



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Σχεδίαση και βελτιστοποίηση μηχανών μονίμων μαγνητών με βάση τα χαρακτηριστικά της σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χαράλαμπος – Ραφαήλ Χ. Βασιλόπουλος

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Σχεδίαση και βελτιστοποίηση μηχανών μονίμων μαγνητών με βάση τα χαρακτηριστικά της σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χαράλαμπος – Ραφαήλ Χ. Βασιλόπουλος

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 13^η Οκτωβρίου 2020.

.....
Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αντώνιος Αντωνόπουλος

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

.....

Χαράλαμπος – Ραφαήλ Χ. Βασιλόπουλος

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

Copyright © Χαράλαμπος – Ραφαήλ Βασιλόπουλος, 2020.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία μελετά την επίδραση διαφορετικών σιδηρομαγνητικών υλικών πυρήνα στα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης των σύγχρονων μηχανών μονίμων μαγνητών, μέσω των αποτελεσμάτων της ανάλυσης ευαισθησίας γεωμετρικών παραμέτρων που διεξάγεται για κάθε υλικό.

Αρχικά, παρουσιάζεται μια σύντομη επισκόπηση της τεχνολογίας των ηλεκτρικών μηχανών που χρησιμοποιούνται συνήθως στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης, ενώ επιλέγεται η διαμόρφωση των σύγχρονων μηχανών επιφανειακών μονίμων μαγνητών που θα μελετηθεί παρακάτω. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα προς μελέτη σιδηρομαγνητικά υλικά (SiFe 3%, CoFe, NiFe, SiFe 6.5%), ενώ ακόμα παρουσιάζονται πρακτικά ζητήματα που προκύπτουν κατά την επεξεργασία των λαμαρινών για την κατασκευή πυρήνων. Ακόμα, αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο και οι μηχανισμοί που συνιστούν τις απώλειες πυρήνα, παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα σημαντικότερα μοντέλα απωλειών πυρήνα που έχουν προταθεί έως σήμερα στη βιβλιογραφία και επιλέγεται το καταλληλότερο, ενώ υλοποιείται εργαλείο υπολογισμού των συντελεστών υστέρησης και δινορρευμάτων. Κατά την υλοποίηση του επιλεγμένου μοντέλου απωλειών πυρήνα, μελετώνται και συγκρίνονται οι γεωμετρικοί τόποι μεταβολής του διανύσματος της μαγνητικής επαγωγής στα διάφορα σημεία του στάτη, για κάθε υλικό.

Μετά την προκαταρκτική σχεδίαση μηχανών μέσω αναλυτικών εξισώσεων για κάθε υλικό, ακολουθεί η χρήση αλγορίθμων παραμετρικής σχεδίασης και ανάλυσης γεωμετριών μηχανών, προκειμένου να δημιουργηθεί μια «δεξαμενή» διαθέσιμων μηχανών. Η ανάλυση ευαισθησίας παράγει περί τις 3240 εναλλακτικές γεωμετρίες για κάθε υλικό και ο στόχος της είναι να προσδιοριστούν οι βέλτιστες μηχανές βάση των κριτηρίων των ελάχιστων συνολικών απωλειών, της μέγιστης απόδοσης και της ελάχιστης μάζας. Βάση των βέλτιστων διατομών του συμβατικού ατσαλιού, υπολογίζονται οι μηχανές αναφοράς των υπολοίπων υλικών, μέσω προσαρμογής του ενεργού μήκους των βέλτιστων διατομών στην επιθυμητή ροπή, το οποίο και αποτελεί συνήθη τεχνική απλούστευσης της διαδικασίας βελτιστοποίησης σε επίπεδο βιομηχανίας.

Τέλος, συγκεντρώνονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα επίδοσης και απόδοσης των βέλτιστων μηχανών για κάθε υλικό προ και μετά βελτιστοποίησης, και εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με τις σχεδιαστικές τάσεις που προκύπτουν από τη χρήση του κάθε υλικού, καθώς και σχετικά με την καταλληλότερη μέθοδο βελτιστοποίησης για κάθε υλικό.

Η ανάλυση πραγματοποιείται μέσω του λογισμικού MATLAB σε συνδυασμό με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων FEMM.

Λέξεις κλειδιά: Σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών, σιδηρομαγνητικά υλικά, απώλειες πυρήνα, συντελεστές απωλειών πυρήνα, παραμετροποιημένη σχεδίαση, ανάλυση ευαισθησίας, σχεδιαστικές τάσεις, σχεδιαστικές οδηγίες.

ABSTRACT

The present thesis investigates the effects of different electrical steels on the performance and efficiency characteristics of permanent magnet synchronous machines (PMSM), through the results of the sensitivity analysis of geometric parameters performed for each material.

Firstly, a short overview of the electric motors commonly used in modern electrical drives is presented, while the configuration of surface permanent magnets is selected and studied. Then, the electrical steels to be studied are presented and compared (SiFe 3%, CoFe, NiFe, SiFe 6.5%), and the manufacturing effects on electrical steels are also presented. Furthermore, the physics and mechanisms behind iron losses are analyzed. The most important models of iron losses that have been proposed in the literature are presented and compared, and the most appropriate one is selected, while a computational tool for calculating hysteresis and eddy current loss coefficients is implemented. During the implementation of the selected iron loss model, the loci of the magnetic induction vector at different points of the stator during a synchronous rotation, are studied and compared for each material.

The preliminary design stage is followed by the use of algorithms for parametric design and analysis of the motors, in order to create a pool of available motors. The sensitivity analysis produces about 3240 different geometries for each material and its purpose is to determine the optimal geometry based on the criteria of minimum total losses, maximum efficiency and minimum mass, as well as to study the resulting design trends for each material. Based on the optimal cross sections of conventional steel, the reference machines of the other materials are calculated, by extruding the active length to the required torque, which is a common technique for simplifying the optimization process at the industry.

Finally, the results regarding the performance and the efficiency of the optimal machines for each material before and after optimization are summarized and compared, and conclusions are drawn about the design trends and guidelines for each material, as well as about the best optimization method for each material.

The entire analysis is carried out using MATLAB coupled with the finite elements software FEMM.

Keywords: Permanent magnet synchronous machines (PMSM), electrical steels, iron losses, iron loss coefficients, parametric design, sensitivity analysis, design trends, design guidelines.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Με την ολοκλήρωση της λοιπόν, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους βοήθησαν κατά την εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Καθηγητή κ. Αντώνιο Κλαδά, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της εργασίας, την ευκαιρία συνεργασίας με το ερευνητικό παράρτημα της Tesla στον Δημόκριτο, καθώς και για την στήριξη του και την πάντα πρόθυμη καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Τον ευχαριστώ ακόμα διότι από τα πρώτα προπτυχιακά μαθήματα κατάφερε να μου μεταδώσει το πάθος του για το αντικείμενο των ηλεκτρικών μηχανών, δίνοντας μου πολύτιμες γνώσεις αλλά κυρίως έμπνευση και κίνητρο να ασχοληθώ συστηματικά και εγώ με το αντικείμενο.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω ειλικρινά τον συνεπιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Κωνσταντίνο Μπούρχα, Sr. Motor Design Engineer στην Tesla Greece, τόσο για την αμέριστη συνεισφορά του στην εργασία αυτή, μέσω των συμβουλών του και των συζητήσεων που είχαμε, όσο και για την έμπνευση που μου έδωσε να ασχοληθώ με την μελέτη των σιδηρομαγνητικών υλικών. Χωρίς την οργάνωση του, την υπομονή του και την εμπειρία του, η εργασία αυτή θα ήταν πολύ διαφορετική, και σίγουρα δε θα ένιωθα τόση πληρότητα με την ολοκλήρωση της.

Ευχαριστώ τους γονείς μου και την αδερφή μου για την συμπαράσταση και την κατανόηση τους όλα τα χρόνια των σπουδών μου· χωρίς εκείνους, είναι σίγουρο πως δεν θα είχα καταφέρει όσα ήθελα. Ευχαριστώ, ακόμα, τον Χρήστο για τη στήριξη του και τις στιγμές που έχουμε μοιραστεί, τον Τάκη που είναι δίπλα μου εδώ και τόσα χρόνια, καθώς και τους συμφοιτητές και σύντομα συναδέλφους, Γιώργο και Δημήτρη, που έκαναν ευχάριστες τις ατελείωτες ώρες διαβάσματος που περάσαμε μαζί.

Τέλος, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω με τον πιο ειλικρινή τρόπο τα δυο άτομα που με στήριξαν κάθε ημέρα και ώρα του αγώνα μου. Την κοπέλα μου Αλεξάνδρα, στην οποία αφιερώνω την παρούσα εργασία, η οποία με βοήθησε να σταθώ στα πόδια μου, όταν το χρειάστηκα, και έμεινε δίπλα μου σε όλο το ταξίδι, και τον ξάδερφό μου, αδελφικό φίλο και συνάδελφο Αντώνη, ο οποίος δεν σταμάτησε ούτε λεπτό να πιστεύει σε μένα και να με στηρίζει με όλο του το είναι. Εύχομαι η ζωή να με κρατήσει κοντά σε αυτά τα άτομα, και να τους ανταποδώσει όσα μου προσέφεραν και συνεχίζουν να μου προσφέρουν.

Χάρης Βασιλόπουλος

Οκτώβριος 2020

Αφιερώνεται στην Αλεξάνδρα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	17
1.1	Σκοπός της εργασίας.....	17
1.2	Δομή της εργασίας	17
2.	ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗ.....	19
2.1	Σύστημα ηλεκτρικής κίνησης.....	19
2.2	Ηλεκτρικές μηχανές.....	20
2.2.1	Μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης.....	21
2.2.2	Μηχανές επαγωγής.....	21
2.2.3	Σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών.....	22
3.	ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	24
3.1	Silicon-iron (SiFe)	27
3.2	Cobalt Iron alloy (CoFe).....	29
3.3	Nickel Iron alloy (NiFe).....	30
3.4	Σύγκριση σιδηρομαγνητικών υλικών.....	31
3.5	Πειραματικές μέθοδοι υπολογισμού μαγνητικών ιδιοτήτων σιδηρομαγνητικών λαμαρινών 31	
3.6	Επιπτώσεις κατασκευαστικών διεργασιών στις μαγνητικές ιδιότητες των σιδηρομαγνητικών υλικών.....	32
3.6.1	Κοπή λαμαρινών	32
3.6.2	Συναρμολόγηση λαμαρινών πυρήνα και μηχανής	33
3.7	Νέες τάσεις και προκλήσεις στη σχεδίαση μηχανών	34
4.	ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΠΥΡΗΝΑ	36
4.1	Απώλειες υστέρησης.....	36
4.2	Απώλειες δινορρευμάτων	36
4.3	Μοντέλα απωλειών	37
4.3.1	Μοντέλα βασισμένα στην εξίσωση Steinmetz.....	37
4.3.2	Μοντέλα βασισμένα στη μέθοδο διαχωρισμού απωλειών	38
4.3.3	Μοντέλα μαγνητικής υστέρησης.....	39
5.	ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ	40
5.1	Πάχος διακένου	40
5.2	Ειδική μαγνητική φόρτιση.....	40
5.3	Ειδική ηλεκτρική φόρτιση.....	41
5.4	Πυκνότητα ρεύματος τυλίγματος	41
5.5	Διαμόρφωση τυλιγμάτων	43
5.6	Σχέση εξόδου ηλεκτρικής μηχανής	45
5.7	Επιφάνεια διακένου	46
5.8	Συχνότητα λειτουργίας – Πόλοι μηχανών αναφοράς.....	47
5.9	Επιλογή διαστάσεων διαμέτρου διακένου και ενεργού μήκους μηχανής (D, L)	48
5.9.1	SiFe 3%.....	48

5.9.2	<i>CoFe</i>	50
5.9.3	<i>NiFe</i>	50
5.9.4	<i>SiFe 6.5%</i>	51
5.10	Εκτίμηση των χαρακτηριστικών στάτη	52
5.11	Έλεγχος ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης	53
5.12	Συνολικά αποτελέσματα προκαταρκτικής σχεδίασης	53
5.13	Εκτίμηση των χαρακτηριστικών δρομέα	54
6.	ΠΕΔΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	57
6.1	Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	57
6.1.1	<i>Επίλυση μαγνητοστατικών προβλημάτων</i>	57
6.1.2	<i>Οριακές συνθήκες</i>	59
6.2	Παραμετροποιημένη σχεδίαση γεωμετρίας	61
6.3	Ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης	62
6.4	Σχεδίαση στάτη	63
6.5	Σχεδίαση δρομέα	64
7.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΕΣΩ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .	66
7.1	Καμπύλη γωνίας ροπής $T - \delta$	66
7.2	Υπολογισμός μέσης ροπής και κυμάτωσης ροπής	66
7.3	Υπολογισμός μάζας μηχανής	67
7.4	Υπολογισμός απωλειών	67
7.4.1	<i>Απώλειες πυρήνα</i>	68
7.4.2	<i>Απώλειες χαλκού</i>	78
7.4.3	<i>Απώλειες μονίμων μαγνητών</i>	79
7.4.4	<i>Μηχανικές απώλειες</i>	81
7.5	Υπολογισμός απόδοσης	81
8.	ΟΡΙΣΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΗΧΑΝΩΝ SiFe 3%	82
8.1	Ανάλυση ευαισθησίας	82
8.2	Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας	84
8.2.1	<i>Μηχανή SiFe 3% με τις ελάχιστες συνολικές απώλειες</i>	92
8.2.2	<i>Μηχανή SiFe 3% με την υψηλότερη απόδοση</i>	94
8.2.3	<i>Μηχανή SiFe 3% με την ελάχιστη μάζα</i>	95
8.3	Τάση σχεδίασης μηχανών SiFe 3%	96
8.4	Ανάλυση μηχανών αναφοράς για τα μη συμβατικά ατσάλια	97
8.4.1	<i>CoFe</i>	98
8.4.2	<i>NiFe</i>	99
8.4.3	<i>SiFe 6.5%</i>	101
8.4.4	<i>Συγκριτικοί πίνακες ανάλυσης μηχανών αναφοράς</i>	103
9.	ΟΡΙΣΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΗΧΑΝΩΝ CoFe	106
9.1	Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας	107
9.1.1	<i>Μηχανή CoFe με τις ελάχιστες συνολικές απώλειες και την υψηλότερη απόδοση</i>	112
9.1.2	<i>Μηχανή CoFe με την ελάχιστη μάζα</i>	113
9.2	Τάση σχεδίασης μηχανών CoFe	115

9.3	Σύγκριση βέλτιστων μηχανών CoFe με τις μηχανές αναφοράς.....	116
10.	ΟΡΙΣΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΗΧΑΝΩΝ NiFe.....	119
10.1	Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας.....	120
10.1.1	Μηχανή NiFe με τις ελάχιστες συνολικές απώλειες και την υψηλότερη απόδοση.....	123
10.1.2	Μηχανή NiFe με την ελάχιστη μάζα.....	124
10.2	Τάση σχεδίασης μηχανών NiFe.....	126
10.3	Σύγκριση βέλτιστων μηχανών NiFe με τις μηχανές αναφοράς.....	127
11.	ΟΡΙΣΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΗΧΑΝΩΝ SiFe 6.5%.....	130
11.1	Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας.....	130
11.1.1	Μηχανή SiFe 6.5% με τις ελάχιστες συνολικές απώλειες και την υψηλότερη απόδοση.....	132
11.1.2	Μηχανή SiFe 6.5% με την ελάχιστη μάζα.....	133
11.2	Τάση σχεδίασης μηχανών SiFe 6.5%.....	134
11.3	Σύγκριση βέλτιστων μηχανών SiFe 6.5% με τις μηχανές αναφοράς.....	135
12.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	138
12.1	Σύνοψη.....	138
12.2	Κυριότερα συμπεράσματα.....	138
12.3	Σημεία προαγωγής της επιστήμης.....	140
12.4	Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση.....	141
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	142
13.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	146

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1. Χαρακτηριστικά και μαγνητικές ιδιότητες των προς μελέτη σιδηρομαγνητικών υλικών	27
Πίνακας 5.1. Οι τιμές ειδικής μαγνητικής φόρτισης B για κάθε υλικό, όπως προκύπτουν από τα αντίστοιχα σημεία κορεσμού της μαγνητικής επαγωγής J_{sat}	41
Πίνακας 5.2. Συνδυασμός πόλων και ηλεκτρικής συχνότητας για κάθε μηχανή αναλόγως του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα.....	47
Πίνακας 5.3. Βασικές προδιαγραφές λειτουργίας των προς μελέτη μηχανών	48
Πίνακας 5.4. Συνοπτικά αποτελέσματα βασικής διαστασιολόγησης για κάθε μηχανή αναλόγως του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα.....	52
Πίνακας 5.5. Συνοπτικά αποτελέσματα βασικών μεγεθών όπως προέκυψαν από τις αναλυτικές εξισώσεις της προκαταρκτικής σχεδίασης, για κάθε μηχανή αναλόγως του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα	54
Πίνακας 5.6. Κύρια λειτουργικά χαρακτηριστικά του επιλεγμένου μόνιμου μαγνήτη N40SH NdFeB για λειτουργία στους 80°C [74].....	56
Πίνακας 6.1. Χρόνοι επίλυσης μιας λειτουργικής κατάστασης σε ολόκληρη γεωμετρία 6πολικής μηχανής και σε κλασματική γεωμετρία ενός πόλου	61
Πίνακας 6.2. Ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης για κάθε τμήμα της μηχανής.....	62
Πίνακας 6.3. Εξαρτημένες μεταβλητές σχεδίασης στάτη	63
Πίνακας 6.4. Εξαρτημένες μεταβλητές σχεδίασης στάτη	64
Πίνακας 7.1. Πυκνότητες υλικών πυρήνα βάση των φυλλαδίων προδιαγραφών των κατασκευαστών.....	67
Πίνακας 7.2. Ειδικές απώλειες πυρήνα επιλεγμένων σημείων στάτη SiFe 3%	70
Πίνακας 7.3. Ειδικές απώλειες πυρήνα επιλεγμένων σημείων στάτη, για τα διάφορα σιδηρομαγνητικά υλικά των μηχανών αναφοράς.....	72
Πίνακας 7.4. Συντελεστές ελασματοποίησης για τις προς μελέτη σιδηρομαγνητικές λαμαρίνες.....	74
Πίνακας 7.5. Οι συντελεστές απωλειών της μεθόδου Jordan, όπως προέκυψαν μέσω surface fitting για τις καμπύλες απωλειών λαμαρίνας CoFe πάχους 0.1 mm.....	76
Πίνακας 7.6. Συντελεστές απωλειών βάση του κλασσικού μοντέλου απωλειών του Jordan, για κάθε υπό εξέταση σιδηρομαγνητικό υλικό	76
Πίνακας 8.1. Σταθερές παράμετροι σχεδίασης μηχανών SiFe 3%	83
Πίνακας 8.2. Παράμετροι σάρωσης κατά τη σχεδίαση των μηχανών SiFe 3%	83
Πίνακας 8.3. Εύρος τιμών ενεργού μήκους κατά τη σχεδίαση των μηχανών SiFe 3%	84
Πίνακας 8.4. Τιμές μεταβλητών παραμέτρων της μηχανής SiFe 3% με τις ελάχιστες συνολικές απώλειες ..	92
Πίνακας 8.5. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης της μηχανής SiFe 3% με τις ελάχιστες συνολικές απώλειες	93
Πίνακας 8.6. Τιμές μεταβλητών παραμέτρων της μηχανής SiFe 3% με την υψηλότερη απόδοση	94
Πίνακας 8.7. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης της μηχανής SiFe 3% με την υψηλότερη απόδοση.....	94
Πίνακας 8.8. Τιμές μεταβλητών παραμέτρων της μηχανής SiFe 3% με την ελάχιστη μάζα.....	95
Πίνακας 8.9. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης της μηχανής SiFe 3% με την ελάχιστη μάζα	96
Πίνακας 8.10. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης reference μηχανών CoFe	99
Πίνακας 8.11. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης reference μηχανών NiFe.....	101

Πίνακας 8.12. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης reference μηχανών SiFe 6.5%	103
Πίνακας 8.13. Σύγκριση μηχανών διαφορετικών υλικών με αναγωγή του ενεργού μήκους, για την διατομή SiFe 3% με τις ελάχιστες συνολικές απώλειες.....	103
Πίνακας 8.14. Σύγκριση μηχανών διαφορετικών υλικών με αναγωγή του ενεργού μήκους, για την διατομή SiFe 3% με την υψηλότερη απόδοση	104
Πίνακας 8.15. Σύγκριση μηχανών διαφορετικών υλικών με αναγωγή του ενεργού μήκους, για την διατομή SiFe 3% με την ελάχιστη μάζα.....	104
Πίνακας 9.1. Παράμετροι σάρωσης κατά τη σχεδίαση των μηχανών CoFe	106
Πίνακας 9.2. Εύρος τιμών ενεργού μήκους κατά τη σχεδίαση των μηχανών SiFe 3%	107
Πίνακας 9.3. Τιμές μεταβλητών παραμέτρων της μηχανής CoFe με την υψηλότερη απόδοση	112
Πίνακας 9.4. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης της μηχανής CoFe με την υψηλότερη απόδοση	113
Πίνακας 9.5. Τιμές μεταβλητών παραμέτρων της μηχανής CoFe με την ελάχιστη μάζα.....	114
Πίνακας 9.6. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης της μηχανής CoFe με την ελάχιστη μάζα	115
Πίνακας 9.7. Σύγκριση χαρακτηριστικών reference και βελτιστοποιημένης μηχανής CoFe, με κριτήριο τις ελάχιστες συνολικές απώλειες.....	116
Πίνακας 9.8. Σύγκριση χαρακτηριστικών reference και βελτιστοποιημένης μηχανής CoFe, με κριτήριο την υψηλότερη απόδοση.....	117
Πίνακας 9.9. Σύγκριση χαρακτηριστικών reference και βελτιστοποιημένης μηχανής CoFe, με κριτήριο την ελάχιστη μάζα.....	117
Πίνακας 10.1. Σταθερές παράμετροι σχεδίασης μηχανών NiFe	119
Πίνακας 10.2. Παράμετροι σάρωσης κατά τη σχεδίαση των μηχανών NiFe.....	119
Πίνακας 10.3. Σταθερές παράμετροι σχεδίασης μηχανών και εύρος τιμών προς εξέταση	119
Πίνακας 10.4. Τιμές μεταβλητών παραμέτρων της μηχανής NiFe με την υψηλότερη απόδοση.....	123
Πίνακας 10.5. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης της μηχανής NiFe με την υψηλότερη απόδοση.....	124
Πίνακας 10.6. Τιμές μεταβλητών παραμέτρων της μηχανής NiFe με την ελάχιστη μάζα.....	125
Πίνακας 10.7. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης της μηχανής NiFe με την ελάχιστη μάζα	126
Πίνακας 10.8. Σύγκριση χαρακτηριστικών reference και βελτιστοποιημένης μηχανής NiFe, με κριτήριο τις ελάχιστες συνολικές απώλειες.....	127
Πίνακας 10.9. Σύγκριση χαρακτηριστικών reference και βελτιστοποιημένης μηχανής NiFe, με κριτήριο την υψηλότερη απόδοση.....	127
Πίνακας 10.10. Σύγκριση χαρακτηριστικών reference και βελτιστοποιημένης μηχανής CoFe, με κριτήριο την ελάχιστη μάζα.....	128
Πίνακας 11.1. Τιμές μεταβλητών παραμέτρων της μηχανής SiFe 6.5% με την υψηλότερη απόδοση	132
Πίνακας 11.2. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης της μηχανής SiFe 6.5% με την υψηλότερη απόδοση.....	133
Πίνακας 11.3. Τιμές μεταβλητών παραμέτρων της μηχανής SiFe 6.5% με την ελάχιστη μάζα.....	133
Πίνακας 11.4. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης της μηχανής SiFe 6.5% με την ελάχιστη μάζα	134
Πίνακας 11.5. Σύγκριση χαρακτηριστικών reference και βελτιστοποιημένης μηχανής SiFe 6.5%, με κριτήριο τις ελάχιστες συνολικές απώλειες	136

Πίνακας 11.6. Σύγκριση χαρακτηριστικών reference και βελτιστοποιημένης μηχανής SiFe 6.5%, με κριτήριο την υψηλότερη απόδοση	136
Πίνακας 11.7. Σύγκριση χαρακτηριστικών reference και βελτιστοποιημένης μηχανής SiFe 6.5%, με κριτήριο την ελάχιστη μάζα	137
Πίνακας 12.1. Σχεδιαστικές τάσεις για τις βασικές γεωμετρικές παραμέτρους στάτη ανά υλικό, όπως προέκυψαν από τις αναλύσεις ευαισθησίας	140

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης διαφορετικών σιδηρομαγνητικών υλικών πυρήνα στα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης των σύγχρονων μηχανών μονίμων μαγνητών, και κατ' επέκταση η εξαγωγή σχεδιαστικών μοτίβων για κάθε υλικό, τα οποία επιτυγχάνουν βέλτιστα τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Παράλληλα σκοπό αποτελεί η σύγκριση της απλούστερης διαδικασίας βελτιστοποίησης, αυτή της εύρεσης του βέλτιστου ενεργού μήκους για μια δεδομένη διατομή, με την διαδικασία βελτιστοποίησης μέσω ανάλυσης ευαισθησίας γεωμετρικών παραμέτρων και της δημιουργίας μιας «δεξαμενής» διαθέσιμων μηχανών, εκ των οποίων επιλέγεται η βέλτιστη.

Στα πλαίσια της εργασίας αναπτύσσεται εργαλείο παραμετροποιημένης σχεδίασης και ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης των μηχανών για την μελέτη των χαρακτηριστικών επίδοσης και απόδοσης, ενώ συγκρίνονται τα συνηθέστερα μοντέλα απωλειών πυρήνα της βιβλιογραφίας και επιλέγεται το κατάλληλο, δεδομένης της βαρύτητας των απωλειών πυρήνα στην μελέτη διαφορετικών λαμαρινών. Παράλληλα, στόχος είναι η ανάπτυξη εργαλείου υπολογισμού των συντελεστών υστέρησης και δινορρευμάτων μέσω επιφανειακής προσαρμογής πειραματικών δεδομένων των λαμαρινών, στις εξισώσεις του επιλεγμένου μοντέλου απωλειών πυρήνα. Στη συνέχεια διενεργείται ανάλυση ευαισθησίας με σάρωση ενός πεδίου ορισμού γεωμετρικών παραμέτρων για κάθε υλικό, και λαμβάνονται τα αποτελέσματα της βέλτιστης μηχανής συναρτήσει των ελάχιστων συνολικών απωλειών, της υψηλότερης απόδοσης και της μικρότερης μάζας, τα οποία θα συγκριθούν με τα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης των μηχανών αναφοράς. Τέλος, στόχος αποτελεί η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις σχεδιαστικές τάσεις (trends) που προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση των μηχανών για κάθε υλικό.

1.2 Δομή της εργασίας

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα εισαγωγικά στοιχεία της εργασίας, με σκοπό να κατατοπισθεί ο αναγνώστης σχετικά με το περιεχόμενο και την δομή της διπλωματικής εργασίας. Στη συνέχεια, η εργασία χωρίζεται σε κεφάλαια με το ακόλουθο περιεχόμενο:

- Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται συνοπτικά ο τομέας της ηλεκτροκίνησης και οι αρχές λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών, ενώ επιλέγεται να μελετηθούν σύγχρονες μηχανές επιφανειακών μονίμων μαγνητών.
- Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο των σιδηρομαγνητικών υλικών, παρουσιάζονται οι ιδιότητες των προς μελέτη υλικών και αναλύονται συνοπτικά πρακτικά ζητήματα και νέες προκλήσεις στην μελέτη των υλικών πυρήνα.
- Στο Κεφάλαιο 4 εξηγούνται οι μηχανισμοί των απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων και ακολουθεί η βιβλιογραφική ανασκόπηση των μοντέλων απωλειών πυρήνα στην παγκόσμια βιβλιογραφία.
- Στο Κεφάλαιο 5 εκτιμώνται οι βασικές προδιαγραφές που πρέπει να πληρούν οι προς σχεδίαση μηχανές και ακολουθεί η προκαταρκτική σχεδίαση των μηχανών, βάση των χαρακτηριστικών του κάθε υλικού.
- Στο Κεφάλαιο 6 περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία σχεδίασης μηχανών μονίμων μαγνητών που αναπτύχθηκε, με την βοήθεια του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων FEMM και του λογισμικού MATLAB.
- Στο Κεφάλαιο 7 περιγράφεται η μεθοδολογία ανάλυσης μηχανών μονίμων μαγνητών που αναπτύχθηκε. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται το μοντέλο απωλειών πυρήνα που επιλέχθηκε και

αναπτύχθηκε, καθώς και ορισμένα αναλυτικά μοντέλα στα οποία στηρίχθηκε η εξαγωγή των αποτελεσμάτων των μηχανών.

- Στο Κεφάλαιο 8 αναλύεται η διαδικασία βελτιστοποίησης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της μηχανής με συμβατικό ατσάλι. Μέσω της ανάλυσης «νέφους» παρουσιάζονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των επιλεγμένων βέλτιστων μηχανών, ενώ σχεδιάζονται και παρουσιάζονται οι μηχανές αναφοράς για τα υπόλοιπα υλικά, βάση της διατομής των βέλτιστων μηχανών με πυρήνα συμβατικού ατσαλιού. Επιπλέον, μελετάται η επίδραση της περιστροφής του μαγνητικού πεδίου στις τοπικές απώλειες πυρήνα.
- Στα Κεφάλαια 9, 10, 11, ακολουθεί η ίδια διαδικασία ανάλυσης ευαισθησίας για τα υπόλοιπα σιδηρομαγνητικά υλικά, εξάγονται τα αποτελέσματα των βέλτιστων μηχανών και συγκρίνονται με αυτά των μηχανών αναφοράς.
- Στο Κεφάλαιο 12 εξετάζονται τα πιο σημαντικά ευρήματα και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη συνολική μελέτη που διεξήχθη στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, αξιολογείται η επιστημονική συνεισφορά της εργασίας, ενώ ακόμα προτείνονται θέματα για περαιτέρω διερεύνηση.

Τέλος, παρατίθεται το Παράρτημα που περιέχει τα αναλυτικά αποτελέσματα επιφανειακής προσαρμογής των πειραματικών μετρήσεων κάθε λαμαρίνας, και στη συνέχεια ακολουθεί η σχετική βιβλιογραφία.

2. ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗ

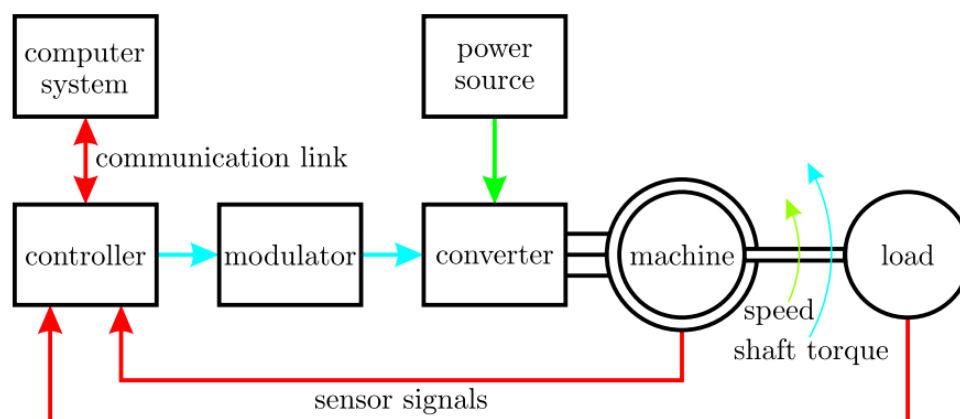
Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής έχουν οδηγήσει τις ρυθμιστικές αρχές παγκοσμίως στην θέσπιση νομοθεσιών σχετικά με τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, με απώτερο στόχο τη μείωση των εκπομπών CO₂, που αποτελεί κύριο αποτέλεσμα της πλεονάζουσας χρήσης ορυκτών καυσίμων. Σε αυτή την κατεύθυνση, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει πολιτικές και στρατηγικές για την καταπολέμηση της περιβαλλοντικής ρύπανσης και της κλιματικής αλλαγής, θέτοντας ως πρωταρχικό στόχο έως το 2030 την μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 40% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 [1], και μακροπρόθεσμα την μεταστροφή σε ένα οικονομικό σύστημα μηδενικών ρύπων, το 2050 [2].

Οι παραπάνω ενεργειακοί στόχοι δύναται να επιτευχθούν τόσο με την αύξηση της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα κάθε χώρας της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όσο και με την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης συστημάτων και διαδικασιών, μέσω του εξηλεκτρισμού βασικών ενεργειακών τομέων όπως η βιομηχανία, η αυτοκίνηση και οι μεταφορές. Η ηλεκτροκίνηση αποτελεί πλέον συνήθη πρακτική τόσο στη βιομηχανία – δεδομένου ότι το 40% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως καταναλώνεται από ηλεκτρικούς κινητήρες σε βιομηχανικό περιβάλλον [3] – όσο στην αυτοκίνηση και τις μεταφορές, όπου η ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων και η έναρξη της διείσδυσης τους στο οδικό -και μη- δίκτυο, θα αυξήσει σημαντικά την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας [4]. Η ύπαρξη λοιπόν όλο και περισσότερων ηλεκτρικών μηχανών (γεννητριών ή κινητήρων) συνδεδεμένων στο δίκτυο αυξάνει τις ανάγκες βελτίωσης της απόδοσης τους, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι μελλοντικές ενεργειακές απαιτήσεις. Προβλέπεται πως μέχρι το έτος 2035 το μεγαλύτερο μέρος της εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας θα επιτευχθεί μέσω της βελτίωσης της απόδοσης των ηλεκτρικών μηχανών [5]. Στο παραπάνω πλαίσιο βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης κινητήριων συστημάτων (είτε σε επίπεδο βιομηχανίας είτε σε επίπεδο μεταφορών), η έρευνα επικεντρώνεται στην ανάπτυξη κινητήριων συστημάτων υψηλής απόδοσης και υψηλής πυκνότητας ισχύος.

2.1 Σύστημα ηλεκτρικής κίνησης

Η γενική μορφή ενός ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα και αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα [6]:

- Πηγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Μετατροπέας ισχύος
- Ηλεκτρική μηχανή
- Ψηφιακός ελεγκτής
- Αισθητήρες μετρήσεων



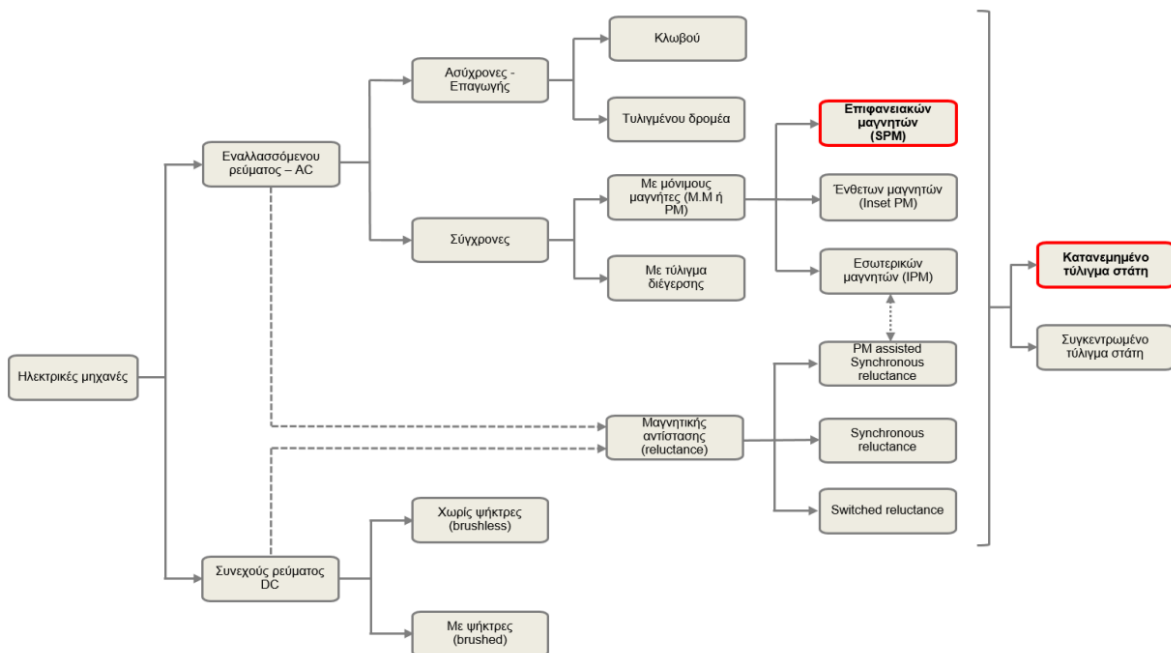
Σχήμα 2.1. Τοπολογία ενός τυπικού συστήματος οδήγησης [7]

Η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος ηλεκτρικής κίνησης εξαρτάται, εκτός των άλλων, και από τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα επιμέρους μέρη που το αποτελούν· από τα σιδηρομαγνητικά υλικά της ηλεκτρικής μηχανής, έως και το υλικό και το είδος των ημιαγωγών ισχύος του μετατροπέα που οδηγεί το σύστημα.

Η παρούσα εργασία θα εξετάσει την επίδραση διαφορετικών σιδηρομαγνητικών υλικών στα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης της μηχανής, καθώς και στα σχεδιαστικά μοτίβα που μεγιστοποιούν αυτές τις παραμέτρους.

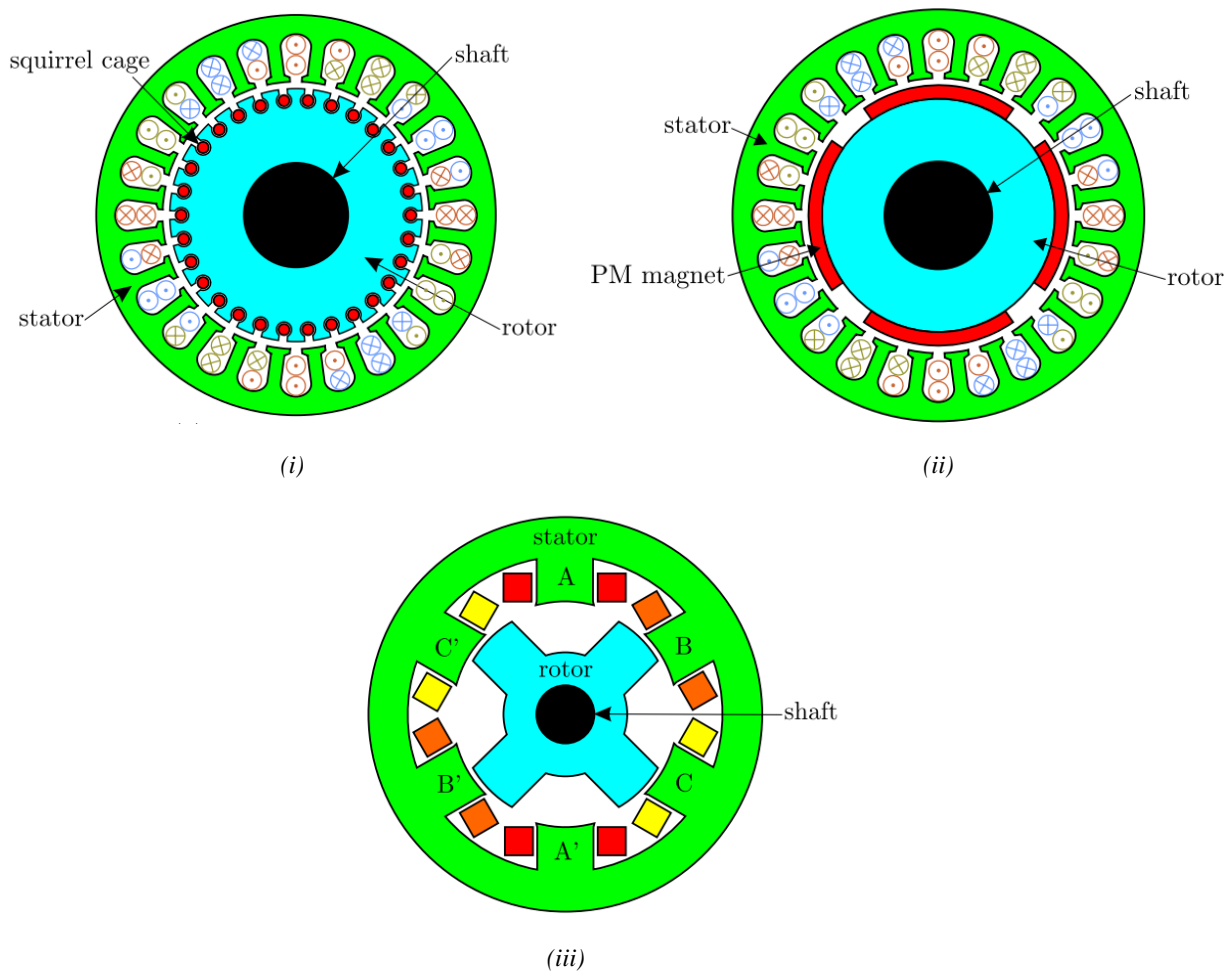
2.2 Ηλεκτρικές μηχανές

Η ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας αποτελεί την βασική αρχή λειτουργίας μιας ηλεκτρικής μηχανής, η οποία αποτελεί το κυριότερο τμήμα ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης. Μια ηλεκτρική μηχανή μπορεί να λειτουργεί είτε ως κινητήρας μετατρέποντας την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική, με σκοπό την κίνηση ενός φορτίου συνδεδεμένου στον άξονα, είτε ως γεννήτρια με σκοπό την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας του ίδιου συστήματος κίνησης, σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι βασικότερες κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται οι ηλεκτρικές μηχανές όσον αφορά την τροφοδότηση των τυλιγμάτων, την διαμόρφωση και τις αρχές λειτουργίας, φαίνονται παρακάτω.



Σχήμα 2.2. Βασική κατηγοριοποίηση ηλεκτρικών μηχανών. Σημειώνεται με κόκκινο το είδος των ηλεκτρικών μηχανών που θα μελετηθούν στην παρούσα εργασία [8].

Στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης, συνηθίζεται η χρήση μηχανών επαγωγής (induction or asynchronous), σύγχρονων μηχανών μόνιμων μαγνητών (Permanent Magnet synchronous), και μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (switched reluctance) [7], οι τοπολογίες των οποίων παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.3. (i) Μηχανή επαγωγής με δρομέα βραχυκυκλωμένου κλωβού (ii) Σύγχρονη μηχανή μόνιμων μαγνητών (iii) Μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης [7].

2.2.1 Μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Στις μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (Switched Reluctance) απουσιάζει τόσο τύλιγμα διέγερσης όσο και μόνιμοι μαγνήτες στο δρομέα, καθώς η λειτουργία τους βασίζεται στην μεταβολή της μαγνητικής αντίστασης του δρομέα, εκμεταλλευόμενοι την ροπή εκτυπότητας. Αυτός ο τύπος μηχανής έχει το πλεονέκτημα της απλότητας κατασκευής και του μικρού κόστους. Ο σύγχρονος κινητήρας μαγνητικής αντίστασης (Synchronous Reluctance) αποτελεί μια ειδική εκδοχή του κινητήρα μαγνητικής αντίστασης (Switched Reluctance), όπου η μεταβολή της μαγνητικής αντίστασης γίνεται με πιο ομαλό (ημιτονικό) τρόπο [9]. Τα κυριότερα μειονεκτήματα των μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης αποτελούν η έντονη κυμάτωση ροπής, ο έντονος θόρυβος λειτουργίας, η χαμηλή πυκνότητα ισχύος και η απαίτηση ιδιαίτερων τοπολογιών μετατροπέα [10].

