπαρξη AC/DC/AC μετατροπέα. Στο σχήμα 2.6 φαίνεται το συνολικό ηλεκτρομηχανικό σύστημα.



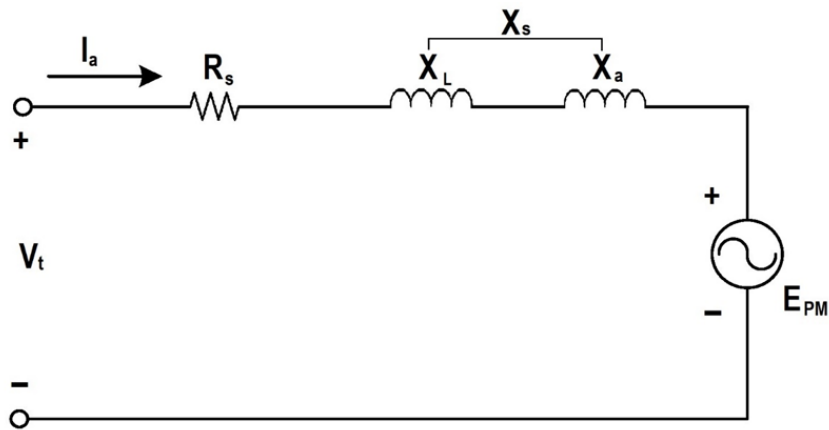
Σχήμα 2.6: Ηλεκτρομηχανικό σύστημα μηχανικού ανελκυστήρα [8]

Η κεντρική πηγή τροφοδοσίας είναι το τριφασικό δίκτυο χαμηλής τάσης. Ενώ οι παραδοσιακοί κινητήρες επαγωγής μπορούν να εκκινήσουν με απλό τρόπο απευθείας στο δίκτυο (“Direct On Line” DOL), οι σύγχρονοι κινητήρες, όπως οι ΣΜΜΜ, απαιτούν έλεγχο. Έτσι, μεταξύ του δικτύου και του κινητήρα παρεμβάλλεται μετατροπέας AC/DC/AC. Ο μετατροπέας τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα που παρέχεται από το δίκτυο, το ανορθώνει και στη συνέχεια το μετατρέπει σε εναλλασσόμενο ρεύμα, με κατάλληλη συχνότητα και τάση (VVVF), ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή ροπή και ταχύτητα στον κινητήρα. Το σύστημα ελέγχου έχει είσοδο την επιθυμητή ταχύτητα που πρέπει να περιστραφεί ο κινητήρας. Με την χρήση encoder ο μετατροπέας γνωρίζει την θέση του δρομέα και εφαρμόζει ρεύματα στον κινητήρα, με κατάλληλη γωνία, ώστε να παραχθεί ροπή. Για να γίνει πιο σαφής η κατανόηση της οδήγησης είναι απαραίτητη η επισκόπηση του ισοδύναμου κυκλώματος της ΣΜΜΜ, στην επόμενη υποενότητα.

## 2.3 ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ (Σ.Μ.Μ.Μ.)

### 2.3.1 Ισοδύναμο κύκλωμα – Πλαίσια $\alpha\beta, dq$ – Καμπύλη ροπής

Σε μια τριφασική σύγχρονη μηχανή έχουμε συμμετρία των 3 φάσεων (ίδιες ενεργές τιμές ρευμάτων και τάσεων σε κάθε φάση). Η μόνη διαφορά είναι στην γωνία που υπάρχει μεταξύ των φάσεων. Έχουμε δηλαδή ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα. Αυτό επιτρέπει τη μελέτη του ανά φάση ισοδύναμου κυκλώματος και την μοντελοποίηση του ηλεκτρικού μέρους του σύγχρονου κινητήρα, προκειμένου να γίνουν πρακτικοί υπολογισμοί με ικανοποιητική ακρίβεια, θεωρώντας κάποιες παραδοχές.



Σχήμα 2.7: Το ανά φάση απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα ενός Σ.Κ.Μ.Μ.

Εφαρμόζεται τάση  $V_t$  στα άκρα του στάτη. Από Νόμο Τάσεων Kirchoff προκύπτει:

$$\widehat{V}_t = \widehat{E}_{PM} + (R_s + jX_s) \cdot \widehat{I}_a \quad (2.1)$$

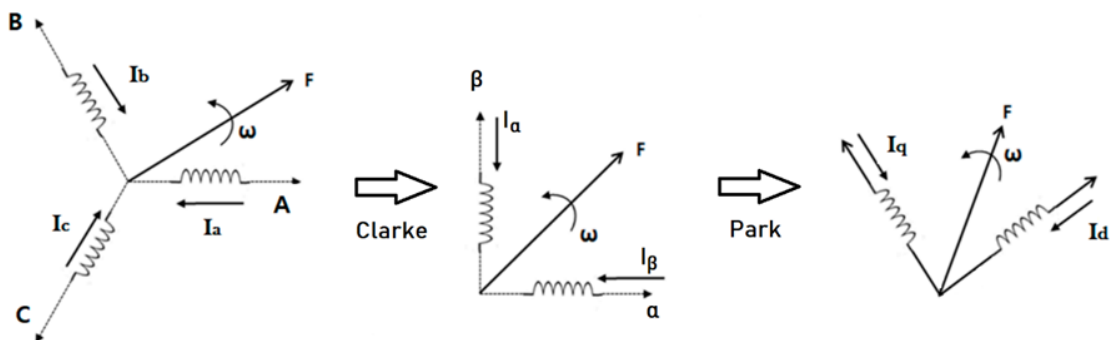
Όπου,  $\widehat{E}_{PM}$  η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη (Α.Η.Ε.Δ.) η οποία επάγεται από το σταθερό πεδίο των μαγνητών του δρομεα και είναι γραμμικά ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής του.

$R_s$  η ωμική αντίσταση που παρουσιάζει το (χάλκινο) σύρμα από το οποίο αποτελούνται τα ελίγματα του στάτη

$X_L$  η αντίδραση μαγνήτησης

$X_a$  η αντίδραση σκέδασης του στάτη από την μαγνητική ροή που κλείνει στον αέρα καθώς και από τα πεδία των αρμονικών χώρου που παράγονται στο διάκενο.

Οι τρεις φάσεις αλληλεπιδρούν στο ίδιο σύστημα (σύνδεση σε αστέρα ή τρίγωνο) και έτσι προκύπτουν δύσκολοι υπολογισμοί. Για αυτό τον λόγο είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι οι μετασχηματισμοί Clarke & Park. Ο μετασχηματισμός στο στρεφόμενο πλαίσιο dq0 αποτελείται από διαδοχική χρήση των δύο μετασχηματισμών. Ο μετασχηματισμός Clarke μετατρέπει τα αρχικά διανύσματα, από το abc πλαίσιο αναφοράς στο αβ0 σταθερό πλαίσιο αναφοράς. Ο μετασχηματισμός Park μετατρέπει τα διανύσματα, από το αβ0 σταθερό πλαίσιο αναφοράς στο dq0 στρεφόμενο πλαίσιο.



Σχήμα 2.8: Οι μετασχηματισμοί Clarke & Park

Οι μετασχηματισμοί απομακρύνουν τις μεταβλητές που σχετίζονται με την περιστροφή (όπως η γωνιακή ταχύτητα) από τις εξισώσεις του συστήματος. Έτσι, διευκολύνουν την ανάλυση του συστήματος, αποκτώντας σταθερές συνιστώσες.

Ο μετασχηματισμός από το τριφασικό στο στρεφόμενο dq πλαίσιο:

$$\begin{bmatrix} d \\ q \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Στην μελέτη των τριφασικών μηχανών το πλαίσιο dq χρησιμοποιείται κατά κόρον αφού οι ποσότητες ρευμάτων, τάσεων, πεπλεγμένων ροών και αυτεπαγωγών μπορούν να εκφραστούν σαν χρονοσταθερές ποσότητες, όπως θα συνέβαινε σε μια μηχανή συνεχούς ρεύματος.

Στην περίπτωση των ΣΜΜΜ σαν αναφορά για την τοποθέτηση του dq πλαισίου έχουμε τον d (ευθύ) άξονα να ταυτίζεται με την ροή του μαγνήτη, ενώ τον q (εγκάρσιο) να προπορεύεται 90 μοίρες. Στην περίπτωση του συμμετρικού τριφασικού συστήματος, η συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας είναι μηδέν.

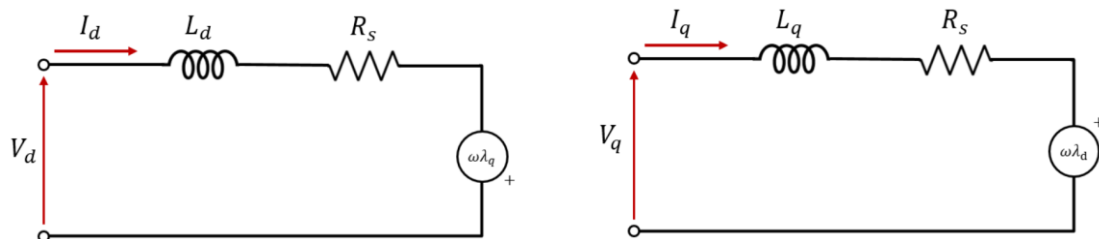
Οι πεπλεγμένες ροές των d ευθύ και q εγκάρσιου άξονα στην γραμμική περιοχή του σιδήρου (πριν το γόνατο κορεσμού) εκφράζονται:

$$\lambda_d = \lambda_{pm} + L_d I_d \quad (2.3)$$

$$\lambda_q = L_q I_q \quad (2.4)$$

Όπου,  $\lambda_{pm}$  η πεπλεγμένη ροή του μαγνήτη η οποία ταυτίζεται με τον d άξονα.

Τα ισοδύναμα κυκλώματα της σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών στο dq πλαίσιο αναφοράς είναι τα ακόλουθα.



**Σχήμα 2.9:** Αριστερά: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ευθύ άξονα  
Δεξιά: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα εγκάρσιου άξονα [9]

Στα παραπάνω κυκλώματα σε συνδυασμό με τις σχέσεις 2.3 & 2.4 εφαρμόζονται οι Ν.Τ.Κ.:

$$V_d = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega_e L_q I_q \quad (2.5)$$

$$V_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega_e (\lambda_{pm} + L_d I_d) \quad (2.6)$$

Τέλος, ολοκληρώνοντας την ανάλυση, η ηλεκτρομαγνητική ροπή στο πεδίο του Park είναι:

$$T_{em} = \frac{3}{4}P(\lambda_d I_q - \lambda_q I_d) \Rightarrow T_{em} = \frac{3}{4}P(\lambda_{pm} I_q + (L_d - L_q) I_q I_d) \quad (2.7)$$

Εισάγοντας την εσωτερική γωνία  $\delta$  στις τιμές του ρεύματος  $I_d$ ,  $I_q$ :

$$I_d = I_s \cos(\delta) \quad (2.8)$$

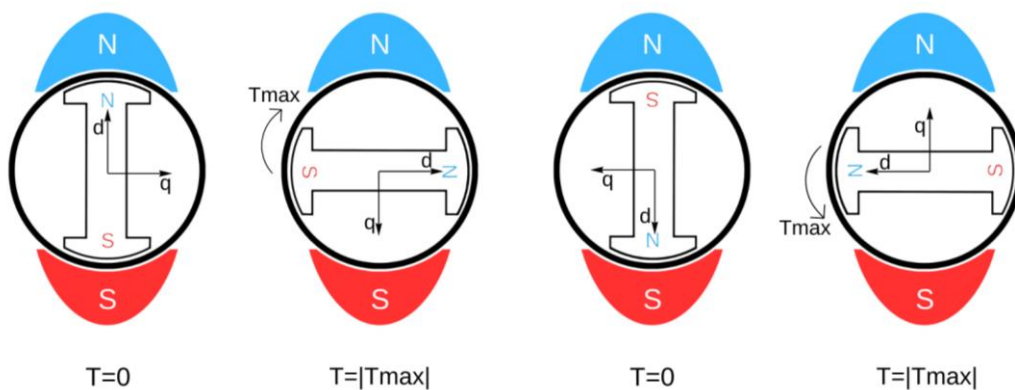
$$I_q = I_s \cos(\delta + 90^\circ) = I_s \sin(\delta) \quad (2.9)$$

Έτσι, αντικαθιστώντας στην σχέση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής τα ρεύματα συναρτήσει της εσωτερικής γωνίας  $\delta$  προκύπτει η τελική σχέση της εσωτερικής γωνίας ροπής:

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{3}{4}P(\lambda_{pm} I_s \sin(\delta) + (L_d - L_q) I_s \sin(\delta) I_s \cos(\delta)) \Rightarrow \\ T_{em} &= \frac{3}{4}P\left(\lambda_{pm} I_s \sin(\delta) + \frac{(L_d - L_q) I_s^2 \sin(2\delta)}{2}\right) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Από την τελική σχέση, γίνεται εμφανές ότι η ροπή του κινητήρα για δεδομένη εσωτερική γωνία  $\delta$  εξαρτάται από 2 όρους:

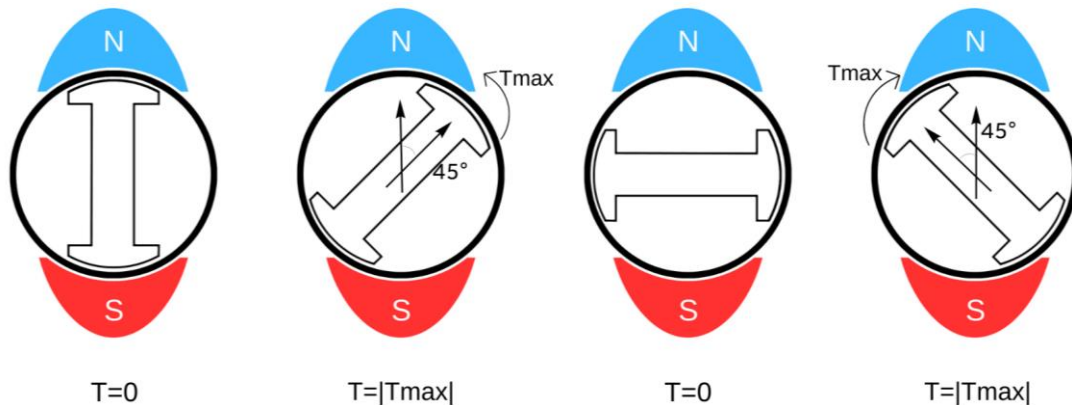
- Από τον όρο:  $T_{magnetic} = \frac{3}{4}P(\lambda_{pm} I_s \sin(\delta))$  ο οποίος υπολογίζει την ροπή που προκαλείται εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των πεδίων στάτη και δρομέα (Ροπή μαγνήτισης). Ο όρος  $\lambda_{pm}$  οφείλεται στον δρομέα ενώ ο όρος  $I_s \sin \delta$  ( $=I_q$ ) στον στάτη. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί η εξάρτηση της ροπής μαγνήτισης αποκλειστικά από την συνιστώσα ρεύματος στον εγκάρσιο ( $q$ ) άξονα. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το σταθερό πεδίο του μαγνήτη είναι προσανατολισμένο στον ευθύ ( $d$ ) άξονα. Άρα γίνεται εμφανές ότι για βέλτιστη αξιοποίηση των πεδίων, ώστε να πάρουμε την μέγιστη ροπή, είναι αναγκαία η καθετότητα των πεδίων (όπως συμβαίνει με μηχανικό τρόπο σε μια μηχανή συνεχούς ρεύματος).



**Σχήμα 2.10:** Ροπή μαγνήτισης σε διπολική μηχανή για διαφορετικές θέσεις του δρομέα

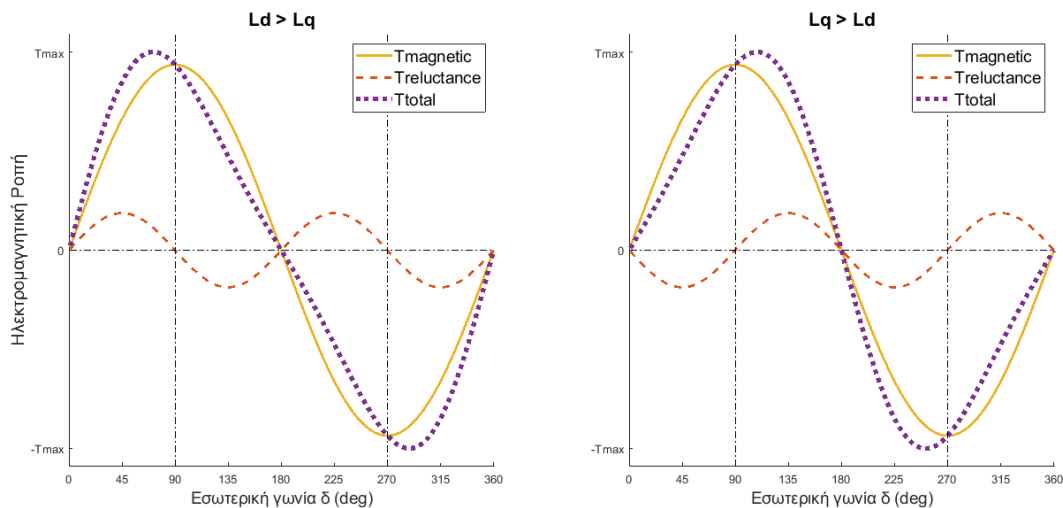
- Από τον όρο  $T_{reluctance} = \frac{3}{4}P \frac{(L_d - L_q) I_s^2 \sin(2\delta)}{2}$  ο οποίος υπολογίζει την ροπή που προκαλείται (ροπή ευθυγράμμισης) λόγω της διαφορετικής μαγνητικής αντίστασης που παρουσιάζει η κατασκευή του δρομέα. Το μαγνητικό κύκλωμα έχει την επιθυμία να βρεθεί στην κατάσταση ελάχιστης μαγνητικής αντίστασης, δηλαδή η μαγνητική ροή που παράγεται

από τον στάτη θέλει να κλείσει από το πιο εύκολο μονοπάτι. Μία μηχανή κυλινδρικού δρομέα ( $L_d = L_q$ ) δεν εμφανίζει εκτυπότητα, αφού ανεξάρτητα της γωνίας του πεδίου ως προς το δρομέα, το μαγνητικό κύκλωμα θα έχει την ίδια μαγνητική αντίσταση. Εν αντιθέσει, σε έναν δρομέα με «εξογκώματα» ( $L_d \neq L_q$ ), η μαγνητική ροή θα τείνει να περάσει από το εύκολο μονοπάτι του σιδηρομαγνητικού υλικού και όχι από τον αέρα ( $\mu_r > \mu_0$ ), προκαλώντας ροπή ευθυγράμμισης. Γενικά σε ΣΜΜΜ, ιδιαίτερα όταν λειτουργούν σε υψηλές στροφές, γίνεται διαμόρφωση του δρομέα ώστε να εισάγει και ροπή ευθυγράμμισης. Αυτό είναι επιθυμητό επειδή σε υψηλές στροφές, η παρουσία της ροπής ευθυγράμμισης δεν συντελεί σε παραγωγή αντί-ΗΕΔ (λειτουργία εξασθένισης πεδίου).



**Σχήμα 2.11:** Ροπή ευθυγράμμισης σε διπολική μηχανή για διαφορετικές θέσεις του δρομέα

Η σχέση μεταξύ των αυτεπαγωγών  $L_d$  και  $L_q$ , καθορίζει την εσωτερική γωνία  $\delta$ , για την οποία η ηλεκτρομαγνητική ροπή επιτυγχάνει τη μέγιστη τιμή της. Αναλυτικότερα, για  $L_d > L_q$  η μέγιστη ροπή παρουσιάζεται για  $\delta < 90^\circ$ . Για  $L_d = L_q$  η ροπή μεγιστοποιείται στις  $\delta = 90^\circ$  μοίρες ενώ για  $L_d < L_q$  για  $\delta > 90^\circ$ . Αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 2.12 αποτυπώνοντας κάθε φορά τις δύο συνιστώσες που παράγουν ροπή.



**Σχήμα 2.12:** Καμπύλη ροπής-εσωτερικής γωνίας  $\delta$  για διαφορετικές σχέσεις αυτεπαγωγών

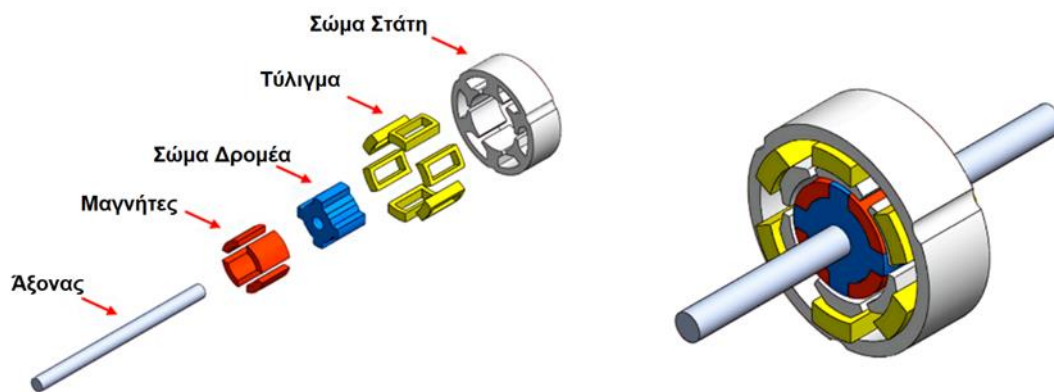


### 2.3.2 Προδιαγραφές υλικών - Συνολική δομή ΣΜΜΜ

Η επιλογή υλικών αποτελεί έναν συμβιβασμό μεταξύ των απαιτήσεων της εφαρμογής, της οικονομικής αξιοπιστίας και λειτουργικότητας της κατασκευής. Συνεπώς, η επιλογή του κατάλληλου υλικού για κάθε μέρος της μηχανής είναι αναγκαίο να λαμβάνει υπόψη τα διάφορα κριτήρια που επηρεάζουν την απόδοση και το κόστος. Η χρήση υλικών υψηλής αντοχής και ποιότητας μπορεί να βελτιώσει την αντοχή και τη διάρκεια ζωής της μηχανής, αλλά ταυτόχρονα αυξάνει και το κόστος της κατασκευής.

Τα κύρια υλικά που αποτελούν την ηλεκτρική μηχανή είναι:

- το υλικό του πυρήνα δρομέα και στάτη
- το υλικό των μαγνητών
- το υλικό του τυλίγματος στο στάτη
- το υλικό του άξονα



Σχήμα 2.13: Δομικά μέρη μιας ΣΜΜΜ [11]

#### 2.3.2.1 Υλικό δρομέα-στάτη - Μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά

Το σώμα των ηλεκτρικών μηχανών κατασκευάζεται από σιδηρομαγνητικά υλικά, βασικό χαρακτηριστικό των οποίων είναι η υστέρηση και μια σειρά από άλλες ιδιότητες όπως:

- **Μικρό εμβαδό βρόχου υστέρησης:** Ο μικρός βρόχος υστέρησης μειώνει τις απώλειες ισχύος κατά την αλλαγή της μαγνητικής ροής. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της απόδοσης και περιορισμένη αύξηση της θερμοκρασίας της μηχανής. Τα υλικά με μικρό εμβαδό βρόχου υστέρησης ονομάζονται «μαλακά», και με απλά λόγια μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται εύκολα.
- **Υψηλή μαγνητική διαπερατότητα:** Μειώνει την μαγνητική αντίσταση της πεπλεγμένης ροής στο μαγνητικό κύκλωμα της μηχανής, επιτρέποντας ομαλή ροή του μαγνητικού πεδίου.
- **Υψηλή μαγνητική επαγωγή κορεσμού:** Επιτρέπει τη διέλευση μεγαλύτερης μαγνητικής ροής ανά μονάδα όγκου, ενώ ταυτόχρονα μικραίνουν οι διαστάσεις και το βάρος της μηχανής.
- **Μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση:** Για να περιοριστούν τα δινορεύματα και να μειωθούν οι απώλειες που προκαλούν, είναι απαραίτητο το σιδηρομαγνητικό υλικό να χαρακτηρίζεται από υψηλή ηλεκτρική αντίσταση. Η υψηλή αντίσταση εμποδίζει την ελεύθερη ροή του ρεύματος μέσα στο υλικό και μειώνει τις απώλειες ισχύος που προκαλούνται από αυτά. Μάλιστα, για αυτό το λόγο, εφαρμόζεται μια τεχνική που αφορά τον πυρήνα του μαγνητικού κυκλώματος. Αντί να χρησιμοποιείται ένα ενιαίο υλικό για τον δρομέα, ο δρομέας αποτελείται από λεπτά ελάσματα, τα οποία

συγκολλούνται μεταξύ τους και απομονώνονται ηλεκτρικά με μονωτικό βερνίκι (ταυτόχρονα το βερνίκι προστατεύει τον σίδηρο από την οξείδωση).

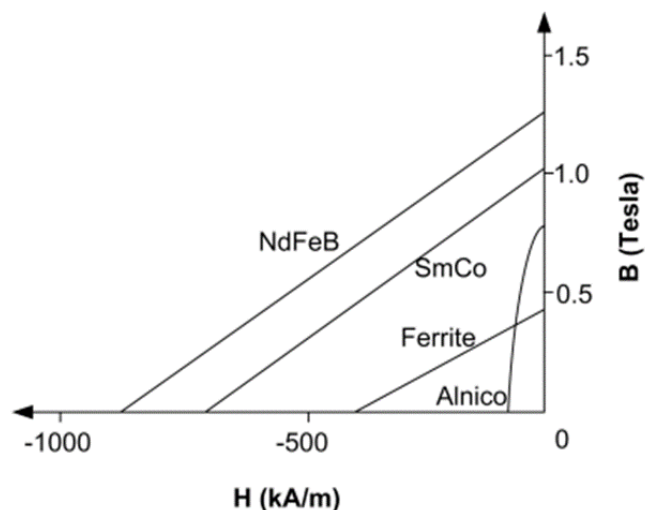
Το πιο συνηθισμένο μαλακό μαγνητικό υλικό που χρησιμοποιείται στις ηλεκτρικές μηχανές είναι ο ηλεκτρικός χάλυβας πυριτίου-σιδήρου με μορφή λεπτών ελασμάτων (λαμαρινών). Η προσθήκη πυριτίου σε μαλακό σίδηρο οδηγεί σε σημαντική μείωση της μαγνητικής αντίστασης, ελαφρά μείωση της μαγνήτισης κορεσμού και αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης. Το πάχος των ελασμάτων επιλέγεται μικρότερο από το μισό του βάθους διεύθυνσης των δινορευμάτων, δηλαδή εν προκειμένω στα 20 Hz επιλέγεται 0.5mm.

### 2.3.2.2 Μόνιμοι μαγνήτες – Σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά

Οι μόνιμοι μαγνήτες αποτελούν κρίσιμο στοιχείο στην κατασκευή, καθώς αντικαθιστούν το τύλιγμα πεδίου, που απαιτείται για τη δημιουργία του σταθερού μαγνητικού πεδίου στον δρομέα. Κατασκευάζονται από σιδηρομαγνητικά υλικά, τα οποία έχουν μεγάλο εμβαδό βρόχου υστέρησης και ονομάζονται «σκληρά». Έχουν την ιδιότητα να διατηρούν την μαγνήτισή τους, ακόμη και υπό την επίδραση αντίθετων ασθενών μαγνητικών πεδίων.

Ωστόσο, σε υψηλές θερμοκρασίες, οι μαγνητικές ιδιότητές των μόνιμων μαγνητών μπορούν να αλλοιωθούν ή ακόμη και να χαθούν πλήρως. Η πλήρης απομαγνήτιση θα προκαλέσει την απώλεια όλης της λειτουργικότητας της μηχανής. Μέχρι σήμερα, δεν υπάρχει συστηματική μεθοδολογία για κατασκευή μαγνητών για τις ΣΜΜΜ, όπου θα συνδυάζει χαμηλό κόστος και ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες. Η γενική πρακτική για τη μείωση του κινδύνου απομαγνήτισης του μαγνήτη λόγω υψηλών θερμοκρασιών, είναι η αύξηση του πάχους του ή η χρήση μαγνητών υψηλότερης βαθμίδας, το οποίο αναπόφευκτα αυξάνει το κόστος. [16]

Η καμπύλη απομαγνήτισης (B-H) δίνεται στο δεύτερο τεταρτημόριο των αξόνων B-H καθώς το πεδίο H του μαγνήτη εντός της μηχανής συνήθως είναι αρνητικό ενώ παράλληλα η μαγνήτισή του είναι θετική. Συνεπώς οι κύριες μαγνητικές ιδιότητες του μαγνήτη αποτυπώνονται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.13). Παρέχονται πληροφορίες για τη συμπεριφορά και τη διατήρηση του μαγνητισμού του υλικού σε αντίθετα μαγνητικά πεδία. Τα παραπάνω είναι κρίσιμες πληροφορίες για πολλές εφαρμογές μαγνητικών υλικών.



Σχήμα 2.14: Καμπύλες B-H διαφόρων τύπων μαγνητών

- **Μαγνήτες NdFeB (Νεοδυμίου-Σιδήριο-Βορίου)**

Οι ισχυρότεροι μαγνήτες που είναι εμπορικά διαθέσιμοι. Παράγονται από ένα κράμα νεοδυμίου, σιδήρου και βορίου για να σχηματίσει την  $Nd_2Fe_{14}B$  τετραγωνική κρυσταλλική δομή. [12] Οι μαγνήτες νεοδυμίου, σε σύγκριση με τα υπόλοιπα «σκληρά» σιδηρομαγνητικά υλικά, έχουν πιο μεγάλη παραμένουσα μαγνήτιση, πολύ πιο μεγάλη μαγνητική αντίσταση και ενεργειακό περιεχόμενο, αλλά πιο χαμηλή θερμοκρασία Curie από άλλους τύπους.

- **SmCo (Σαμάριο-Κοβάλτιο):**

Αυτό το υλικό έχει λίγο χαμηλότερη δυνατότητα μαγνητισμού (Br) και αντιστάθμιση ( $H_c$ ) από το NdFeB, αλλά είναι πιο ανθεκτικό στην αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό σημαίνει πως διατηρεί τον μαγνητισμό καλύτερα σε υψηλές θερμοκρασίες σε σχέση με το NdFeB.

- **Μαγνήτες κεραμικοί (Ferrite)**

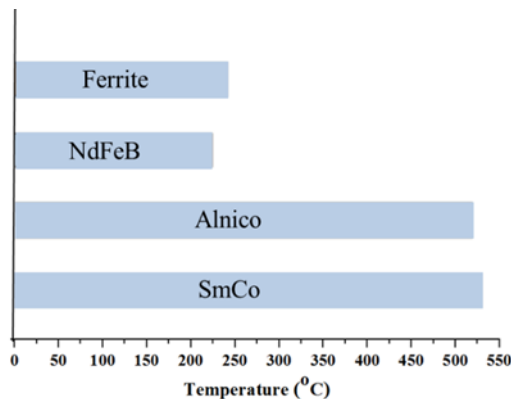
Αυτό το υλικό έχουν χαμηλότερες τιμές μαγνητισμού (Br) και πεδίου επαναφοράς ( $H_c$ ) σε σχέση με το NdFeB και το SmCo. Ωστόσο, είναι φθηνοί και ανθεκτικοί σε θερμοκρασία και οξείδωση.

- **Μαγνήτες AlNiCo (Αλουμίνιο-Νικέλιο-Κοβάλτιο):**

Περιλαμβάνουν κράματα αλουμινίου, νικελίου, κοβαλτίου και σιδήρου. Έχουν μέτρια παραμένουσα μαγνήτιση (Retentivity ή Remanence - Br) και σημείο κορεσμού, αλλά έχουν πολύ χαμηλό πεδίο επαναφοράς (Coercivity -  $H_c$ ). Είναι πολύ ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες.

**Πίνακας 2.4:** Πίνακας σκληρών υλικών [13], [14]

Υλικά	Παραμένουσα μαγνήτιση (Remanence) (T)	Πεδίο επαναφοράς (Coercivity) (kA/m)	Μέγιστο Ενεργειακό Προϊόν ( $kJ/m^3$ )	Θερμοκρασία Curie ( $^{\circ}C$ )
NdFeB	1.1-1.4	800-1100	235-430	310
SmCo	0.85-1.1	630-800	140-250	720
Ferrite	0.23-0.39	150-250	8-28	450
Alnico	0.7-1.2	40-120	20-71	850



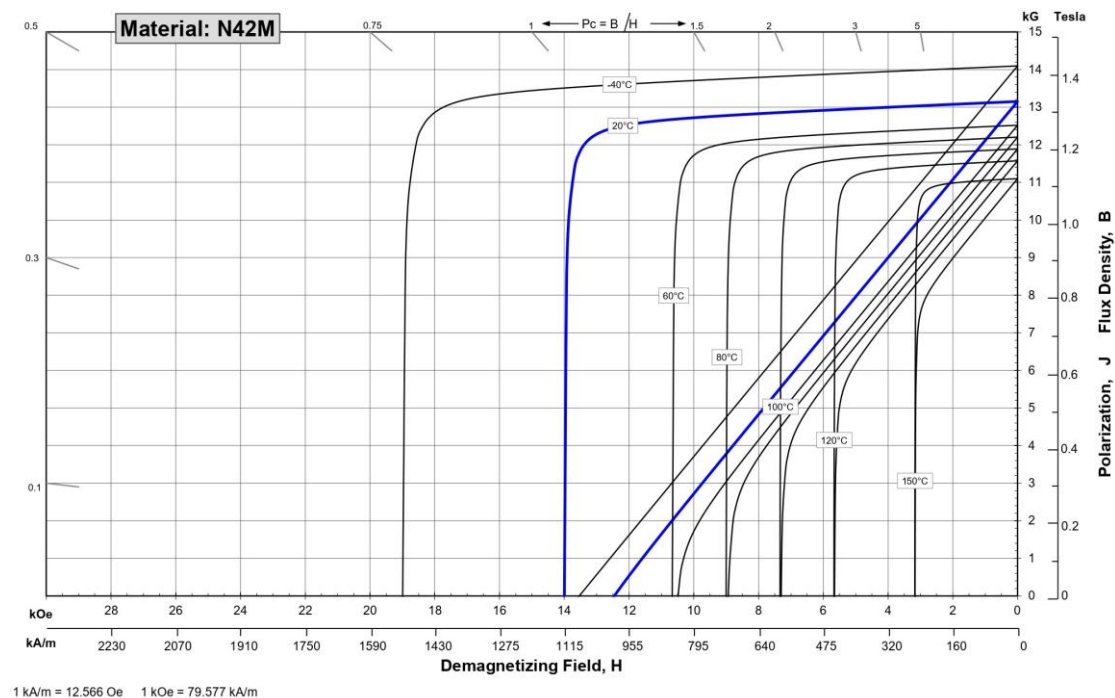
**Σχήμα 2.15:** Θερμοκρασία λειτουργίας μονίμων μαγνητών ανά υλικό [15]

### 2.3.2.3 Επιλογή Μαγνήτη - N42M

Κατά την επιλογή ενός μαγνήτη, είναι κρίσιμο να ληφθούν υπόψη οι συγκεκριμένες απαιτήσεις της εφαρμογής και να επιλεγεί μια βαθμίδα που να ανταποκρίνεται στις ανάγκες όσον αφορά τη μαγνητική δύναμη, το μέγεθος, την αντοχή και το κόστος.

Ο μόνιμος μαγνήτης που επιλέχθηκε στην παρούσα εφαρμογή είναι ο N42. Το "N" στο N42 αντιπροσωπεύει το νεοδύμιο (NdFeB), ενώ ο αριθμός 42 αναπαριστά το μέγιστο προϊόν ενέργειας του μαγνήτη ( $BH_{\max}$ ), το οποίο αντιπροσωπεύει την ενέργεια που αποθηκεύεται στον μαγνήτη. Το μέγιστο προϊόν ενέργειας είναι το εμβαδόν του μεγαλύτερου ορθογωνίου που μπορεί να εγκλωβιστεί κάτω από την καμπύλη απομαγνήτισης και εκφράζεται συνήθως σε Mega Gauss Oersteds (MGOe) ή σε  $\text{kJ/m}^3$ . Οι οριζόντιες πλευρές του ορθογωνίου αντιστοιχούν στην ένταση του μαγνητικού πεδίου  $H$  και οι κατακόρυφες πλευρές του ορθογωνίου αντιστοιχούν στην πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B$ . Το "M" υποδηλώνει ότι αυτός ο μαγνήτης έχει μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας 100 βαθμούς Κελσίου. Άλλες βαθμίδες είναι το "N" για 80 βαθμούς, το "H" για 120 βαθμούς, το "SH" για 150 βαθμούς, το "UH" για 180 βαθμούς και το "EH" για 200 βαθμούς Κελσίου.

Οι μαγνήτες N42 χρησιμοποιούνται συνήθως σε διάφορες εφαρμογές όπου απαιτούνται ισχυρές μαγνητικές δυνάμεις. Διαθέτουν ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο και παρέχουν μια καλή ισορροπία μεταξύ μαγνητικής ισχύος και κόστους. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι υπάρχουν και υψηλότερες βαθμίδες μαγνητών διαθέσιμες, όπως οι N50 ή N52, που προσφέρουν ακόμα καλύτερες μαγνητικές ιδιότητες.



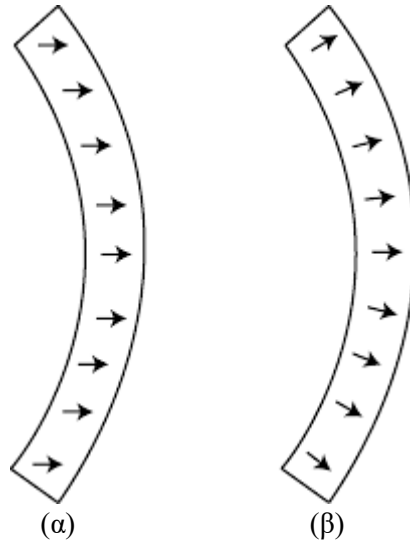
Σχήμα 2.16: Καμπύλη απομαγνήτισης N42M [17]

### 2.3.2.4 Μαγνήτιση Μονίμων μαγνητών

Το σκληρό σιδηρομαγνητικό υλικό, αρχικά επεξεργάζεται και διαμορφώνεται στα σχήματα που έχουν προκύψει κατά την σχεδίαση της εφαρμογής. Στην συνέχεια, το υλικό θερμαίνεται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, που υπερβαίνουν τη θερμοκρασία Curie του υλικού. Η θερμοκρασία Curie είναι η θερμοκρασία στην οποία το υλικό χάνει τις μαγνητικές

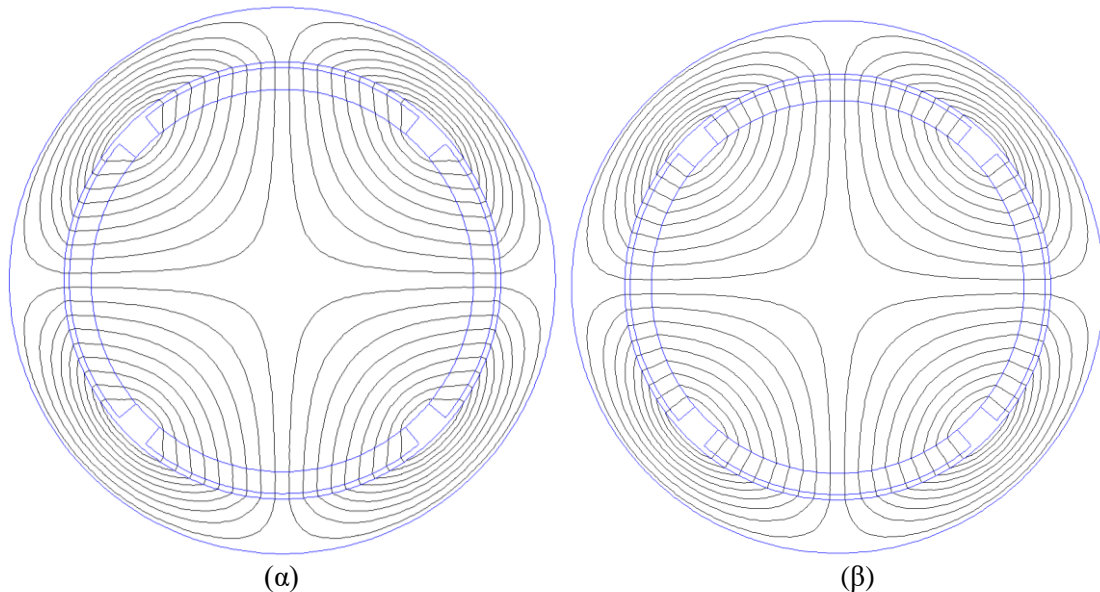
του ιδιότητες. Η υψηλή θερμοκρασία βοηθά στην αναδιάταξη των ατομικών δομών μέσα στο υλικό. Κατά τη διάρκεια της θέρμανσης, εφαρμόζεται στο υλικό ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο. Η παρουσία του μαγνητικού πεδίου ευνοεί την ευθυγράμμιση των μαγνητικών πεδίων των ατομικών δομικών μονάδων του υλικού. Καθώς το υλικό κρύνει, η μαγνητισμένη δομή "παγώνει" και διατηρεί το μαγνητισμό του.

Το μαγνητικό πεδίο χαρακτηρίζεται και από τον προσανατολισμό του και αφορά την κατεύθυνση της μαγνήτισης του μονίμου μαγνήτη. Οι δύο πλέον διαδεδομένες κατευθύνσεις μαγνήτισης είναι η ακτινική και η παράλληλη κατεύθυνση.

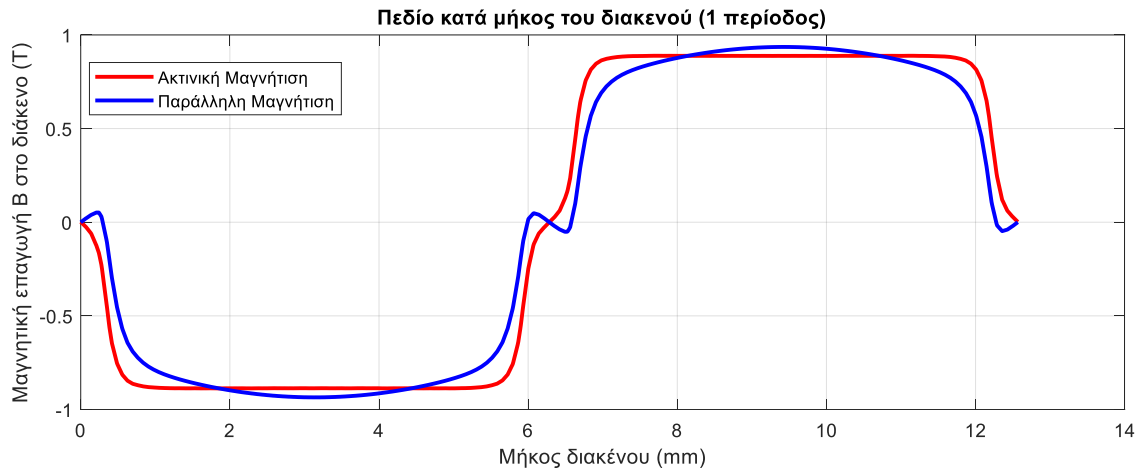


**Σχήμα 2.17:** Τρόπος μαγνήτισης α) παράλληλη μαγνήτιση β) ακτινική μαγνήτιση [18]

Στις ηλεκτρικές μηχανές ο προσανατολισμός του μαγνητικού πεδίου είναι σημαντικός, καθώς επηρεάζει την κατανομή της μαγνητικής ροής στο διάκενο και την πυκνότητα ισχύος της μηχανής. Κακή κατανομή της μαγνητικής ροής συνεπάγεται με αρμονικές χώρου που επιδρούν στην απόδοση και την ομαλή λειτουργία.



**Σχήμα 2.18:** Κατανομή μαγνητικών γραμμών στην μηχανή για α) μηχανή με παράλληλη μαγνήτιση β) μηχανή με ακτινική μαγνήτιση



**Σχήμα 2.19:** Μαγνητική επαγωγή στο διάκενο για μηχανή με ακτινική μαγνήτιση και μηχανή με παράλληλη μαγνήτιση

### 2.3.2.5 Υλικό Τυλίγματος Στάτη

Στον στάτη το πεδίο παράγεται μέσω των ρευμάτων που ρέουν στα τυλίγματά του, οπότε η επιλογή του υλικού έχει μεγάλη βαρύτητα στη συνολική διαμόρφωση. Το τυλίγμα αποτελείται από δύο υλικά, το αγωγίμο μέρος και την μόνωση εξωτερικά. Το αγωγίμο μέρος συνήθως κατασκευάζεται από μέταλλο μεγάλης αγωγιμότητας, όπως χαλκό ή αλουμίνιο, και είναι υπεύθυνο για την δημιουργία του μαγνητικού πεδίου στο στάτη.

**Πίνακας 2.5:** Σύγκριση αγωγών αλουμινίου και χαλκού

Ποσότητα	Χαλκός	Αλουμίνιο	Μονάδες
Αντίσταση	$1,68 \times 10^{-8}$	$2,82 \times 10^{-8}$	$\Omega \cdot m$
Αγωγιμότητα	$5,96 \times 10^7$	$3,55 \times 10^7$	S/m
Πυκνότητα	8960	2700	kg/m <sup>3</sup>
Σημείο Τήξης	1.083°C	660,3°C	°C
Θερμική Αγωγιμότητα	398	237	W/(m·K)
Συντελεστής Επέκτασης	$16,6 \times 10^{-6}$	$23,1 \times 10^{-6}$	1/°C
Ελαστική Αντοχή	210-260	60-90	MPa
Μαγνητική διαπερατότητα	$1.256629 \times 10^{-6}$ ( $\mu_0=0,999994$ )	$1.256665 \times 10^{-6}$ ( $\mu_0=1,000022$ )	H/m
Τιμή	Σχετικά Ακριβός	Σχετικά Φθηνός	
Ευελιξία	Λιγότερο Ευέλικτος	Περισσότερο Ευέλικτος	
Εύκολη Κόλληση	Καλή	Κακή	
Αντίσταση σε Υψηλές Θερμοκρασίες	Καλή	Μέτρια-Κακή	

Τα μονωτικά υλικά χωρίζονται σύμφωνα με τα πρότυπα του IEC σε κλάσεις μόνωσης που δείχνουν την αντίστοιχη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας (πίνακας 2.6). Είναι σημαντικό να μην υπερβαίνεται αυτή η θερμοκρασία κατά τη λειτουργία της μηχανής,

καθώς μπορεί να οδηγήσει σε αποσύνθεση του μονωτικού υλικού και μόνιμη καταστροφή της μηχανής. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις αναγνωρισμένες κατηγορίες μόνωσης.

**Πίνακας 2.7:** Κλάση μόνωσης και μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία [19]

INSULATION CLASSIFICATIONS ACCORDING TO IEC			
Class	Temperature		Type
	°C	°F	
E	120	248	ADOMIN®
B	130	266	ENOFLEX-B®
F	155	311	ENOFLEX-F®
H	180	356	ENOFLEX 180®
H	180	356	ENOFLEX-H®
H	180	356	IDIOTHERM®
200	200	392	MEDIOTHERM®
220	220	428	POLITHERM®
H	180	356	ENOBOND 180®
H	180	356	IDIOBOND®
200	200	392	MEDIOBOND 200®

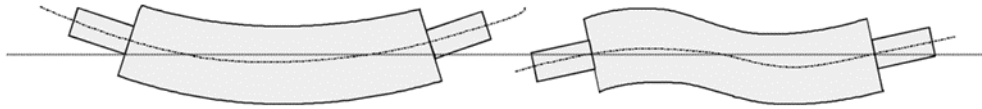
Ένα κοινό μονωτικό υλικό που χρησιμοποιείται σε ηλεκτρικές μηχανές είναι το Enoflex. Το Enoflex είναι μια ειδική πολυαμίδα που έχει εξαιρετικές ιδιότητες μονωτικότητας και αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες.

TYPE	ENOFLEX - 180®		MAIN USES
	PROPERTIES		
	STANDARDS	IEC 60317-51 NEMA MW 82-C	Suited to production systems with automated soldering equipment. Used in the manufacture of small motors, transformers, relays and magnet coils.
	INSULATION COATINGS	POLYURETHANE 180	
	AVAILABILITY	0,07-1,60 mm L-2L	
	MECHANICAL PROPERTIES	FOR Ø 0,30	
	ELONGATION	>30%	
	SPRINGINESS	<50	
	ADHERENCE-FLEXIBILITY	EXCELLENT	
	RESISTANCE TO ABRASION	>6,75N	
	ELECTRICAL PROPERTIES		
	BREAKDOWN VOLTAGE	7 KV	
	THERMAL PROPERTIES		
	TEMPERATURE INDEX	180	
	CUT THROUGH	2 min≥230 °C	
	HEAT SHOCK	1d, 1/2h≥200 °C	
	CHEMICAL PROPERTIES		
SOLVENT TEST	4H		
SOLDERABILITY	390 °C		
RESISTANCE TO REFRIGERANTS	—		

**Σχήμα 2.20:** Χαρακτηριστικά τύπου αγωγού που επιλέχθηκε για το καλώδιο του τυλίγματος από Datasheet προμηθευτή [19]

### 2.3.2.6 Υλικό Άξονα

Στον στάτη το πεδίο παράγεται μέσω των ρευμάτων που ρέουν στα τυλίγματα – πηνία. Η σχεδίαση και διαστασιολόγηση του άξονα σε ένα τέτοιο κινητήρα ανήκει στις προκλήσεις τις μηχανολογικής ανάλυσης. Ο άξονας υπόκειται σε εντατικές καταπονήσεις, από την κίνηση του ανελκυστήρα αλλά και από τα μηχανικά φρένα, ενώ συγχρόνως θα πρέπει να αντέχει σε δυνάμεις πίεσης και κάμψης που δημιουργούνται κατά την λειτουργία του. Σημαντικό είναι ότι ο κινητήρας δεν χρησιμοποιείται απλά σαν μέσω κίνησης, αλλά δέχεται και τις δυνάμεις από την στήριξη του θαλάμου και του αντίβαρου μέσω της τροχαλίας τριβής.