2.2.2 Μηχανές επαγωγής

Οι μηχανές επαγωγής στηρίζουν τη λειτουργία τους στο φαινόμενο της επαγωγής ρευμάτων και τάσεων μεταξύ τυλιγμάτων στάτη και δρομέα. Πιο συγκεκριμένα, το τριφασικό τύλιγμα στο στάτη δημιουργεί στρεφόμενο πεδίο που επάγει τάσεις, οι οποίες με τη σειρά τους παράγουν ρεύματα στο βραχυκυκλωμένο (ή κλειστό) τύλιγμα του δρομέα. Η αλληλεπίδραση των πεδίων στάτη και δρομέα στο διάκενο, παράγει ροπή περιστρέφοντας τον δρομέα. Τόσο το πεδίο του στάτη όσο και το πεδίο του δρομέα στρέφονται με τη σύγχρονη ταχύτητα, όμως ο δρομέας στρέφεται με ταχύτητα ελαφρώς διαφορετική, για αυτό και οι μηχανές επαγωγής ονομάζονται και ασύγχρονες μηχανές. Ο δρομέας της μηχανής έχει δύο εναλλακτικούς τρόπους διαμόρφωσης: το τύλιγμα κλωβού, το οποίο αποτελείται από αγωγίμες ράβδους αλουμινίου ή χαλκού, οι οποίες

βραχυκυκλώνονται στα άκρα τους με δακτυλίους και τοποθετούνται σε αύλακες στο σώμα του δρομέα, και το τύλιγμα δρομέα με δακτυλίους, όπου τοποθετείται τριφασικό τύλιγμα στο δρομέα, αντίστοιχο του τυλίγματος του στάτη, ενώ η προσθήκη εξωτερικών αντιστάσεων δίνει τη δυνατότητα ελέγχου της ροπής και των ρευμάτων κατά την εκκίνηση [11].

Οι μηχανές επαγωγής έχουν ευρεία εφαρμογή στα ηλεκτροκίνητα οχήματα (βλ. Tesla Model S), λόγω του χαμηλού κόστους κατασκευής, τον εύκολο έλεγχο και την υψηλή αξιοπιστία. Για την οδήγησή τους στα ηλεκτρικά οχήματα απαιτείται διάταξη αντιστροφής με δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας για έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής [9]. Σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης μηχανών επαγωγής σε κινητήρια συστήματα είναι η ικανότητα υποδιέγερσης σε συνθήκες χαμηλού φορτίου, προκειμένου να επιτευχθεί υψηλή ταχύτητα, βελτιώνοντας έτσι σημαντικά την συμπεριφορά και το βαθμό απόδοσης σε συνθήκες ελέγχου σταθερής ισχύος.

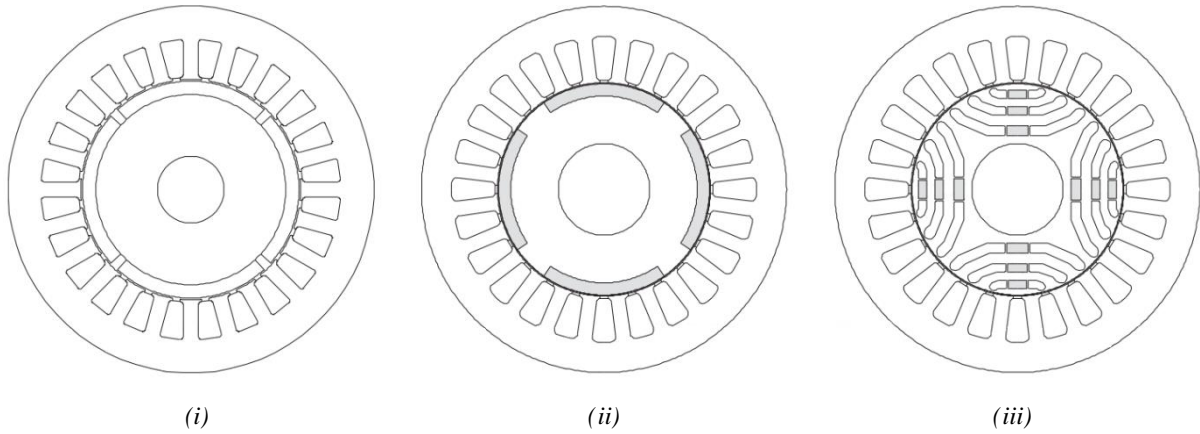
2.2.3 Σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών

Η λειτουργία των σύγχρονων μηχανών μονίμων μαγνητών στηρίζεται επίσης στην αλληλεπίδραση πεδίων δρομέα (διέγερση) και στάτη (τύμπανο), όπου σε αντίθεση με τις μηχανές επαγωγής, εδώ το πεδίο δρομέα είναι σταθερό και δημιουργείται από τους μόνιμες μαγνήτες που βρίσκονται στον δρομέα, ενώ ο στάτης εξακολουθεί να έχει τριφασικό τύλιγμα, ώστε να δημιουργείται το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Η ύπαρξη του πεδίου των μαγνητών ως διέγερση της μηχανής, οδηγεί στην απουσία τυλιγμάτων χαλκού στο δρομέα, επομένως υπάρχει σημαντική μείωση στις απώλειες χαλκού, οδηγώντας έτσι σε υψηλότερη απόδοση της μηχανής καθώς και υψηλότερη πυκνότητα ισχύος [12], καθιστώντας τη διαμόρφωση αυτή ιδανική σε εφαρμογές που απαιτείται υψηλή απόδοση για εξοικονόμηση ενέργειας, όπως σε ηλεκτρικά οχήματα και αεροπλάνα. Παρόλα αυτά, μειονεκτήματα της διαμόρφωσης αυτής αποτελούν το υψηλό κόστος των μονίμων μαγνητών καθώς και η αδυναμία σβέσης του πεδίου διέγερσης σε λειτουργικές καταστάσεις χαμηλού φορτίου, με αποτέλεσμα την ύπαρξη σημαντικών απωλειών πυρήνα σε συνθήκες χαμηλής ροπής και υψηλής ταχύτητας, λόγω του μόνιμου πεδίου διέγερσης.

Συνοπτικά, οι κυριότερες διαμορφώσεις σύγχρονων μηχανών μονίμων μαγνητών, βάση της τοπολογίας των μαγνητών στο δρομέα είναι:

- **Μηχανές επιφανειακών μονίμων μαγνητών (Surface Permanent Magnets – SPM):** Πρόκειται για την απλούστερη διαμόρφωση από άποψη κατασκευής, ενώ το κατασκευαστικό κόστος είναι σχετικά μικρό. Οι μαγνήτες σε αυτή τη διαμόρφωση είναι πολύ κοντά στο διάκενο όπου γίνεται η αλληλεπίδραση των πεδίων, επομένως αξιοποιείται πλήρως η μαγνητική τους ικανότητα. Το κυριότερο μειονέκτημα της διαμόρφωσης αυτής είναι η μειωμένη μηχανική αντοχή των μαγνητών στις υψηλές ταχύτητες, αφού υπάρχει κίνδυνος αποκόλλησης τους, λόγω των υψηλών φυγόκεντρων δυνάμεων. Παρόλα αυτά, η προσθήκη ενός «μανδύα» (sleeve) ανθρακονήματος, οδηγεί σε καλύτερη συγκράτηση των μαγνητών ακόμα και σε πολύ υψηλές ταχύτητες [13].
- **Μηχανές ένθετων μαγνητών (Inset Permanent Magnets):** Σε αυτή την διαμόρφωση, οι μαγνήτες τοποθετούνται εντός αυλακώσεων που δημιουργούνται στο δρομέα, επομένως η μηχανική αντοχή σε υψηλές ταχύτητες είναι εξασφαλισμένη, αφού οι μαγνήτες δεν είναι εκτεθειμένοι στις φυγόκεντρες δυνάμεις του διακένου. Στην διαμόρφωση αυτή όμως, η αναπτυσσόμενη ροπή δεν οφείλεται αποκλειστικά στην αλληλεπίδραση των πεδίων στάτη και δρομέα αλλά οφείλεται και στη ροπή εκτυπότητας.
- **Μηχανές εσωτερικών μονίμων μαγνητών (Interior Permanent Magnets – IPM):** Σε αυτή την διαμόρφωση, οι μόνιμοι μαγνήτες τοποθετούνται στο εσωτερικό του σώματος του δρομέα, με διάφορες τοπολογίες [14]. Στις τοπολογίες αυτές είναι έντονη η συνιστώσα εκτυπότητας που προστίθεται στην μηχανή με αποτέλεσμα η μεγιστοποίηση της ροπής να προκύπτει για γωνία ροπής $\delta \sim 150^\circ$, σε αντίθεση με την περίπτωση των επιφανειακών μονίμων μαγνητών, όπου η μέγιστη ροπή προκύπτει για γωνία ροπής $\delta \sim 90^\circ$ [8]. Η μηχανική αντοχή της διαμόρφωσης αυτής είναι σημαντικά

καλύτερη από αυτή των επιφανειακών μαγνητών, καθώς η εισαγωγή τους εντός του δρομέα προσφέρει σημαντική μηχανική στήριξη και επιτρέπει την επίτευξη πολύ υψηλών ταχυτήτων χωρίς τον κίνδυνο αποκόλλησης των μαγνητών. Παρόλα αυτά, η πολυπλοκότητα της διαμόρφωσης των μαγνητών αυξάνει το κόστος κατασκευής, ενώ αναλόγως της γεωμετρίας του δρομέα ίσως θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί άξονας από μη σιδηρομαγνητικό υλικό ή τουλάχιστον να υπάρχει στρώση μη σιδηρομαγνητικού υλικού μεταξύ δρομέα και άξονα, προκειμένου η μαγνητική ροή να μην περνάει από τον άξονα, λόγω της μικρής απόστασης με τους μαγνήτες [15].



Σχήμα 2.4. Σύγχρονη μηχανή με (i) επιφανειακούς μόνιμους μαγνήτες, (ii) ένθετους μόνιμους μαγνήτες και (iii) εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες [12]

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκε να μελετηθεί η Σύγχρονη Μηχανή Επιφανειακών Μόνιμων Μαγνητών (PMSM), κυρίως λόγω της απλότητας κατασκευής και της ευρείας χρήσης σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης. Αρχικά θα γίνει η προκαταρκτική σχεδίαση της μηχανής βάση των κλασικών εξισώσεων σχεδίασης και στη συνέχεια θα πραγματοποιηθεί βελτιστοποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών σε κάθε σιδηρομαγνητικό υλικό, με σκοπό την μελέτη της επίδρασης των ιδιοτήτων των υλικών πυρήνα στην επιλογή των βέλτιστων γεωμετρικών παραμέτρων.

3. ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

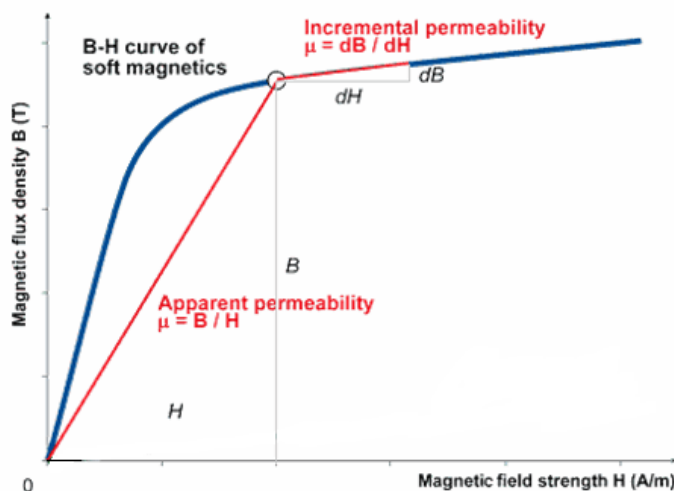
Το σώμα του στάτη και του δρομέα κατασκευάζονται από σιδηρομαγνητικά υλικά. Η επιλογή των υλικών αυτών οφείλεται κυρίως στην υψηλή μαγνητική διαπερατότητα που εμφανίζει ο σίδηρος ως υλικό. Σε εφαρμογές χαμηλών απαιτήσεων απόδοσης, είναι δυνατό να χρησιμοποιείται συμπαγής σίδηρος για το σώμα της μηχανής. Όμως σε πιο απαιτητικές εφαρμογές, ο σίδηρος ελασματοποιείται και το σώμα της μηχανής κατασκευάζεται από πολλά λεπτά φύλλα σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας, με σκοπό την μείωση της αγωγικής διαδρομής των επαγόμενων δινορρευμάτων που προκαλούν θερμικές απώλειες στον πυρήνα, όπως εξηγείται στην ενότητα 4.2.

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα μαλακά και τα σκληρά. Τα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά, όπως για παράδειγμα ο πυριτιούχος σίδηρος (SiFe) που θα δούμε παρακάτω, μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται εύκολα. Αντίθετα, τα σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά, όπως για παράδειγμα το κράμα νεοδυμίου, σιδήρου και βαρίου (NdFeB), δεν απομαγνητίζονται εύκολα, και διατηρούν τις μαγνητικές τους ιδιότητες σχηματίζοντας μόνιμους μαγνήτες.

Ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά των μαλακών σιδηρομαγνητικών υλικών είναι [9]:

- Υψηλή μαγνητική διαπερατότητα, δηλαδή χαμηλή μαγνητική αντίσταση η οποία ελαχιστοποιεί την μείωση της πεπλεγμένης ροής στο μαγνητικό κύκλωμα της μηχανής.
- Υψηλή μαγνητική επαγωγή κορεσμού, έτσι ώστε να διέρχεται όσο το δυνατό περισσότερη μαγνητική ροή ανά μονάδα όγκου, και να ελαχιστοποιούνται οι διαστάσεις και το βάρος της μηχανής.
- Μικρό εμβαδό βρόχου υστέρησης και σχετικά μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση.

Οι ιδιότητες αυτές εξασφαλίζουν μειωμένες ειδικές απώλειες πυρήνα και περιορισμένη αύξηση της θερμοκρασίας. Έτσι διευκολύνεται σημαντικά η ψύξη της μηχανής, και μειώνεται το κατασκευαστικό της κόστος. Παρακάτω φαίνεται η καμπύλη μαγνήτισης ενός μαλακού σιδηρομαγνητικού υλικού, καθώς και οι επιμέρους περιοχές που την αποτελούν.



Σχήμα 3.1. Καμπύλη αρχικής μαγνήτισης ή καμπύλη B-H ενός μαλακού σιδηρομαγνητικού υλικού [8]

Με την επιβολή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H σε ένα αρχικά αμαγνήτιστο υλικό, τότε γραμμικά αυξάνεται και η μαγνητική επαγωγή B του υλικού, σύμφωνα με μια σταθερή τιμή μαγνητικής διαπερατότητας μ του υλικού, βάση της σχέσης:

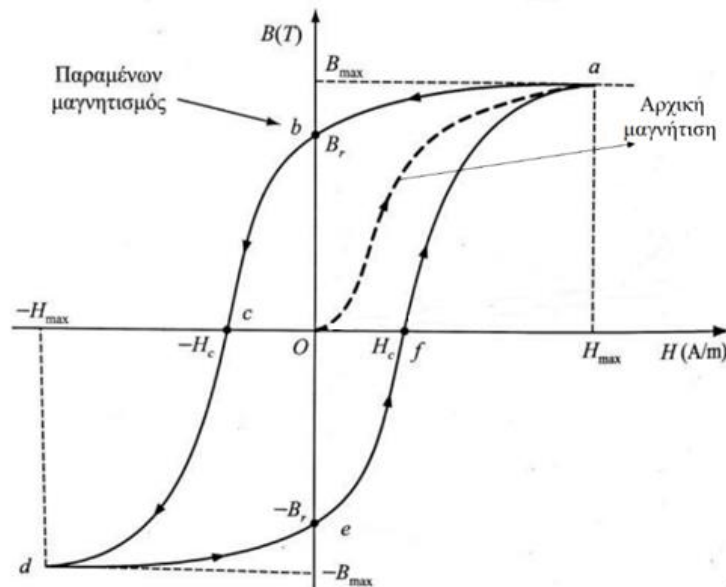
$$B = \mu \cdot H \quad (3.1)$$

Η γραμμική αύξηση της μαγνητικής επαγωγής με την αύξηση του εξωτερικού πεδίου, συνεχίζει να υφίσταται έως το γόνατο κορεσμού, δηλαδή έως ότου το υλικό εισέλθει στην περιοχή κορεσμού, όπου η αύξηση του

εξωτερικού πεδίου δεν επιδρά σημαντικά στην αναπτυσσόμενη μαγνητική επαγωγή, επομένως εκεί μεταβάλλεται η τιμή της διαπερατότητας του υλικού ως:

$$\mu = \frac{dB}{dH} \quad (3.2)$$

Οποιαδήποτε περαιτέρω αύξηση της εξωτερικής διέγερσης, όσο το υλικό βρίσκεται στην περιοχή κορεσμού, έχει ως μόνο αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών χαλκού (λόγω της αύξησης της πυκνότητας ρεύματος από την οποία εξαρτάται το εξωτερικό πεδίο H), χωρίς σχεδόν καμία μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής. Η παραπάνω καμπύλη αποτελεί την καμπύλη αρχικής μαγνήτισης ενός υλικού και ορίζεται ως η διαδρομή Oa στην παρακάτω καμπύλη υστέρησης του υλικού.

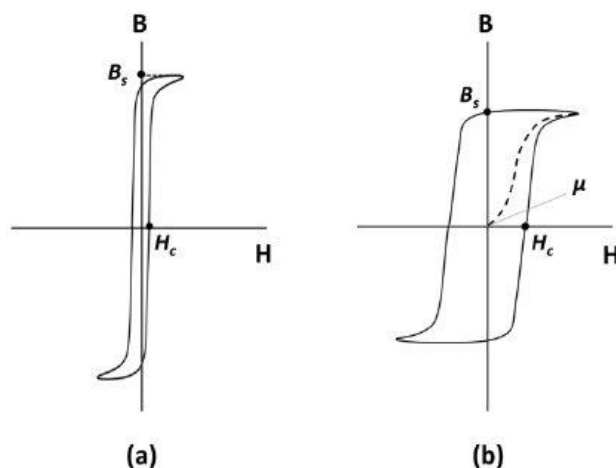


Σχήμα 3.2. Καμπύλη υστέρησης μαλακού σιδηρομαγνητικού υλικού [16]

Αν η επιβολή του εξωτερικού πεδίου διακοπεί, όσο το υλικό βρίσκεται σε σημείο μέγιστης μαγνητικής επαγωγής B_{max} , η μαγνητική επαγωγή δεν θα μηδενιστεί, δηλαδή το υλικό δεν θα χάσει πλήρως τη μαγνήτιση του, αφού θα παραμείνει στον πυρήνα ένα μέρος της. Η τιμή αυτή της μαγνητικής επαγωγής B_r ονομάζεται παραμένουσα (residual) μαγνητική επαγωγή, ενώ για τον μηδενισμό της, έτσι ώστε να επιστρέψει το υλικό στην αρχική αμαγνήτιστη κατάσταση του, θα πρέπει να εφαρμοστεί μια μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ) αντίθετης πολικότητας, η οποία ονομάζεται απομαγνητίζουσα (coercive) δύναμη.

Έτσι είναι φανερό πως με την επιβολή ενός εναλλασσόμενου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H , μετά την απόκτηση της μέγιστης τιμής B_{max} , κατά τη μείωση του ρεύματος στη διάρκεια της περιόδου, η διαδρομή μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής είναι διαφορετική από αυτή που ακολουθήθηκε κατά την αύξηση του ρεύματος, αφού πλέον το υλικό είναι μαγνητισμένο. Η απόκλιση της μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής από την αρχική της διαδρομή, αποτελεί το φαινόμενο της υστέρησης (hysteresis) και εκφράζεται από τη διαδρομή abcdefa, η οποία ορίζει το βρόχο υστέρησης, το εμβαδό του οποίου σχετίζεται με τις απώλειες υστέρησης του σιδηρομαγνητικού υλικού.

Στα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά, η καμπύλη μαγνήτισης εμφανίζει μεγάλη κλίση, και ο βρόχος υστέρησης έχει μικρό εμβαδό, γεγονός που συνεπάγεται μειωμένες απώλειες υστέρησης. Οι μειωμένες απώλειες υστέρησης, σε συνδυασμό με την μεγάλη σχετική του διαπερατότητα, καθιστούν τα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά κατάλληλα για χρήση σε μετασχηματιστές ισχύος και ηλεκτρικές μηχανές.



Σχήμα 3.3. Καμπύλες υστέρησης μαλακού σιδηρομαγνητικού υλικού (αριστερά) και σκληρού σιδηρομαγνητικού υλικού (δεξιά) [17]. Η «στενότητα» της καμπύλης του μαλακού σιδηρομαγνητικού υλικού εκφράζει την μικρότερη μαγνητική αντίσταση που εμφανίζει.

Όσον αφορά τη χρήση σιδηρομαγνητικών υλικών για την κατασκευή πυρήνων ηλεκτρικών μηχανών (στρεφόμενων και στατών), η πιο συνηθισμένη επιλογή – από το 1890 όπου υιοθετήθηκε η διαμόρφωση ελασματοποιημένου πυρήνα έως σήμερα – αποτελεί ο πυριτιούχος σίδηρος χωρίς κατευθυνόμενους κόκκους (NO SiFe), υλικό το οποίο κυριαρχεί την παγκόσμια αγορά σιδηρομαγνητικών υλικών [18]. Παρόλα αυτά, τόσο η έρευνα, όσο και η βιομηχανία, έχει να δείξει ειδικές εφαρμογές όπου κρίνεται βέλτιστη η επιλογή άλλων σιδηρομαγνητικών υλικών όπως φερρίτες, κράματα κοβαλτίου – σιδήρου και νικελίου – σιδήρου, άμορφα και νανοκρυσταλλικά υλικά.

Οι τυπικές ιδιότητες και παράμετροι ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, τις οποίες καλείται να λάβει υπόψη ένας σχεδιαστής μηχανών, ώστε να επιλέξει βέλτιστα κατά τη διαδικασία της προκαταρκτικής σχεδίασης της μηχανής, είναι [19]:

- Σημείο μαγνητικού κορεσμού
- Διαπερατότητα
- Ηλεκτρική αντίσταση
- Ειδικές απώλειες πυρήνα
- Περιορισμοί και κόστη επεξεργασίας – κατασκευής
- Τιμή

Η επιλογή του κατάλληλου σιδηρομαγνητικού υλικού σε μια ηλεκτρική μηχανή παύει να αποτελεί μια μονοσήμαντη επιλογή, αφού η βέλτιστη σχεδίαση μιας μηχανής για μια περιοχή εφαρμογών, εξαρτάται άμεσα από τις μαγνητικές ιδιότητες του πυρήνα της. Πιο συγκεκριμένα, υψηλό σημείο κορεσμού και υψηλή διαπερατότητα για ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, συνεπάγεται και χαμηλότερες απώλειες πυρήνα, και επομένως υψηλότερο βαθμό απόδοσης, αφού σε περίπτωση συνεχούς λειτουργίας στα 1.5 T, η μηχανή θα λειτουργεί σε σημείο χαμηλότερου του κορεσμού, απαιτώντας έτσι και μικρότερη ηλεκτρική φόρτιση, άρα μικρότερη πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα. Έτσι η επιλογή του βέλτιστου υλικού για την εκάστοτε εφαρμογή είναι κομβικής σημασίας αφού ο υψηλός βαθμός απόδοσης θα οδηγήσει σε μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση, η οποία όπως προβλέπεται για μια μηχανή που λειτουργεί σε βιομηχανικό περιβάλλον, ξεπερνά το 90% του συνολικού κόστους στον κύκλο ζωής της μηχανής [19].



Σχήμα 3.4. Τυπικό κόστος κύκλου ζωής ενός κινητήρα για 25 έτη λειτουργίας [19]

Ορισμένα σιδηρομαγνητικά υλικά, παρά τις πολλά υποσχόμενες ιδιότητες τους, έχουν σοβαρούς κατασκευαστικούς περιορισμούς, όπως το FINEMET που ανήκει στην κατηγορία των νανοκρυσταλλικών μαγνητικών υλικών, το οποίο, αν και παρουσιάζει πολύ μικρές απώλειες πυρήνα σε υψηλές συχνότητες, μπορεί να παρασκευαστεί και να κοπεί σε μέγιστο πλάτος 63 mm, επομένως η κατασκευή μεγαλύτερων πυρήνων, απαιτεί την τμηματική κατασκευή και την συγκράτηση των επιμέρους μερών με ρητίνη [20]. Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκαν να εξεταστούν υλικά τα οποία δεν φέρουν ιδιαίτερες δυσκολίες στην επεξεργασία και στην κατασκευή πυρήνων, ώστε μια προτεινόμενη διαμόρφωση να είναι δυνατό να κατασκευαστεί για σκοπούς πειραματικής επαλήθευσης των αποτελεσμάτων. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τα προς μελέτη σιδηρομαγνητικά υλικά, καθώς και τις χαρακτηριστικές ιδιότητες τους, βάση των φυλλαδίων των κατασκευαστών τους [21] – [24].

Πίνακας 3.1. Χαρακτηριστικά και μαγνητικές ιδιότητες των προς μελέτη σιδηρομαγνητικών υλικών

Υλικό	Σύνθεση υλικού	Πάχος λαμαρίνας (mm)	Σημείο κορεσμού μαγνητικής επαγωγής J_{sat} (T)	Ειδική ηλεκτρική αντίσταση ($\mu\Omega \cdot cm$)	Πυκνότητα υλικού (g/cm^3)
SiFe 3%	3% Si, 0.4% Al	0.2	1.95	59	7.6
CoFe	49% Co, 49% Fe, 2% V	0.1	2.4	42	8.12
NiFe	40% Ni, 60% Fe	0.35	1.53	60	8.2
SiFe 6.5%	6.5% Si, Fe	0.1	1.8	82	7.57

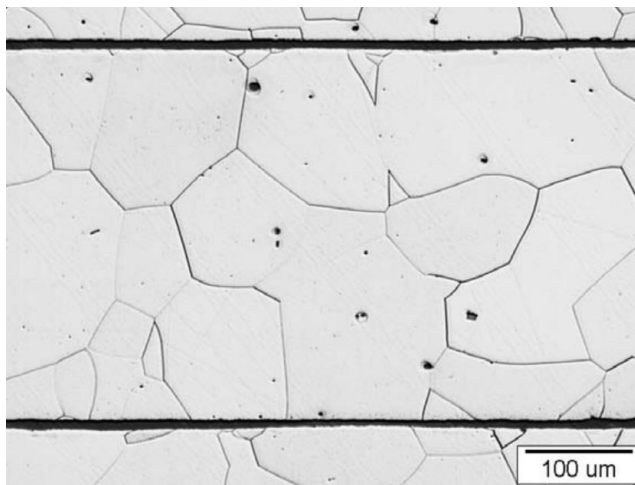
3.1 Silicon-iron (SiFe)

Τα κράματα πυριτίου (Si) – σιδήρου (Fe) αποτελούν το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο σιδηρομαγνητικό υλικό στις ηλεκτρικές μηχανές και είναι διαθέσιμο σε δύο τύπους ελασμάτων: με κατευθυνόμενους κόκκους (grain-oriented, GO) ή χωρίς (non-oriented, NO).

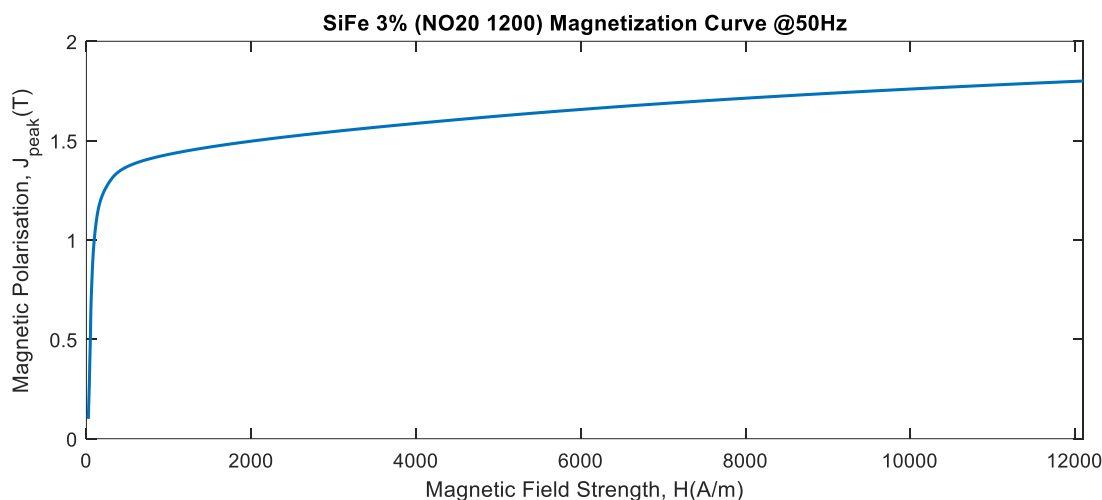
Τα ελάσματα χωρίς κατευθυνόμενους κόκκους είναι ιστροπικά και χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις περιστρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές, λόγω της αλλαγής της μεταβλητότητας της κατεύθυνσης της μαγνητικής ροής, με την περιστροφή του πεδίου.

Αντιθέτως, τα ελάσματα με κατευθυνόμενους κόκκους είναι ανιστροπικά, παρουσιάζουν μία κατεύθυνση στην οποία οι μαγνητικές ιδιότητες είναι βελτιωμένες και χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών και όταν απαντώνται υψηλές συχνότητες.

Σε ελάσματα μη κατευθυνόμενων κόκκων, η περιεκτικότητα σε σίδηρο διαμορφώνεται από 99% σε κράματα χαμηλής περιεκτικότητας πυριτίου με χρήση σε συμβατικές εφαρμογές, έως και 97% σε κράματα υψηλής περιεκτικότητας σε πυρίτιο με χρήση σε απαιτητικές εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, όπου ο βαθμός απόδοσης και η πυκνότητα ισχύος της μηχανής είναι κομβικής σημασίας.



Σχήμα 3.5. Μικρογραφία επιφάνειας ελάσματος συμβατικού ατσάλιού όπου διακρίνονται οι πολυγωνικοί κόκκοι (grains) [25]

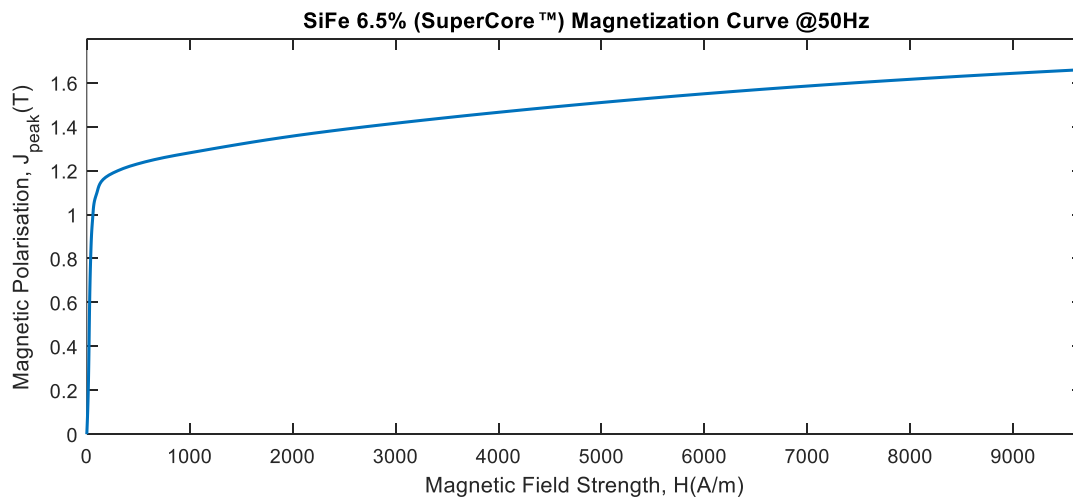


Σχήμα 3.6. Καμπύλη μαγνήτισης πυριτιούχου σιδήρου 3% [21]

Τα υπόλοιπα στοιχεία του κράματος αποτελούν το αλουμίνιο (Al) και το μαγγάνιο (Mn) με περιεκτικότητα έως 1% και 0.5% αντίστοιχα. Η προσθήκη πυριτίου στο σίδηρο προσδίδει ευεργετικές μαγνητικές ιδιότητες στο κράμα όπως: (i) ευκολότερη μαγνήτιση και απομαγνήτιση του υλικού, (ii) αυξημένη ηλεκτρική αντίσταση που οδηγεί σε μείωση των επαγόμενων δινορρευμάτων, (iii) βελτίωση τη σταθερότητας των μαγνητικών ιδιοτήτων στο χρόνο, ενώ από την άλλη τα μειονεκτήματα αυτής της πρόσμιξης συναντώνται στην: (i) μείωση της θερμοκρασίας Curie (θερμοκρασία στην οποία το μαγνητικό υλικό χάνει τις μαγνητικές του ιδιότητες), (ii) μείωση του σημείου κορεσμού της μαγνητικής επαγωγής, (iii) ευθραυστότητα σε κράματα με περιεκτικότητα πάνω από 2% πυρίτιο. Αντίστοιχα η προσθήκη αλουμινίου αυξάνει την ηλεκτρική αντίσταση αλλά μειώνει την μαγνητική διαπερατότητα του υλικού, ενώ η αύξηση της συγκέντρωσης μαγγανίου σχηματίζει μεγαλύτερους κόκκους στην επιφάνεια του ελάσματος, με αποτέλεσμα την αύξηση της διαπερατότητας, υπό το κόστος όμως αυξημένων απωλειών [26].

Υψηλής περιεκτικότητας πυριτιούχοι χάλυβες (SiFe 6.5%) χρησιμοποιούνται κυρίως σε μηχανές υψηλών ταχυτήτων [27], [28] λόγω της μεγάλης ηλεκτρικής αντίστασης που προσφέρουν, περιορίζοντας έτσι τα δινορρεύματα που αναπτύσσονται στις υψηλές συχνότητες λειτουργίας. Συγκεκριμένα, παρά το χαμηλότερο σημείο κορεσμού που εμφανίζουν σε σχέση με τα κράματα κοβαλτίου – σιδήρου, φαίνεται πως σε εφαρμογές

πολύ υψηλών ταχυτήτων, όπως οι αεροπορικές εφαρμογές, είναι προτιμότερες, λόγω των χαμηλών απωλειών πυρήνα που εμφανίζουν σε οδήγηση υψηλών συχνοτήτων [28].

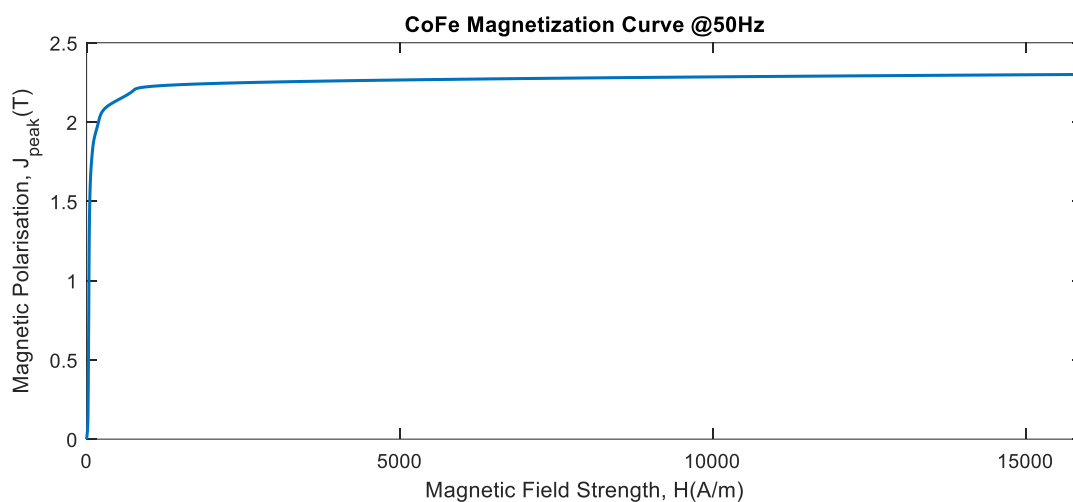


Σχήμα 3.7. Καμπύλη μαγνήτισης πυριτιούχου σιδήρου 6.5%, βάση των πειραματικών μετρήσεων στο [24]

Παρόλα αυτά, τα μειονεκτήματα του εξωτικού αυτού υλικού συναντώνται στη μείωση της μαγνητικής επαγωγής και της μαγνητικής διαπερατότητας, λόγω του αυξημένου περιεχόμενου σε πυρίτιο, η οποία επίσης καθιστά το κράμα πιο εύθραυστο και σκληρό οδηγώντας σε πολυπλοκότερες και πολύ ακριβότερες διεργασίες κατασκευής και επεξεργασίας, σε σχέση με τις προηγούμενες προσμίξεις [29].

3.2 Cobalt Iron alloy (CoFe)

Το κράμα κοβαλτίου (Co) και σιδήρου (Fe), αποτελεί το ακριβότερο σιδηρομαγνητικό υλικό, λόγω της υψηλής συγκέντρωσης σε κοβάλτιο, που αποτελεί εξωτικό υλικό. Το κράμα αυτό, παρουσιάζει το υψηλότερο σημείο κορεσμού της μαγνητικής επαγωγής σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά, φτάνοντας έως τα 2.43 T [29]. Μια τυπική σύνθεση του κράματος αποτελείται από 48-50% κοβάλτιο, περίπου 48% σίδηρο και 2% βανάδιο (V). Μέσω κατάλληλων προσμίξεων, όπως με το νιόβιο (Nb) [30], αλλά και μέσω κατάλληλης θερμικής κατεργασίας, όπως ανόπτηση σε υψηλότερη θερμοκρασία [31], είναι δυνατό να επιτευχθούν χαμηλότερες απώλειες πυρήνα και μεγαλύτερη μαγνητική διαπερατότητα ή να ενισχυθεί η μηχανική αντοχή της λαμαρίνας.



Σχήμα 3.8. Καμπύλη μαγνήτισης κράματος κοβαλτίου – σιδήρου [22]

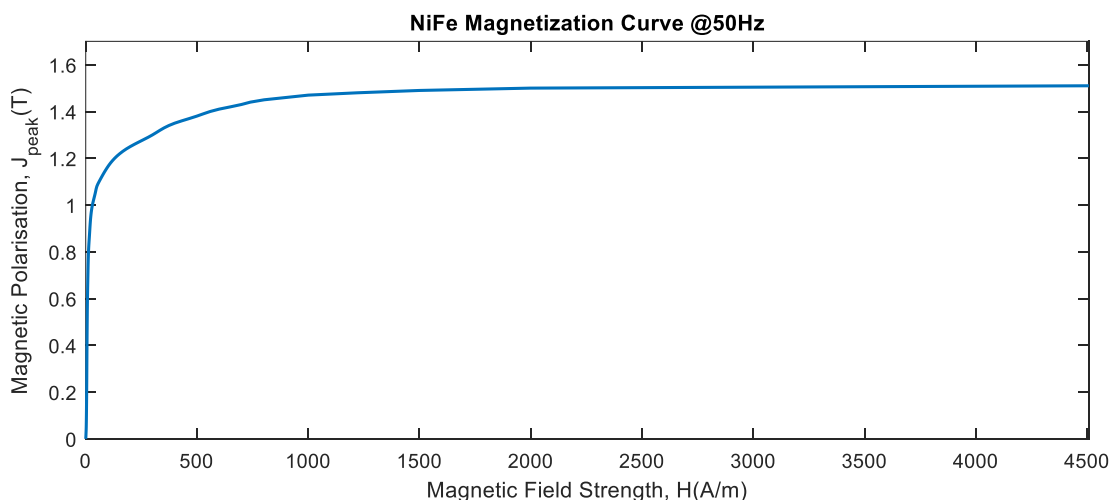
Το υψηλό σημείο μαγνητικής φόρτισης στο οποίο μπορεί να φτάσει, το καθιστά ιδανική επιλογή σε εφαρμογές που απαιτούν πολύ υψηλή πυκνότητα ισχύος, αφού επιτρέπει το σχεδιασμό μηχανών μικρότερου μεγέθους και βάρους σε σχέση με τη συμβατική λαμαρίνα. Τέτοιες εφαρμογές είναι κυρίως αεροναυπηγικές, στρατιωτικές και εφαρμογές μηχανοκίνητου αθλητισμού όπου το μικρότερο βάρος αντισταθμίζει την υψηλότερη τιμή.

Ακόμα, οι λαμαρίνες κοβαλτίου – σιδήρου παρουσιάζουν υψηλότερη μηχανική αντοχή σε σχέση με τις λαμαρίνες συμβατικών υλικών, με αποτέλεσμα να επιλέγονται συχνά για την κατασκευή δρομέων σε εφαρμογές πολύ υψηλών ταχυτήτων, όπως σε γεννήτριες μικροτουρμπίνας, σε ηλεκτρομαγνητικά ρουλεμάν καθώς και σε σφονδύλους αποθήκευσης ενέργειας.

Το σοβαρότερο μειονέκτημα αυτού του υλικού είναι η υψηλή τιμή του, ειδικότερα όταν πρόκειται για υψηλές συγκεντρώσεις κοβαλτίου, ενώ πρόσφατα έχει αναπτυχθεί ενδιαφέρον στη χρήση λαμαρινών κοβαλτίου σιδήρου με συγκέντρωση 15-30% κοβαλτίου, που παρουσιάζουν μεν ελαφρώς μικρότερο σημείο κορεσμού, αλλά επιτυγχάνεται δε μείωση του συνολικού κόστους.

3.3 Nickel Iron alloy (NiFe)

Οι λαμαρίνες από κράμα νικελίου (Ni) και σιδήρου (Fe), έχουν βέλτιστη χρήση σε εφαρμογές όπου οι απώλειες πυρίνα αποτελούν κομβικό παράγοντα. Τυπικές προσμίξεις του κράματος περιέχουν 40 – 50% νικέλιο, η αύξηση της συγκέντρωσης του οποίου, οδηγεί σε μεγαλύτερη μαγνητική διαπερατότητα, εις βάρος όμως της ηλεκτρικής αντίστασης η οποία μειώνεται, οδηγώντας έτσι σε αύξηση των δινορρευσμάτων [19].



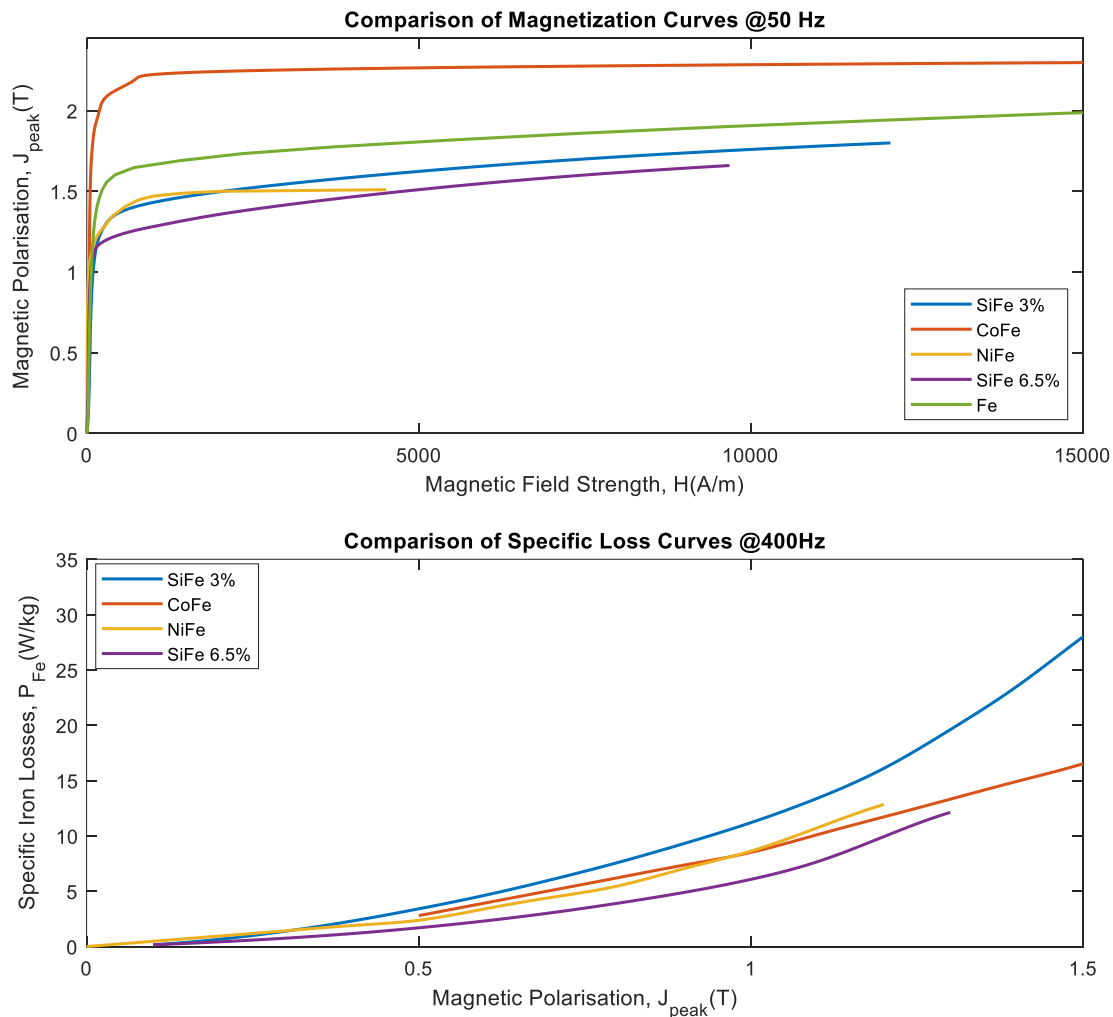
Σχήμα 3.9. Καμπύλη μαγνήτισης κράματος νικελίου – σιδήρου, βάση των πειραματικών μετρήσεων στο [23]

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτού του σιδηρομαγνητικού υλικού είναι η πολύ χαμηλή μαγνητική αντίσταση και η κατ' επέκταση πολύ υψηλή μαγνητική διαπερατότητα, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες λαμαρίνες CoFe και SiFe, ενώ κύριο μειονέκτημα αποτελεί το χαμηλό σημείο κορεσμού της μαγνητικής επαγωγής.

Βάση των παραπάνω μαγνητικών ιδιοτήτων, οι λαμαρίνες NiFe 45-50%, βρίσκουν συχνή χρήση σε εφαρμογές μηχανές χαμηλής ισχύος και υψηλής ταχύτητας, όπου κύριος παράγοντας είναι οι χαμηλές απώλειες, όπως σε εργαλειομηχανές ιατρικής χρήσης και αεροδιαστημικές εφαρμογές [29].

3.4 Σύγκριση σιδηρομαγνητικών υλικών

Οι παραπάνω ιδιότητες των προς μελέτη σιδηρομαγνητικών υλικών, μπορούν εύκολα να γίνουν αντιληπτές, μελετώντας τα παρακάτω συγκεντρωτικά διαγράμματα των $B-H$ καμπυλών, και καμπυλών ειδικών απωλειών όλων των υλικών.



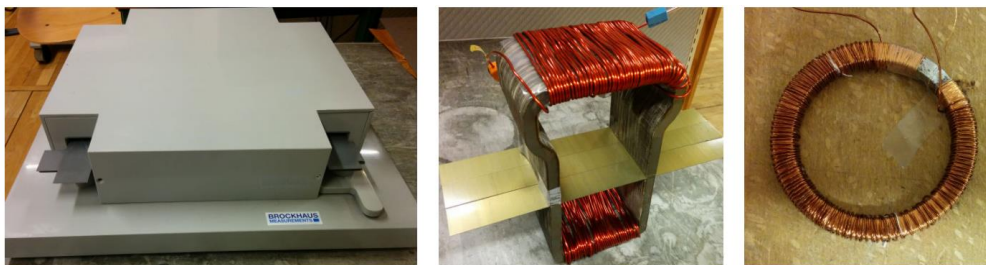
Σχήμα 3.10. Καμπύλες $B-H$ αρχικής μαγνήτισης (πάνω) και καμπύλες ειδικών απωλειών σε 400 Hz (κάτω), προς επιβεβαίωση των επιμέρους μαγνητικών ιδιοτήτων των υλικών

Πράγματι παρατηρείται πως το CoFe παίρνει τις υψηλότερες μαγνητικής επαγωγής για τις δεδομένες φορτίσεις, λόγω της μεγαλύτερης μαγνητικής διαπερατότητας. Παρατηρείται ακόμα πως και ο καθαρός σίδηρος φτάνει σε κορεσμό σε υψηλές τιμές μαγνητικής φόρτισης, παρόλα αυτά, δεν εξετάζεται στην παρούσα εργασία, λόγω των υψηλών απωλειών πυρήνα που εμφανίζει. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί, πως οι χαμηλές ειδικές απώλειες πυρήνα του SiFe 6.5% οφείλονται επίσης στην πολύ λεπτή λαμαρίνα που έχει επιλεγεί, πάχους 0.1mm , οδηγώντας έτσι σε μειωμένες απώλειες δινορρευμάτων.

3.5 Πειραματικές μέθοδοι υπολογισμού μαγνητικών ιδιοτήτων σιδηρομαγνητικών λαμαρινών

Ο χαρακτηρισμός και η αξιολόγηση των μαγνητικών υλικών βάση των μαγνητικών ιδιοτήτων τους, όπως η καμπύλη υστέρησης και οι ειδικές απώλειες πυρήνα, μπορούν να προσδιοριστούν μέσω μετρήσεων σε δοκίμια από μαγνητική λαμαρίνα. Οι βασικές πειραματικές μέθοδοι μετρήσεων είναι η διάταξη Epstein (Epstein Frame), η δοκιμή μεμονωμένων φύλλων (Single Sheet Test – SST) και μετρήσεις πυρήνα δακτυλίου (ring core

measurements). Όταν οι μετρήσεις αφορούν αποκλειστικά την μελέτη των μαγνητικών ιδιοτήτων της λαμαρίνας και αγνοούνται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που φέρει μια ηλεκτρική μηχανή, τότε εφαρμόζονται οι δύο πρώτες μέθοδοι, ενώ τα προς εξέταση φύλλα λαμαρίνας έχουν απλή γεωμετρία και διαστάσεις βάση συγκεκριμένων προτύπων. Τα δεδομένα καταλόγου που παρέχουν οι κατασκευαστές σιδηρομαγνητικών λαμαρινών, λαμβάνονται χρησιμοποιώντας μετρήσεις μέσω της διάταξης Epstein. Το κύριο μειονέκτημα των δυο πρώτων μεθόδων είναι ότι η γεωμετρία των δειγμάτων που εξετάζονται δεν είναι αντιπροσωπευτική μιας πραγματικής ηλεκτρικής μηχανής [32].



i. Διάταξη Epstein

ii. Single Sheet Test

iii. Ring Core

Σχήμα 3.11. Διατάξεις μέτρησης μαγνητικών ιδιοτήτων σιδηρομαγνητικών λαμαρινών και πυρήνων [33]

Οι μετρήσεις σε πυρήνα δακτυλίου εφαρμόζονται για την αξιολόγηση μικρών γεωμετριών του πυρήνα, (όπως η επίδραση της κοπής του υλικού) και σε σιδηρομαγνητικά υλικά υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι η γεωμετρία που χρησιμοποιείται είναι αντιπροσωπευτική του σώματος στάτη (yoke), ενώ στη συγκεκριμένη τοπολογία αναπτύσσεται κλειστή διαδρομή της μαγνητικής ροής χωρίς την παρουσία διακένων [33]. Ακόμα, μια εναλλακτική αυτής της μεθόδου περιλαμβάνει χρήση πραγματικού πυρήνα ηλεκτρικής μηχανής, ενώ οι αρχές λειτουργίας και η μεθοδολογία μετρήσεων παραμένει ίδια.

3.6 Επιπτώσεις κατασκευαστικών διεργασιών στις μαγνητικές ιδιότητες των σιδηρομαγνητικών υλικών

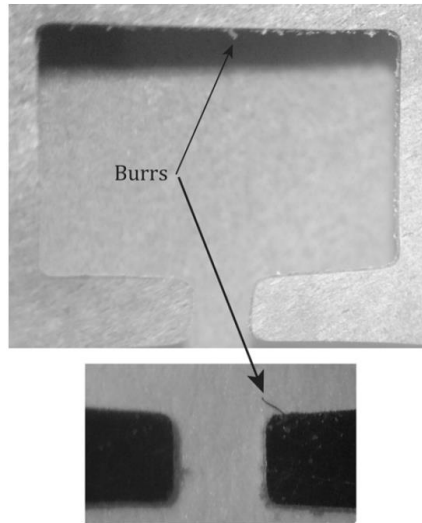
Η παραγωγή μιας ηλεκτρικής μηχανής αποτελείται από διαφορετικές κατασκευαστικές διεργασίες. Κάθε ένα από αυτά τα στάδια παραγωγής προκαλεί μηχανικές και θερμικές τάσεις στο μαγνητικό υλικό που χρησιμοποιείται στο πυρήνα της μηχανής, οι οποίες ενδέχεται να υποβαθμίσουν τις μαγνητικές και ηλεκτρικές του ιδιότητες. Οι κυριότερες διεργασίες κατά την παραγωγή των ηλεκτρικών μηχανών, καθώς και οι αντίστοιχες επιδράσεις αυτών, αναλύονται στις κάτωθι υποενότητες.

3.6.1 Κοπή λαμαρινών

Οι λαμαρίνες σιδηρομαγνητικών υλικών που χρησιμοποιούνται στους πυρήνες στάτη και δρομέα των ηλεκτρικών μηχανών (electrical steels) αποκτούν το τελικό τους σχήμα μέσω κοπής με laser ή μέσω μηχανικής κοπής (διάτρησης-punching). Η κοπή μέσω laser είτε μέσω punching αποτελούν τις κυριότερες μεθόδους σε περιπτώσεις μαζικής παραγωγής [34].

Λόγω των μηχανικών καταπονήσεων που προκαλούνται κατά την κοπή, παρουσιάζεται μείωση της σχετικής διαπερατότητας, επομένως για την ανάπτυξη της επιθυμητής μαγνητικής επαγωγής στο υλικό, απαιτείται υψηλότερη ηλεκτρική φόρτιση των τυλιγμάτων, επομένως αύξηση των απωλειών χαλκού. Στις περιπτώσεις της μηχανικής κοπής, οι περιοχές της λαμαρίνας που υποβαθμίζονται μαγνητικά μπορεί να φτάσουν και τα 15 mm από το άκρο κοπής, ειδικά στην περίπτωση της υψηλής συγκέντρωσης πυριτίου στο υλικό [35]. Όσον αφορά τις επιπτώσεις της μηχανικής κοπής στις απώλειες πυρήνα, η μείωση της μαγνητικής διαπερατότητας

οδηγεί σε αύξηση των απωλειών υστέρησης, ενώ τα ρινίσματα σιδήρου που μένουν στα άκρα κοπής της λαμαρίνας, οδηγούν σε υποβάθμιση της μόνωσης και κατ' επέκταση σε βραχυκυκλώματα μεταξύ των φύλλων λαμαρίνας, αυξάνοντας έτσι περαιτέρω τις απώλειες δινορρευμάτων [36].



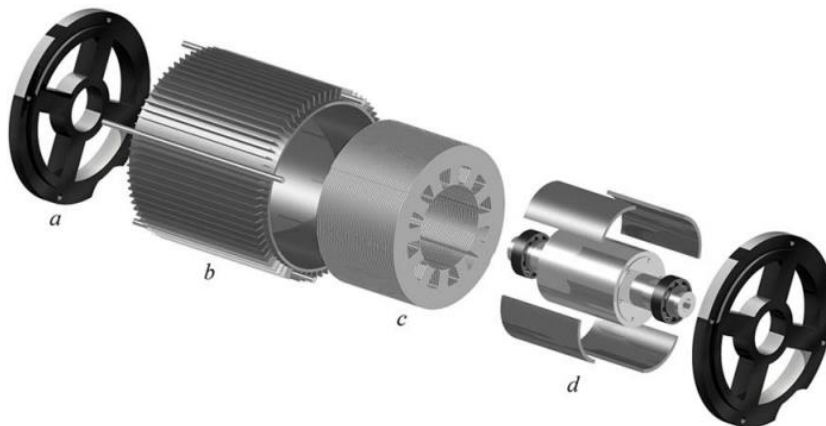
Σχήμα 3.12. Ρινίσματα σιδήρου (burrs) στα άκρα κοπής της αύλακος και των δοντιών στάτη [22]

Όσον αφορά την κοπή λαμαρινών με laser, οι επιπτώσεις στην επιφάνεια του υλικού είναι κυρίως θερμικές, η αύξηση των απωλειών πυρήνα είναι μεγαλύτερη από ότι στην διάτρηση, ενώ οι περιοχές που δέχονται αλλοίωση των μαγνητικών τους ιδιοτήτων, δεν περιορίζονται σε λίγα mm από τα άκρα κοπής, αλλά εμφανίζονται σε όλη την επιφάνεια του υλικού [37].

3.6.2 Συναρμολόγηση λαμαρινών πυρήνα και μηχανής

Μετά την κοπή των λαμαρινών, σειρά έχει η συναρμολόγηση των ελασματοποιημένων σωμάτων στάτη και δρομέα, όπου οι λαμαρίνες συγκρατούνται μεταξύ τους μέσω ειδικής ρητίνης για μόνωση και πιέζονται για να σχηματίσουν τον πυρήνα. Κατά τη διαδικασία αυτή, το υλικό των λαμαρινών μπορεί να δεχτεί μηχανικές παραμορφώσεις, οι οποίες αυξάνουν τις απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων. Ακόμα, κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης της στοίβας λαμαρινών κατά μήκος, προκαλούνται επιπλέον θερμικές και μηχανικές τάσεις που υποβαθμίζουν περαιτέρω τις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού.

Μετά την κατασκευή των πυρήνων στάτη και δρομέα, σειρά έχει η συναρμολόγηση της μηχανής.



Σχήμα 3.13. Συναρμολόγηση μηχανής μονίμων μαγνητών: (a) Καπάκια μηχανής, (b) κέλυφος μηχανής, (c) σώμα στάτη, (d) άξονας, σώμα δρομέα, μαγνήτες και ρουλεμάν [9]

Κατά τη διαδικασία αυτή, εισάγεται αρχικά ο άξονας στη σχεδιασμένη οπή του σώματος δρομέα, μέσω θερμικής διαστολής του δρομέα, εισαγωγής του άξονα και τη ψύξη στη συνέχεια του δρομέα για την πλήρη ενσωμάτωση του άξονα. Η διαδικασία αυτή ασκεί θερμικές και μηχανικές τάσεις στον ελασματοποιημένο δρομέα και τον άξονα, οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν τις μαγνητικές του πυρήνα δρομέα. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για την εισαγωγή του στάτη εντός του κελύφους, μέσω θερμικής διαστολής του κελύφους, με αποτέλεσμα την περαιτέρω υποβάθμιση των μαγνητικών ιδιοτήτων του υλικού και την αύξηση των απωλειών, ιδιαίτερα στην περίπτωση λαμαρινών σιδήρου με υψηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο [32].

Οι επιπτώσεις των ανωτέρω κατασκευαστικών διεργασιών, μπορούν να μοντελοποιηθούν σε επίπεδο προσομοίωσης, μέσω εισαγωγής κατάλληλων συντελεστών απωλειών, οι οποίοι ενσωματώνουν τις παραπάνω επιδράσεις στο μοντέλο, καθώς και μέσω μεταβολής της καμπύλης μαγνήτισης που χαρακτηρίζει το υλικό, κατ' αντιστοιχία των πειραματικών μετρήσεων [38], [39].

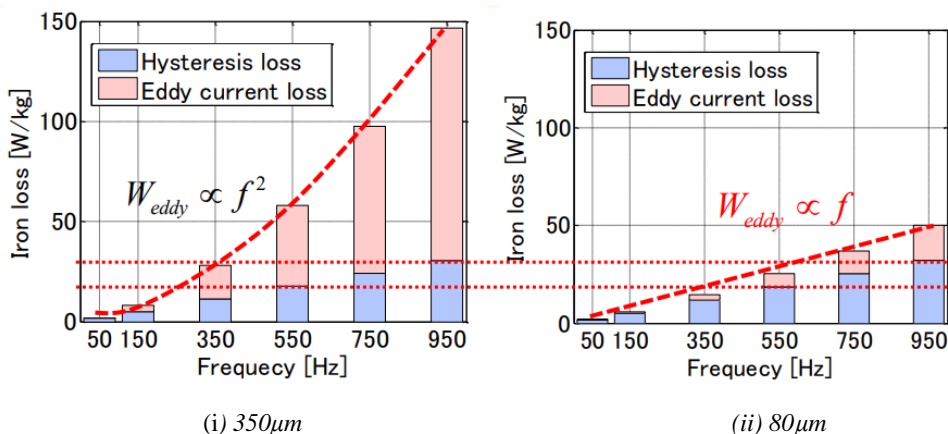
3.7 Νέες τάσεις και προκλήσεις στη σχεδίαση μηχανών

Οι σύγχρονες προκλήσεις στη σχεδίαση ηλεκτρικών μηχανών περιλαμβάνουν την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση των εξής παραγόντων:

- Υψηλότερη απόδοση
- Υψηλότερη πυκνότητα ροπής και ισχύος
- Μείωση κόστους κατασκευής
- Δυνατότητα μαζικής παραγωγής

Στα πλαίσια βελτιστοποίησης των παραπάνω παραγόντων, απαιτείται συζευγμένη σχεδίαση της μηχανής, όσον αφορά τους ηλεκτρικούς (τάση αντιστροφέα, περιορισμοί ρευμάτων), ηλεκτρομαγνητικούς (ροπή, κυμάτωση, αρμονικές), θερμικούς και μηχανικούς περιορισμούς της εκάστοτε εφαρμογής. Οι κυριότεροι άξονες στους οποίους επικεντρώνεται πρόσφατα η έρευνα τόσο σε ακαδημαϊκό επίπεδο όσο και σε επίπεδο βιομηχανίας είναι τα προηγμένα υλικά, νέα σχεδιαστικά μοτίβα και μέθοδοι ψύξης.

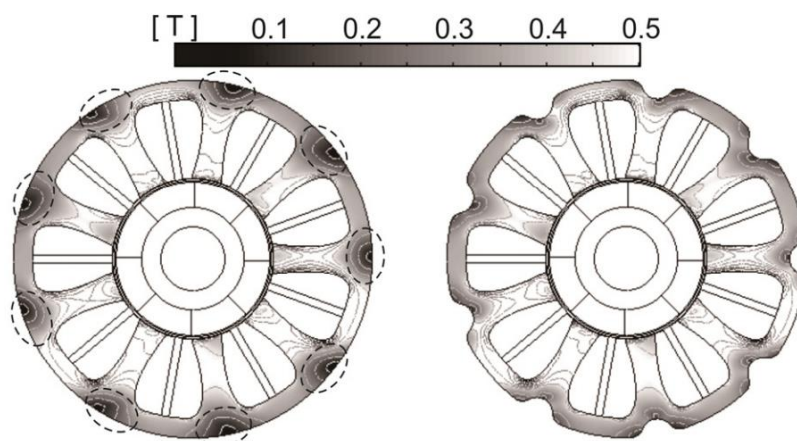
Τα προηγμένα υλικά των οποίων η επίδραση μελετάται στα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης των ηλεκτρικών μηχανών είναι κράματα κοβαλτίου – σιδήρου (CoFe) τα οποία γίνονται ελκυστικά λόγω της υψηλότερης πυκνότητας ροπής (+20-25%) σε σχέση με μια ίδια μηχανή συμβατικού ατσάλιου, καθώς και κράματα πυριτίου – σιδήρου (SiFe) με υψηλότερη περιεκτικότητα σε πυρίτιο, αφού κάτι τέτοιο οδηγεί σε μείωση των ειδικών απωλειών πυρήνα, επομένως σε υψηλότερη απόδοση της μηχανής [40]. Ακόμα, η χρήση εξαιρετικά λεπτής σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας SiFe 3.5%, πάχους 80μm, οδηγεί στην δραστική μείωση των δινορρευμάτων και κατ' επέκταση των συνολικών απωλειών πυρήνα, ιδιαίτερα σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων, με αποτέλεσμα τελικά οι απώλειες δινορρευμάτων να είναι ανάλογες της συχνότητας, και όχι του τετραγώνου της συχνότητας, όπως ήταν έως τώρα δεδομένο [41].



Σχήμα 3.14. Απώλειες πυρήνα και επιμέρους συνιστώσες σε συμβατική λαμαρίνα πάχους 350μm (αριστερά) και σε λαμαρίνα SiFe 3.5% πάχους 80μm, για διάφορες συχνότητες τροφοδότησης [41]

Επίσης, προτείνεται η θεώρηση των μαγνητικών ιδιοτήτων ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, όχι ως συνάρτηση 2 μεταβλητών (όπως η καμπύλη μαγνήτισης $B-H$ και η καμπύλη ειδικών απωλειών $P_{Fe}-B$), αλλά συναρτήσει 3 μεταβλητών με την προσθήκη της σχετικής γωνίας θ_{BH} των διανυσμάτων της μαγνητικής επαγωγής \vec{B} και της έντασης του μαγνητικού πεδίου \vec{H} , που επιτρέπει τον πλήρη χαρακτηριστικό του υλικού αφού λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση της κατεύθυνσης των διανυσμάτων κατά την περιστροφή του πεδίου εντός της μηχανής [42].

Όσον αφορά τη σχεδίαση των μηχανών, αν και αποτελεί γνωστή τακτική η σχεδίαση στρογγυλότερων αυλάκων, προκειμένου να αποφευχθούν οι απότομες γωνίες στα δόντια που οδηγούν σε κορεσμό της μαγνητικής επαγωγής στα σημεία αυτά, προτείνεται πιο συγκεκριμένα η σχεδίαση των δοντιών βάση της καμπύλης Μπεζιέ (Bézier curve), αφού κάτι τέτοιο φαίνεται να μειώνει τις απώλειες πυρήνα λόγω της ομαλοποίησης των γωνιών των δοντιών [43]. Τέλος, η δημιουργία «μαργαρίτας» στην εξωτερική ακτίνα στάτη, επιτρέπει την μείωση του όγκου του σιδήρου σε περιοχές που η πυκνότητα της μαγνητικής ροής ήταν πολύ χαμηλή (επιπλέον επίδραση του μοντέλου Μπεζιέ), επομένως με την μείωση του βάρους και την ροπή να παραμένει στα ίδια επίπεδα, επιτυγχάνεται αύξηση της πυκνότητας ροπής [43].



Σχήμα 3.15. Δημιουργία «μαργαρίτας» σε περιοχές του yoke, με σκοπό την αύξηση της πυκνότητας ροπής της μηχανής [43].

Όσον αφορά τους μαγνήτες στις μηχανές επιφανειακών μονίμων μαγνητών, φαίνεται πως η ελασματοποίηση τους μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση των απωλειών δινορρευσμάτων, αφού μειώνεται το συνολικό πάχος του υλικού [44] εντός του οποίου περνάνε τα δινορρεύματα.

Τέλος, νέες μέθοδοι ψύξης που στοχεύουν στην δυνατότητα τροφοδότησης των τυλιγμάτων με υψηλότερα ρεύματα και κατ' επέκταση στην αύξηση της παραγόμενης ροπής, προτείνουν τις εξής διαμορφώσεις:

- Δίαυλοι ροής ψυκτικού υγρού (λάδι) στον στάτη και μόνωση του στάτη από τον δρομέα μέσω μανδύα ανθρακονήματος [45]
- Κέλυφος (housing) με υδροχυτώνια για ροή ψυκτικού υγρού και σύστημα ψεκασμού στα ακροτυλιγμάτα (εκεί όπου βρίσκεται συνήθως το επίκεντρο των απωλειών θερμότητας των τυλιγμάτων) [46].
- Δίαυλοι ψύξης διαμέσου των ακροτυλιγμάτων από θερμοαγώγιμα υλικά όπως PVC, σιλικονούχο ελαστικό, μέταλλο κ.α. [47]
- Εμποτισμός των αυλάκων και των ακροτυλιγμάτων στάτη με θερμοαγώγιμα υλικά όπως βερνίκι, εποξειδική ρητίνη και σιλικονούχα υλικά, με σκοπό την καλύτερη αγωγή θερμότητας [48]

4. ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΠΥΡΗΝΑ

Οι απώλειες πυρήνα ή σιδήρου, οφείλονται στη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό ενός σιδηρομαγνητικού πυρήνα και ο μηχανισμός αυτών των απωλειών βασίζεται στην αρχή του φαινομένου Joule. Αποτελούνται από δύο βασικές συνιστώσες: τις απώλειες υστέρησης (hysteresis) και τις απώλειες δινορρευμάτων (eddy currents).

4.1 Απώλειες υστέρησης

Για γίνουν κατανοητές οι απώλειες υστέρησης θα πρέπει να εξεταστεί η μαγνητική συμπεριφορά των σιδηρομαγνητικών υλικών και πιο συγκεκριμένα η δομή τους σε μικροσκοπική κλίμακα. Το εσωτερικό του σιδήρου, του κοβαλτίου, του νικέλιο και κραμάτων τους, αποτελείται από ομοιόμορφα μαγνητισμένες περιοχές, που ονομάζονται τομείς (domains). Σε ένα αμαγνήτιστο κομμάτι υλικού, το πλήθος των μικροσκοπικών τομέων του είναι τυχαία προσανατολισμένο, ή αντίστοιχα, το στατιστικό άθροισμα της μαγνήτισης όλων των τομέων είναι μηδενικό. Οι γειτονικοί τομείς, χωρίζονται από τα τοιχώματα μαγνητικών τομέων ή περιοχών (domain walls). Τα τοιχώματα των τομέων είναι στην πραγματικότητα ενεργειακές ζώνες μέσω των οποίων η μαγνήτιση αλλάζει κατεύθυνση. Αντίθετα, με την εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, οι τομείς που είναι προσανατολισμένοι στην κατεύθυνση του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, διευρύνονται εις βάρος των υπολοίπων που είναι προσανατολισμένοι σε άλλες κατευθύνσεις.



Σχήμα 4.1. Μαγνητικοί τομείς προ (αριστερά) και μετά (δεξιά) μαγνήτισης. Με μαύρο χρώμα φαίνονται τα τοιχώματα που χωρίζουν τους γειτονικούς τομείς [32]

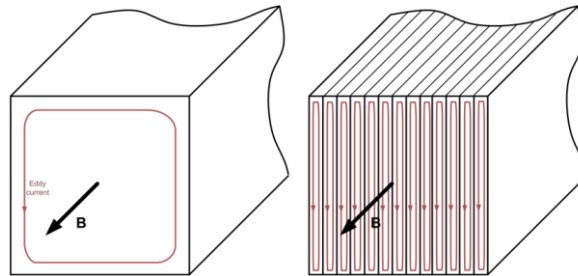
Με την αύξηση της έντασης του εξωτερικά επιβαλλόμενου πεδίου, οι τομείς του μαγνητικού υλικού που είχαν διαφορετικό προσανατολισμό, ευθυγραμμίζονται τελικά προς τη διεύθυνση του πεδίου. Στην πραγματικότητα όμως, εντός του σιδηρομαγνητικού υλικού, υπάρχουν προσμίξεις με άλλα μη μαγνητικά στοιχεία (άνθρακας, θείο) τα οποία παρεμβαίνουν της διεύρυνσης των τοιχωμάτων, προκαλώντας το φαινόμενο Barkhausen: καθώς το μαγνητίζον πεδίο μεταβάλλεται, η μαγνήτιση αλλάζει σε χιλιάδες μικροσκοπικά ασυνεχή άλματα, αφού η προσανατολισμένη κίνηση των τοιχωμάτων εμποδίζεται αρχικά από τέτοια μη-μαγνητικά μικροσκοπικά στοιχεία (γνωστά ως σημεία αγκυρώσεως - pinning sites), τα οποία τείνουν τελικά να ξεπεραστούν με την περαιτέρω αύξηση του εξωτερικού πεδίου. Αυτή η ταχεία υπερπήδηση των σημείων αγκυρώσεως, δημιουργεί αιχμές στην επαγόμενη τάση, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται τοπικά δινορρεύματα τα οποία δημιουργούν απώλειες Joule, που ορίζονται ως απώλειες υστέρησης. Το φαινόμενο Barkhausen είναι ο κύριος παράγοντας που καθορίζει την μορφή της καμπύλης υστέρησης των μαγνητικών υλικών, αφού οι τομείς δεν επιστρέφουν στην αρχική ελάχιστη ενεργειακή τους διαμόρφωση όταν αφαιρείται το εξωτερικό πεδίο επειδή τα τοιχώματα περιοχής τείνουν να «πιαστούν» σε ελαττώματα του κρυσταλλικού πλέγματος (λόγω των προσμίξεων), διατηρώντας την υπάρχουσα μαγνήτιση τους (παραμένουσα μαγνήτιση) [32], [33].

4.2 Απώλειες δινορρευμάτων

Όταν ένα αγωγίμο 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 που

ρέουν σε κλειστούς βρόχους, κάθετα στο επίπεδο της κατεύθυνσης της μαγνητικής ροής προσπαθώντας να διατηρήσουν σταθερό το μαγνητικό πεδίο που έχει αναπτυχθεί στο υλικό (νόμος Lenz). Τα ρεύματα αυτά ονομάζονται δινορρεύματα, λόγω του σχηματισμού δινών κατά την κυκλοφορία τους και προκαλούν τις θερμικές απώλειες μέσα στον μαγνητικό πυρήνα των ηλεκτρικών μηχανών. Η παρουσία δινορρευμάτων οδηγεί ακόμα σε διεύρυνση της καμπύλης υστέρησης και επομένως σε αύξηση της μαγνητικής αντίστασης [49].

Οι απώλειες δινορρευμάτων εξαρτώνται από την συχνότητα και το πάχος της μαγνητικής λαμαρίνας, επομένως, για την εξάλειψη των απωλειών που προκαλούν, ο μαγνητικός πυρήνας των ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος κατασκευάζεται από πολύ λεπτά ελάσματα του σιδηρομαγνητικού υλικού, τα οποία είναι μονωμένα μεταξύ τους, μέσω ρητίνης.



Σχήμα 4.2. Περιορισμός κυκλοφορίας δινορρευμάτων μέσω ελασματοποίησης του σιδηρομαγνητικού πυρήνα [32]

Η κυκλοφορία των δινορρευμάτων εντός του υλικού έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση του επιδερμικού φαινομένου. Συγκεκριμένα, παρατηρείται σταδιακή μείωση της μαγνητικής επαγωγής σε μεγαλύτερα βάθη και ως εκ τούτου περιορισμός της μαγνητικής ροής σε μια μικρή περιοχή κοντά στην επιφάνεια του υλικού.

Το πάχος των ελασμάτων του πυρήνα επιλέγεται μικρότερο από το μισό του βάθους διείσδυσης των δινορρευμάτων δηλαδή για συχνότητα 50 Hz και συμβατικό σιδηρομαγνητικό υλικό το πάχος πρέπει να είναι μικρότερο από 0.5 mm, επιτρέποντας έτσι στη μαγνητική ροή να διεισδύσει πλήρως σε κάθε φύλλο λαμαρίνας [49].

4.3 Μοντέλα απωλειών

Για την εκτίμηση των απωλειών πυρήνα, διάφορα μοντέλα εκτίμησης απωλειών σιδήρου (iron loss models) έχουν προταθεί μέχρι σήμερα στη βιβλιογραφία. Οι κυριότερες προσεγγίσεις των απωλειών στηρίζονται σε εμπειρικούς τύπους και σταθερές, ενώ υπάρχουν κομβικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη στην επιλογή του κατάλληλου μοντέλου, τους οποίους θα δούμε αργότερα. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται συνοπτικά τα πιο ευρέως γνωστά μοντέλα εκτίμησης απωλειών σιδήρου, ενώ επίσης εξετάζονται οι σημαντικότερες παραδοχές και οι περιορισμοί τους.

4.3.1 Μοντέλα βασισμένα στην εξίσωση Steinmetz

Ένα πλήθος μοντέλων απωλειών βασίζονται στην εμπειρική προσέγγιση που εισήγαγε πρώτος ο Steinmetz το 1892 [50], η οποία όμως ισχύει για ημιτονοειδή κατανομή του πεδίου, το οποίο αποτελεί το μεγαλύτερο μειονέκτημα της:

$$P_{Fe} = k_{SE} \cdot f^\alpha \cdot \hat{B}^\beta \quad (4.1)$$

όπου P_{Fe} είναι οι ειδικές απώλειες πυρήνα (W/kg), f είναι η συχνότητα, \hat{B} είναι το μέγιστο της μαγνητικής επαγωγής, ενώ οι συντελεστές k_{SE} , α και β προκύπτουν μέσω προσαρμογής της καμπύλης των πειραματικών μετρήσεων που λαμβάνονται υπό ημιτονοειδή διέγερση.

Βάση της παραπάνω αρχικής εξίσωσης του Steinmetz, έχει αναπτυχθεί η τροποποιημένη εξίσωση Steinmetz (Modified Steinmetz Equation – MSE), η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα για συνθήκες μη ημιτονοειδούς διέγερσης:

$$P_{Fe} = k_{SE} \cdot f_{eq}^{\alpha-1} \cdot \hat{B}^\beta \cdot f \quad (4.2)$$

όπου f_{eq} είναι μια ισοδύναμη συχνότητα που εξαρτάται από τη συχνότητα μαγνήτισης και απομαγνήτισης του υλικού, η οποία τελικά είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής dB/dt :

$$f_{eq} = \frac{2}{\Delta B^2 \cdot \pi^2} \cdot \int_0^T \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt \quad (4.3)$$

όπου ΔB είναι το πλάτος της μαγνητικής επαγωγής μεταξύ μεγίστων (peak to peak). Ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η μείωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων όταν η θεμελιώδης συχνότητα της κυματομορφής είναι μικρή.

Μια ακόμα προσέγγιση είναι η γενικευμένη εξίσωση Steinmetz (Generalized Steinmetz Equation – GSE):

$$P_{Fe} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T k_{GSE} \cdot \left| \frac{dB}{dt} \right|^\alpha |B(t)|^{\beta-\alpha} dt \quad (4.4)$$

όπου k_{GSE} είναι συντελεστής σχετιζόμενος με τον αρχικό k_{SE} . Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι πως βελτιώνει την ακρίβεια της MSE, παρόλα αυτά χάνει την ακρίβεια της αν μια αρμονική συνιστώσα κοντά στη θεμελιώδη έχει υψηλή τιμή.

Συνοψίζοντας τις διαφορετικές προσεγγίσεις που στηρίζονται στην εξίσωση Steinmetz, πρέπει να σημειωθεί πως αποτελούν μια απλή και γρήγορη μέθοδο υπολογισμού των απωλειών, ενώ οι συντελεστές Steinmetz εξάγονται εύκολα αφού είτε παρέχονται από τον κατασκευαστή του υλικού είτε υπολογίζονται μέσω των πειραματικών μετρήσεων.

Τα μειονεκτήματα αυτών των μεθόδων έγκεινται στην ακρίβεια σε περιπτώσεις κυματομορφών με υψηλό αρμονικό περιεχόμενο, αφού οι συντελεστές Steinmetz εξαρτώνται από τη συχνότητα, επομένως μπορεί να είναι δύσκολο να υπολογιστούν συντελεστές που δίνουν καλά αποτελέσματα σε όλο το εύρος συχνοτήτων της εφαρμοζόμενης κυματομορφής, ενώ ακόμα, σε χαμηλές θεμελιώδεις συχνότητες, όπου οι απώλειες οφείλονται κυρίως στο φαινόμενο της υστέρησης, υπάρχει ανεξάρτηση από την κυματομορφή της μαγνητικής επαγωγής, με αποτέλεσμα να προκύπτουν αποκλίσεις στην εκτίμηση των απωλειών [33].

4.3.2 Μοντέλα βασισμένα στη μέθοδο διαχωρισμού απωλειών

Μια διαφορετική μέθοδος θεώρησης των απωλειών είναι ο διαχωρισμός των απωλειών πυρήνα σε διαφορετικές συνιστώσες.

Όπως φαίνεται στο [51], ο Jordan θεμελίωσε το διαχωρισμό των απωλειών πυρήνα σε απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων. Οι συνιστώσες αυτές είναι ανάλογες του τετραγώνου του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής \hat{B} , ενώ ο όρος της υστέρησης εξαρτάται από τη συχνότητα f , ορίζοντας έτσι τις στατικές απώλειες, ενώ ο όρος των δινορρευμάτων εξαρτάται από το τετράγωνο της συχνότητας f^2 , ορίζοντας έτσι τις δυναμικές απώλειες, κατ' αντιστοιχία της φυσικής τους περιγραφής:

$$P_{Fe} = P_{hys} + P_{ec} = k_{hyst} \cdot f \cdot \hat{B}^2 + k_{ec} \cdot f^2 \cdot \hat{B}^2 \quad (4.5)$$

όπου k_{hyst} και k_{ec} είναι οι συντελεστές υστέρησης και δινορρευμάτων, οι οποίοι προκύπτουν μέσω προσαρμογής των πειραματικών καμπυλών.

Η παραπάνω εξίσωση του Jordan αποδείχθηκε σωστή για διάφορες περιπτώσεις κραμάτων νικελίου σιδήρου (NiFe), όμως είναι ελλιπής σε θέμα ακρίβειας στις περιπτώσεις κραμάτων πυριτίου σιδήρου, επομένως οι Pry

και Bean στο [52] εισήγαγαν ένα διορθωτικό συντελεστή $n_{exc} = \frac{P_{ec_{measured}}}{P_{ec_{calculated}}} > 1$, προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν τις αποκλίσεις μεταξύ των απωλειών δινορρευμάτων που υπολογίζονται από την εξίσωση Jordan και των πειραματικά μετρούμενων απωλειών:

$$P_{Fe} = P_{hys} + n_{exc} \cdot P_{ec} = k_{hyst} \cdot f \cdot \hat{B}^2 + n_{exc} \cdot k_{ec} \cdot f^2 \cdot \hat{B}^2 \quad (4.6)$$

Μια περαιτέρω βελτίωση της ακρίβειας της μεθόδου αναπτύχθηκε από τον Bertotti [53], [54], ο οποίος προχώρησε στην προσθήκη του όρου απωλειών P_{exc} , που αποτελεί τις απώλειες ανώμαλης κατανομής δινορρευμάτων (anomalous or excess eddy current losses) και εξαρτάται από τη συχνότητα και την μέγιστη τιμή τις μαγνητικής επαγωγής. Ακόμα, στην προσπάθεια να ανταποκρίνονται περισσότερα μη συμβατικοί πυρήνες, όπως τα ελάσματα πυριτιούχου σιδήρου (SiFe) υψηλής περιεκτικότητας πυριτίου, εισήχθη ο συντελεστής προσαρμογής α για τις απώλειες υστέρησης, με συνήθεις τιμές από 1.6 έως 2.2 για φερρομαγνητικά υλικά και κράματα, διαμορφώνοντας έτσι την τελική σχέση:

$$P_{Fe} = P_{hys} + P_{ec} + P_{exc} = k_{hyst} \cdot f \cdot \hat{B}^\alpha + k_{ec} \cdot f^2 \cdot \hat{B}^2 + k_{exc} \cdot f^{1.5} \cdot \hat{B}^{1.5} \quad (4.7)$$

Ο συντελεστής k_{exc} στηρίζεται στην θεωρία που αναπτύχθηκε από τον Bertotti σχετικά με τα ενεργά μαγνητικά αντικείμενα και την κίνηση των τοιχωμάτων των μαγνητικών τομέων, και υπολογίζεται ως εξής:

$$k_{exc} = \sqrt{S \cdot V_0 \cdot \sigma \cdot G} \quad (4.8)$$

όπου S το εμβαδό της λαμαρίνας, $G \approx 0.136$ είναι ένας αδιάστατος συντελεστής σχετικός με την απόσβεση των δινορρευμάτων, σ η ηλεκτρική αντίσταση του σιδηρομαγνητικού υλικού και V_0 συντελεστής που εξαρτάται από τα τοπικά πεδία απομαγνήτισης και το μέγεθος των κόκκων στην επιφάνεια του υλικού [33].

4.3.3 Μοντέλα μαγνητικής υστέρησης

Μια ακόμη μέθοδος για τον υπολογισμό των απωλειών σιδήρου με μεγαλύτερη ακρίβεια, είναι η υλοποίηση μεθόδων μαθηματικής μοντελοποίησης της μαγνητικής υστέρησης. Τέτοια μοντέλα προσπαθούν να περιγράψουν τις φυσικές ιδιότητες της υστέρησης, είναι μη γραμμικά και ορισμένα από αυτά μπορούν να περιγράψουν δυναμικά φαινόμενα, όπως η ιδιότητα της μνήμης της μαγνητικής υστέρησης σε τοπικά σημεία. Προκειμένου να το πετύχουν, λαμβάνουν υπόψη τους την ύπαρξη όχι μόνο του μείζονα, αλλά και των ελάσσονων βρόχων μαγνητικής υστέρησης, επομένως απαιτούν περισσότερες μετρήσεις και δεδομένα των προς μελέτη υλικών. Τέτοια μοντέλα είναι το κλασσικό μοντέλο Preisach [55] και βελτιώσεις αυτού, όπως το δυναμικό μοντέλο Preisach [56], το μοντέλο υστέρησης – τριβής [57] και το μοντέλο απωλειών επιφάνειας [58], τα οποία περιγράφονται και αξιολογούνται λεπτομερώς στο [59].

Παρά την υψηλή ακρίβεια των παραπάνω μοντέλων, η επιλογή μοντέλων μαγνητικής υστέρησης για την πρόβλεψη των απωλειών σιδήρου αποφεύγεται συνήθως σε βιομηχανικές εφαρμογές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι απαιτούν την εισαγωγή δεδομένων από τις πλήρεις καμπύλες μαγνητικής υστέρησης των υλικών ενώ οι χρονικές απαιτήσεις για τον υπολογισμό τους είναι ιδιαίτερα υψηλές. Επομένως, η πρακτική εφαρμογή τους για την εκτίμηση απωλειών σιδήρου είναι περιορισμένη, με την πλειοψηφία των εφαρμογών να χρησιμοποιεί είτε τα μοντέλα της εξίσωσης Steinmetz είτε τα μοντέλα της μεθόδου διαχωρισμού των απωλειών, τα οποία ευνοούν την ενσωμάτωσή τους σε προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων [9].

5. ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ

Η προκαταρκτική σχεδίαση λαμβάνει υπόψιν τις προδιαγραφές του συστήματος κίνησης και προσδιορίζει τη γεωμετρία του διακένου, χωρίς τη λεπτομερή διαμόρφωση του κινητήρα. Η προκαταρκτική σχεδίαση μιας ηλεκτρικής μηχανής αποτελεί θεμελιώδη διαδικασία στη βελτιστοποίηση των ηλεκτρικών μηχανών, καθώς αποτελεί ένα ασφαλές σημείο εκκίνησης για τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Επίσης, δύναται να ορίσει με ασφάλεια το πεδίο ορισμού των μεταβλητών σχεδίασης κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Η προκαταρκτική σχεδίαση περιλαμβάνει τα εξής βήματα [60], [61]:

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

Η προκαταρκτική σχεδίαση μέσω αναλυτικών σχέσεων βασίζεται στη διαστασιολόγηση του διακένου, δηλαδή στον καθορισμό των προκαταρκτικών διαστάσεων του κυλίνδρου που ορίζει το μέσον του διακένου, ανάμεσα σε στάτη και δρομέα, το οποίο ορίζεται από τις μεταβλητές D και L που αντιστοιχούν στη διάμετρο του δρομέα αυξημένη κατά το κενό μεταξύ δρομέα-στάτη και στο ενεργό μήκος της μηχανής. Αυτή η διαστασιολόγηση γίνεται με βάση ορισμένες τυπικές τιμές βασικών μαγνητικών, ηλεκτρικών και θερμικών μεγεθών. Παρακάτω παρουσιάζονται αυτά τα μεγέθη και οι βασικές σχέσεις υπολογισμού τους στην περίπτωση της τριφασικής σύγχρονης μηχανής.

5.1 Πάχος διακένου

Το πάχος του διακένου είναι πρωτεύουσας σημασίας για την επίτευξη των επιθυμητών χαρακτηριστικών λειτουργίας μιας ηλεκτρικής μηχανής και εν γένει καταβάλλεται προσπάθεια ώστε να ελαχιστοποιείται, όσο αυτό επιτρέπεται από την ακρίβεια της κατασκευής και την δυνατότητα μηχανικής στήριξης δρομέα και στάτη. Μειωμένο διάκενο συνεπάγεται αυξημένη ικανότητα ροπής, ενώ όμως αυξάνεται το αρμονικό περιεχόμενο της ΜΕΔ και αντίστροφα. Συνήθως το πάχος διακένου επιλέγεται σε μηχανές μονίμων μαγνητών μικρής ισχύος να είναι μικρότερο του 1 mm , ενώ στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, επιλέγεται να είναι σταθερό ως $lg = 0.7\text{ mm}$, ώστε να υπάρχει επαρκής μηχανική στήριξη και να αποφευχθούν κατασκευαστικές δυσκολίες.