Σχήμα 2.21: Μηχανικές καταπονήσεις άξονα [20]

Αυτά τα στοιχεία καθιστούν απαραίτητη την επιλογή ενός υλικού για τον άξονα που να συνδυάζει σκληρότητα, αντοχή σε διάβρωση και ανθεκτικότητα σε καμπτικές δυνάμεις. Μετά από προσεκτική αξιολόγηση των διαθέσιμων επιλογών, το SS316L (ανοξειδωτος χάλυβας τύπου 316L) φαίνεται να αποτελεί την πιο κατάλληλη επιλογή.

### 2.3.2.6 Περίληψη επιλογών

Πίνακας 2.6: Συγκεντρωτικός πίνακας επιλογής υλικών

Μέρος Κινητήρα	Υλικό
Σώμα στάτη	Χάλυβας πυριτίου-σιδήρου τύπου M250-50A
Σώμα δρομέα	Χάλυβας πυριτίου-σιδήρου τύπου M250-50A
Μόνιμοι Μαγνήτες	N42M
Τύλιγμα	ENOFLEX 180
Άξονας	Ανοξειδωτος χάλυβας SS316L

### 2.3.3 Τοπολογία δρομέα

Οι μηχανές μονίμων μαγνητών (εσωτερικού δρομέα, ακτινικής ροής) χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης των μαγνητών στην γεωμετρία του δρομέα. Έτσι, ανάλογα την τοπολογία οι δρομείς χωρίζονται σε:

- Επιφανειακών μαγνητών (Surface Permanent Magnets)
- Ένθετων μαγνητών (Surface Embedded Permanent Magnets)
- Εσωτερικών μαγνητών (Inner Magnets)

#### 2.3.3.1 Δρομέας με επιφανειακά τοποθετημένους Μαγνήτες (SPM)

Σε αυτήν την τοπολογία οι μαγνήτες, οι οποίοι είναι μαγνητισμένοι (ακτινικά ή παράλληλα) στις μεγάλες τους πλευρές, τοποθετούνται περιφερειακά στην επιφάνεια του δρομέα, έχοντας άμεση επαφή με το διάκενο. Πρόκειται για τοπολογία που παρουσιάζει



κατασκευαστική απλότητα, γεγονός που μεταφράζεται σε χαμηλό κόστος. Η πυκνότητα ισχύος είναι πολύ υψηλή, αφού η τοποθέτηση μαγνητών στο διάκενο αξιοποιεί όσο το δυνατόν καλύτερα τις μαγνητικές τους ιδιότητες. Σημαντικό μειονέκτημα είναι το γεγονός ότι οι μαγνήτες είναι εκτεθειμένοι στις μεγάλες ταχύτητες αφού υπάρχει κίνδυνος αποκόλλησης τους λόγω των φυγόκεντρων δυνάμεων.

Από ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς, στις μηχανές με κυλινδρικό δρομέα, οι αυτεπαγωγές ευθέως και κάθετου άξονα είναι σχεδόν ίσες ( $L_d \approx L_q$ ), καθώς η μαγνητική διαπερατότητα των μαγνητών είναι περίπου ίση με αυτή του αέρα ( $\mu_r \approx 1$ ), ενώ το σχήμα του δρομέα είναι ακριβώς ίδιο και στους δύο άξονες. Σε μία πιο λεπτομερής ματιά, το πεδίο του μόνιμου μαγνήτη προκαλεί ορισμένο κορεσμό στον σίδηρο, ελαττώνοντας ελαφρώς την αυτεπαγωγή ορθού άξονα. Αυτό σημαίνει ότι ο κινητήρας δεν παρουσιάζει εκτυπότητα και έτσι η μέγιστη ροπή εξαρτάται από την ροπή μαγνήτισης και συναντάται στις 90 ηλεκτρικές μοίρες. Επίσης εμφανίζονται μικρές απώλειες σκέδασης. Η ροή του μαγνήτη βρίσκεται πολύ κοντά στο σιδηρομαγνητικό υλικό του στάτη και βρίσκει πιο εύκολο “μονοπάτι” σε σχέση με τον αέρα που περιβάλλει το μαγνήτη. Με αυτόν τον τρόπο αξιοποιείται το μεγαλύτερο ποσοστό για την ανάπτυξη ροπής. Εδώ, το κύριο μειονέκτημα είναι η έκθεση των μόνιμων μαγνητών σε πεδία απομαγνήτισης και οι αυξημένες απώλειες δινορευμάτων σε αυτούς.

### 2.3.3.2 Δρομέας με ένθετα τοποθετημένους Μαγνήτες

Στην συγκεκριμένη τοπολογία ο δρομέας έχει φαρυδιές εγκοπές μέσα στις οποίες εισάγονται οι μαγνήτες. Πλέον δεν διακινδυνεύεται η αποκόλληση των μαγνητών σε υψηλές ταχύτητες.

Από ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς, η εκτυπότητα του σιδήρου στον εγκάρσιο άξονα εισάγει και συνιστώσα ροπής εκτυπότητας ( $L_d < L_q$ ). Η ροπή μεγιστοποιείται για γωνία ελαφρώς μικρότερη των 90 μοιρών. Τέλος, σε αυτήν την τοπολογία εμφανίζονται στα άκρα των μαγνητών ροές σκέδασης.

### 2.3.3.3 Δρομέας με εσωτερικά τοποθετημένους Μαγνήτες

Στην συγκεκριμένη τοπολογία οι μαγνήτες τοποθετούνται στο εσωτερικό του σιδήρου του δρομέα. Οι διαμορφώσεις των μαγνητών μπορούν να έχουν πολλές παραλλαγές. Συγκεντρωτικά, σε αυτή την κατηγορία τα πλεονεκτήματα συναντώνται κυρίως στις υψηλές ταχύτητες. Αρχικά, ο κίνδυνος αποκόλλησης των μαγνητών έχει εξαλειφθεί ενώ ακόμα η καταστολή του πεδίου είναι ευκολότερη σε σύγκριση με τις διαμορφώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω. Αυτό βοηθάει στην περίπτωση που ο κινητήρας χρειαστεί να δουλέψει σε ταχύτητες που ξεπερνούν την ονομαστική, δηλαδή την περιοχή εξασθένησης πεδίου (field-weakening). Υστερούν όμως, σε κατασκευαστική πολυπλοκότητα, γεγονός που συνεπάγεται υψηλό κόστος. Η συγκεκριμένη κατηγορία επιλέγεται κατά κόρον στα ηλεκτρικά οχήματα λόγω του μεγάλου εύρους στροφών, κατά τον κύκλο λειτουργίας τους και την ανάγκη λειτουργίας στην περιοχή εξασθένησης πεδίου. Στην παρούσα εφαρμογή όπου ο κύκλος λειτουργίας είναι σαφώς πιο περιορισμένος στο εύρος ταχυτήτων θα αξιολογηθεί αν τέτοιου είδους δρομέας είναι τεχνοοικονομικά ανταγωνιστικός σε σύγκριση με τους υπόλοιπους τύπους.

### 2.3.4 Τύλιγμα στάτη

Τα τυλίγματα στο στάτη χαρακτηρίζονται ως προς τις τερματικές συνδέσεις των επιμέρους πηνίων, τον τρόπο με τον οποίο κατανέμονται στα αυλάκια και το βήμα συστάδας.

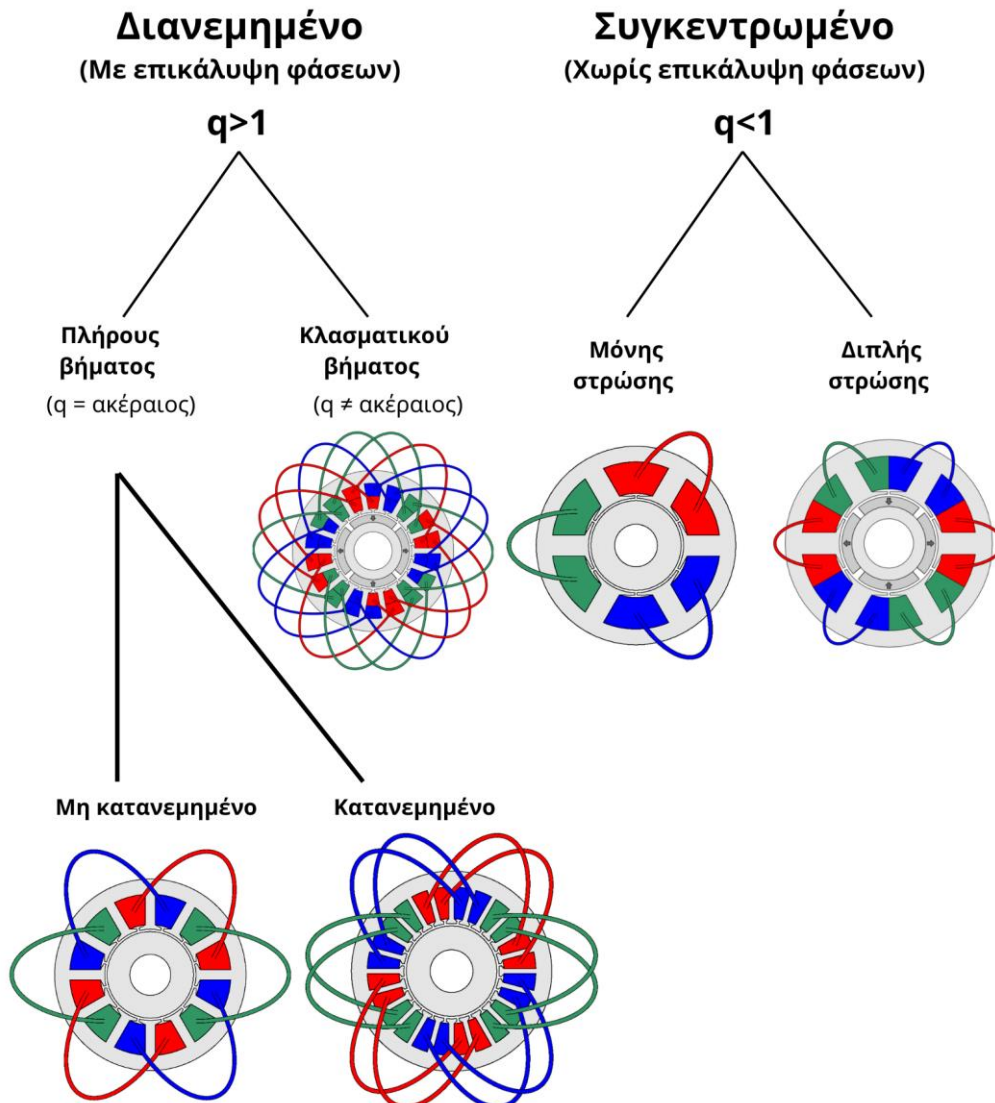
Αρχικά, ορίζεται η ποσότητα  $q$  που αποτελεί τον αριθμό των αυλάκων ανά πόλο και φάση. Αποκαλύπτει επίσης πληροφορίες σχετικά με τον συντελεστή τυλίγματος (winding factor) και τις αρμονικές του.

$$q = \frac{\text{Slots}}{\text{Poles} \cdot \text{Phases}} \quad (2.11)$$

Τα είδη τυλίγματος ανάλογα με τον τρόπο που μοιράζονται στις αύλακες:

- Διανεμημένο όπου υπάρχει επικάλυψη στις τερματικές συνδέσεις μεταξύ των πηνίων
- Συγκεντρωμένο όπου δεν υπάρχει επικάλυψη στις τερματικές συνδέσεις μεταξύ των πηνίων

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται αναλυτικά και οι υποκατηγορίες την κάθε διαμόρφωσης.



Σχήμα 2.22: Είδη τυλίγματος

- **Διανεμημένο τύλιγμα (Με επικάλυψη φάσεων)**

Στις ηλεκτρικές μηχανές, η πιο συχνή διάταξη των τυλιγμάτων είναι αυτή των διανεμημένων τυλιγμάτων. Το κύμα ΜΕΔ ενός πηνίου έχει γενικά τετραγωνική μορφή. Άρα για να επιτευχθεί ημιτονικότητα, είναι αναγκαία η κατάλληλη τοποθέτηση των πηνίων στις αύλακες, ώστε να γίνει εφικτό, χρησιμοποιώντας ορθογωνικές κατανομές, να προσεγγίσουμε την ημιτονική. Αυτό σημαίνει ότι οι σπείρες κάθε τυλίγματος, κατανέμονται στα αυλάκια, προκειμένου να σχηματίσουν πηνία πλήρους ή κλασματικού βήματος. Όσο περισσότερες είναι οι πλευρές πηνίου ανά πόλο και φάση, τόσο καλύτερα προσεγγίζεται η ημιτονική κυματομορφή.

Σε εφαρμογές που απαιτείται περαιτέρω μείωση του αρμονικού περιεχομένου, το διανεμημένο τύλιγμα χωρίζεται σε κατανεμημένο πλήρους βήματος και κατανεμημένο κλασματικού βήματος.

- **Συγκεντρωμένο τύλιγμα (χωρίς επικάλυψη φάσεων)**

Οι τεχνολογίες στον τομέα των μη επικαλυπτόμενων συγκεντρωμένων τυλιγμάτων έχουν βελτιωθεί αισθητά τα τελευταία χρόνια. Η στόχευση αυτών των βελτιώσεων είναι κυρίως, η αύξηση της πυκνότητας της ισχύος και η μείωση των απωλειών χαλκού. Αυτοί οι δύο παράγοντες κάνουν τα συγκεντρωμένα τυλίγματα ανταγωνιστική επιλογή σε σχέση με τα κατανεμημένα τυλίγματα για ορισμένες εφαρμογές.

Στη διαδικασία αυτή, ο αγωγός τυλίγεται γύρω από κάθε δόντι, οδηγώντας σε σύντομα τμήματα τυλίγματος εκτός του ενεργού μέρους του στάτη. Έτσι, περιορίζονται οι απώλειες χαλκού και εξοικονομείται χαλκός. Αυτή η διάταξη έχει επίσης το προτέρημα της ευκολίας στην κατασκευή, καθώς χρειάζονται λιγότερες περιτυλίξεις που δεν επικαλύπτονται, επομένως δεν υπάρχουν αμοιβαίες αυτεπαγωγές μεταξύ των φάσεων, κάτι που αυξάνει την αντοχή σε σφάλματα. Ωστόσο, αυτή η διάταξη έχει το μειονέκτημα ότι παρουσιάζει έντονο αρμονικό περιεχόμενο, ενώ επίσης ενέχει περιορισμούς ως προς την επιλογή του αριθμού πόλων και αυλάκων, καθώς όχι μόνο δεν είναι όλοι οι συνδυασμοί εφικτοί, αλλά και ο συντελεστής τυλίγματος δεν είναι ίδιος για κάθε συνδυασμό, κάτι που δεν συμβαίνει με τα διανεμημένα τυλίγματα. [19]

- **Σύγκριση**

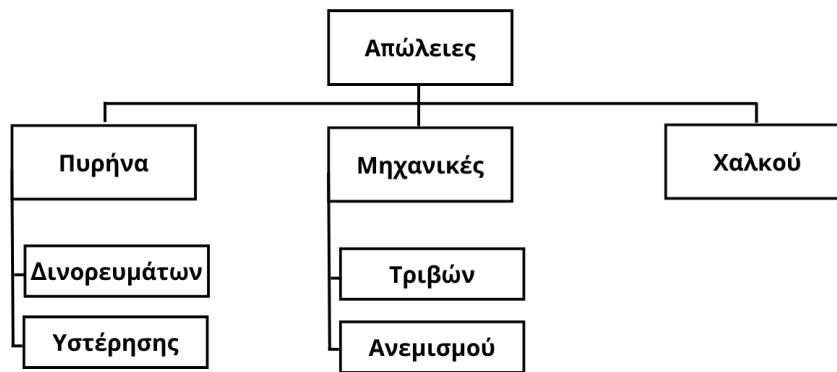
Το διανεμημένο τύλιγμα (είτε πλήρους είτε κλασματικού βήματος), παρότι έχει το μειονέκτημα της πιο πολύπλοκης διαδικασίας τυλίγματος και του μικρότερου συντελεστή πλήρωσης του αύλακα, προσφέρει περισσότερα πλεονεκτήματα στην παρούσα εφαρμογή.

Καταρχάς, χαρακτηρίζεται από υψηλότερο συντελεστή τυλίγματος. Ο συντελεστής τυλίγματος διαμορφώνει πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής της έντασης του μαγνητικού πεδίου  $H$  στο διάκενο και είναι ευθέως ανάλογος με την ικανότητα μιας μηχανής να παράγει ροπή. Επίσης, το διανεμημένο τύλιγμα, με τον κατάλληλο σχεδιασμό, μπορεί να μειώσει την κυμάτωση της ροπής και τις απώλειες χαλκού. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε εφαρμογές όπως οι ανεκκυστήρες, όπου δεν απαιτείται υψηλή πυκνότητα ρεύματος σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν, επιλέγεται το απλό διανεμημένο τύλιγμα πλήρους βήματος, καθώς κρίνεται καταλληλότερο για την παρούσα εφαρμογή.

### 2.3.5 Φαινόμενα και απώλειες

Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός της μηχανής σε 2 επιμέρους κυκλώματα. Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό κύκλωμα. Οι απώλειες θα που προκαλούνται στην μηχανή θα χωριστούν σε εκείνες που οφείλονται στη ροή του ρεύματος (απώλειες τυλίγματος) και σε εκείνες που προκαλούνται από την διέγερση με εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο (απώλειες πυρήνα).



Σχήμα 2.23: Είδη απωλειών

#### 2.3.5.1 Απώλειες χαλκού

Οι απώλειες χαλκού είναι ένα σημαντικό φαινόμενο στους ηλεκτρικούς αγωγούς, το οποίο προκαλείται από την αντίσταση του υλικού του αγωγού κατά τη διέλευση του ρεύματος (απώλειες Joule). Η αντίσταση επηρεάζεται από το συνολικό μήκος του αγωγού, τη διατομή του καθώς και την ειδική αντίσταση του υλικού.

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A} \quad (2.12)$$

Όπου,  $R$ , η συνολική αντίσταση του αγωγού (Ohm)

$L$ , το μήκος του υλικού (m)

$A$ , το εμβαδό διατομής του υλικού (m<sup>2</sup>)

$\rho$ , η ειδική αντίσταση του υλικού (Ohm-m).

Κατά τη διέλευση του ρεύματος μέσα από τον αγωγό, τα ηλεκτρόνια συγκρούονται με τα άτομα του υλικού του αγωγού, προκαλώντας απώλεια ενέργειας με την μορφή θερμότητας. Οι απώλειες εξαρτώνται από το τετράγωνο του ρεύματος που το διαρρέει. Επομένως, η μείωση των απωλειών τυλίγματος είναι σημαντική για τη βελτίωση της απόδοσης του ηλεκτρικού κυκλώματος. Οι απώλειες  $P_{\text{Joule}}$  ενός αγωγού συνολικής αντίστασης  $R$  που τον διαπερνά ρεύμα έντασης  $I$  υπολογίζονται ως:

$$P_{\text{Joule}} = I^2 \cdot R \quad (2.13)$$

Τέλος, λαμβάνεται υπόψιν, η εξάρτηση της ειδικής αντίστασης ενός αγωγού από την θερμοκρασία. Από την ακόλουθη σχέση γίνεται εμφανής η γραμμική εξάρτηση τους.

$$\rho_{\theta} = \rho_{20^{\circ}}[1 + \alpha(\theta^{\circ} - 20^{\circ})] \quad (2.14)$$

Όπου,  $\rho_{\theta}$ , η ειδική αντίσταση του υλικού (Ohm-m) σε θερμοκρασία  $\theta^{\circ}\text{C}$

$\rho_{20^{\circ}}$ , η ειδική αντίσταση του υλικού (Ohm-m) σε θερμοκρασία  $20^{\circ}\text{C}$

$\alpha$ , ο θερμοκρασιακός συντελεστής του μετάλλου σε  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

Τελικά, σε ένα κινητήρα οι απώλειες τυλίγματος υπολογίζονται ως:

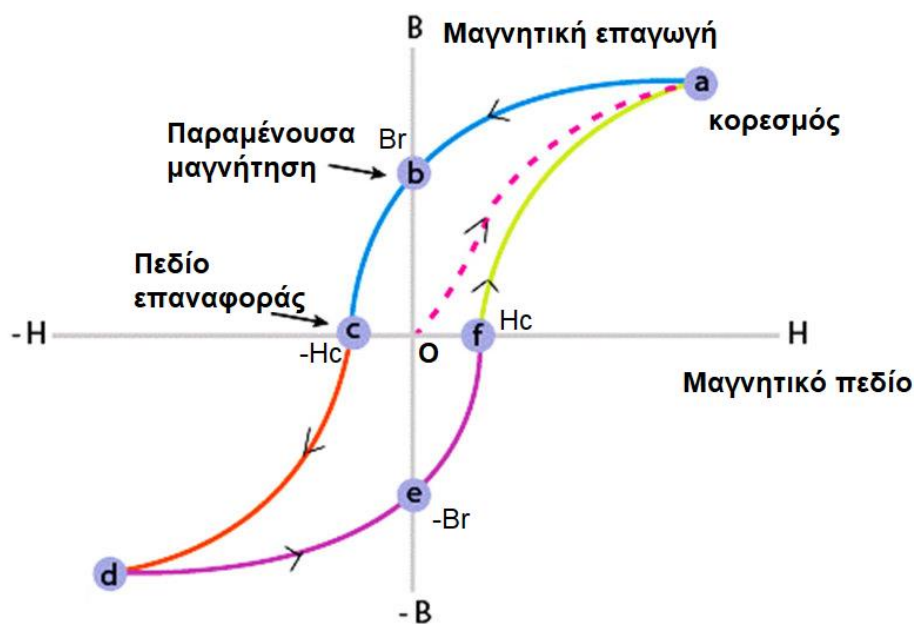
$$P_{cu} = 3 \cdot I_{coil}^2 \cdot R \quad (2.15)$$

### 2.3.5.2 Απώλειες πυρήνα

Οι απώλειες πυρήνα εμφανίζονται όταν ένα μαγνητικό υλικό, όπως αυτό στο σώμα ενός ηλεκτρικού κινητήρα διεγείρεται από ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Το πιο κοινό υλικό κατασκευής του πυρήνα των ηλεκτρικών μηχανών είναι η σιδηρομαγνητική λαμαρίνα, με μερική περιεκτικότητα σε πυρίτιο. Όμως ο όρος «σίδηρος» χρησιμοποιείται εν γένει από τους μηχανικούς για να περιγράψουν το μαγνητικό υλικό του πυρήνα. Για αυτό το λόγο οι απώλειες πυρήνα λέγονται και απώλειες σιδήρου. [21] Γενικά, τα σιδηρομαγνητικά υλικά αποτελούνται από «προσανατολισμένους κόκκους» οι οποίοι αλληλεπιδρούν όταν βρεθούν σε μαγνητικό πεδίο (τείνουν να ευθυγραμμισθούν). Οι ιδιότητες τους είναι χρήσιμες αλλά επιφέρουν και πολλά προβλήματα όπως τα φαινόμενα απωλειών. Οι απώλειες χωρίζονται σε δύο είδη: τις απώλειες υστέρησης και τις απώλειες δινορευμάτων.

- **Απώλειες υστέρησης**

Για την κατανόηση των απωλειών υστέρησης για ένα τυπικό σιδηρομαγνητικό υλικό, είναι απαραίτητο να εξηγηθεί ο βρόχος μαγνητικής υστέρησης.

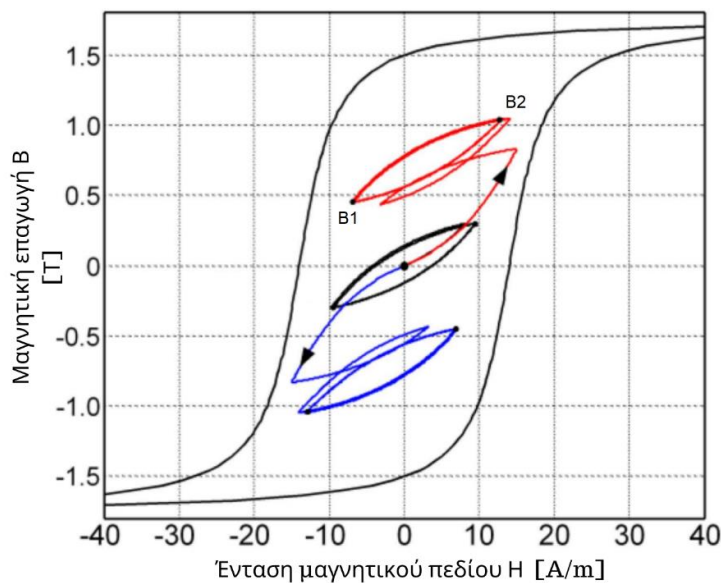


Σχήμα 2.24: Ποιοτικό παράδειγμα βρόχου υστέρησης

Το διάγραμμα αυτό περιγράφει μια σειρά από διαδικασίες, οι οποίες θα αναφέρονται παρακάτω:

- O-a:** Αρχικά θεωρείται ένα αμαγνήτιστο υλικό. Για να προκύψει η καμπύλη μαγνήτισης αυξάνουμε το πεδίο  $H$  από την τιμή μηδέν μέχρι μια μέγιστη τιμή, όπου το υλικό θα έχει φθάσει στον κορεσμό. Αυτό παριστάνεται από το τμήμα της καμπύλης O-a.
- a-b:** Με το υλικό μαγνητισμένο στην κατάσταση a, η ελάττωση του πεδίου  $H$  δεν δίνει τιμές του  $B$  που να βρίσκονται πάνω στην αρχική καμπύλη μαγνήτισης. Η ελάττωση του πεδίου  $H$  ακολουθείται από ελάττωση του  $B$ , αλλά χαράσσοντας μιας νέας καμπύλης (διαδρομή a-b). Όταν το  $H$  έχει την τιμή μηδέν (σημείο b) υπάρχει ακόμα μαγνητικό πεδίο τιμής  $B_r$ . Το πεδίο αυτό ονομάζεται παραμένον πεδίο ή παραμένουσα μαγνήτιση (Remanence).
- b-c:** Στη συνέχεια αντιστρέφουμε την διεύθυνση του  $H$  μέχρις ότου να έχουμε  $B = 0$  (σημείο c). Το τμήμα b-c της καμπύλης ονομάζεται καμπύλη απομαγνήτισης. Το υλικό είναι πλήρως απομαγνητισμένο για μια τιμή μαγνητικού πεδίου  $H_c$  (πεδίο επαναφοράς - Coercive).
- c-d:** Με επιπλέον αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου  $B$ , με στην ίδια κατεύθυνση, φθάνουμε στην κατάσταση d, όπου τα  $B$  και  $H$  έχουν και τα δύο διευθύνσεις αντίθετες απ' αυτές που είχαν στην κατάσταση a και το υλικό φθάνει πάλι στον κορεσμό.
- d-e:** Στην συνέχεια με μείωση του  $H$  μέχρι το 0 η καμπύλη ακολουθεί συμμετρική πορεία ως προς το κέντρο των αξόνων και έχουμε παραμένουσα μαγνήτιση αντίθετης φοράς.
- e-f-a:** Τέλος με αύξηση του  $H$  με τον αρχικό προσανατολισμό (που εφαρμόστηκε στο O-a) το υλικό απομαγνητίζεται πλήρως και στην συνέχεια μπαίνει ξανά σε κορεσμό.

Το υλικό μπορεί να λειτουργεί και σε ενδιάμεσες τιμές σημειώνοντας μικρότερους βρόχους (minor loops). Οι απώλειες ενέργειας λόγω της υστέρησης υπολογίζονται από το εμβαδόν των βρόχων υστέρησης.

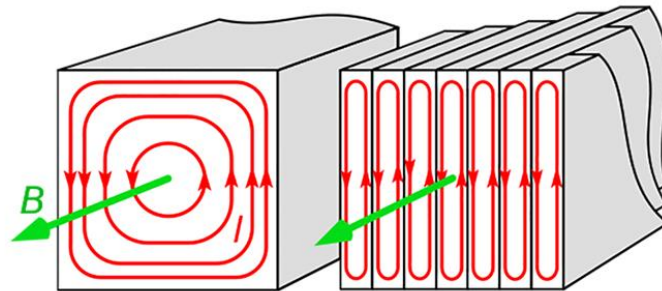


Σχήμα 2.25: Minor loops

Πιο αναλυτικά, η ενέργεια που απορροφάται από το υλικό κατά την αύξηση της μαγνητικής επαγωγής από  $B_1$  σε  $B_2$  είναι μεγαλύτερη από εκείνη που θα επιστρέφεται κατά την επιστροφή από την  $B_2$  στη  $B_1$ . Η διαφορά των δύο αυτών ενεργειών είναι το μέτρο της απώλειας υστέρησης. Η ενέργεια αυτή χάνεται με την μορφή θερμότητας, επομένως είναι ιδιαίτερα σημαντική τόσο για την απόδοση της μηχανής, όσο και για την θερμική ανάλυση της.

- **Απώλειες δινορευμάτων**

Όταν ένα αγώγιμο υλικό βρίσκεται υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου μεταβαλλόμενου με τον χρόνο, τότε σε αυτό επάγονται τάσεις σύμφωνα με το νόμο του Faraday. Οι επαγόμενες τάσεις παράγουν ρεύματα τα οποία σχηματίζουν βρόχους στο κάθετο επίπεδο της κατεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου. Η κατεύθυνσή τους είναι τέτοια ώστε να παράγουν μαγνητικό πεδίο που τείνει να αναιρέσει το προϋπάρχων. Ονομάζονται δινορεύματα (eddy currents) και προκαλούν τις θερμικές απώλειες Joule  $I^2R$  μέσα στον μαγνητικό πυρήνα των ηλεκτρικών μηχανών. Για τον περιορισμό αυτών των θερμικών απωλειών ο μαγνητικός πυρήνας των μηχανών κατασκευάζεται από πολύ λεπτά ελάσματα από μαγνητικό υλικό, τα οποία είναι μονωμένα μεταξύ τους με κατάλληλο μονωτικό βερνίκι (laminations). Οι απώλειες δινορευμάτων εξαρτώνται από την συχνότητα και το πάχος της μαγνητικής λαμαρίνας. [21]

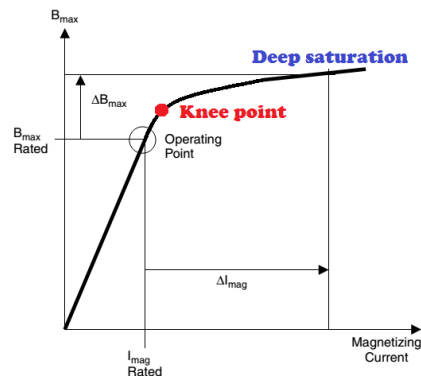


**Σχήμα 2.26:** Δινορεύματα μέσα σε πυρήνα από συμπαγή σίδηρο (αριστερά) & σε ελάσματα παράλληλα προς το πεδίο (δεξιά)

### 2.3.5.3 Κορεσμός

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα του βρόχου υστέρησης, ο μαγνητικός κορεσμός συμβαίνει όταν το μαγνητικό υλικό μιας μηχανής έχει φθάσει στη μέγιστη μαγνητική του ικανότητα. Όταν ένα υλικό φτάσει στο σημείο κορεσμού, δεν μπορεί πλέον να αυξήσει την μαγνήτιση του, ανεξάρτητα από την αύξηση του μαγνητικού πεδίου. Αυτό μπορεί να προκαλέσει αυξημένες απώλειες διότι, η αύξηση του ρεύματος δεν θα οδηγεί σε ανάλογη αύξηση της μαγνητικής πυκνότητας. Μετά το γόνατο κορεσμού, μεγάλη αύξηση του ρεύματος προκαλεί μικρή αύξηση της μαγνητικής επαγωγής. Η έλλειψη γραμμικότητας σε αυτά τα μεγέθη, έχει επίδραση στην απόδοση λόγω αυξημένων απωλειών χαλκού.

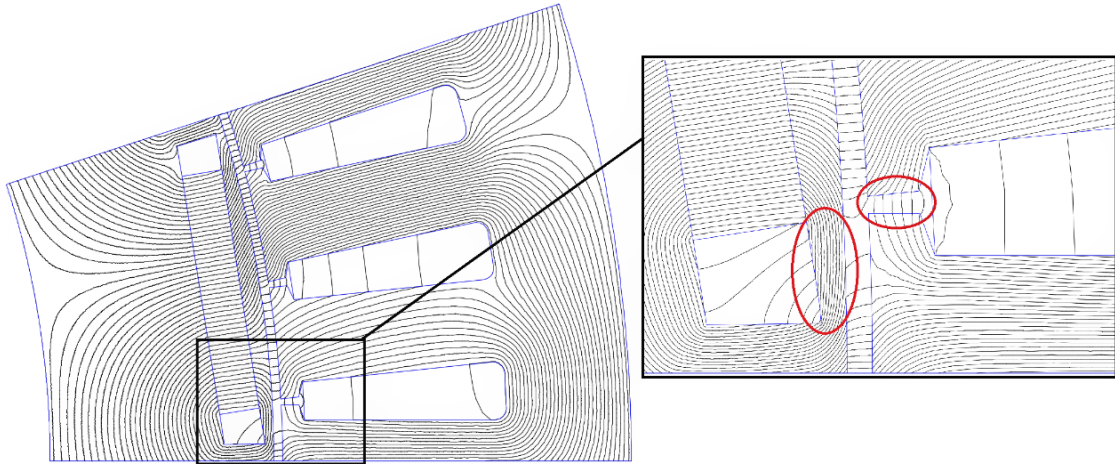
Σε γενικές γραμμές, οι ηλεκτρικές μηχανές για την πλήρη αξιοποίηση των μαγνητικών ιδιοτήτων του σιδήρου, όσων αφορά το βάρος σε συνδυασμό με την επίδοση και την απόδοση, οφείλουν να λειτουργούν στη γραμμική περιοχή κοντά στο γόνατο κορεσμού της καμπύλης  $B-H$ , δηλαδή στην περιοχή όπου η μαγνητική επαγωγή  $B$  αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση του μαγνητικού πεδίου  $H$ .



**Σχήμα 2.27:** Περιοχή ονομαστικής λειτουργίας μηχανής στην καμπύλη μαγνήτισης

### 2.3.5.4 Σκέδαση

Στις ηλεκτρικές μηχανές, όπως οι μετασχηματιστές και οι ηλεκτρικοί κινητήρες, το φαινόμενο της σκέδασης αφορά τη μαγνητική ροή που δεν ακολουθεί την επιθυμητή διαδρομή στο μαγνητικό κύκλωμα και παρουσιάζει διαρροές ροής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μαγνητικές γραμμές ροής, όπως και το ηλεκτρικό ρεύμα, τείνουν να ακολουθήσουν τη διαδρομή της ελάχιστης αντίστασης. Εξαιτίας όμως των ατελειών στον σχεδιασμό και την κατασκευή του μαγνητικού πυρήνα, κάποιες από τις μαγνητικές γραμμές ροής θα βρουν μια διαδρομή με μικρότερη μαγνητική αντίσταση και θα διαφύγουν από εκεί. Στις ΣΜΜΜ υπάρχουν δύο σημεία, τα οποία χρειάζεται να δοθεί προσοχή είναι: η ροή του μαγνήτη και τα δόντια του στάτη. Όταν το ρεύμα διέρχεται από τα πηνία του στάτη, δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο που αλληλεπιδρά με το μαγνητικό πεδίο του μόνιμου μαγνήτη του δρομέα. Με κακή σχεδίαση υπάρχει περίπτωση, μαγνητικές γραμμές ροής να σκεδάζονται μεταξύ των δοντιών και αντίστοιχα, μαγνητικές γραμμές του μαγνήτη να επιστρέφουν χωρίς να εμπλέκονται στο διάκενο. Και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει πεδίο το οποίο δεν χρησιμοποιείται αποτελεσματικά για την παραγωγή ροπής μέσω του διακένου. Ωστόσο, είναι σχεδόν αδύνατο να εξαλειφθεί εντελώς η σκέδαση λόγω των φυσικών περιορισμών των υλικών και των μεθόδων κατασκευής.

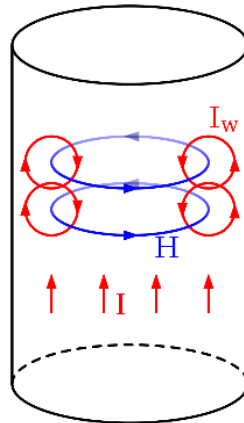


**Σχήμα 2.28:** Σκέδαση στον εσωτερικό μαγνήτη και στα δόντια του στάτη

### 2.3.5.5 Επιδερμικό φαινόμενο (skin effect)

Στους αγωγούς που άγεται εναλλασσόμενο ρεύμα παρατηρείται το επιδερμικό φαινόμενο. Το φαινόμενο αυτό χαρακτηρίζεται από την συμπεριφορά του ρεύματος να τείνει να συγκεντρώνεται προς τις άκρες του αγωγού. Το εναλλασσόμενο ρεύμα στον αγωγό  $I$ , δημιουργεί μαγνητικό πεδίο  $H$ , το οποίο δημιουργεί επαγωγικά κυκλικά ρεύματα  $I_w$  (δινορεύματα) στο εσωτερικό του αγωγού. Τα δινορεύματα  $I_w$  συνυπάρχουν με το αρχικό ρεύμα  $I$  και συνολικά η πυκνότητα του ρεύματος είναι πολύ μεγαλύτερη κοντά στην επιφάνεια του αγωγού σε σύγκριση με την εσωτερική περιοχή, η οποία παραμένει σχεδόν ανενεργή. Αποτέλεσμα είναι, η αύξηση της αντίστασης και των απωλειών ισχύος στον αγωγό.





**Σχήμα 2.29:** Η αιτία του επιδερμικού φαινομένου

### 2.3.5.6 Φαινόμενο γειτνίασης (proximity effect)

Το φαινόμενο γειτνίασης είναι ανάλογο του επιδερμικού φαινομένου με την διαφορά ότι παρατηρείται σε πολλούς αγωγούς που βρίσκονται σε στενή επαφή μεταξύ τους. Αυτό συμβαίνει διότι το μαγνητικό πεδίο που προκαλείται από το ρεύμα σε έναν αγωγό, προκαλεί δινορεύματα στους γειτονικούς του αγωγούς. Ως αποτέλεσμα το ρεύμα δεν διανέμεται ομοιογενώς σε όλους τους αγωγούς αλλά έχει μεγαλύτερη πυκνότητα κοντά στην περιοχή που απέχει περισσότερο από τους γειτονικούς αγωγούς (εφόσον το ρεύμα στους αγωγούς έχει την ίδια κατεύθυνση).



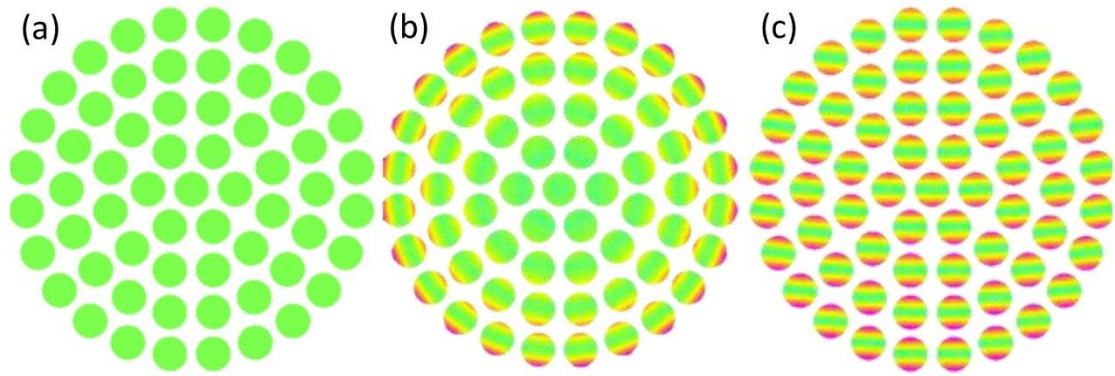
**Σχήμα 2.30:** Το φαινόμενο γειτνίασης σε 2 αγωγούς: (αριστερά) Όταν τα ρεύματα έχουν ίδια φορά, (δεξιά) όταν τα ρεύματα έχουν αντίθετη φορά

Συνολικά υπάρχουν 3 είδη απωλειών για τον αγωγό:

- την dc αντίσταση του αγωγού που είναι ανεξάρτητη της συχνότητας (απώλειες χαλκού)
- τις απώλειες που προκαλούνται από το επιδερμικό φαινόμενο
- τις απώλειες από το φαινόμενο γειτνίασης.

Για τα δύο τελευταία, λόγω ότι δημιουργούνται από δινορεύματα, υπάρχει εξάρτηση από την συχνότητα.

$$P_{\text{losses}} = P_{\text{dc}} + P_{\text{skin}} + P_{\text{prox}} \quad (2.16)$$



**Σχήμα 2.31:** Κατανομή πυκνότητας ρεύματος σε μια ομάδα αγωγών για 3 περιπτώσεις (a) Συνεχές ρεύμα (b) Εναλλασσόμενο ρεύμα χωρίς την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (c) Εναλλασσόμενο ρεύμα υπό την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου [22]

## ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΗΣ

### 3.1 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΑΝΕΛΚΥΣΤΗΡΑ (ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ)

#### 3.1.1 Απαιτήσεις εγκατάστασης ανελκυστήρων

Σε οποιοδήποτε κτίριο (κτιριοδομικός κανονισμός, άρθρο 29), που κατασκευάζεται και το οποίο έχει ισόγειο ή πυλωτή και τρεις ορόφους, ή στο οποίο το ύψος από το δάπεδο του ισογείου μέχρι το δάπεδο του τελευταίου ορόφου είναι μεγαλύτερο από εννέα (9) μέτρα, είναι υποχρεωτική η εγκατάσταση ενός τουλάχιστον ανελκυστήρα ωφέλιμου φορτίου 600 κιλών ή οκτώ ατόμων. Για κτήρια δημόσιας χρήσης, η απαίτηση αυτή ισχύει εφόσον υπάρχει έστω και ένας όροφος. Η εγκατάσταση του ανελκυστήρα αυτού θα είναι σύμφωνη με τις οδηγίες του προτύπου Ε.Ν. 81.1 και του κτιριοδομικού κανονισμού. Οι διαστάσεις του θαλάμου, και συνεπώς του φρεατίου, δίνονται από τους παρακάτω πίνακες (Ε. Ν. 81.1 παράγραφος 8).

**Πίνακας 3.1:** Αντιστοίχιση μέγιστης ωφέλιμης επιφάνειας θαλάμου με το ονομαστικό φορτίο

Ονομαστικό φορτίο μάζα kg	Μέγιστη ωφέλιμη επιφάνεια θαλάμου m <sup>2</sup>	Ονομαστικό φορτίο μάζα kg	Μέγιστη ωφέλιμη επιφάνεια θαλάμου m <sup>2</sup>
100 <sup>(1)</sup>	0,37	900	2,20
180 <sup>(2)</sup>	0,58	975	2,35
225	0,70	1000	2,40
300	0,90	1050	2,50
375	1,10	1125	2,65
400	1,17	1200	2,80
450	1,30	1250	2,90
525	1,45	1275	2,95
600	1,60	1350	3,10
630	1,66	1425	3,25
675	1,75	1500	3,40
750	1,90	1600	3,56
800	2,00	2000	4,20
825	2,05	2500 <sup>(3)</sup>	5,00

(1) Ελάχιστο για ανελκυστήρα ενός ατόμου  
(2) Ελάχιστο για ανελκυστήρα δύο ατόμων  
(3) Για φορτία πέραν των 2500kg προστίθενται 0,16m<sup>2</sup> για κάθε επιπλέον φορτίο 100kg  
(4) Για ενδιάμεσα φορτία η επιφάνεια προσδιορίζεται με γραμμική παρεμβολή

Στην συνέχεια βλέπουμε τον μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό επιβατών για κάθε ωφέλιμη επιφάνεια θαλάμου.

**Πίνακας 3.2:** Αντιστοίχιση ελάχιστης ωφέλιμης επιφάνειας θαλάμου με τον αριθμό ατόμων

Αριθμός επιβατών	Ελάχιστη ωφέλιμη Επιφάνεια θαλάμου m <sup>2</sup>	Αριθμός επιβατών	Ελάχιστη ωφέλιμη Επιφάνεια θαλάμου m <sup>2</sup>
1	0,28	11	1,87
2	0,49	12	2,01
3	0,60	13	2,15
4	0,79	14	2,29
5	0,98	15	2,43
6	1,17	16	2,57
7	1,31	17	2,71
8	1,45	18	2,85
9	1,59	19	2,89
10	1,73	20	3,13

Για επιβάτες πέραν των είκοσι προστίθενται 0,115m<sup>2</sup> για κάθε επιπλέον επιβάτη.

Το μέγεθος και η επιφάνεια του ανεγκυστήρα, για μια εγκατάσταση είναι συνάρτηση της κυκλοφοριακής μελέτης του κτιρίου, καθώς και οικονομικών και τεχνικών κριτηρίων. Η κυκλοφοριακή μελέτη ενός κτιρίου δεν είναι αντικείμενο της συγκεκριμένης μελέτης, συνοπτικά όμως αναφέρεται ότι έχει ως σκοπό να προσδιορίσει το μέγεθος, την ταχύτητα, τον αριθμό και το σύστημα λειτουργίας των ανεγκυστήρων για την καλύτερη δυνατή εξυπηρέτηση των ατόμων που κατοικούν ή εργάζονται στο κτίριο.

Για την εκπόνηση της μελέτης είναι απαραίτητες, σε γενικές γραμμές, οι παρακάτω πληροφορίες:

- Το είδος του κτιρίου (γραφεία, κατοικίες, ξενοδοχείο κ.λ.π) καθώς και ο αριθμός των ορόφων και η επιφάνεια τους.
- Ο θεωρητικός πληθυσμός του κτιρίου, οι ώρες άφιξης και αναχώρησης των ενοίκων και οι ώρες συσσώρευσης των επισκεπτών στο κτίριο.
- Η ανάγκη εγκατάστασης ανεγκυστήρα φορτίων ή γκαράζ ή νοσοκομειακού ανεγκυστήρα.

### 3.1.2 Βασικές μηχανολογικές παράμετροι

Τα μηχανολογικά μεγέθη που θα εστιάσει η παρούσα μελέτη είναι η ταχύτητα του ανεγκυστήρα καθώς και η ανάγκη σε ροπή. Το εύρος των τιμών των μεταβλητών κατά τον κύκλο λειτουργίας του ανεγκυστήρα, θα επηρεάσουν τις προδιαγραφές του ηλεκτρικού κινητήρα.

Η ταχύτητα που επιτυγχάνει ο ανεγκυστήρας εξαρτάται από τον τύπο του ανεγκυστήρα και το ύψος του κτιρίου. Οι ανεγκυστήρες πολλών ορόφων έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα από εκείνους με λιγότερους ορόφους, γιατί πρέπει να μεταφέρουν επιβάτες σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

Η ταχύτητα κίνησης του θαλάμου εξαρτάται από:

- Το είδος του εξυπηρετούμενου χώρου
- Το μήκος της διαδρομής, το οποίο είναι συνάρτηση των ορόφων και του αριθμού των στάσεων
- Τον τύπο του ανεγκυστήρα

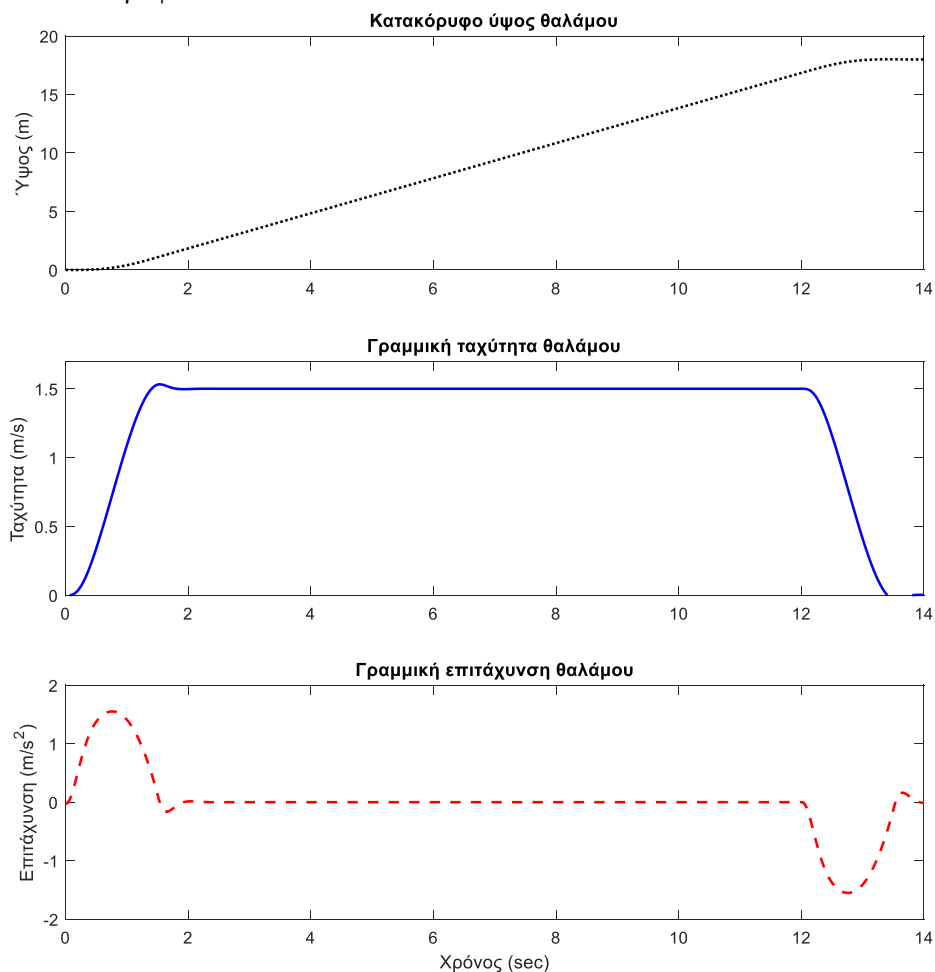
Στους υδραυλικούς κυμαίνονται μεταξύ 0,4 και 0,8 m/s, ενώ στους ανεγκυστήρες τριβής 1 με 2 m/s. (Το γρηγορότερο στον κόσμο είναι 20 m/s σε ουρανοξύστη στην Κίνα).