5.2 Ειδική μαγνητική φόρτιση

Η ειδική μαγνητική φόρτιση \bar{B} συνδέει τον αριθμό πόλων P με τη μαγνητική ροή ανά πόλο Φ και είναι:

$$\bar{B} = \frac{P \cdot \Phi}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (5.1)$$

όπου D η διάμετρος του διακένου και L το αξονικό μήκος του ενεργού μέρους της μηχανής.

Υψηλή μαγνητική φόρτιση σημαίνει αυξημένη δυνατότητα παραγωγής ροπής και ισχύος, αφού εξαρτώνται άμεσα, όπως θα φανεί και από τις παρακάτω σχέσεις της προκαταρκτικής σχεδίασης. Η τιμή της ειδικής μαγνητικής φόρτισης ή της μέσης μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο, λαμβάνει συνήθως τιμές από 0.4 T έως 0.7 T [60] και εξαρτάται από το είδος του σιδηρομαγνητικού υλικού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του πυρήνα της μηχανής. Εμπειρικά η μέση τιμή αυτή υπολογίζεται ως το $1/3$ του σημείου κορεσμού της

μαγνητικής επαγωγής για το εκάστοτε υλικό, το οποίο προκύπτει από το γεγονός πως τα δόντια σιδήρου καλύπτουν περίπου το 1/2 με 1/3 του βήματος αύλακος της μηχανής [62], τα οποία φτάνουν τιμές κοντά στον κορεσμό.

Για τα υλικά τα οποία επιλέχθηκαν να εξεταστούν, οι τιμές της ειδικής μαγνητικής φόρτισης καθορίζονται ως εξής [21] – [24]:

Πίνακας 5.1. Οι τιμές ειδικής μαγνητικής φόρτισης \bar{B} για κάθε υλικό, όπως προκύπτουν από τα αντίστοιχα σημεία κορεσμού της μαγνητικής επαγωγής J_{sat}

Υλικό	Σημείο κορεσμού μαγνητικής επαγωγής J_{sat} (T)	Ειδική μαγνητική φόρτιση \bar{B} (T)
SiFe 3%	1.95	0.65
CoFe	2.4	0.8
NiFe	1.53	0.5
SiFe 6.5%	1.8	0.6

5.3 Ειδική ηλεκτρική φόρτιση

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση, ac , προσδιορίζεται από την ενεργό τιμή των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο περιφέρειας του διακένου, και εκφράζεται ως εξής [62]:

$$ac = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_{\varphi} \cdot I_{rms}}{\pi \cdot D} \quad (5.2)$$

όπου N_{φ} είναι ο αριθμός ελιγμάτων ανά φάση, I_{rms} η ενεργός τιμή του ρεύματος και $\pi \cdot D$ η επιφάνεια του διακένου. Σημειώνεται πως τα εν σειρά ενεργά τυλίγματα μίας φάσης ορίζονται ως εξής [8]:

- Για εν σειρά συνδεσμολογία όλων των τυλιγμάτων:

$$N_{\varphi} = \frac{P}{2} \cdot q \cdot (layers) \cdot N_s \quad (5.3)$$

- Για παράλληλη συνδεσμολογία ως προς κάθε ζεύγος πόλων:

$$N_{\varphi} = q \cdot (layers) \cdot N_s \quad (5.4)$$

όπου q οι ομάδες πηνίων ή ο αριθμός αυλάκων ανά πόλο και φάση, N_s ο αριθμός των ελιγμάτων σε κάθε αύλακα και $layers$ ο αριθμός των διαφορετικών στρώσεων τυλιγμάτων σε κάθε αυλάκι.

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση σε συνδυασμό με την ειδική μαγνητική φόρτιση καθορίζει από κοινού με την ικανότητα παραγωγής ροπής μιας δεδομένης μηχανής. Πιο συγκεκριμένα η υψηλή ηλεκτρική φόρτιση, θα επιφέρει υψηλότερη τιμή μαγνητικής επαγωγής στο υλικό και κατ' επέκταση περισσότερη παραγόμενη ροπή. Όσον αφορά τις απώλειες, η ηλεκτρική φόρτιση συνδέεται με τις απώλειες χαλκού της μηχανής, μέσω του ρεύματος τροφοδότησης των τυλιγμάτων, όπως θα δούμε παρακάτω.

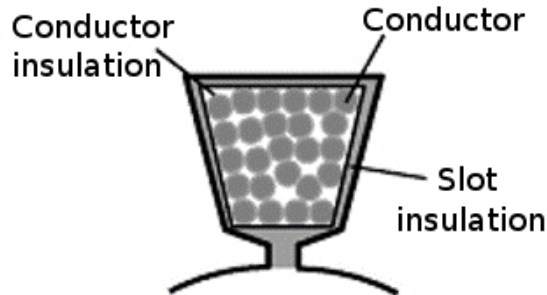
5.4 Πυκνότητα ρεύματος τυλίγματος

Η πυκνότητα του ρεύματος J (A/mm^2) με την οποία τροφοδοτούνται τα τυλίγματα αποτελεί σημαντικό ηλεκτρικό μέγεθος της μηχανής, αφού καθορίζει την ειδική ηλεκτρική φόρτιση της μηχανής σε κάθε λειτουργική κατάσταση και υπολογίζεται ως εξής:

$$J_{slot} = \frac{N_s \cdot I_{rms}}{A_{slot}} \quad (5.5)$$

όπου A_{slot} είναι το εμβαδό της κάθε αύλακος.

Στην πραγματικότητα το εμβαδό A_{slot} δεν τροφοδοτείται εξ' ολοκλήρου από ρεύμα, λόγω του συντελεστή πληρότητας αύλακος ff , που εκφράζει την αδυναμία κάλυψης όλης της επιφάνειας του αυλακιού από χαλκό, λόγω της κυκλικής διατομής των αγωγών, που λόγω γεωμετρίας αφήνει ανεκμετάλλευτο χώρο στο αυλάκι.



Σχήμα 5.1. Αποτύπωση διαμόρφωσης αύλακος. Διακρίνονται οι αγωγοί, οι μονώσεις αγωγών και αύλακος, καθώς και οι κενοί χώροι μεταξύ των κυκλικών αγωγών που καθορίζουν τον συντελεστή πληρότητας [63]

Έτσι ορίζεται αντίστοιχα το «ενεργό» εμβαδόν αύλακας A_{cu} που εκφράζει το εμβαδόν της αύλακος που καλύπτεται από χαλκό και ισχύει:

$$A_{cu} = ff \cdot A_{slot} \quad (5.6)$$

Η πυκνότητα ρεύματος κάθε αύλακος εισάγεται ως είσοδος στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων και καθορίζει την εκάστοτε λειτουργική κατάσταση της μηχανής. Ακόμα, τόσο η θερμική συμπεριφορά όσο και οι ωμικές απώλειες στα τυλίγματα της μηχανής είναι μεγέθη άμεσα εξαρτώμενα από το μέτρο της πυκνότητας ρεύματος. Πιο συγκεκριμένα, οι ωμικές απώλειες της μηχανής εξαρτώνται από το τετράγωνο της πυκνότητας ρεύματος ($P_{Cu} \sim J^2$), ενώ όσον αφορά τις θερμικές απώλειες ορίζεται το μετρικό μέγεθος $A \cdot J$, η τιμή του οποίου εξαρτάται από το είδος ψύξης της μηχανής. Ως A ορίζεται η γραμμική πυκνότητα ρεύματος και υπολογίζεται ως εξής [61]:

$$A = \frac{J \cdot A_{cu}}{\tau_u} \quad (5.7)$$

όπου $\tau_u = \frac{\pi D}{Q}$, το πολικό τόξο (slot pitch) σε m της εκάστοτε μηχανής.

Το γινόμενο $A \cdot J$ εκφράζει την φόρτιση της μηχανής από την πλευρά της επιτρεπόμενης ψύξης. Είναι μέγεθος ανεξάρτητο των διαστάσεων της μηχανής και τυπικές τιμές δεδομένης φυσικής ψύξης για σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών είναι $14 \cdot 10^{10}$ έως $42.25 \cdot 10^{10}$ (A^2/m^3) [61]. Μια εμπειρική εκτίμηση της πυκνότητας ρεύματος για φυσική ψύξη λαμβάνεται συνήθως έως $4 A/mm^2$ σε ονομαστική λειτουργία και έως $6.5 A/mm^2$ σε μεταβατικές φορτίσεις. Στην πραγματικότητα όμως η τιμή της πυκνότητας ρεύματος εξαρτάται από το είδος (διάμετρος, μόνωση) του αγωγού που καλύπτει τα αυλάκια, αφού όσο το γινόμενο $A \cdot J$ είναι κάτω από το όριο φυσικής ψύξης, μπορεί να επιλεγθεί αγωγός που να αντέχει περισσότερο ρεύμα, επομένως το παραπάνω εμπειρικό όριο παύει να έχει ισχύ.

Προκειμένου να εξασφαλίσουμε πως οι μηχανές που θα μελετηθούν παρακάτω έχουν τις ίδιες απαιτήσεις ψύξης, επιλέγεται το γινόμενο $A \cdot J$ να μένει σταθερό σε όλες τις μηχανές. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη το μετρικό μέγεθος ψύξης $A \cdot J$ για μια υπάρχουσα κατασκευασμένη μηχανή που γνωρίζουμε πως λειτουργεί σε φυσική ψύξη, προκύπτει μια ενδεικτική τιμή ορίου ψύξης (reference) και περιορίζοντας τις τιμές για κάθε προς μελέτη μηχανή σε αυτή την τιμή στην ονομαστική λειτουργία, μπορούμε να είμαστε βέβαιοι

πως οι θερμικές απώλειες που προκαλούνται δεν θα οδηγήσουν σε καταστροφή των αγωγών ή τον υποβιβασμό της μονωτικής ικανότητας των μονώσεων τους.

Η reference τιμή του γινομένου $A \cdot J$ υπολογίστηκε για το σύγχρονο κινητήρα εσωτερικών μόνιμων μαγνητών που παρουσιάζεται στα [6] και [64], ο οποίος σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε και μετρήθηκε στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογή μικρού ηλεκτρικού οχήματος πόλης. Πιο συγκεκριμένα έχουμε για την επιλεγμένη μηχανή 4-πολική μηχανή 36 αυλάκων, διαμέτρου διακένου $D = 53.43 \text{ mm}$, σε συνθήκες ονομαστικής ροπής ($J = 4 \text{ A/mm}^2$):

$$A_{cu} = ff \cdot A_{slot} = 0.5 \cdot 190.24 \text{ mm}^2 \Rightarrow A_{cu} = 9.512 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$J = 4 \text{ A/mm}^2 = 4 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$$

Επομένως για την γραμμική πυκνότητα ρεύματος A θα έχουμε:

$$A = \frac{J \cdot A_{cu}}{\tau_u} = \frac{4 \cdot 10^6 \cdot 9.512 \cdot 10^{-5}}{\frac{\pi \cdot 0.05343}{36}} \Rightarrow A = 81601.72 \text{ A/m}$$

Τελικά το γινόμενο $A \cdot J$ που εκφράζει την φόρτιση της μηχανής, θα είναι:

$$A \cdot J = 81601.72 \cdot 4 \cdot 10^6 \Rightarrow$$

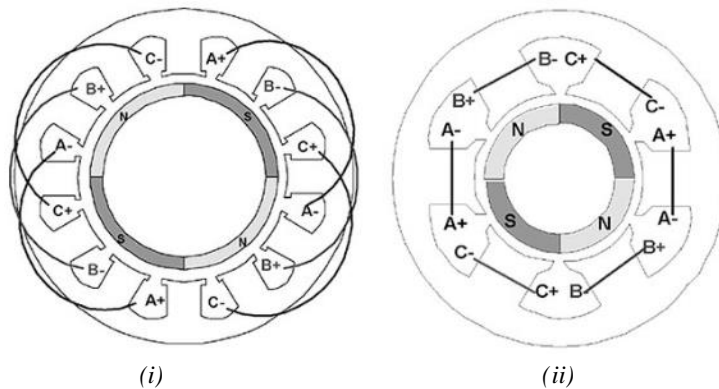
$$A \cdot J = 32.64 \cdot 10^{10} \text{ A}^2/\text{m}^3 \quad (5.8)$$

Η παραπάνω τιμή εμπίπτει στο σύνηθες εύρος τιμών που αναφέρθηκε προηγουμένως, και αποτελεί τη reference τιμή ορίου ψύξης εντός του οποίου θα πρέπει να εμπίπτουν οι προς μελέτη μηχανές της παρούσας εργασίας.

5.5 Διαμόρφωση τυλιγμάτων

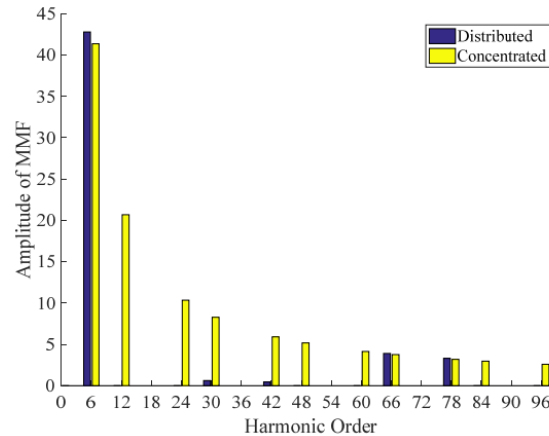
Τα τυλίγματα μιας ηλεκτρικής μηχανής χαρακτηρίζονται ως προς τις τερματικές συνδέσεις των επιμέρους πηνίων, τον τρόπο με τον οποίο κατανέμονται στα αυλάκια και το βήμα συστάδας. Έτσι, μπορεί να είναι βροχοειδή ή κυματοειδή (τα πρώτα χρησιμοποιούνται σε μηχανές με λίγους πόλους ενώ τα δεύτερα σε πολυπολικές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

- Επικαλυπτόμενα, διανεμημένα (ή κατανεμημένα) με ένα ή περισσότερα αυλάκια ανά πόλο και φάση.
- Μη επικαλυπτόμενα, συγκεντρωμένα, μονής ή διπλής στρώσης.



Σχήμα 5.2. (i) Επικαλυπτόμενα διανεμημένα τυλίγματα στάτη μονής στρώσης και (ii) μη επικαλυπτόμενα συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσης [65]

Τα διανεμημένα επικαλυπτόμενα τυλίγματα γενικά προσφέρουν καλύτερη ημιτονικότητα όσον αφορά την κατανομή της ΜΕΔ στο διάκενο, άρα μικρότερη αρμονική παραμόρφωση τάσης, και χαμηλότερες παρασιτικές ροπές (cogging torque). Ακόμα η διαμόρφωση αυτή παρέχει περισσότερες κατασκευαστικές επιλογές, όσον αφορά τους δυνατούς συνδυασμούς για τον αριθμό πόλων και αυλάκων, σε αντίθεση με τα συγκεντρωμένα τυλίγματα που περιορίζονται σε συγκεκριμένους συνδυασμούς [66]. Τέλος, προσφέρει μεγαλύτερη ΗΕΔ, χάρη στον υψηλότερο συντελεστή τυλίγματος k_w που επιτυγχάνεται, ο οποίος καθορίζει το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας.



Σχήμα 5.3 Ανάλυση αρμονικού περιεχομένου της ΜΕΔ, μηχανής μονίμων μαγνητών σε διαμορφώσεις συγκεντρωμένου και διανεμημένου αντίστοιχα. Παρατηρείται χαμηλότερο αρμονικό περιεχόμενο καθώς και μεγαλύτερο πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας, στην περίπτωση του διανεμημένου τυλίγματος [67]

Το συγκεντρωμένο τύλιγμα τυλίγεται γύρω από κάθε δόντι ή γύρω από δύο διαδοχικά δόντια (αναλόγως του αριθμού στρώσεων), οδηγώντας έτσι σε κοντύτερα, μη επικαλυπτόμενα άκρα τυλιγμάτων που αποτελούν έναν κομβικό παράγοντα των απωλειών χαλκού. Ακόμα η κατασκευή μιας τέτοιας διαμόρφωσης είναι ευκολότερη, αφού απαιτούνται λιγότερα πηνία τα οποία δεν επικαλύπτονται, ενώ η μη επικάλυψη αυτή των πηνίων οδηγεί στην απουσία αμοιβαίων αυτεπαγωγών μεταξύ φάσεων, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη ανοχή σε αντίστοιχα σφάλματα. Τέλος, η διαμόρφωση αυτή των πηνίων γύρω από τα δόντια, οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές συντελεστή πληρότητας χαλκού στην αύλακα, με αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλότερης πυκνότητας ισχύος.

Παρόλα τα πλεονεκτήματα των μη επικαλυπτόμενων συγκεντρωμένων τυλιγμάτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, η αναπτυσσόμενη ροπή περιλαμβάνει σε αρκετές περιπτώσεις ανώτερες αρμονικές εν αντιθέσει με τα διανεμημένα τυλίγματα, όπου κυριαρχεί η θεμελιώδης αρμονική ροπής, χάρη στην πιο ημιτονοειδή κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο. Επιπλέον, παρατηρούνται υψηλές συνολικές απώλειες σε μεγάλες ταχύτητες εξαιτίας των πρόσθετων απωλειών δινορρευμάτων στο δρομέα και στους μόνιμους μαγνήτες λόγω των αρμονικών του μαγνητικού πεδίου [68].

Με βάση τα παραπάνω στην παρούσα εργασία θα μελετηθούν μηχανές με διαμόρφωση διανεμημένου τυλίγματος, σε τοπολογίες πλήρους και κλασματικού βήματος. Το βήμα ενός πηνίου (coil pitch) ορίζεται ως η γωνιακή απόσταση μεταξύ των δύο πλευρών του εν λόγω πηνίου (coil sides). Αν η απόσταση αυτή είναι ίση με την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πόλων, τότε λέμε ότι έχουμε τύλιγμα πλήρους βήματος. Αντίθετα, αν η απόσταση αυτή είναι μικρότερη, και αποτελεί ένα κλάσμα του πολικού βήματος, τότε έχουμε τύλιγμα κλασματικού βήματος. Στην περίπτωση κλασματικού βήματος, τα ελίγματα της κάθε φάσης ανά πόλο διανέμονται σε περισσότερες από μία διαδοχικές αύλακες. Επομένως ορίζεται το μέγεθος q , που ορίζει τον αριθμό των αυλάκων ανά πόλο και φάση ή τις ομάδες πηνίων:

$$q = \frac{Q}{m \cdot P} \quad (5.9)$$

Το χαρακτηριστικό των διανεμημένων τυλιγμάτων, και συγκεκριμένα της διαμόρφωσης κλασματικού βήματος, είναι η βελτίωση της ημιτονοειδούς κατανομής της ΜΕΔ, ή ο περιορισμός των πλατών των ανώτερων αρμονικών αντίστοιχα, εις βάρος όμως του πλάτους της θεμελιώδους συνιστώσας. Τα αποτελέσματα της επιλεγμένης διαμόρφωσης στο αρμονικό περιεχόμενο της ΜΕΔ μπορούν να ποσοτικοποιηθούν βάση των αντίστοιχων συντελεστών.

Ο συντελεστής πλάτους k_b εκφράζει την μείωση του πλάτους της θεμελιώδους συνιστώσας (στη γενική περίπτωση της ν-οστής τάξης αρμονικής) λόγω του επιλεγμένου αριθμού των αυλάκων ανά πόλο και φάση και του βήματος αύλακος.

$$k_b = \frac{\sin\left(\frac{q \cdot \gamma}{2}\right)}{q \cdot \sin\frac{\gamma}{2}} \quad (5.10)$$

όπου $\gamma = \frac{m \cdot 360^\circ}{q}$, το βήμα αύλακος σε ηλεκτρικές μοίρες.

Η επίδραση του κλασματικού βήματος ρ στο πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της ΜΕΔ, εκφράζεται από τον συντελεστή βήματος k_p :

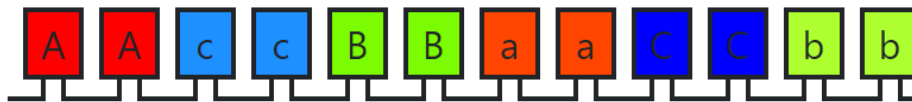
$$k_p = \cos\frac{\pi - \rho}{2} \quad (5.11)$$

όπου ρ το κλασματικό βήμα σε ηλεκτρικές μοίρες, που εκφράζει το ποσοστό του πολικού βήματος που καλύπτεται (ενδεικτικά, για $q = 2$ συνήθως επιλέγεται $\rho = \frac{5}{6} \cdot 180^\circ$, δηλαδή μια συστάδα αγωγών καλύπτει τα πέντε-έκτα της απόστασης μεταξύ δυο διαδοχικών πόλων) [11].

Ο συντελεστής που εκφράζει το τελικό ποσοστό της αρχικής τιμής της θεμελιώδους συνιστώσας της ΜΕΔ λόγω των παραπάνω παραγόντων, είναι ο συντελεστής τυλίγματος k_w :

$$k_w = k_b \cdot k_p \quad (5.12)$$

Ικανοποιητικές τιμές συντελεστή τυλίγματος, θεωρούνται αυτές που προσεγγίζουν την μονάδα, και συχνά απαιτείται $k_w \geq 0.9$, έτσι ώστε να μην προκαλείται μεγάλη απομείωση της θεμελιώδους της επαγόμενης τάσης.



Σχήμα 5.4. Αποτύπωση αλληλουχίας κατανεμημένου τυλίγματος πλήρους βήματος μονής στρώσης, με 2 αυλάκια ανά πόλο και φάση. Προκύπτει συντελεστής τυλίγματος 0.966 [69]

5.6 Σχέση εξόδου ηλεκτρικής μηχανής

Η ειδική μαγνητική και ηλεκτρική φόρτιση που ορίσαμε παραπάνω σχετίζονται με την αρχική εκτίμηση της ροπής ή της ισχύος εξόδου. Η ενεργός τιμή της επαγόμενης τάσης δίνεται από τη σχέση:

$$E_{rms} = 4.44 \cdot k_w \cdot f \cdot N_\phi \cdot \Phi \quad (5.13)$$

όπου k_w ο συντελεστής τυλίγματος και f η ηλεκτρική συχνότητα.

Η φαινόμενη ισχύς της μηχανής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S = 3 \cdot E_{rms} \cdot I_{rms} \quad (5.14)$$

Η ηλεκτρική συχνότητα f συνδέεται με την μηχανική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα n_s , με τις εξής σχέσεις:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (\Sigma\Lambda\Lambda) \quad (5.15)$$

$$n' = \frac{2 \cdot f}{P} \quad (\Sigma\Lambda\Delta) \Rightarrow f = \frac{P}{2} \cdot n' \quad (\text{Hz}) \quad (5.16)$$

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

$$S = 1.1 \cdot k_w \cdot \pi^2 \cdot \bar{B} \cdot ac \cdot D^2 \cdot L \cdot n' \quad (5.17)$$

Όπως φαίνεται, η ισχύς εξόδου της μηχανής είναι ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου του διακένου και ανάλογη του ενεργού μήκους της μηχανής.

Έτσι λοιπόν, κατά τη σχεδίαση ενός κινητήρα πρέπει να προσδιοριστεί ο πιο συμφέρων συνδυασμός ειδικής ηλεκτρικής και μαγνητικής φόρτισης, διαστάσεων διακένου και ταχύτητας περιστροφής ώστε να επιτευχθούν τα κατάλληλα χαρακτηριστικά επίδοσης (ροπή, ισχύς) συμπεριλαμβανομένων και των εκάστοτε γεωμετρικών και λειτουργικών περιορισμών που τίθενται από την εφαρμογή και χωρίς να θυσιάστούν άλλοι εξίσου σημαντικοί παράγοντες όπως η απόδοση, το βάρος και το κόστος της μηχανής.

5.7 Επιφάνεια διακένου

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή διακένου T_{em} , που αναπτύσσεται από την επίδραση των πεδίων στάτη (τύμπανο) και δρομέα (διέγερση), υπολογίζεται βάσει της μέσης επαπτομενικής πίεσης P_t των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο και της επιφάνειας διακένου A , μέσω των παρακάτω σχέσεων:

$$F_t = P_t \cdot A = P_t \cdot \pi \cdot L \cdot D \quad (5.18)$$

$$T_{max} = \frac{D \cdot F_t}{2}$$

$$T_{max} = \frac{\pi}{2} \cdot L \cdot D^2 \cdot P_t$$

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

$$F_t = L \cdot \oint_c \bar{B}_n \cdot \bar{B}_t \, dl \quad (5.19)$$

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

$$P_t = \frac{F_t}{A} = \frac{1}{\pi \cdot D \cdot \mu_0} \oint_c \bar{B}_n \cdot \bar{B}_t \, dl \quad (5.20)$$

όπου \bar{B}_n η μέση ακτινική συνιστώσα μαγνητικής επαγωγής διακένου, \bar{B}_t η μέση επαπτομενική συνιστώσα μαγνητικής επαγωγής διακένου και μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

Όσον αφορά τη γωνία θ , πρόκειται για τη γωνία που σχηματίζουν μεταξύ τους η ακτινική και η επαπτομενική συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής, \bar{B}_n και \bar{B}_t , ενώ για την προκειμένη εφαρμογή επιλέγεται μια τυπική τιμή $\theta = 45^\circ$ [60]. Έτσι θα έχουμε για τις επιμέρους συνιστώσες:

$$\bar{B}_n = \bar{B} \cdot \sin(45^\circ) = \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$\bar{B}_t = \bar{B} \cdot \cos(45^\circ) = \bar{B} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}$$

Άρα τελικά:

$$\oint_c \bar{B}_n \cdot \bar{B}_t \, dl = \pi \cdot D \cdot \bar{B}_n \cdot \bar{B}_t = \pi \cdot D \cdot \frac{\bar{B}^2}{2}$$

Άρα η εφαπτομενική πίεση προκύπτει ως εξής:

$$P_t = \frac{\bar{B}^2}{2 \cdot \mu_0} \quad (5.21)$$

Και η μέγιστη ηλεκτρομαγνητική ροπή τελικά θα είναι:

$$T_{max} = \frac{\pi}{2} \cdot D^2 \cdot L \cdot P_t \quad (5.22)$$

5.8 Συχνότητα λειτουργίας – Πόλοι μηχανών αναφοράς

Η συχνότητα λειτουργίας αποτελεί σημαντικό λειτουργικό χαρακτηριστικό καθώς καθορίζει με άμεσο τρόπο τη διακύμανση των απωλειών πυρήνα, αλλά και την τιμή των αντιδράσεων σκέδασης και μαγνήτισης της μηχανής. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της συχνότητας επιφέρει μη γραμμική αύξηση των απωλειών πυρήνα, ενώ αυξάνει ανάλογα την τιμή των αντιδράσεων της μηχανής. Παράλληλα, για την ίδια ονομαστική ροπή, μηχανές με περισσότερους πόλους έχουν ελαφρύτερο μαγνητικό κύκλωμα, καθώς η διαδρομή της μαγνητικής ροής από τον έναν πόλο στον άλλο είναι αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού των πόλων, όπως γίνεται αντιληπτό από την σχέση (5.1). Η επιλογή ονομαστικής συχνότητας λειτουργίας και αριθμού πόλων σχετίζεται με την μηχανική ταχύτητα περιστροφής στη μόνιμη κατάσταση, επομένως για επιλεγμένη ταχύτητα δρομέα $n_m = 1500$ ΣΑΛ και λύνοντας την εξίσωση (5.15), θα έχουμε:

$$\frac{P}{f} = 0.08 \quad (5.23)$$

Η επιλογή μιας πολυπολικής μηχανής θα οδηγήσει σε αυξημένη συχνότητα λειτουργίας και κατ' επέκταση σε αυξημένες απώλειες πυρήνα, όμως η επιλογή μεγαλύτερου αριθμού πόλων, για σταθερό αριθμό αυλάκων, δύναται να οδηγήσει σε υψηλότερη παραγωγή ροπής, σε πιο ημιτονοειδή κυματομορφή τάσης και άρα μικρότερο αρμονικό περιεχόμενο, ενώ τέλος η μηχανή εισέρχεται στην περιοχή εξασθένισης πεδίου, σε υψηλότερες ταχύτητες [70]. Έτσι η πολυπολική διαμόρφωση φαίνεται να ωφελεί μηχανές που αποτελούνται από υλικά χαμηλού σημείου κορεσμού και χαμηλών απωλειών, ενώ η επιλογή μικρότερου αριθμού πόλων μπορεί να ευνοήσει μηχανές υλικών που παρουσιάζουν υψηλές ειδικές απώλειες πυρήνα. Με βάση τα παραπάνω, τα επιλεγμένα ζεύγη τιμών πόλων και ονομαστικής συχνότητας λειτουργίας φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.2. Συνδυασμός πόλων και ηλεκτρικής συχνότητας για κάθε μηχανή αναλόγως του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα

Υλικό	(P, f)
SiFe 3%	(6 πόλοι, 75 Hz)
CoFe	(4 πόλοι, 50 Hz)
NiFe	(8 πόλοι, 100 Hz)
SiFe 6.5%	(8 πόλοι, 100 Hz)

Η παραπάνω επιλογή διαμόρφωσης πόλων γίνεται στο στάδιο της προκαταρκτικής σχεδίασης ενώ για την περαιτέρω κατανόηση της επίδρασης του αριθμού των πόλων σε κάθε υλικό, παρακάτω θα μελετηθούν διαφορετικές διαμορφώσεις 4,6,8 και 10 πόλων μέσω ανάλυσης ευαισθησίας, ώστε να επιβεβαιωθεί ή να βελτιωθεί η προκαταρκτική επιλογή.

5.9 Επιλογή διαστάσεων διαμέτρου διακένου και ενεργού μήκους μηχανής (D, L)

Από την τελευταία σχέση της προηγούμενης ενότητας φαίνεται η εξάρτηση της παραγόμενης ροπής από την πίεση της επαπτομενικής δύναμης στο διάκενο, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την ειδική μαγνητική φόρτιση της μηχανής και από τη γωνία μεταξύ των δύο συνιστωσών του πεδίου. Όπως είδαμε στην ενότητα 5.2, η τιμή της μαγνητικής φόρτισης εξαρτάται άμεσα από το επιλεγμένο σιδηρομαγνητικό υλικό, άρα για μια δεδομένη μέγιστη παραγόμενη ροπή, η σχέση (5.22) θα δώσει διαφορετικά αποτελέσματα για κάθε σιδηρομαγνητικό υλικό. Θεωρείται δόκιμο λοιπόν η σχεδίαση διαφορετικών μηχανών αναφοράς βάση της επιλεγμένης λαμαρίνας, για μια συγκεκριμένη λειτουργική κατάσταση, ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά της κάθε μηχανής και ενδεχομένως να παρατηρηθούν σχεδιαστικά μοτίβα που χαρακτηρίζουν το εκάστοτε υλικό.

Το επιλεγμένο σετ προδιαγραφών των προς σχεδίαση μηχανών, στο οποίο στηρίζεται η βασική διαστασιολόγηση των μηχανών, φαίνεται παρακάτω. Στις σχέσεις της προκαταρκτικής σχεδίασης χρησιμοποιείται η απαίτηση της μέγιστης ροπής της μηχανής, αφού η μηχανή θα πρέπει να διαστασιολογηθεί έτσι ώστε να μπορεί να φτάσει στο μέγιστο σημείο επίδοσης.

Πίνακας 5.3. Βασικές προδιαγραφές λειτουργίας των προς μελέτη μηχανών

Βασικές προδιαγραφές λειτουργίας μηχανών	
Παράμετροι	Τιμές
Ονομαστική ροπή T_{nom} (Nm)	15
Μέγιστη ροπή T_{max} (Nm)	45
Ονομαστική πυκνότητα ρεύματος J_{nom} (A/mm ²)	2
Μέγιστη πυκνότητα ρεύματος J_{max} (A/mm ²)	4
Ταχύτητα n_m (ΣΑΛ)	1500
Θερμοκρασία λειτουργίας θ (°C)	80

Αρχικά θα παρουσιαστεί η διαδικασία επίλυσης των σχέσεων προκαταρκτικής σχεδίασης και η επιλογή των διαστάσεων της μηχανής, για την περίπτωση που το υλικό του πυρήνα της μηχανής είναι πυριτιούχος σίδηρος. Ο αναλυτικός καθορισμός και η επιλογή αυτών των διαστάσεων είναι καθοριστικής σημασίας για την επίδοση και απόδοση της μηχανής. Για το λόγο αυτό, η οριστική επιλογή τους θα γίνει αργότερα, με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

5.9.1 SiFe 3%

Για την επαπτομενική πίεση του διακένου θα έχουμε:

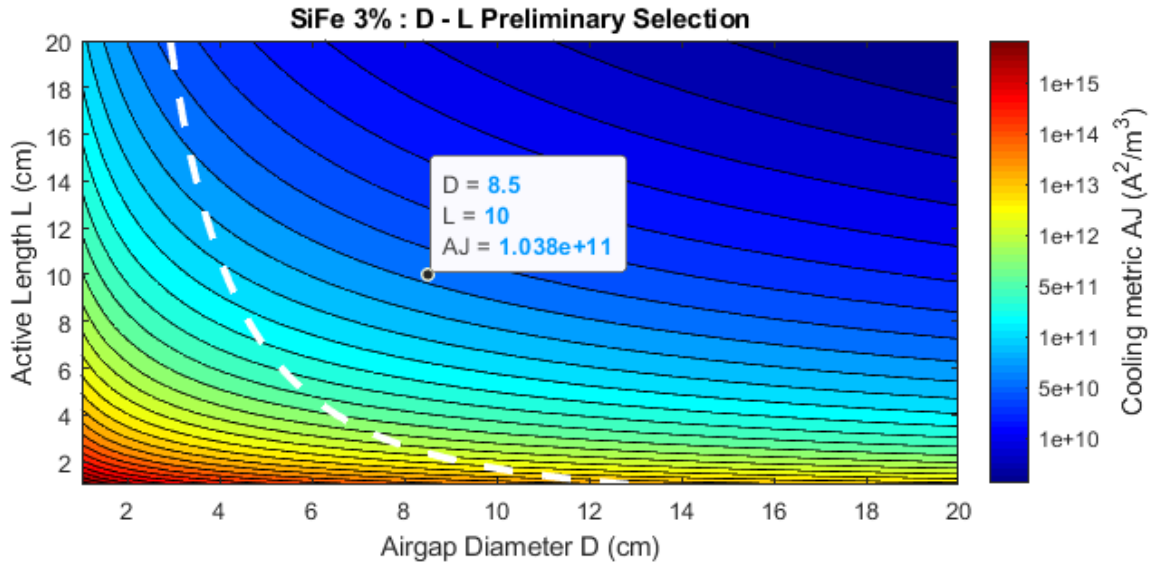
$$P_t = \frac{\bar{B}_{SiFe}^2 \cdot \sin(2\theta)}{2 \cdot \mu_0} = \frac{0.65^2 \cdot \sin(2 \cdot 45^\circ)}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 168.107 \text{ kN/m}^2$$

Ενώ από τη σχέση μέγιστης ροπής προκύπτει:

$$T_{max} = \frac{\pi}{2} \cdot D^2 \cdot L \cdot P_t \Rightarrow D^2 L = \frac{2 \cdot T_{max}}{\pi \cdot P_t} \Rightarrow$$

$$D^2 L = 170.415 \text{ cm}^3 \quad (5.24)$$

Η παρακάτω καμπύλη συνίσταται από όλους τους δυνατούς συνδυασμούς που ικανοποιούν τον παραπάνω περιορισμό, επομένως τα σημεία της αποτελούν χαρακτηριστικά μηχανών που έχουν την επιθυμητή επίδοση, ενώ οι χρωματικές επιφάνειες ορίζονται από τις απαιτήσεις ψύξης κάθε συνδυασμού D, L .



Σχήμα 5.5. Επιλογή βασικής διαστασιολόγησης μηχανής αναφοράς με πυρήνα SiFe 3%

Η τελική διαστασιολόγηση του διακένου προκύπτει έπειτα από την διενέργεια πεδιακής μελέτης και λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς που θέτει η κατασκευή του κινητήρα. Πιο συγκεκριμένα λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω τιμές της προκαταρκτικής σχεδίασης καθώς και τις δυνατότητες κατασκευής και μέτρησης δοκιμών του εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος του ΕΜΠ, τέθηκε ως ανώτερο όριο διαμέτρου διακένου $D_{max} = 10 \text{ cm}$ και έγινε προσπάθεια για τη σχεδίαση μηχανών όσο το δυνατόν κυλινδρικής διαμόρφωσης. Ακόμα κρίθηκε θεμιτό να γίνει μια υπερδιαστασιολόγηση, αφού, προκειμένου το γινόμενο $A \cdot J$ να βρίσκεται εντός του ορίου της φυσικής ψύξης, καθώς και για να υπάρχει χαμηλή πυκνότητα μαγνητικής ροής στα δόντια του στάτη, χρειάζεται περισσότερος χώρος για τα τυλίγματα και για τα δόντια του στάτη [9]. Έτσι, επιλέχθηκε ο συνδυασμός $(D, L) = (8.5, 10)$, ο οποίος βρίσκεται δεξιά της καμπύλης, επομένως σίγουρα καλύπτει τον περιορισμό για την παραγωγή ροπής, αφού ισχύει $D^2 L > 170.415 \text{ cm}^3$. Το γινόμενο ψύξης $A \cdot J = 10.4 \cdot 10^{10} \text{ A}^2/\text{m}^3$ που αντιστοιχεί στον επιλεγμένο συνδυασμό διαστάσεων, είναι μικρότερο του ορίου που τέθηκε προηγουμένως, επομένως η μηχανή θα λειτουργεί καλά με φυσική ψύξη σε λειτουργία μέγιστης ροπής.

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για τις μηχανές των υπόλοιπων σιδηρομαγνητικών υλικών, αφού μεταβάλλοντας την ειδική μαγνητική φόρτιση που εξαρτάται από το προς μελέτη υλικό, μεταβάλλεται η εφαπτομενική πίεση του διακένου και κατ' επέκταση το γινόμενο $D^2 L$ που καθορίζει τις διαστάσεις της μηχανής. Η επιλογή των διαστάσεων για τις προκαταρκτικές σχεδιάσεις των υπόλοιπων υλικών θα γίνουν έτσι ώστε να εξασφαλίζεται κοινή απαίτηση ψύξης σε όλες τις μηχανές, δηλαδή θα επιλεχθούν συνδυασμοί διαστάσεων που απαιτούν ψύξη κοντά στο $10 \cdot 10^{10} \text{ A}^2/\text{m}^3$.

5.9.2 CoFe

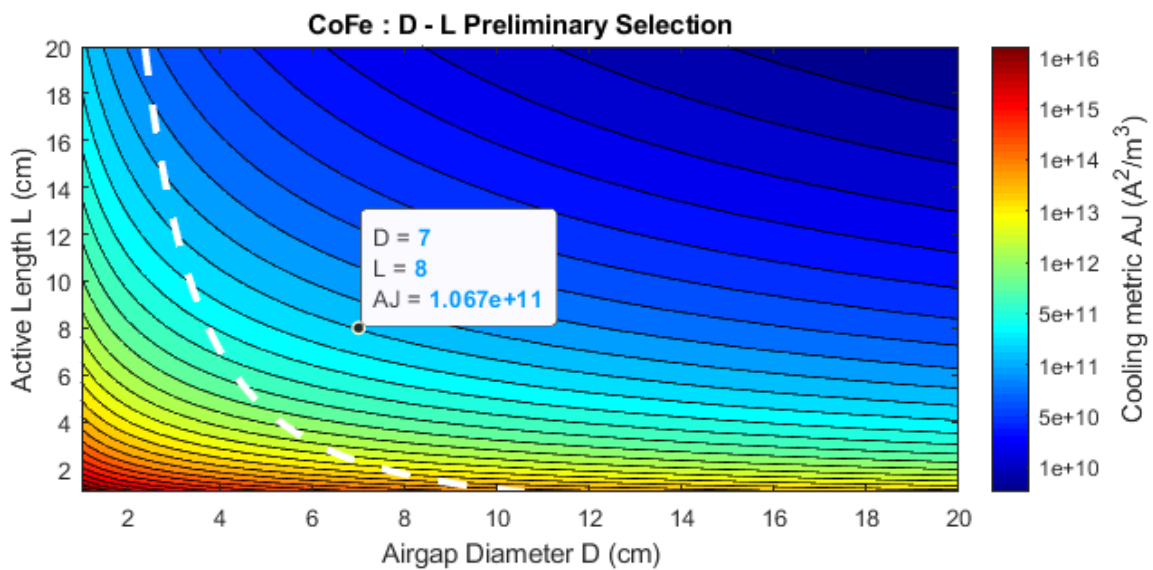
Λύνοντας τις σχέσεις της προκαταρκτικής σχεδίασης για τη μηχανή με πυρήνα κοβαλτίου – σιδήρου, θα έχουμε:

$$P_t = \frac{\bar{B}_{CoFe}^2 \cdot \sin(2\theta)}{2 \cdot \mu_0} = \frac{0.8^2 \cdot \sin(2 \cdot 45^\circ)}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 254.648 \text{ kN/m}^2$$

$$T_{max} = \frac{\pi}{2} \cdot D^2 \cdot L \cdot P_t \Rightarrow D^2 L = \frac{2 \cdot T_{max}}{\pi \cdot P_t} \Rightarrow$$

$$D^2 L = 112.5 \text{ cm}^3 \quad (5.25)$$

Παρατηρούμε λοιπόν πως λόγω του υψηλότερου σημείου κορεσμού μαγνητικής επαγωγής του υλικού, προκύπτει μικρότερο γινόμενο $D^2 L$, επομένως είναι δυνατή η σχεδίαση μικρότερης μηχανής η οποία φτάνει το επιθυμητό σημείο επίδοσης. Η καμπύλη $D^2 L$ καθώς και η τελική υπερδιαστασιολόγηση που επιλέχθηκε, φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 5.6. Επιλογή βασικής διαστασιολόγησης μηχανής αναφοράς με πυρήνα CoFe

5.9.3 NiFe

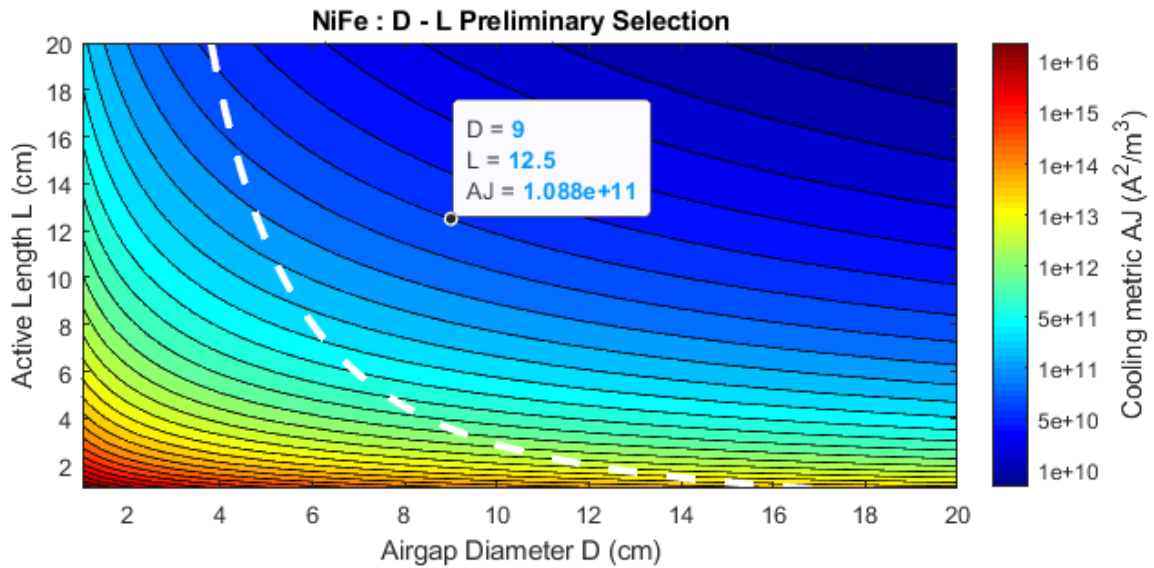
Λύνοντας τις σχέσεις της προκαταρκτικής σχεδίασης για τη μηχανή με πυρήνα νικελίου – σιδήρου, θα έχουμε:

$$P_t = \frac{\bar{B}_{NiFe}^2 \cdot \sin(2\theta)}{2 \cdot \mu_0} = \frac{0.5^2 \cdot \sin(2 \cdot 45^\circ)}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 99.472 \text{ kN/m}^2$$

$$T_{max} = \frac{\pi}{2} \cdot D^2 \cdot L \cdot P_t \Rightarrow D^2 L = \frac{2 \cdot T_{max}}{\pi \cdot P_t} \Rightarrow$$

$$D^2 L = 288 \text{ cm}^3 \quad (5.26)$$

Σε αντίθεση με πριν, παρατηρείται αύξηση του γινομένου $D^2 L$, λόγω του χαμηλού σημείου κορεσμού της μαγνητικής επαγωγής, επομένως απαιτούνται μεγαλύτερες βασικές διαστάσεις μηχανής, προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη ροπή. Η καμπύλη $D^2 L$ καθώς και η τελική υπερδιαστασιολόγηση που επιλέχθηκε, φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 5.7. Επιλογή βασικής διαστασιολόγησης μηχανής αναφοράς με πυρήνα NiFe

5.9.4 SiFe 6.5%

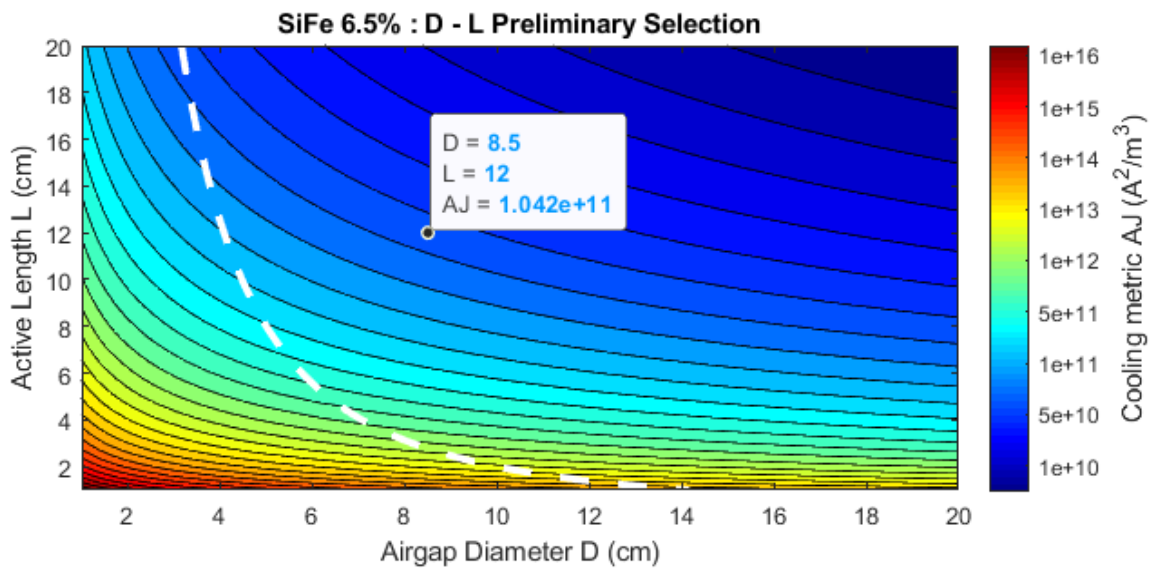
Λύνοντας τις σχέσεις της προκαταρκτικής σχεδίασης για τη μηχανή σιδήρου με υψηλής περιεκτικότητας πυρίτιο, θα έχουμε:

$$P_t = \frac{\bar{B}_{SiFe6.5}^2 \cdot \sin(2\theta)}{2 \cdot \mu_0} = \frac{0.6^2 \cdot \sin(2 \cdot 45^\circ)}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 143.239 \text{ kN/m}^2$$

$$T_{max} = \frac{\pi}{2} \cdot D^2 \cdot L \cdot P_t \Rightarrow D^2 L = \frac{2 \cdot T_{max}}{\pi \cdot P_t} \Rightarrow$$

$$D^2 L = 200 \text{ cm}^3 \quad (5.27)$$

Η καμπύλη $D^2 L$ καθώς και η τελική υπερδιαστασιολόγηση που επιλέχθηκε, φαίνονται παρακάτω:



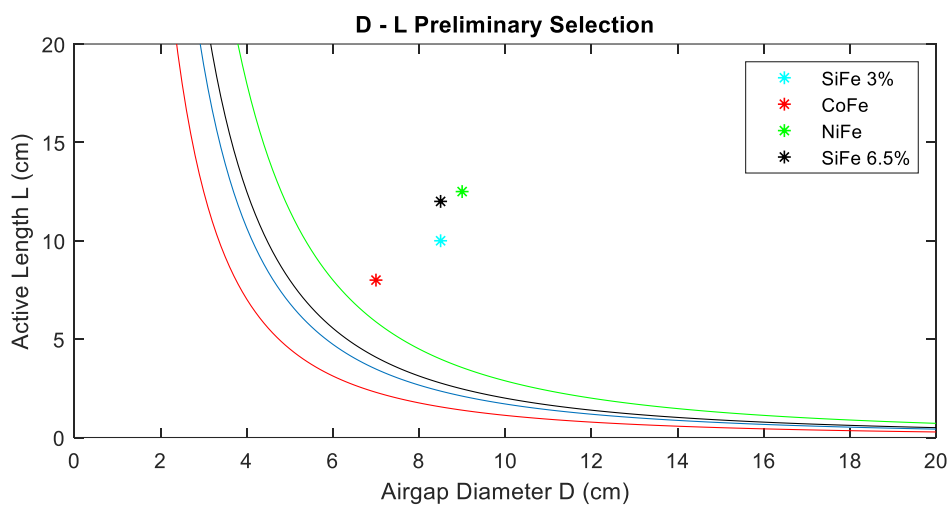
Σχήμα 5.8. Επιλογή βασικής διαστασιολόγησης μηχανής αναφοράς με πυρήνα SiFe 6.5%

Τα παραπάνω αποτελέσματα επιλογής της διαμέτρου διακένου και του ενεργού μήκους για κάθε μηχανής αναφοράς, φαίνονται στον παρακάτω συνοπτικό πίνακα.

Πίνακας 5.4. Συνοπτικά αποτελέσματα βασικής διαστασιολόγησης για κάθε μηχανή αναλόγως του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα

Υλικό	Διαστασιολόγηση διακένου (D, L) σε cm
SiFe 3%	(8.5, 10)
CoFe	(7, 8)
NiFe	(9, 12.5)
SiFe 6.5%	(8.5, 12)

Τέλος, η συσχέτιση μεταξύ της ειδικής μαγνητικής φόρτισης κάθε υλικού και των απαιτούμενων διαστάσεων για την επίτευξη μιας δεδομένης επίδοσης, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, όπου η μετατόπιση της εκάστοτε καμπύλης D^2L δεξιάτερα, αποτυπώνει την ελάττωση του σημείου κορεσμού για κάθε υλικό (βλ. Πίνακας 5.1) και κατ' επέκταση την ανάγκη μεγαλύτερων διαστάσεων μηχανής.



Σχήμα 5.9. Καμπύλες βασικής διαστασιολόγησης μηχανών αναφοράς, αναλόγως του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα

5.10 Εκτίμηση των χαρακτηριστικών στάτη

Με βάση τα παραπάνω, η μέση ροή ανά πόλο για μηχανή πυρήνα SiFe 3% υπολογίζεται ως εξής:

$$\Phi = \frac{\bar{B} \cdot \pi \cdot L \cdot D}{P} \xrightarrow{\text{SiFe 3\%}} \Phi = \frac{0.65 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 85}{6} \Rightarrow \Phi = 2.893 \text{ mWb} \quad (5.28)$$

Το επίπεδο της τάσης τυμπάνου καθορίζεται από το επίπεδο τάσης της πηγής και την τεχνική διαμόρφωσης του αντιστροφέα. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση που η πηγή δεν είναι το δίκτυο αλλά π.χ. συσσωρευτές, όπως στις εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων, τότε το επίπεδο τάσης είναι σχετικά περιορισμένο, για λόγους χώρου, κόστους και ασφάλειας. Καθώς η κυρίαρχη συνιστώσα απωλειών σε συμβατικές εφαρμογές είναι οι απώλειες χαλκού, είναι προφανές πως όσο υψηλότερο είναι το επίπεδο τάσης τόσο πιο αποδοτικός θα είναι ο κινητήρας. Θεωρώντας την οδήγηση της μηχανής με αντιστροφέα με τεχνική διαμόρφωσης SPWM και τυπικό συντελεστή διαμόρφωσης $m_a = 0.9$ [60], καθώς και συνεχή τάση εισόδου του αντιστροφέα $V_{DC} = 250 \text{ V}$, η ενεργός τιμή της θεμελιώδης συνιστώσας της φασικής τάσης εξόδου προκύπτει:

$$E_{rms} = \frac{m_a \cdot V_{DC}}{\sqrt{2}} = \frac{0.9 \cdot 250}{\sqrt{2}} \Rightarrow E_{rms} \cong 80 \text{ V} \quad (5.29)$$

Έτσι για τα εν σειρά ελίγματα ανά φάση τελικά θα έχουμε:

$$N_{\varphi} = \frac{E_{rms}}{4.44 \cdot k_w \cdot f \cdot \Phi} = \frac{80}{4.44 \cdot 0.966 \cdot 75 \cdot 2.893 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow N_{\varphi} \cong 92 \text{ ελίγματα} \quad (5.30)$$

Ενώ τα αντίστοιχα εν σειρά ελίγματα κάθε αύλακος, για παράλληλη συνδεσμολογία των τυλιγμάτων ανά ζεύγος πόλων με $q = 2$ ομάδες πηνίων και 2 στρώσεις τυλίγματος, θα είναι:

$$N_s = \frac{N_{\varphi}}{q \cdot (\text{layers})} \Rightarrow N_s \cong 23 \text{ ελίγματα} \quad (5.31)$$

Η ενεργός τιμή του ονομαστικού ρεύματος που διαρρέει τα τυλίγματα του στάτη, θεωρώντας μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, είναι:

$$I_{rms} = \frac{P_n}{3 \cdot E_{rms} \cdot \cos \varphi} = \frac{T_{em_n} \cdot \omega_m}{3 \cdot E_{rms}} \quad (5.32)$$

Η ροπή των 45 Nm που έχει επιλεγεί για την εφαρμογή, αποτελεί την μέγιστη απαιτούμενη ροπή της μηχανής, επομένως το απαιτούμενο ρεύμα σε αυτή την λειτουργική κατάσταση θα είναι:

$$I_{rms} = \frac{T_{max} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n_m}{60}}{3 \cdot E_{rms}} \Rightarrow I_{rms} = 29.45 \text{ A} \quad (5.33)$$

Θεωρώντας πυκνότητα ρεύματος $J = 4 \frac{A}{mm^2}$ για δυνατότητα παραγωγής της μέγιστης ροπής, η διατομή της κάθε αύλακος προκύπτει:

$$A_{slot} = \frac{N_s \cdot I_{rms}}{J} \Rightarrow A_{slot} = 169.33 \text{ mm}^2 \quad (5.34)$$

Βάση των ανωτέρω υπολογισμών και για χρήση καλωδίου AWG12 (δεδομένης της έντασης ρεύματος περίπου 30A για συνθήκες μέγιστης ροπής) που αντιστοιχεί σε διατομή αγωγού 3.3 mm^2 , ο συντελεστής πληρότητας της αύλακος προκύπτει ως εξής [71]:

$$ff = \frac{N_s \cdot A_{wire}}{A_{slot}} = \frac{23 \cdot 3.31 \text{ mm}^2}{169.33 \text{ mm}^2} \Rightarrow ff \cong 0.45 \quad (5.35)$$

Όπως είναι αντιληπτό, ο συντελεστής πληρότητας εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των ελιγμάτων που προκύπτουν από την προκαταρκτική σχεδίαση κάθε μηχανής, ωστόσο αποτελεί μια καλή θεώρηση πως ο συντελεστής πληρότητας παραμένει γενικά σταθερός σε τιμές κοντά στο 50% για τη δεδομένη εφαρμογή.

5.11 Έλεγχος ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση, θεωρώντας ονομαστικό ρεύμα ίσο με το 1/3 του ρεύματος μέγιστης ροπής, διαμορφώνεται ως εξής:

$$ac = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_{\varphi} \cdot I_{rms}}{\pi \cdot D} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 92 \cdot 9.82}{\pi \cdot 0.085} \Rightarrow ac = 20300 \frac{A\varepsilon}{m} \quad (5.36)$$

που εμπίπτει εντός των φυσιολογικών ορίων ($15 - 45 \frac{A\varepsilon}{m}$).

5.12 Συνολικά αποτελέσματα προκαταρκτικής σχεδίασης

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία για τα υπόλοιπα προς μελέτη υλικά, προέκυψαν τα κάτωθι αποτελέσματα για την απαιτούμενη διαμόρφωση των μηχανών, προκειμένου να φτάσουν στην επιθυμητή επίδοση.

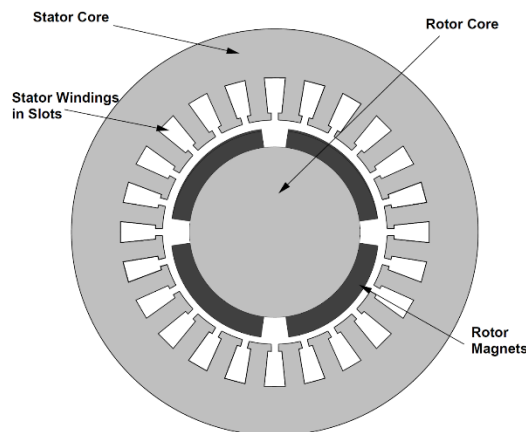
Πίνακας 5.5. Συνοπτικά αποτελέσματα βασικών μεγεθών όπως προέκυψαν από τις αναλυτικές εξισώσεις της προκαταρκτικής σχεδίασης, για κάθε μηχανή αναλόγως του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα

Υλικό πυρήνα	Μαγνητική ροή ανά πόλο Φ (mWb)	Ελίγματα ανά φάση N_ϕ	Εμβαδόν αύλακος A_{slot} (mm ²)	Ειδική ηλεκτρική φόρτιση ac ($\frac{A\epsilon}{m}$)	Συντελεστής πληρότητας ff
SiFe 3%	2.893	92	169.33	20300	0.45
CoFe	3.519	114	209.46	30544	0.46
NiFe	2.209	90	166.82	18755	0.46
SiFe 6.5%	2.403	83	153.33	18314	0.45

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, όσο υψηλότερο το σημείο κορεσμού ενός υλικού, τόσο μεγαλύτερη η ειδική ηλεκτρική φόρτιση και το απαιτούμενο εμβαδόν αύλακος, αφού προκειμένου να αναπτυχθεί υψηλή επαγωγή στον πυρήνα, απαιτείται και ισχυρό επιβαλλόμενο πεδίο μέσω τροφοδότησης των τυλιγμάτων.

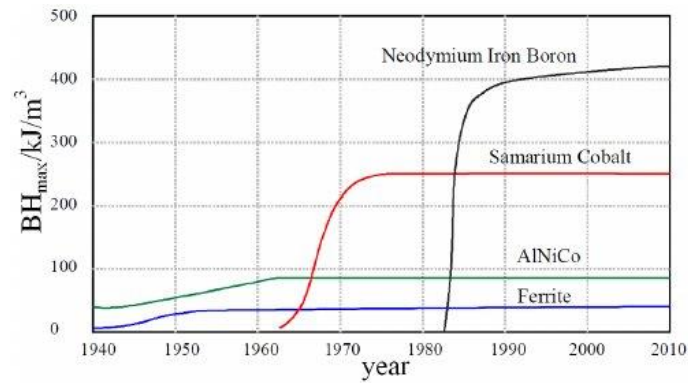
5.13 Εκτίμηση των χαρακτηριστικών δρομέα

Η τοπολογία δρομέα που επιλέγεται για τις προς μελέτη μηχανές είναι επιφανειακών μονίμων μαγνητών όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.10. Επιλεγμένη τοπολογία δρομέα με επιφανειακούς μόνιμους μαγνήτες [12]

Οι μαγνήτες κράματος Νεοδυμίου – Σιδήρου – Βορίου (NdFeB) επιλέγονται ως υλικό, γιατί έχουν τη μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας από τις υπόλοιπες εναλλακτικές του εμπορίου, όπως γίνεται αντιληπτό από το κάτωθι σχήμα.



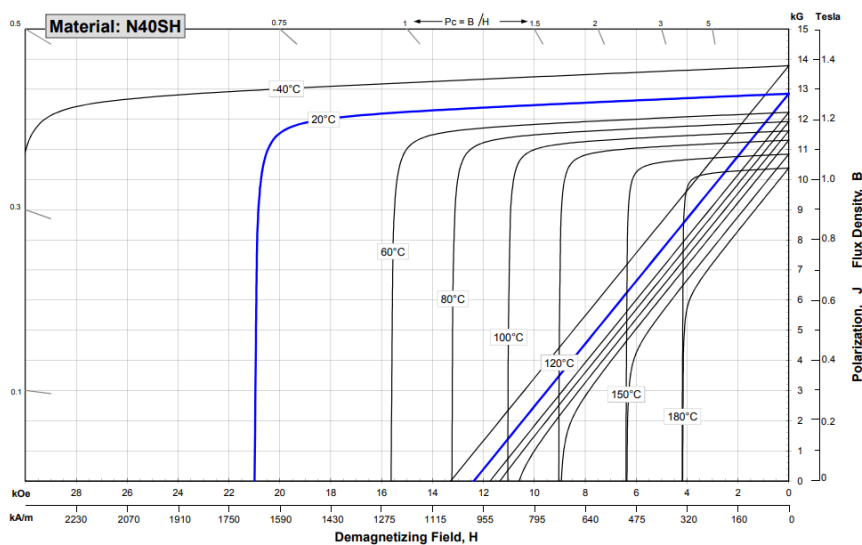
Σχήμα 5.11. Η ανάπτυξη της μέγιστης πυκνότητας ενέργειας για κάθε υλικό σε βάθος χρόνου [72]

Η μέγιστη πυκνότητα ενέργειας μαγνητών είναι το μέτρο της μαγνητικής ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί από ένα μαγνητικό υλικό, ανά μονάδα όγκου. Υπολογίζεται ως το μέγιστο του γινομένου της παραμένουσας μαγνήτισης B_r ενός μαγνητικού υλικού, και της μαγνητικής του αντίστασης [73].

Οι βασικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά και τις ιδιότητες ενός μόνιμου μαγνήτη είναι [15]:

- Το σημείο κορεσμού της μαγνητικής επαγωγής B_{sat} και το αντίστοιχο σημείο ηλεκτρικής φόρτισης H_{sat}
- Η παραμένουσα μαγνήτιση B_r , που αντιστοιχεί στην τιμή της μαγνητικής επαγωγής που παραμένει στον μόνιμο μαγνήτη μετά την απομάκρυνση της πηγής μαγνήτισης του
- Η απομαγνητίζουσα δύναμη H_c , που αντιστοιχεί στην τιμή του μαγνητικού πεδίου που πρέπει να εφαρμοσθεί στον μόνιμο μαγνήτη για να μηδενιστεί η παραμένουσα μαγνήτιση, έτσι ώστε να επιστρέψει το υλικό στην αρχική αμαγνήτιστη κατάσταση του
- Η καμπύλη απομαγνήτισης, η οποία χρησιμοποιείται για την ανάλυση και το σχεδιασμό μηχανών αφού δείχνει την επιρροή της έντασης εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, λόγω της διέγερσης του τυμπάνου

Η βέλτιστη αξιοποίηση του μόνιμου μαγνήτη έγκειται στη λειτουργία του σε περιοχή κοντά στο σημείο μέγιστης ενέργειας στην καμπύλη απομαγνήτισης. Η καμπύλη απομαγνήτισης είναι πρακτικά ευθεία γραμμή, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, όπου παρουσιάζεται η καμπύλη απομαγνήτισης καθώς και τα κύρια χαρακτηριστικά του μόνιμου μαγνήτη N40SH NdFeB. Η θεώρηση της καμπύλης απομαγνήτισης ως ευθεία γραμμή διευκολύνει τον υπολογισμό του σημείου που αποδίδουν οι μέγιστοι μαγνήτες τη μέγιστη τους ενέργεια, αρκεί να είναι γνωστά η παραμένουσα μαγνήτιση B_r , και το μαγνητικό πεδίο επαναφοράς H_c [9].



Σχήμα 5.12. Καμπύλη απομαγνήτισης μόνιμου μαγνήτη N40SH κράματος NdFeB για διάφορες θερμοκρασίες [74]

Πίνακας 5.6. Κόρια λειτουργικά χαρακτηριστικά του επιλεγμένου μόνιμου μαγνήτη N40SH NdFeB για λειτουργία στους 80°C [74]

Κόρια λειτουργικά χαρακτηριστικά μόνιμου μαγνήτη N40SH NdFeB σε θερμοκρασία $\theta = 80^{\circ}\text{C}$	
Πεδίο απομαγνήτισης H_c (kA/m)	989
Μαγνητική διαπερατότητα μ_r	1.045
Παραμένουσα μαγνητική επαγωγή B_r (T)	1.3
Ηλεκτρική αγωγιμότητα (MS/m)	0.694

Η καμπύλη απομαγνήτισης μπορεί να περιγραφεί από την παρακάτω εξίσωση :

$$H(B) = \frac{H_c}{B_r} \cdot B - H_c \quad (5.37)$$

Η διαστασιολόγηση των μονίμων μαγνητών του δρομέα γίνεται μέσω επίλυσης αναλυτικών σχέσεων που βασίζονται στην καμπύλη απομαγνήτισης και συγκεκριμένα συνδέουν τη παραμένουσα μαγνήτιση B_r , την απομαγνητίζουσα δύναμη H_c και την μαγνητική επαγωγή διακένου εν κενώ B_g , με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μαγνήτη. Στην παρούσα μελέτη επιλέγεται σταθερό πάχος μαγνητών $H_{mag} = 6 \text{ mm}$, το μήκος των μαγνητών θεωρείται ίσο με το ενεργό μήκος L της μηχανής, ενώ τέλος το τόξο του μαγνήτη σε μοίρες υπολογίζεται ως ποσοστό του πολικού βήματος τ (που εξαρτάται από τον αριθμό των πόλων της μηχανής) ως εξής:

$$\theta_m = \frac{\text{MagnetDC}}{100} \cdot \frac{360^{\circ}}{P} \quad (5.38)$$

Τέλος, όσον αφορά τον άξονα (shaft) του δρομέα, επιλέγεται ως υλικό καθαρός σίδηρος (pure iron), όπως συνηθίζεται στις περισσότερες περιπτώσεις σχεδίασης μηχανών.

6. ΠΕΔΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Κατά την προκαταρκτική σχεδίαση μιας μηχανής προκύπτει η βασική κατασκευαστική διαμόρφωση, η οποία αποτελεί προσχέδιο για τη φάση της οριστικής σχεδίασης. Προκειμένου να επιτευχθεί λεπτομερής βελτιστοποίηση γεωμετρίας, η οριστική σχεδίαση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΠΣ) ή Finite Elements (FE) για την επίλυση των εξισώσεων του μαγνητικού πεδίου, προκειμένου να αποτυπωθεί με ακρίβεια η συμπεριφορά (επίδοση, απόδοση) και τα συνολικά χαρακτηριστικά (αυτεπαγωγές ορθού και κάθετου άξονα) των προς μελέτη μηχανών.

6.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Αν και η περιγραφή ενός μαγνητικού προβλήματος μπορεί να εκφραστεί υπό τη μορφή μίας μερικής διαφορικής εξίσωσης με καλώς τοποθετημένες οριακές συνθήκες (δηλαδή ενός προβλήματος οριακών συνθηκών), είναι πολύ δύσκολο να βρεθούν αναλυτικές λύσεις σε σύνθετες γεωμετρίες, όπως αυτές που αποτελούν μια ηλεκτρική μηχανή. Προκειμένου να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία αναπτύχθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, σύμφωνα με την οποία το αρχικό πρόβλημα και η αρχική περιοχή χωρίζονται σε έναν μεγάλο αριθμό περιοχών και αντίστοιχων υπο-προβλημάτων, τα οποία μπορεί να είναι πολλά περισσότερα σε αριθμό, αλλά η επίλυσή τους είναι σημαντικά ευκολότερη. Η επίλυση του συνολικού προβλήματος συντίθεται από την επιμέρους επίλυση των απλούστερων υπο-προβλημάτων.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων FEMM (Finite Element Method Magnetics) που δύναται να επιλύει δισδιάστατα μαγνητοστατικά προβλήματα, διακριτοποιώντας την περιοχή του προβλήματος μέσω τριγωνικών στοιχείων (triangle elements) δημιουργώντας έτσι ένα πλέγμα (mesh) στο χώρο του προβλήματος. Σε κάθε ένα από αυτά τα τρίγωνα πραγματοποιείται επίλυση των ηλεκτρομαγνητικών διαφορικών εξισώσεων που θα δούμε παρακάτω. Έτσι το πρόβλημα, ανάγεται σε ένα πρόβλημα γραμμικής άλγεβρας χιλιάδων αγνώστων σε μορφή πινάκων, καθώς σε κάθε τριγωνικό στοιχείο η λύση προσεγγίζεται με γραμμική παρεμβολή των τιμών του διανυσματικού δυναμικού A στις κορυφές του τριγώνου (κόμβοι - nodes). Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η Newton-Raphson καθώς είναι ταχεία στην σύγκλιση και στην ικανότητα σύγκλισης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ελαχιστοποιηθεί το μέτρο του σφάλματος σε μια καθορισμένη τιμή.

Συνοπτικά, η διαδικασία επίλυσης ενός μαγνητικού προβλήματος από το FEMM έχει τα παρακάτω στάδια [60]:

- Σχεδίαση της γεωμετρίας, ορισμός των οριακών και περιοδικών συνθηκών και των υλικών.
- Πλεγματοποίηση του προβλήματος με επιθυμητό αριθμό τριγωνικών στοιχείων, αντίκειται σε θέματα πεπερασμένης ακρίβειας ή άλλων υπολογιστικών περιορισμών.
- Επίλυση του προβλήματος γραμμικής άλγεβρας και εύρεση του διανυσματικού δυναμικού.
- Απεικόνιση και επεξεργασία αποτελεσμάτων

6.1.1 Επίλυση μαγνητοστατικών προβλημάτων

Μαγνητοστατικά ονομάζονται τα προβλήματα στα οποία το μαγνητικό πεδίο είναι αμετάβλητο ως προς το χρόνο [56]. Σε αυτή την περίπτωση, η ένταση του μαγνητικού πεδίου H και η μαγνητική επαγωγή B ικανοποιούν τις παρακάτω εξισώσεις του Maxwell [76]:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (6.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (6.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (6.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (6.4)$$

όπου \vec{E} η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, D η πυκνότητα του ηλεκτρικού πεδίου, J η πυκνότητα ρεύματος και ρ η πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου. Σύμφωνα με το νόμο του Ampere και θεωρώντας χαμηλές συχνότητες λειτουργίας προκύπτει:

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \approx 0 \quad (6.5)$$

και συνεπώς:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} \quad (6.6)$$

Σύμφωνα με τη θεμελιώδη καταστατική σχέση μεταξύ των μεγεθών B και H για κάθε υλικό (εκτός των μόνιμων μαγνητών), προκύπτει:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (6.7)$$

όπου μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα του μαγνητικού υλικού. Στην περίπτωση των μόνιμων μαγνητών η καταστατική εξίσωση έχει τη γενική μορφή:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \vec{M} \quad (6.8)$$

όπου μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού και M η μαγνήτιση του μόνιμου μαγνήτη. Αν το υλικό είναι μη γραμμικό, όπως για παράδειγμα ο κορεσμένος σίδηρος ή οι μαγνήτες Alnico [15], τότε η μαγνητική διαπερατότητα είναι συνάρτηση του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής B :

$$\mu(B) = \frac{B}{H(B)} \quad (6.9)$$

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

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (6.10)$$

Επομένως από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει η εξίσωση:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \cdot \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{j} \quad (6.11)$$

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

$$\frac{1}{\mu} \cdot \nabla^2 \times \vec{A} = -\vec{j} \quad (6.12)$$

η οποία σχέση αποτελεί τη διανυσματική εξίσωση Poisson.

Το πλεονέκτημα της χρήσης του διανυσματικού δυναμικού είναι πως όλες οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται στο μαγνητοστατικό πεδίο συνδυάζονται σε μία εξίσωση μίας μεταβλητής. Όπως γίνεται αντιληπτό από τα ανωτέρω, εάν είναι γνωστό το \vec{A} , τότε τα \vec{B} και \vec{H} προκύπτουν μέσω παραγώγισης.

Στη γενική περίπτωση, το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό είναι ένα διάνυσμα τριών συνιστωσών. Στη θεώρηση όμως καρτεσιανής γεωμετρίας δύο διαστάσεων, οι δύο από αυτές τις τρεις συνιστώσες μπορούν να μηδενισθούν, και μεταβάλλεται μόνο η A_z συνιστώσα. Συνεπώς έχουμε:

$$\vec{A} = A_z \cdot \vec{i}_z \quad (6.13)$$

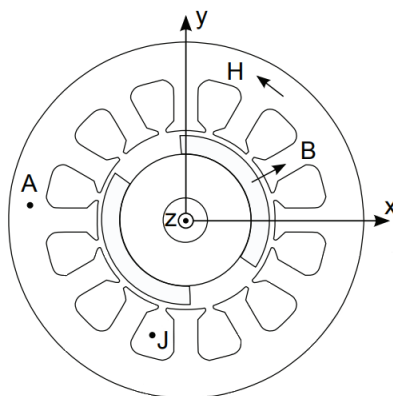
Ομοίως και για την πυκνότητα ρεύματος \vec{J} θα ισχύει:

$$\vec{J} = J_z \cdot \vec{i}_z \quad (6.14)$$

Τέλος, η μαγνητική επαγωγή \vec{B} , λόγω του εξωτερικού γινομένου στην σχέση ορισμού του διανυσματικού δυναμικού, ορίζεται λόγω επίπεδης συμμετρίας ως εξής:

$$\vec{B} = B_x \cdot \vec{i}_x + B_y \cdot \vec{i}_y \quad (6.15)$$

Τα παραπάνω αποτυπώνονται στο παρακάτω σχήμα, όπου με κατεύθυνση προς τη σελίδα φαίνονται τα διανύσματα της πυκνότητας ρεύματος \vec{J} και του διανυσματικού δυναμικού \vec{A} , ενώ φαίνονται επίσης οι συνιστώσες x και y του διανύσματος της μαγνητικής επαγωγής \vec{B} .



Σχήμα 6.1. Διατομή (cross section) γεωμετρίας μηχανής επιφανειακών μονίμων μαγνητών στο επίπεδο (x,y) [12]

Στην παρούσα εργασία, τα προβλήματα που λύνονται θεωρούνται μαγνητοστατικά και επιλύονται με βάση την εξίσωση Poisson, ενώ τα δυναμικά φαινόμενα, που προϋποθέτουν περιστροφή του δρομέα, θεωρούνται ως διακριτές μαγνητοστατικές καταστάσεις, με μικρό βήμα περιστροφής, όπου γίνεται η παραδοχή πως σε εκείνες τις χρονικές στιγμές το μαγνητικό πεδίο είναι αμετάβλητο.

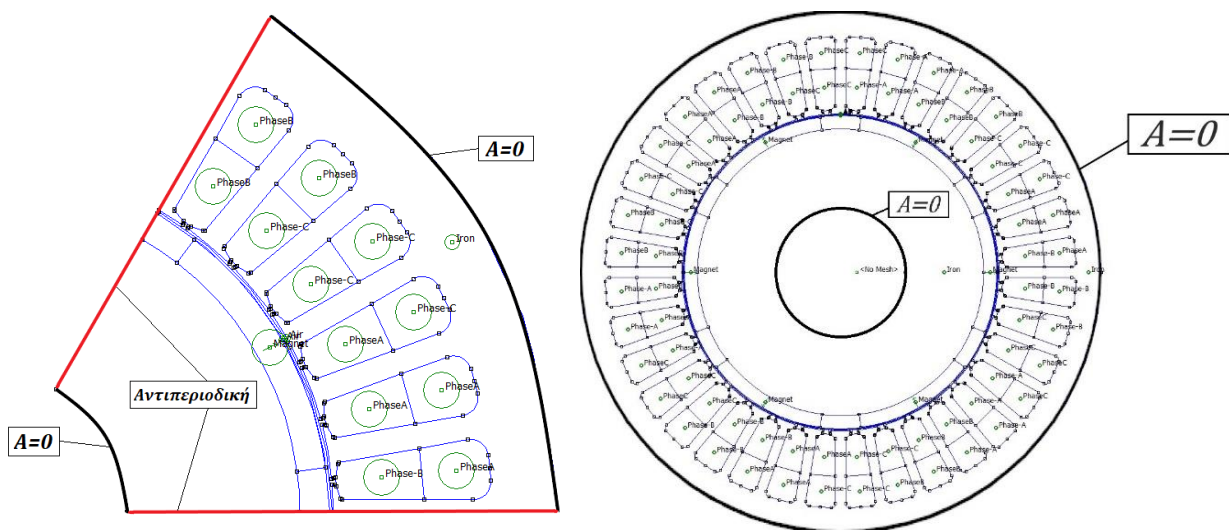
6.1.2 Οριακές συνθήκες

Η επίλυση ενός μαγνητοστατικού ή ηλεκτροστατικού προβλήματος ανάγεται σε επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων. Είναι γνωστό από τη θεωρία των μερικών διαφορικών εξισώσεων, ότι προκειμένου να έχουμε μοναδική λύση, πρέπει να ορισθούν οι οριακές συνθήκες του προβλήματος ώστε να το πρόβλημα να είναι καλώς ορισμένο. Οι οριακές συνθήκες κατηγοριοποιούνται ως εξής [15], [76], [77]:

- Συνθήκες Dirichlet: Σε αυτό τον τύπο οριακής συνθήκης, η τιμή του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού A δηλώνεται κατά μήκος ενός συνόρου της γεωμετρίας. Αν $A = 0$ τότε πρόκειται για την ομογενή συνθήκη Dirichlet, διαφορετικά πρόκειται για τη μη ομογενή. Η συνθήκη $A = 0$ απαντάται συχνά στην εξωτερική επιφάνεια του στάτη και στην εσωτερική επιφάνεια του δρομέα, όπου ο πυρήνας συνδέεται με τον άξονα της μηχανής. Η φυσική σημασία της δήλωσης $A = 0$ κατά μήκος ενός ορίου της γεωμετρίας σε ένα μαγνητικό πρόβλημα, είναι πως η μαγνητική ροή περιορίζεται εντός των ορίων της μηχανής ώστε να μην περάσει η ροή στον αέρα εκτός του στάτη ή στον άξονα του δρομέα, ενώ οι γραμμές της μαγνητικής ροής θα είναι παράλληλες προς το σύνορο αυτό. Σε περιπτώσεις όπου μοντελοποιείται ολόκληρη η μηχανή, η χρήση μόνο αυτής της οριακής συνθήκης είναι επαρκής.

- Συνθήκες Neumann: Η οριακή αυτή συνθήκη ορίζει την κάθετη παράγωγο του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού κατά μήκος του ορίου. Η συνηθέστερη περίπτωση είναι η χρήση της ομογενούς συνθήκης Neumann δηλαδή $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$. Η χρήση αυτής τη συνθήκης επιβάλλει στις μαγνητικές γραμμές να τέμνουν το σύνορο κάθετα.
- Συνθήκες Robin: Η οριακή αυτή συνθήκη είναι ένα είδος συνδυασμού των συνθηκών Dirichlet και Neumann, καθώς καθορίζει μια σχέση μεταξύ της των σταθμισμένων τιμών του A και της παραγώγου του. Αυτή η οριακή συνθήκη χρησιμοποιείται συχνά προβλήματα διάδοσης θερμότητας ως οριακή συνθήκη σε μονωτικές επιφάνειες.
- Περιοδική συνθήκη: Μία περιοδική οριακή συνθήκη συνδέει δύο όρια μεταξύ τους. Στα αντίστοιχα σημεία των δύο ορίων, οι τιμές του πεδίου είναι ίσες. Αυτή η συνοριακή συνθήκη χρησιμοποιείται στα άκρα του προβλήματος, όταν επιλύεται ένα ζεύγος πόλων της μηχανής.
- Αντιπεριοδική συνθήκη: Μία αντιπεριοδική οριακή συνθήκη συνδέει επίσης δύο όρια μεταξύ τους. Στα αντίστοιχα σημεία των δύο ορίων, οι τιμές του πεδίου είναι αντίθετες (ίδιο μέτρο, αντίθετο πρόσημο). Αυτή η συνοριακή συνθήκη χρησιμοποιείται στα άκρα του προβλήματος, όταν επιλύεται ένας πόλος της μηχανής.

Τόσο οι περιοδικές όσο και οι αντιπεριοδικές οριακές συνθήκες χρησιμοποιούνται όταν μοντελοποιείται ένα τμήμα της μηχανής και όχι ολόκληρη η γεωμετρία.



Σχήμα 6.2. Αποτύπωση οριακών συνθηκών σε τμηματική γεωμετρία (ένας πόλος) και σε ολόκληρη γεωμετρία μηχανής

Στην παρούσα μελέτη, θα σχεδιάζεται και θα αναλύεται η κλασματική γεωμετρία (geometry fraction) κάθε μηχανής που αντιστοιχεί σε έναν πόλο του δρομέα και μέσω των κατάλληλων οριακών συνθηκών, προκύπτουν τα πεδιακά μεγέθη ολόκληρης της γεωμετρίας. Αυτή η μοντελοποίηση της μηχανής προσφέρει σημαντική μείωση του υπολογιστικού χρόνου που θα χρειαζόταν η ανάλυση ολόκληρης της μηχανής, γεγονός βαρύνουσας σημασίας λόγω του μεγάλου αριθμού μηχανών που μελετώνται. Οι χρόνοι που απαιτούνται για την επίλυση του προβλήματος με ανάλυση ολόκληρης της γεωμετρίας ή ενός κλάσματος αυτής, παρουσιάζονται παρακάτω.

Πίνακας 6.1. Χρόνοι επίλυσης μιας λειτουργικής κατάστασης σε ολόκληρη γεωμετρία δπολικής μηχανής και σε κλασματική γεωμετρία ενός πόλου

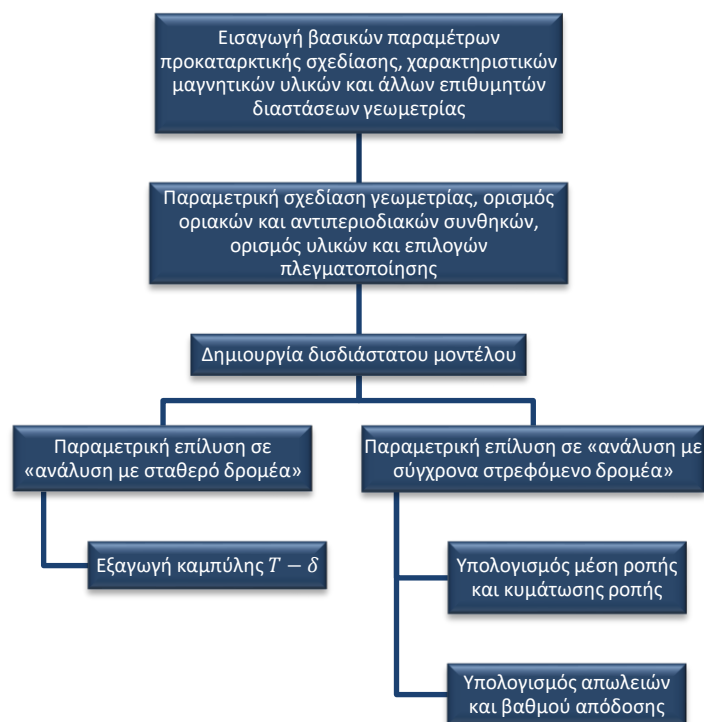
Στοιχεία προσομοίωσης	Ολόκληρη γεωμετρία	Γεωμετρίας ενός πόλου	Διαφορά
Κόμβοι πλέγματος	19729	3254	- 83.5%
Απαιτούμενος χρόνος (sec)	11.364	1.531	- 86.5%

Βάσει των ανωτέρω αποτελεσμάτων, προτείνεται η σχεδίαση και η επίλυση της μηχανής σε γεωμετρία ενός πόλου, προκειμένου να μειωθεί αρκετά ο χρόνος των προσομοιώσεων, κατ' αναλογία της μείωσης της αρχικής γεωμετρίας.

6.2 Παραμετροποιημένη σχεδίαση γεωμετρίας

Κατά την προκαταρκτική σχεδίαση μιας μηχανής προκύπτει η βασική κατασκευαστική διαμόρφωση, η οποία αποτελεί μια καλή προσέγγιση για τα τελικά χαρακτηριστικά της μηχανής. Προκειμένου να επιτευχθεί λεπτομερής βελτιστοποίηση γεωμετρίας, η οριστική σχεδίαση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση των εξισώσεων του μαγνητικού πεδίου, για ένα πλήθος γεωμετριών μηχανών. Για τον λόγο αυτό απαιτείται η επαναληπτική επίλυση του προβλήματος με διαφορετικές γεωμετρικές παραμέτρους, οι οποίες θα αντιστοιχούν στα χαρακτηριστικά διαφορετικών μηχανών προς εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού αυτών των παραμέτρων.

Για την υλοποίηση της παραπάνω διαδικασίας αναπτύχθηκε κώδικας παραμετροποιημένης σχεδίασης γεωμετρίας, που επιτρέπει την εισαγωγή γεωμετρικών χαρακτηριστικών που αντιστοιχούν σε ένα πλήθος διαφορετικών μηχανών και εξάγει τα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης των εκάστοτε μηχανών. Ο κώδικας σχεδίασης και ανάλυσης πραγματοποιείται μέσω του λογισμικού MATLAB σε συνδυασμό με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων FEMM.



Σχήμα 6.3. Δομικό διάγραμμα κώδικα παραμετροποιημένης σχεδίασης γεωμετρίας και ανάλυσης μηχανών

Οι επιμέρους διαδικασίες του κώδικα παραμετρικής σχεδίασης και ανάλυσης μηχανών που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία αναλύονται στις επόμενες υποενότητες, ενώ παραπάνω φαίνεται ένα δομικό διάγραμμα της συνολικής διαδικασίας.

Το μαγνητοστατικό πρόβλημα της εκάστοτε γεωμετρίας, επιλύεται ανά μονάδα μήκους του μαγνητικού κυκλώματος, αφού με αυτό τον τρόπο, τα αποτελέσματα της επίλυσης μπορούν να αναχθούν σε οποιοδήποτε επιθυμητό ενεργό μήκος. Η ροπή πιο συγκεκριμένα μπορεί να υπολογιστεί κατά μήκος της περιφέρειας του δρομέα ως εξής [12]:

$$T = \frac{D^2 \cdot L}{4} \cdot \int_0^{2\pi} \frac{B_{g_n} \cdot B_{g_t}}{\mu_0} d\theta_m \quad (6.16)$$

όπου B_{g_n} και B_{g_t} η ακτινική και η εφαπτομενική συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής διακένου και θ_m η θέση του δρομέα.

Λόγω της δισδιάστατης φύσης του προβλήματος το μαγνητικό πεδίο δεν αλλάζει μορφή κατά μήκος της μηχανής και τα μεγέθη που προκύπτουν από τη μετεπεξεργασία του πεδίου είναι ανάλογα του ενεργού μήκους της μηχανής [8].

6.3 Ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης

Για την επίτευξη της παραπάνω διαδικασίας παραμετροποιημένης σχεδίασης της μηχανής καθορίζονται αρχικά οι ανεξάρτητες μεταβλητές (που δίνονται ως είσοδοι στο πρόγραμμα) και στη συνέχεια οι αναγκαίες για τη σχεδίαση εξαρτημένες μεταβλητές του στάτη και του δρομέα. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης στάτη, δρομέα και τυλιγμάτων, οι οποίες αποτελούν μέρη μιας συνολικής δομής (struct) που ονομάζεται MotorEntity και εισάγονται ως είσοδος στον κώδικα. Έτσι για τη πλευρά του στάτη οι μεταβλητές ανήκουν στο struct MotorEntity.Stator, για τη πλευρά των τυλιγμάτων στο MotorEntity.Winding κ.ο.κ.