**Πίνακας 3.3:** Χαρακτηρισμός γραμμικής ταχύτητας θαλάμου ανεγκυστήρα

Χαρακτηρισμός ταχύτητας ανεγκυστήρα	Όριο τιμών ταχύτητας (m/s)
μικρή	$v < 0,4$
μέση	$0,4 < v < 2,5$
μεγάλη	$v > 2,5$

Στην παρούσα εφαρμογή καλύπτεται κτίριο 5 ορόφων και έτσι, επιλέγεται τιμή ονομαστικής ταχύτητας 1.5 m/s. Επίσης, ορίζεται ο χρόνος που θα πρέπει να φθάνει στην σταθερή ταχύτητα από την στάση και το αντίστροφο, δηλαδή την επιτάχυνση που θα έχει ο θάλαμος κατά την εκκίνηση και την επιβράδυνση όταν προσεγγίζει τον όροφο στάσης. Για την προσομοίωση του ανεγκυστήρα γίνεται χρήση του Matlab Simulink, το οποίο παρέχει το built-in μοντέλο “sm\_cable\_elevator”. Με βάση αυτό το μοντέλο, διενεργήθηκαν οι απαραίτητοι υπολογισμοί για τον ανεγκυστήρα, που θα παρουσιαστούν στην συνέχεια.

Αρχικά, τα παρακάτω διαγράμματα δείχνουν το προφίλ λειτουργίας του ανεγκυστήρα για το οποίο θα ασχοληθεί η παρούσα εργασία. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι τιμές μεταβολής του ύψους, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης από την κίνηση του θαλάμου από το ισόγειο στον 5<sup>ο</sup> όροφο.

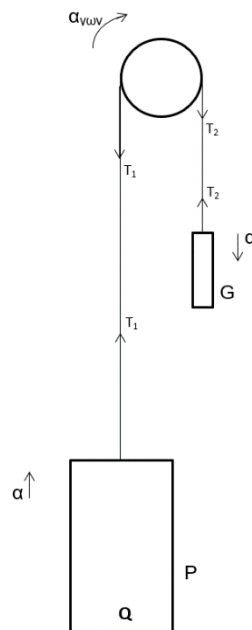


**Σχήμα 3.1:** Διαγράμματα μεταβολής ύψους, ταχύτητας και επιτάχυνσης θαλάμου για μια μετακίνηση από το επίπεδο 0 στο 5

Φυσικά, και για μετακινήσεις στους ενδιάμεσους ορόφους, τα μεταβατικά στάδια (επιτάχυνσης και επιβράδυνσης) παραμένουν τα ίδια, μεταβάλλεται όμως ο χρόνος της λειτουργίας σε σταθερή ταχύτητα. Ζητούμενο λοιπόν είναι, ανεξάρτητα του ωφέλιμου φορτίου ο ανελκυστήρας να επιταχύνει και να επιβραδύνει σε 1,7sec (όπως στο σχήμα 3.1).

Η ροπή του κινητήρα εξαρτάται από τις δυνάμεις που ασκούνται στον θάλαμο του ανελκυστήρα για δεδομένη επιτάχυνση του θαλάμου. Οι δυνάμεις αυτές περιλαμβάνουν το βάρος του θαλάμου, των επιβατών και των φορτίων που μεταφέρονται, καθώς και την τριβή των συρματόσχοινων. Για τον καθορισμό της ροπής του κινητήρα απαιτείται η ανάλυση της μηχανικής του προβλήματος.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κατανομή των δυνάμεων στην διάταξη θάλαμος-τροχαλία τριβής - αντίβαρο. (θεωρούμε εφαρμογή με ανάρτηση 1:1 & αγνοείται η βαθμιαία μείωση των εφελκυστικών δυνάμεων κατά τη φορά της έλξης).



**Σχήμα 3.2:** Αποτύπωση μηχανικού προβλήματος με αποτύπωση δυνάμεων

Ένας εύκολος τρόπος να μειωθεί η δαπανωμένη ενέργεια είναι η προσθήκη αντίβαρου. Το αντίβαρο χρησιμοποιείται για να αντισταθμίσει το απόβαρο και ένα μέρος από το βάρος του ωφέλιμου φορτίου, μειώνοντας τις ανάγκες σε ροπή και αυξάνοντας την απόδοση του συστήματος. Το αντίβαρο αποτελείται από πολλά μεταλλικά τεμάχια σχήματος ράβδων ή επιφανειών ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου, τα οποία περιβάλλονται από επένδυση χυτοσιδήρου και ειδικά διαμορφωμένο πλαίσιο το οποίο αποτρέπει την μετατόπιση τους. Τα μεταλλικά αυτά τεμάχια ασφαρίζονται με δύο τουλάχιστον ντίζες. Στο επάνω μέρος του πλαισίου υπάρχουν ειδικοί σφιγκτήρες στους οποίους τοποθετούνται τα συρματόσχοινα ανάρτησης του αντίβαρου. Το πλαίσιο του αντίβαρου έχει τη δυνατότητα να ολισθαίνει σε:

- συρματοδηγούς, αν πρόκειται για εγκατάσταση πολύ μικρού ανελκυστήρα και
- οδηγούς ίδιας μορφής με αυτούς του θαλάμου, αν πρόκειται για συμβατική εγκατάσταση ηλεκτροκίνητου ανελκυστήρα.



Σχήμα 3.3: Πραγματικό αντίβαρο

Η βέλτιστη επιλογή του αντίβαρου προκύπτει ως εξής:  
 Η ισχύς ανόδου (σε ίππους) θα είναι αντίστοιχα:

$$N_{\text{ανόδου}} = F \cdot v \quad (3.1)$$

Όπου,  $v$  η ταχύτητα σε m/s

$F$  η διαφορά των τάσεων στην τροχαλία

Για την κάθοδο χωρίς φορτίο θα έχουμε αντίστοιχα:

$$F = T_1 - T_2 \quad (3.2)$$

Κατά την ισορροπία του ελευθέρου σώματος, για τους δύο κλάδους έχουμε τις παρακάτω σχέσεις :

$$T_1 = P \cdot g \quad (3.3)$$

$$T_2 = G \cdot g \quad (3.4)$$

Επομένως, με αντικατάσταση:

$$F = T_2 - T_1 \Rightarrow F = (G - P) \cdot g \quad (3.5)$$

Η ισχύς για την κάθοδο θα είναι:

$$N_{\text{κάθοδος}} = F' \cdot v \quad (3.6)$$

Από τις ανωτέρω σχέσεις προκύπτει ότι μεγάλο αντίβαρο ευνοεί την άνοδο του θαλάμου ενώ επιβαρύνει τη κάθοδο. Ομοίως μικρό αντίβαρο ευνοεί την κάθοδο ενώ επιβαρύνει αντίστοιχα την άνοδο.

Για την οικονομικότερη εκμετάλλευση λαμβάνεται:

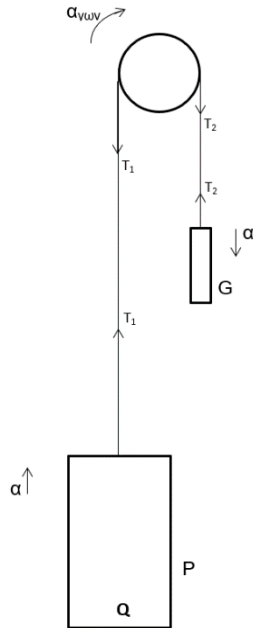
$$N_{\text{ανόδου}} = N_{\text{κάθοδος}} \quad (3.7)$$

Οπότε:

$$\left. \begin{array}{l} F = F' \\ F' = (G - P) \cdot g \\ F = (Q + P - G) \cdot g \end{array} \right\} G = \frac{1}{2} Q + P \quad (3.8)$$

Δηλαδή, το βάρος του αντίβαρου ισούται με το βάρος του θαλάμου συν το μισό του ωφέλιμου φορτίου.

Επομένως, προκύπτει ο υπολογισμός της αναγκαίας ροπής που πρέπει να δώσει ο κινητήρας από τις ακόλουθες σχέσεις.



Για τον θάλαμο (μαζί με το ωφέλιμο φορτίο του):

$$\begin{aligned} \Sigma F &= (P + Q) \cdot a \Rightarrow T_1 - (P + Q) \cdot g = (P + Q) \cdot a \Rightarrow \\ &\Rightarrow T_1 = (P + Q) \cdot (g + a) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Για το αντίβαρο:

$$\Sigma F = G \cdot a \Rightarrow G \cdot g - T_2 = G \cdot a \Rightarrow T_2 = G \cdot (g - a) \quad (3.10)$$

Στον κινητήρα με την τροχαλία τριβής:

$$\begin{aligned} \Sigma T &= J a_{\omega\omega} \Rightarrow T_{motor} - T_1 R + T_2 R = J a_{\omega\omega} \Rightarrow \\ &\Rightarrow T_{motor} - T_1 R + T_2 R = J \cdot \frac{a}{R} \end{aligned} \quad (3.11)$$

(3.11) με (3.10), (3.9)  $\Rightarrow$

$$\Rightarrow T_{motor} - (P + Q) \cdot (g + a) \cdot R + G \cdot (g - a)R = J \cdot \frac{a}{R}$$

$$T_{motor} = (P + Q) \cdot (g + a) \cdot R - G \cdot (g - a)R + J \cdot \frac{a}{R} \quad (3.12)$$

Όπου, P: η μάζα του θαλάμου (kg)

Q: το ωφέλιμο φορτίο (kg)

G: το αντίβαρο (kg)

R: η ακτίνα της τροχαλίας τριβής (m)

J: η αδράνεια της μάζας του δρομέα της μηχανής συμπεριλαμβανομένου

της τροχαλίας τριβής (kgm<sup>2</sup>)

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s<sup>2</sup>)

a: η γραμμική επιτάχυνση του θαλάμου (m/s<sup>2</sup>)

Θεωρώντας στην συγκεκριμένη εφαρμογή ότι έχουμε ανελκυστήρα 7 ατόμων, με βάση τα πρότυπα που αναφέρθηκαν παραπάνω μπορούμε να θεωρήσουμε τις παραμέτρους του μηχανικού προβλήματος ως:

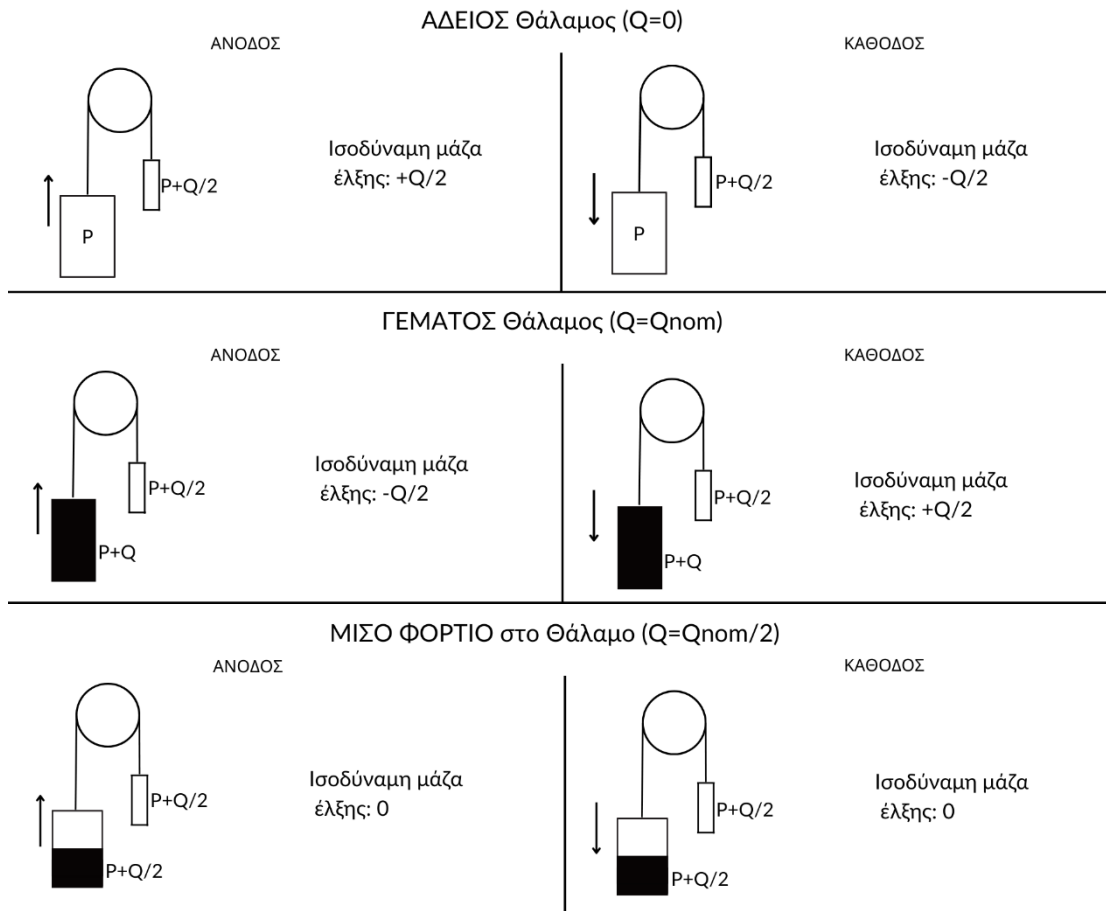
**Πίνακας 3.4:** Μεταβλητές μηχανικού προβλήματος

Σύμβολο	Ποσότητα	Τιμή	Μονάδες
<b>P</b>	η μάζα του θαλάμου	700	kg
<b>Q</b>	Η μάζα του ωφέλιμου φορτίου	500	kg
<b>G</b>	Η μάζα του αντίβαρου	950	kg
<b>g</b>	η επιτάχυνση της βαρύτητας	9.81	m/s <sup>2</sup>
<b>R</b>	η ακτίνα της τροχαλίας τριβής	0.125	m
<b>J</b>	η αδράνεια της μάζας του δρομέα της μηχανής μαζί με την τροχαλία τριβής	0.5	Kgm <sup>2</sup>

Από τις παραπάνω παραμέτρους συμπεραίνονται οι απαιτήσεις ροπής του κινητήρα.

Για να μελετήσουμε όλο το εύρος των απαιτήσεων σε ροπή, θα μελετήσουμε τον θάλαμο σε κατάσταση ανόδου και καθόδου για τις 2 ακραίες φορτώσεις (άδειο - γεμάτο) και με μισό φορτίο όπως θα λειτουργεί στις περισσότερες περιπτώσεις. Αναλυτικά τα σενάρια φαίνονται στο σχήμα 3.4:





\*Η αρνητική τιμή υποδεικνύει μάζα για την οποία ο κινητήρας θα πρέπει να πράξει έργο.

**Σχήμα 3.4:** Σενάρια φόρτωσης θαλάμου

Σύμφωνα με τις παραπάνω περιπτώσεις που αφορούν την ίδια κατηγορία ανελκυστήρα αλλά διαφορετικό ωφέλιμο φορτίο, διαπιστώνεται ότι, η καταναλισκόμενη ενέργεια για τον άδειο ανελκυστήρα είναι μεγαλύτερη από τον ανελκυστήρα με φορτίο 250 Kg. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ύπαρξη του αντιβάρου, μέσω του οποίου πραγματοποιείται η ανάρτηση του θαλάμου. Επίσης, υπάρχει ομοιότητα στην περίπτωση ανόδου και καθόδου, οπότε εξετάζεται μόνο η περίπτωση ανόδου καλύπτοντας ταυτόχρονα και τις καταστάσεις καθόδου.

- Άνοδος με άδειο θάλαμο:  $F = G - P = P + Q/2 - P = Q/2 = 250 \text{ Kg}$  δηλαδή στην περίπτωση αυτή το αντίβαρο είναι πιο βαρύ από το άδειο θάλαμο.
- Άνοδος με το μισό φορτίο:  $F = G - P - Q/2 = P + Q/2 - P - Q/2 = 0 \text{ Kg}$  δηλαδή στην περίπτωση αυτή ο κινητήρας δεν σηκώνει καθόλου φορτίο στην μόνιμη κατάσταση, αλλά καλύπτει μόνο τις απώλειες και τις τριβές. Έτσι, σε αυτό το σενάριο έχει την μικρότερη κατανάλωση ενέργειας.
- Άνοδο με πλήρες φορτίο:  $F = P + Q - G = P + Q - P + Q/2 = Q/2 = 250 \text{ Kg}$  στην περίπτωση αυτή ο θάλαμος και το φορτίο είναι πιο βαριά από το αντίβαρο.

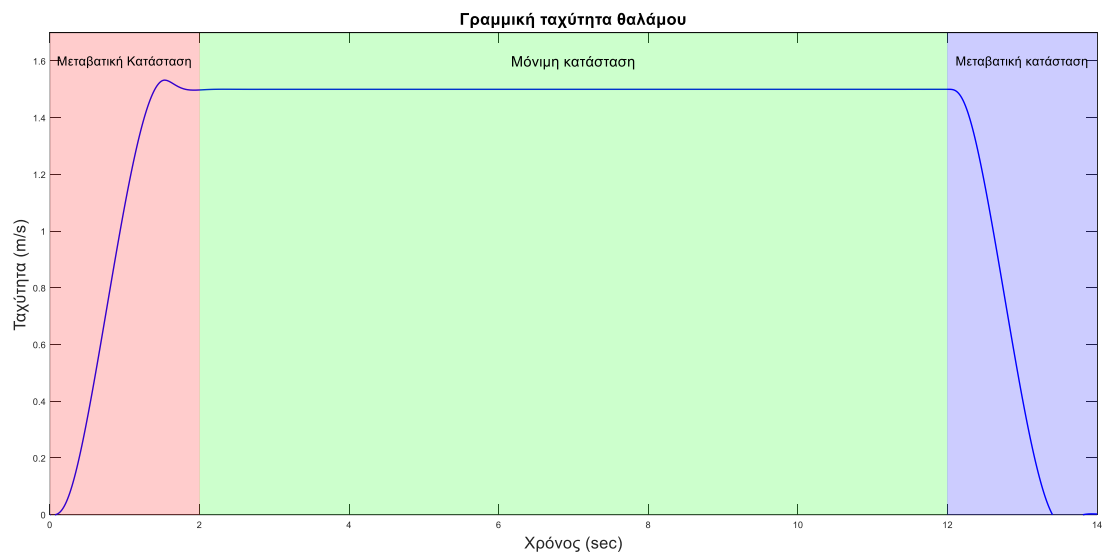
Κατά την λειτουργία διαπιστώνεται ότι, όταν το μηχανικό σύστημα θάλαμος-αντίβαρο τείνει να κινηθεί προς την φορά που ευνοείται από την βαρύτητα, ο κινητήρας οφείλει να φρενάρει το σύστημα. Ο κινητήρας βρίσκεται σε κατάσταση πέδησης και η ροπή του είναι αντίρροπη από την ταχύτητα κίνησης (λειτουργία γεννήτριας-ροή ισχύος από τη μηχανή προς το δίκτυο). Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να επιτευχθεί επιστροφή μέρους της ενέργειας πίσω

στο κτίριο. Για το παραπάνω χρειάζεται Inverter με ικανότητα διπλής φοράς ροής ισχύος και η εξοικονόμηση ενέργειας φτάνει το 30%.

### 3.1.3 Ανάλυση κύκλου λειτουργίας

Για την ανάλυση θα είναι απαραίτητο να χωριστεί η λειτουργία του ανελκυστήρα σε 3 περιοχές.

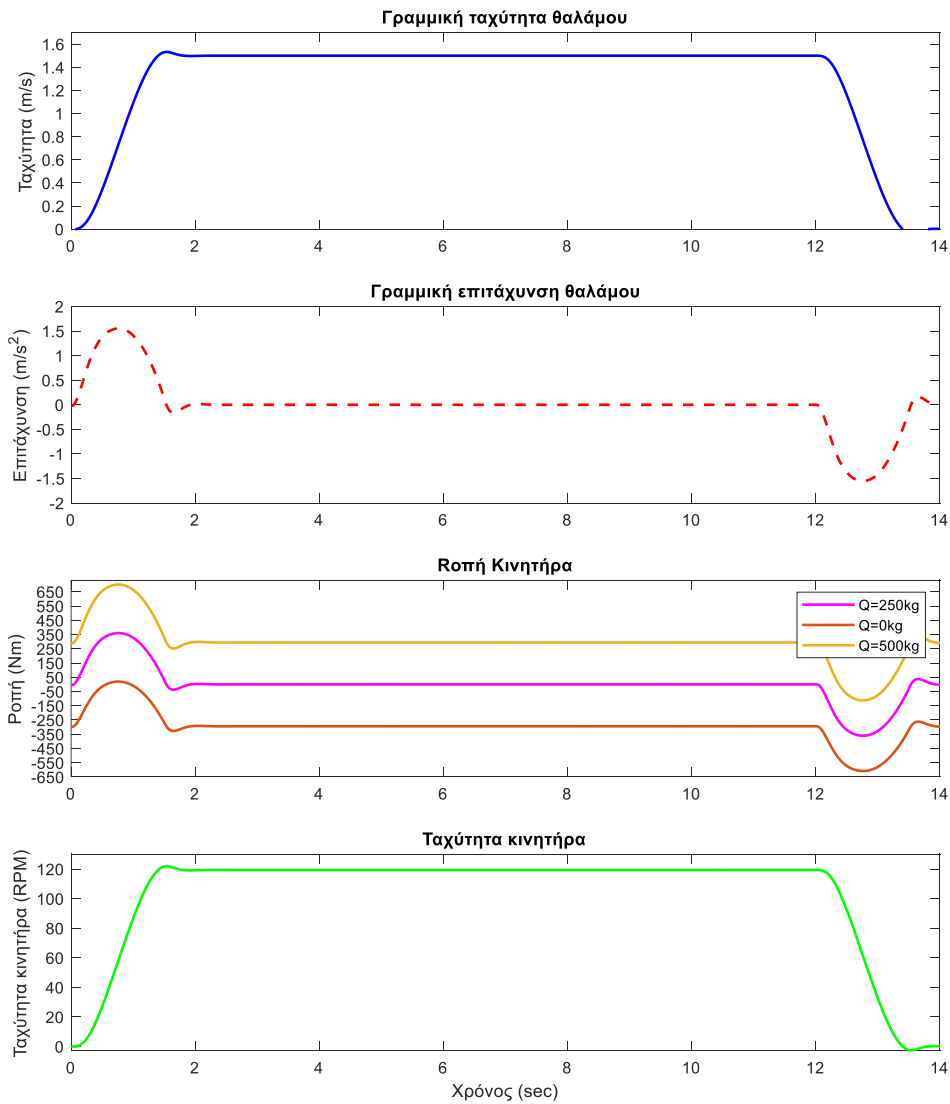
1. Επιτάχυνση
2. Σταθερή ταχύτητα
3. Επιβράδυνση



**Σχήμα 3.5:** Τα τρία στάδια σε ένα κύκλο λειτουργίας του ανελκυστήρα

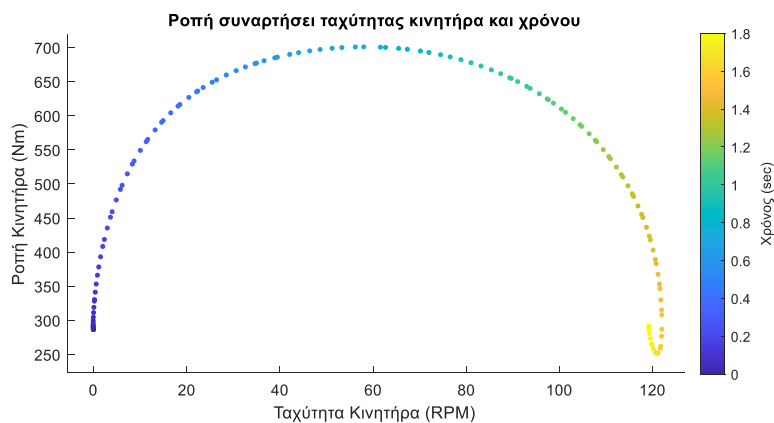
Σχετικά με τις λειτουργικές καταστάσεις του ανελκυστήρα ανάλογα με το φορτίο του, το μόνο μέγεθος που προσαρμόζεται για να παραμένει σταθερή η ταχύτητα του ανελκυστήρα είναι η ροπή του κινητήρα.

Στο επόμενο διάγραμμα (σχήμα 3.6) αποτυπώνεται η γραμμική ταχύτητα του θαλάμου, η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, η επιτάχυνση και η ροπή που χρειάζεται να προσφέρει ο κινητήρας για τρεις διαφορετικές τιμές ωφέλιμου φορτίου.



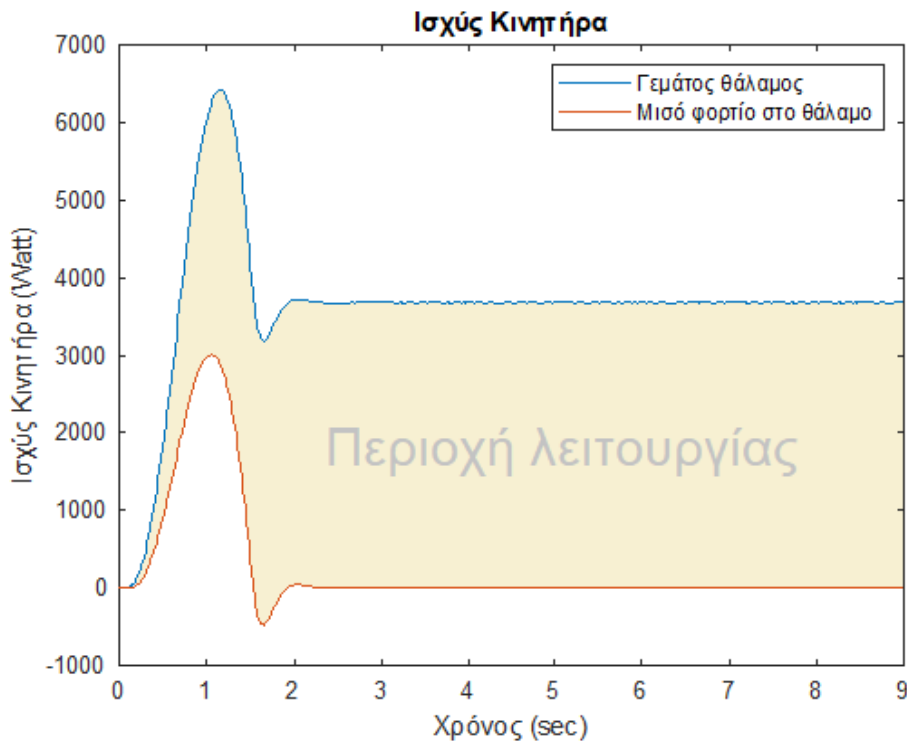
**Σχήμα 3.6:** Διαγράμματα γραμμικής ταχύτητας θαλάμου, γραμμικής επιτάχυνσης θαλάμου, ροπής κινητήρα και ταχύτητας κινητήρα για τρεις περιπτώσεις φόρτωσης του θαλάμου

Σε έναν κύκλο λειτουργίας του ανελκυστήρα (Ισόγειο προς 5<sup>ο</sup>) γίνεται εμφανές ότι ο κινητήρας λειτουργεί σε σταθερή τιμή ροπής περίπου για το 70% του χρόνου κίνησής του. Το παραπάνω αποτυπώνεται και στο σχήμα 3.6 στο οποίο παρατηρείται ότι μετά τα 1.8 sec ο κινητήρας λειτουργεί στη μόνιμη κατάσταση (300Nm με 120rpm). Στο σχήμα 3.7 φαίνεται ότι η μεταβατική λειτουργία διαρκεί μόλις 1.8sec.



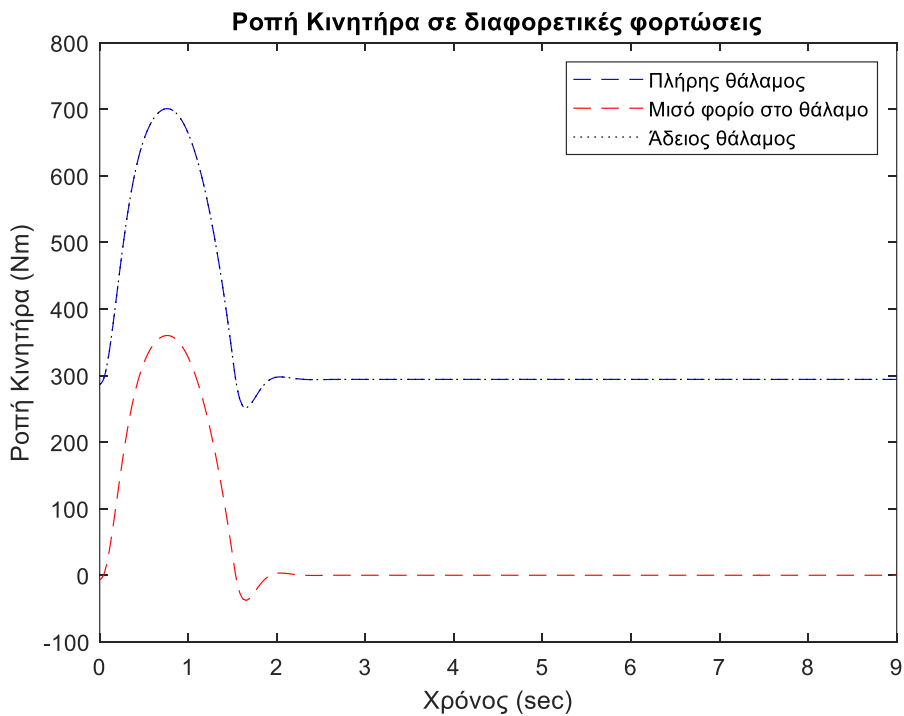
**Σχήμα 3.7:** Μεταβατικό εκκίνησης

Στη συνέχεια τρέχουν 2 προσομοιώσεις του μοντέλου του ανελκυστήρα με τα 2 ακραία σενάρια φόρτωσης. Έτσι παρατηρούνται και όλες οι ενδιάμεσες καταστάσεις που θα πρέπει να ανταπεξέλθει το σύστημα κίνησης. Αρχικά παρουσιάζεται η ισχύς του κινητήρα.



**Σχήμα 3.8 :** Οι ισχύς για τις 2 ακραίες περιπτώσεις (ευνοϊκότερη και δυσμενέστερη)

Στη συνέχεια αποτυπώνεται η ροπή για τις 2 ακραίες περιπτώσεις (σχήμα 3.9). Όμοια και εδώ ο κινητήρας ανάλογα με το ωφέλιμο φορτίο θα χρειαστεί να λειτουργεί στην περιοχή που ορίζεται ανάμεσα στις γραφικές παραστάσεις.



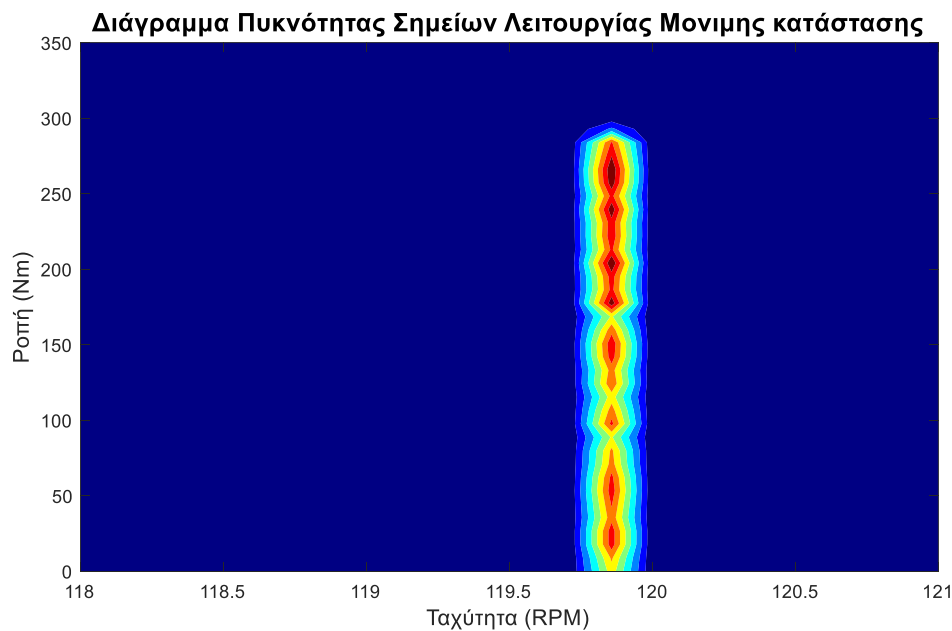
**Σχήμα 3.9 :** Οι ροπές για τις 3 περιπτώσεις φορτίου

Συγκεντρωτικά, αντλώντας τα δεδομένα από τα παραπάνω διαγράμματα, προκύπτουν για τις ακραίες τα εξής:

**Πίνακας 3.5:** Τελικές προδιαγραφές κινητήρα του ανελκυστήρα

	Χαρακτηριστικό	Ποσότητα
Ακραία περίπτωση με γεμάτο η χωρίς φορτίο (χειρότερο σενάριο)	Ονομαστική ισχύς	3800 Watt
	Ονομαστική ροπή	300 Nm
	Μέγιστη ροπή	700 Nm
Ακραία περίπτωση με μισό φορτίο (ευνοϊκότερο σενάριο)	Ονομαστική ισχύς	Τριβές (ιδανικά 0 Nm)
	Ονομαστική ροπή	Τριβές (ιδανικά 0 Nm)
	Μέγιστη ροπή	300 Nm

Τέλος, παρουσιάζεται το διάγραμμα πυκνότητας πιθανότητας στο επίπεδο ροπής στροφών. Εξετάζοντας το, μπορεί να αξιολογηθεί η πιθανότητα του ηλεκτροκινητήρα να λειτουργεί σε συγκεκριμένα λειτουργικά σημεία (ροπή και στροφές). Αυτό θα καθορίσει τα σημεία όπου ο κινητήρας θα πρέπει να λειτουργεί βέλτιστα.



**Σχήμα 3.10 :** Διάγραμμα πυκνότητας πιθανότητας

### 3.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΜΜΜ

Η προκαταρκτική σχεδίαση ενός συστήματος ηλεκτρικού κινητήρα περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των βασικών διαστάσεων του κινητήρα χωρίς την λεπτομερή διαμόρφωση του. Σκοπός είναι να δοθεί μια αρχική ιδέα της τάξης μεγέθους ορισμένων βασικών χαρακτηριστικών του κινητήρα. Η ακρίβεια των αναλυτικών υπολογισμών στην αρχική σχεδίαση, επιτυγχάνεται μέσω μοντέλων, που περιγράφουν τα φαινόμενα μέσα στον κινητήρα. Φυσικά, κατά τον αναλυτικό υπολογισμό μέσω μαθηματικών τύπων γίνονται ορισμένες παραδοχές και έτσι θα ακολουθήσει μια πιο ακριβής ανάλυση (Κεφ. 4). Εκεί, πραγματοποιείται λεπτομερής ανάλυση από τον υπολογιστή μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis), η οποία παρέχει υψηλά λεπτομερείς αναπαραστάσεις των χαρακτηριστικών του κινητήρα που συνεπάγονται σχεδίαση μεγάλης ακρίβειας. Στην εργασία τηρείται η ίδια συλλογιστική πορεία, δηλαδή αρχικά, στα πλαίσια της προκαταρκτικής σχεδίασης, χρησιμοποιούνται αναλυτικές μέθοδοι ώστε να καθοριστούν οι αρχικές τιμές των μεταβλητών, που θα αποτελέσουν την αρχικοποίηση της βελτιστοποίησης. Στο κεφάλαιο πέντε περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία βελτιστοποίησης στα πεπερασμένα στοιχεία.



Σχήμα 3.11 : Διάγραμμα ροής της σχεδίασης του κινητήρα

Για την υλοποίηση της προκαταρκτικής σχεδίασης, κρίνεται απαραίτητη η θεώρηση των επιθυμητών χαρακτηριστικών του κινητήρα προς μελέτη. Όπως είδαμε ο κινητήρας πρέπει να έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Ονομαστική τιμή Ροπής εξόδου: 300 Nm
- Μέγιστη τιμή Ροπής εξόδου: 700 Nm
- Ταχύτητα: 120 ΣΑΛ

#### 3.2.1 Βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης

Η διαστασιολόγηση του κινητήρα γίνεται με ορισμένες τυπικές τιμές βασικών μαγνητικών, ηλεκτρικών και θερμικών μεγεθών. Συγκεκριμένα, αυτά περιλαμβάνουν:

##### 3.2.1.1 Ειδική ηλεκτρική φόρτιση

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση,  $ac$ , καθορίζεται από την ενεργό τιμή των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο περιφέρειας του διακένου, σύμφωνα με την σχέση:

$$ac = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_{\varphi} \cdot I_{rms}}{\pi \cdot D} \quad (3.13)$$

Όπου,  $N_{\varphi}$  είναι ο συνολικός αριθμός εν σειρά ελιγμάτων ανά φάση

$I_{rms}$  η ενεργός τιμή του ρεύματος και

$\pi D$  η περιφέρεια του διακένου.

Το μέγεθος αυτό συνδέεται με τα τυλίγματα του στάτη και προκαλείται από τα ρεύματα που τα διαρρέουν. Τυπικές τιμές είναι 15.000-45.000 ΑΕ/μ.

### 3.2.1.2 Ειδική μαγνητική φόρτιση

Η ειδική μαγνητική φόρτιση  $B$  συνδέει τον αριθμό των πόλων  $P$  με την μέση μαγνητική ροή ανά πόλο  $\Phi$  και την επιφάνεια διακένου, σύμφωνα με την σχέση:

$$\bar{B} = \frac{P\Phi_B}{\pi DL} \quad (3.14)$$

Όπου,  $D$  είναι η διάμετρος διακένου,

$L$  το ενεργό αξονικό μήκος της μηχανής,

$\pi \cdot D \cdot L$  η συνολική κυλινδρική επιφάνεια του διακένου της μηχανής.

Το μέγεθος αυτό λαμβάνει τιμές από 0.4-0.7T, ενώ σε μηχανές με μεγάλη απαίτηση πυκνότητας ροπής, μπορεί να ξεπεράσει το 1T. Ο κορεσμός του σιδηρομαγνητικού υλικού στο στάτη περιορίζει την τιμή της μαγνητικής φόρτισης, καθώς στην περιοχή κοντά στο γόνατο κορεσμού αυξάνονται οι απώλειες πυρήνα. [34] Προφανώς, εδώ δεν λαμβάνεται υπ' όψη τυχών διαφεύγουσα μαγνητική ροή λόγω σκέδασης.

### 3.2.1.3 Μηχανική φόρτιση (Οριακή τάση διακένου)

Για την μηχανική αντοχή, σημαντικός δείκτης για την καταπόνηση της μάζας του δρομέα είναι η μηχανική φόρτιση. Κατά την περιστροφή του δρομέα κυρίως σε υψηλές ταχύτητες, οι φυγόκεντρες δυνάμεις τείνουν να αποκολλήσουν τα υλικά του, γι' αυτό η μηχανική φόρτιση δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή των 10 tn/cm<sup>2</sup>. Η σχέση της οριακής τάσης διακένου είναι σύμφωνα με την σχέση:

$$\sigma_{\max} = \frac{m \cdot \omega_{rm}^2}{2 \cdot \pi \cdot L} \quad (3.15)$$

Όπου,  $m$  είναι η μάζα του δρομέα,

$\omega_{rm}$  η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής

$L$  το ενεργό αξονικό μήκος της μηχανής.

### 3.2.1.4 Πυκνότητα Ρεύματος τυλίγματος

Η πυκνότητα ρεύματος τυλίγματος συνδέεται άμεσα με την παραγωγή ροπής καθώς και την θερμική ισορροπία της μηχανής. Πιο συγκεκριμένα η πυκνότητα ρεύματος στο τύλιγμα του στάτη όπως είδαμε, είναι υπεύθυνη για τις θερμικές απώλειες Joule, οι οποίες εξαρτώνται από το τετράγωνο του ρεύματος. Αν ξεπεραστεί ένα δεδομένο όριο της θερμοκρασίας, ελλοχεύει ο κίνδυνος οι θερμικές απώλειες να προκαλέσουν σοβαρές φθορές στους μόνιμους μαγνήτες και στα μονωτικά της μηχανής. Εδώ εισάγεται η ανάγκη για την θερμική ανάλυση της μηχανής σε διάφορες τιμές πυκνότητας ρεύματος, τόσο κατά την ονομαστική κατάσταση λειτουργίας, όσο και σε μικρές περιόδους υπερφορτίσεων.

$$J_{cu} = \frac{N_s \cdot I_{rms}}{A_{cu}} \quad (3.16)$$

Όπου,  $N_s$  ο αριθμός των ελιγμάτων ανά αύλακα,  
 $I_{rms}$  η ενεργός τιμή του φασικού ρεύματος,  
 $A_{cu}$  το «ενεργό» εμβαδό χαλκού στην αύλακα

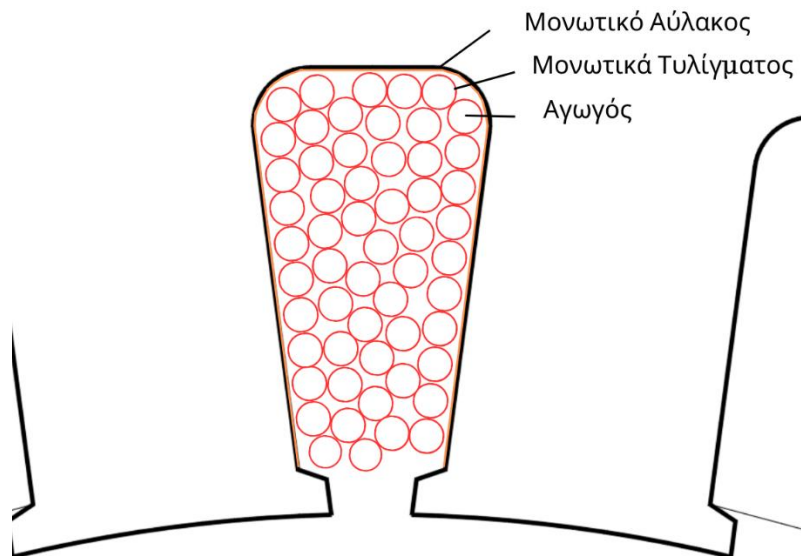
Εδώ είναι αναγκαίο να αναφερθεί ο συντελεστής πληρότητας αύλακος (fill factor), αφού το «ενεργό» εμβαδό χαλκού δεν αντιστοιχεί σε όλο το εμβαδό της αύλακος. Ο συντελεστής πληρότητας αύλακος (fill factor) είναι ίσος με την αναλογία της επιφάνειας του αγωγού προς τη συνολική επιφάνεια μεταξύ δύο δοντιών. Για παράδειγμα, ένας συντελεστής πληρότητας αύλακος 0,5 σημαίνει ότι, το μισό του εμβαδού της αύλακος καταλαμβάνεται από τους αγωγούς (δηλαδή καθαρό χαλκό ή αλουμίνιο). Το άλλο μισό καταλαμβάνεται από μόνωση αγωγού, μονωτικά στις πλευρές του σιδηρομαγνητικού υλικού και αναπόφευκτα κενά μεταξύ των αγωγών και μεταξύ των αγωγών και των τοιχωμάτων. Συνήθως η τιμή κυμαίνεται μεταξύ 40% και 60%. Υψηλότεροι συντελεστές πλήρωσης σχισμής μπορούν να επιτευχθούν με ορθογώνιους αγωγούς αντί για στρογγυλούς αγωγούς. [23]

$$ff = \frac{A_{cu}}{A_{slot}} \quad (3.17)$$

Όπου,  $A_{cu}$  το εμβαδό του χαλκού (στην περίπτωση που το τύλιγμα είναι χάλκινο)  
 $A_{slot}$  το συνολικό εμβαδό της αύλακος.

Επομένως, η τελική σχέση για την πυκνότητα ρεύματος αύλακος για το συνολικό εμβαδόν αύλακος  $A_{slot}$  είναι:

$$J_{slot} = ff \cdot J_{cu} = \frac{N_s \cdot I_{rms}}{A_{cu}/ff} = \frac{N_s \cdot I_{rms}}{A_{slot}} \quad (3.18)$$



Σχήμα 3.12 : Τομή αύλακος

Εμπειρικό όριο της πυκνότητας ρεύματος είναι τα  $4 \text{ A/mm}^2$  για μηχανή χωρίς κάποιο σύστημα ψύξης.



### 3.2.1.5 Ισχύς Εξόδου Μηχανής

Η φαινόμενη ισχύς της μηχανής δίνεται από το γινόμενο της επαγόμενης φασικής τάσης του τυλίγματος, με το ρεύμα του τυλίγματος κάθε φάσης και τον αριθμό των φάσεων:

$$S = 3 \cdot E_{\text{rms}} \cdot I_{\text{rms}} \text{ [VA]} \quad (3.19)$$

Ο νόμος της επαγωγής του Faraday δίνει την σχέση για την επαγόμενη τάση:

$$E = -\frac{d\Psi_B}{dt} = -2\pi f k_w N_\varphi \widehat{\Phi}_B \cos(\omega t) \quad (3.20)$$

Θεωρώντας, πως η πεπλεγμένη μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με τον χρόνο, η ενεργός τιμή της επαγόμενης τάσης, δίνεται από την σχέση:

$$E_{\text{rms}} = \sqrt{2}\pi \cdot k_w \cdot f \cdot N_\varphi \cdot \widehat{\Phi}_B \Rightarrow E_{\text{rms}} = 4,44 \cdot k_w \cdot f \cdot N_\varphi \cdot \widehat{\Phi}_B \text{ [V]} \quad (3.21)$$

Όπου,  $k_w$  ο συντελεστής τυλίγματος (θεμελιώδους συνιστώσας),

$f$  η ηλεκτρική συχνότητα,

$N_\varphi$  είναι ο συνολικός αριθμός εν σειρά ελιγμάτων ανά φάση και

$\Phi$  η μαγνητική (θεμελιώδης) ροή ανά πόλο.

Τα ενεργά ελίγματα μιας φάσης  $N_\varphi$  ορίζονται:

- Για σύνδεση σε σειρά ως:

$$N_\varphi = \frac{P}{2} \cdot q \cdot \text{layers} \cdot N_{\text{slot}} \quad (3.22)$$

- Για σύνδεση παράλληλα ως:

$$N_\varphi = q \cdot \text{layers} \cdot N_{\text{slot}} \quad (3.23)$$

Όπου,  $P$  οι πόλοι,

$q$  οι αύλακες ανά πόλο και φάση,

layers οι στρώσεις σε κάθε αύλακα (για κλασματικό τύλιγμα),

$N_{\text{slot}}$  τα ελίγματα ανά στρώση και αύλακα.

Η ηλεκτρική συχνότητα  $f$  σε μια σύγχρονη μηχανή σχετίζεται με την μηχανική ταχύτητα του άξονα  $n$ :

$$n = \frac{120f}{P} \text{ [RPM]} \quad (3.24)$$

Άρα,

$$\begin{aligned} S &= 3 \cdot \sqrt{2}\pi \cdot k_w \cdot f \cdot N_\varphi \cdot \widehat{\Phi}_B \cdot I_{\text{rms}} \Rightarrow S = 3 \cdot \sqrt{2}\pi \cdot k_w \cdot f \cdot N_\varphi \cdot \widehat{\Phi}_B \cdot \frac{ac \cdot \pi \cdot D}{3 \cdot 2 \cdot N_\varphi} \Rightarrow \\ S &= 3 \cdot \sqrt{2}\pi \cdot k_w \cdot f \cdot N_\varphi \cdot \frac{\pi D L \bar{B}}{P} \cdot \frac{ac \cdot \pi \cdot D}{3 \cdot 2 \cdot N_\varphi} \Rightarrow S = 3 \cdot \sqrt{2}\pi^2 \cdot k_w \cdot f \cdot \frac{D^2 L \bar{B}}{P} \cdot \frac{ac \cdot \pi}{3 \cdot 2} \Rightarrow \\ S &= 3 \cdot \sqrt{2}\pi^2 \cdot k_w \cdot \frac{n}{120} \cdot D^2 L \bar{B} \cdot \frac{ac \cdot \pi}{6} \Rightarrow \\ S &= \frac{\sqrt{2}\pi^3}{240} \cdot k_w \cdot n \cdot D^2 L \bar{B} \cdot ac \end{aligned} \quad (3.25)$$

Η ισχύς της μηχανής είναι ανάλογη των φορτίσεων  $\bar{B} \cdot ac$ , ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου διακένου  $D^2$  και του ενεργού μήκους  $L$ . Επομένως, είναι απαραίτητο να γίνουν οι απαραίτητοι συμβιβασμοί στην επιλογή των παραμέτρων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, προκειμένου να επιτευχθούν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά απόδοσης, όπως η ισχύς και η ροπή, χωρίς να υποβαθμιστούν άλλες, όπως η αύξηση του βάρους και του όγκου της μηχανής.

### 3.2.1.6 Ηλεκτρομαγνητική Ροπή

Η μέση μαγνητική δύναμη  $F_t$  στο διάκενο είναι:

$$F_t = \frac{L}{\mu_0} \oint_C B_n B_t dl = \frac{L}{\mu_0} \pi D B_n B_t \quad (3.26)$$

Η μέση επαπτομενική πίεση του διακένου προκύπτει από την μέση δύναμη προς την επιφάνεια  $A$ :

$$\bar{P}_t = \frac{F_t}{A} = \frac{1}{\pi D \mu_0} \oint_C B_n B_t dl = \frac{1}{\mu_0} B_n B_t \quad (3.27)$$

Όπου,  $B_n$  η μέση ακτινική και  $B_t$  η μέση επαπτομενική συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής διακένου. Το  $B_n$  μπορεί να θεωρηθεί ως το πεδίο λόγω μαγνητικής φόρτισης  $B$ , ενώ το  $B_t$  μπορεί να θεωρηθεί ως το πεδίο που προκαλείται λόγω της ηλεκτρικής φόρτισης  $ac$ .

Η ροπή που ασκείται:

$$T_e = F_t R = \frac{F_t D}{2} \quad (3.28)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις προκύπτει τελικά:

$$T_e = \frac{P_t \pi D^2 L}{2} = \frac{\pi}{2 \cdot \mu_0} \cdot D^2 \cdot L \cdot \bar{B}_n \cdot \bar{B}_t \quad [\text{Nm}] \quad (3.29)$$

Εφόσον έχουν καταγραφεί οι περισσότερες σχεδιαστικές εξισώσεις καθώς και οι προδιαγραφές του κινητήρα, ακολουθεί η προκαταρκτική σχεδίαση της μηχανής.

## 3.3 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ – ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω ως θεωρητικό υπόβαθρο, θα γίνει η προκαταρκτική σχεδίαση του κινητήρα, η οποία αφορά την βασική διαστασιολόγησή του.

### 3.3.1 Διαστάσεις μηχανής

Οι παραπάνω παράμετροι που παρουσιάστηκαν θα πρέπει να ρυθμιστούν ώστε ο κινητήρας να αποδίδει τη μέγιστη ροπή των 700Nm για μικρό διάστημα υπερφόρτωσης και 300Nm στην ονομαστική κατάσταση λειτουργίας.

Η μέση τιμή της μαγνητικής επαγωγής καθορίζεται πρακτικά από τον κορεσμό του υλικού του πυρήνα. Έτσι θεωρείται μια τιμή στο διάκενο:  $\bar{B} = 0.6T$

Τα πεδία στάτη και δρομέα πρέπει να είναι ίσα για την ελαχιστοποίηση των απωλειών άρα:

$$B_n^2 + B_t^2 = 0.6^2 \quad (3.30)$$

$$B_n \approx B_t \quad (3.31)$$

Επομένως,  $B_n = B_t = 0.424T$  (3.32)

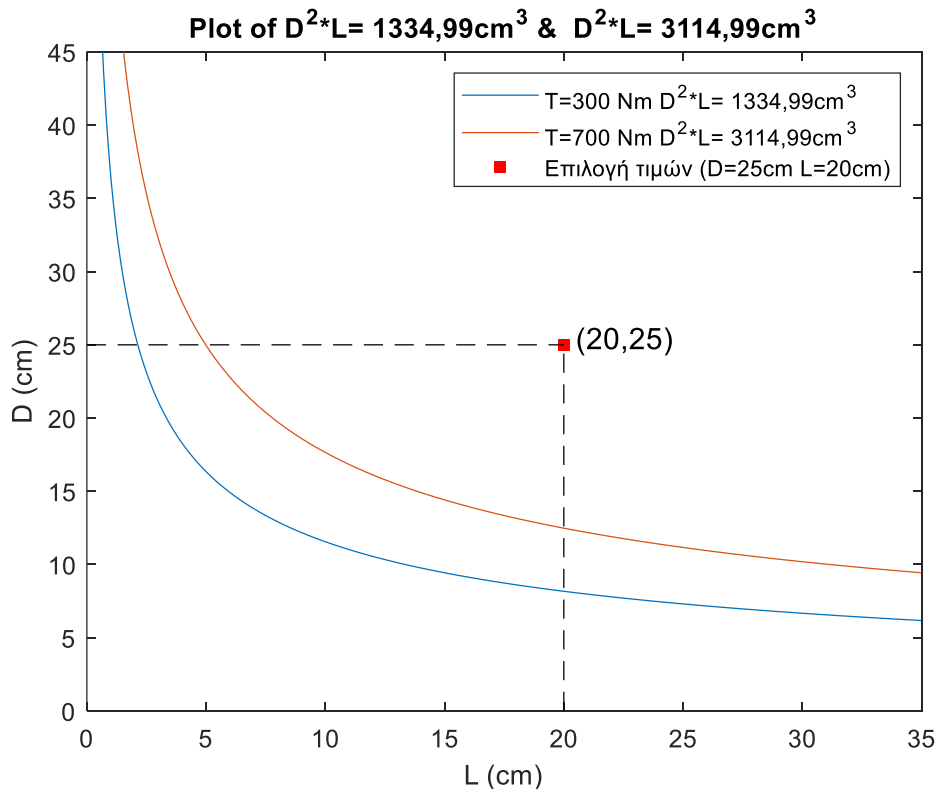
Όπως είδαμε στην μηχανική ανάλυση του προβλήματος, ο κινητήρας πρέπει να αποδίδει 300Nm στην ακραία περίπτωση μόνιμης κατάστασης και για μικρό μεταβατικό υπερφόρτωσης θα χρειαστεί να αποδώσει 700Nm.

$$T_e = \frac{\pi}{2 \cdot \mu_o} \cdot D^2 \cdot L \cdot \bar{B}_n \cdot \bar{B}_t \quad (3.33)$$

$$\text{Για τα 300Nm: } D^2 \cdot L = \frac{2 \cdot \mu_o \cdot T_e}{\pi \cdot \bar{B}_n \cdot \bar{B}_t} = \frac{2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 300}{\pi \cdot 0.424^2} = 1.334,99 \text{ cm}^3 \quad (3.34)$$

$$\text{Για τα 700Nm: } D^2 \cdot L = \frac{2 \cdot \mu_o \cdot T_e}{\pi \cdot \bar{B}_n \cdot \bar{B}_t} = \frac{2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 700}{\pi \cdot 0.424^2} = 3.114,99 \text{ cm}^3 \quad (3.35)$$

Στο παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 3.13) αποτυπώνονται οι τιμές D και L για τις οποίες  $D^2 \cdot L = 1.334,99 \text{ cm}^3$  &  $D^2 \cdot L = 3.114,99 \text{ cm}^3$ . Για τα σημεία που ορίζονται πάνω από την γραφική παράσταση ισχύει  $T_e > 300 \text{ Nm}$ . Έτσι στα πλαίσια της προκαταρκτικής σχεδίασης γίνεται η επιλογή για  $D=25 \text{ cm}$  και  $L=20 \text{ cm}$ . Φυσικά, αυτό αποτελεί μια αρχική προσέγγιση, αφού στην συνέχεια θα αξιολογηθεί αναλυτικά, στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.



**Σχήμα 3.13 :** Θεμελιώδη γεωμετρικά χαρακτηριστικά διακένου μηχανής

Άρα, επιλέγεται  $D=25 \text{ cm}$  και  $L=20 \text{ cm}$ .

Το πάχος του διακένου ορίζεται από την κατασκευαστική πολυπλοκότητα της εφαρμογής και θα παραμείνει σταθερό σε όλη την διάρκεια της βελτιστοποίησης.

$$g = 1 \text{ mm}$$

### 3.3.2 Συχνότητα Λειτουργίας – Πόλοι Μηχανής

Η συχνότητα λειτουργίας αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά, καθώς ορίζει τις απώλειες πυρήνα. Η σχέση που συνδέει την μηχανική ταχύτητα με την ηλεκτρική είναι:

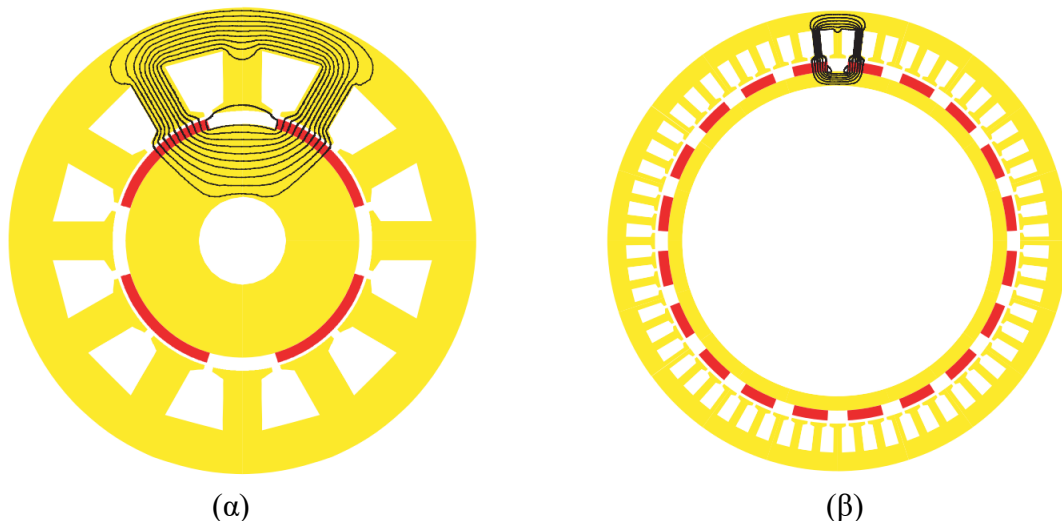
$$n = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (3.36)$$

Από την παραπάνω σχέση γίνεται εμφανές ότι όσο οι πόλοι αυξάνονται για δεδομένες στροφές  $n$ , η συχνότητα  $f$  θα πρέπει να αυξηθεί (αυξάνοντας και τις απώλειες). Ως ονομαστική ταχύτητα θεωρούνται οι 120 Στροφές/Λεπτό όπως προέκυψε από την μηχανική ανάλυση.

**Πίνακας 3.6:** Αντιστοίχιση πόλων μηχανής με την ονομαστική συχνότητα λειτουργίας για δεδομένες στροφές

n (ΣΑΛ)	P (Πόλοι)	f (Hz)
120	10	10
120	12	12
120	14	14
120	16	16
120	18	18
120	20	20

Επίσης, για δεδομένη απαιτούμενη ονομαστική ροπή, οι κινητήρες με υψηλό αριθμό πόλων έχουν μικρότερο μαγνητικό κύκλωμα από αυτά των κινητήρων με λίγους πόλους. Οι δύο μηχανές του παρακάτω σχήματος έχουν μέγιστη πυκνότητα ροής στο διάκενο περίπου 0,75 T (κενό φορτίο). Η πυκνότητα ροής είναι ίδια, αλλά η ροή από τον ένα πόλο στον άλλο είναι αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού των πόλων. Δεδομένου ότι η ροή είναι χαμηλότερη με μεγαλύτερο αριθμό πόλων, το μαγνητικό υλικό σάτι και δρομέα μπορούν να γίνουν λεπτότερα χωρίς μεγαλύτερο κίνδυνο κορεσμού.



**Σχήμα 3.14 :** α) 4-πολική μηχανή β) 20-πολική μηχανή [24]

Με βάση τα παραπάνω, γίνεται η επιλογή για 20 πόλους.

Η ροή ανά μαγνητικό πόλο υπολογίζεται μέσω της ειδικής μαγνητικής φόρτισης:

$$\widehat{\Phi}_B = \frac{\pi D L \bar{B}}{P} = \frac{\pi \cdot 30 \text{cm} \cdot 20 \text{cm} \cdot 0.6 \text{T}}{20} = 4,712 \text{ mWb} \quad (3.37)$$

### 3.3.3 Ηλεκτρική φόρτιση – Μαγνητεγερτική δύναμη

Για την ηλεκτρική φόρτιση:

$$\begin{aligned} S &= \frac{\sqrt{2}\pi^3}{240} \cdot k_w \cdot n \cdot D^2 L \bar{B} \cdot ac \Rightarrow T_e \cdot \omega_{\text{mech}} = \frac{\sqrt{2}\pi^3}{240} \cdot k_w \cdot n \cdot D^2 L \bar{B} \cdot ac \\ &\Rightarrow T_e \cdot n_{\text{mech}} \cdot \frac{2\pi}{60} = \frac{\sqrt{2}\pi^3}{240} \cdot k_w \cdot n \cdot D^2 L \bar{B} \cdot ac \Rightarrow \\ ac &= \frac{T_e \cdot n_{\text{mech}} \cdot \frac{2\pi}{60}}{\frac{\sqrt{2}\pi^3}{240} \cdot k_w \cdot n_{\text{mech}} \cdot D^2 L \bar{B}} = \frac{T_e \cdot \frac{2\pi}{60}}{\frac{\sqrt{2}\pi^3}{240} \cdot k_w \cdot D^2 L \bar{B}} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi^2} \frac{T_e}{k_w \cdot D^2 L \bar{B}} \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$\text{Για τα } 300 \text{Nm:} \quad ac_{T=300 \text{Nm}} = \frac{\frac{4\sqrt{2}}{\pi^2} 300}{0,9 \cdot 0,25^2 \cdot 0,2 \cdot 0,6} = 25,47 \text{ kAE/m} \quad (3.39)$$

$$\text{Για τα } 700 \text{Nm:} \quad ac_{T=700 \text{Nm}} = \frac{\frac{4\sqrt{2}}{\pi^2} 700}{0,9 \cdot 0,25^2 \cdot 0,2 \cdot 0,6} = 50,94 \text{ kAE/m} \quad (3.40)$$

Για την Μαγνητεγερτική δύναμη:

$$ME\Delta = N_\Phi \cdot I_S = \frac{\pi D_g ac}{6} [\text{AE}] \quad (3.41)$$

$$\text{Για τα } 300 \text{Nm:} \quad ME\Delta = N_\Phi \cdot I_S = \frac{\pi \cdot 0,25 \cdot 25470}{6} = 3.334 \text{ AE} \quad (3.42)$$

$$\text{Για τα } 700 \text{Nm:} \quad ME\Delta = N_\Phi \cdot I_S = \frac{\pi \cdot 0,25 \cdot 50940}{6} = 6.668 \text{ AE} \quad (3.43)$$

Η τροφοδοσία θα γίνεται από το τριφασικό δίκτυο χαμηλής τάσης μέσω AC-DC-AC μετατροπέα. Άρα το επίπεδο τάσης της μηχανής δεν θα μπορεί να υπερβεί την έξοδο του αντιστροφέα.

$$V_{LL,RMS} = 400 \text{V} \Rightarrow V_{LL,PEAK} = \sqrt{2} \cdot 400 \text{V} = 565,68 \text{V} \Rightarrow$$

$$V_{LN,PEAK} = \frac{565,68 \text{V}}{\sqrt{3}} = 326,6 \text{V} \quad (3.44)$$

Για τριφασική ανόρθωση πλήρους γέφυρας:

$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cdot V_{LN,PEAK} = 540,19 \text{V} \quad (3.45)$$

Άρα, για την μηχανή:

$$E_{\text{rms}} = \frac{m_a \frac{V_{dc}}{2}}{\sqrt{2}} = \frac{0,75 \frac{540,19}{2}}{\sqrt{2}} = 143,24 \text{V} \quad (3.46)$$

### 3.3.4 Συνδεσμολογία τυλίγματος

Για την εύρεση της ενεργής τιμής της τάσης, θα υπολογιστούν τα εν σειρά ελίγματα, δεδομένης της ροής και της ταχύτητας περιστροφής.

$$f_e = n \frac{1}{60} \frac{P}{2} = 120 \text{RPM} \cdot \frac{1}{60} \frac{20}{2} = 20 \text{Hz} \quad (3.47)$$

Στο σενάριο που τα τυλίγματα είναι συνδεσμολογημένα παράλληλα, μειώνεται η τάση λειτουργίας. Αν συνδεθούν σε σειρά, τότε τα ενεργά ελίγματα διαιρούνται με τα ζεύγη πόλων.

- **ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1: ΣΕ ΣΕΙΡΑ**

$$E_{\text{rms}} = \sqrt{2} \pi \cdot k_w \cdot f \cdot N_\phi \cdot \widehat{\Phi}_B \Rightarrow N_\phi = \frac{E_{\text{rms}}}{\sqrt{2} \pi \cdot k_w \cdot f \cdot \widehat{\Phi}_B} = \frac{143,24}{\sqrt{2} \pi \cdot 0,95 \cdot 20 \cdot 4,712} \Rightarrow \quad (3.48)$$

$$N_\phi = 360 \text{ ενεργά ελίγματα}$$

Διαιρώντας με τα ζεύγη πόλων προκύπτει  $N_{\text{slot}} = \frac{360}{10} = 36$  ελίγματα ανά αυλάκι και πόλο.

Υπολογίζοντας το ονομαστικό ρεύμα για την περίπτωση των 300Nm και τη μεταβατική υπερφόρτωση των 700 Nm:

300Nm (120rpm):

$$P_{\text{mech}} = T_e \cdot \omega_{\text{μηχ}} = 300 \text{Nm} \frac{2\pi \cdot 120}{60} \text{r/s} \approx 3800 \text{W} \quad (3.49)$$

$$I_s = \frac{P_{\text{mech}}}{3 \cdot E_{\text{rms}} \cdot BA} = \frac{3800}{3 \cdot 143 \cdot 0,9} = 9,84 \text{ A} \quad (3.50)$$

700Nm (Κατά την επιτάχυνση: 90rpm αφού δεν έχει φτάσει την ονομαστική ταχύτητα):

$$P_{\text{mech}} = T_e \cdot \omega_{\text{μηχ}} = 700 \text{Nm} \frac{2\pi \cdot 90}{60} \text{r/s} = 6600 \text{W} \quad (3.51)$$

$$I_s = \frac{P_{\text{mech}}}{3 \cdot E_{\text{rms}} \cdot BA} = \frac{6600}{3 \cdot 143 \cdot 0,9} = 17,1 \text{ A} \quad (3.52)$$

Υπολογίζοντας στην συνέχεια το εμβαδό χαλκού που χρειάζεται για να επιτευχθεί η ονομαστική πυκνότητα ρεύματος που υποθέσαμε  $4 \text{A/mm}^2$  (300Nm):

$$A_{\text{cu}} = \frac{N_{\text{slot}} I_{\text{rms}}}{J_{\text{cu}}} = \frac{36 \cdot 9,84}{4} = 88,5 \text{ mm}^2 \quad (3.53)$$

Με αυτό το εμβαδό στην υπερφόρτιση όπου  $I_{\text{rms}}=17,1 \text{ A}$  προκύπτει η πυκνότητα ρεύματος:

$$J_{\text{cu}} = \frac{N_{\text{slot}} I_{\text{rms}}}{A_{\text{cu}}} = \frac{36 \cdot 17,1}{88,5 \text{ mm}^2} = 6,9 \text{ A/mm}^2 \quad (3.54)$$

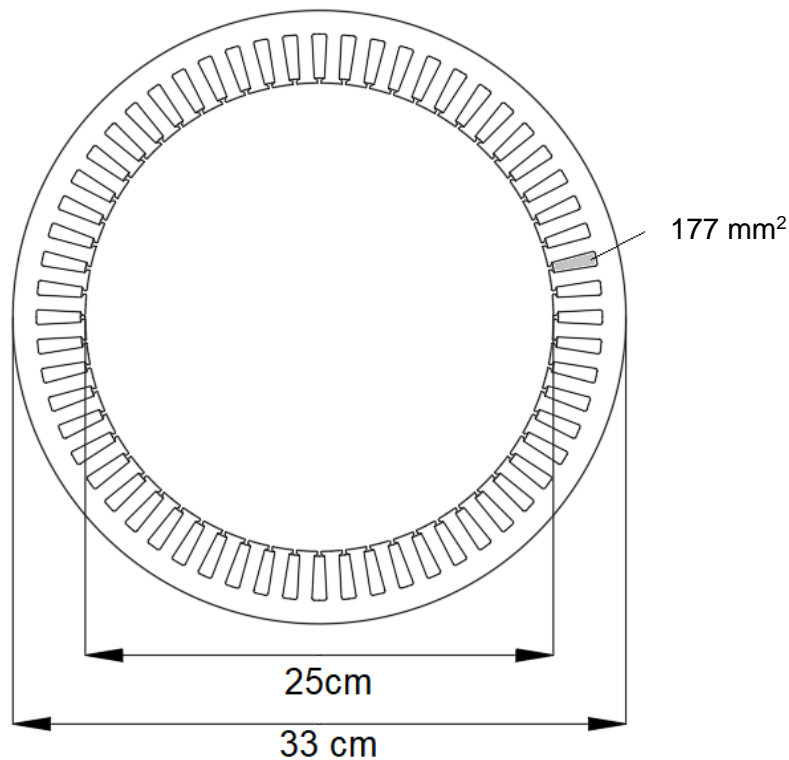
Ο συντελεστής πληρότητας αύλακος (fill factor) υπολογίζεται στο 45% επομένως:

$$A_{\text{slot}} = \frac{A_{\text{cu}}}{0,5} = 177 \text{ mm}^2 \quad (3.55)$$

Στον πίνακα 3.7 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της προκαταρκτικής σχεδίασης, για την περίπτωση που τα τυλίγματα είναι συνδεδεμένα σε σειρά.

**Πίνακας 3.7:** Χαρακτηριστικά Μηχανής

Αριθμός Φάσεων (m)	3	Είδος Τυλίγματος	Διανεμημένο
Πόλοι (P)	20	Συνδεσμολογία Πηνίων	Σε Σειρά
Ισχύς ( $P_N$ )	3800 W	Συντελεστής Τυλίγματος (Kw)	0,95
Ταχύτητα ( $n_{mech}$ )	120 rpm	Συνολικές Αύλακες Στάτη (Q)	60
Ροπή ( $T_N$ )	300 Nm	Στρώσεις (Layers)	1
Μέγιστη Ροπή ( $T_{max}$ )	700 Nm	Αύλακες ανά Πόλο (q)	1
Ηλεκτρική Συχνότητα ( $f_e$ )	20 Hz	Κλασματικό Βήμα (R)	-
Ενεργός τιμή τάσης ( $E_{rms}$ )	143 V	Ροή ανά Πόλο ( $\Phi$ )	4,7 mWb
Ονομαστικό Ρεύμα ( $I_N$ )	9.8 A	Πυκνότητα Ρεύματος ( $J_{Nom}$ )	4 A/mm <sup>2</sup>
Μήκος Διακένου ( $L_g$ )	1 mm	Fill Factor (ff)	50%
Μήκος Μηχανής (L)	20 cm	Ενεργά ελίγματα ανα Φάση ( $N_\phi$ )	360
Διάμετρος Μηχανής (D)	33 cm	Τυλίγματα Στρώσης Αύλακος (Nslot)	36
Μαγνητική Φόρτιση (B)	0,6 T	Εμβαδό Στρώσης Αύλακος (Aslot)	88,5 mm <sup>2</sup>
Ηλεκτρική Φόρτιση (ac)	25,47 kA/m	Εμβαδό Χαλκού Στρώσης Αύλακος (Acu)	177mm <sup>2</sup>



**Σχήμα 3.15 :** Βασικές διαστάσεις στάτη όπως προέκυψαν από τους υπολογισμούς

• **ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2: ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ**

Θεωρώντας στον αντιστροφέα μέγιστη έξοδο  $E_{rms} = 40V$  προκύπτει:

$$N_{\phi} = \frac{E_{rms}}{\sqrt{2}\pi \cdot k_w \cdot f \cdot \Phi_B} = \frac{40}{\sqrt{2}\pi \cdot 0,95 \cdot 20 \cdot 4,712} = 100 \text{ ελίγματα} \quad (3.56)$$

Αν τώρα υποθέσουμε ότι έχει 2 αυλάκες ανα πόλο και φάση (εφόσον 100 ελίγματα είναι αδύνατον να τοποθετηθούν) τότε προκύπτει:  $N_{slot} = \frac{N_{\phi}}{q} = \frac{100}{2} = 50$  ελίγματα ανα αυλάκι

Υπολογίζοντας το ονομαστικό ρεύμα για την περίπτωση των 300Nm και τη μεταβατική υπερφόρτωση των 700 Nm:

300Nm (120rpm):

$$P_{mech} = T_e \cdot \omega_{μηχ} = 300Nm \frac{2\pi \cdot 120}{60} r/s \approx 3800W \quad (3.57)$$

$$I_s = \frac{P_{mech}}{3 \cdot E_{rms} \cdot BA} = \frac{3800}{3 \cdot 40 \cdot 0,9} = 35,2 \text{ A} \quad (3.58)$$

700Nm (Κατά την επιτάχυνση: 90rpm αφού δεν έχει φτάσει την ονομαστική ταχύτητα):

$$P_{mech} = T_e \cdot \omega_{μηχ} = 700Nm \frac{2\pi \cdot 90}{60} r/s = 6600W \quad (3.59)$$

$$I_s = \frac{P_{mech}}{3 \cdot E_{rms} \cdot BA} = \frac{6600}{3 \cdot 143 \cdot 0,9} = 61,1 \text{ A} \quad (3.60)$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται το εμβαδό χαλκού που χρειάζεται για να επιτευχθεί η ονομαστική πυκνότητα ρεύματος που υποθέσαμε  $4A/mm^2$ :

$$A_{Cu} = \frac{N_{slot} I_{rms}}{J_{Cu}} = \frac{50 \cdot 38,77}{4} = 484mm^2 \quad (3.61)$$

Μη υλοποιήσιμη γεωμετρία με 120 αυλάκια και  $A_{Cu} = 484mm^2$ . Επομένως η διαδικασία θα προχωρήσει με τα τυλίγματα σε σειρά.



## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (2D- FEA)

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγιναν οι προκαταρκτικοί -προσεγγιστικοί- υπολογισμοί των βασικών μεγεθών του κινητήρα, όπου τα αποτελέσματά θα αποτελέσουν την βάση του επόμενου βήματος σχεδίασης. Πλέον για την τελική υλοποίηση του κινητήρα είναι απαραίτητη η λεπτομερής σχεδίαση του κινητήρα και η προσομοίωσή του, με σκοπό την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών επίδοσης του. Έτσι, σε αυτό το στάδιο γίνεται αναφορά στην κατασκευή της γεωμετρίας στάτη και δρομέα και την εισαγωγή της στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Στην συνέχεια δίνονται τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά με τα οποία θα καθοριστεί η λειτουργική κατάσταση του κινητήρα (Πυκνότητα ρεύματος, στροφές, εσωτερική γωνία δρομέα – στάτη κλπ.) και έπειτα γίνεται η πεδιακή ανάλυση που θα εξάγει αποτελέσματα (απόδοση, ροπή εξόδου, σημεία κορεσμού, μάζα κλπ.).

Οι παραπάνω διαδικασίες θα πραγματοποιηθούν με το ελεύθερο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων (FEMM - Finite Element Method Magnetics) που λειτουργεί μέσω διεπαφής με κώδικά στο λογισμικό MATLAB. Έτσι, σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρονται:

- Το λογισμικό FEMM
- Η δημιουργία μαγνητοστατικού προβλήματος (λεπτομερής κατασκευή της γεωμετρίας του κινητήρα) (Προ - επεξεργασία)
- Η προσομοίωση στο FEMM (Επεξεργασία)
- Και η εξαγωγή των βασικών χαρακτηριστικών με τα οποία θα αξιολογηθούν οι γεωμετρίες που θα αναπτυχθούν. (Μετά - επεξεργασία)

<b>Εισαγωγή</b>	• Γεωμετρία	• Αριθμητική Μέθοδος	• Εξαγωγή Αποτελεσμάτων
<b>δεδομένων :</b>	• Υλικά	• Μέγιστος Αριθμός Επαναλήψεων	• Διαγράμματα
	• Οριακές Συνθήκες	• Καθορισμός Μεγίστου Σφάλματος	• Colour Plots
	• Παραμετροποίηση	• Καθορισμός πλέγματος (mesh)	• Βελτιστοποίηση
			• Ανάλυση Ευαισθησίας

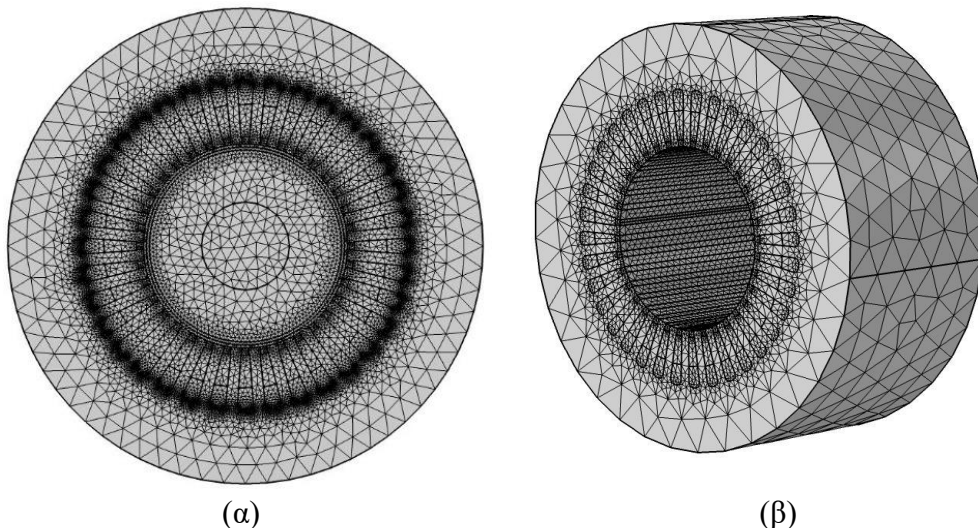


**Σχήμα 4.1:** Πορεία ανάλυσης [25]

## 4.2 ΠΕΔΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιείται για την προσέγγιση λύσεων διαφορικών εξισώσεων που προκύπτουν σε φυσικά και μηχανολογικά προβλήματα με πολύπλοκες γεωμετρίες, όπως στην παρούσα περίπτωση.

Με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η γεωμετρία του προβλήματος διαιρείται σε μικρότερες περιοχές. Έπειτα, επιλύει τα επιμέρους προβλήματα για κάθε περιοχή και συνδυάζει τις λύσεις έτσι ώστε να προκύψει η συνολική λύση. Σε μία συνεχή κατασκευή δεν υπάρχουν φυσικοί διαχωρισμοί και συνεπώς απαιτείται να γίνει τεχνητός διαχωρισμός σε στοιχεία, τα οποία να συνδέονται κατά μήκος των άκρων (πλευρών) τους. Τα τεχνητά αυτά στοιχεία, ή πεπερασμένα στοιχεία είναι συνήθως τετράεδρα ή εξάεδρα στην περίπτωση τρισδιάστατης γεωμετρίας και τριγωνικά στην περίπτωση δισδιάστατης. Χάρη σε αυτά το συνεχές πρόβλημα έχει μετατραπεί σε πολλά πιο απλά διακριτά προβλήματα με ευκολότερη επίλυση.



**Σχήμα 4.2:** Το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων του κινητήρα: (α) το δισδιάστατο τριγωνικό πλέγμα του δρομέα και του στάτη και (β) το τρισδιάστατο τετραεδρικό πλέγμα του στάτη. [26]

## 4.3 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ FEMM

Το FEMM είναι ελεύθερο λογισμικό που έχει την δυνατότητα να επιλύσει τέσσερις κατηγορίες προβλημάτων: Μαγνητοστατικά, Ηλεκτροστατικά, Θερμικά και Μόνιμων ρευμάτων. Έχει την ικανότητα να επιλύσει μόνο δυσδιάστατα προβλήματα με την επιλογή βάθους στην γεωμετρία, γεγονός που δεν αποτελεί πρόβλημα για την παρούσα μελέτη, αφού ο χρόνος επίλυσης είναι σημαντικά γρήγορος και η γεωμετρία δεν αλλάζει κατά τον άξονα  $z$ . Η κατηγορία που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση είναι το Μαγνητοστατικό Πρόβλημα. Όμως το πρόβλημα στην πραγματικότητα εμπεριέχει και ανώτερες αρμονικές χρόνου, οι οποίες μπορούν να αναλυθούν με ηλεκτρομαγνητική αρμονική ανάλυση. Στην περίπτωση που θέλουμε να μοντελοποιήσουμε τις αλληλεπιδράσεις όλων των φαινομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα σχήμα πεπερασμένων στοιχείων διακριτού χρόνου (Finite difference time domain) σε άλλο λογισμικό, το οποίο όμως θα είχε μεγάλες υπολογιστικές απαιτήσεις.

#### 4.4 ΜΑΓΝΗΤΟΣΤΑΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Τα μαγνητοστατικά προβλήματα είναι προβλήματα στα οποία τα πεδία παραμένουν αμετάβλητα ως προς τον χρόνο. Σε αυτήν την περίπτωση, η ένταση του πεδίου ( $H$ ) και η πυκνότητα του ροής ( $B$ ) επαληθεύονται στις παρακάτω εξισώσεις:

$$\nabla \times H = J \quad (4.1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4.2)$$

Η σχέση μεταξύ  $B$  και  $H$  για κάθε υλικό (εκτός των μονίμων μαγνητών):

$$B = \mu H \quad (4.3)$$

Για τους μόνιμους μαγνήτες η σχέση γράφεται:

$$B = \mu_0 H + M \quad (4.4)$$

Όπου,  $M$  η μαγνήτιση του υλικού.

Εάν ένα υλικό είναι μη γραμμικό, η επιτρεπτότητα  $\mu$ , είναι μια συνάρτηση της μαγνητικής επαγωγής  $B$ :

$$B = \mu H(B) \quad (4.5)$$

Το FEMM υπολογίζει το διανυσματικό δυναμικό του μαγνητικού πεδίου σε κάθε σημείο του χώρου, μέσω του διανυσματικού δυναμικού,  $A$ , ως εξής:

$$B = \nabla \times A \quad (4.6)$$

Με αυτόν τον τρόπο, η ορισμένη παραπάνω σχέση για το  $B$  ικανοποιεί πάντα την εξίσωση (4.2). Έτσι, η εξίσωση (4.1) γράφεται:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = J \quad (4.7)$$

Για ένα γραμμικό ιστροπικό υλικό (και υποθέτοντας τη συνθήκη του Coulomb,  $\nabla \cdot A = 0$ ), η εξίσωση (4.7) απλοποιείται σε:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = J \quad (\text{εξίσωση Poisson}) \quad (4.8)$$

Το FEMM διατηρεί τη μορφή της εξίσωσης (4.7), έτσι ώστε να είναι δυνατή η επίλυση μαγνητοστατικών προβλημάτων με μια μη γραμμική σχέση  $B$ - $H$ .

Στη περίπτωση των τριών διαστάσεων, το  $A$  είναι ένα διάνυσμα με τρεις συνιστώσες. Ωστόσο, στην περίπτωση των δυσδιάστατων και αξονικών προβλημάτων, δύο από τις τρεις συνιστώσες είναι μηδενικές, αφήνοντας μόνο τη συνιστώσα στην κατεύθυνση "έξω από τη σελίδα".

Το πλεονέκτημα της διατύπωσης του διανυσματικού δυναμικού είναι, ότι όλες οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιηθούν έχουν συνδυαστεί σε μία μόνο εξίσωση. Αν βρεθεί το  $A$ , τότε μπορεί να υπολογιστεί το  $B$  και το  $H$  με διαφοροποίηση του  $A$ . Η μορφή της εξίσωσης (4.7), μια

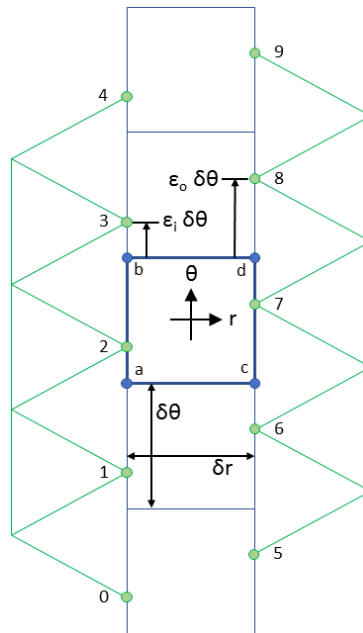
ελλειπτική μερική διαφορική εξίσωση, προκύπτει στη μελέτη πολλών διαφορετικών ειδών μηχανικών φαινομένων. Έχουν αναπτυχθεί πολλά εργαλεία τα τελευταία χρόνια για την επίλυση αυτού του συγκεκριμένου προβλήματος.

#### 4.5 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Οι οριακές συνθήκες καθορίζουν τη συμπεριφορά ενός μαθηματικού ή φυσικού μεγέθους στα όρια ενός συστήματος ή ενός πεδίου. Κάθε μία από αυτές έχει την ιδιαίτερη σημασία της και εφαρμόζεται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του συστήματος που μελετάμε. Στην παρούσα περίπτωση καθορίζουν την τιμή που λαμβάνει το διάνυσμα του δυναμικού  $A$  του μαγνητικού πεδίου στα άκρα του. Παρακάτω οι συνηθέστερες οριακές συνθήκες:

- **Οριακή συνθήκη Dirichlet:** Αυτή η οριακή συνθήκη καθορίζει την τιμή μιας μεταβλητής στο όριο του συστήματος. Στην περίπτωσή μας ορίζεται η μηδενική οριακή συνθήκη ( $A=0$ ) για το εξωτερικό όριο του στάτη και για το εσωτερικό όριο του δρομέα όπου οι μαγνητικές γραμμές δεν τέμνουν το όριο, γεγονός που αποτελεί παραδοχή και θα συνέβαινε μόνο αν η μηχανή περιβαλλόταν από υλικό με μηδενική μαγνητική διαπερατότητα.
- **Οριακή συνθήκη Neumann:** Αυτή η οριακή συνθήκη καθορίζει την παράγωγο μιας μεταβλητής στο όριο του συστήματος. Σε ομογενή οριακή συνθήκη Neumann η πρώτη παράγωγος είναι ίση με μηδέν ( $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ ) και οι μαγνητικές γραμμές τέμνουν κάθετα το σύνορο της επιφάνειας. Στην περίπτωση του μαγνητοστατικού προβλήματος, έξω από το όριο στο οποίο ορίζεται η συνθήκη, υπάρχει υλικό με άπειρη μαγνητική διαπερατότητα.
- **Οριακή συνθήκη Robin:** Αυτή η οριακή συνθήκη είναι μια συνδυασμένη οριακή συνθήκη που συνδέει την τιμή της μεταβλητής και την παράγωγό της στο όριο του συστήματος ( $\frac{\partial A}{\partial n} + c \cdot A = 0$ ), λαμβάνοντας τη μορφή ενός γραμμικού συνδυασμού των δύο.
- **Περιοδική οριακή συνθήκη:** Αυτή η οριακή συνθήκη προσδιορίζει μια περιοδική συμπεριφορά των μεταβλητών συνδέοντας δύο όρια. Δηλαδή, οι μεταβλητές σε δυο αντίστοιχα σημεία των ορίων είναι ίσες. Για παράδειγμα στα άκρα των πλευρών ενός ζεύγους πόλων έχουμε περιοδικότητα.
- **Αντιπεριοδική οριακή συνθήκη:** Αυτή η οριακή συνθήκη περιγράφει μια αντιπεριοδική συμπεριφορά της μεταβλητής στα 2 όρια του προβλήματος. Δηλαδή, η μεταβλητή αλλάζει προς την αντίθετη κατεύθυνση κάθε περίοδο του συστήματος. Για παράδειγμα, στα άκρα των πλευρών ενός πόλου μιας μηχανής.
- **Ειδική οριακή συνθήκη "Sliding Band":** Λόγω της κλασματικής γεωμετρίας, ενδιαφέρον παρουσιάζει η μοντελοποίηση της κίνησης του δρομέα ως προς τον στάτη. Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια διασταύρωση μεταξύ των μεθόδων Moving Band και

Interpolation που επινόησε ο David Meeker και την ονόμασε "Sliding Band" και εφαρμόζεται στο διάκενο.

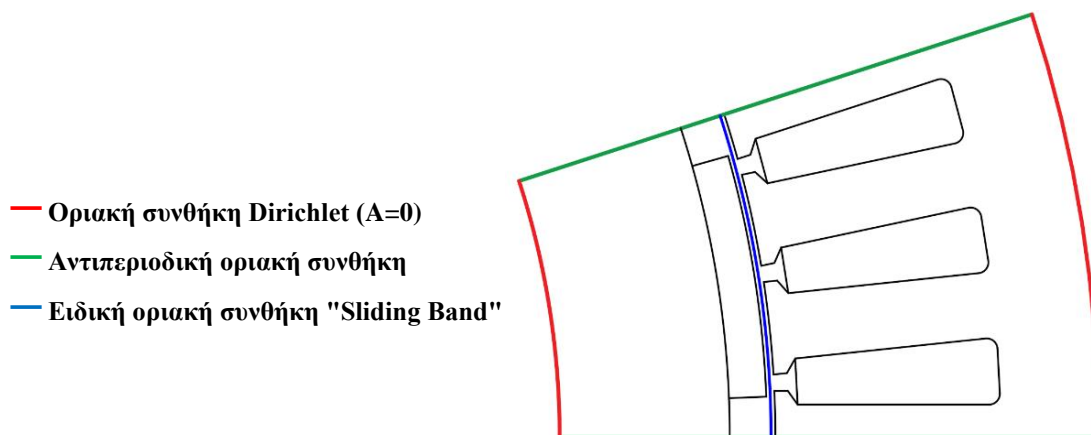


Σχήμα 4.3: Απεικόνιση του διακένου με την ειδική οριακή συνθήκη Sliding Band [27]

Η κλασματική γεωμετρία χωρίζεται σε 2 ξεχωριστά πλέγματα, ένα στον στάτη και ένα στον δρομέα. Ο αέρας στο διάκενο χωρίζεται στο μέσο του. Η μια πλευρά κατανέμεται με το πλέγμα του στάτη και η άλλη πλευρά με το πλέγμα του δρομέα. Ανάμεσα στα 2 πλέγματα δημιουργείται μια ζώνη την οποία, η μέθοδος "Sliding Band" γεμίζει τετράπλευρα στοιχεία όπως φαίνεται στην εικόνα.

Για να αλληλεπιδράσουν οι τιμές των κόμβων των στοιχείων, του ενός πλέγματος στο άλλο, χρησιμοποιούνται οι κόμβοι των τετράπλευρων της ζώνης με κυβική παρεμβολή. Για παράδειγμα οι τιμές των κόμβων Aa, Ab και Ac, Ad (σχήμα 4.3) είναι τα διανυσματικά δυναμικά στις γωνίες ενός συγκεκριμένου ορθογώνιου στοιχείου της ζώνης. Οι τιμές τους προκύπτουν από κυβική παρεμβολή (cubic interpolation) των τιμών δυναμικού στις ακμές του πλέγματος A0 έως A4 για τα Aa και Ab και A5 έως A9 για τα Ac και Ad.

Με την κυβική παρεμβολή (Cubic Spline Interpolation) μπορούμε να υπολογίσουμε τιμές του πεδίου σε οποιαδήποτε θέση (r, theta) μεταξύ αυτών των γνωστών σημείων του πλέγματος. Αυτό μας επιτρέπει να εκτιμήσουμε με ακρίβεια τις τιμές του πεδίου καθώς η μία πλευρά θα ολισθαίνει τεχνητά. [27]



Σχήμα 4.4: Οι οριακές συνθήκες στην μηχανή

## 4.6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Η αξιολόγηση του κινητήρα γίνεται με βάση κάποια κριτήρια. Αυτά θα είναι:

- **Ροπή εξόδου για δεδομένη πυκνότητα ρεύματος ( $T_e$ ):**

Η ροπή εξόδου αποτελεί ένα από τα κρίσιμα κριτήρια αξιολόγησης κινητήρων. Η δυνατότητα του κινητήρα να παράγει την απαιτούμενη ροπή για μια δεδομένη πυκνότητα ρεύματος είναι απαραίτητη προϋπόθεση για να λειτουργήσει στις λειτουργικές καταστάσεις που θα χρειαστεί να ανταπεξέλθει. Στην περίπτωση μας αν η ονομαστική ροπή είναι μικρότερη, ο κινητήρας δεν θα μπορεί να σηκώσει το θάλαμο.

- **Κυμάτωση της ροπής εξόδου ( $T_{ripple}$ ):**

Η κυμάτωση της ροπής εξόδου είναι ένα ακόμα κριτήριο αξιολόγησης που επηρεάζει την λειτουργικότητα του κινητήρα. Οι ταλαντώσεις ροπής μπορεί να προκαλέσουν φθορά στα εσωτερικά μέρη του κινητήρα, όπως τα ρουλεμάν και τις εδράσεις, μειώνοντας μακροπρόθεσμα την αξιοπιστία και τη διάρκεια ζωής του. Επίσης, σε μεγάλες τιμές η κυμάτωση της ροπής δημιουργεί μη ομαλή λειτουργία στον σύστημα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε δονήσεις, θόρυβο και ακανόνιστη κίνηση του κινητήρα που θα αναταράξουν την μηχανική λειτουργία της εφαρμογής.

- **Αρμονική παραμόρφωση της επαγόμενης τάσης (Αντι-ΗΕΔ, THD):**

Η αρμονική παραμόρφωση της επαγόμενης τάσης αφορά την ποιότητα της τάσης που παράγεται από τον κινητήρα. Οι αρμονικές τάσεις μπορούν να προκαλέσουν αρμονικά ρεύματα στο ηλεκτρικό σύστημα. Υψηλή αρμονική παραμόρφωση μειώνει την απόδοση του αντιστροφέα, ενώ μπορεί να προκαλέσει φθορά στα ημιαγωγικά στοιχεία του, επηρεάζοντας και την αξιοπιστία του συστήματος από πλευράς ηλεκτρονικών ισχύος.

- **Απόδοση:**

Η απόδοση αποτελεί ένα σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης για τη λειτουργία των κινητήρων. Υψηλή απόδοση υποδηλώνει αποτελεσματική μετατροπή ενέργειας και ελάχιστη απώλεια ισχύος, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας. Από οικονομικής άποψης η απόδοση συνδέεται με τα λειτουργικά έξοδα που έχει η λειτουργία του ανελκυστήρα. Ένα σύστημα ανελκυστήρα με χαμηλή απόδοση καταναλώνει περισσότερη ενέργεια για να εκτελέσει τις κινήσεις του, αυξάνοντας το κόστος σε μακροπρόθεσμη βάση.

- **Βάρος:**

Το βάρος αποτελεί παράμετρο αξιολόγησης κατά την κατασκευή των κινητήρων. Μικρότερο βάρος επιτρέπει ευκολότερη εγκατάσταση, μείωση του χώρου που απαιτείται και αυξημένη ευελιξία στη χρήση. Βέβαια, στην συγκεκριμένη εφαρμογή το βάρος δεν θα αποτελέσει σημαντικό κριτήριο.

- **Κόστος Υλικών:**

Το κόστος αποτελεί ένα από τα κριτήρια αξιολόγησης κατά την κατασκευή και τη λειτουργία των κινητήρων. Συνολικά, οι μαγνήτες, ο χαλκός και τα σιδηρομαγνητικά υλικά, μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά το συνολικό κόστος ενός ηλεκτρικού κινητήρα. Οι επιλογές υλικών σε συνδυασμό με την εύρωστη σχεδίαση μπορούν να αντιμετωπίσουν αυτή την πρόκληση και να επιτευχθεί οικονομική βιωσιμότητα. Η βαρύτητα στρέφεται στους μόνιμους μαγνήτες που χρησιμοποιούνται στις ΣΜΜΜ. Συνήθως, όπως και στην παρούσα εφαρμογή, χρησιμοποιείται νεοδύμιο (NdFeB), μια σπάνια γαία που παράγεται κυρίως σε ορισμένες χώρες, όπως η Κίνα. Η περιορισμένη διαθεσιμότητα αυτών των σπάνιων γαιών σε συνδυασμό με την αυξημένη ζήτηση σε διάφορες βιομηχανίες, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και οι ηλεκτρονικές συσκευές μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του κόστους των μαγνητών, επηρεάζοντας το συνολικό κόστος του κινητήρα.