Πίνακας 6.2. Ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης για κάθε τμήμα της μηχανής

Ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης μηχανής	
Συμβολισμός	Φυσική σημασία
m	Αριθμός φάσεων
$Poles$	Αριθμός πόλων
lg	Πάχος διακένου
ff	Συντελεστής πληρότητας
Ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης στάτη	
R_{so}	Εξωτερική ακτίνα στάτη
Spp	Αριθμός αυλάκων ανά πόλο και φάση
$Tooth2SlotPercentage$	Ποσοστό δοντιού ως προς το άθροισμα ενός δοντιού και μίας αύλακος
$Yoke2Tooth$	Λόγος του σώματος στάτη (yoke) ως προς το πάχος ενός δοντιού
$ToothTips$	Ποσοστό της γωνίας πέλματος του δοντιού (tooth tips) ως προς το πολικό βήμα
$Tips2Tooth$	Ποσοστό του συνολικού ύψους του πέλματος ως προς το μήκος του δοντιού

<i>Tips2Tips</i>	Ποσοστό του ύψους των άκρων δοντιών ως προς το συνολικό ύψος του πέλματος
<i>r_{edge}</i>	Ακτίνα κύκλου για την εξομάλυνση των γωνιών των δοντιών στη μεριά των αυλάκων
Ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης δρομέα	
<i>SpliRatio</i>	Ποσοστό εξωτερικής ακτίνας δρομέα (χωρίς τους μαγνήτες) ως προς την εξωτερική ακτίνα στάτη
<i>InnerRatio</i>	Ποσοστό εσωτερικής ακτίνας δρομέα (ακτίνα άξονα) ως προς την εξωτερική ακτίνα δρομέα
<i>MagnetDC</i>	Ποσοστό επίκεντρης γωνίας μαγνήτη ως προς το πολικό βήμα της μηχανής
<i>MagnetHeight</i>	Ποσοστό ύψους επιφανειακού μαγνήτη ως προς την εξωτερική ακτίνα στάτη
Ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης τυλίγματος	
<i>Layers</i>	Στρώσεις τυλίγματος
<i>Overlap</i>	Αριθμός επικαλυπτόμενων αυλάκων μεταξύ δύο στρώσεων

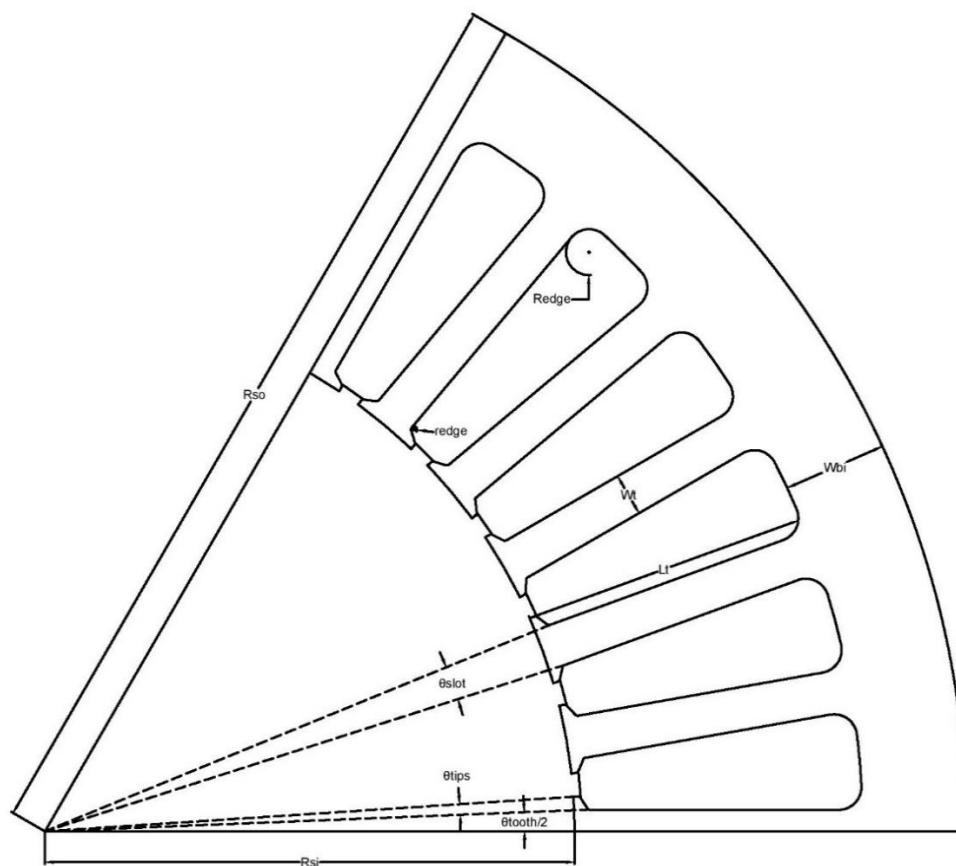
6.4 Σχεδίαση στάτη

Οι βασικότερες εξαρτημένες μεταβλητές σχεδίασης του στάτη παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.3. Εξαρτημένες μεταβλητές σχεδίασης στάτη

Εξαρτημένες μεταβλητές σχεδίασης στάτη	
Συμβολισμός	Φυσική σημασία
R_{si}	Εσωτερική ακτίνα στάτη
W_t	Πάχος δοντιού
W_{tips}	Πάχος άκρων δοντιών
L_t	Μήκος δοντιού
θ_{slot}	Γωνία αύλακος
θ_{tips}	Γωνία πέλματος
θ_{tooth}	Γωνία δοντιού
W_{bi}	Πάχος σώματος (yoke) στάτη

Η γεωμετρική αποτύπωση των ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών σχεδίασης στάτη, παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6.4. Απεικόνιση μεταβλητών σχεδίασης στάτη

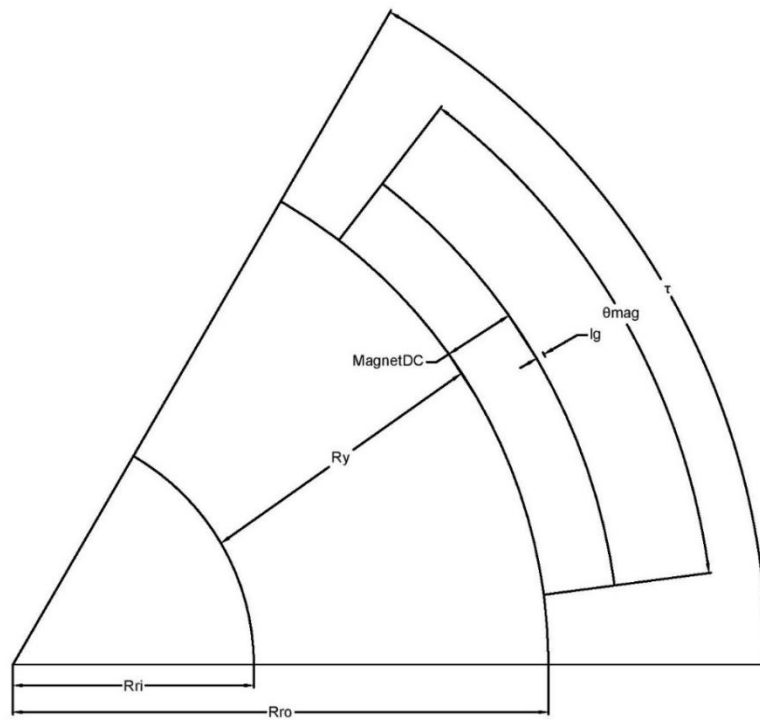
6.5 Σχεδίαση δρομέα

Οι βασικότερες εξαρτημένες μεταβλητές σχεδίασης του δρομέα παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.4. Εξαρτημένες μεταβλητές σχεδίασης στάτη

Εξαρτημένες μεταβλητές σχεδίασης δρομέα	
Συμβολισμός	Φυσική σημασία
R_{ro}	Εξωτερική ακτίνα δρομέα (χωρίς τους μαγνήτες)
R_{ri}	Εσωτερική ακτίνα δρομέα (ακτίνα άξονα)
R_{ry}	Ακτίνα σώματος δρομέα
R_{mag}	Εξωτερική ακτίνα δρομέα και μαγνητών
τ	Πολικό βήμα
θ_{magnet}	Γωνία επιφανειακού μαγνήτη

Η γεωμετρική αποτύπωση των ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών σχεδίασης δρομέα, παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



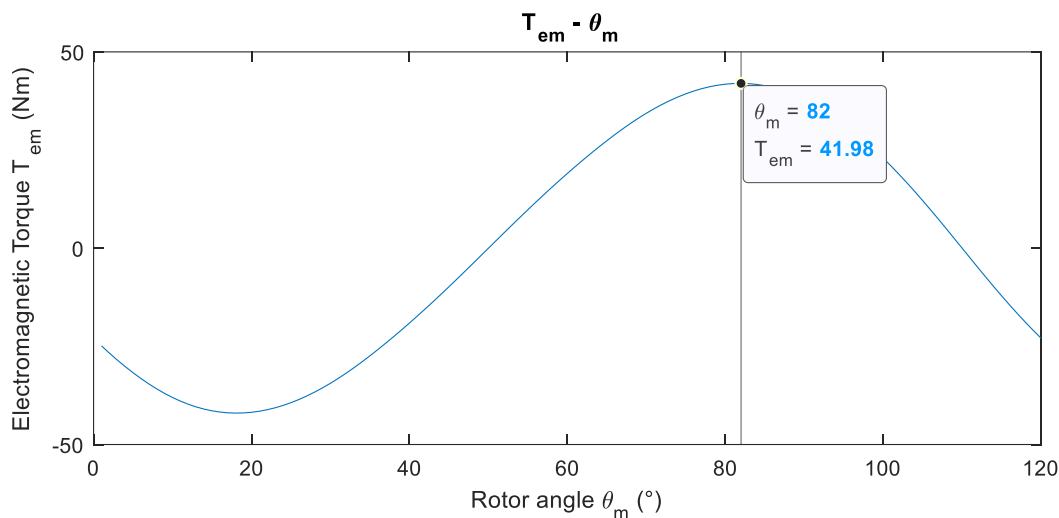
Σχήμα 6.5. Απεικόνιση μεταβλητών σχεδίασης δρομέα

Ακόμα, μέσω των επιλογών εισόδου στον κώδικα παραμετροποιημένης σχεδίασης, δίνεται στο χρήστη η δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει μεταξύ διαμόρφωσης επιφανειακών μαγνητών (επιλεγμένη διαμόρφωση στην παρούσα εργασία) και εσωτερικά επιφανειακών (inset) μαγνητών, καθώς και μεταξύ ολόσωμου μαγνήτη ή μαγνήτη με αύλακες (slots), όπως προτείνεται στο [78], το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε δραστική μείωση της ροπής ευθυγράμμισης (cogging torque) στην περίπτωση των inset μαγνητών.

7. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΕΣΩ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

7.1 Καμπύλη γωνίας ροπής ($T - \delta$)

Για την εξαγωγή της κυματομορφής της ηλεκτρομαγνητικής ροπής συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας θ_e , αρχικά υπολογίζεται η επιθυμητή αρχική γωνία των ρευμάτων στάτη (ή αντίστοιχα δρομέα), μέσω ανάλυσης με «σταθερό δρομέα». Πιο συγκεκριμένα, η γεωμετρία σχεδιάζεται και πλεγματοποιείται μόνο κατά την πρώτη εκτέλεση του επιλύτη. Εν συνεχεία προσομοιώνεται μεταβολή της ηλεκτρικής γωνίας ισχύος του κινητήρα, στο διάστημα $[0^\circ, 180^\circ]$ μέσω ολίσθησης της φάσης των ρευμάτων στάτη, διατηρώντας την ημιτονοειδή κατανομή των ρευμάτων των τριών φάσεων. Σε κάθε μία τέτοια μεταβολή επιλύεται το μαγνητοστατικό πρόβλημα και υπολογίζεται η ηλεκτρομαγνητική ροπή στο διάκενο. Επομένως από την ανάλυση αυτή προκύπτει το διάγραμμα μεταβολής της ηλεκτρομαγνητικής ροπής στο διάκενο συναρτήσει της μεταβολής της ηλεκτρικής γωνίας των ρευμάτων των τυλιγμάτων στάτη, γνωστό και ως καμπύλη γωνίας – ροπής της μηχανής.



Σχήμα 7.1. Εύρεση μηχανικής γωνίας για την μέγιστη παραγωγής ροπής, για σταθερή ηλεκτρική γωνία ρευμάτων

Η γωνία η οποία αντιστοιχεί σε μεγιστοποίηση της ροπής (κοντά στις 90° για μηχανές επιφανειακών μονίμων μαγνητών) αποθηκεύεται, ώστε ο υπολογισμός της ροπής, της κυμάτωσης ροπής καθώς και η μελέτη απωλειών της μηχανής να γίνουν στη λειτουργική κατάσταση μέγιστης παραγόμενης ροπής (T_{max}, δ_{max}).

7.2 Υπολογισμός μέσης ροπής και κυμάτωσης ροπής

Αφού έχει επιλεγεί η λειτουργική κατάσταση μέγιστης ροπής όπως αυτή αναλύθηκε προηγουμένως, ακολουθεί η ανάλυση με «σύγχρονα στρεφόμενο δρομέα», όπου σε αυτή την περίπτωση τα πεδία δρομέα και στάτη στρέφονται συγχρονισμένα για διάστημα μιας πλήρους ηλεκτρικής περιστροφής μέσω συγχρονισμένης ολίσθησης της φάσης των ρευμάτων στάτη και της αντίστοιχης μηχανικής γωνίας στροφής του δρομέα. Σε αντίθεση με πριν, για τις ανάγκες αυτής της προσομοίωσης η γεωμετρία σχεδιάζεται και επαναπλεγματοποιείται κάθε φορά πριν την επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος. Αν $d\theta_e$ είναι το βήμα με το οποίο μεταβάλλεται η ηλεκτρική γωνία των ρευμάτων στάτη σε κάθε επανάληψη, τότε ο δρομέας θα στρέφεται κατά αντιστοιχία κατά [11]:

$$d\theta_m = d\theta_e \cdot \frac{2}{P} \quad (7.1)$$

Ο δρομέας στρέφεται κατά δύο πολικά βήματα και υπολογίζεται σε κάθε βήμα η ηλεκτρομαγνητική ροπή μέσω του ταυυστή του Maxwell και αποθηκεύεται σε πίνακα. Η μέση ροπή (mean torque) υπολογίζεται για

μια ηλεκτρική περίοδο. Η κυμάτωση της ροπής προκύπτει από το ποσοστό της μέγιστης μείον της ελάχιστης ροπής διά τη μέση ροπή ως εξής:

$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{mean}} \quad (7.2)$$

Από την ανάλυση αυτή προκύπτουν υπό δεδομένη ηλεκτρική φόρτιση, εκτός της μέσης ροπής και της κυμάτωσης της, τα χαρακτηριστικά της επαγόμενης τάσης στάτη του κινητήρα καθώς και των απωλειών της μηχανής, που χρησιμεύουν στον υπολογισμό της απόδοσης όπως αναλύεται παρακάτω.

7.3 Υπολογισμός μάζας μηχανής

Για τον υπολογισμό της μάζας της εκάστοτε μηχανής γίνεται χρήση της δυνατότητας υπολογισμού εμβαδού γεωμετρίας μέσω του FEMM. Πιο συγκεκριμένα, κατά την δημιουργία των γεωμετριών των μηχανών στο FEMM, οι διάφορες περιοχές χαρακτηρίζονται από διαφορετικές ιδιότητες όπως το υλικό, το μέγεθος των τριγωνικών στοιχείων (mesh size) καθώς και το χαρακτηριστικό τους όνομα. Επιλέγοντας την κάθε περιοχή μέσω του FEMM μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η επιφάνεια αυτής της περιοχής, μέσω της εντολής `mo_getelement` για όλα τα τριγωνικά στοιχεία της περιοχής αυτής. Έτσι, αρχικά επιλέγονται τα στοιχεία των αλάκων της μηχανής, υπολογίζεται το απειροστό εμβαδό τους και αθροίζεται, στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή πληρότητας ff (που προκύπτει για αγωγούς AWG12), ώστε να υπολογιστεί το συνολικό εμβαδό χαλκού A_{Cu} της μηχανής. Στη συνέχεια επιλέγονται τα στοιχεία στάτη και δρομέα, υπολογίζεται το απειροστό εμβαδό τους και αθροίζεται, ώστε να υπολογιστεί το συνολικό εμβαδό πυρήνα A_{iron} της μηχανής, ενώ κατά αντιστοιχία υπολογίζεται το εμβαδό μαγνητών και άξονα, A_{mag} και A_{shaft} αντίστοιχα. Στη συνέχεια, τα εμβαδά αυτά πολλαπλασιάζονται με το ενεργό μήκος της μηχανής ώστε να προκύψει ο όγκος που κατέχει το κάθε υλικό της μηχανής, ενώ τέλος πολλαπλασιάζονται με τις αντίστοιχες πυκνότητες κάθε υλικού ώστε να εξαχθεί η μάζα κάθε υλικού και αθροίζονται για τη συνολική μάζα της μηχανής. Οι πυκνότητες των προς μελέτη υλικών βάση των φυλλαδίων προδιαγραφών των κατασκευαστών φαίνονται παρακάτω [21] – [24], [79]:

Πίνακας 7.1. Πυκνότητες υλικών πυρήνα βάση των φυλλαδίων προδιαγραφών των κατασκευαστών

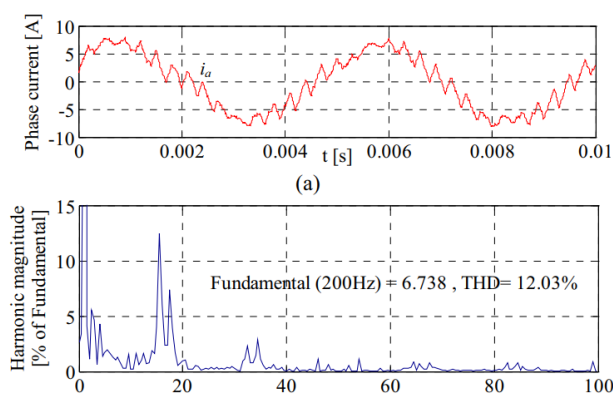
Στοιχείο μηχανής	Υλικό	Πυκνότητα υλικού d (kg/m^3)
Σώμα στάτη/δρομέα	SiFe 3%	7600
	CoFe	8120
	NiFe	8200
	SiFe 6.5%	7570
Τύλιγμα	Cu	8920
Μόνιμος μαγνήτης	NdFeB	7500
Άξονας	Fe	7860

7.4 Υπολογισμός απωλειών

Οι απώλειες σε μια μηχανή καθορίζουν την τιμή της απόδοσης της. Συνεπώς κρίνεται σημαντική η ανάπτυξη αυτοματοποιημένων διαδικασιών ή η χρήση αναλυτικών εξισώσεων για τον όσο το δυνατόν ακριβέστερο υπολογισμό τους.

7.4.1 Απώλειες πυρήνα

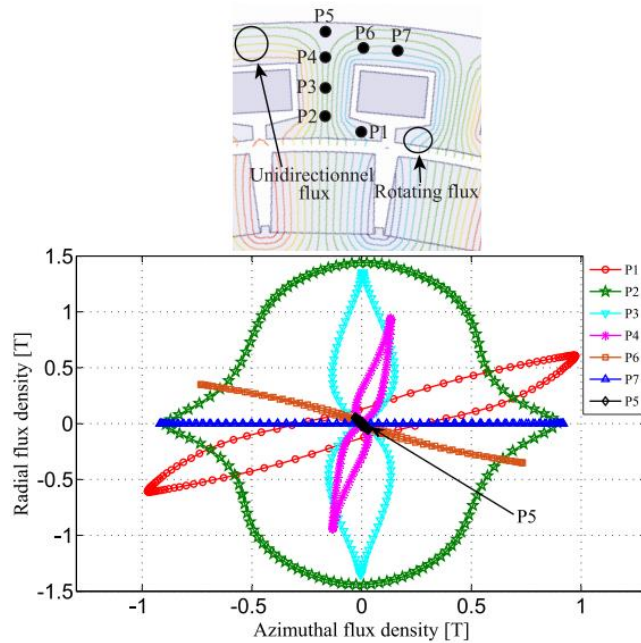
Όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 4.3, τα περισσότερα μοντέλα υπολογισμού των απωλειών πυρήνα στην υπάρχουσα βιβλιογραφία βασίζονται στην υπόθεση πως η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο είναι πάντοτε ημιτονοειδής, ενώ στην πραγματικότητα (και ιδιαίτερα στις μηχανές επιφανειακών μονίμων μαγνητών) είναι τραπεζοειδής, έχοντας ως συνέπεια παρόμοια μεταβολή της επαγωγής στο σώμα του πυρήνα [9]. Ακόμα, θεωρώντας ημιτονοειδή μαγνητική επαγωγή, αγνοούνται τόσο οι αρμονικές χώρου, που οφείλονται στη γεωμετρία του στάτη και συγκεκριμένα στην εναλλαγή δοντιού και αύλακος, όσο και οι αρμονικές χρόνου λόγω της τροφοδοσίας, υποθέτοντας έτσι πως η μόνη συνιστώσα μαγνητικής επαγωγής που προκαλεί απώλειες είναι αυτή της θεμελιώδους συχνότητας. Στην πραγματικότητα όμως, οι ηλεκτρικές μηχανές και ειδικότερα οι κινητήρες, αποτελούν μέρος ενός συνολικού συστήματος οδήγησης που αποτελείται από μετατροπείς ισχύος, όπως αντιστροφείς και οδηγούνται μέσω κάποιας τεχνικής, όπως η τεχνική διαμόρφωσης πλάτους (PWM). Όταν μια μηχανή οδηγείται από αντιστροφή με τεχνική PWM, η κυματομορφή του ρεύματος είναι συνήθως διαφοροποιημένη από καθαρό ημίτονο.



Σχήμα 7.2. Κυματομορφή φασικού ρεύματος τροφοδότησης κινητήρα με προβλεπτικό έλεγχο μέσω σημάτων PWM. Φαίνεται το υψηλό αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος [80]

Αυτό το παραμορφωμένο ρεύμα θα προκαλέσει διακυμάνσεις και τοπικά ελάχιστα στην κυματομορφή της μαγνητικής επαγωγής που αναπτύσσεται το διάκενο, οι οποίες με τη σειρά τους, θα δημιουργήσουν ελάχιστονες βρόχους υστέρησης (minor hysteresis loops) επί της συνολικής καμπύλης υστέρησης, προσθέτοντας επιπλέον απώλειες υστέρησης. Επίσης, οι διακυμάνσεις της κυματομορφής οφείλονται στην ύπαρξη αρμονικών συνιστωσών μαγνητικής επαγωγής, πλέον της θεμελιώδους, οι οποίες επάγουν επιπλέον δινορρεύματα, οδηγώντας έτσι σε αυξημένες απώλειες δινορρευμάτων.

Μια ακόμα αιτία απώλειας ισχύος αποτελεί η περιστροφή του διανύσματος της μαγνητικής επαγωγής [81]. Τα προηγούμενα μοντέλα υποθέτουν πως η μαγνητική ροή μεταβάλλεται μόνο ως προς το μέτρο, ενώ η διεύθυνσή της παραμένει σταθερή. Στις στρεφόμενες μηχανές όμως, υπάρχουν περιοχές του στάτη όπου η μαγνητική επαγωγή εμφανίζει έντονη αλλαγή της κατεύθυνσης της. Οι περιοχές αυτές είναι κατά κύριο λόγο οι άκρες των δοντιών και το τμήμα της βάσης του δοντιού.

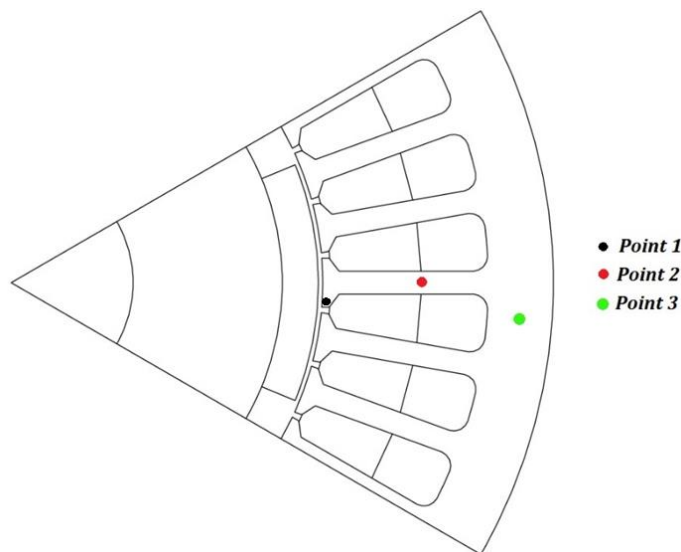


Σχήμα 7.3. Μεταβολή της διεύθυνσης της μαγνητικής ροής στις διάφορες περιοχές του στάτη, κατά τον οριζόντιο και τον κάθετο άξονα [36]

Όπως φαίνεται παραπάνω, ο γεωμετρικός τόπος που σχηματίζεται από το διάνυσμα της επαγωγής σε σημείο της περιοχής 2 είναι σχεδόν κυκλικός. Επίσης, η επαγωγή στα σημεία 1 και 3 παρουσιάζει έντονη μεταβολή της διεύθυνσής της. Για να γίνει καλύτερα κατανοητή η μεταβολή της διεύθυνσης της μαγνητικής ροής κατά την περιστροφή της μηχανής, η παρακάτω υποενοότητα μελετά τους γεωμετρικούς τόπους μεταβολής του διανύσματος της μαγνητικής επαγωγής στα διάφορα σημεία του στάτη.

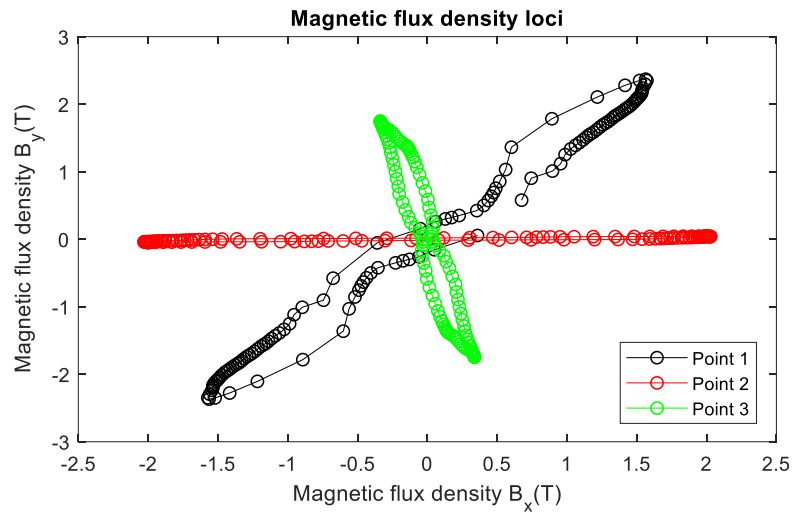
7.4.1.1 Γεωμετρικοί τόποι των διανυσμάτων μαγνητικής επαγωγής σε διάφορα σημεία του στάτη

Παρακάτω θα μελετηθεί η αλλαγή της διεύθυνσης της μαγνητικής επαγωγής στην επιλεγμένη μηχανή υψηλότερης απόδοσης, λόγω της περιστροφής του μαγνητικού πεδίου, στην οποία έγινε αναφορά προηγουμένως. Οι περιοχές του στάτη που θα μελετηθούν είναι το σώμα (yoke) και το δόντι του στάτη, όπου η μαγνητική επαγωγή αναμένουμε να είναι σχεδόν μονοκατευθυντική (Point 1, 2) καθώς και το άκρο του δοντιού όπου η μαγνητική επαγωγή αναμένεται να αλλάζει έντονα κατεύθυνση (Point 3).



Σχήμα 7.4. Επιλεγμένα σημεία στάτη για τη μελέτη του διανύσματος της μαγνητικής επαγωγής και των ειδικών απωλειών πυρήνα

Η μελέτη των διανυσμάτων της μαγνητικής επαγωγής έγινε με περιστροφή της μηχανής κατά γωνία βήματος $d\delta$, που αντιστοιχεί σε χρονικό βήμα dt , επομένως τα αποτελέσματα αφορούν τη χρονική μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής στα παραπάνω σημεία.



Σχήμα 7.5. Γεωμετρικοί τόποι επιλεγμένων σημείων στάτη κατά τη σύγχρονη περιστροφή του δρομέα

Στην παραπάνω απεικόνιση – η οποία είναι σχεδόν ταυτόσημη με το Σχήμα 7.3 που παρουσιάζεται στο [22] – φαίνεται οι γεωμετρικοί τόποι (loci) που σχηματίζουν τα επιλεγμένα σημεία της γεωμετρίας σε ένα χρονικό διάστημα ή σε ένα εύρος περιστροφής αντίστοιχα. Όπως αναμέναμε, από την απεικόνιση των μαγνητικών γραμμών που δίνει το FEMM, η διεύθυνση της μαγνητικής επαγωγής στα σημεία 1 και 2 είναι σχεδόν μονοκατευθυντική και αντιστοιχεί στην εφαπτομενική συνιστώσα του πεδίου που υπερισχύει στο σώμα του στάτη και στην ακτινική συνιστώσα του πεδίου που διασχίζει το δόντι του στάτη. Αντίθετα, λόγω της αλληλεπίδρασης των άκρων του δοντιού με το πεδίο διέγερσης των μαγνητών και την άσκηση μεγάλων δυνάμεων στο διάκενο, ικανών να παράξουν τελικά ροπή, η διεύθυνση της μαγνητικής επαγωγής στο άκρο του δοντιού, παρουσιάζει έντονη μεταβλητότητα κατά τη περιστροφή της μηχανής.

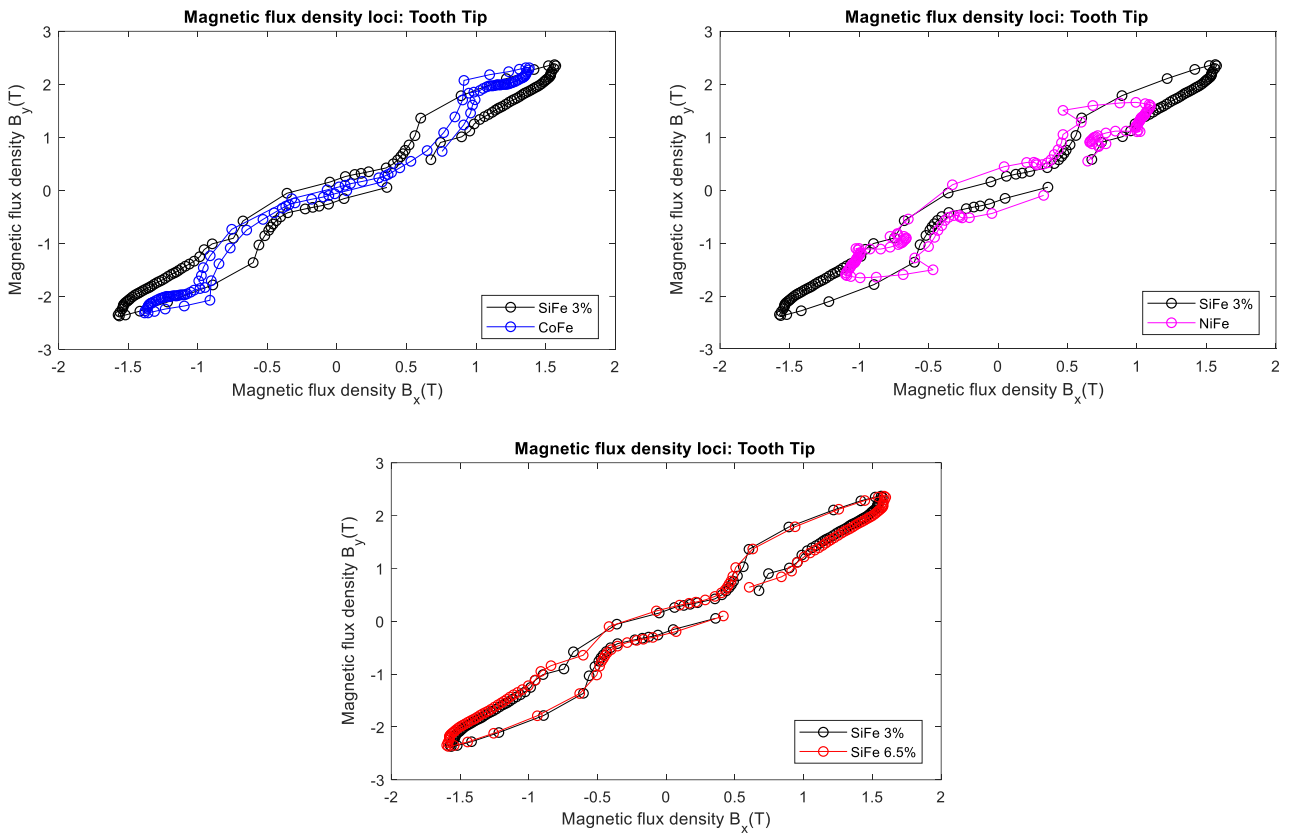
Όσον αφορά τις ειδικές απώλειες πυρήνα στα παραπάνω επιλεγμένα σημεία, συμπεριλαμβάνοντας τις απώλειες των ανώτερης τάξης αρμονικών της μαγνητικής επαγωγής, διαμορφώνονται ως εξής για κάθε σημείο:

Πίνακας 7.2. Ειδικές απώλειες πυρήνα επιλεγμένων σημείων στάτη SiFe 3%

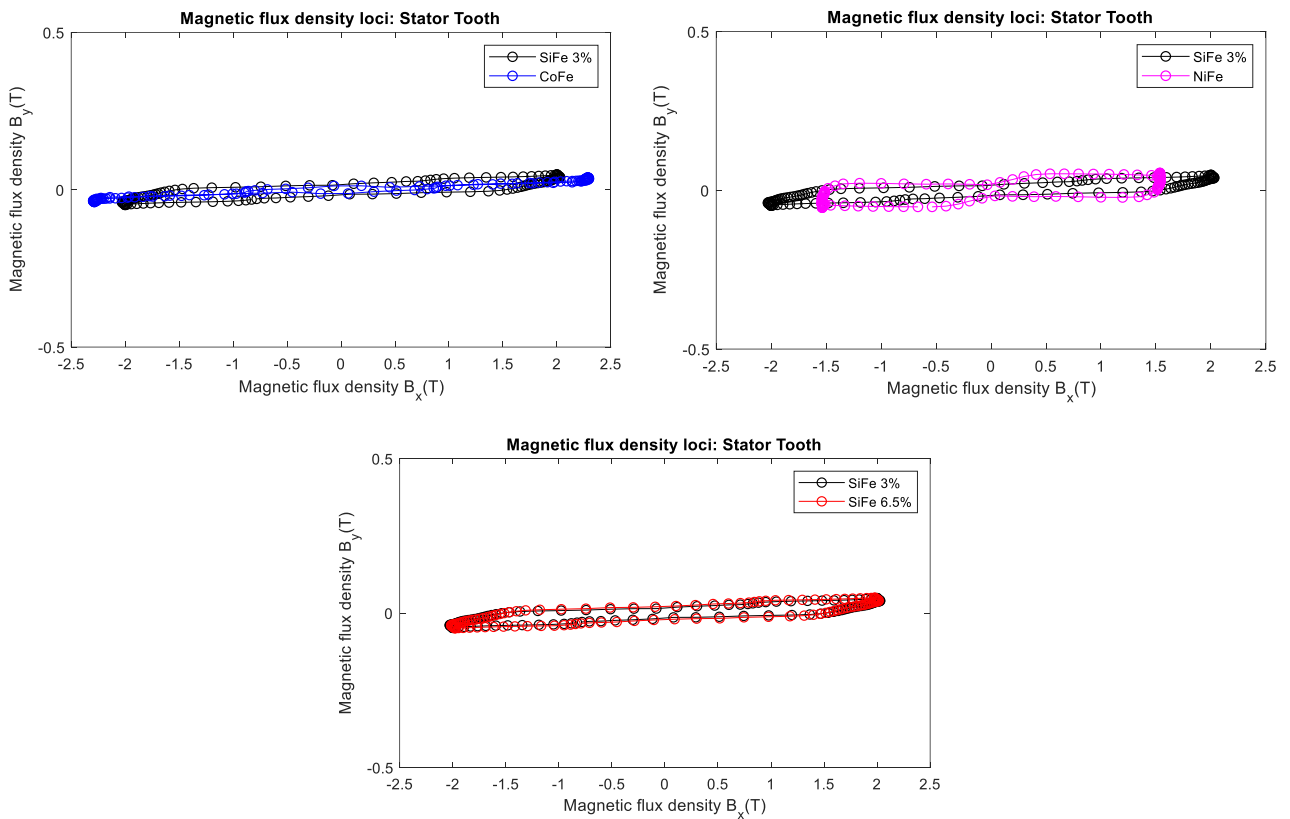
Επιλεγμένο σημείο στάτη	Ειδικές απώλειες πυρήνα (W/kg)
Point 1 (σώμα στάτη – stator yoke)	20.8
Point 2 (δόντι στάτη – stator tooth)	34.4
Point 3 (άκρο δοντιού στάτη – stator tooth tip)	67.8

Όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρούμε πως όσον αφορά την κατανομή των απωλειών, υψηλότερες απώλειες παρουσιάζονται στα σημεία που το πεδίο φτάνει σε τοπικό κορεσμό, όπως είναι τα άκρα των δοντιών. Ακόμα, ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας της τοπικής αύξησης των απωλειών στα σημεία αυτά είναι η έντονη μεταβλητότητα διεύθυνσης του διανύσματος της μαγνητικής επαγωγής, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε τοπικά αυξημένες απώλειες πυρήνα, όπως αναφέρεται στο [36].

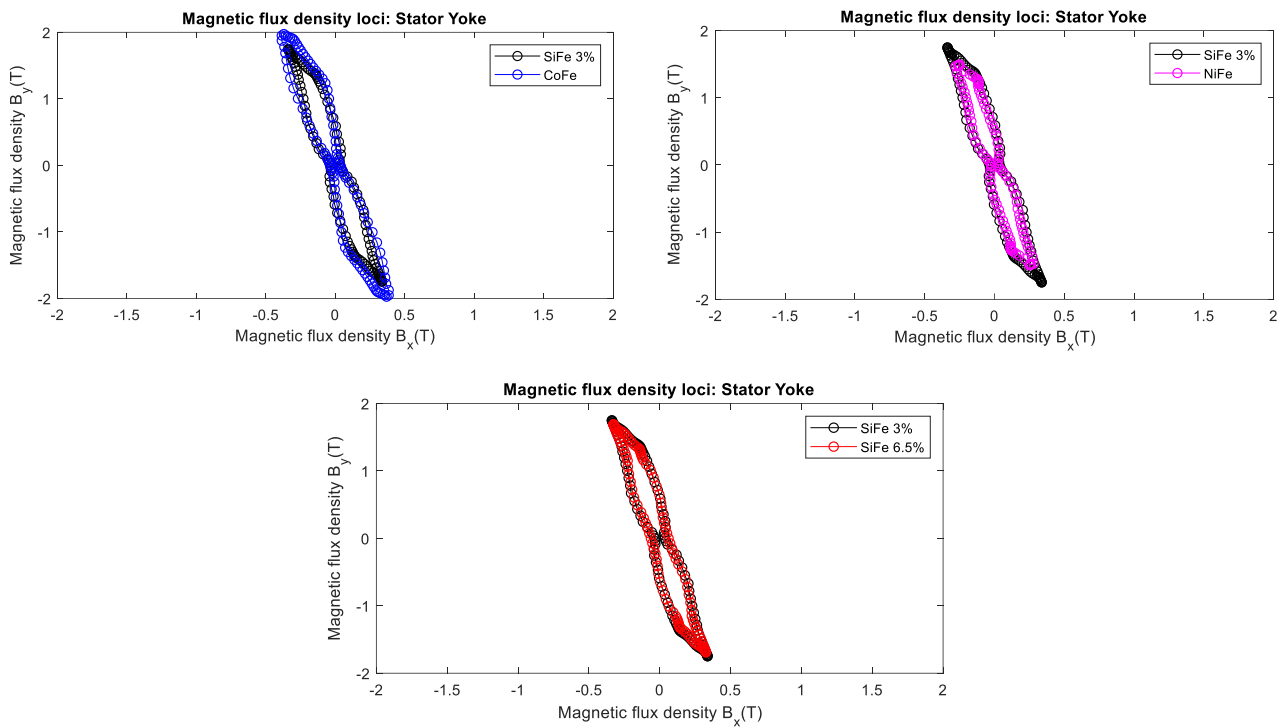
Η μελέτη αυτή επαναλαμβάνεται παρακάτω και για τα υπόλοιπα υλικά, προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση του κάθε υλικού πυρήνα στην μεταβολή του μέτρου και διεύθυνσης της μαγνητικής επαγωγής στα διάφορα σημεία αλλά και στις τοπικές απώλειες των σημείων αυτών.



Σχήμα 7.6. Σύγκριση γεωμετρικών τόπων μαγνητικής επαγωγής στο άκρο δοντιού στάτη κατά τη σύγχρονη περιστροφή του δρομέα, για τα διάφορα σιδηρομαγνητικά υλικά των μηχανών αναφοράς



Σχήμα 7.7. Σύγκριση γεωμετρικών τόπων μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος του δοντιού στάτη κατά τη σύγχρονη περιστροφή του δρομέα, για τα διάφορα σιδηρομαγνητικά υλικά των μηχανών αναφοράς



Σχήμα 7.8. Σύγκριση γεωμετρικών τόπων μαγνητικής επαγωγής στο σώμα στάτη κατά τη σύγχρονη περιστροφή του δρομέα, για τα διάφορα σιδηρομαγνητικά υλικά των μηχανών αναφοράς

Παρατηρείται πως οι παραπάνω γεωμετρικοί τόποι της μαγνητικής επαγωγής των επιλεγμένων σημείων στάτη ταυτίζονται σχεδόν για όλα τα υλικά, με μικρές διαφορές να παρατηρούνται στα εξής:

- Όσον αφορά τους γεωμετρικούς τόπους της μαγνητικής επαγωγής στα άκρα του δοντιού στάτη, παρατηρείται πως στην περίπτωση των κραμάτων SiFe, οι συνιστώσες B_x και B_y λαμβάνουν τιμές πιο βαθιά στον κορεσμό σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές των CoFe και NiFe. Αυτό μπορεί να αποτελεί ένδειξη πως στα σημεία απότομης γεωμετρίας (όπως τα άκρα των δοντιών), το κράμα πυριτίου – σιδήρου εμφανίζει περισσότερο κορεσμό και κατ' επέκταση υψηλότερες τοπικές απώλειες.
- Στα υπόλοιπα σημεία του στάτη (μέσο δοντιού και yoke), παρατηρείται συνάφεια των ακραίων τιμών που παίρνουν οι συνιστώσες B_x και B_y , και του σημείου κορεσμού του κάθε υλικού. Έτσι το CoFe και το NiFe λαμβάνουν τις υψηλότερες και τις χαμηλότερες ακραίες τιμές, κατ' αντιστοιχία των σημείων κορεσμού της μαγνητικής επαγωγής του κάθε υλικού.

Όσον αφορά τον υπολογισμό των τοπικών απωλειών πυρήνα στις περιοχές ενδιαφέροντος του στάτη για κάθε υλικό, τα αποτελέσματα να επιβεβαιώνουν τις ιδιότητες των υλικών στην ανάπτυξη απωλειών, όπως αυτές αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 3, καθώς και την επίδραση της περιστροφής του μαγνητικού πεδίου στα διαφορετικά σημεία της γεωμετρίας.

Πίνακας 7.3. Ειδικές απώλειες πυρήνα επιλεγμένων σημείων στάτη, για τα διάφορα σιδηρομαγνητικά υλικά των μηχανών αναφοράς

Επιλεγμένο σημείο στάτη	Ειδικές απώλειες πυρήνα (W/kg)			
	SiFe 3%	CoFe	NiFe	SiFe 6.5%
Point 1 (σώμα στάτη – stator yoke)	20.8	15.9	11.1	12
Point 2 (δόντι στάτη – stator tooth)	34.4	26.9	19.6	19.3
Point 3 (άκρο δοντιού στάτη – stator tooth tip)	67.8	42.8	35.2	36.9

Παρά την ύπαρξη τους, οι παραπάνω απώλειες θα αμεληθούν στην παρούσα εργασία λόγω της σημαντικής δυσκολίας υπολογισμού τους, αφού όσον αφορά τις απώλειες PWM, απαιτείται λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που να επιτρέπει τη δυναμική ανάλυση των ρευμάτων της μηχανής, ενώ όσον αφορά τις απώλειες περιστροφής, ο υπολογισμός τους συνήθως περιορίζεται μέσω της προσθήκης συντελεστών περιστροφής, οι οποίοι απαιτούν την διεξαγωγή μετρήσεων σε περίπλοκες πειραματικές διατάξεις [82]. Έτσι στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα αμεληθούν οι απώλειες PWM και περιστροφής, ενώ λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των αρμονικών χώρου (space ή slot harmonics), λόγω της εναλλαγής δοντιών – αυλάκων.