## 4.7 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Στο Κεφάλαιο 3 έγινε η βασική διαστασιολόγηση του κινητήρα με χρήση μαθηματικών υπολογισμών. Τώρα, σειρά έχει, ο τρόπος με τον οποίο θα γίνονται οι προσομοιώσεις και η αξιολόγηση των μηχανών στο Matlab - FEMM. Στα πλαίσια της εργασίας αναπτύχθηκε κώδικας παραμετροποιημένης σχεδίασης ΣΜΜΜ και αξιολόγησής της. Αυτό σημαίνει πως ο σχεδιαστής εισάγει τα χαρακτηριστικά του κινητήρα στο Matlab και στην συνέχεια το πρόγραμμα δημιουργεί τον κινητήρα και εξάγει αποτελέσματα επίδοσης.

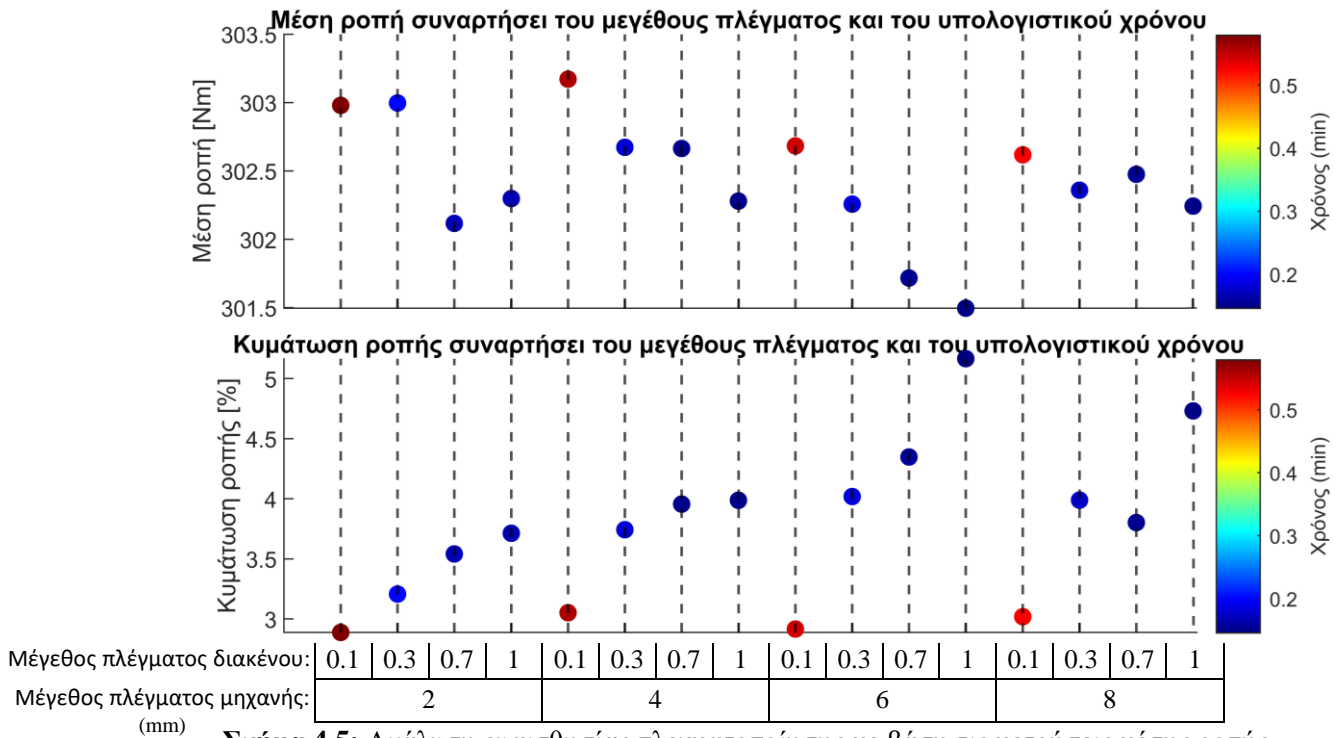
Η κάθε μηχανή εξετάζεται προσομοιώνοντας μια σύγχρονη ηλεκτρική περιστροφή. Σε μια ηλεκτρική περιστροφή, ο δρομέας θα στραφεί κατά 2 πολικά βήματα και τα ρεύματα του στάτη στρέφονται ταυτόχρονα, διατηρώντας σταθερή την εσωτερική γωνία των 2 πεδίων (των μαγνητών και του στάτη). Όπως παρουσιάστηκε παραπάνω το FEMM πραγματοποιεί μαγνητοστατικές αναλύσεις στο δυσδιάστατο επίπεδο. Έτσι, η σύγχρονη περιστροφή διακριτοποιείται σε πολλαπλά διαδοχικά στιγμιότυπα, όπου το καθένα από αυτά, αναλύεται μαγνητοστατικά στο FEMM. Τα αποτελέσματα από κάθε στιγμιότυπο καταγράφονται και συντίθενται κατάλληλα, ώστε να αποτυπώθούν ποσότητες που δεν προκύπτουν κατευθείαν από την στατική ανάλυση (π.χ. επαγόμενη Αντί-ΗΕΔ, Κυμάτωση ροπής).

Η επίλυση των μαγνητοστατικών προβλημάτων προϋποθέτει να έχει γίνει με ακριβή και ορθό τρόπο ο καθορισμός των παραμέτρων. Μια σημαντική πρόκληση κατά την αξιολόγηση των γεωμετριών είναι ο χρόνος εκτέλεσης των προσομοιώσεων. Για αυτό εκμεταλλευόμαστε την συμμετρία της κατασκευής και μέσω κατάλληλων οριακών συνθηκών προσομοιώνουμε μόνο κομμάτι της μηχανής. Στην συνέχεια ανάγουμε τα αποτελέσματα για ολόκληρη την κατασκευή.

Επίσης χρειάζεται να γίνει ένας καλός συμβιβασμός μεταξύ της ακρίβειας επίλυσης που επιθυμεί ο σχεδιαστής, με τον χρόνο εκτέλεσης που θα απαιτηθεί από το υπολογιστικό σύστημα για να εξάγει τα αποτελέσματα. Δύο είναι τα κύρια κριτήρια που μεταβάλλουν σημαντικά τον χρόνο και την ακρίβεια των προσομοιώσεων. Το πόσο πυκνό είναι το **πλέγμα**, δηλαδή σε πόσα στοιχεία χωρίζεται η γεωμετρία και πόσα **στιγμιότυπα** θα χωριστεί η σύγχρονη περιστροφή. Σχετικά με το πρώτο, σε κάθε στοιχείο η λύση προσεγγίζεται με γραμμική παρεμβολή των τιμών δυναμικού στις κορυφές του τριγώνου και το πρόβλημα της γραμμικής άλγεβρας σχηματίζεται με την ελαχιστοποίηση του μέτρου του σφάλματος ανάμεσα στην πραγματική διαφορική εξίσωση και την προσεγγιστική διαφορική εξίσωση. Γίνεται λοιπόν εμφανές ότι ο καθορισμός των τριγωνικών στοιχείων του πλέγματος διαμορφώνει σημαντικά το τελικό σφάλμα των αποτελεσμάτων.

#### 4.7.1 Ανάλυση ευαισθησίας επιλογών Πλεγματοποίησης

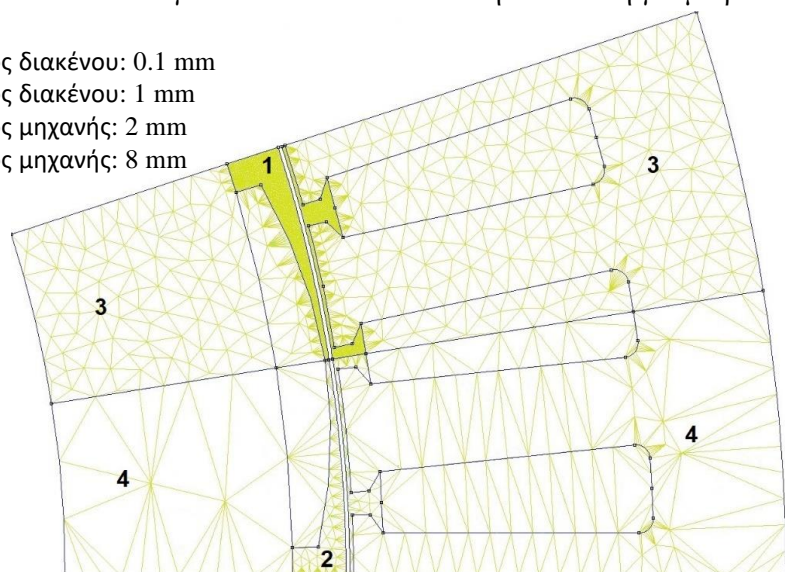
Τα σημαντικότερα φαινόμενα συμβαίνουν στο διάκενο, για αυτό και εκεί πρέπει να δοθεί μεγαλύτερη σημασία από ότι στην υπόλοιπη γεωμετρία, άρα και πυκνότερο πλέγμα. Παρακάτω χωρίζω την γεωμετρία σε 2 ζώνες πλεγματοποίησης, στο διάκενο και στην υπόλοιπη μηχανή και συγκρίνω ενδεικτικά τα αποτελέσματα ροπής και κυμάτωσης ροπής αποτυπώνοντας και τον χρόνο εκτέλεσης.



**Σχήμα 4.5:** Ανάλυση ευαισθησίας πλεγματοποίησης με βάση τις μετρήσεις μέσης ροπής (πάνω διάγραμμα) και κυμάτωσης ροπής (κάτω διάγραμμα)

Γίνεται εμφανές ότι το μέγεθος του διακένου καθορίζει πρακτικά τον χρόνο αλλά και την ακρίβεια, ενώ μια καλή τιμή είναι τα 0.3mm για το διάκενο και 2mm στην υπόλοιπη γεωμετρία.

- Περιοχή 1:** Μέγεθος πλέγματος διακένου: 0.1 mm
- Περιοχή 2:** Μέγεθος πλέγματος διακένου: 1 mm
- Περιοχή 3:** Μέγεθος πλέγματος μηχανής: 2 mm
- Περιοχή 4:** Μέγεθος πλέγματος μηχανής: 8 mm



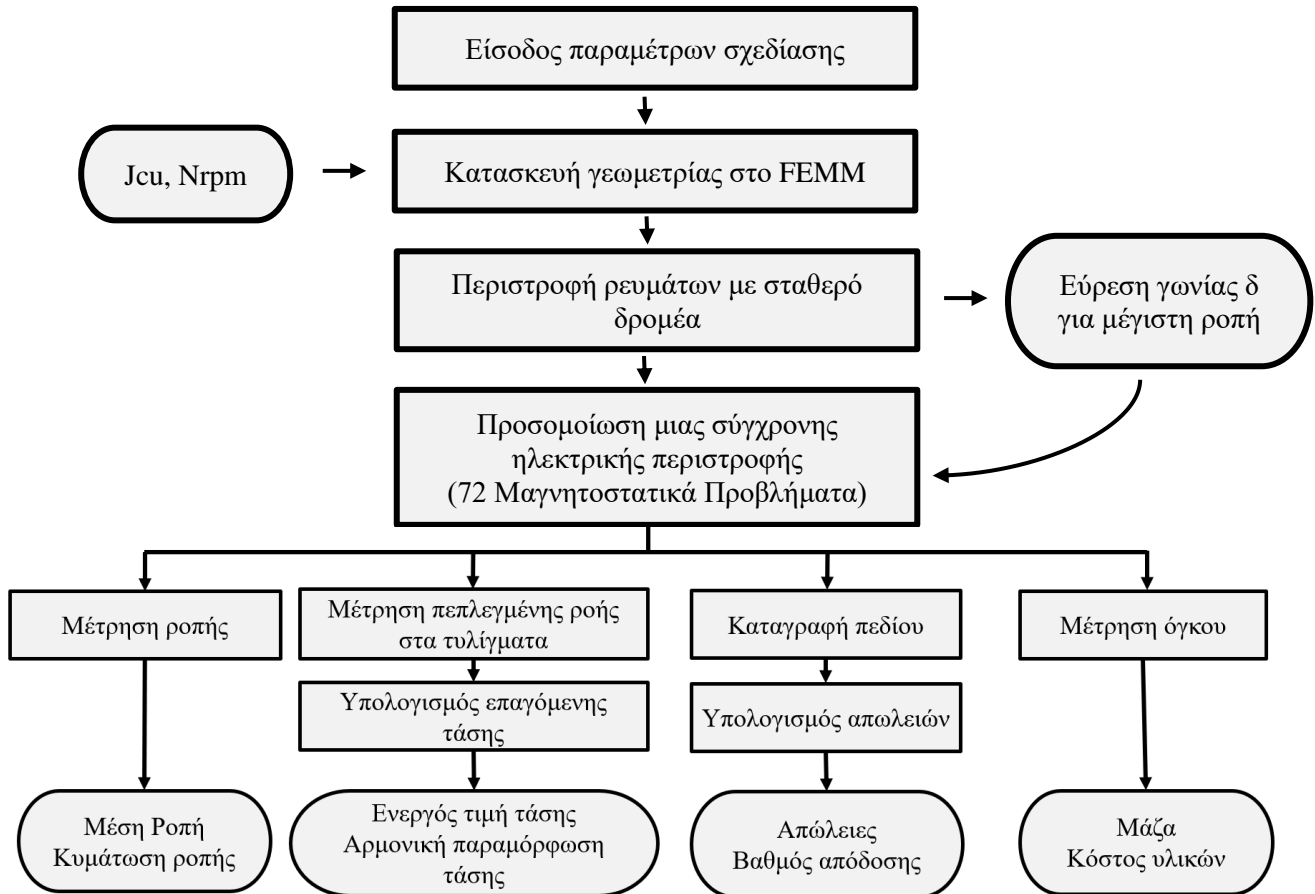
**Εικόνα 4.6:** Ακραίες τιμές στην ανάλυση ευαισθησίας πλεγματοποίησης



### 4.7.2 Διάγραμμα ροής για την εξέταση μιας μηχανής

Τώρα θα εξετάζονται συνοπτικά τα εργαλεία που μετρούν τις ποσότητες. Παρακάτω παρουσιάζεται βήμα-προς-βήμα το πλάνο για το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στο Matlab για τον σχεδιασμό μιας ηλεκτρικής μηχανής και την αξιολόγησή της:

Αναλυτικά η διαδικασία:



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα ροής σχεδίασης και αξιολόγησης ενός κινητήρα

#### 4.7.2.1 Είσοδος παραμέτρων σχεδίασης

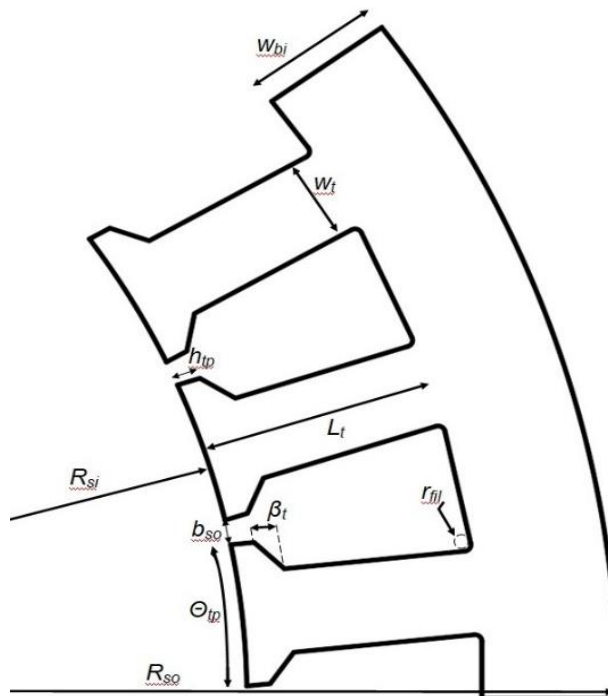
Στο πρώτο βήμα, πραγματοποιείται η διαδικασία εισαγωγής των παραμέτρων σχεδίασης για τα διάφορα μέρη του κινητήρα, όπως ο στάτης, ο δρομέας, τα τυλίγματα και οι μαγνήτες. Αυτή η συνάρτηση αποτελεί τον καθοριστικό πυρήνα που δημιουργεί τον κινητήρα ως μια ολοκληρωμένη οντότητα. Προσδιορίζονται επιμελώς οι λεπτομερείς διαστάσεις και οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των μερών του κινητήρα. Οι μεταβλητές αυτές παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 4.1: Γενικές μεταβλητές σχεδίασης της μηχανής

Σύμβολο	Μέγεθος
$p$	Αριθμός πόλων κινητήρα
$S$	Αριθμός αυλάκων κινητήρα
$m$	Αριθμός φάσεων
$L$	Ενεργό μήκος κινητήρα (mm)
$l$	Πάχος Διακένου (mm)
$lam$	Πάχος λαμαρίνας (mm)
SF	Συντελεστής πληρότητας λαμαρίνας (%)

Πίνακας 4.2: Γενικές μεταβλητές σχεδίασης στάτη

Σύμβολο	Μέγεθος
$R_{so}$	Εξωτερική ακτίνα στάτη (mm)
$R_{si}$	Εσωτερική ακτίνα στάτη (mm)
$W_t$	Πάχος δοντιού (mm)
$W_{bi}$	Πάχος σώματος στάτη (mm)
$h_{tp}$	Πάχος πέλματος (mm)
$L_t$	Μήκος δοντιού (mm)
$b_{so}$	Γωνία ανοίγματος αύλακας (deg)
$\theta_{tip}$	Γωνία πέλματος δοντιού (deg)
$\beta_t$	Ύψος τμήματος δοντιού με κλίση (mm)
$r_{fill}$	Ακτίνα κύκλου για εξομάλυνση των γωνιών (mm)

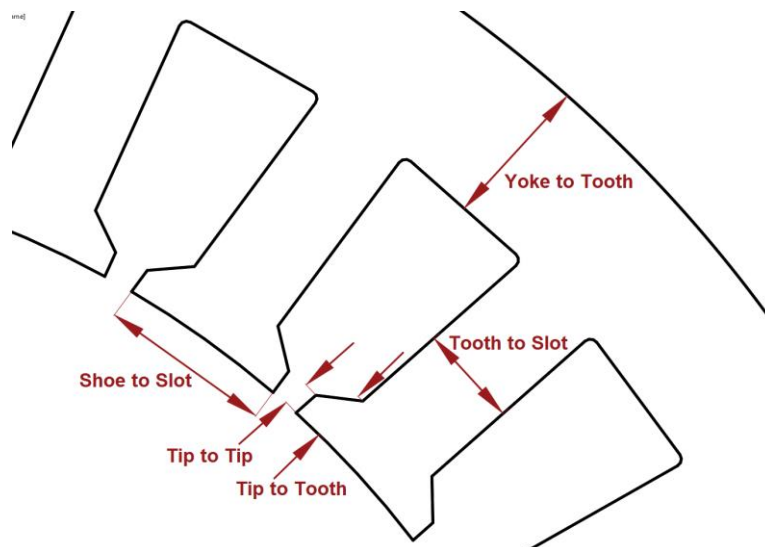


Σχήμα 4.8: Απεικόνιση μεταβλητών στάτη

Για απλοποίηση της περιγραφής του στάτη οι διαστάσεις που περιγράφονται στον πίνακα 4.2 μπορούν να μειωθούν, εφαρμόζοντας ποσοστιαίες σχέσεις μεταξύ των διαστάσεων του στάτη. Έτσι, προκύπτει ο νέος πίνακας δεδομένων για το στάτη (πίνακας 4.3) που δίνονται ως είσοδο στο Matlab:

**Πίνακας 4.3:** Παραμετροποιημένες μεταβλητές στάτη

Συμβολισμός	Σημασία
$R_{so}$	Εξωτερική ακτίνα στάτη (mm)
$R_{si}$	Εσωτερική ακτίνα στάτη (mm)
Yoke2Tooth	Πάχος πλαισίου στάτη ως ποσοστό του πάχους δοντιού
Tooth2Slot	Πάχος δοντιού ως ποσοστό του αθροίσματος του μήκους δοντιού και αύλακας
Shoe2Slot	Γωνία πέλματος του δοντιού ως ποσοστό του πολικού βήματος
Tips2Tooth	Ύψος πέλματος ως ποσοστό του μήκους του δοντιού
Tips2Tips	Ύψος των άκρων των δοντιών ως ποσοστό του ύψους του πελματος



**Σχήμα 4.9:** Απεικόνιση παραμετροποιημένων μεταβλητών στάτη

**Πίνακας 4.4:** Βασικές παράμετροι δρομέα

Σύμβολο	Μέγεθος
Rotor_Type	Τύπος Δρομέα
$R_{ro}$	Εξωτερική διάμετρος δρομέα
$R_{ri}$	Εσωτερική διάμετρος δρομέα
$H_{mag}$	Πάχος μαγνήτη

**Πίνακας 4.5:** Παράμετροι τυλίγματος

Σύμβολο	Μέγεθος
$N_{slot}$	Ελίγματα ανα αυλάκια
ff	Συντελεστής πληρότητας αυλάκος
layers	Στρώσεις τυλίγματος

#### 4.7.2.2 Κατασκευή γεωμετρίας στο FEMM

Στην συνέχεια αφού καθοριστούν οι μεταβλητές, εισάγονται στην συνάρτηση που αναλαμβάνει να κατασκευάσει τον κινητήρα στο FEMM. Το πρόβλημα παρουσιάζει συμμετρία, για αυτό σχεδιάζεται μόνο ένας πόλος, κάνοντας χρήση των αντιπεριοδικών και των μηδενικών οριακών συνθηκών που συζητήθηκαν παραπάνω.

#### 4.7.2.3 Εύρεση εσωτερικής γωνίας $\delta$ για μέγιστη ροπή (ΜΤΡΑ)

Αφού έχει σχεδιαστεί ο κινητήρας στο FEMM, ακολουθεί η επίλυση του προβλήματος για εξαγωγή αποτελεσμάτων. Αρχικά, όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο της θεωρίας, υπάρχουν δύο συνιστώσες που συντελούν στην παράγωγή ροπής: ο μαγνήτης και η ροπή ευθυγράμμισης. Ο δρομέας που παρουσιάζει διαφορετικά  $L_d$  και  $L_q$ , αλλάζει την καμπύλη ροπής-εσωτερικής γωνίας  $\delta$  παρουσιάζοντας μέγιστη τιμή σε γωνίες κοντά ή και πέρα από τις 90 μοίρες.

Η στρατηγική Maximum Torque Per Ampere (ΜΤΡΑ) χρησιμοποιείται για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών, έχοντας ως στόχο την μεγιστοποίηση ροπής για δεδομένο ρεύμα φάσης. Καθορίζει την τιμή της εσωτερικής γωνίας  $\delta$  που πρέπει να σχηματίζεται ανάμεσα στο ρεύμα στάτη και το μαγνητικό πεδίο δρομέα, ώστε να επιτυγχάνεται βέλτιστη αξιοποίηση των πεδίων. Χρησιμοποιώντας την τεχνική αυτή, τα συστήματα ελέγχου της μηχανής μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τις απώλειες του τυλίγματος, που συνεισφέρουν σημαντικά στις συνολικές απώλειες της μηχανής, βελτιώνοντας την συνολική της απόδοση.

Έτσι, για δεδομένη γεωμετρία και ονομαστικό ρεύμα κρατώντας σταθερό τον δρομέα, περιστρέφουμε μόνο τα ρεύματα του στάτη ώστε να βρεθεί η εσωτερική γωνία για την οποία μεγιστοποιείται η παραγόμενη ροπή. Για εξοικονόμηση χρόνου, η αναζήτηση της εσωτερικής γωνίας  $\delta$  για την μέγιστη ροπή, ξεκινάει από τις 80 μοίρες και με βήμα 0.5 μοίρες φτάνει ως τις 110 μοίρες.

#### 4.7.2.4 Προσομοίωση μιας σύγχρονης ηλεκτρικής περιστροφής

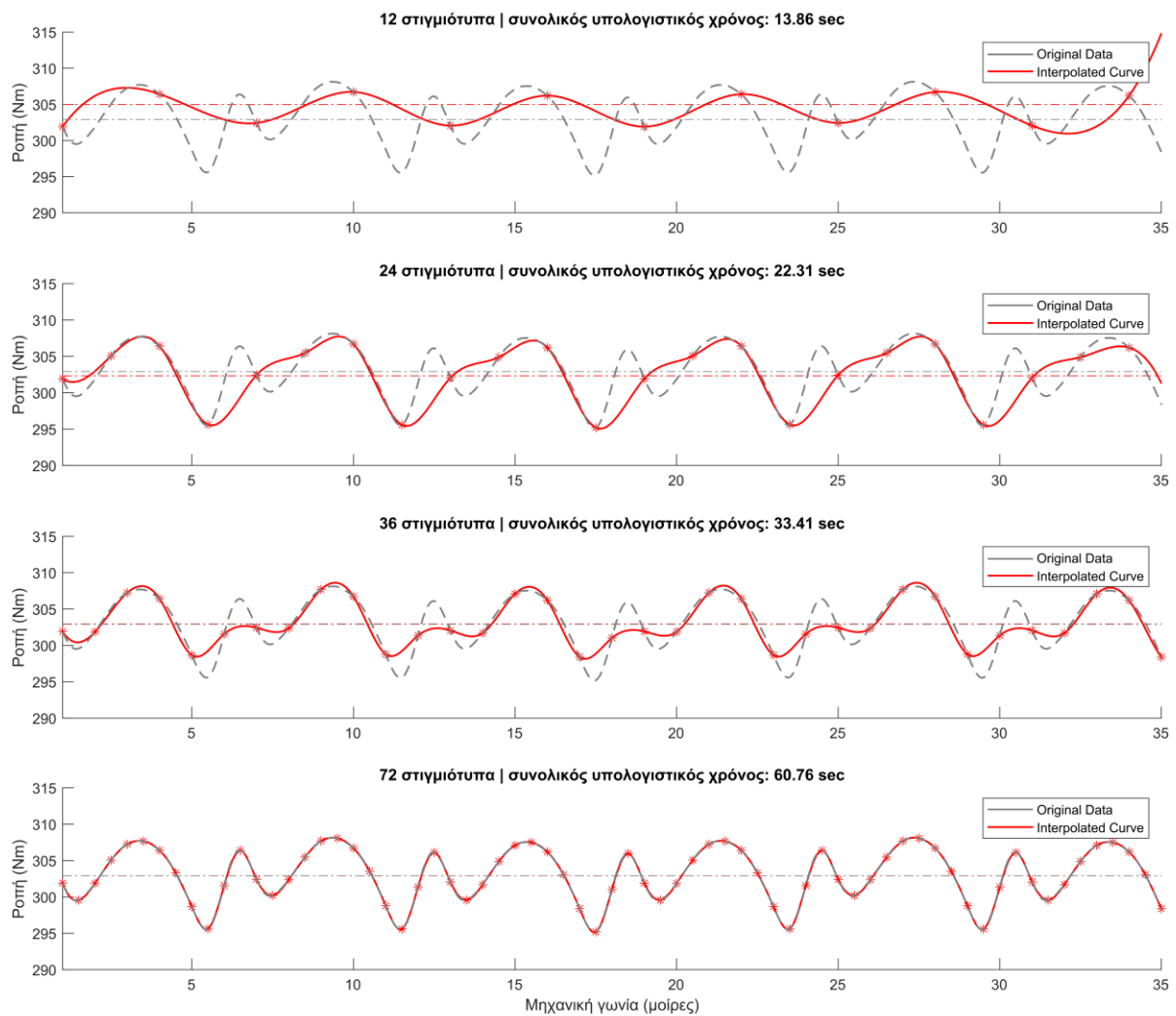
Η προσομοίωση σε ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας μέσω του λογισμικού FEMM, απαιτεί την εκτέλεση πολλαπλών μαγνητοστατικών αναλύσεων. Κατά τη διάρκεια αυτών των αναλύσεων, ο δρομέας περιστρέφεται σύγχρονα με τα ρεύματα του στάτη (με την εσωτερική γωνία  $\delta$  που υπολογίστηκε παραπάνω) για δύο πολικά βήματα, πραγματοποιώντας μια πλήρη ηλεκτρική περίοδο.

Τα φαινόμενα που διαδραματίζονται στο διάκενο κατά την ηλεκτρική περιστροφή, δεν έχουν καθ' όλη την περιστροφή την ίδια συμπεριφορά. Οι οδοντώσεις του στάτη προκαλούν αρμονικές χώρου, οι οποίες έχουν επίδραση σε όλα τα μεγέθη που μελετούμε. Αυτό φέρνει την ανάγκη για πολλά στιγμιότυπα. Η επιλογή του κατάλληλου χρονικού βήματος μεταξύ διαδοχικών στιγμιότυπων είναι σημαντική. Αν επιλέξουμε ένα πολύ μικρό βήμα, θα έχουμε ακριβέστερα αποτελέσματα, αλλά θα χρειαστεί να εκτελέσουμε περισσότερους υπολογισμούς. Επομένως, πρέπει να βρούμε μια ισορροπία μεταξύ της ακρίβειας και της απόδοσης των υπολογισμών μας, επιλέγοντας έναν επαρκώς μικρό αριθμό δειγμάτων της χρονικής ακολουθίας.

Στην συνέχεια από τις διακριτές τιμές, προσεγγίζουμε την συνεχή γραφική παράσταση με spline interpolation. Μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την παραγωγή μιας ομαλής και συνεχούς καμπύλης, που περνά από ένα σύνολο δεδομένων σημείων. Η αρμονική φύση του μαγνητικού πεδίου και των υπόλοιπων ποσοτήτων σε μια ηλεκτρική μηχανή καθιστά την Spline ακριβή και αξιόπιστη μέθοδο παρεμβολής, καθώς λαμβάνει υπόψη την παρουσία των ημιτόνων.

Για να επιλέξουμε το κατάλληλο βήμα, χρησιμοποιούμε το θεώρημα δειγματοληψίας του Shannon-Nyquist. Αυτό το θεώρημα λέει ότι, για να αποτυπώσουμε ένα σήμα και το φάσμα του με αξιόπιστο τρόπο, πρέπει να έχουμε έναν αριθμό δειγμάτων που είναι τουλάχιστον διπλάσιος από την υψηλότερη συχνότητα του σήματος. Έτσι, αν θέλουμε να μελετήσουμε την επίδραση των αρμονικών συνιστωσών μέσω της ανάλυσης Fourier, πρέπει να έχουμε ένα ελάχιστο αριθμό δειγμάτων της χρονικής ακολουθίας, ώστε τα αποτελέσματα να είναι αξιόπιστα. [28] Μελετώντας την επίδραση του αριθμού στιγμιότυπων, στο παρακάτω διάγραμμα η σύγχρονη περιστροφή κατά 2 ζεύγη πόλων χωρίζεται σε 12, 24, 36 και 72 στιγμιότυπα, με σκοπό να καθοριστεί κάθε φορά το σφάλμα.

Η επιλογή του αριθμού των στιγμιότυπων δεν χωρίζεται τυχαία σε αυτές τις επιλογές, αφού η ροπή έχει αρμονικό περιεχόμενο με τάξεις αρμονικών τις 6, 12, 18, 24, 36 κλπ.



**Σχήμα 4.10:** Ανάλυση ευαισθησίας του αριθμού των στιγμιότυπων που χωρίζεται η σύγχρονη ηλεκτρική περιστροφή

#### 4.7.2.5 Υπολογισμός Μάζας

Το λογισμικό μπορεί να υπολογίσει με ακρίβεια τον όγκο των υλικών που χρησιμοποιούνται στη μηχανή. Με βάση τον όγκο και την πυκνότητα κάθε υλικού, μπορούμε να υπολογίσουμε τη συνολική μάζα της μηχανής. Ειδικά για τον χαλκό, πρέπει να γίνει ένας ειδικός υπολογισμός, βασισμένος στο συνολικό μήκος του και την διατομή των αγωγών. Η πυκνότητα κάθε υλικού παραμένει η ίδια με την αρχική σχεδίαση, προκειμένου να αναδειχθεί η επίδραση των αλλαγών στο μαγνητικό κύκλωμα και τον στάτη.

**Πίνακας 4.4:** Υλικό κατασκευής και πυκνότητα για κάθε δομικό στοιχείο του ενεργού μέρους

Στοιχείο	Υλικό	Πυκνότητα [ $\frac{kg}{m^3}$ ]
Σώμα στάτη	Σίδηρος	7870
Σώμα δρομέα	Σίδηρος	7870
Τύλιγμα	Χαλκός	8930
Μαγνήτης	NdFeB	7650

Η μάζα υπολογίζεται ξεχωριστά για το κάθε υλικό ως εξής:

$$m = \rho \cdot V \quad (4.9)$$

Επίσης, μπορεί να υπολογιστεί και η ροπή αδράνειας του δρομέα. Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού μιας μηχανής, χρησιμοποιούμε μια υπόθεση για τη ροπή αδράνειας του δρομέα. Είναι σημαντικό να διεξαχθούν επιβεβαιώσεις για να διασφαλίσουμε ότι η ροπή αδράνειας  $J$ , της υλοποιημένης μηχανής ανταποκρίνεται στις αρχικές μας υποθέσεις. Αυτό εξασφαλίζει ότι η μηχανή θα λειτουργεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές και τις ανάγκες της εφαρμογής.

$$J = 0.5 \cdot \pi \cdot \rho \cdot L \cdot (R_{out}^4 - R_{in}^4) \quad (4.10)$$

Όπου,  $\rho$  η πυκνότητα του υλικού του δρομέα

$L$  το ενεργό μήκος του δρομέα

$R_{out}$  η εξωτερική ακτίνα του δρομέα

$R_{in}$  η εσωτερική ακτίνα του δρομέα

#### 4.7.2.6 Μέτρηση ροπής

Όπως είδαμε παραπάνω στο διάκενο γίνεται χρήση της μεθόδου “Sliding Band”. Για τον υπολογισμό της ροπής, το FEMM χρησιμοποιεί μια παραλλαγή του τανυστή Maxwell. Αρχικά ο υπολογισμός ροπής μέσω του τανυστή Maxwell:

$$T_{em} = \frac{r \cdot L}{\mu_0} \oint \vec{B}_r \vec{B}_\theta \, dl \quad (4.11)$$

Όπου,  $\vec{B}_r$  η ακτινική συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής

$\vec{B}_\theta$  η εφαπτομενική συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής

$r$  η ακτίνα διακένου

$L$  το ενεργό μήκος της μηχανής (Η ροπή υπολογίζεται ανα λαμαρίνα του κινητήρα και πολλαπλασιάζεται με τις στρώσεις τους για να βρεθεί η συνολική)

Στην παρούσα υλοποίηση, το πρόγραμμα υπολογίζει την πυκνότητα ροής στο κόμβο κάθε στοιχείου του Sliding band. Ωστόσο, το FEMM δεν υπολογίζει τη ροπή απευθείας από τις τιμές των κόμβων. Αντ' αυτού, υπολογίζει τον διακριτό μετασχηματισμό Fourier (DFT) των  $B_r$  και  $B_\theta$  και αποθηκεύει τους συντελεστές του μετασχηματισμού.

Η δύναμη και η ροπή υπολογίζονται στη συνέχεια από το πρόγραμμα μέσω του τανυστή τάσεων του Maxwell κατά μήκος της κεντρικής γραμμής των στοιχείων της ζώνης, αθροίζοντας τις συνεισφορές από κάθε αρμονική. Για παράδειγμα, εάν τα  $b_r(i)$  και  $b_\theta(i)$  αντιπροσωπεύουν τους μιγαδικούς συντελεστές DFT για την  $i$ -οστή αρμονική, η ροπή είναι [27],[29]:

$$T_{em} = \frac{\gamma \cdot L}{4\mu_0} \sum_{i=0}^n b_r(i)\bar{b}_\theta(i) + \bar{b}_r(i)b_\theta(i) \quad (4.12)$$

Η κυμάτωση ροπής εκφράζεται σε ποσοστό (%) ως:

$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{mean}} \quad (4.13)$$

#### 4.7.2.7 Μέτρηση πεπλεγμένης ροής στα τυλίγματα

Σε κάθε στιγμιότυπο μέσω του Femm επιλέγονται οι αύλακες που φέρουν την φάση A και μετράται το διανυσματικό δυναμικό στο εσωτερικό τους. Το ίδιο επαναλαμβάνεται για την φάση -A. Από την κάτωθι σχέση μπορεί να υπολογιστεί η συνολική ροή που εμπλέκεται από την φάση A. Έτσι, καταφέρνουμε να έχουμε την πεπλεγμένη ροή  $\Psi$  που ρέει μέσα από το κάθε τυλίγμα επανάλαμβάνοντας την διαδικασία και για τις άλλες δύο φάσεις.

$$\Lambda_{phA} = \frac{\frac{poles}{2} \cdot N_{slot} \cdot L \cdot (A_{phA} - A_{ph-A})}{S_{slot}} \quad (4.14)$$

Όπου,  $\frac{poles}{2}$  αφού τα τυλίγματα είναι συνδεδεμένα σε σειρά,

$N_{slot}$  ο αριθμός των σπειρών

$L$  το ενεργό μέρος του κινητήρα

$A_{phA}$  το διανυσματικό δυναμικό της φάσης A

$S_{slot}$  το εμβαδό της αύλακος

Στην συνέχεια εφαρμόζω μετασχηματισμό Fourier στον πίνακα-σειρά του σήματος FluxLinkage\_A που έχω δημιουργήσει και αναλύω το φάσμα των αρμονικών του.

#### 4.7.2.8 Μέτρηση επαγόμενης τάσης

Εφόσον έχουν υπολογιστεί οι διακριτές τιμές της πεπλεγμένης ροής, γνωρίζοντας την ταχύτητα του κινητήρα, η επαγόμενη τάση μπορεί να υπολογιστεί με το νόμο του Faraday.

$$E = - \frac{d\Lambda}{dt} \xrightarrow{\text{Fourier}} E(\omega) = j\omega\Lambda(\omega) \quad (4.15)$$

Για να υπάρξει μεγαλύτερη ακρίβεια στην επίλυση ο παραπάνω τύπος εφαρμόζεται σε κάθε αρμονική της πεπλεγμένης ροής.

Συνοπτικά, η διαδικασία είναι η εξής:

1. Ανάλυση κατά Fourier της μαγνητικής ροής ( $\Lambda$ ) για να υπολογίσουμε τις αρμονικές συνιστώσες της.
2. Πολλαπλασιασμός κάθε αρμονικής συνιστώσας με τη γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  για να υπολογίσουμε την αναλυμένη κατά Fourier τάση.
3. Εφαρμογή αντίστροφου Fourier μετασχηματισμού για να αποκτήσουμε την τάση στο πεδίο του χρόνου.

Με την εφαρμογή αυτής της διαδικασίας, μπορούμε να υπολογίσουμε την επαγόμενη τάση  $E_a$  από την αναλυμένη κατά Fourier μαγνητική ροή (flux). Στην συνέχεια καταγράφεται το THD (Total Harmonic Distortion) ώστε να αξιολογηθεί ο βαθμός παραμόρφωσης που προκαλούν οι αρμονικές συνιστώσες της τάσης:

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=3,5,7,\dots} V_n^2}{V_1^2}} \quad (4.16)$$

#### 4.7.2.8 Μέτρηση απωλειών

- **Απώλειες πυρήνα**

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την εκτίμηση των απωλειών πυρήνα. Μια μέθοδος είναι η ενσωμάτωση ενός μοντέλου των μηχανισμών απωλειών πυρήνα στη καμπύλη B-H. Το παραπάνω μοντέλο χρησιμοποιείται στο χρονομεταβλητό πρόβλημα, έτσι ώστε οι επιπτώσεις των απωλειών πυρήνα να είναι άμεσα ορατές, ως διαταραχές της τάσης και του ρεύματος στους ακροδέκτες της μηχανής. Δυστυχώς όμως, η δημιουργία αυτού του μοντέλου είναι αρκετά περίπλοκη και χρονοβόρα. Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι η εκτίμηση των απωλειών πυρήνα στο στάδιο της μετα-επεξεργασίας. Η σειρά των μαγνητοστατικών αναλύσεων γίνεται, αγνοώντας τους μηχανισμούς απωλειών στον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου. Η προσέγγιση αυτή είναι ακριβής, επειδή ο πυρήνας είναι πολυστρωματικός και οι απώλειες του πυρήνα έχουν μικρή επίδραση στην κατανομή του πεδίου. Στην συνέχεια από την μεταβολή του μαγνητικού πεδίου καταλήγουμε στις απώλειες, με τον τρόπο που θα αναφερθεί αναλυτικά στην συνέχεια.

Η συνάρτηση που υπολογίζει τις απώλειες, εκτελεί μια σύγχρονη περιστροφή και σε κάθε διαδοχική εκτέλεση συλλέγει τα απαιτούμενα δεδομένα για τα μαγνητικά πεδία στον δρομέα, τον στάτη, τους μαγνήτες και τα πηνία. [33]

Οι εντολές `mo_numnodes`, `mo_numelements`, `mo_getnode` και `mo_getelement` που προστέθηκαν στην έκδοση 15Jul2009 του FEMM [30], παρέχουν πρόσβαση σε κάθε στοιχείο του πλέγματος, δημιουργώντας ουσιαστικά ένα ιστορικό της πυκνότητας ροής, σε σχέση με το χρόνο για κάθε στοιχείο του πλέγματος.

Για να αναλυθεί η κατανομή των απωλειών στη μηχανή, διακρίνουμε τα διάφορα τμήματα της σε πέντε βασικές ομάδες. Στη συνέχεια, σε κάθε ομάδα αντιστοιχίζεται ένα συγκεκριμένο μοντέλο απωλειών, με το οποίο γίνονται οι υπολογισμοί. Πιο αναλυτικά:



**Πίνακας 4.7:** Μοντέλο απωλειών ανά δομικό στοιχείο κινητήρα

Ομάδα	Απώλειες προς μελέτη
Αέρας	-
Πυρήνας στάτη	Απώλειες πυρήνα
Τυλίγματα	Απώλειες γειτνίασης & Απώλειες Χαλκού
Πυρήνας δρομέα	Απώλειες πυρήνα
Μόνιμοι μαγνήτες	Απώλειες μαγνητών

Αρχικά, οι απώλειες πυρήνα όπως αναφέρθηκε και στην θεωρία χωρίζονται σε:

- απώλειες υστέρησης, οι οποίες μεταβάλλονται γραμμικά με τη συχνότητα, και
- απώλειες δινορευμάτων, οι οποίες μεταβάλλονται με το τετράγωνο της συχνότητας

Λόγω ύπαρξης αρμονικών η σχέση θα εφαρμοστεί σε κάθε αρμονική και τα αποτελέσματα θα αθροιστούν για να προκύψει μια προσέγγιση των συνολικών απωλειών πυρήνα, ως εξής:

$$P_{\text{core}} = P_{\text{hysteresis}} + P_{\text{eddy}} = \sum_{i=1}^{\text{μέγιστη τάξη αρμονικών}} (C_h \omega_i B_i^2 + C_e \omega_i^2 B_i^2) \quad (4.17)$$

Όπου,  $P_{\text{hysteresis}}$  οι απώλειες υστέρησης

$P_{\text{eddy}}$  οι απώλειες δινορευμάτων

$B_i$  το πλάτος του μαγνητικού πεδίου (δηλαδή η τιμή κορυφής) της  $i$ -οστής χρονικής αρμονικής της βασικής συχνότητας  $\omega$

$C_h$  και  $C_e$  οι συντελεστές απωλειών υστέρησης και δινορευμάτων που προκύπτουν από τα δεδομένα απωλειών πυρήνα της λαμαρίνας του κατασκευαστή.

Για την λαμαρίνα όπου επιλέχθηκε M250-50A (πάχους 0.5mm) μια προσεγγιστική των συντελεστών για συχνότητες κοντά στα 50Hz είναι:

$$C_h = 143 \frac{\text{Watt}}{\text{m}^3 \cdot \text{Tesla}^2 \cdot \text{Hz}} \quad (4.18)$$

$$C_e = 0.530 \frac{\text{Watt}}{\text{m}^3 \cdot \text{Tesla}^2 \cdot \text{Hz}^2} \quad (4.19)$$

#### • Απώλειες χαλκού

Η αύλακα περιέχει τα τυλίγματα του αγωγού. Πιο συγκεκριμένα λαμβάνοντας υπόψιν τα ελίγματα ανα αύλακα  $N_{\text{slot}}$ , το συντελεστή πληρότητας αύλακος fillfactor και το εμβαδόν της αύλακος μπορούμε να υπολογίσουμε την διατομή του αγωγού  $d$  που θα χρησιμοποιηθεί με την σχέση:

$$d = \frac{A_{\text{slot}} \cdot \text{fillfactor}}{N_{\text{slot}}} \quad (4.20)$$

Στη συνέχεια για να γίνει υπολογισμός των απωλειών χρειάζεται να βρεθεί το μήκος του αγωγού ώστε να βρεθεί η συνολική του ωμική αντίσταση.

Για το ενεργό μήκος της φάσης έχουμε:

$$L = \frac{P}{2} \cdot N_{\text{slot}} \cdot q \cdot 2 \cdot l \quad (4.21)$$

Όπου, P ο αριθμός των πόλων

$N_{\text{slot}}$  τα ενεργά εν σειρά ελίγματα ανά αύλακα

Q οι αύλακες ανά πόλο και φάση

l το συνολικό μήκος του αγωγού για να διαπεράσει το ενεργό μήκος της μηχανής μαζί με το μήκος που απαιτείται για την επιστροφή του αγωγού στην επόμενη αύλακα

Η αντίσταση φάσης στους 20°C υπολογίζεται:

$$R_{\text{phase } 20^{\circ}\text{C}} = \frac{L_{\text{phase}}}{d \cdot \gamma_{\text{Cu } 20^{\circ}\text{C}}} \quad (4.22)$$

Όπου,  $\gamma$  η ειδική αγωγιμότητα του χαλκού στους 20°C (=  $58 \cdot 10^6$  S/m)

d η διατομή του αγωγού σε  $\text{m}^2$

l το μήκος του τυλίγματος της φάσης σε m

Η αντίσταση φάσης στους 60°C υπολογίζεται:

$$R_{\text{phase } 60^{\circ}\text{C}} = R_{\text{phase } 20^{\circ}\text{C}} \cdot (1 + \alpha(60 - 20)) \quad (4.23)$$

με  $\alpha=0.004/^{\circ}\text{C}$

Η ενεργός τιμή του φασικού ρεύματος υπολογίζεται ως:

$$I_{\text{phase,rms}} = \frac{J_{\text{slot,rms}} \cdot A_{\text{slot}}}{N_{\text{slot}}} \quad (4.24)$$

Επομένως και για τις 3 φάσεις οι απώλειες χαλκού προκύπτουν ως εξής:

$$P_{\text{Cu}} = 3 \cdot I_{\text{phase,rms}}^2 \cdot R_{\text{phase } 60} \quad (4.25)$$

- **Απώλειες γειτνίασης**

Για ορισμένες μηχανές, οι απώλειες από το φαινόμενο της γειτνίασης μπορεί να αυξήσουν σημαντικά τις απώλειες χαλκού. Σε προβλήματα εναλλασσόμενου ρεύματος, μια περιοχή με καλώδια μπορεί να αντικατασταθεί από μια ομογενοποιημένη περιοχή με διαπερατότητα μιγαδικής τιμής. Το φανταστικό μέρος της διαπερατότητας σχετίζεται με τις απώλειες. Στην περίπτωση χαμηλής συχνότητας, οι απώλειες γειτνίασης ανά μονάδα όγκου,  $P_{prox}$  είναι:

$$P_{proximity} = C_{prox} \omega^2 B^2 \quad (4.26)$$

$$Me \quad C_{prox} = fillfactor \cdot \frac{\pi^2}{8} \sigma_{wire} d_{wire}^2 \quad (4.27)$$

Όπου,  $\sigma_{wire}$  η ηλεκτρική αγωγιμότητα

$d_{wire}$  η διάμετρος των καλωδίων του αγωγού

Η μορφή της είναι παρόμοια με τις απώλειες δινορευμάτων σε ελάσματα. Χρησιμοποιώντας αυτό το μοντέλο, οι απώλειες στις τυλιγμένες περιοχές μπορούν να αθροιστούν για όλες τις αρμονικές με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως οι απώλειες πυρήνα, χρησιμοποιώντας απλώς διαφορετικές τιμές για τους συντελεστές απωλειών πυρήνα (δηλαδή  $C_e = C_{prox}$ ,  $C_h = 0$ ).

- **Απώλειες Μαγνήτη**

Τα δινορεύματα δεν εμφανίζονται μόνο στο σώμα του πυρήνα, αλλά και στους μαγνήτες λόγω της υψηλής τους αγωγιμότητας. Να σημειωθεί ότι κατά την ανάλυση, δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των δινορευμάτων στο αρχικό πεδίο του μαγνήτη.

Η πυκνότητα ρεύματος  $J_m$  των δινορευμάτων στη διατομή του μαγνήτη είναι:

$$J_m = -\sigma_m \frac{dA}{dt} + J_c \quad (4.28)$$

Όπου,  $\sigma_m$  είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού του μόνιμου μαγνήτη

$A$  το διανυσματικό δυναμικό του μαγνητικού πεδίου

$J_c$  είναι μια τιμή πυκνότητας ρεύματος που επιλέγεται, ώστε το συνολικό ρεύμα στη διατομή κάθε μαγνήτη να είναι ίσο με μηδέν

Εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Fourier στο διανυσματικό δυναμικό  $A$  λαμβάνεται η σχέση:

$$J_m = -\sigma_m j \omega A + J_c \quad (4.29)$$

Ο υπολογισμός της ρευματικής πυκνότητας των δινορευμάτων στο σώμα των μαγνητών γίνεται σε κάθε στοιχειώδη όγκο της γεωμετρίας των μαγνητών (το σύνολο των στοιχειωδών όγκων μαγνήτη  $\Delta V_{mag}$  ορίζεται με την μεταβλητή  $n$ ). Λαμβάνονται και πάλι υπ' όψη, όπως και με τις απώλειες πυρήνα, οι αρμονικές συνιστώσες του διανυσματικού δυναμικού  $A$ , το οποίο προκύπτει σε κάθε στοιχειώδη όγκο κατά την διάρκεια μιας σύγχρονης ηλεκτρικής περιστροφής.

Τέλος, βάση των πυκνοτήτων ρεύματος πάνω στο σώμα των μαγνητών υπολογίζονται οι συνολικές απώλειες στους μαγνήτες ως άθροισμα όλων των αρμονικών συνιστωσών του διανυσματικού δυναμικού  $A$ , σε κάθε στοιχειώδη όγκο της γεωμετρίας των μαγνητών:

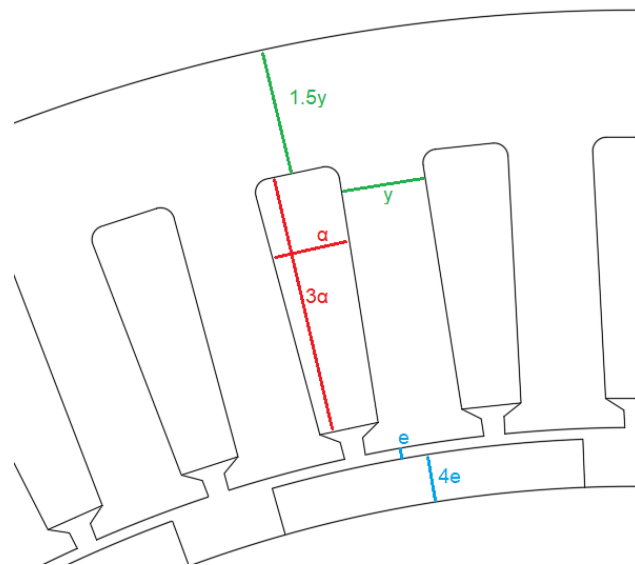
$$P_{\text{mag}} = \frac{1}{2} \sigma_{\text{mag}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\text{μέγ.τάξη αρμονικών}} [\Delta V_{\text{mag},i} \cdot (2\pi\omega_j)^2 \cdot |J_{m,j}|^2] \quad (4.30)$$

## ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ - ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

### 5.1 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΠΡΩΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Στο Κεφάλαιο 5, υλοποιείται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επίσης, στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσεται και εφαρμόζεται μια διαδικασία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης της γεωμετρίας του δρομέα.

Ξεκινώντας, κατασκευάζεται ο στάτης για 20πολική μηχανή λαμβάνοντας κάποιες αρχικές αποφάσεις για τις παραμέτρους με βάση τα αποτελέσματα της προκαταρκτικής σχεδίασης (Κεφάλαιο 3) και τους ακόλουθους εμπειρικούς κανόνες σχεδίασης.

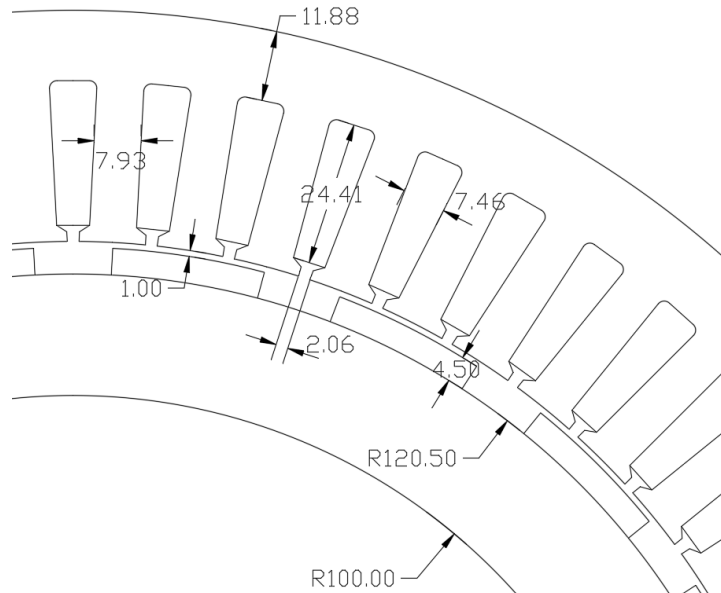


Σχήμα 5.1: Εμπειρικοί κανόνες σχεδίασης κινητήρα

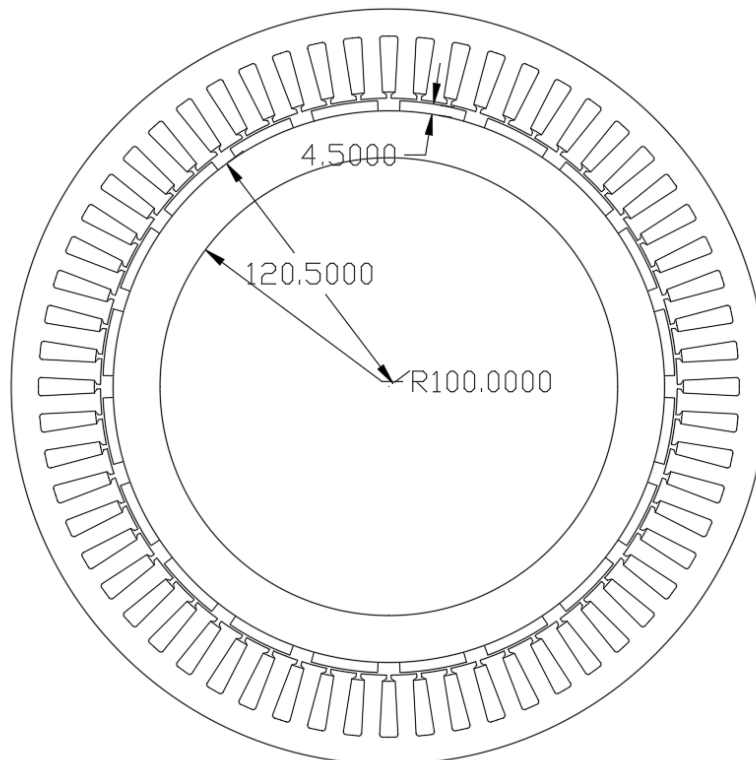
Οι εμπειρικοί κανόνες σχεδίασης παρατίθενται παρακάτω:

- Πάχος μαγνήτη 4 φορές το μήκος διακένου
- Ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πελμάτων στα δόντια, 3 φορές το μήκος διακένου (ώστε να αποφεύγεται η σκέδαση μεταξύ δοντιών)
- Πλάτος μαγνήτη το 70% του πολικού βήματος
- Μήκος αύλακος το τριπλάσιο από το πλάτος της
- Μήκος yoke 1.5 φορά το μήκος του ενός δοντιού (εφόσον  $spp=1$ )

Κατά την προκαταρκτική σχεδίαση το διάκενο ορίστηκε στο 1mm και από τους υπολογισμούς προέκυψαν το ενεργό μήκος του κινητήρα  $L=20\text{cm}$  και η διάμετρος του διακένου  $D=25\text{cm}$ . Ως αποτέλεσμα κατασκευάζεται ο πρώτος κινητήρας με δρομέα επιφανειακού μαγνήτη με τα χαρακτηριστικά του πίνακα 5.2. Πρωταρχικός στόχος του σχεδιασμού και της αξιολόγησης της πρώτης μηχανής είναι η επιβεβαίωση των υπολογισμών της προκαταρκτικής σχεδίασης, ώστε να τεθούν οι σωστές βάσεις για την επιτυχημένη βελτιστοποίηση.



Σχήμα 5.2: Αναλυτικές διαστάσεις πρώτης μηχανής



Σχήμα 5.3: Τομή πρώτης μηχανής

Στην συνέχεια δίνονται όλες οι μεταβλητές της πρώτης μηχανής επιφανειακών μαγνητών που δόθηκαν ως είσοδοι στο πρόγραμμα σχεδίασης.

**Πίνακας 5.1:** Βασικές Παράμετροι

Μέγεθος	Τιμή
Πόλοι	20
Φάσεις	3
Μήκος διακένου	1 mm
Συνολικό ενεργό μήκος μηχανής	20 cm
Πάχος λαμαρίνας	0.5 mm
Πυκνότητα ρεύματος	4 A/mm <sup>2</sup>

**Πίνακας 5.2:** Παράμετροι στάτη

Μέγεθος	Τιμή
Αύλακες ανά πόλο και φάση	1
Εξωτερική διάμετρος στάτη	33 cm
Yoke2Tooth	1.5
Tooth2Slot	60
Shoe2Slot	85
Tips2Tooth	10
Tips2Tips	60

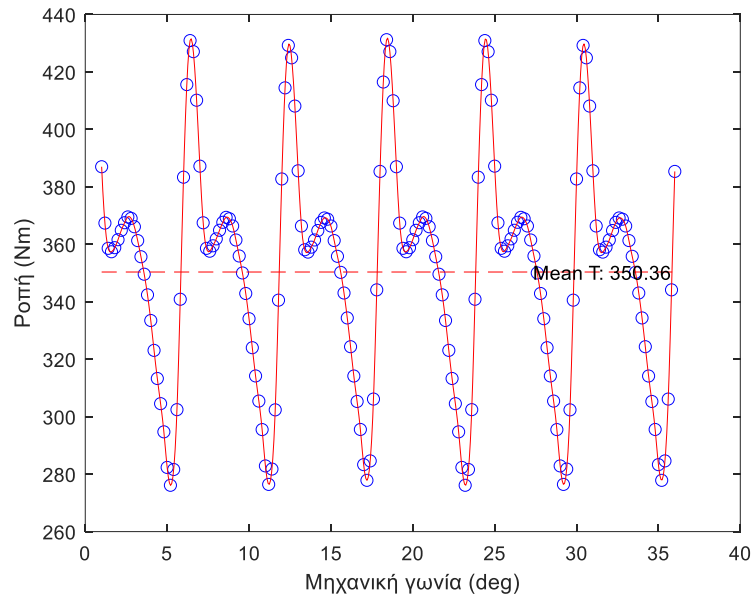
**Πίνακας 5.3:** Παράμετροι τυλίγματος

Συμβολισμός	Τιμή
Ελίγματα ανα αύλακα	36
Συντελεστής πληρότητας αύλακος	0.45

**Πίνακας 5.4:** Παράμετροι δρομέα

Συμβολισμός	Τιμή
Τύπος Δρομέα	Με επιφανειακούς (τραπεζοειδείς) μαγνήτες
Εξωτερική διάμετρος δρομέα	25 cm
Εσωτερική διάμετρος δρομέα	20 cm
Πάχος μαγνήτη	4.5mm
Πλάτος μαγνήτη προς το πολικό βήμα	70%

Έπειτα από την σχεδίαση της μηχανής στο FEMM, πραγματοποιείται προσομοίωση μιας σύγχρονης ηλεκτρικής περιστροφής και εξάγονται τα αποτελέσματα επίδοσης. Σε αυτό το στάδιο, κρίνεται σκόπιμο να επικεντρωθεί η προσοχή στο βασικό μέγεθος της παραγόμενης ροπής εξόδου αποφεύγοντας περαιτέρω εμβάθυνση σε άλλα χαρακτηριστικά επίδοσης, αφού η αρχική σχεδίαση που δεν υποβλήθηκε σε εκτεταμένη ανάλυση. Η εξέταση του διαγράμματος ροπής (σχήμα 5.4) επιβεβαιώνει τους υπολογισμούς της προκαταρκτικής ανάλυσης ως προς την μέση ροπή αλλά παρατηρείται σημαντική κυμάτωση στην ροπή, το οποίο χρήζει περαιτέρω εξέτασης.

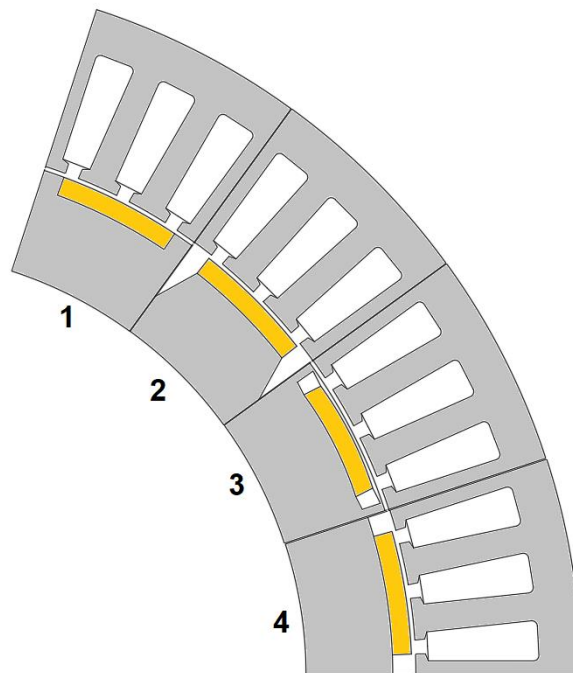


**Σχήμα 5.4:** Κυματομορφή ροπής συναρτήσει μηχανικής γωνίας δρομέα κατά την σύγχρονη περιστροφή

## 5.2 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΔΡΟΜΕΑ

Εστιάζοντας στον δρομέα, προτείνονται τέσσερις διαφορετικές τοπολογίες, βασισμένες στην τοποθέτηση και τη γεωμετρία του μαγνήτη. Για την αμερόληπτη σύγκριση των τοπολογιών σχεδιάζονται κινητήρες με κοινό χαρακτηριστικό το μέγεθος και το σχήμα του μαγνήτη καθώς και το ενεργό μήκος ίσο με 20 cm. Αναλυτικά οι τέσσερις τοπολογίες:

1. Δρομέας με ένθετο μαγνήτη
2. Δρομέας με επιφανειακό μαγνήτη σε έκτυπο δρομέα
3. Δρομέας με εσωτερικό μαγνήτη
4. Δρομέας με επιφανειακό μαγνήτη



**Σχήμα 5.5:** Εναλλακτικές διαμορφώσεις δρομέα

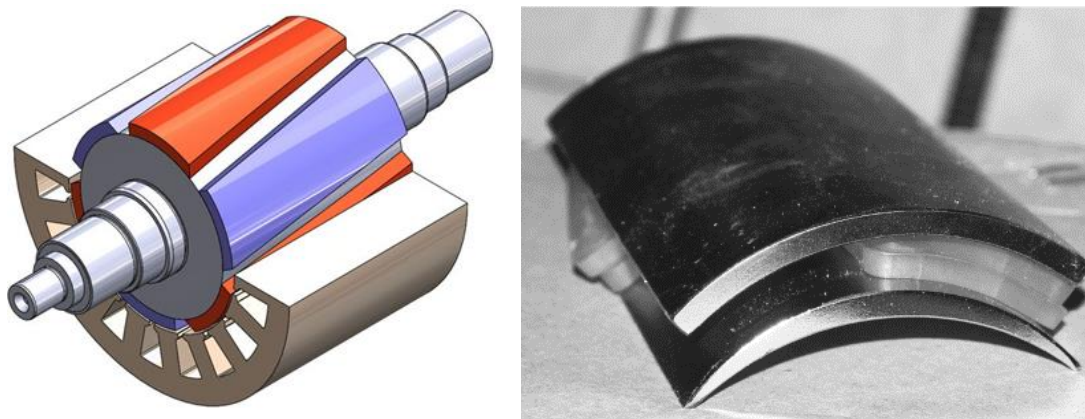


**Πίνακας 5.5:** Συγκεντρωτική αξιολόγηση των κινητήρων με διαφορετικούς δρομείς

#	Τύπος δρομέα	Μέση Ροπή [Nm]	Κυμάτωση Ροπής [%]	THD [%]	Μάζα [kg]	Απόδοση [%]
1	Ένθετου μαγνήτη	344.62	28.06	30.95	37.65	81.5
2	Έκτυπου μαγνήτη	348.11	24.55	18.89	34.18	81.5
3	Εσωτερικού μαγνήτη	329.17	15.01	22.65	36.91	78.7
4	Επιφανειακού μαγνήτη	348.18	25.41	19.13	36.03	84.6

Παρατηρούνται πολύ υψηλά ποσοστά κυμάτωσης ροπής, χαρακτηριστικό το οποίο προκαλεί διακυμάνσεις στη ροπή και στην ταχύτητα, καθώς επίσης ακουστικό θόρυβο και δόνηση, ιδιαίτερα σε εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας και απευθείας κίνησης, όπως την συγκεκριμένη.

Για αυτό, προκύπτει η ανάγκη για εφαρμογή κάποιας τεχνικής που θα περιορίζει την ταλάντωση στην ροπή. Μια τεχνική είναι η διαμόρφωση του δρομέα με κλίση (skew) που όμως απαιτεί πολυπλοκότητα στην κατασκευή. Μια άλλη τεχνική είναι να προσαρμόσουμε το σχήμα του μαγνήτη από τραπεζοειδές σε ημιτονοειδές σχήμα.



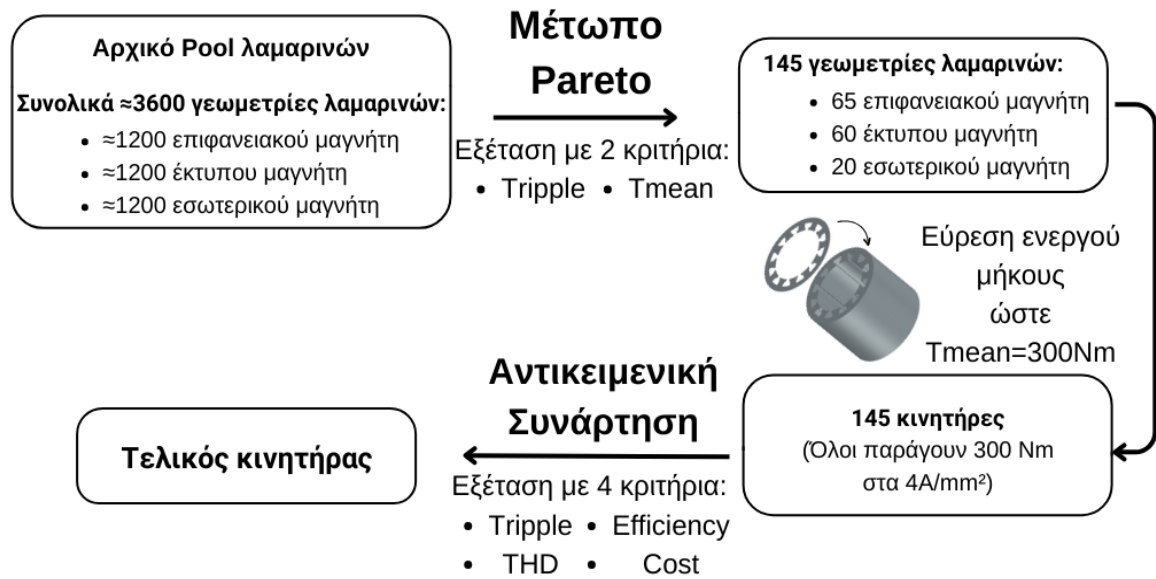
**Σχήμα 5.6:** Τεχνικές περιορισμού κυμάτωσης ροπής: 1. Κλίση κατά μήκος του δρομέα (skew)(αριστερά), 2. Χρήση ημιτονοειδούς σχήματος μαγνήτη (δεξιά) [31][32]

### 5.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης αναπτύσσεται με επίκεντρο τον δρομέα, περιλαμβάνοντας δύο στάδια. Αρχικά, δημιουργείται ένα σύνολο από ποικιλόμορφες γεωμετρίες διαφόρων λαμαρινών δρομέων, οι οποίες αξιολογούνται ανά λαμαρίνα μέσω του μετώπου Pareto. Αυτή η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση ενσωματώνει δύο βασικές παραμέτρους για την αξιολόγηση: την κυμάτωση της ροπής και τη μέση ροπή. Το επιλεγμένο σύνολο γεωμετριών εξετάζεται σε σχέση μόνο με αυτές τις δύο μεταβλητές, καθώς αποτελούν τα πλέον κρίσιμα στοιχεία, τα οποία υπολογίζονται γρήγορα και δεν εξαρτώνται από το ενεργό μήκος του κινητήρα.

Στην επόμενη φάση, από το σύνολο των Pareto-βέλτιστων γεωμετριών λαμαρινών που επιτεύχθηκαν, οι λαμαρίνες διαμορφώνουν κινητήρες με διαφορετικό μήκος σε κάθε περίπτωση, ώστε όλοι οι κινητήρες να παράγουν 300Nm στην ονομαστική τους λειτουργία ( $4A/mm^2$ ). Σε αυτή την ομάδα κινητήρων, εφαρμόζεται πλέον η αντικειμενική συνάρτηση

βελτιστοποίησης. Αυτή η διαδικασία είναι πιο χρονοβόρα, καθώς προϋποθέτει την εξέταση περισσότερων παραμέτρων, πέραν της κυμάτωσης ροπής.



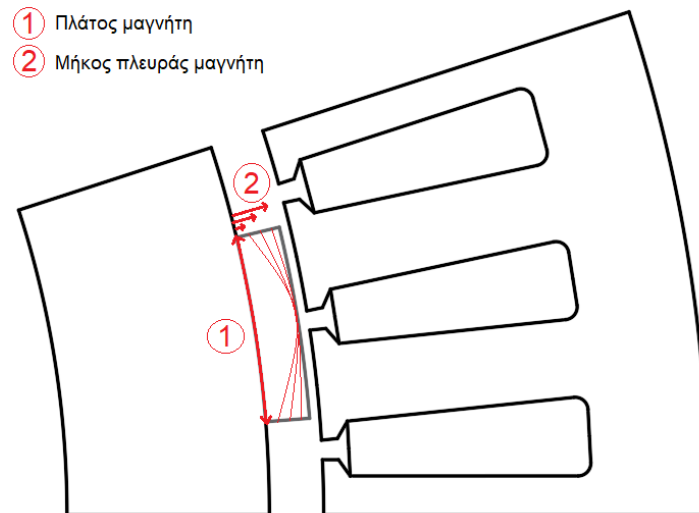
**Σχήμα 5.7:** Σχηματική αναπαράσταση πλήρους διαδικασίας βελτιστοποίησης που θα εφαρμοστεί

#### 5.4 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η βαρύτητα της διερεύνησης επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση του δρομέα μέσω του σχήματος του μαγνήτη. Για την διαδικασία αυτή καθορίζονται δύο βασικές μεταβλητές:

- (1) το πλάτος του μαγνήτη σε σχέση με το πολικό βήμα, εκφραζόμενο ως ποσοστό (%), και
- (2) την καμπυλότητα του μαγνήτη, η οποία ορίζεται σε ποσοστό (%) με βάση την παρακάτω μέθοδο.

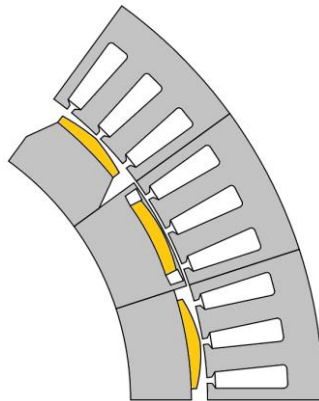
Το πάχος του διάκενου στο 1mm είναι κρίσιμο μέγεθος, και παραμένει σταθερό σε όλες τις γεωμετρίες, με την κορυφή του μαγνήτη να διατηρείται σε συγκεκριμένο πάχος, ορίζοντας έτσι συνεχώς το διάκενο στα 1mm. Στη διαδικασία βελτιστοποίησης, το πρόγραμμα, μεταβάλλει το ύψος των δύο πλευρών του μαγνήτη που είναι κάθετες στην επιφάνεια του δρομέα. Αυτή η προσαρμογή στο ύψος περιγράφεται σε σύγκριση με έναν τραπεζοειδή μαγνήτη που έχει σταθερό διάκενο 1mm κατά μήκος του. Το ύψος των πλευρών εκφράζεται σε ποσοστό % σε σχέση με το μέγιστο ύψος του τραπεζοειδούς μαγνήτη.



**Σχήμα 5.8:** Απεικόνιση μεταβολής σχήματος μαγνήτη κατά την διάρκεια της βελτιστοποίησης

Σύμφωνα με βάση την παραπάνω διαδικασία, πρόκειται να γίνει βελτιστοποίηση στα 3 είδη δρομέα:

- Επιφανειακού μαγνήτη σε κυλινδρικό δρομέα
- Επιφανειακού μαγνήτη σε έκτυπο δρομέα
- Εσωτερικού μαγνήτη



**Σχήμα 5.9:** Παράδειγμα παραμετροποιημένων τιμών μαγνήτη

Κατά το παρόν στάδιο ανάλυσης, κάθε κινητήρας αναλύεται για μόνο μια λαμαρίνα του (ενεργό μήκος 0.5mm). Τα αποτελέσματα μέσης ροπής εξόδου για μόνο μια λαμαρίνα καταδεικνύουν τον απαιτούμενο αριθμό λαμαρινών που θα πρέπει να απαρτίζουν το stack του πυρήνα, δηλαδή το συνολικό ενεργό στο μήκος του κινητήρα. Αυτό θα προκύψει από την ζητούμενη ροπή που θα πρέπει να παράγει ο κινητήρας βάση του τύπου:

$$T_{\text{per lamination}} \cdot \text{Total laminations} = T_{\text{motor}} \quad (5.1)$$

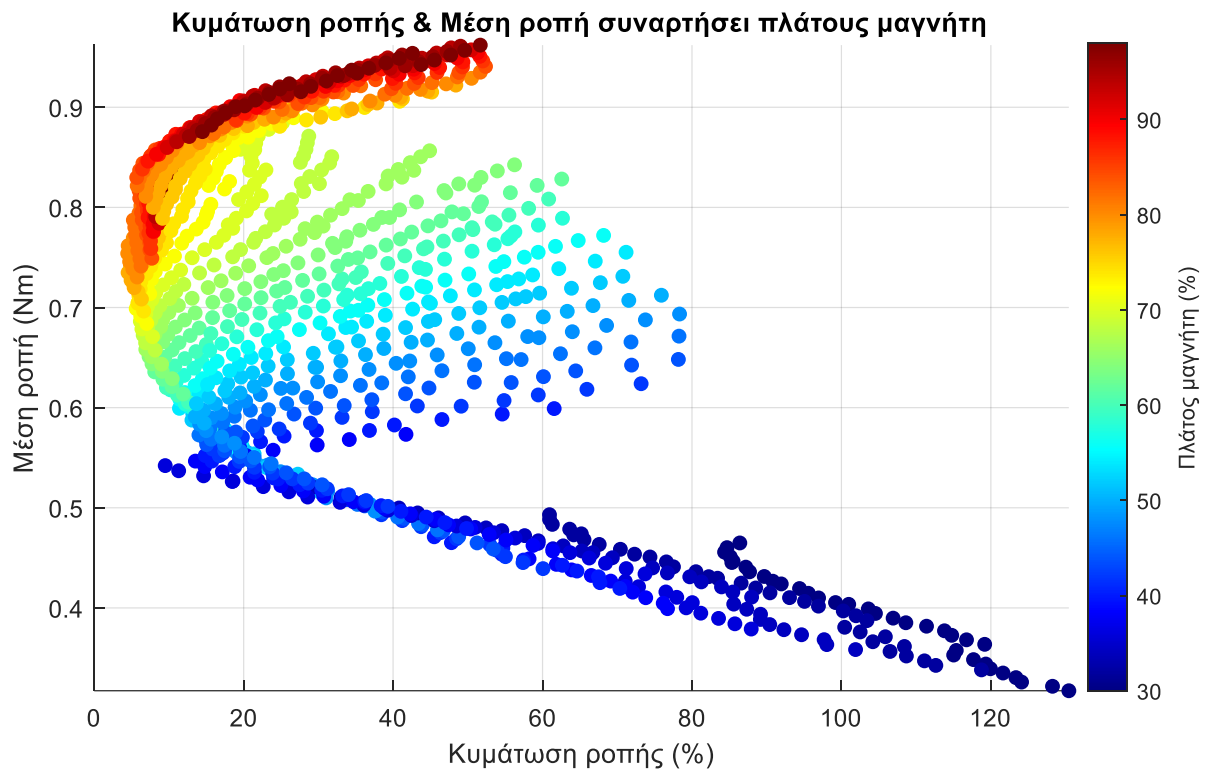
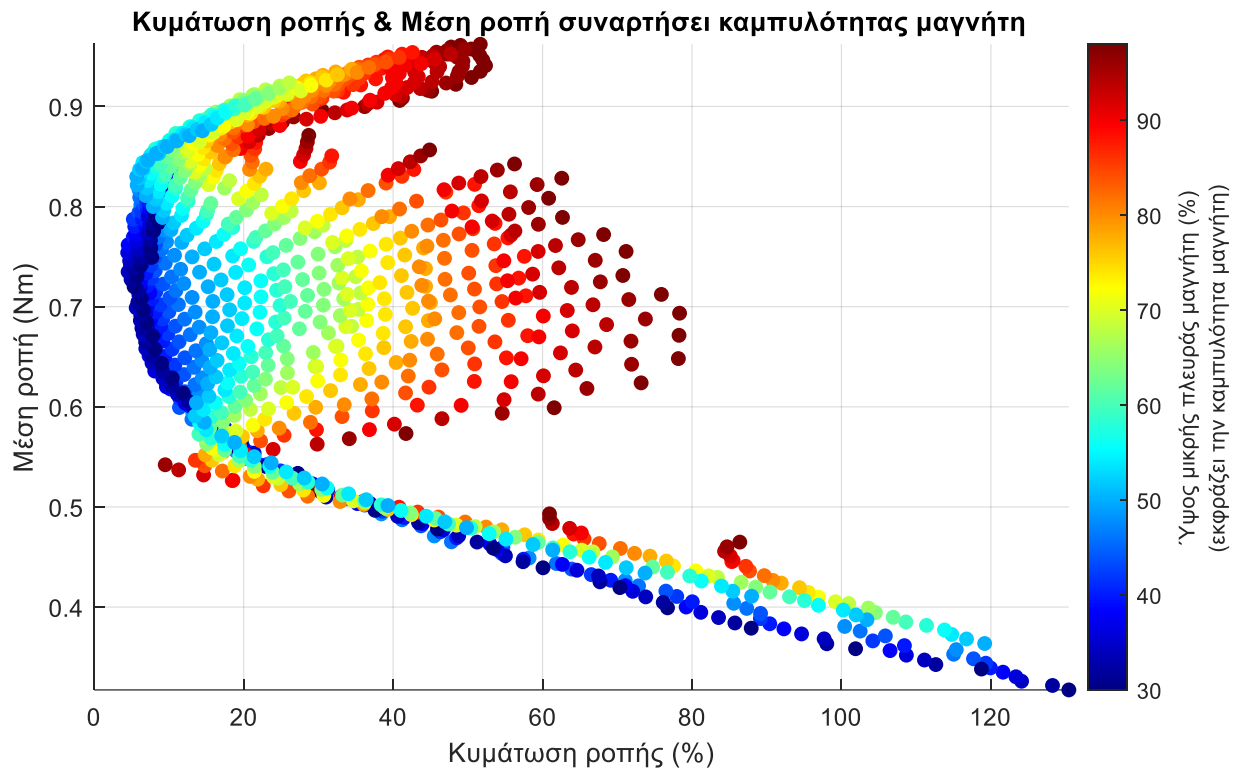
Ο παραπάνω τύπος ισχύει, αφού το μαγνητικό πεδίο δεν αλλάζει κατά μήκος της μηχανής και έτσι τα αποτελέσματα για μια μονάδα μήκους του μαγνητικού κυκλώματος μπορούν να αναχθούν για οποιοδήποτε ενεργό μήκος.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι 3 αναλύσεις ευαισθησίας που έγιναν για κάθε είδος δρομέα. Συνολικά εξετάστηκαν για κάθε είδος δρομέα περίπου 1200 κινητήρες και μετρήθηκαν:

- Μέση ροπή ανα λαμαρίνα ( $T_{\text{mean}}$ ) και
- Κυμάτωση ροπής ( $T_{\text{ripple}}$ ).

Η αρχική φάση απαιτεί τη δημιουργία διαγραμμάτων δύο διαστάσεων για να απεικονίσει την επίδοση των κινητήρων. Ο κατακόρυφος άξονας  $y$  παρουσιάζει την Μέση ροπή ( $T_{\text{mean}}$ ), ενώ ο οριζόντιος άξονας  $x$  παρουσιάζει την κυμάτωση ροπής ( $T_{\text{ripple}}$ ). Για κάθε είδος δρομέα παρουσιάζονται δύο διαγράμματα με χρωματικά διακριτά σημεία. Κάθε σημείο αντιπροσωπεύει έναν κινητήρα (πάχους 1 λαμαρίνας) με συγκεκριμένη γεωμετρία μαγνήτη. Το χρώμα του σημείου στο πρώτο διάγραμμα καταδεικνύει την καμπυλότητα του μαγνήτη (που ορίζεται από το μήκος της πλευράς του), ενώ στο δεύτερο διάγραμμα καταδεικνύει το πλάτος του μαγνήτη (ως προς το πολικό βήμα). Αυτή η διπλή απεικόνιση παρέχει μια καλύτερη εποπτεία των γεωμετριών και του πώς επιδρούν στα αποτελέσματα.

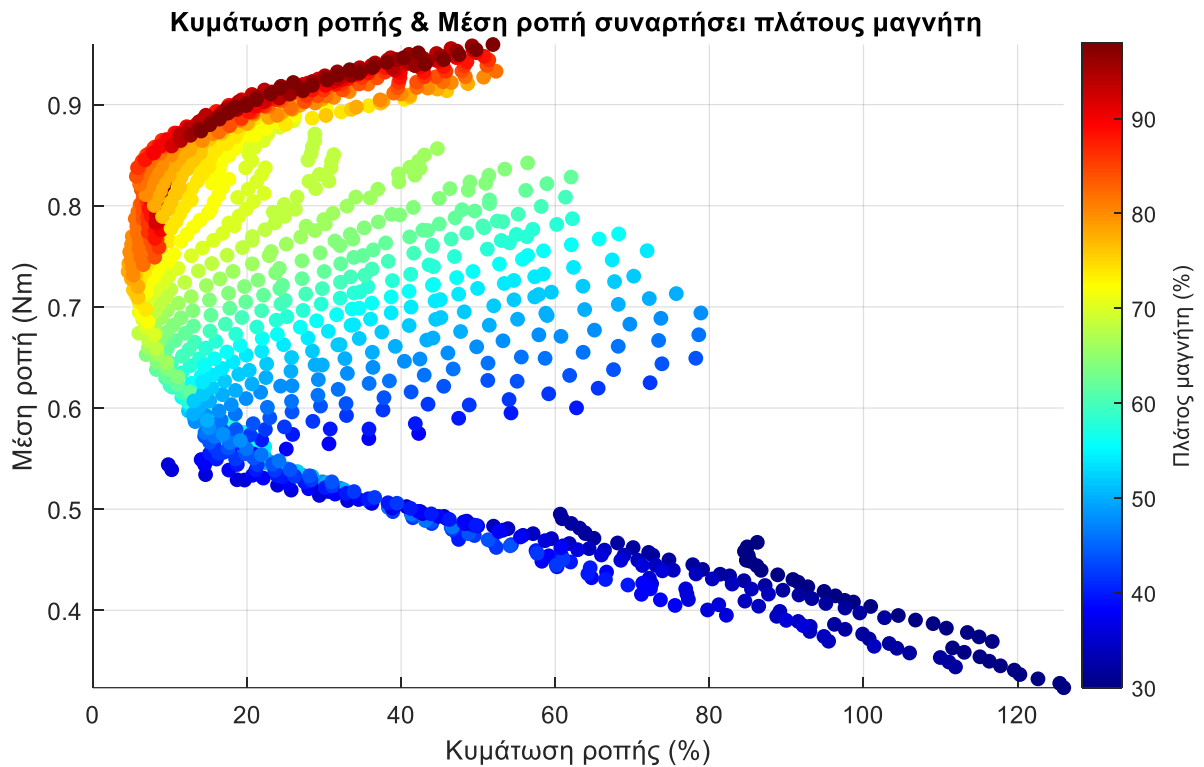
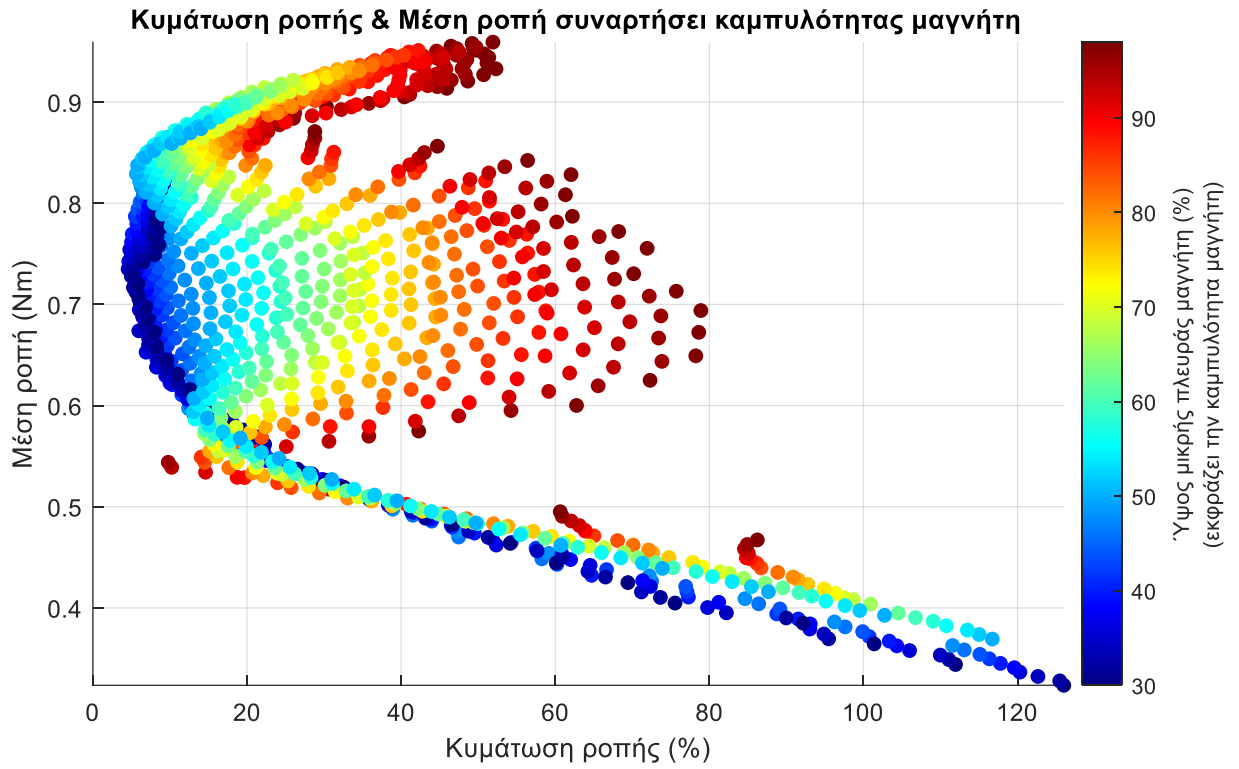
## Επιφανειακού μαγνήτη



Σχήμα 5.10: Γεωμετρίες λαμαρινών επιφανειακού μαγνήτη με 2 διαφορετικές απεικονίσεις

Εξετάστηκαν 1211 γεωμετρίες λαμαρινών με επιφανειακό μαγνήτη

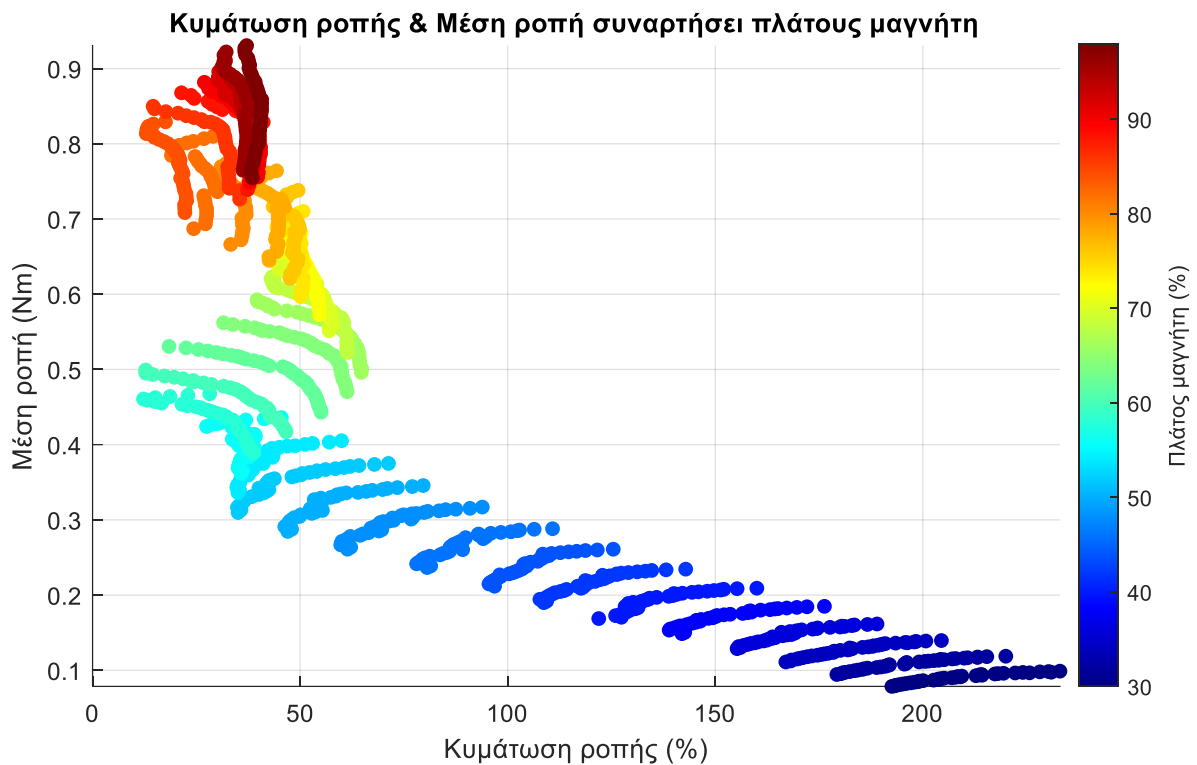
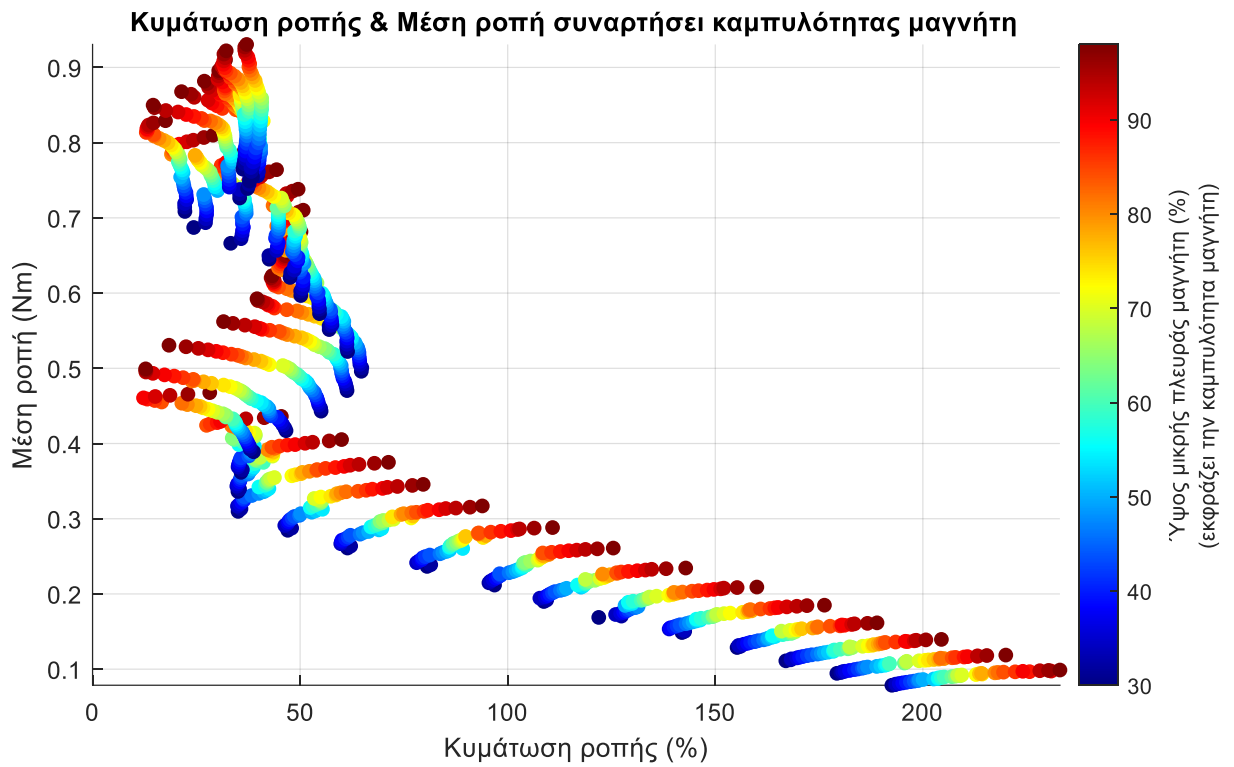
## Έκτυπου μαγνήτη



**Σχήμα 5.11:** Γεωμετρίες λαμαρινών έκτυπου μαγνήτη με 2 διαφορετικές απεικονίσεις

Εξετάστηκαν 1211 γεωμετρίες λαμαρινών με έκτυπο μαγνήτη

## Εσωτερικού μαγνήτη



Σχήμα 5.12: Γεωμετρίες λαμαρινών εσωτερικού μαγνήτη με 2 διαφορετικές απεικονίσεις

Εξετάστηκαν 1155 γεωμετρίες λαμαρινών με εσωτερικό μαγνήτη

Στις πρώτες 2 κατηγορίες, επιφανειακού και έκτυπου μαγνήτη, βλέπουμε παρόμοια αποτελέσματα. Στην ανάλυση του εσωτερικού μαγνήτη το επίπεδο ροπής ξεκινάει από πολύ χαμηλότερες τιμές, όμως παρατηρούνται παρόμοια φαινόμενα.

- Σχετικά με την μεταβολή του πλάτους του μαγνήτη:
  - Υπάρχει μια σχεδόν αναλογική συσχέτιση μεταξύ της αλλαγής του πλάτους του μαγνήτη και της μέσης ροπής. Ενδιαφέρουσα, η συμπεριφορά της ροπής για πλάτος μαγνήτη που είναι μεγαλύτερο από το 90% του πολικού βήματος, με την μέση ροπή να παραμένει πρακτικά αμετάβλητη.
  - Στο άλλο άκρο του φάσματος, όταν το πλάτος του μαγνήτη συγκλίνει προς το πλάτος του δοντιού του στάτη, παρατηρείται μια εμφανής αύξηση της ροπής ευθυγράμμισης. Ωστόσο, για πλάτη μεγαλύτερα από 35%, όπου ο μαγνήτης αρχίζει να αλληλεπιδρά με περισσότερα από ένα δόντια, η ροπή ευθυγράμμισης μειώνεται αισθητά.
- Σχετικά με την μεταβολή της καμπυλότητας του μαγνήτη:
  - Παρατηρείται ότι όσο πιο μικρή είναι η πλαϊνή πλευρά, γεγονός που ορίζει μεγάλη καμπύλη στο μαγνήτη τόσο μειώνεται η κυμάτωση ροπής, ενώ παράλληλα μειώνεται και η μέση ροπή.