Η μεθοδολογία υπολογισμού των απωλειών πυρήνα που υιοθετείται στην παρούσα εργασία, αποτελεί ένα υβριδικό μοντέλο, που στηρίζεται στις προτεινόμενες μεθοδολογίες που αναφέρονται στα [83], [84] και στο μοντέλο διαχωρισμού του Jordan [51] και υλοποιείται ακολουθώντας την εξής διαδικασία:

- Μετά τη σχεδίαση της επιθυμητής γεωμετρίας στο FEMM ακολουθεί η διαδικασία της πλεγματοποίησης, κατά την οποία η γεωμετρία διακριτοποιείται σε τριγωνικά θεμελιώδη στοιχεία και κόμβους, ο αριθμός των οποίων καθορίζει την ακρίβεια αλλά και το υπολογιστικό κόστος της ανάλυσης, ενώ στη συνέχεια επιλύεται το μαγνητοστατικό πρόβλημα σε κάθε ένα από τα πεπερασμένα στοιχεία που δημιουργήθηκαν.
- Μέσω της διεπαφής FEMM – MATLAB, η μηχανή περιστρέφεται σύγχρονα, με τροφοδότηση των τυλιγμάτων στάτη με τριφασικά ρεύματα μεταβαλλόμενης ηλεκτρικής γωνίας, και ταυτόχρονη περιστροφή του δρομέα σε αντίστοιχη μηχανική γωνία, ενώ λαμβάνεται σε κάθε στιγμιότυπο της παραπάνω περιστροφής πληροφορία σχετικά με τα διανύσματα της μαγνητικής επαγωγής στο σώμα της μηχανής. Οι πληροφορίες για την αρχική θέση και την τιμή της επιφάνειας των στοιχείων αποθηκεύονται στην πρώτη επανάληψη.
- Πιο συγκεκριμένα, αναγνωρίζονται οι περιοχές της γεωμετρίας που ανήκουν στον στάτη και λαμβάνονται οι τιμές του διανύσματος της μαγνητικής επαγωγής $\vec{B} = (B_x, B_y)$ στο βαρύκεντρο του κάθε στοιχειώδους τριγώνου, ενώ για τις περιοχές του δρομέα, λαμβάνεται ομοiotρόπως το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής, το οποίο πολλαπλασιάζεται με διάνυσμα κατάλληλης γωνίας, ώστε να εκφραστεί η περιστροφή του επιπέδου αναφοράς μαζί με τον δρομέα.
- Αφού ολοκληρωθεί μια πλήρης ηλεκτρική περιστροφή, η διαδικασία ανάλυσης της μηχανής ολοκληρώνεται με την εξαγωγή ενός πίνακα $n \times m$, ο οποίος περιέχει το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής σε κάθε ένα από τα m στοιχεία του πλέγματος, για κάθε ένα από τα n διαφορετικά στιγμιότυπα κατά την περιστροφή της μηχανής.

Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ανάλυση Fourier (μέσω της συνάρτησης ταχέως μετασχηματισμού Fourier στο MATLAB) στις κάθετες συνιστώσες της μαγνητικής επαγωγής για κάθε στοιχείο του πίνακα των διανυσμάτων, ώστε να μετατραπεί η χρονοσειρά της μαγνητικής επαγωγής σε πλάτη αρμονικών συνιστωσών, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση των ανώτερων αρμονικών στις απώλειες πυρήνα. Πιο συγκεκριμένα, όπως προαναφέρθηκε, το κλασσικό μοντέλο Jordan ορίζει τις απώλειες πυρήνα βάσει του διαχωρισμού σε συνιστώσες υστέρησης και δινορρευμάτων, ως εξής [51]:

$$P_{Fe} = P_{hyst} + P_{ec} = k_{hyst} \cdot f \cdot \hat{B}^2 + k_{ec} \cdot f^2 \cdot \hat{B}^2 \quad (7.3)$$

Η παραπάνω εξίσωση του Jordan δίνει τις ειδικές απώλειες πυρήνα σε W/kg , επομένως παρακάτω υπολογίζονται οι συνολικές απώλειες πυρήνα βάση της μάζα του πυρήνα της εκάστοτε μηχανής. Αρχικά υπολογίζεται ο στοιχειώδης όγκος κάθε i -οστού τριγωνικού στοιχείου της γεωμετρίας ως εξής:

$$\Delta v_i = A_i \cdot L \quad (7.4)$$

όπου A_i το στοιχειώδες εμβαδό που υπολογίζεται μέσω του FEMM με την εντολή `mo_getelement`, ενώ L είναι το ενεργό μήκος της μηχανής. Το άθροισμα των στοιχειωδών όγκων για όλα τα m τριγωνικά στοιχεία του πλέγματος στον πυρήνα, δίνει τον συνολικό όγκο του πυρήνα σιδήρου στη μηχανή. Ο όγκος αυτός υπολογίζεται σε m^3 , επομένως πολλαπλασιάζοντας με την πυκνότητα του κάθε υλικού, λαμβάνουμε τελικά την μάζα του πυρήνα της μηχανής. Οι πυκνότητες των προς μελέτη υλικών πυρήνα βάση των φυλλαδίων προδιαγραφών των κατασκευαστών έχουν παρουσιαστεί σε προηγούμενη ενότητα (βλ. Πίνακας 7.1).

Ακόμα λόγω της κατασκευής των πυρήνων των ηλεκτρικών μηχανών από ελάσματα σιδήρου, το σώμα των πυρήνων δεν αποτελείται πλήρως από σίδηρο. Μεταξύ των φύλλων λαμαρίνας παρεμβάλλεται κάποιο μονωτικό υλικό όπως βερνίκι ή εποξειδική ρητίνη, ενώ λόγω των διεργασιών επεξεργασίας όπως η διάτρηση (*punching*) οι λαμαρίνες δεν είναι απόλυτα επίπεδες. Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν τελικά τις μαγνητικές ιδιότητες του κατασκευασμένου πυρήνα, και η επίδραση αυτή λαμβάνεται υπόψη εισάγοντας τον συντελεστή ελασματοποίησης (*stacking factor* ή *lamination factor*) που λαμβάνει τιμές < 1 , του οποίου η τιμή εξαρτάται από το πάχος της λαμαρίνας που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του ελασματοποιημένου πυρήνα. Με αυτό τον τρόπο αναπαρίσταται η μείωση της ικανότητας του πυρήνα στην ανάπτυξη μαγνητικής επαγωγής. Ένας εμπειρικός τύπος υπολογισμού του *stacking factor* ανάλογα με το πάχος που χρησιμοποιείται για τη κατασκευή του πυρήνα είναι [85]:

$$cs = 0.0425 \cdot \delta_{lam} + 0.6032 \cdot \arctan(108.16 \cdot \delta_{lam}) \quad (7.5)$$

όπου δ_{lam} είναι το πάχος της λαμαρίνας σε mm .

Σύμφωνα με την εξίσωση (7.5), για τους συντελεστές ελασματοποίησης των προς μελέτη σιδηρομαγνητικών λαμαρινών, θα έχουμε:

Πίνακας 7.4. Συντελεστές ελασματοποίησης για τις προς μελέτη σιδηρομαγνητικές λαμαρίνες

Υλικό	Πάχος λαμαρίνας (mm)	Stacking factor
SiFe 3%	0.2	0.928
CoFe	0.1	0.896
NiFe	0.35	0.946
SiFe 6.5%	0.1	0.896

Ο όρος αυτός υπεισέρχεται στον στοιχειώδη όγκο, αφού εκφράζει την μείωση του ενεργού μήκος σιδήρου λόγω της μόνωσης που παρεμβάλλεται: έτσι συντελεστής ελασματοποίησης 0.95 σημαίνει πρακτικά πως το ενεργό μήκος της μηχανής αποτελείται κατά 95% από σίδηρο. Ο στοιχειώδης όγκος κάθε i -οστού τριγωνικού στοιχείου της γεωμετρίας τελικά υπολογίζεται:

$$\Delta v_i = A_i \cdot L \cdot cs \quad (7.6)$$

Επομένως με την προσθήκη της πυκνότητας και του όγκου του πυρήνα στην κλασσική εξίσωση Jordan, θα έχουμε:

$$P_{Fe} = P_{hys} + P_{ec} = (k_{hyst} \cdot f \cdot \hat{B}^2 + k_{ec} \cdot f^2 \cdot \hat{B}^2) \cdot d \cdot \sum_{i=1}^m \Delta v_i \quad (7.7)$$

ενώ όσον αφορά το μέτρο \hat{B} του διανύσματος της μαγνητικής επαγωγής \vec{B} , αν αναλυθεί στις επιμέρους συνιστώσες του διανύσματος B_x και B_y , θα έχουμε:

$$\hat{B} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \Rightarrow \hat{B}^2 = B_x^2 + B_y^2 \quad (7.8)$$

Τέλος, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση των ανώτερων αρμονικών συνιστωσών της μαγνητικής επαγωγής στις απώλειες πυρήνα, η παραπάνω εξίσωση εφαρμόζεται σε κάθε στοιχειώδη όγκο της γεωμετρίας και στη συνέχεια λαμβάνεται το άθροισμα των αρμονικών στην εκάστοτε συχνότητα έως την 120^η αρμονική. Το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής λαμβάνεται μέσω των επιμέρους συνιστωσών της μαγνητικής επαγωγής B_x και B_y , επομένως οι P_{hys} απώλειες υστέρησης και P_{ec} απώλειες δινορρευμάτων, ορίζονται τελικά ως εξής:

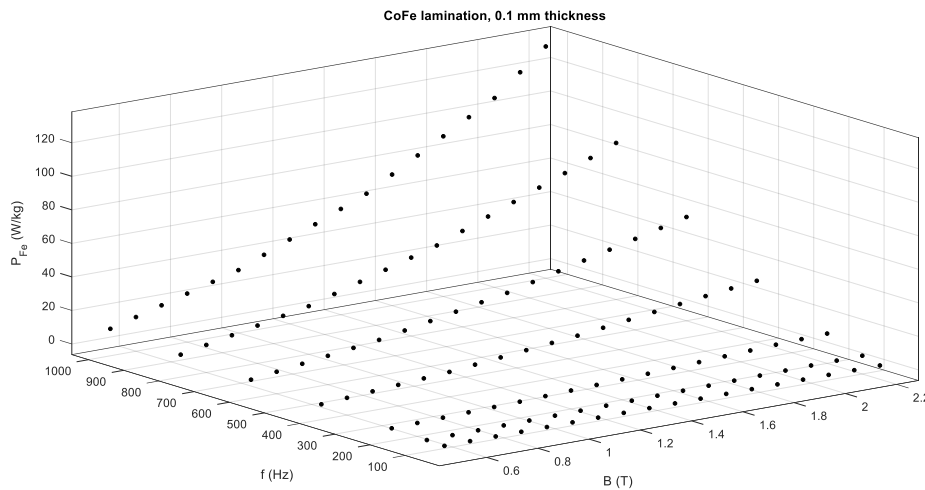
$$P_{hys} = k_{hys} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{120} \Delta v_i \cdot d \cdot (j \cdot f) \cdot (B_{x_{i,j}}^2 + B_{y_{i,j}}^2) \quad (7.9)$$

και

$$P_{ec} = k_{ec} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{120} \Delta v_i \cdot d \cdot (j \cdot f)^2 \cdot (B_{x_{i,j}}^2 + B_{y_{i,j}}^2) \quad (7.10)$$

όπου k_{hys} και k_{ec} οι συντελεστές υστέρησης και δινορρευμάτων αντίστοιχα, j η τάξη της εκάστοτε αρμονικής συνιστώσας, i ο αριθμός του εκάστοτε στοιχείου του πλέγματος και Δv_i ο στοιχειώδης όγκος του κάθε στοιχείου του πλέγματος.

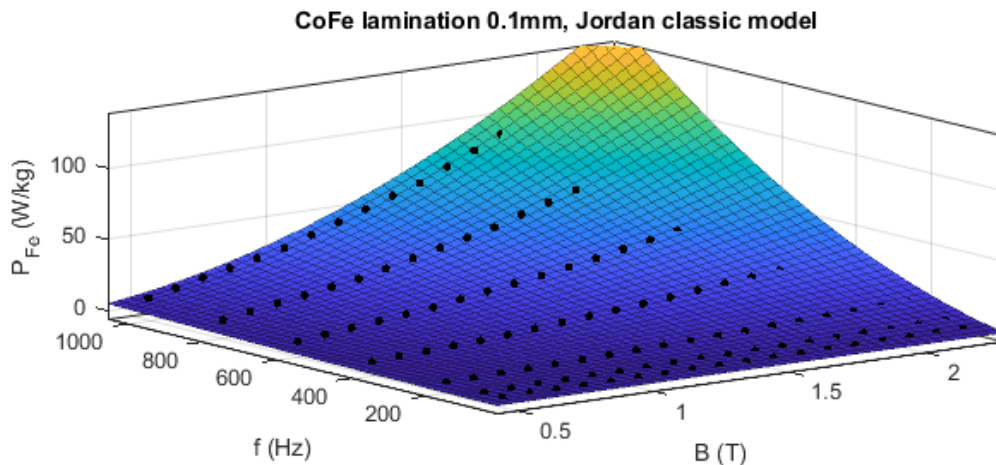
Οι συντελεστές k_{hys} και k_{ec} υπολογίζονται μέσω επιφανειακής προσαρμογής (surface fitting) κατάλληλων εξισώσεων στις καμπύλες ειδικές απωλειών, σε ένα εύρος συχνοτήτων, οι οποίες παρέχονται συνήθως από τον κατασκευαστή της λαμαρίνας. Πιο συγκεκριμένα, εισάγοντας στο Matlab, τις μετρήσεις των ειδικών απωλειών πυρήνα σε W/kg , τις αντίστοιχες τιμές μαγνητικής επαγωγής B και τις ηλεκτρικές συχνότητες f του εναλλασσόμενου πεδίου για την οποίες έγιναν οι μετρήσεις, προκύπτει μια τρισδιάστατη απεικόνιση, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 7.9. Τρισδιάστατη απεικόνιση των ειδικών απωλειών πυρήνα λαμαρίνας CoFe πάχους 0.1 mm, συναρτήσει της μαγνητικής επαγωγής και της συχνότητας

Τα παραπάνω σημεία αντιστοιχούν σε μετρήσεις που έγιναν σε λαμαρίνα κοβαλτίου – σιδήρου CoFe πάχους 0.1 mm, στο εύρος συχνοτήτων 50 – 1000 Hz και υπό την εφαρμογή πεδίου 0.5 – 2.2 T, ενώ κρίθηκε θεμιτό να γίνει γραμμική παρεμβολή μεταξύ των ακραίων μετρήσεων για κάθε υλικό που μελετάται, προκειμένου να πυκνώσουν τα προς απεικόνιση σημεία. Συνήθως, οι καμπύλες απωλειών που προέρχονται από φυλλάδια προδιαγραφών των κατασκευαστών, παρουσιάζουν έλλειψη πειραματικών δεδομένων σε υψηλές τιμές μαγνητικής επαγωγής και σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων, επομένως συχνά χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή ώστε οι καμπύλες να αναχθούν στη ζητούμενη συχνότητα.

Μετά την εισαγωγή των μετρήσεων στο Matlab, η προκύπτουσα καμπύλη μπορεί να προσαρμοστεί σε οποιοδήποτε μοντέλο απωλειών εισάγει ο χρήστης, επομένως εισάγοντας το επιλεγμένο μοντέλο απωλειών βάση της κλασσικής εξίσωσης Jordan, θα έχουμε:



Σχήμα 7.10. Surface fitting του κλασσικού μοντέλου απωλειών του Jordan, στις καμπύλες ειδικών απωλειών λαμαρίνας CoFe πάχους 0.1 mm

Η προσαρμογή της εξίσωσης στην παραπάνω καμπύλη κρίνεται ως προς την ακρίβεια της, από τους δείκτες ελέγχου καλής προσαρμογής (goodness of fit), ενώ μετά το fitting, εξάγονται οι συντελεστές που θα χρησιμοποιηθούν αργότερα στο μοντέλο απωλειών. Για το παραπάνω υλικό θα έχουμε:

Πίνακας 7.5. Οι συντελεστές απωλειών της μεθόδου Jordan, όπως προέκυψαν μέσω surface fitting για τις καμπύλες απωλειών λαμαρίνας CoFe πάχους 0.1 mm

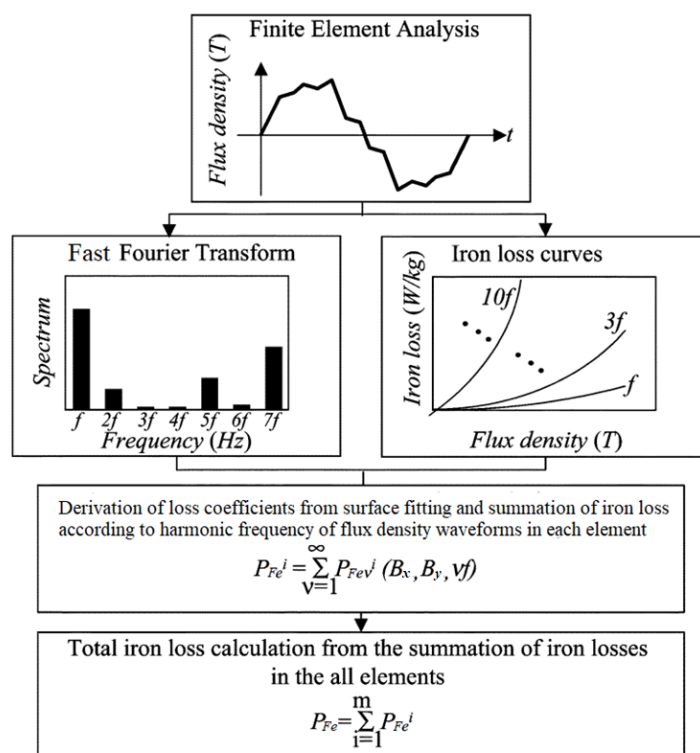
CoFe 0.1 mm	
Παράμετροι	Τιμές
a	2
$k_{hys} (W/(kg \cdot Hz \cdot T^2))$	0.0098
$k_{ec} (W/(kg \cdot Hz^2 \cdot T^2))$	$1.7820 \cdot 10^{-5}$

Ομοίως εξάγονται οι συντελεστές απωλειών πυρήνα για τα υπόλοιπα σιδηρομαγνητικά υλικά που μελετώνται στην παρούσα εργασία και παρουσιάζονται συνοπτικά στον κάτωθι πίνακα. Οι αναλυτικοί υπολογισμοί και τα αποτελέσματα της μεθόδου surface fitting για κάθε υλικό, παρατίθενται στο παράρτημα.

Πίνακας 7.6. Συντελεστές απωλειών βάση του κλασσικού μοντέλου απωλειών του Jordan, για κάθε υπό εξέταση σιδηρομαγνητικό υλικό

	SiFe 3% 0.2 mm	CoFe 0.1 mm	NiFe 0.35 mm	SiFe 6.5% 0.1 mm
k_{hys}	0.0224	0.0098	0.0151	0.0138
k_{ec}	$2.3951 \cdot 10^{-5}$	$1.7820 \cdot 10^{-5}$	$1.8558 \cdot 10^{-5}$	$6.2830 \cdot 10^{-6}$

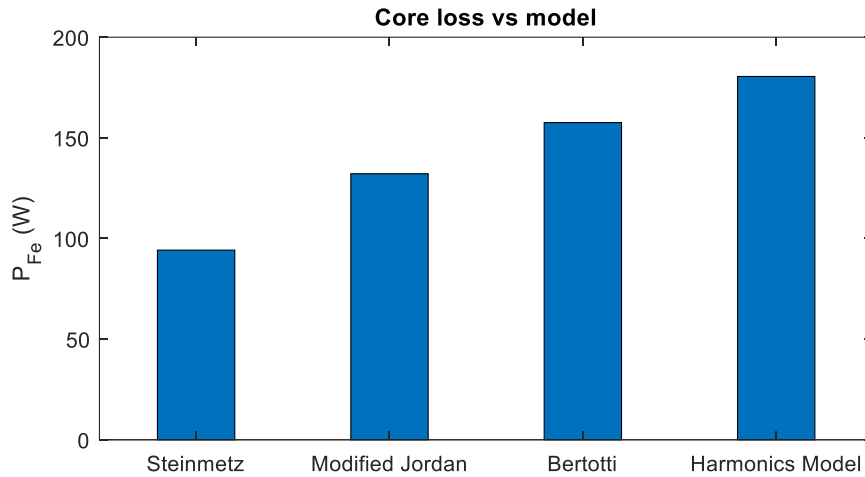
Συνοπτικά, το διάγραμμα ροής της ανωτέρω διαδικασίας για τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα κάθε μηχανής, φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 7.11. Διαργασίες ρουτίνας υπολογισμού απωλειών πυρήνα, βασισμένες στο μοντέλο που παρουσιάζεται στο [84]

Η τελική επιλογή του μοντέλου υπολογισμού απωλειών πυρήνα είναι κομβικής σημασίας, αφού οι απώλειες πυρήνα αποτελούν βασική συνιστώσα διαφοροποίησης των προς μελέτη υλικών, επομένως ο ακριβής ή μη υπολογισμός αυτών έχει σημαντική επίπτωση στην ορθότητα των εξαγόμενων συμπερασμάτων. Για την υποστήριξη της επιλεγμένης μεθοδολογίας, είναι χρήσιμο να παρουσιαστεί μια σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων διαφορετικών μεθόδων, για μια ενδεικτική 6-πολική μηχανή, ροπής 45 Nm σε τροφοδότηση 4 A/mm² στις 1500 ΣΑΛ, με λαμαρίνα SiFe 3% της σειράς NO20 [21], που έχει ευρεία χρήση στην αυτοκίνηση, λόγω των χαμηλών ειδικών απωλειών πυρήνα που εμφανίζει.

Αρχικά, εισάγοντας στην υπορουτίνα που αναπτύχθηκε, τις καμπύλες ειδικών απωλειών του υλικού σε εύρος συχνοτήτων 50 – 1000 Hz, καθώς και την εξίσωση απωλειών που αντιστοιχεί στο εκάστοτε μοντέλο προκύπτουν μέσω surface fitting τους συντελεστές απωλειών για κάθε μοντέλο απωλειών. Επιλέχθηκαν να συγκριθούν η κλασική εξίσωση Steinmetz [50], το τροποποιημένο μοντέλο Jordan για SiFe [52], η εξίσωση Bertotti [53], [54], καθώς και μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, το οποίο φαίνεται παρακάτω ως Harmonics Model, αφού λαμβάνει υπόψη την επίδραση των ανώτερων αρμονικών συνιστωσών.



Σχήμα 7.12. Συγκριτικά αποτελέσματα απωλειών πυρήνα για πυρήνα 6 πολικής SiFe 3% μάζας 11.2 kg σε ταχύτητα περιστροφής 1500 ΣΑΛ.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, ο συνυπολογισμός της επίδρασης των ανώτερων αρμονικών, αλλά και η μελέτη αυτών σε κάθε στοιχείο του πλέγματος, οδηγεί σε υψηλότερες απώλειες πυρήνα, όπως ήταν αναμενόμενο.

7.4.2 Απώλειες χαλκού

Οι απώλειες χαλκού στις σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών οφείλονται στις ωμικές απώλειες στα τυλίγματα του στάτη. Για τον υπολογισμό τους γίνεται χρήση του εξής τύπου:

$$P_{Cu} = 3 \cdot I^2 \cdot R_{Cu} \quad (7.11)$$

Για τον υπολογισμό τους πρέπει να προσδιοριστούν οι τιμές του ονομαστικού ρεύματος I και της ωμικής αντίστασης φάσης του τυλίγματος R_{Cu} .

Κατά κανόνα σε μια διαδικασία βελτιστοποίησης γεωμετρίας ηλεκτρικού κινητήρα, λόγω του ότι οι γεωμετρικές παράμετροι του στάτη και άρα και το εμβαδόν της αύλακας αλλάζουν, το ονομαστικό ρεύμα δεν είναι σταθερή ποσότητα. Αυτό οφείλεται στην τυπική θεώρηση σχεδίασης σταθερής γραμμικής πυκνότητας ρεύματος στις αύλακες J και όχι ρεύματος για την εξασφάλιση αξιόπιστης θερμικής συμπεριφοράς. Συνεπώς το ονομαστικό ρεύμα I πρέπει να υπολογίζεται εκ νέου για κάθε γεωμετρία. Για τον υπολογισμό του ρεύματος στάτη I , για δεδομένη πυκνότητα ρεύματος εισόδου J , χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

$$I = \frac{J \cdot ff \cdot A_{slot}}{N_s} \quad (7.12)$$

όπου J είναι η ενεργός τιμή της πυκνότητας ρεύματος, N_s ο αριθμός ελιγμάτων ανά αύλακα, ff ο συντελεστής πληρότητας της αύλακας και A_{slot} η επιφάνεια κάθε αύλακας.

Η αντίσταση του τυλίγματος κάθε φάσης υπολογίζεται ως εξής:

$$R_{Cu} = \frac{N_s \cdot Q}{m} \cdot r_{Cu} \cdot \frac{l_{turn}}{A_{wire}} \quad (7.13)$$

όπου Q ο αριθμός των αυλάκων της μηχανής, r_{Cu} η ειδική αντίσταση σε θερμοκρασία θ , l_{turn} το μέσο μήκος αγωγού και $A_{wire} = \frac{A_{cu}}{N_s} = \frac{ff \cdot A_{slot}}{N_s}$, η διατομή του κάθε αγωγού.

Η ειδική αντίσταση του χαλκού για θερμοκρασία περιβάλλοντος $\theta = 20^\circ\text{C}$ είναι ίση με $r_{Cu20^\circ\text{C}} = 1.75 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. Η διορθωμένη ειδική αντίσταση προκύπτει σε $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ ως εξής:

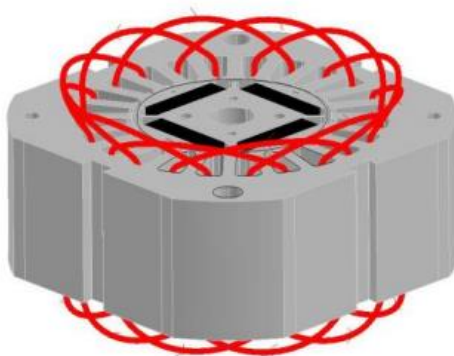
$$r_{Cu} = r_{Cu20^{\circ}C} \cdot (1 + a \cdot (\theta - 20^{\circ}C)) \quad (7.14)$$

όπου a ο συντελεστής θερμοκρασιακής μεταβολής.

Θεωρώντας για τον υπολογισμό των απωλειών, θερμοκρασία λειτουργίας του χαλκού $\theta = 80^{\circ}C$ και συντελεστή θερμοκρασιακής μεταβολής $a = 3.9 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ για αυτή τη θερμοκρασία, η ειδική αντίσταση θα είναι:

$$\begin{aligned} r_{Cu} &= 1.75 \cdot (1 + 3.9 \cdot 10^{-3} \cdot (80 - 20)) \Rightarrow \\ r_{Cu} &= 2.16 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m \end{aligned} \quad (7.15)$$

Ακόμα, για τον υπολογισμό του μέσου μήκους αγωγού [60], λαμβάνεται υπόψη το ενεργό μήκος L της μηχανής και η απόσταση W_{ts} , που ορίζεται ως η απόσταση από το γεωμετρικό μέσο της μίας στρώσης μιας αύλακας, μέχρι το γεωμετρικό μέσο της ακόλουθης στρώσης της γειτονικής αύλακας. Επίσης, εισάγεται ένας συντελεστής προσαύξησης του μέσου μήκους μιας σπείρας, ο συντελεστής πλέξης olf , που εκφράζει το αυξημένο μήκος των πηνίων κατά την περιέλιξη τους, λόγω της καμπυλότητας τους που οδηγεί στην ύπαρξη των κεφαλών τυλίγματος εκτός του ενεργού μήκους της μηχανής. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι οι αγωγοί έχουν κάποιες ελάχιστες ακτίνες καμπυλότητας που πρέπει να πληρούνται για μηχανικούς λόγους [86].



Σχήμα 7.13. Άκρα τυλιγμάτων που προκύπτουν κατά την περιέλιξη του στάτη [87]. Τα άκρα τυλιγμάτων, δημιουργούν επιπλέον απώλειες χαλκού χωρίς να συμμετέχουν στην ανάπτυξη μαγνητικής επαγωγής στον πυρήνα, αποτελώντας σημαντικό πρόβλημα στη διαμόρφωση κατανεμημένων τυλιγμάτων.

Θεωρώντας μια τυπική τιμή για το συντελεστή πλέξης $olf = 1.2$ [9], προκύπτει το μέσο μήκος μιας σπείρας ως εξής:

$$l_{turn} = olf \cdot (2L + 2W_{ts}) \quad (7.16)$$

Η προτεινόμενη τεχνική αγνοεί τις απώλειες του ρεύματος που παρουσιάζονται στα άκρα τυλιγμάτων λόγω του φαινομένου γειτνίασης των αγωγών, αφού μπορούν να αμεληθούν σε μηχανές μικρής και μεσαίας κλίμακας ισχύος [88].

7.4.3 Απώλειες μονίμων μαγνητών

Οι απώλειες δινορρευμάτων στο σώμα των μόνιμων μαγνητών αποτελούν απώλεια ισχύος στους κινητήρες επιφανειακών μόνιμων μαγνητών, όπου οι μαγνήτες που τοποθετούνται στο διάκενο της μηχανής και αναπτύσσουν δινορρεύματα λόγω της μεταβολής της ΜΕΔ στο διάκενο [6]. Τα αναπτυσσόμενα δινορρεύματα προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας των μόνιμων μαγνητών, που μπορεί να οδηγήσει σε απομαγνήτιση τους. Οι απώλειες αυτές διαδραματίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο σε εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων, λόγω του γεγονότος ότι οι απώλειες μόνιμων μαγνητών είναι ανάλογες του τετραγώνου της συχνότητας λειτουργίας, ενώ συνήθως αμελούνται σε εφαρμογές συμβατικών ταχυτήτων [89], όπως η παρούσα.

Ο υπολογισμός τους στηρίζεται κυρίως σε αναλυτικές μεθόδους που συνήθως θεωρούν παραδοχές και απλουστεύσεις σχετικά με τις μαγνητικές ιδιότητες των υλικών, όπως η μέθοδος που προτείνεται στο [89], η οποία επιλέγεται για την παρούσα μελέτη. Οι βασικές υποθέσεις της προτεινόμενης μεθόδου είναι:

- Οι πυρήνες στάτη και δρομέα θεωρείται πως έχουν άπειρη διαπερατότητα και μηδενική ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Τα επαγόμενα δινορρεύματα έχουν αξονική κατεύθυνση, δηλαδή αγνοούνται η επίδραση των άκρων τυλιγμάτων
- Οι μόνιμοι μαγνήτες έχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα σ_m
- Η αλλαγή της μαγνητικής διαπερατότητας στο διάκενο λόγω εναλλαγής δοντιών – αυλάκων αγνοείται

Κατ' αντιστοιχία με τη μέθοδο υπολογισμού των απωλειών πυρήνα, αφού η γεωμετρία σχεδιαστεί, πλεγματοποιηθεί και ο δρομέας περιστραφεί σύγχρονα με τα ρεύματα στάτη, ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Αναγνωρίζονται οι περιοχές της γεωμετρίας που υπάρχουν μαγνήτες και λαμβάνονται οι τιμές του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού A στο βαρύκεντρο του κάθε στοιχειώδους τριγώνου των μαγνητών
- Αφού ολοκληρωθεί μια πλήρης ηλεκτρική περιστροφή, η διαδικασία ανάλυσης της μηχανής ολοκληρώνεται με την εξαγωγή ενός πίνακα $n \times m$, ο οποίος περιέχει το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό σε κάθε ένα από τα m στοιχεία του πλέγματος, για κάθε ένα από τα n διαφορετικά στιγμιότυπα κατά την περιστροφή της μηχανής. Σε όσα από τα m στοιχεία του πλέγματος υπάρχει υλικό μαγνήτη, ο πίνακας A έχει κάποια τιμή, ενώ στα υπόλοιπα έχει μηδενική τιμή, υποδηλώνοντας έτσι την ύπαρξη άλλου υλικού

Στη συνέχεια, τα επαγόμενα δινορρεύματα στους μαγνήτες λόγω του χρονομεταβλητού μαγνητικού πεδίου του στάτη, υπολογίζονται ως εξής σε μορφή πίνακα $n \times m$:

$$J_m = -\sigma_m \cdot \frac{dA}{dt} + J_c \quad (7.17)$$

όπου σ_m η ηλεκτρική αγωγιμότητα των μαγνητών και J_c είναι η σταθερά ολοκλήρωσης που απαιτείται για το μηδενισμό της πυκνότητας ρεύματος στην εγκάρσια διατομή κάθε μαγνήτη. Ομοίως με το μοντέλο απωλειών πυρήνα, αντί να υπολογίζεται ο ρυθμός μεταβολής του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού $\frac{dA}{dt}$ σε κάθε βήμα για κάθε στοιχείο της γεωμετρίας μαγνητών, επιλέγεται να υπολογιστούν οι αρμονικές συνιστώσες του A μέσω της συνάρτησης ταχέως μετασχηματισμού Fourier στο MATLAB, επομένως η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$J_m = -\sigma_m \cdot j \cdot f \cdot A + J_c \quad (7.18)$$

Η σταθερά J_c υπολογίζεται ως ένα ισοδύναμο «μέσο» ρεύμα στην διατομή κάθε μαγνήτη, ως εξής:

$$J_c = J_m \cdot \frac{\Delta v_n}{V_{mag}} \quad (7.19)$$

όπου J_m είναι πίνακας $n \times m$, Δv_n είναι πίνακας $m \times 1$ που περιέχει τους στοιχειώδεις όγκους των τριγωνικών στοιχείων των μαγνητών και V_{mag} είναι ο συνολικός όγκος των μαγνητών. Έτσι το J_c προκύπτει ως διάνυσμα στήλη $n \times 1$, επομένως για κάθε θέση δρομέα προκύπτει μια ισοδύναμη πυκνότητα ρεύματος περιορισμού (constraint current).

Για τον υπολογισμό των απωλειών δινορρευμάτων γίνεται άθροισμα όλων των αρμονικών συνιστωσών του διανυσματικού δυναμικού A , σε κάθε στοιχειώδη όγκο της γεωμετρίας των μαγνητών. Οι συνολικές απώλειες δινορρευμάτων υπολογίζονται ως εξής:

$$P_{mag} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_m \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{120} \Delta v_i \cdot (2 \cdot \pi \cdot j \cdot f)^2 \cdot (J_{m,j})^2 \quad (7.20)$$

7.4.4 Μηχανικές απώλειες

Το κύριο μέρος των μηχανικών απωλειών μιας ηλεκτρικής μηχανής είναι οι απώλειες τριβών στα ρουλεμάν και οι απώλειες ανεμισμού λόγω της περιστροφής του δρομέα εντός του αέρα του διακένου. Οι απώλειες τριβών και ανεμισμού συνήθως αμελούνται αφού ο ακριβής υπολογισμός τους απαιτεί χρήση τρισδιάστατων μοντέλων, παρόλα αυτά παρατίθεται παρακάτω η μέθοδος εκτίμησης τους, μέσω εμπειρικών τύπων.

7.4.4.1 Απώλειες τριβών

Οι απώλειες λόγω τριβών εξαρτώνται από το είδος των ρουλεμάν που στηρίζουν τον άξονα της μηχανής και σε συνήθεις εφαρμογές με χρήση συμβατικών ρουλεμάν, υπολογίζονται από την εμπειρική σχέση [15]:

$$P_{fr} = \frac{k_{fb} \cdot (m_{rotor} + m_{magnet}) \cdot n_m}{1000} \quad (7.21)$$

όπου k_{fb} είναι ένας εμπειρικός συντελεστής, που λαμβάνεται συνήθως ίσος με 3, m_{rotor} και m_{magnet} είναι η μάζα του δρομέα και των μονίμων μαγνητών αντίστοιχα, και n_m είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα εκφρασμένη σε ΣΑΛ.

7.4.4.2 Απώλειες ανεμισμού

Οι απώλειες ανεμισμού εμφανίζονται με τη μορφή θερμότητας εντός του ρευστού (εδώ αέρας) μεταξύ του δρομέα και του στάτη, λόγω της περιστροφής του δρομέα. Ο εμπειρικός τύπος που παρατίθεται στη συνέχεια, υποθέτουν κυλινδρικό δρομέα και στάτη και φυσική ψύξη, αφού η ύπαρξη φτερωτής στον άξονα θα οδηγήσει σε αύξηση των απωλειών [15]:

$$P_{wind} = \frac{L \cdot n_m^3 \cdot (2 \cdot R_{ro} + 2 \cdot H_{mag})^3}{10^6} \quad (7.22)$$

όπου L το ενεργό μήκος της μηχανής, R_{ro} η εξωτερική ακτίνα του δρομέα και H_{mag} το πάχος των μαγνητών.

7.5 Υπολογισμός απόδοσης

Μετά τον υπολογισμό των επιμέρους συνιστωσών των απωλειών με βάση τις προαναφερθείσες διαδικασίες, η απόδοση της μηχανής δίνεται από τη σχέση:

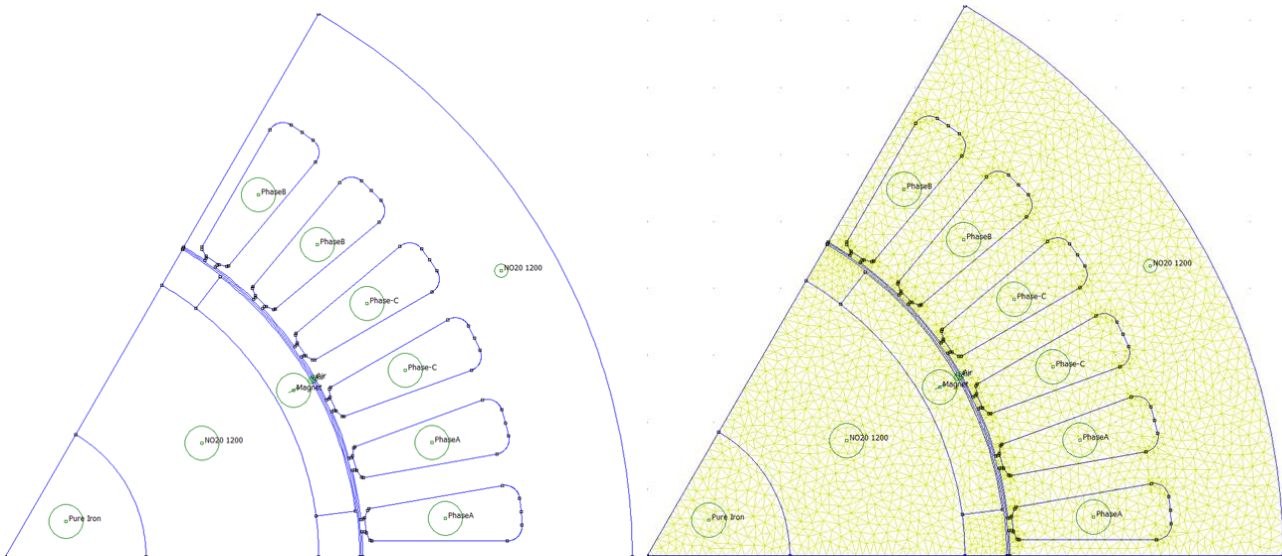
$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{P_m}{P_m + P_{loss}} \quad (7.23)$$

όπου $P_m = T_m \cdot \omega_m$ είναι η παραγόμενη ισχύς της μηχανής και P_{loss} οι συνολικές απώλειες της μηχανής που ορίζονται ως:

$$P_{loss} = P_{Fe} + P_{Cu} + P_{mag} + P_{fr} + P_{wind} \quad (7.24)$$

8. ΟΡΙΣΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΗΧΑΝΩΝ SiFe 3%

Παρακάτω φαίνεται μια ενδεικτική γεωμετρία μηχανής πυρήνα SiFe 3%, έτσι όπως σχεδιάστηκε στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων FEMM καθώς και η δημιουργία του τριγωνικού πλέγματος για την επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος.



Σχήμα 8.1. Αναπαράσταση γεωμετρίας ενός πόλου με και χωρίς το τριγωνικό πλέγμα

8.1 Ανάλυση ευαισθησίας

Προκειμένου να καθοριστούν τα βέλτιστα χαρακτηριστικά της μηχανής με πυρήνα πυριτιούχου σιδήρου 3%, θα πρέπει να δημιουργηθεί μια δεξαμενή (pool) μηχανών διαφορετικής διατομής και διαφορετικού ενεργού μήκους, ώστε να προκύψει η μηχανή με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τα οποία μεγιστοποιούν την επίδοση (ροπή) και την απόδοση (απώλειες). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέσω ανάλυσης ευαισθησίας, με την μεταβολή μιας σειράς γεωμετρικών παραμέτρων σε κάθε μηχανή.

Η ανάλυση ευαισθησίας αποτελεί τον κλασικό χειρισμό ενός προβλήματος ταυτόχρονης βελτιστοποίησης πολλών κριτηρίων. Διενεργώντας ανάλυση ευαισθησίας σε ορισμένες παραμέτρους, επιλύονται όλα τα αντίστοιχα μαγνητικά προβλήματα που προκύπτουν και λαμβάνεται ένα πλήθος αποτελεσμάτων. Βάσει των αποτελεσμάτων επιλέγεται η καλύτερη γεωμετρία από το διαθέσιμο pool μηχανών. Στην παρούσα μελέτη, η ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων γίνεται με κύριο στόχο την εύρεση των βέλτιστων μηχανών όσον αφορά τις συνολικές απώλειες, την απόδοση και την μάζα, καθώς και την μελέτη της επίδρασης των επιλεγμένων γεωμετρικών παραμέτρων στα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης.

Για την παραμετροποιημένη σχεδίαση των μηχανών, αρχικά καθορίζονται οι βασικές παράμετροι που παραμένουν σταθερές σε όλες τις προς σχεδίαση μηχανές. Οι σταθερές παράμετροι που επιλέχθηκαν είναι οι εξής:

Πίνακας 8.1. Σταθερές παράμετροι σχεδίασης μηχανών SiFe 3%

Σταθερές παράμετροι σχεδίασης μηχανών	
Παράμετροι	Τιμές
m	3
lg (mm)	0.7
r_{edge} (mm)	1.5
$ToothTips$ (%)	15
$Tips2Tooth$ (%)	10
$SplitRatio$ (%)	50
$InnerRatio$ (%)	45
$MagnetDC$ (%)	75
$MagnetHeight$ (mm)	6

Οι παράμετροι σάρωσης για τις προς μελέτη γεωμετρίες ορίζονται ως εξής:

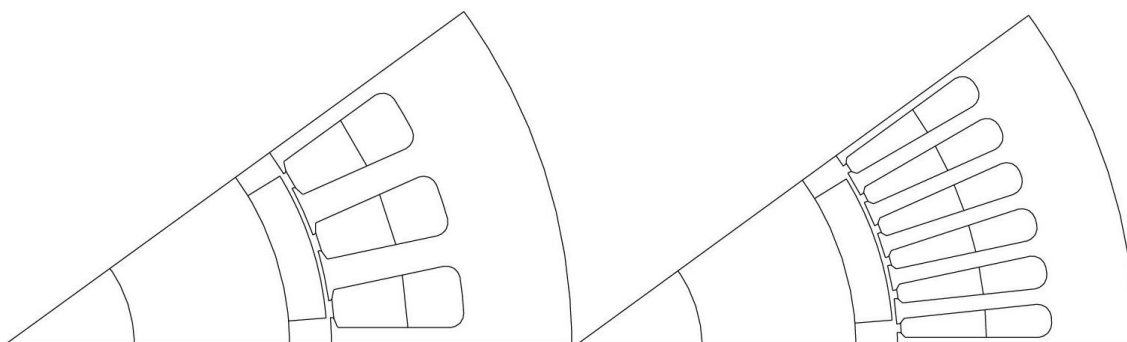
Πίνακας 8.2. Παράμετροι σάρωσης κατά τη σχεδίαση των μηχανών SiFe 3%

Παράμετροι σάρωσης κατά τη σχεδίαση μηχανών	
Παράμετροι	Τιμές
$Poles$	[6 8 10]
$Tooth2SlotPercentage$ (%)	[30 : 5 : 50]
$Yoke2ToothPercentage$ (%)	[200 : 50 : 450]
R_{so} (mm)	[80 : 5 : 95]

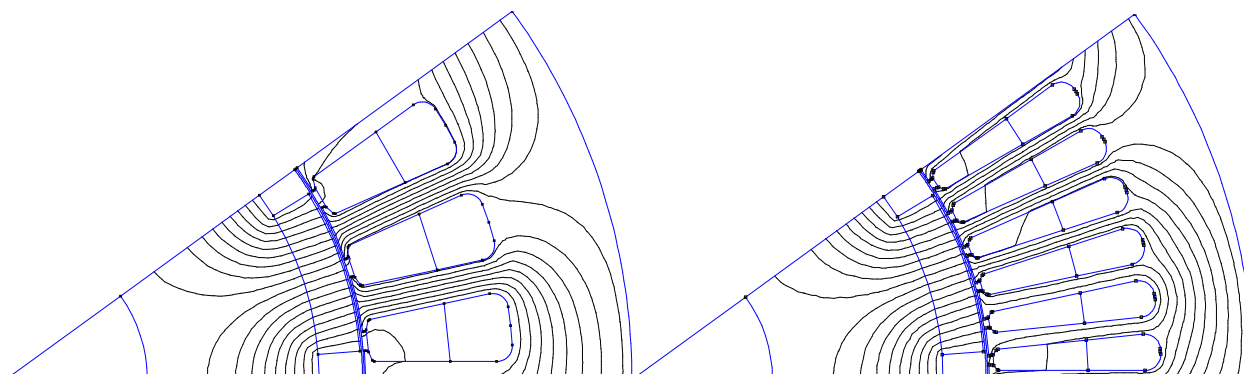
Όσον αφορά τον αριθμό και τη διαμόρφωση των αυλάκων, επιλέγεται η μελέτη των εξής συνδυασμών:

- Για μηχανές με $Poles = 6$, ορίζονται $Spp = 2$, $Layers = 1$ και $Overlap = 0$.
- Για μηχανές με $Poles = 8$ ή 10 , ορίζονται $Spp = 1$, $Layers = 1$ και $Overlap = 0$.