## 5.5 ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ - ΜΕΤΩΠΟ PARETO

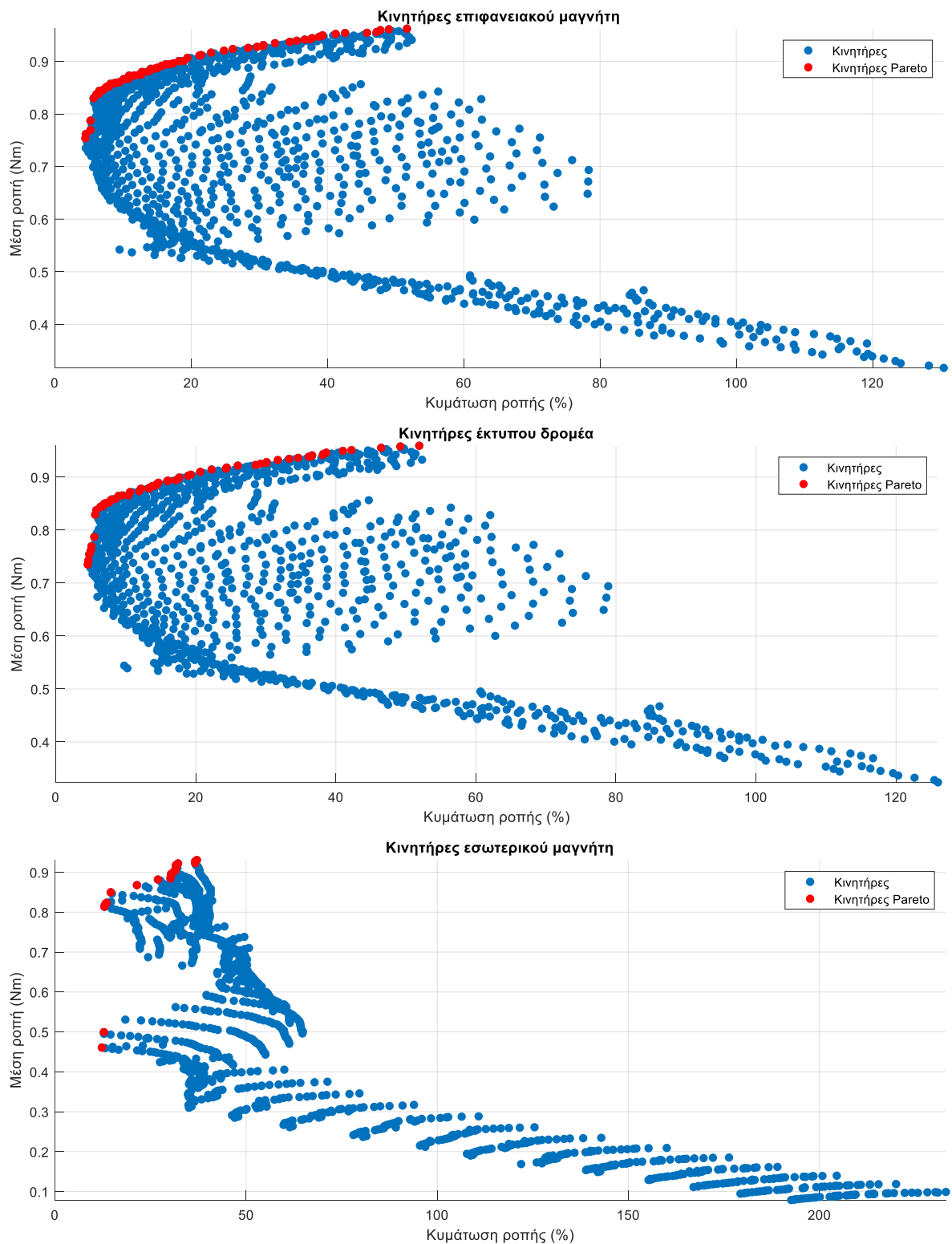
Η μαθηματική διατύπωση ενός κλασσικού προβλήματος βελτιστοποίησης αποτελείται από δύο μέρη: την συνάρτηση στόχου  $f(x)$  και τους περιορισμούς. Αν η συνάρτηση στόχου  $f(x)$  είναι απλή, τότε ορίζεται το πρόβλημα της κλασσικής βελτιστοποίησης ή βελτιστοποίησης ενός κριτηρίου. Τότε, η συνάρτηση στόχου είναι ένα βαθμωτό μέγεθος και το πρόβλημα ανάγεται στην εύρεση των τιμών των μεταβλητών απόφασης  $x$  που ελαχιστοποιούν ή μεγιστοποιούν την  $f(x)$ . Κύριος στόχος είναι ο εντοπισμός μιας μονοσήμαντης λύσης. Αυτό όμως είναι και το σημαντικότερο μειονέκτημα των κλασσικών μεθόδων. Σε πολύπλοκα συστήματα, η χρήση μόνο ενός κριτηρίου βελτιστοποίησης είναι μη ρεαλιστική και μπορεί να οδηγήσει σε απαράδεκτα μεροληπτικές λύσεις.

Το πλαίσιο ενός προβλήματος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης διαφέρει από αυτό της μονοκριτηριακής αφού δεν γίνεται αναζήτηση ενός μοναδικού σημείου ακρότατου, αλλά μιας ομάδας σημείων τα οποία είναι βέλτιστα σύμφωνα με τον ορισμό του Pareto. Έτσι, αντί να υπάρχει μια μόνο συνάρτηση στόχου  $f(x)$ , υπάρχουν πολλαπλές συναρτήσεις στόχου  $F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]$  και αντί για μια μοναδική “βέλτιστη” λύση, υπάρχει ένα σύνολο λύσεων που αποτελούν το μέτωπο Pareto. Κάθε λύση σε αυτό το μέτωπο αντιπροσωπεύει ένα διαφορετικό συμβιβασμό μεταξύ των στόχων.

Όσον αφορά στην μορφή του μετώπου Pareto, σε προβλήματα δύο κριτηρίων ( $n=2$ ), είναι μια καμπύλη. Σε προβλήματα τριών κριτηρίων, είναι μια επιφάνεια, ενώ σε προβλήματα περισσότερων κριτηρίων (έστω  $m$ ), αν και δεν μπορεί να αποτυπωθεί ώστε να γίνει αντιληπτό, το μέτωπο συνιστά μια υπερ-επιφάνεια  $(m-1)$ -διαστάσεων. [28]



### 5.5.1 Επιλογή Pareto



**Σχήμα 5.13:** Σύνολο κινητήρων (πάχους μιας λαμαρίνας) και εύρεση βέλτιστων βάση μετώπου Pareto

Στα παραπάνω τρία διαγράμματα, τα οποία αντιστοιχούν σε κάθε τύπο δρομέα, παρουσιάζονται οι κινητήρες που κατασκευάστηκαν στο επίπεδο Tmean, Tripple (οι ίδιες γεωμετρίες που παρουσιάστηκαν στα σχήματα 5.10, 5.11, 5.12 αλλά χωρίς χρωματικό κώδικα). Η πρωταρχική ενέργεια είναι να εντοπιστούν οι καταλληλότερες γεωμετρίες. Το μέτωπο

Pareto είναι ένας θεμελιώδης όρος στην θεωρία της βελτιστοποίησης και παίζει κρίσιμο ρόλο στην εύρεση των βέλτιστων επιλογών. Στο πλαίσιο αυτό, η περιοχή του διαγράμματος που περιλαμβάνεται στο μέτωπο Pareto αναδεικνύει τις πιο ευνοϊκές γεωμετρίες για κινητήρες. Χάρη σε αυτήν την προσέγγιση, η διαδικασία επιλογής δεν βασίζεται υποκειμενικά κριτήρια, αλλά στηρίζεται σε σταθερά κριτήρια, προσφέροντας έτσι την πιο αποτελεσματική λύση.

Για την επιλογή των κατάλληλων γεωμετριών, θα χρησιμοποιηθούν τα δύο διαθέσιμα κριτήρια που είναι η μέση ροπή (Tmean) και η κυμάτωση ροπής (Tripple). Στην πράξη, τα σημεία που τοποθετούνται ψηλά στον κάθετο άξονα (λόγω υψηλού Tmean) και προς την αριστερή πλευρά του οριζόντιου άξονα (λόγω χαμηλού Tripple) αντιπροσωπεύουν τις πιο ευνοϊκές διαθέσιμες γεωμετρίες. Το σύνολο των κινητήρων που επιλέχθηκαν φαίνεται στον επόμενο πίνακα.

**Πίνακας 5.5:** Κινητήρες που επελέγησαν στο πρώτο στάδιο βελτιστοποίησης

Τύπος Δρομέα	Αριθμός κινητήρων που επελέγησαν
Επιφανειακού	65
Έκτυπου	60
Εσωτερικού	20

Για να βρεθεί η μοναδική λύση βέλτιστης γεωμετρίας, αυτές οι 145 γεωμετρίες θα μελετηθούν με αντικειμενική συνάρτηση.

### 5.5.2 Αντικειμενική συνάρτηση

Για την κάθε μια από τις γεωμετρίες των Pareto υπολογίζεται το απαιτούμενο μήκος ώστε να παράγουν με πυκνότητα ρεύματος  $4 \text{ A/mm}^2$ ,  $300 \text{ Nm}$  ροπής. Έτσι, η συλλογή των λαμαρινών μετατρέπεται σε συλλογή από μηχανές με διαφορετικό ενεργό μήκος για την κάθε μια. Πλέον, εφόσον υπάρχουν ολοκληρωμένοι κινητήρες ως οντότητες, είναι εφικτή η μέτρηση της απόδοσης και του κόστους υλικών.

Το δεύτερο και τελευταίο στάδιο της βελτιστοποίησης ξεκινά με την αναλυτική αξιολόγηση συλλέγοντας δεδομένα επίδοσης από κάθε ηλεκτρικό κινητήρα: η κυμάτωση ροπής (Tripple %), η συνολική αρμονική παραμόρφωση (THD %), η απόδοση (Efficiency %) και το κόστος (Cost €). Στην συνέχεια για να διασφαλιστεί η σωστή σύγκριση των μετρήσεων και να αποφευχθούν ανισορροπίες λόγω διαφορετικών κλιμάκων, τα αποτελέσματα κανονικοποιούνται. Κάθε τιμή που προέρχεται από τη μέτρηση των Tripple, THD, Efficiency, και Cost πρέπει να μετασχηματιστεί σε μια τιμή που κυμαίνεται σε ένα κοινό εύρος. Αυτό γίνεται συνήθως μέσω μιας συνάρτησης κανονικοποίησης, όπως η min-max κανονικοποίηση. Η μέθοδος min-max κανονικοποίησης μετατρέπει μια τιμή  $x$  σε μια νέα τιμή  $x_{norm}$  στο διάστημα  $[0, 1]$ , όπου:

$$x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (5.2)$$

Οι κανονικοποιημένες τιμές αποθηκεύονται σε έναν πίνακα με τη μορφή **[Tripple\_norm, THD\_norm, Efficiency\_norm, Cost\_norm]**.

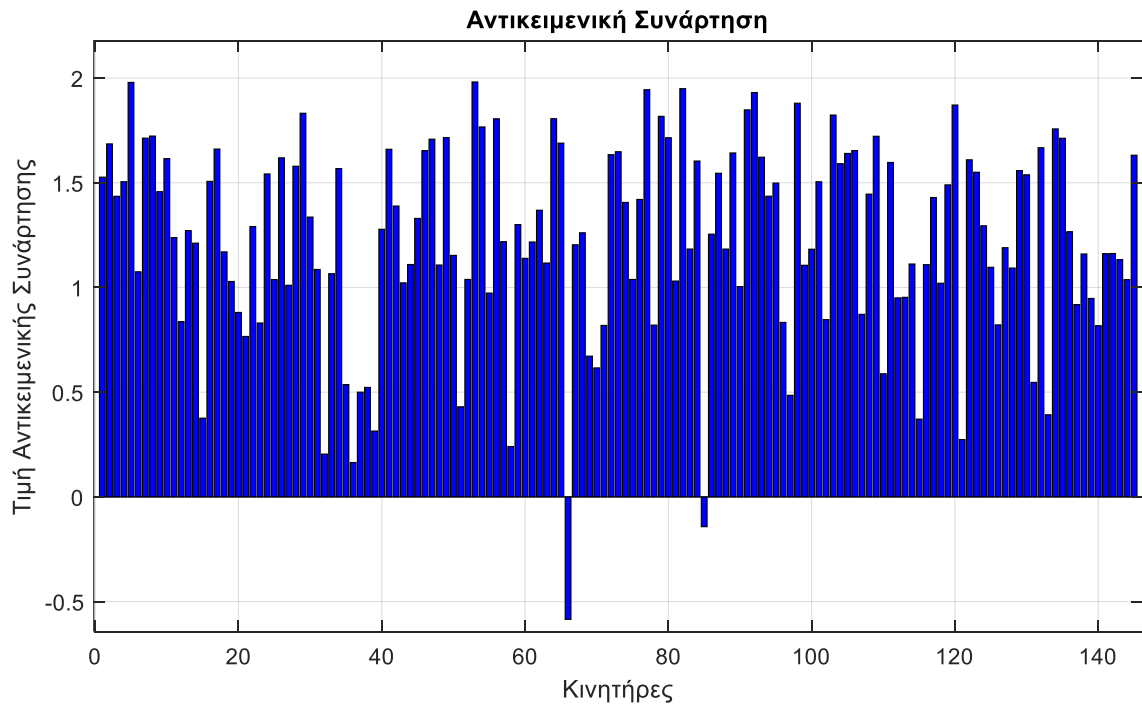
Η αντικειμενική συνάρτηση υπολογίζει στη συνέχεια την τιμή του αντικειμενικού κριτηρίου για τον ηλεκτρικό κινητήρα, πολλαπλασιάζοντας κάθε κανονικοποιημένη τιμή με το αντίστοιχο βάρος, και στη συνέχεια, αθροίζοντας τα γινόμενα. Τα βάρη αντιπροσωπεύουν τη σχετική σημασία που αποδίδεται σε κάθε παράμετρο αξιολόγησης. Η τελική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης αντιπροσωπεύει την “βαθμολογία” του κάθε υποψήφιου ηλεκτρικού κινητήρα.

Συγκεκριμένα για τα βάρη επιλέγεται:

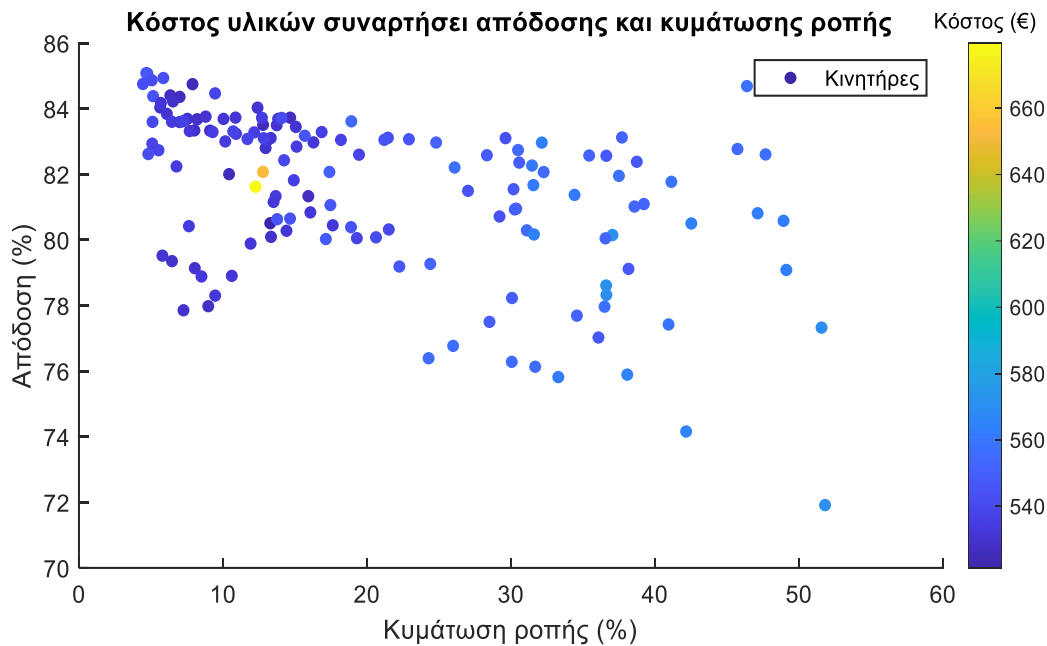
- Το βάρος **0.4** αντιστοιχεί στη κυμάτωση ροπής **Tripple\_norm**.
- Το βάρος **0.2** αντιστοιχεί στη αρμονική παραμόρφωση της τάσης **THD\_norm**.
- Το βάρος **2** αντιστοιχεί στη απόδοση **Efficiency\_norm**.
- Το βάρος **0.1** αντιστοιχεί στο κόστος κατασκευής **Cost\_norm**.

Τέλος διαμορφώνεται η αντικειμενική συνάρτηση:

$$f_{\text{ObjectiveFunction}} = [-\text{weight}(1) \quad -\text{weight}(2) \quad \text{weight}(3) \quad -\text{weight}(4)] \cdot \begin{bmatrix} \text{Tripple}_{\text{norm}} \\ \text{THD}_{\text{norm}} \\ \text{Efficiency}_{\text{norm}} \\ \text{Cost}_{\text{norm}} \end{bmatrix}$$



Σχήμα 5.14: Απεικόνιση αποτελεσμάτων 2<sup>ου</sup> σταδίου βελτιστοποίησης



**Σχήμα 5.15:** Απεικόνιση κινητήρων συναρτήσει τριών παραμέτρων που υπολογίζονται στην αντικειμενική συνάρτηση

Συνοπτικά η διαδικασία που αναλύθηκε:

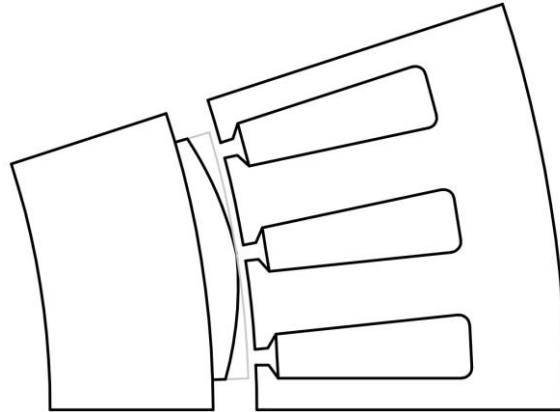
1. **Δημιουργία 3500 λαμαρινών** με τρεις διαφορετικές τοπολογίες και διαμορφωτικές παραμέτρους στον μαγνήτη.
2. **Επιλογή με Pareto:** Επιλογή με την μέθοδο Pareto ενός υποσύνολου από τις 3500 λαμαρίνες που αποτελούν τις βέλτιστες λύσεις σε σχέση με την ισορροπία μεταξύ της μέσης ροπής (Tmean) και της διακύμανσης ροπής (Tripple). Στο πλαίσιο αυτού του βήματος, το νέο υποσύνολο από λαμαρίνες μετατρέπεται σε κινητήρες, με διαφορετικό ενεργό μήκος ώστε όλοι τους να παράγουν 300Nm στα 4A/mm<sup>2</sup>.
3. **Αντικειμενική συνάρτηση για την τελική επιλογή:** Στο τελευταίο βήμα, έγινε εφαρμογή αντικειμενικής συνάρτησης που συνδυάζει τις κανονικοποιημένες μετρικές (Tripple, THD, Efficiency, Cost) με συγκεκριμένους συντελεστές βαρύτητας.

## ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΡΙΣΤΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

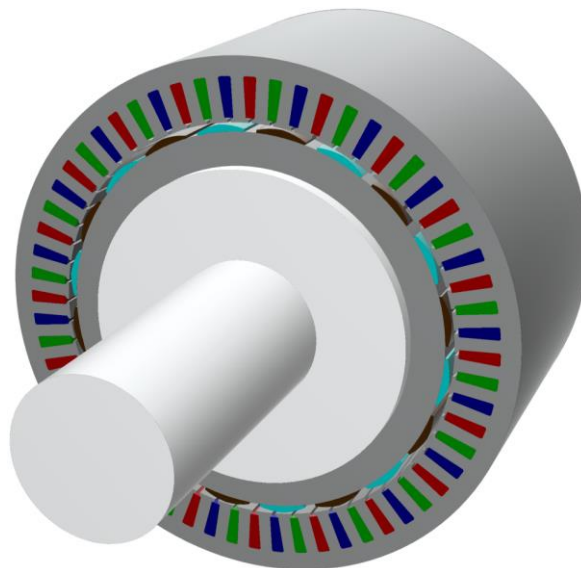
### 6.1 ΤΕΛΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ

Η τελική βαθμολόγηση των κινητήρων βάσει της αντικειμενικής συνάρτησης, σηματοδοτεί το τέλος της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Ως βέλτιστη λύση αναδείχθηκε ο κινητήρας με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Πλάτος μαγνήτη: 80% του πολικού βήματος
- Μικρή Πλευρά: 36% ως προς την πλευρά ενός τραπεζοειδή μαγνήτη
- Αριθμός Λαμαρινών: 392 λαμαρίνες πάχους 0.5mm



**Σχήμα 6.1:** Εικόνα με έναν πόλο της τελικής μηχανής. Με γκρι αχνό χρώμα φαίνεται ο τραπεζοειδής μαγνήτης βάσης του οποίου εκφράζονται τα χαρακτηριστικά του βελτιστοποιημένου μαγνήτη.



**Σχήμα 6.2:** Τρισδιάστατο μοντέλο κινητήρα στο λογισμικό SolidWorks

**Πίνακας 6.1:** Μάζα κινητήρα

Στοιχείο μηχανής	Μάζα [kg]
Σώμα στάτη	38.92
Σώμα δρομέα	21.85
Μαγνήτες	3.18
Τύλιγμα στάτη	9.42
<b>Συνολική μάζα ενεργού μέρους μηχανής</b>	<b>73.36</b>

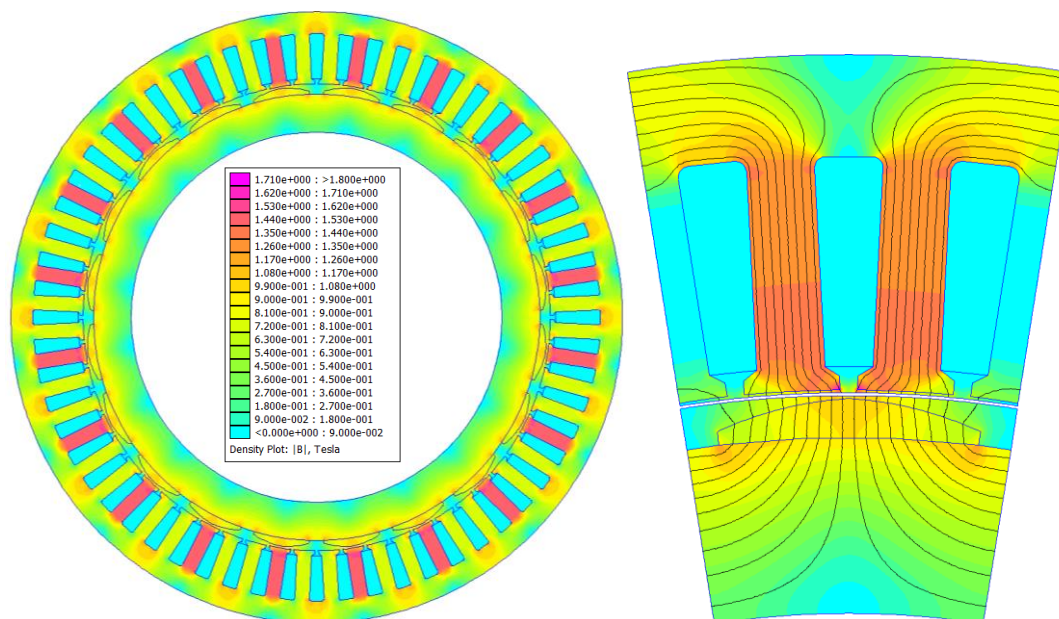
**Πίνακας 6.2:** Τεχνικά χαρακτηριστικά κινητήρα

Αριθμός Φάσεων	3
Πόλοι	20
Αριθμος Αυλάκων	60
Εξωτερική διάμετρος μηχανής (στάτη)	33 cm
Εσωτερική διάμετρος δρομέα	20 cm
Πάχος Λαμαρίνας	0.5 mm
Αριθμός λαμαρινών	393
Ενεργό μήκος	20 cm
Συντελεστής πληρότητας λαμαρίνας	0.98
Συνολικό μήκος μηχανής	20.4 cm
Σχήμα μαγνήτη	ημιτονοειδές
Διάμετρος διακένου	25,2 cm
Πάχος διακένου	1 mm
Αριθμός ελιγμάτων	36
Διάμετρος καλωδίου	1.6 mm
Μήκος τυλίγματος ανά φάση	180 m
Αντίσταση τυλίγματος ανά φάση (L-N)	1.5 Ω
Συντελεστής πληρότητας τυλίγματος	0.45
Βάρος ενεργού μέρους μηχανής	34.8 kg
Ονομαστική ροπή	300 Nm
Ονομαστική ταχύτητα	120 ΣΑΛ
Ονομαστικό ρεύμα	8.31 A ή 4 A/mm <sup>2</sup>
Μέγιστη ροπή	700 Nm
Ρεύμα για μέγιστη ροπή	19.73 A ή 9.5 A/mm <sup>2</sup>

Στην συνέχεια ο κινητήρας θα αξιολογηθεί σε 3 καταστάσεις λειτουργίας από τις οποίες θα πραγματοποιηθούν αναλύσεις διαφόρων μεγεθών.

### 6.1.1 Κενό Φορτίο (0A/mm<sup>2</sup>)

Κατά την δοκιμή κενού φορτίου ο κινητήρας στέφεται στην ταχύτητα των 120 περιστροφών το λεπτό (ονομαστικές στροφές) με την βοήθεια ενός εξωτερικού μηχανισμού κίνησης. Η περιοδικότητα στο ηλεκτρικό μέρος παρουσιάζεται για κάθε ηλεκτρική περιστροφή (360 ηλεκτρικές μοίρες). Εδώ, πρόκειται για εικοσαπολικό κινητήρα, επομένως μια ηλεκτρική περιστροφή αποτελεί την μετατόπιση του δρομέα κατά δύο ζεύγη πόλων, δηλαδή 36 μηχανικές μοίρες. Οι ακροδέκτες των τριών φάσεων του κινητήρα βρίσκονται ανοικτοκυκλωμένοι. Στην συνέχεια αποτυπώνονται διαφορετικά μεγέθη από την λειτουργία κενού φορτίου.



**Σχήμα 6.3:** Κατανομή μαγνητικού πεδίου σε ολόκληρη την μηχανή και σε έναν πόλο της, κατά την λειτουργία σε κενό φορτίο ( $0A/mm^2$ )

Το μαγνητικό πεδίο που υπάρχει στο εσωτερικό της μηχανής προέρχεται αποκλειστικά από τους μόνιμους μαγνήτες του δρομέα. Σε αυτήν την κατάσταση, το μαγνητικό πεδίο είναι σχεδόν ομοιόμορφα κατανεμημένο σε όλο τον κινητήρα, καθώς δεν υπάρχει επιπρόσθετο πεδίο που προκύπτει από τα ρεύματα του στάτη για να το επηρεάσει ή να το παραμορφώσει.

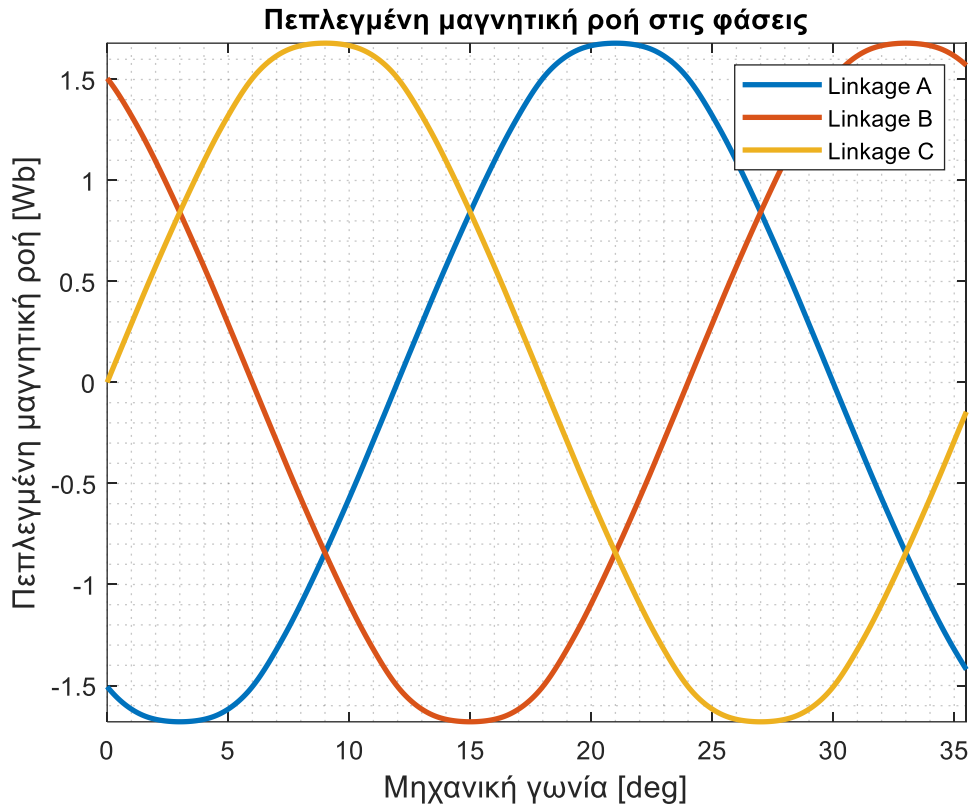
Κατά την εξωτερική κίνηση του κινητήρα, η ροπή ευθυγράμμισης (Cogging Torque) μπορεί να περιγράψει ως μια “τρανταχτή” κίνηση του δρομέα. Η ροπή ευθυγράμμισης προκύπτει από την αλληλεπίδραση μεταξύ των μόνιμων μαγνητών του δρομέα και των δοντιών του στάτη. Υπάρχουν, δηλαδή, ορισμένες θέσεις όπου ο δρομέας θα “προτιμά” να σταματάει (μικρή μαγνητική αντίσταση) και να θέτει αντίσταση στην κίνηση.



**Σχήμα 6.4:** Ροπή υπό μηδενικό φορτίο

Τέλος, αποτυπώνονται:

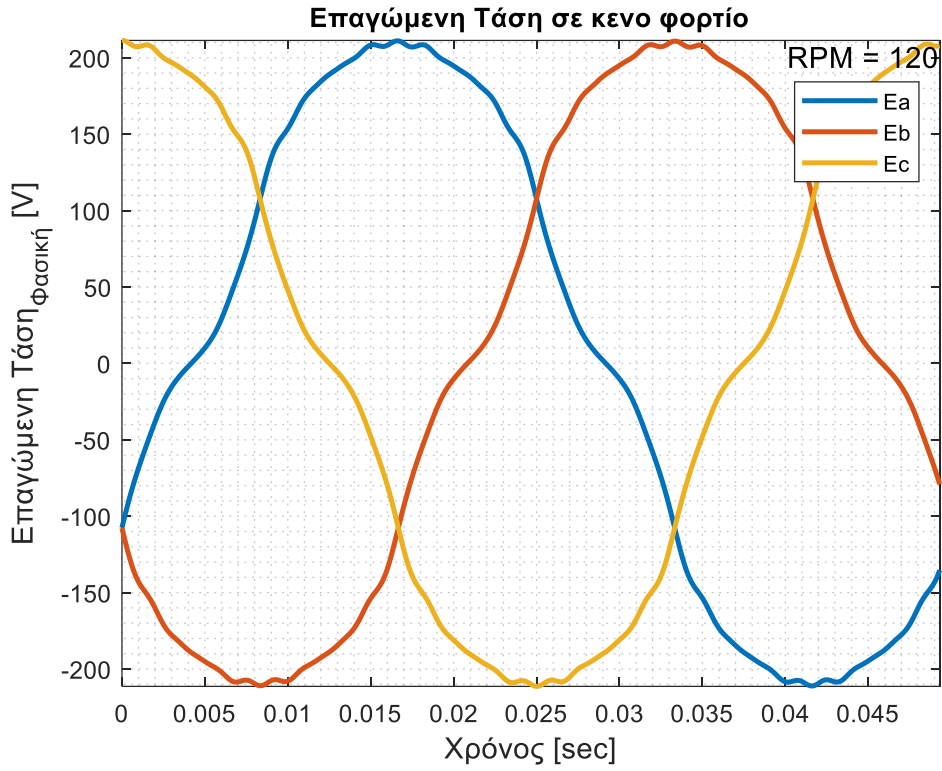
- η μαγνητική ροή των μονίμων μαγνητών που είναι πεπλεγμένη με τις τρεις φάσεις των τυλιγμάτων
- η επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη στην ονομαστική ταχύτητα καθώς και
- το αρμονικό περιεχόμενο της ηλεκτρεγερτικής δύναμης



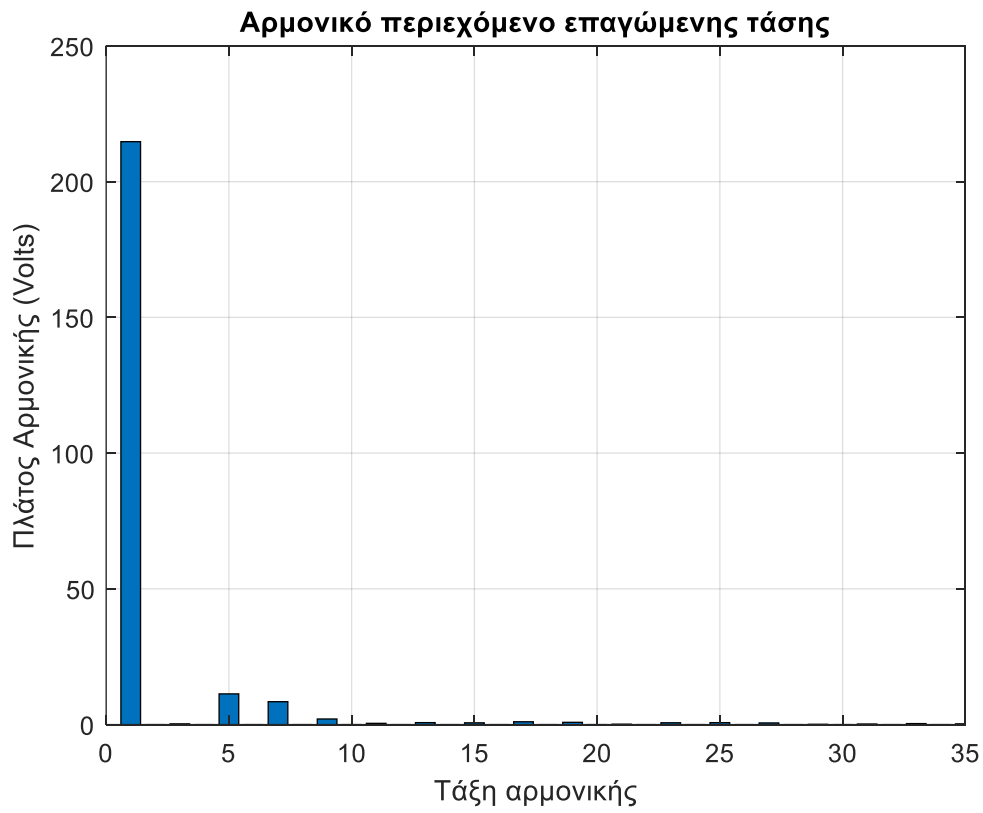
**Σχήμα 6.5:** Πεπλεγμένη μαγνητική ροή στις φάσεις

Η κυματομορφή της ΗΕΔ παρουσιάζει σχεδόν ημιτονική συμπεριφορά, γεγονός που επαληθεύεται και από το αρμονικό περιεχόμενο που αποτυπώνεται στο σχήμα 6.7. Η ενεργός τιμή της τάσης υπολογίζεται  $E_{rms}=150V$  και είναι πολύ κοντά στους αρχικούς υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Η συνολική αρμονική παραμόρφωση (Total Harmonic Distortion) της επαγόμενης τάσης υπολογίζεται  $THD = 6.7\%$ .





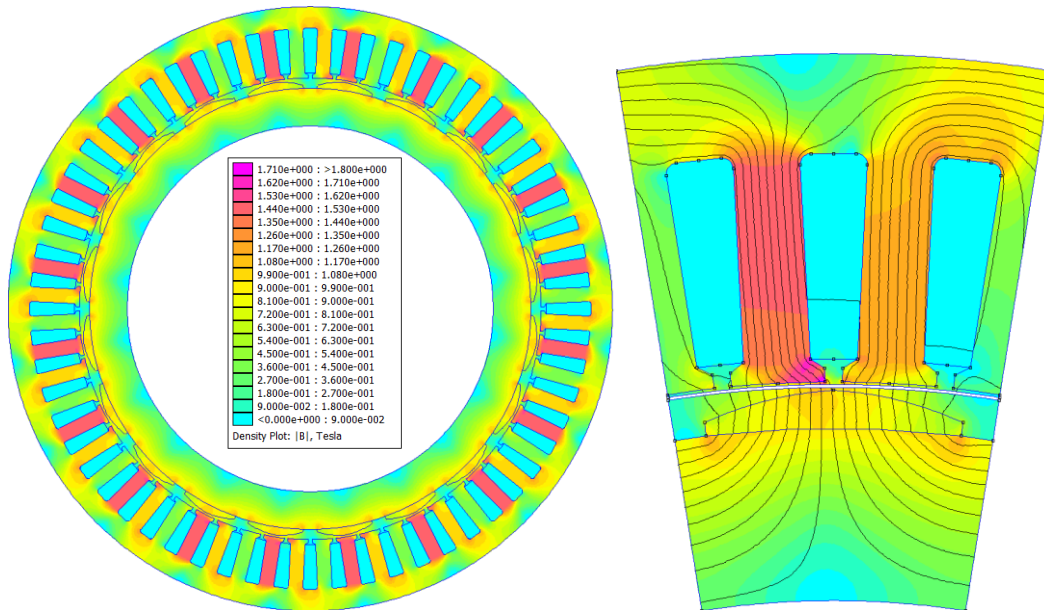
Σχήμα 6.6: Επαγόμενη τάση υπό μηδενικό φορτίο



Σχήμα 6.7: Αρμονικό περιεχόμενο επαγόμενης τάσης υπό μηδενικό φορτίο

### 6.1.2 Ονομαστική λειτουργία (4 A/mm<sup>2</sup>)

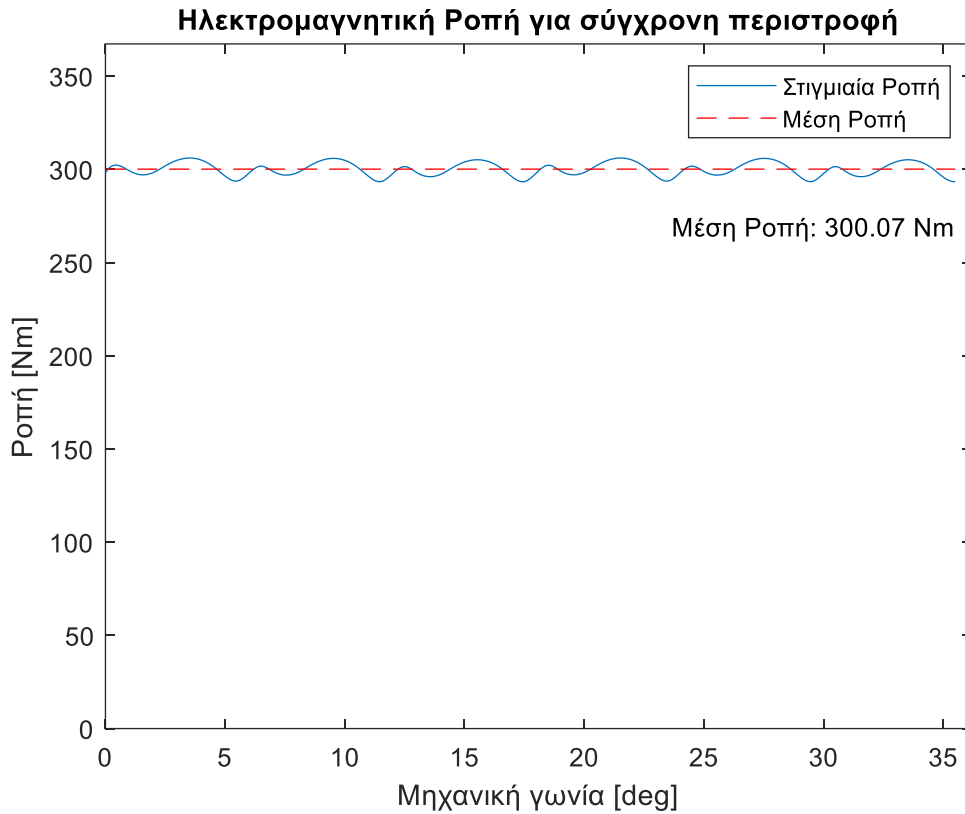
Κατά την ονομαστική λειτουργία εφαρμόζεται ρεύμα φάσης 8.31A το οποίο μεταφράζεται σε πυκνότητα ρεύματος 4A/mm<sup>2</sup> στην αύλακα του στάτη. Από την τους υπολογισμούς του προγράμματος που αναπτύχθηκε (βλ. υποενότητα 4.7.2.3), για λειτουργία ΜΤΡΑ στα 4A/mm<sup>2</sup>, η εσωτερική γωνία  $\delta$  υπολογίζεται 94°. Ο δρομέας στρέφεται σύγχρονα με τα ρεύματα στάτη, με ονομαστική ταχύτητα 120RPM και αναλύεται ξανά μια πλήρης ηλεκτρική περιστροφή που αντιστοιχεί σε 36 μηχανικές μοίρες.



**Εικόνα 6.8 :** Κατανομή μαγνητικού πεδίου σε ολόκληρη την μηχανή και σε έναν πόλο της, κατά την λειτουργία σε ονομαστικό φορτίο (4A/mm<sup>2</sup>)

Τα ρεύματα του στάτη δημιουργούν δικά τους μαγνητικά πεδία, τα οποία αλληλεπιδρούν με το πεδίο των μαγνητών, προκαλώντας ροπή. Το πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής λαμβάνει υψηλότερες τιμές στα δόντια του στάτη ακριβώς πάνω από τους μαγνήτες, αφού εκεί συγκεντρώνεται η περισσότερη μαγνητική ροή. Επίσης η το μαγνητικό κύκλωμα του πυρήνα δεν έχει κορεστεί, αφού η τιμή του πεδίου δεν ξεπερνά πουθενά τα 1.8T. Αυτό αφήνει περιθώρια υπερφόρτισης του μαγνητικού κυκλώματος όπως θα παρουσιαστεί στην συνέχεια.

Παρακάτω αποτυπώνεται η ροπή του κινητήρα σε ονομαστική λειτουργία. Η μέση ροπή είναι 300Nm και υπάρχει μικρή κυμάτωση ροπής  $T_{ripple}=4.24\%$ . Η διακύμανση της ροπής είναι εξαιρετικά χαμηλή, ενώ η μεγάλη αδράνεια του δρομέα συμβάλλει στη σταθερότητα της λειτουργίας του.



**Σχήμα 6.9:** Ροπή ονομαστικής λειτουργίας

**Πίνακας 6.3:** Τεχνικά στοιχεία για την ονομαστική λειτουργία της μηχανής

<b>Ονομαστική λειτουργία</b>	
Ονομαστική πυκνότητα ρεύματος άυλακος	4 A/mm <sup>2</sup>
Ενεργός πυκνότητα ρεύματος (fillfactor=0.45)	1.8 A/mm <sup>2</sup>
Ρεύμα φάσης	8.31 A
Εσωτερική γωνία δ	94 deg
Μέση ροπή	300 Nm
Κυμάτωση ροπής	4.24%

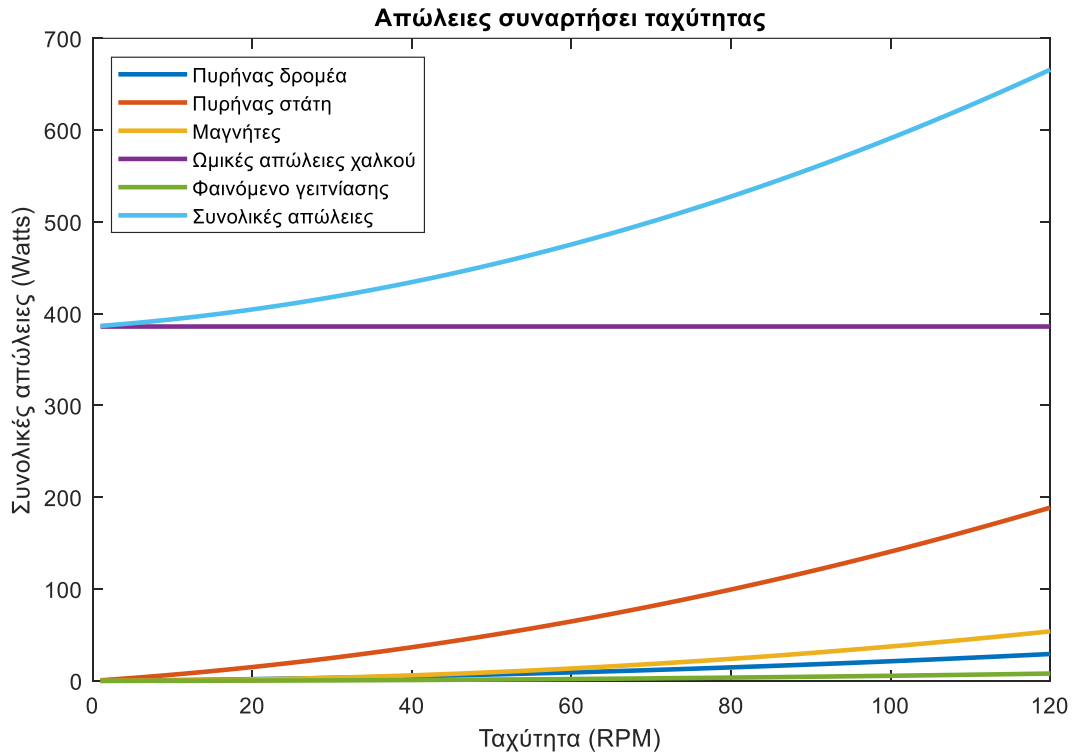
Τέλος υπολογίζονται και αποτυπώνονται οι απώλειες ισχύος και η απόδοση.

**Πίνακας 6.4:** Κατανομή απωλειών στη μηχανή κατά την ονομαστική λειτουργία

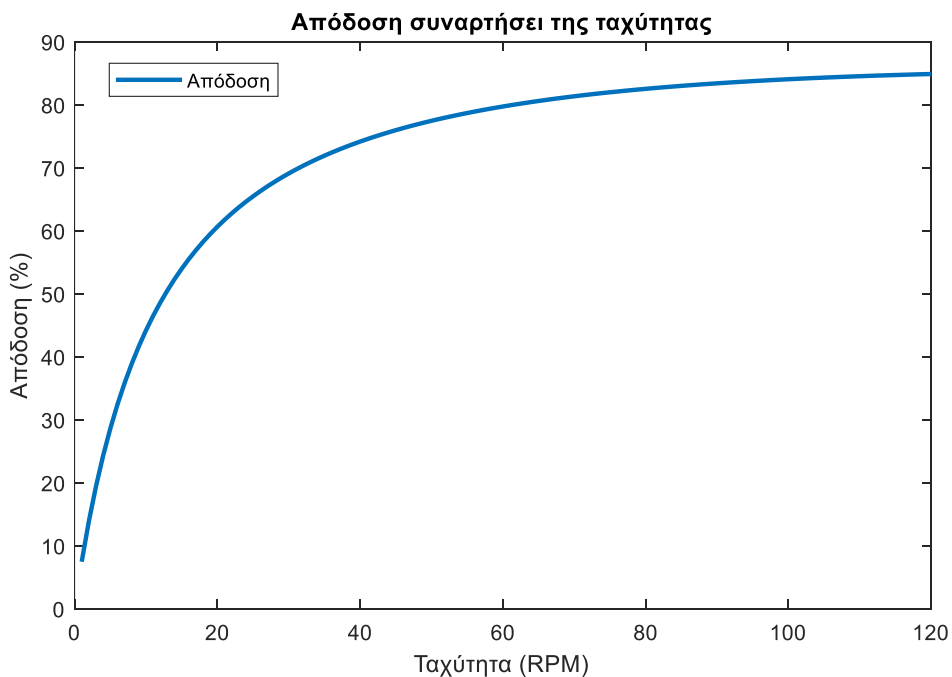
Είδος απωλειών	Ισχύς απωλειών (Watts)
Χαλκού	386.01
Στάτη	188.74
Δρομέα	29.24
Μαγνητών	53.92
Γεινίασης – Επιδερμικού φαινομένου	7.94

Η απόδοση για την λειτουργία της μηχανής στα 300Nm 120 RPM εκτιμάται στο 85%. Βασική συνιστώσα απωλειών είναι οι απώλειες χαλκού. Η συχνότητα είναι πολύ χαμηλή για αυτό και οι υπόλοιπες απώλειες -που εξαρτώνται από αυτήν- παραμένουν σε χαμηλότερα επίπεδα. Οι απώλειες χαλκού παραμένουν σταθερές κατά την αλλαγή της ταχύτητας, αφού εξαρτώνται από την πυκνότητα του ρεύματος. Ως αποτέλεσμα θα μπορούσε κανείς να τις θεωρήσει εξαρτώμενες από την ροπή που παράγει η μηχανή. Μάλιστα, οι απώλειες χαλκού

αποτελούν και την βασική αιτία που η απόδοση είναι ιδιαίτερα χαμηλή σε χαμηλότερες στροφές. Στην συνέχεια, ακολουθούν οι απώλειες στάτη στις οποίες έχουμε και το μαγνητικό πεδίο να ολισθαίνει πάνω του. Σε αντίθεση, ο πυρήνας του δρομέα επηρεάζεται κυρίως από τις αρμονικές συνιστώσες του πεδίου του στάτη, καθώς κινείται σύγχρονα με τη θεμελιώδη συνιστώσα. Έτσι ο δρομέας έχει πολύ μικρότερες απώλειες σε σύγκριση με τον στάτη. Οι μαγνήτες παρουσιάζουν απώλειες δινορευμάτων και εξαιτίας του ότι βρίσκονται στην επιφάνεια του δρομέα καταπονούνται έντονα από το στάτη.

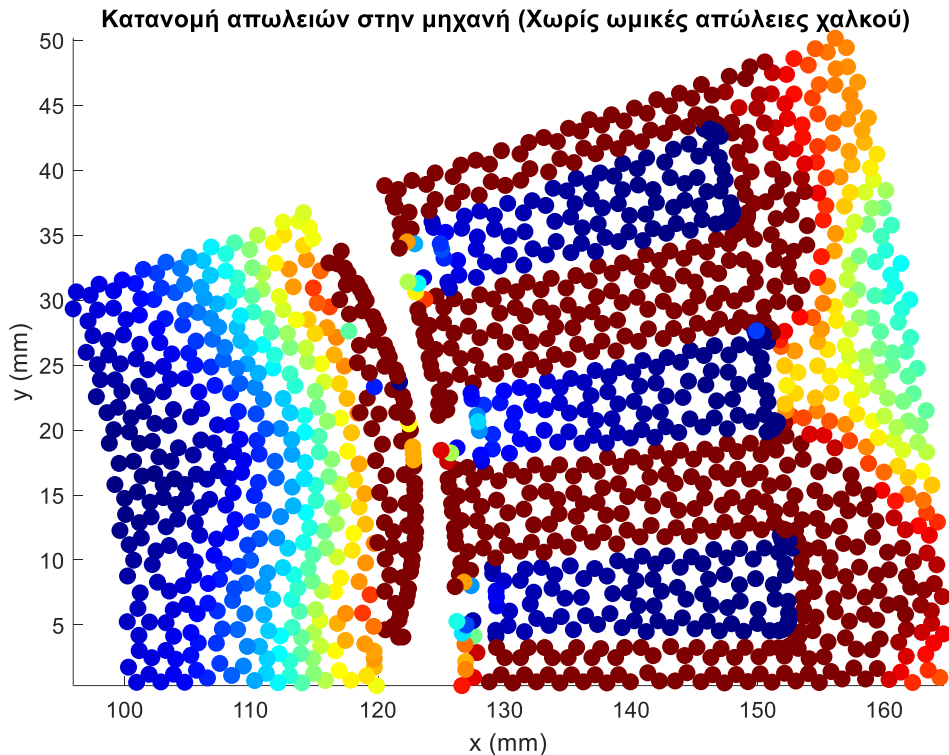


**Σχήμα 6.10:** Απώλειες μηχανής σε λειτουργία με ονομαστική πυκνότητα ρεύματος



**Σχήμα 6.11:** Απόδοση συναρτήσει της ταχύτητας σε ονομαστική πυκνότητα ρεύματος

Τέλος, αποτυπώνεται η κατανομή των απωλειών στον πόλο της μηχανής. Οι κυριότερες απώλειες συμβαίνουν στα δόντια του στάτη καθώς και στον μόνιμο μαγνήτη. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι παρόλο που οι πυρήνες του στάτη και του δρομέα είναι κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό, ο στάτης φαίνεται να συγκεντρώνει τις μεγαλύτερες απώλειες. Αυτό συμβαίνει, αφενός λόγω της μεγαλύτερης έντασης του πεδίου του και αφετέρου λόγω της διαφορετικής διακύμανσης του πεδίου σε αυτόν. Η σχετική ταχύτητα του που ολισθαίνει το πεδίο στο στάτη είναι ίση με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Αντίθετα, ο δρομέας “βλέπει” ένα σταθερό πεδίο καθώς περιστρέφεται σύγχρονα και επηρεάζεται μόνο από τις αρμονικές του πεδίου στο διάκενο.



**Σχήμα 6.12:** Κατανομή απωλειών σε έναν πόλο κατά την ονομαστική λειτουργία της μηχανής (δεν αποτυπώνονται οι ωμικές απώλειες χαλκού)

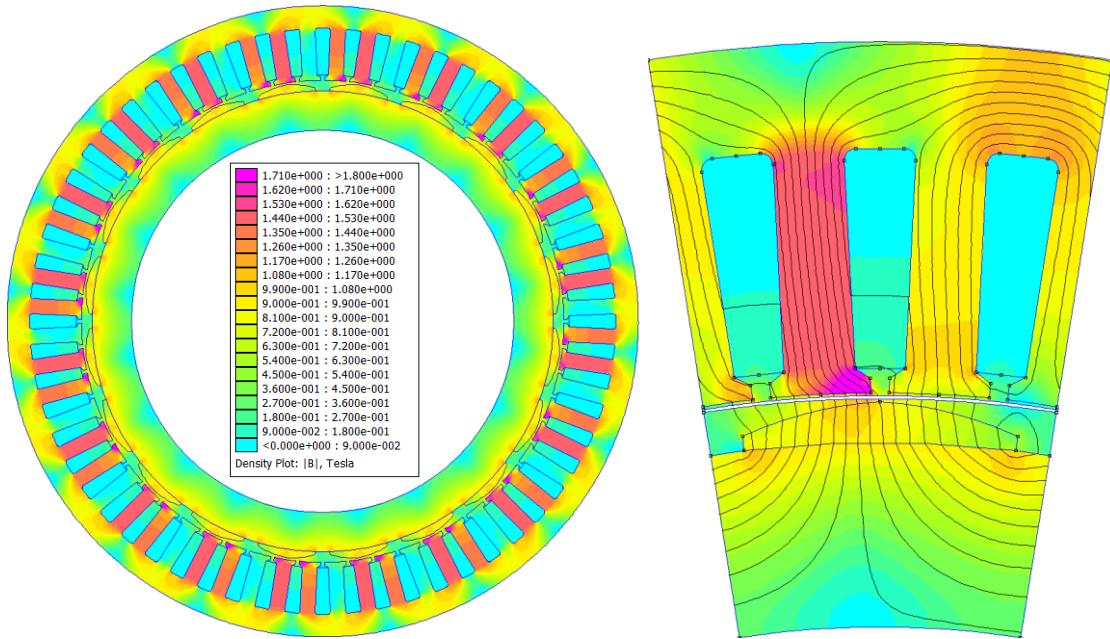
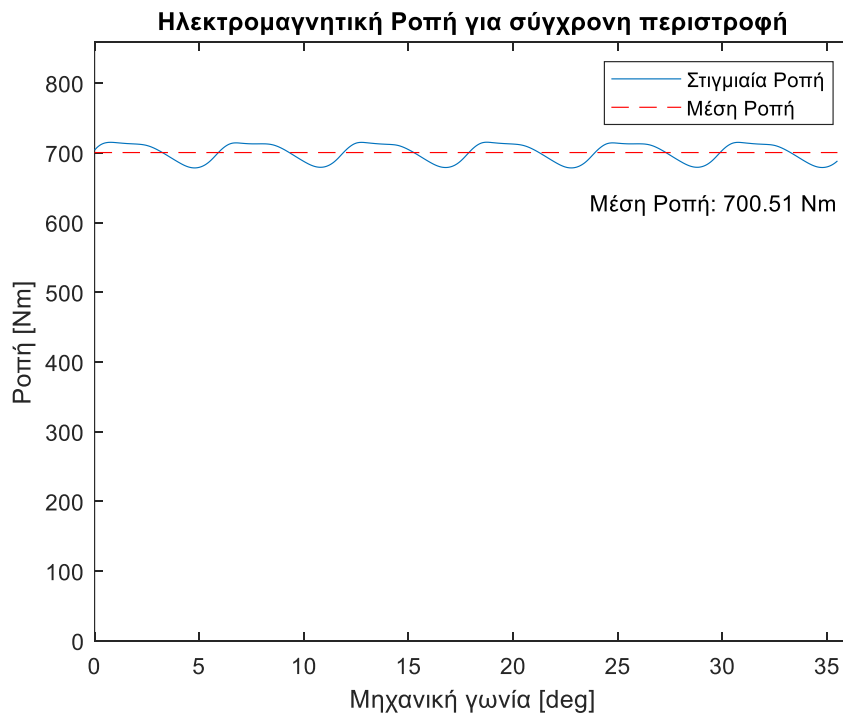
### 6.1.3 Υπερφόρτιση ( $9.5 \text{ A/mm}^2$ )

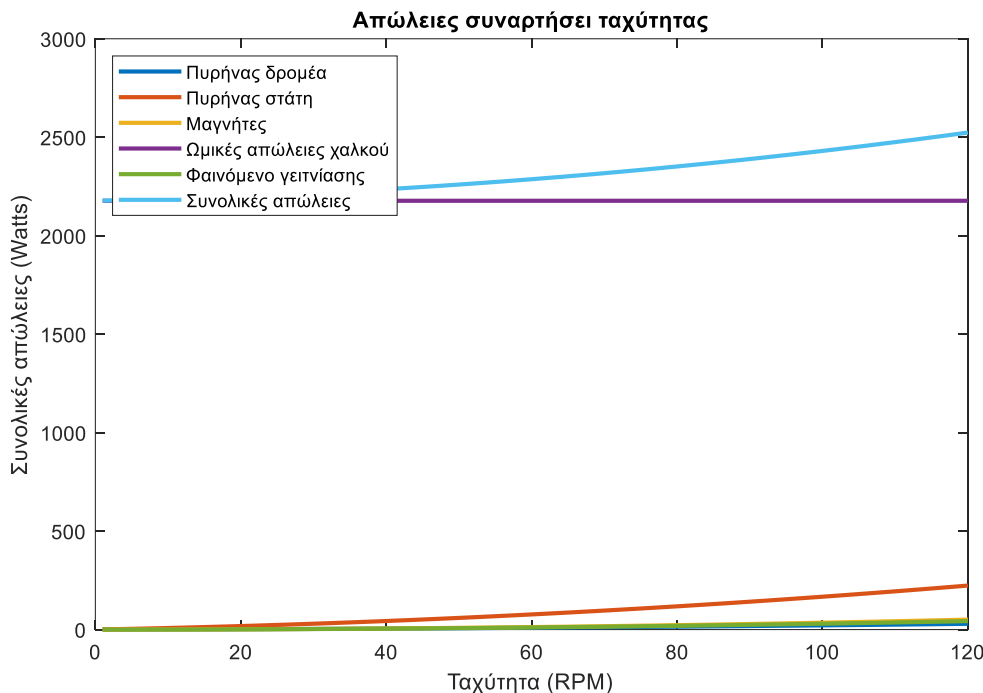
Για πολύ σύντομα χρονικά διαστήματα και σε ακραία σενάρια φορτίσεων του θαλάμου ο κινητήρας θα κληθεί να παράξει  $700 \text{ Nm}$  ροπής κατά το μεταβατικό την επιτάχυνσης του θαλάμου. Τονίζεται η μικρή χρονική διάρκεια σε κατάσταση υπερφόρτισης γιατί μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση στα τυλίγματα. Η υπερθέρμανση είναι μια σημαντική απειλή για τους μαγνήτες καθώς είναι ευαίσθητοι σε υψηλές θερμοκρασίες και μπορεί να υποστούν μόνιμη απομαγνήτιση.

Ακολουθούν, τα διαγράμματα κατανομής του πεδίου, η κυματομορφή της ροπής και ο υπολογισμός των απωλειών.

Πίνακας 6.5: Τεχνικά στοιχεία της μηχανής κατά την λειτουργία σε υπερφόρτιση

Λειτουργία Υπερφόρτισης	
Ονομαστική πυκνότητα ρεύματος άυλακος	9.5 A/mm <sup>2</sup>
Ενεργός πυκνότητα ρεύματος (fillfactor=0.45)	4.28 A/mm <sup>2</sup>
Ρεύμα φάσης	19.73 A
Εσωτερική γωνία δ	97 deg
Μέση ροπή	700 Nm
Κυμάτωση ροπής	5.3%

Σχήμα 6.13: Κατανομή μαγνητικού πεδίου σε ολόκληρη την μηχανή και σε έναν πόλο της, κατά την λειτουργία σε υπερφόρτισης 9.5 (A/mm<sup>2</sup>)Σχήμα 6.14: Ροπή σε κατάσταση υπερφόρτισης (9.5 A/mm<sup>2</sup>)



Σχήμα 6.15: Απώλειες μηχανής σε λειτουργία υπερφόρτισης ( $9.5 \text{ A/mm}^2$ )

## 6.2 ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΗΧΑΝΗΣ

Η ανάλυση, όπως παρουσιάστηκε, επικεντρώνεται σε τρεις λειτουργικές καταστάσεις του κινητήρα: κενό φορτίο, ονομαστικό φορτίο, υπερφόρτιση. Με σκοπό να δοθεί μια πλήρης εικόνα των επιδόσεων και της λειτουργίας του για όλες τις ενδιάμεσες λειτουργικές καταστάσεις, κρίνεται απαραίτητο να παρουσιαστούν επιπρόσθετα διαγράμματα. Στην παρούσα υποενοότητα αποτυπώνονται διάφορα μεγέθη του κινητήρα στο επίπεδο ροπής – στροφών. Κάθε σημείο του επιπέδου αντιπροσωπεύει και μια λειτουργική κατάσταση του κινητήρα, δηλαδή να δουλεύει με  $x$  ΣΑΛ και να παράγει  $y$  Nm ροπής.

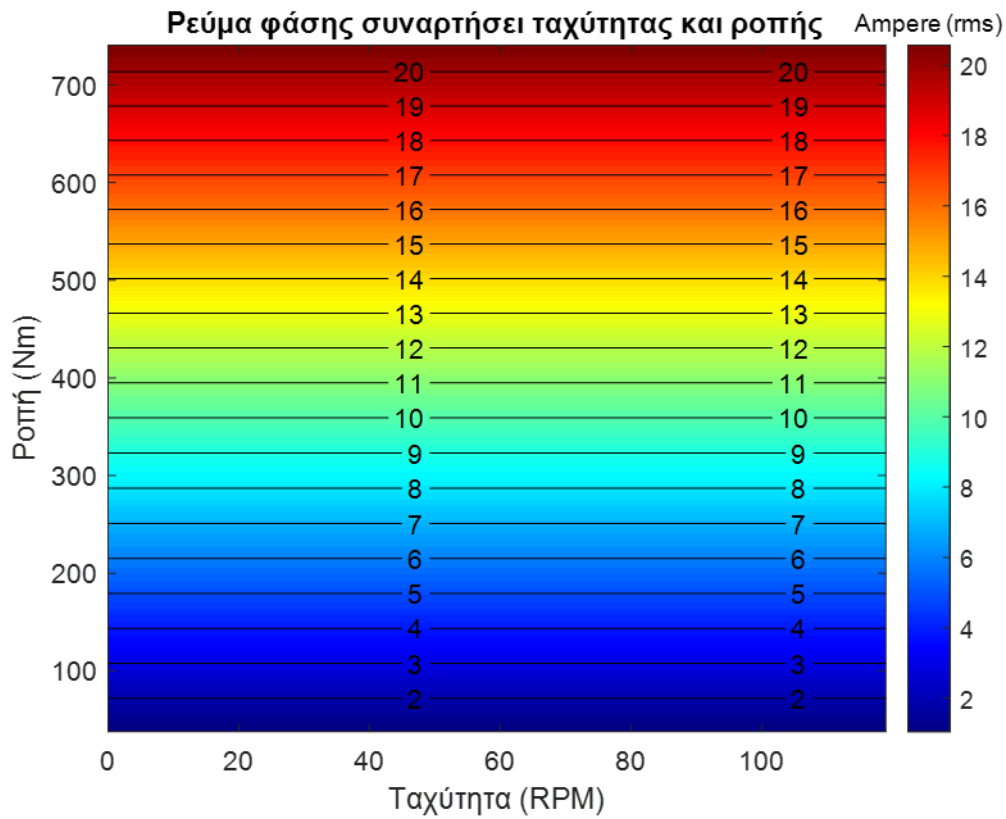
### 6.2.1 Χάρτης ρευμάτων και τάσεων

Στα σχήματα 6.16 και 6.17 φαίνονται οι τιμές τάσεων και ρευμάτων συναρτήσει των λειτουργικών καταστάσεων του κινητήρα.

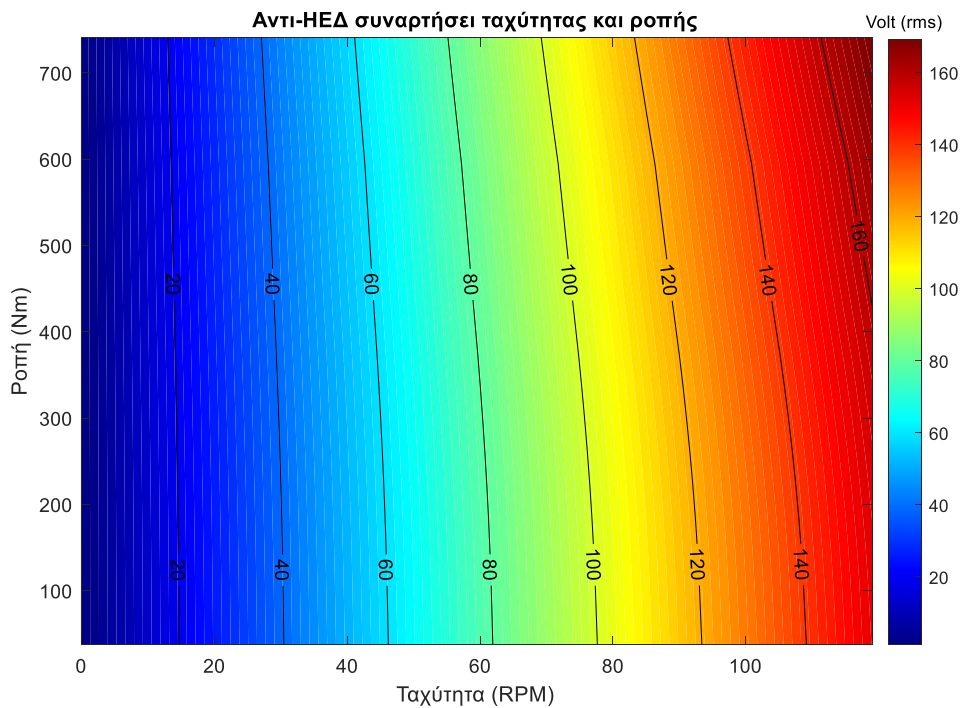
Αρχικά, για το σχήμα 6.16 παρατηρείται αντιστοίχιση των ρευμάτων με ροπές, γεγονός που σημαίνει ότι η ταχύτητα δεν επηρεάζει το ρεύμα 120ΣΑΛ. Αυτό συμβαίνει γιατί ο κινητήρας δεν θα χρειαστεί να περάσει τις 120 ΣΑΛ και να μπει στην περιοχή λειτουργίας εξασθένισης πεδίου. Αν ήταν επιθυμητή η αύξηση των στροφών πέρα από τις ονομαστικές θα έπρεπε να κατασταλεί το πεδίο του μαγνήτη με επιπλέον ρεύμα  $-I_d$  (Δεν υπάρχει ανάγκη για λειτουργία του κινητήρα σε στροφές μεγαλύτερες των ονομαστικών στην παρούσα εφαρμογή).

Στο σχήμα 6.17 παρατηρείται αντιστοίχιση των τάσεων με τις στροφές του κινητήρα. Η επαγόμενη τάση είναι αποτέλεσμα της χρονικής μεταβολής της πεπλεγμένης ροής στο τύλιγμα του στάτη. Όσο πιο γρήγορα στρέφεται ο στάτης τόσο μεγαλώνει ο ρυθμός μεταβολής της πεπλεγμένης ροής και έτσι η τάση αυξάνεται. Παρατηρείται επίσης, μικρή εξάρτηση και από την ροπή, η οποία αντιστοιχίζεται με της πυκνότητα ρεύματος του στάτη. Για την αύξηση

της ροπής είναι απαραίτητη η αύξηση του ρεύματος στάτη, γεγονός που ενισχύει την πεπλεγμένη ροή στο τύλιγμα και έτσι η επαγόμενη τάση αυξάνεται με αύξηση της ροπής.



Σχήμα 6.16: Χάρτης rms ρεύματος φάσης κινητήρα

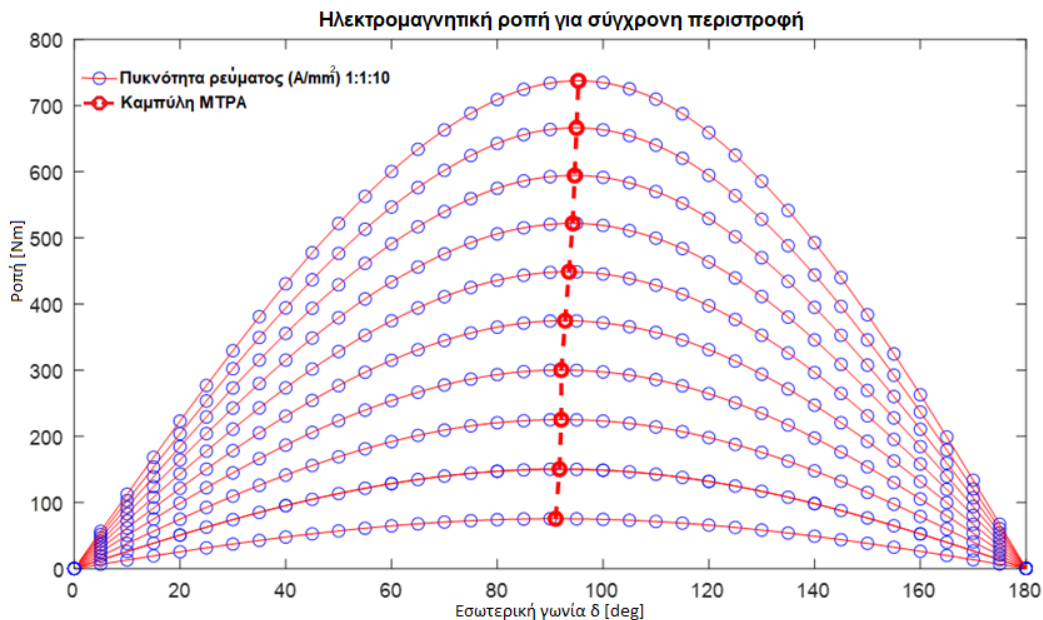


Σχήμα 6.17: Χάρτης φασικής τάσης κινητήρα

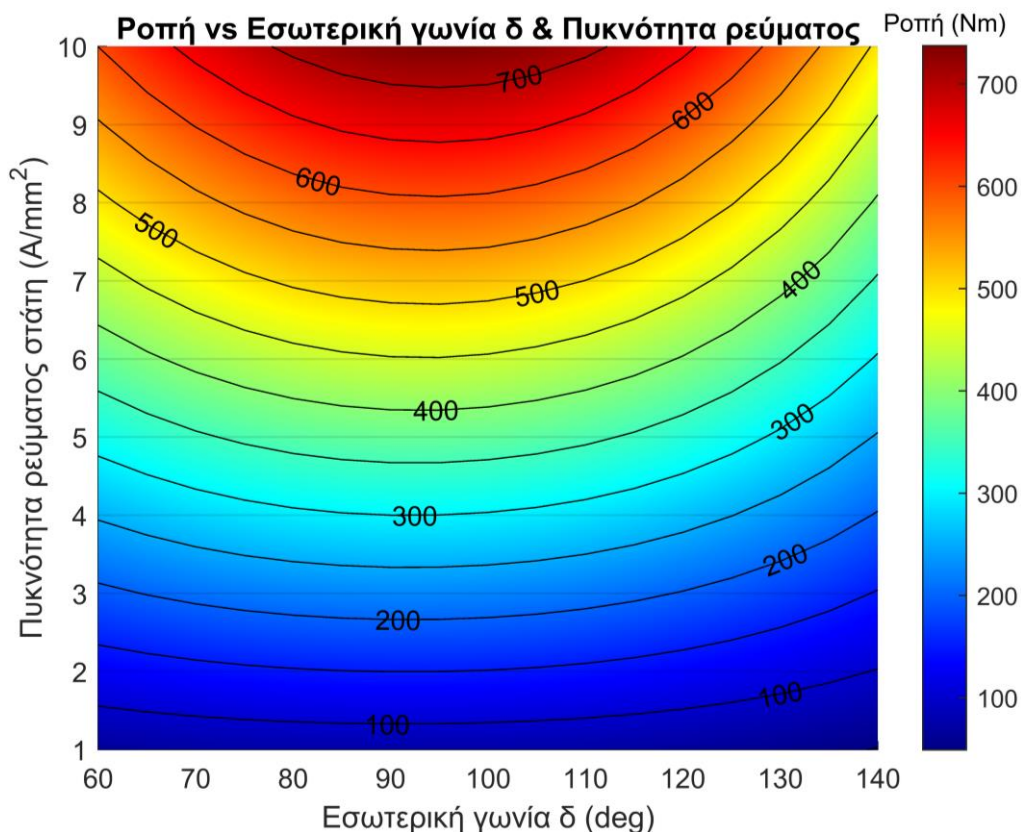


### 6.2.2 Καμπύλη μέγιστης ροπής ανά Ampere (ΜΤΡΑ)

Γίνονται αναλύσεις για διαφορετικές πυκνότητες ρεύματος από τα  $1\text{A}/\text{mm}^2$  μέχρι τα  $10\text{A}/\text{mm}^2$ . Για κάθε πυκνότητα ρεύματος γίνεται σύγχρονη ηλεκτρική περιστροφή για διαφορετική εσωτερική γωνία  $\delta$ . Έτσι, προκύπτουν οι καμπύλες ροπής-εσωτερικής γωνίας  $\delta$  (T- $\delta$ ) για διαφορετικές ρευματικές πυκνότητες. Τα σημεία μέγιστης ροπής κάθε καμπύλης T- $\delta$  σημειώνονται με έντονο κόκκινο και ενώνονται αποτυπώνοντας της καμπύλη ΜΤΡΑ.



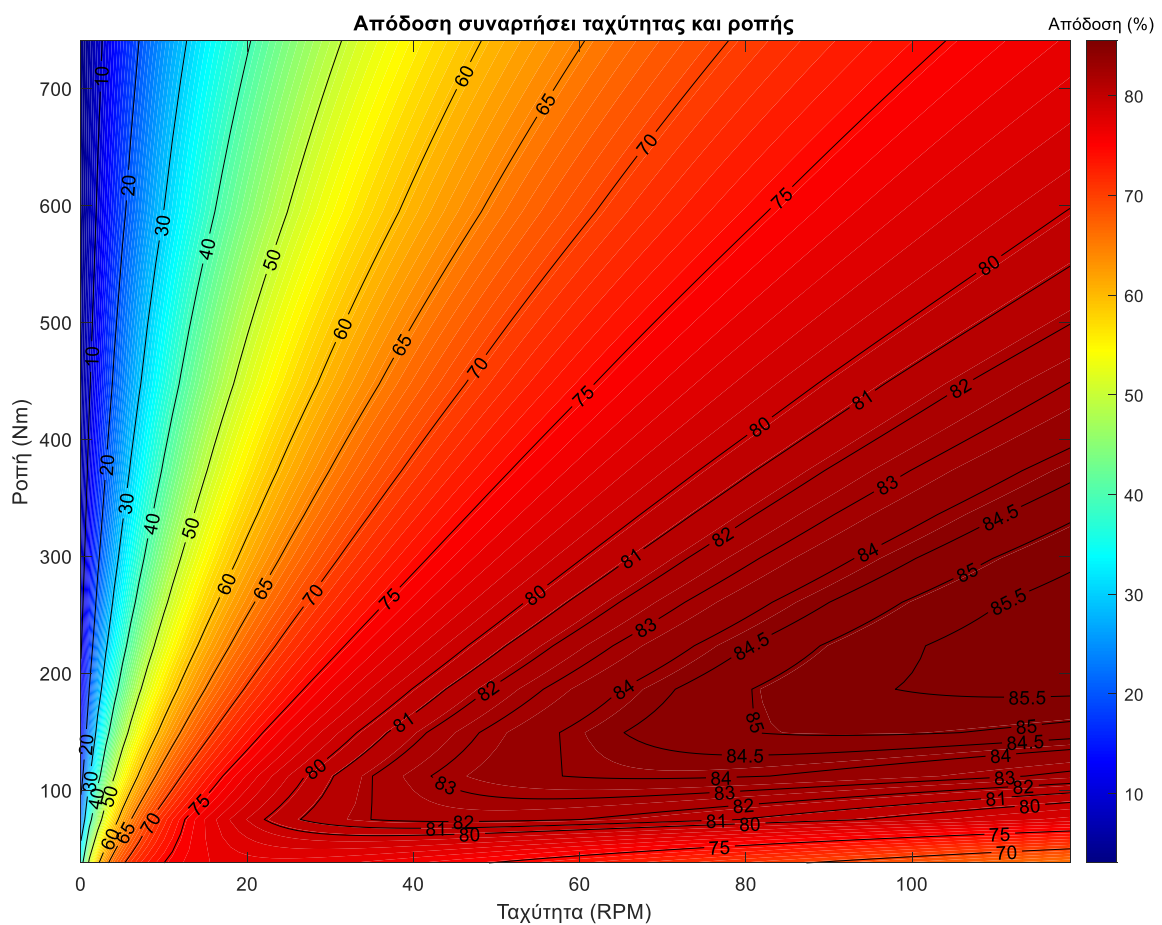
Σχήμα 6.18: Καμπύλες ροπής-εσωτερικής γωνίας  $\delta$  για διακριτές τιμές πυκνότητας ρεύματος και η καμπύλη ΜΤΡΑ



Σχήμα 6.19: Χάρτης ροπών για κάθε λειτουργική κατάσταση (J, $\delta$ )

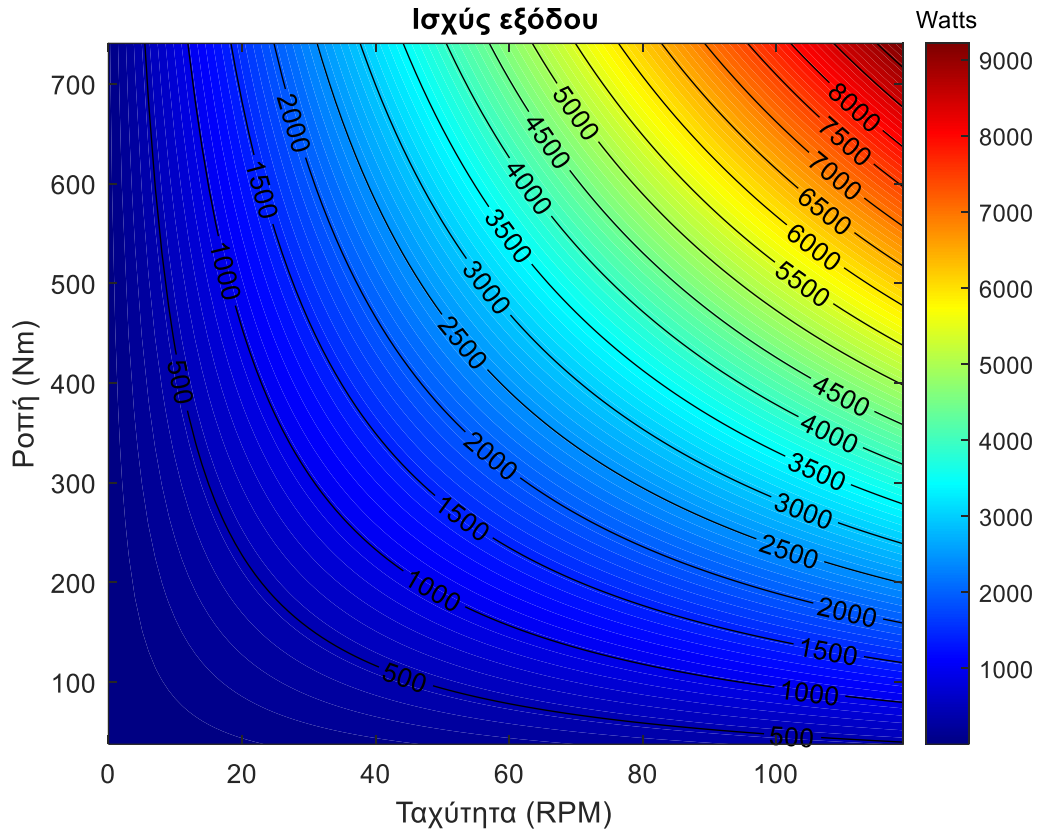
### 6.2.3 Χάρτης απόδοσης

Ο χάρτης απόδοσης αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα διαγράμματα του κινητήρα, καθώς αποτυπώνει τις περιοχές όπου ο κινητήρας επιτυγχάνει την μέγιστη αξιοποίηση της ενέργειας, μέσω της ελαχιστοποίησης των απωλειών. Η κατανόηση των περιοχών αυτών είναι σημαντική για την επιλογή στην εφαρμογή. Κατά την επιλογή ενός κινητήρα για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, είναι καίριο ο μηχανικός να γνωρίζει σε ποιο λειτουργικό σημείο (ποιες στροφές και με ποια ροπή) θα λειτουργεί συχνότερα ο κινητήρας. Επιλέγοντας έναν κινητήρα που παρουσιάζει βέλτιστη απόδοση σε αυτό το σημείο, μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας του συστήματος. Στην παρούσα εφαρμογή όπως προκύπτει από το σχήμα 3.10, ο κινητήρας θα λειτουργεί συχνότερα στο κατακόρυφο ευθύγραμμο τμήμα που ορίζεται από τα σημεία (120ΣΑΛ, 0Nm) και (120 ΣΑΛ, 300Nm).

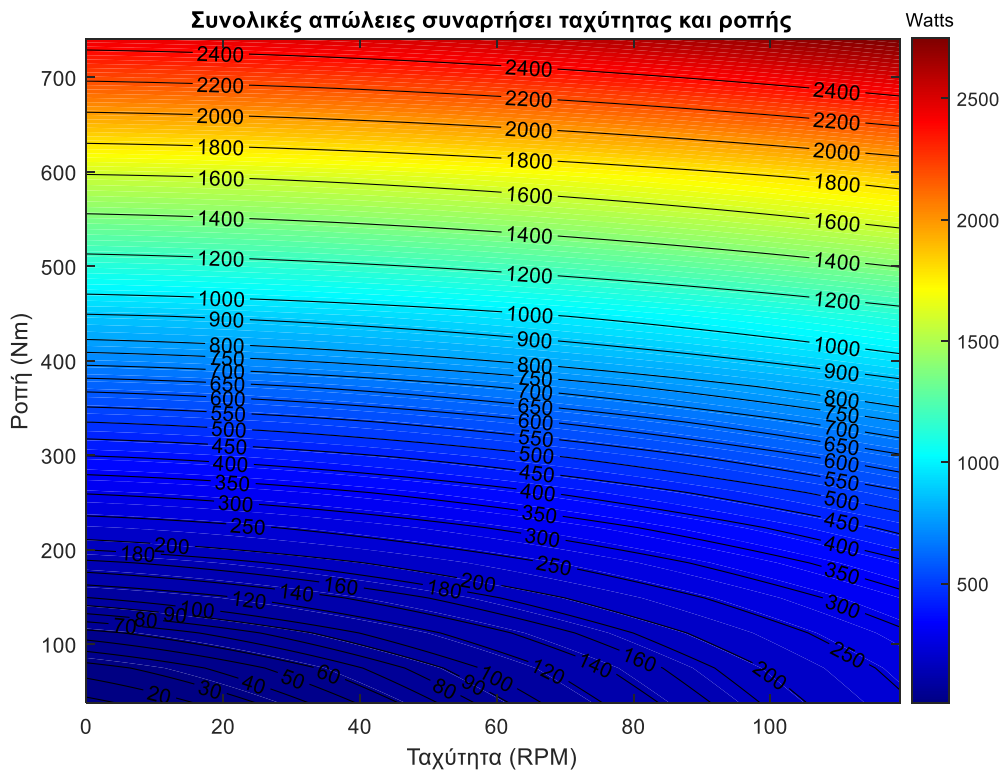


**Σχήμα 6.20:** Χάρτης απόδοσης μηχανής

Τέλος, παρουσιάζονται τα διαγράμματα ισχύος εξόδου και συνολικών απωλειών για κάθε λειτουργική κατάσταση.



Σχήμα 6.21: Χάρτης ισχύος εξόδου κινητήρα



Σχήμα 6.22: Χάρτης συνολικών απωλειών κινητήρα



## ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 7.1 ΣΥΝΟΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε αναλυτικά η διαδικασία σχεδίασης μιας ηλεκτρικής μηχανής μονίμων μαγνητών από το πρωταρχικό στάδιο της εξέτασης του προβλήματος μέχρι την τελική διαμόρφωση της. Κατά την διαδικασία έγινε πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση του δρομέα δύο σταδίων: μέσω του μετώπου Pareto και αντικειμενικής συνάρτησης. Τέλος, παρουσιάστηκαν τα χαρακτηριστικά επίδοσης του τελικού κινητήρα και επιβεβαιώθηκε η επάρκεια του για την εφαρμογή.

### 7.2 ΚΥΡΙΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, η προκείμενη έρευνα πραγματοποιείται την αναλυτική διαδικασία σχεδίασης μιας Σύγχρονης Μηχανής Μονίμων Μαγνητών. Τα δεδομένα υποδεικνύουν ότι η απόδοση αυτής της μηχανής κατά τον κύκλο λειτουργίας κυμαίνεται στο 80% ενώ στην ονομαστική λειτουργία είναι 85%, ενός σημαντικά αυξημένου ποσοστού σε σχέση με τους υδραυλικούς μηχανισμούς, οι οποίοι εμφανίζουν μέση απόδοση της τάξης του 60%. Αυτό υπογραμμίζει την υπεροχή του μηχανικού ανελκυστήρα χωρίς μειωτήρα. Επίσης, τα βασικά συμπεράσματα που αναδύονται από την παρούσα έρευνα είναι τα ακόλουθα:

- Η ανάλυση των απαιτήσεων στο πεδίο εφαρμογής των μηχανικών ανελκυστήρων αποτέλεσε θεμέλιο για τον στοχευμένο σχεδιασμό του κινητήρα.
- Η χρήση ενός πυκνού πλέγματος στη ζώνη του διακένου αποδείχθηκε κρίσιμης σημασίας για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων στην ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων. Αντιθέτως, η πλεγματοποίηση των υπολοίπων τμημάτων της μηχανής δεν φαίνεται να έχει την ίδια επιρροή στην συνολική αξιολόγηση, και επομένως μπορεί να πραγματοποιηθεί με μεγαλύτερη ευελιξία ως προς τη διακριτοποίηση των στοιχείων, ώστε να εξοικονομηθεί υπολογιστικός χρόνος.
- Η καμπυλότητα του μαγνήτη σε συνδυασμό με το πλάτος του και τον τρόπο μαγνήτισης του (παράλληλα ή ακτινικά) αποτελεί παράγοντα ουσιαστικής σημασίας στη διαμόρφωση του αρμονικού περιεχομένου του πεδίου. Αυτό το φαινόμενο συνδέθηκε άμεσα με κρίσιμα μεγέθη όπως η κυμάτωση της ροπής, επηρεάζοντας την, τόσο σε επίδοση όσο και στη συμπεριφορά της σε ανώτερες αρμονικές.
- Η γραφική απεικόνιση της ευαισθησίας των μελετηθέντων παραμέτρων του μαγνήτη ανέδειξε τη σημασία της οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων. Η αποτύπωση σε διάγραμμα διευκολύνει τον σχεδιαστή να αντιληφθεί πώς οι μεταβολές σε μία παράμετρο επηρεάζουν τα αποτελέσματα.

- Ο επιφανειακός μαγνήτης αποτελεί την βέλτιστη επιλογή σε σύγκριση με τις εναλλακτικές γεωμετρίες που εξετάστηκαν στις εφαρμογές μηχανικών ανελκυστήρων χωρίς μειωτήρα.
- Αναδείχθηκε η τεχνική αξιολόγησης βασισμένη στη μεθοδολογία “ανά λαμαρίνα”, η οποία, παρέχει την δυνατότητα δημιουργίας πολλών μηχανών (με διαφορετικό ενεργό μήκος) βασισμένες στην ίδια γεωμετρία λαμαρίνας, περιορίζοντας την ανάγκη για πολλαπλές μαγνητοστατικές αναλύσεις.
- Η μεθοδολογία ανάλυσης των κινητήρων ενσωματώθηκε επιτυχώς σε μια διαδικασία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης δύο σταδίων (εξέταση με το μέτωπο Pareto και στην συνέχεια με αντικειμενική συνάρτηση).
- Στο πλαίσιο αυτής της απολύτως αντικειμενικής διαδικασίας, η υποκειμενικότητα εισήχθη μόνο κατά την επιλογή των βαρών στα διάφορα κριτήρια βελτιστοποίησης. Η διερεύνηση κατάλληλων συντελεστών (βαρών) για την αντικειμενική συνάρτηση αποτέλεσε σημαντικό βήμα, αφού έστρεψε την πορεία στα σημαντικότερα κριτήρια κατά την κρίση του σχεδιαστή.
- Η εκμετάλλευση της συμπεριφοράς του κινητήρα σε θερμικό επίπεδο, διαχωρίζοντας τις περιοχές υπερφόρτισης και ονομαστικής λειτουργίας επέτρεψε τον περιορισμό στις διαστάσεις του κινητήρα.

### 7.3 Η ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗ

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, εντοπίστηκαν σημεία πρωτοτυπίας που αναδεικνύουν την επιστημονική αξία της. Αυτά είναι τα εξής:

- Λεπτομερής ανάλυση του μηχανικού μοντέλου που αποσκοπεί την εξαγωγή κρίσιμων παραμέτρων και χαρακτηριστικών της λειτουργίας του κινητήρα.
- Αναλυτική αναφορά στις επιλογές των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν, με έμφαση στο υλικό του μόνιμου μαγνήτη καθώς και τις επιλογές μαγνήτισής τους (παράλληλη και ακτινική).
- Ανάπτυξη μοντέλου παραμετροποιημένης σχεδίασης που δημιουργεί και προσομοιώνει με ικανοποιητική ακρίβεια και ταχύτητα την σύγχρονη μηχανή μόνιμων μαγνητών σε διαφορετικές λειτουργικές καταστάσεις και παράγει πληθώρα αναλυτικά διαγράμματα.
- Ανάλυση ευαισθησίας της διαδικασίας αξιολόγησης των μηχανών, εστιάζοντας στα κριτήρια που επηρεάζουν τον χρόνο και την ακρίβεια των προσομοιώσεων. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στον αριθμό των στοιχείων του πλέγματος, στα οποία διαιρείται η γεωμετρία της μηχανής και στον αριθμό των στιγμιότυπων που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση της σύγχρονης περιστροφής.
- Ανάπτυξη μεθοδολογίας πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης δύο σταδίων. Στο πρώτο στάδιο, από ένα αρχικό σύνολο λαμαρινών, μέσω του μετώπου Pareto επιλέγεται ένα

υποσύνολο. Στο επόμενο στάδιο, το σύνολο των λαμαρινών μετατρέπεται σε κινητήρες και μέσω αντικειμενικής συνάρτησης, προκύπτει η τελική επιλογή κινητήρα.

- Εφαρμογή των αλγορίθμων βελτιστοποίησης σε τρεις διαφορετικούς τύπους δρομέα: με επιφανειακό δρομέα, με εσωτερικό δρομέα και με επιφανειακό μαγνήτη σε έκτυπο δρομέα.
- Ανάπτυξη μεθοδολογία για οπτικοποίηση της κατανομής των απωλειών στο εσωτερικό του κινητήρα.

#### 7.4 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Η τρέχουσα έρευνα αποκαλύπτει διάφορα ζητήματα που προσφέρονται για περαιτέρω διερεύνηση και ανάλυση:

- Η διεξοδική θερμική ανάλυση της επιλεγμένης γεωμετρίας, προκειμένου να κατανοηθεί εάν υπάρχουν πιθανά θερμικά ζητήματα καθ' όλη τη διάρκεια των κύκλων λειτουργίας και κυρίως κατά τις υπερφορτίσεις.
- Η υλοποίηση και η πρακτική αξιολόγηση της προτεινόμενης γεωμετρίας που θεωρείται ως η βέλτιστη, με πειραματική διαδικασία για την επιβεβαίωση της απόδοσης και των λειτουργικών χαρακτηριστικών της.
- Η εξέταση εναλλακτικών διαμορφώσεων τυλίγματος, όπως το συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα (που ενδεχομένως μειώσει τις απώλειες χαλκού), και η σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα της τρέχουσας έρευνας.





## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ε. Δούμος, Ι. Ευθυμίου και Μ. Κοτζαμπάσης, *Ανελκυστήρες*. Αθήνα: Οργανισμός Εκδόσεως Διδακτικών Βιβλίων, 2008.
- [2] "Γενικά περί ανελκυστήρων," Γκάμαρης Θαλαμοτεχνική. Available: <https://www.gth.gr/genika-peri-anelkystiron/> (Accessed: 06 August 2023).
- [3] Π. Δαλαμάρας, "Μελέτη ανελκυστήρων προσώπων με την βοήθεια υπολογιστή," Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2011.
- [4] "Επιθεώρηση/Πιστοποίηση Ανελκυστήρων," ΦΕΚ2604/Β/2008.
- [5] "Nextlevel Ανελκυστήρες / Ασανσερ Kleemann Partner" NEXTLEVEL. Available: <https://www.nextlevel.gr/> (Accessed: 06 August 2023).
- [6] G. Zhang, G. Wang, N. Zhao, and D. Xu, *Permanent Magnet Synchronous Motor Drives for Gearless Traction Elevators, 1st ed.* Singapore, 2022.
- [7] S. J. Chapman, *Ηλεκτρικές Μηχανές*, 4η Έκδοση, Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλας, 2009.
- [8] G. Wang, J. Qi, J. Xu, X. Zhang, and D. Xu, "Antirollback Control for Gearless Elevator Traction Machines Adopting Offset-Free Model Predictive Control Strategy," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 10, pp. 6194–6203, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/tie.2015.2431635>
- [9] Η. Αντωκακάκης, Γ. Βαμβακάς, "Σχεδίαση Ηλεκτρικού Κινητήρα για Χρήση σε Όχημα Εξοικονόμησης Ενέργειας", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2019.
- [10] Δ. Γκίτσος, "Εύρωστος σχεδιασμός κινητήρα μονίμων μαγνητών για ηλεκτρικό όχημα", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2020.
- [11] D.-C. Pang, Z.-J. Shi, P.-X. Xie, H.-C. Huang, and G.-T. Bui, "Investigation of an inset micro permanent magnet synchronous motor using soft magnetic composite material," *Energies*, vol. 13, no. 17, p. 4445, 2020.
- [12] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors*. New York, NY: Springer New York, 2010.
- [13] D. C. Jiles, "Recent advances and future directions in magnetic materials," *Acta Mater*, vol. 51, pp. 5907–5939, 2003.

- [14] B. D. Cullity and C. D. Graham, *Introduction to Magnetic Materials*. New Jersey, US: Wiley, 2008.
- [15] Roskill Information Services Ltd. and Arnold Magnetic Technologies, "Permanent Magnets: the Demand for Rare Earths," presented at the 8th International Rare Earths Conference, November 2012.
- [16] H. Xiong, J. Zhang, M. W. Degner, C. Rong, F. Liang, and W. Li, "Permanet magnet demagnetization test fixture design and validation," in 2015 *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2015.
- [17] Arnold Magnetic Technologies Corp., "Material N42M, Rev. 210607," Rochester, NY, Technical Data Sheet, 2023.
- [18] "Radial Magnetization: Finite Element Method Magnetics," *Femm.info*. [Online]. Available: <https://www.femm.info/wiki/RadialMagnetization>. [Accessed: 06-Aug-2023].
- [19] Cablel Hellenic Cables, "Enamelled Copper Wires," Brochure, 2023.
- [20] J. Pyrhonen, T. Jokinen, and V. Hrabovcova, *Design of rotating electrical machines: Pyrhönen/design*, 2nd ed. Nashville, TN: John Wiley & Sons, 2014.
- [21] Π. Ροβολής, "Μοντελοποίηση μαγνητικών υλικών για βελτιστοποίηση κατασκευής και λειτουργίας ηλεκτρικών μηχανών", Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2010.
- [22] C. D. Manolopoulos, M. F. Iacchetti, A. C. Smith, P. Miller, and M. Husband, "Litz wire loss performance and optimization for cryogenic windings," *IET Electr. Power Appl.*, 2022.
- [23] S. Meier, "Slot fill factor," *Emetor.com*. [Online]. Available: <https://www.emetor.com/glossary/slot-fill-factor/>. [Accessed: 07-Aug-2023].
- [24] F. Meier, "Permanent-Magnet Synchronous Machines with Non-Overlapping Concentrated Windings for Low-Speed Direct-Drive Applications," Διδακτορική Διατριβή, KTH, Στοκχόλμη, 2008.
- [25] K. Hameyer and R. Belmans, *Numerical Modelling and Design of Electrical Machines and Devices*. Southampton, Boston: WIT Press, 1999.
- [26] S. Sathyan, U. Aydin, and A. Belahcen, "Acoustic noise computation of electrical motors using the boundary element method," *Energies*, vol. 13, no. 1, p. 245, 2020.
- [27] "Sliding band motion model for electric machines:Finite Element Method Magnetics," *Femm.info*. [Online]. Available: <https://www.femm.info/wiki/SlidingBand>. [Accessed: 07-Aug-2023].

- [28] Μ. Μπενιακάρ, "Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση κινητήρων με θεώρηση των απωλειών των μόνιμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης", Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2014.
- [29] A. Arkkio, "Analysis of Induction Motors Based on the Numerical Solution of the Magnetic Field and Circuit Equations," Διδακτορική Διατριβή, Helsinki University of Technology, Espoo, 1987.
- [30] D. Meeker, "Finite Element Method Magnetics User's Manual," 4.2 ed., 2015. [Online]. Available: <http://www.femm.info/wiki/HomePage>. [Accessed: 06-Aug-2023].
- [31] O. Ocak and M. Aydin, "An innovative semi-FEA based, variable magnet-step-skew to minimize cogging torque and torque pulsations in permanent magnet synchronous motors," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 210775–210783, 2020.
- [32] K. Laskaris and A. Kladas, "Permanent-magnet shape optimization effects on synchronous motor performance," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 9, pp. 3776–3783, 2011.
- [33] "Rotating losses in a surface mount permanent magnet motor," *Femm.info*. [Online]. Available: <https://www.femm.info/wiki/SPMLoss>. [Accessed: 09-Aug-2023].
- [34] Κ. Λάσκαρης, "Σχεδιασμός Και Κατασκευή Κινητήρων Μονίμων Μαγνητών Για Ηλεκτρικά Οχήματα", Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2012.