Η παραπάνω επιλογή του αριθμού αυλάκων ανά πόλο και φάση γίνεται σκόπιμα προκειμένου να εξασφαλιστεί παρόμοια μαγνητική φόρτιση σε όλες τις προς μελέτη μηχανές. Πιο συγκεκριμένα, ο αριθμός των αυλάκων στις ανωτέρω διαμορφώσεις που θα εξεταστούν, έχουν μικρή διαφορά μεταξύ τους (24 αύλακες για την 8πολικές, 30 αύλακες για τις 10πολικές και 36 αύλακες για τις 6πολικές) με αποτέλεσμα το πάχος του δοντιού να παραμένει περίπου σταθερό και κατ' επέκταση η μαγνητική ροή που περνάει από κάθε δόντι να είναι περίπου η ίδια. Σε αντίθετη περίπτωση, θα προέκυπταν διαμορφώσεις πολλών αυλάκων με πολύ λεπτά δόντια, με αποτέλεσμα τη μείωση της μαγνητικής ροής που περνάει από κάθε δόντι και τελικά την μείωση της μαγνητικής φόρτισης της μηχανής, όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 8.2. Διαμορφώσεις 10πολικής μηχανής με $s_{rr}=1$ και $s_{rr}=2$ αντίστοιχα



Σχήμα 8.3. Μαγνητική ροή σε 10πολική μηχανή με $S_{rr}=1$ και $S_{rr}=2$ αντίστοιχα. Είναι εμφανής η μείωση των μαγνητικών γραμμών που διέρχονται από κάθε δόντι στη δεύτερη περίπτωση.

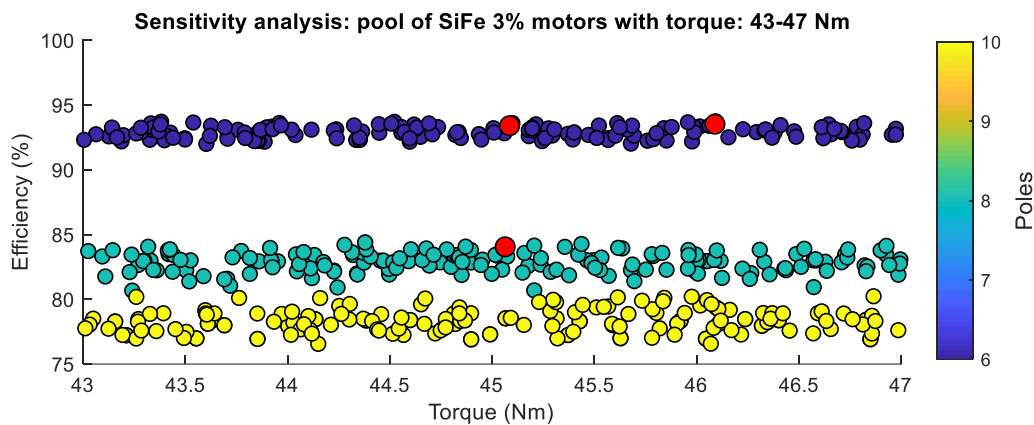
Βάση των ανωτέρω παραμέτρων, θα σχεδιαστούν και θα αναλυθούν 360 μηχανές διαφορετικής διατομής και μοναδιαίου ενεργού μήκους. Ακόμα, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του μήκους της μηχανής στις ανωτέρω διατομές, αναλόγως την εξωτερική ακτίνα στάτη μελετώνται διαφορετικές τιμές ενεργού μήκους μηχανής:

Πίνακας 8.3. Εύρος τιμών ενεργού μήκους κατά τη σχεδίαση των μηχανών SiFe 3%

Εξωτερική ακτίνα στάτη R_{so} (mm)	Ενεργό μήκος L (mm)
80,85	[80 : 5 : 120]
90,95	[60 : 5 : 100]

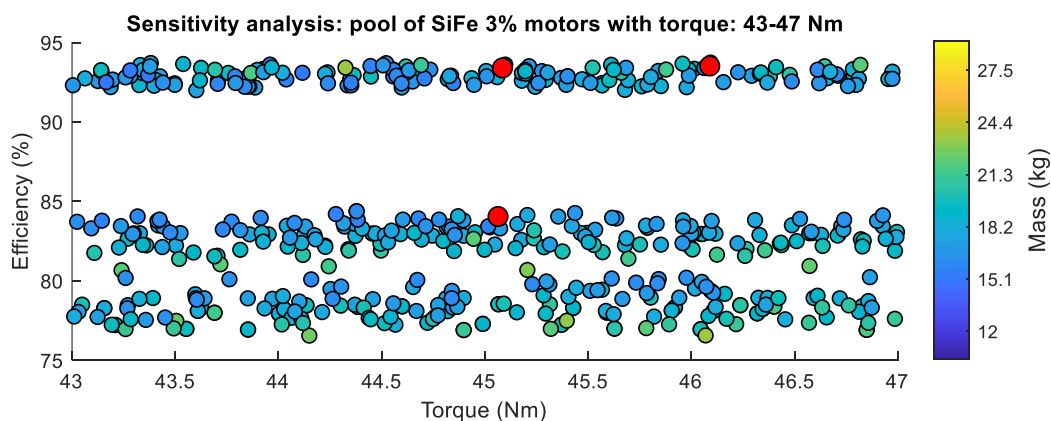
8.2 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για τις 3240 μηχανές που προέκυψαν, ενώ υποδεικνύονται οι επιλεγμένες μηχανές που πληρούν τα κριτήρια ελάχιστων απωλειών, υψηλότερης απόδοσης και μικρότερης μάζας που θα αναπτυχθούν στη συνέχεια.

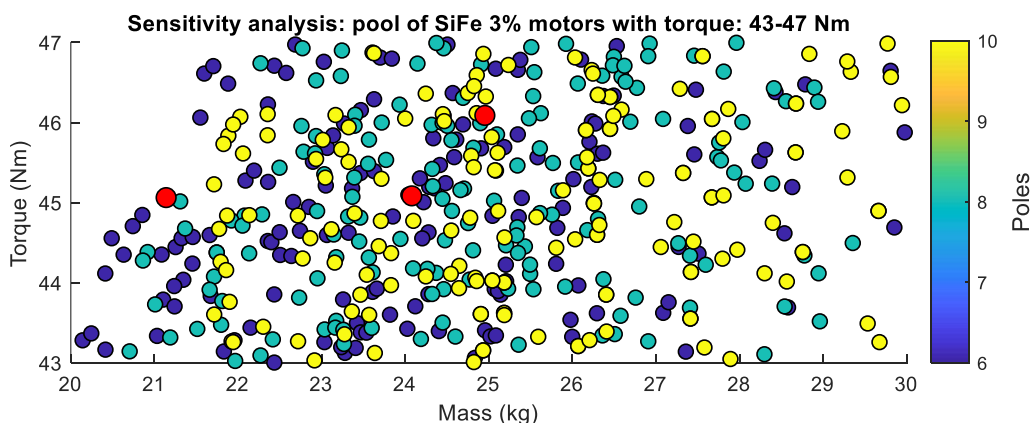


Σχήμα 8.4. Γραφική αναπαράσταση απόδοσης μηχανών που επιτυγχάνουν ροπή 43-47 Nm, συναρτήσει του αριθμού των πόλων. Υποδεικνύονται οι επιλεγμένες μηχανές SiFe 3%.

Παρατηρείται πως οι δπολικές κυριαρχούν όσον αφορά τον βαθμό απόδοσης, γεγονός που οφείλεται όπως θα εξηγηθεί παρακάτω, τόσο στο επιλεγμένο μοντέλο απωλειών, όσο και στην επιλεγμένη υψηλή ταχύτητα (1500 ΣΑΛ) η οποία απαιτεί υψηλότερες συχνότητες τροφοδότησης, με αποτέλεσμα υψηλότερες απώλειες πυρήνα.



Σχήμα 8.5. Γραφική αναπαράσταση απόδοσης μηχανών που επιτυγχάνουν ροπή 43-47 Nm, συναρτήσει της μάζας. Υποδεικνύονται οι επιλεγμένες μηχανές SiFe 3%.



Σχήμα 8.6. Γραφική αναπαράσταση ροπής και μάζας μηχανών που επιτυγχάνουν ροπή 43 – 47 Nm, συναρτήσει του αριθμού των πόλων. Υποδεικνύονται οι επιλεγμένες μηχανές SiFe 3%.

Όσον αφορά την κατανομή των μηχανών ως προς τη μάζα, παρατηρούμε πως οι περισσότερες μηχανές συγκεντρώνονται στα 23 – 26 kg, ενώ η αύξηση του αριθμού των πόλων οδηγεί σε βαρύτερες μηχανές όπως φαίνεται από τη συγκέντρωση των 8πολικών και 10πολικών ελαφρώς δεξιότερα των 6πολικών μηχανών στο Σχήμα 8.6.

Ο βασικός περιορισμός που εφαρμόζεται για την επιλογή των υποψήφιων βέλτιστων μηχανών, είναι η παραγωγή ροπής από 45 Nm έως 47 Nm. Ο περιορισμός αυτός αφορά κυρίως τον αποκλεισμό των υπερδιαστασιοποιημένων (oversized) μηχανών, που παράγουν μεν περισσότερη ροπή, αλλά έχουν περισσότερη μάζα, επομένως μειώνεται ενδεχομένως η πυκνότητα ισχύος τους, ενώ η χρήση περισσότερου υλικού πυρήνα σημαίνει και αντίστοιχη αύξηση του κόστους της μηχανής.

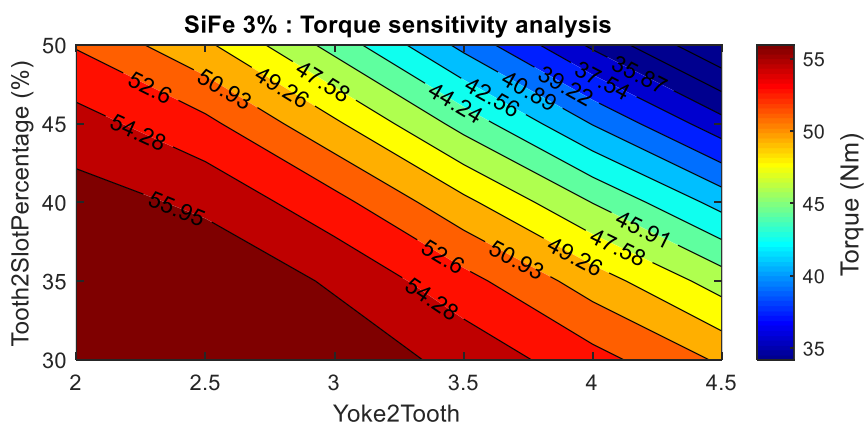
Επιπλέον, για την παραπάνω επιλογή των μηχανών SiFe 3%, ελήφθησαν υπόψη κατασκευαστικοί περιορισμοί, αφού προκειμένου η ανωτέρω μελέτη να έχει υπόσταση, θα πρέπει η προτεινόμενη σχεδίαση να μπορεί να κατασκευαστεί σε δοκίμιο και να μετρηθεί στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών. Πιο συγκεκριμένα, θα πρέπει το άνοιγμα της αύλακος (slot opening) να επιτρέπει την είσοδο των αγωγών εντός της αύλακος κατά την περιέλιξη. Κατά την διαδικασία περιέλιξης, οι αγωγοί τυλίγονται αρχικά σε καλούπια που αντιστοιχούν στο μέγεθος των δοντιών και στη συνέχεια η κάθε συστάδα αγωγών εισάγεται στον πυρήνα του στάτη μέσω του ανοίγματος των αυλάκων, επομένως το άνοιγμα της κάθε αύλακος θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από τη διάμετρο του επιλεγμένου αγωγού (έχει επιλεγθεί αγωγός AWG12 που αντιστοιχεί σε διάμετρο καλωδίου 2.05mm).



Σχήμα 8.7. Περιέλιξη τυλιγμάτων στάτη ασύγχρονης μηχανής. Αριστερά φαίνονται οι συστάδες των αγωγών, ενώ δεξιά φαίνεται ο στάτης με τοποθετημένες τις μονώσεις και ένα μέρος των τυλιγμάτων στις αύλακες.

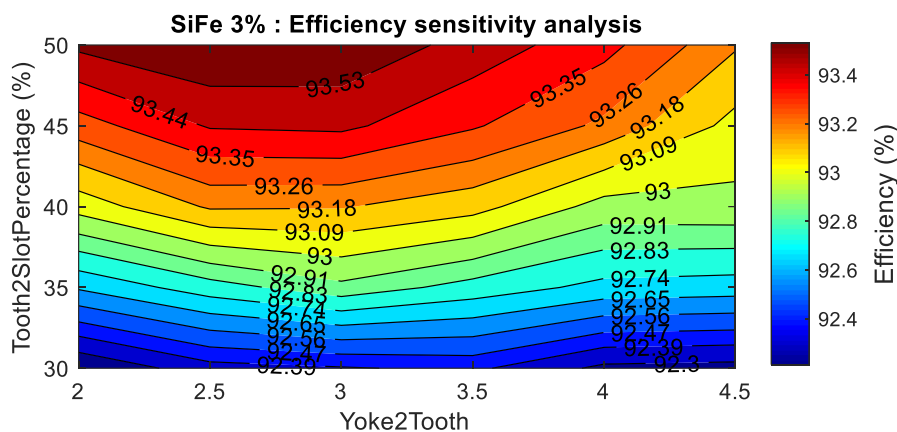
Ακόμα, προκειμένου να περνάει αρκετή μαγνητική ροή σε κάθε δόντι, να διασφαλισθεί η μηχανική αντοχή των λαμαρινών πριν τη συναρμολόγηση του πυρήνα αλλά και προκειμένου να μπορέσει το laser κοπής να δώσει σωστή μορφή στα σχεδιασμένα δόντια του στάτη, θα πρέπει εμπειρικά το δόντι στάτη να έχει πάχος τουλάχιστον 2mm.

Το σύνολο των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από την ανάλυση ευαισθησίας, μπορούν να αναπαρασταθούν σε ισούψειες καμπύλες που ορίζουν επιφάνειες κατάλληλου χρωματικού κώδικα ώστε να γίνει κατανοητή η επίδραση της κάθε παραμέτρου μικρογεωμετρίας του στάτη στα διάφορα μεγέθη επίδοσης και απόδοσης της μηχανής. Στις παρακάτω αναλύσεις ευαισθησίας επιλέγεται να μελετηθεί η επίδραση του πάχους δοντιού και σώματος στάτη (yoke) σε βπολικές μηχανές, σταθερής εξωτερικής ακτίνας στάτη $R_{so} = 95mm$ και σταθερού ενεργού μήκους $L = 90mm$.



Σχήμα 8.8. Παραγόμενη ροπή επιλεγμένης μηχανής SiFe 3% ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού και σώματος στάτη

Όσον αφορά την παραγόμενη ροπή, παρατηρούμε πως μεγιστοποιείται στην περίπτωση που το δόντι του στάτη έχει μειωμένο πάχος, ενώ όσο αυξάνεται το πάχος του δοντιού μειώνεται η παραγόμενη ροπή. Αντίστοιχα, η αύξηση του πάχους του σώματος του στάτη φαίνεται να επηρεάζει αρνητικά τη ροπή μετά από κάποια τιμή του πάχους του δοντιού, ενώ η βέλτιστη παραγόμενη ροπή εμφανίζεται για τα μικρότερα πάχη δοντιού και μέσες τιμές πάχους σώματος και η μικρότερη ροπή παρουσιάζεται σε μηχανές με μεγάλο πλάτος δοντιού και yoke. Αυτό συμβαίνει διότι στην περίπτωση που το δόντι και το yoke καταλαμβάνουν σημαντικό μέρος του συνολικού σώματος στάτη, περιορίζεται το εμβαδό της αύλακος και αντίστοιχα περιορίζεται η ηλεκτρική φόρτιση μέσω των τυλιγμάτων, λόγω της συσχέτισης τους. Ο περιορισμός αυτός μειώνει την αναπτυσσόμενη μαγνητική επαγωγή στο στάτη (μαγνητική φόρτιση) και κατ' επέκταση την παραγόμενη ροπή.

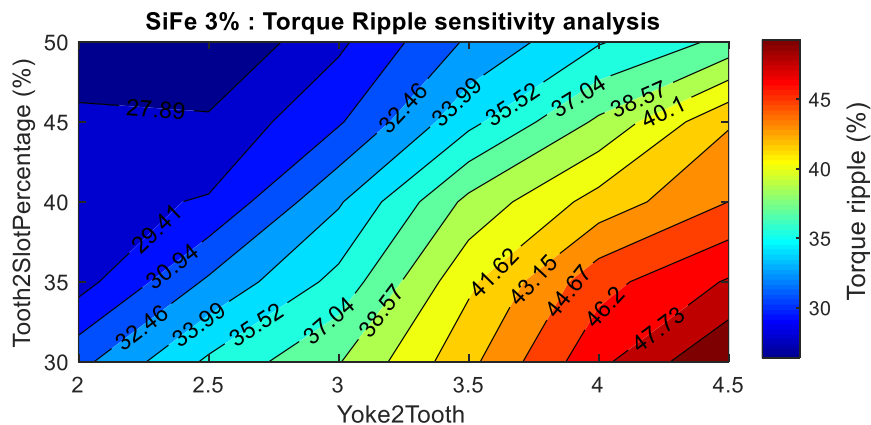


Σχήμα 8.9. Απόδοση επιλεγμένης μηχανής SiFe 3% ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού και σώματος στάτη

Η απόδοση της μηχανής φαίνεται να επηρεάζεται αντίθετα από ότι η ροπή από τις προς εξέταση παραμέτρους. Πιο συγκεκριμένα, η απόδοση μειώνεται σημαντικά με την μείωση του πάχους του δοντιού και του yoke, αφού κάτι τέτοιο επιτρέπει την ύπαρξη μεγαλύτερης αύλακος και άρα μεγαλύτερης ηλεκτρικής φόρτισης κάτι το οποίο επιδεινώνει τις απώλειες χαλκού, από τις οποίες η απόδοση εξαρτάται σημαντικά. Αντίθετα, η απόδοση βελτιστοποιείται με την αύξηση των δυο παραμέτρων, που επιφέρουν μικρότερο αυλάκι και άρα μικρότερες απώλειες χαλκού.

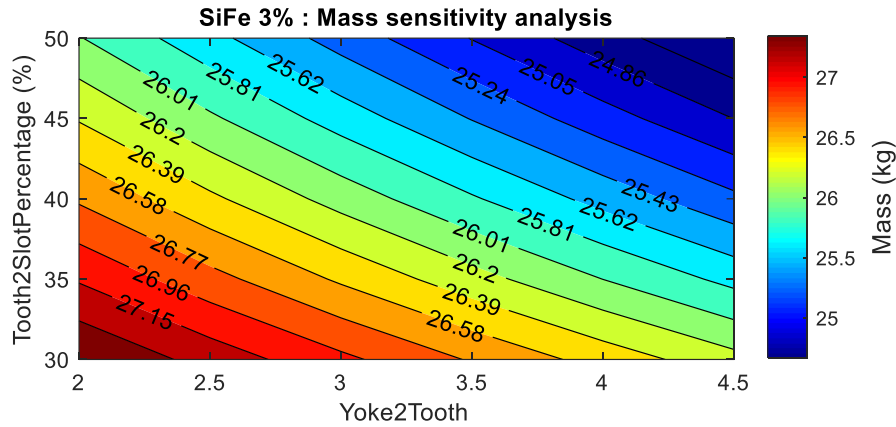
Ήδη από τις δυο πρώτες αναλύσεις παραμέτρων, φαίνεται η αντίστροφη επίδραση των παραμέτρων αυτών στην επίδοση και την απόδοση, το οποίο αποτελεί το κλασικό σχεδιαστικό δίλλημα, αφού οι υψηλότερες φορτίσεις να μην θα επιφέρουν αυξημένη παραγόμενη ροπή (έως ότου το σιδηρομαγνητικό υλικό του πυρήνα μπει στον κορεσμό), θα αυξήσουν όμως δε τις απώλειες.

Παρακάτω μελετάται η επίδραση των γεωμετρικών αυτών παραμέτρων στην κυμάτωση ροπής και στη συνολική μάζα της μηχανής, παράγοντες οι οποίοι είναι επιθυμητό να ελαχιστοποιηθούν.



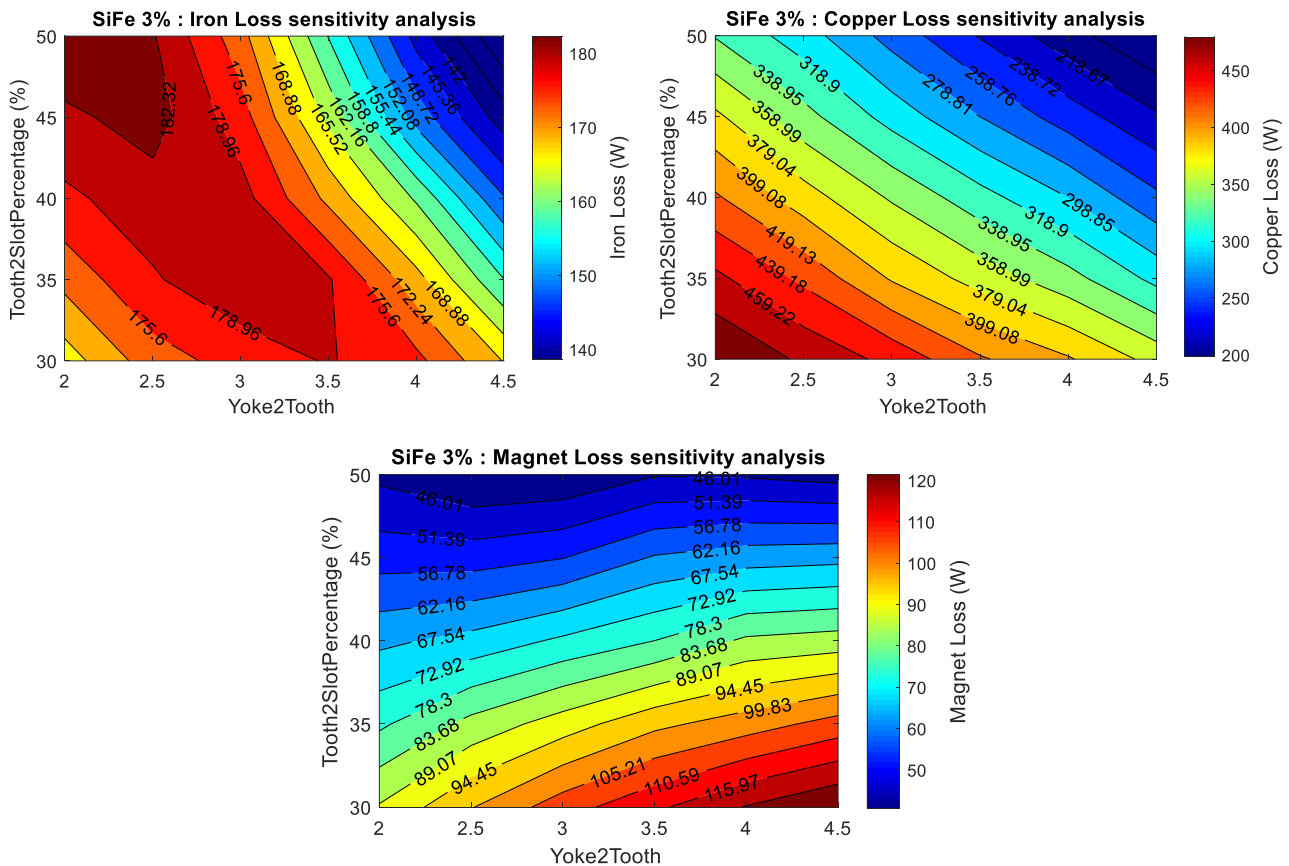
Σχήμα 8.10. Κυμάτωση ροπής επιλεγμένης μηχανής SiFe 3% ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού και σώματος στάτη

Όσον αφορά την κυμάτωση της ροπής, φαίνεται να μειώνεται με την αύξηση του πλάτους του δοντιού, αφού κάτι τέτοιο αυξάνει αντίστοιχα το πλάτος των άκρων των δοντιών και κατ' επέκταση μειώνει το χώρο του αέρα που παρεμβάλλεται μεταξύ δύο διαφορετικών δοντιών. Αυτό αναμενόμενα μειώνει την κυμάτωση της ροπής, αφού ο κύριος λόγος που εμφανίζεται κυμάτωση είναι η εναλλαγή αύλακος – δοντιού που οδηγεί σε μη κυλινδρικό στάτη και κατ' επέκταση στα tooth – slot harmonics που εξηγήθηκαν στην ενότητα 7.4.1. Έτσι όταν το δόντι καλύπτει σχεδόν ολόκληρο slot pitch, οδηγούμαστε σε διαμορφώσεις που φέρνουν σε μηχανές με κλειστά αυλάκια (slotless), οι οποίες εμφανίζουν σχεδόν μηδενική κυμάτωση ροπής [90].



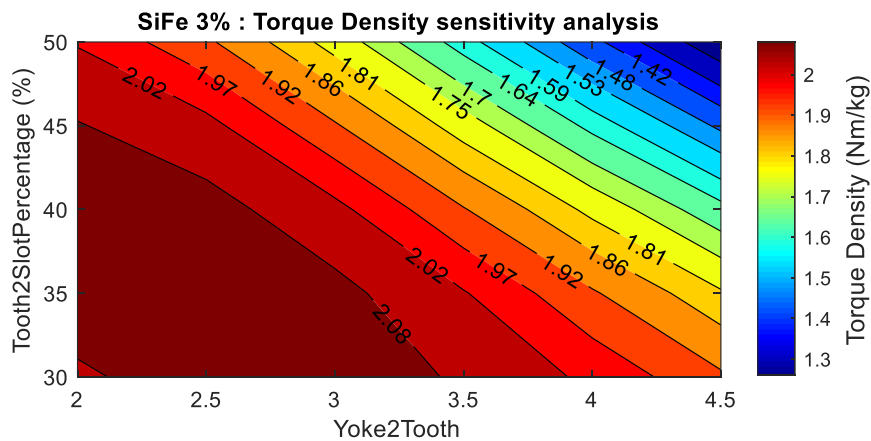
Σχήμα 8.11. Συνολική μάζα επιλεγμένης μηχανής SiFe 3% ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού και σώματος στάτη

Όσον αφορά την μάζα της μηχανής, φαίνεται πως η αύξηση του πάχους του δοντιού και του yoke του στάτη επιφέρει μείωση της συνολικής μάζας, αφού με αυτό τον τρόπο μειώνεται το εμβαδό της αύλακος και άρα ο όγκος των τυλιγμάτων, με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά η συνολική μάζας της μηχανής, αφού η πυκνότητα του χαλκού είναι πολύ υψηλότερη από αυτή του συμβατικού ατσαλιού.



Σχήμα 8.12. Απώλειες επιλεγμένης μηχανής SiFe 3% ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού και σώματος στάτη

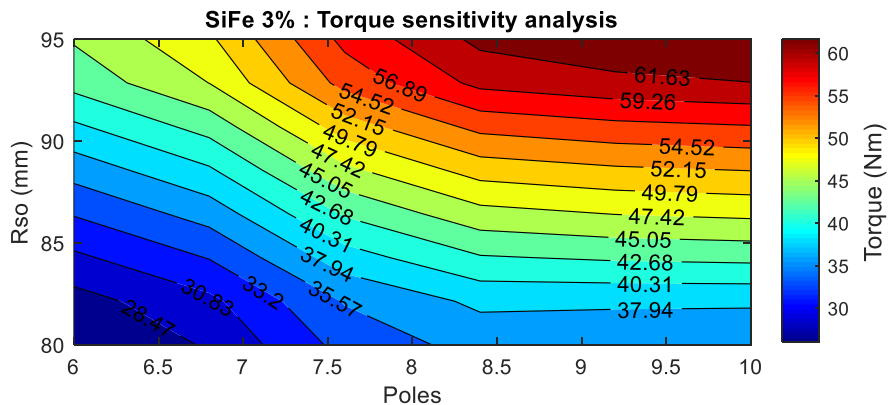
Οι απώλειες της μηχανής φαίνεται να έχουν δυσανάλογη μεταβολή ως προς το πλάτος δοντιού και σώματος στάτη. Πιο συγκεκριμένα, οι απώλειες πυρήνα ελαχιστοποιούνται όσο αυξάνεται ο όγκος σιδήρου της μηχανής, ενώ μεγιστοποιούνται με την μείωση του πάχους του yoke. Αυτό συμβαίνει καθώς όσο μικραίνει το πάχος σιδήρου (είτε του δοντιού είτε του σώματος στάτη), τόσο μεγαλώνει ο κορεσμός της μαγνητικής επαγωγής αφού εμφανίζεται ο «στραγγαλισμός» των γραμμών μαγνητικής ροής στο λεπτό πάχος του μαγνητικά αγωγίμου υλικού. Η αύξηση της μαγνητικής επαγωγής σε σημεία του στάτη έχει ως αποτέλεσμα την ακόμα μεγαλύτερη αύξηση των απωλειών πυρήνα, ανάλογη του B^2 , όπως γίνεται αντιληπτό από την εξίσωση (7.3). Όσον αφορά τις απώλειες χαλκού, η ελαχιστοποίηση του όγκου του σιδήρου μέσω λεπτών δοντιών και λεπτού σώματος στάτη, επιτρέπει την αύξηση του εμβαδού καθώς και του όγκου των τυλιγμάτων, με άμεση συνέπεια την αύξηση των απωλειών χαλκού. Έτσι διαμορφώσεις με σημαντικό πάχος δοντιού και σώματος στάτη, όπως αυτή της επιλεγμένης μηχανής, επωφελούνται από χαμηλότερες απώλειες χαλκού, αν και όπως είναι αντιληπτό, ο περιορισμός του εμβαδού του χαλκού, περιορίζει την ηλεκτρική φόρτιση και κατ' επέκταση την μαγνητική φόρτιση και την ικανότητα παραγωγής ροπής της μηχανής.



Σχήμα 8.13. Πυκνότητα ροπής επιλεγμένης μηχανής SiFe 3% ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού και σώματος στάτη

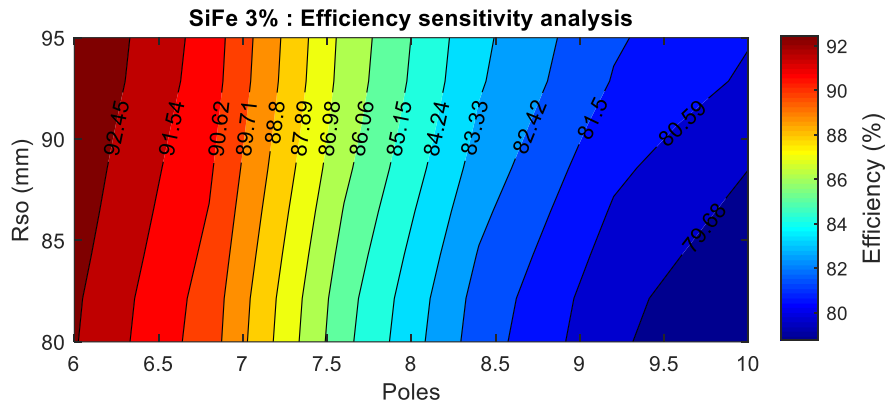
Τέλος, όσον αφορά την πυκνότητα ροπής της μηχανής, ακολουθεί την σχέση της ροπής με τις γεωμετρικές παραμέτρους δοντιού και σώματος στάτη. Όπως ήταν αναμενόμενο, στα σημεία που η παραγόμενη ροπή μεγιστοποιείται, εμφανίζει μέγιστα και η πυκνότητα ροπής, ενώ η ελαχιστοποίηση της μάζας με γεωμετρικές με περισσότερο όγκο σιδήρου (παχύ δόντι και σώμα) δεν φαίνεται να επηρεάζει θετικά την πυκνότητα ροπής.

Στη συνέχεια, κρίνεται σκόπιμο να μελετηθεί η επίδραση της εξωτερικής ακτίνας στάτη R_{so} καθώς και του αριθμού των πόλων της μηχανής στα μεγέθη επίδοσης και απόδοσης της μηχανής. Για τον σκοπό αυτό, τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας στάτη που πριν μεταβάλλονταν, τώρα παραμένουν σταθερά ως $Yoke2Tooth = 3.5$ και $Tooth2Slot = 45\%$.



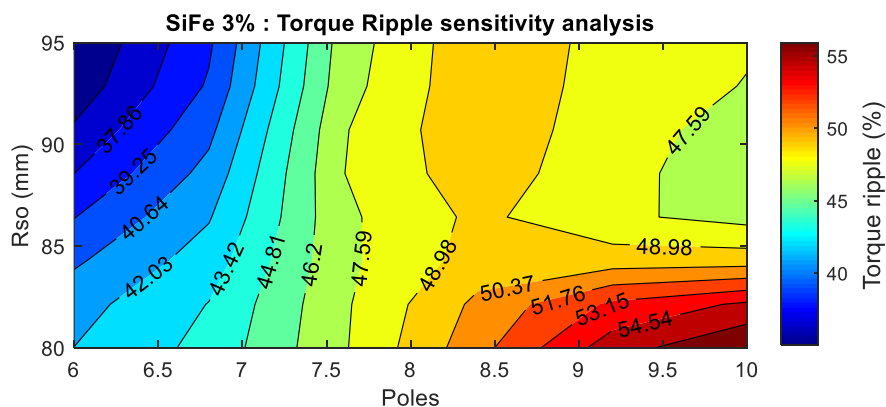
Σχήμα 8.14. Παραγόμενη ροπή μηχανής SiFe 3% ως συνάρτηση της εξωτερικής ακτίνας στάτη και του αριθμού των πόλων, για τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά μικρογεωμετρίας

Όσον αφορά την παραγόμενη ροπή της μηχανής, η αύξηση της ακτίνας στάτη αυξάνει κατά αντιστοιχία την διάμετρο διακένου και κατ' επέκταση της παραγόμενη ροπή, όπως γίνεται αντιληπτό από την εξίσωση (6.16), ενώ όπως ήταν αναμενόμενο, η αύξηση του αριθμού των πόλων επιφέρει μεγαλύτερη ικανότητα ροπής στην μηχανή [91].



Σχήμα 8.15. Απόδοση μηχανής SiFe 3% ως συνάρτηση της εξωτερικής ακτίνας στάτη και του αριθμού των πόλων, για τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά μικρογεωμετρίας

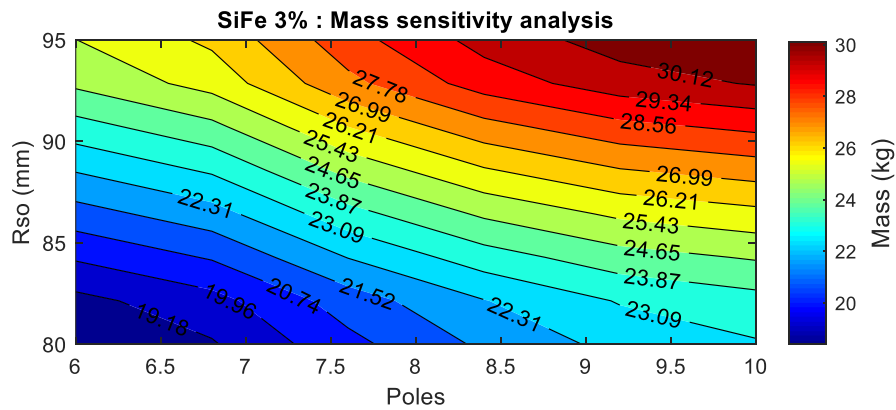
Η απόδοση της μηχανής φαίνεται πως μεταβάλλεται έντονα κυρίως με την αύξηση των πόλων, ενώ λιγότερη φαίνεται να την επηρεάζει η αύξηση της ακτίνας στάτη, κυρίως λόγω της αντίστοιχης αύξησης της παραγόμενης ροπής. Η μεγάλη μείωση της απόδοσης που επέρχεται με την αύξηση των πόλων οφείλεται κυρίως στην αντίστοιχη αύξηση της συχνότητας που απαιτείται για την επίτευξη της ταχύτητας των 1500 ΣΑΛ. Πιο συγκεκριμένα, διατηρώντας τον λόγο $\frac{P}{f} = 0.08$ σταθερό, απαιτείται τροφοδότηση ρευμάτων συχνότητας 75Hz για την 6πολική, 100Hz για την 8πολική και 125Hz για την 10πολική, επομένως βάση των εξισώσεων (7.9) και (7.10), γίνεται αντιληπτή η σημαντική αύξηση των απωλειών πυρήνα με την αύξηση της συχνότητας, κυρίως λόγω των ανώτερων αρμονικών. Πρέπει να αναφερθεί φυσικά πως παρά την αποδοχή του μοντέλου απωλειών πυρήνα που επιλέχθηκε και υλοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, τόσο από την έρευνα όσο και από τη βιομηχανία, το μεγαλύτερο μειονέκτημα είναι πως προσεγγίζει γραμμικά την επίδραση των ανώτερων αρμονικών, ενώ στην πραγματικότητα τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα δεν είναι γραμμικά. Έτσι μέσω του μοντέλου αυτού ίσως να οδηγούμαστε σε υπερεκτίμηση των απωλειών πυρήνα και κατ' επέκταση σε υποεκτίμηση του βαθμού απόδοσης της μηχανής, όταν πρόκειται για μεγάλο αριθμό πόλων σε υψηλές ταχύτητες.



Σχήμα 8.16. Κυμάτωση ροπής μηχανής SiFe 3% ως συνάρτηση της εξωτερικής ακτίνας στάτη και του αριθμού των πόλων, για τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά μικρογεωμετρίας

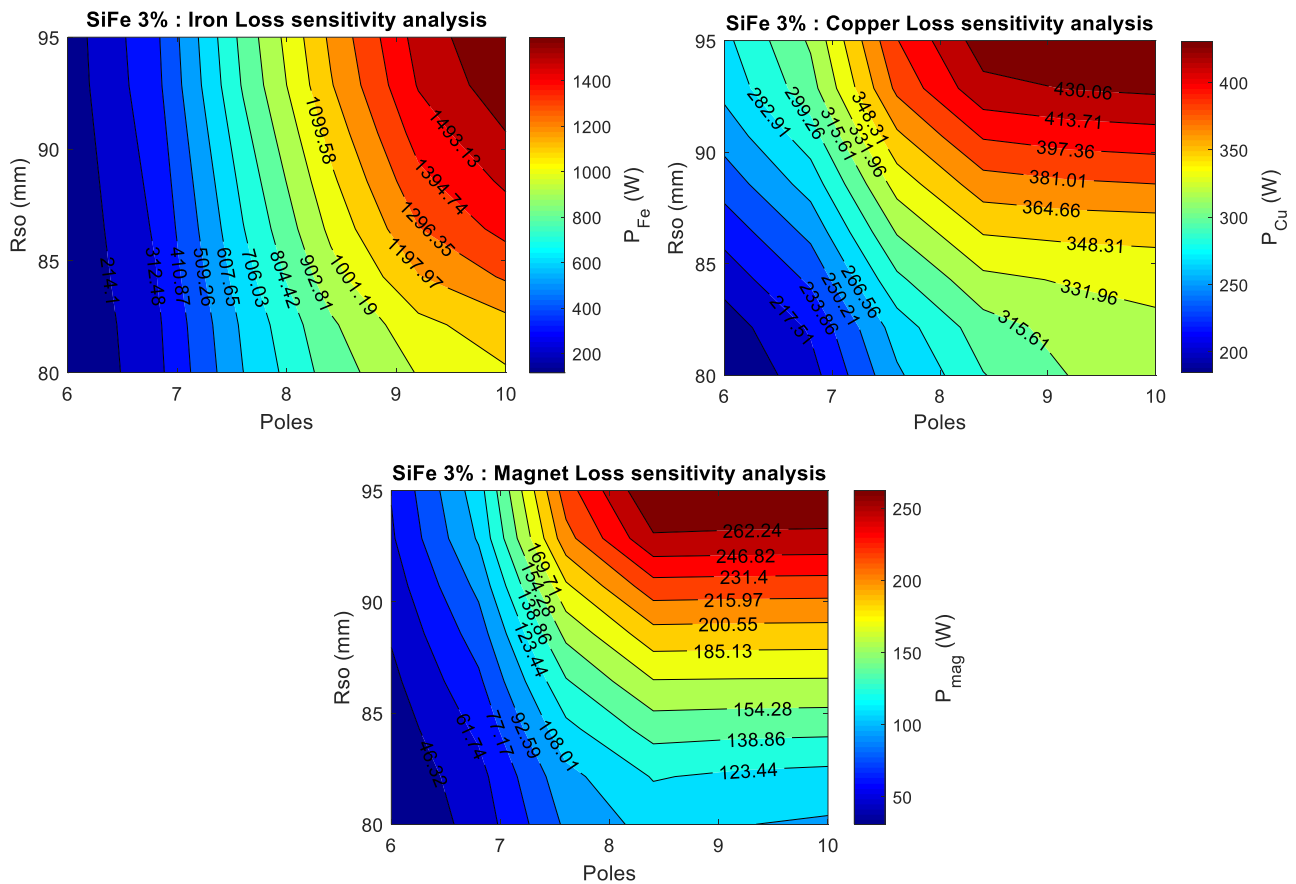
Όσον αφορά την κυμάτωση της ροπής, παρατηρείται έντονη αύξηση με την αύξηση του αριθμού των πόλων και ελαφριά μείωση με την αύξηση της ακτίνας. Όσον αφορά την αύξηση των πόλων αυτό μπορεί να εξηγηθεί βάση του μεταβαλλόμενου αριθμού αυλάκων ανά πόλο και φάση, παράγοντας ο οποίος επηρεάζει την

κυμάτωση ροπής [92]. Πιο συγκεκριμένα, για τις βπολικές μηχανές έχει επιλεγεί $spr = 2$ με αποτέλεσμα την διαμόρφωση 36 αυλάκων, ενώ στις βπολικές και 10πολικές μηχανές έχει επιλεγεί $spr = 1$, οδηγώντας σε διαμορφώσεις λιγότερων αυλάκων. Ο μεγαλύτερος αριθμός αυλάκων έχει ως αποτέλεσμα την «ομαλοποίηση» της ΜΕΔ διακένου, με αποτέλεσμα την μείωση της κυμάτωσης ροπής.



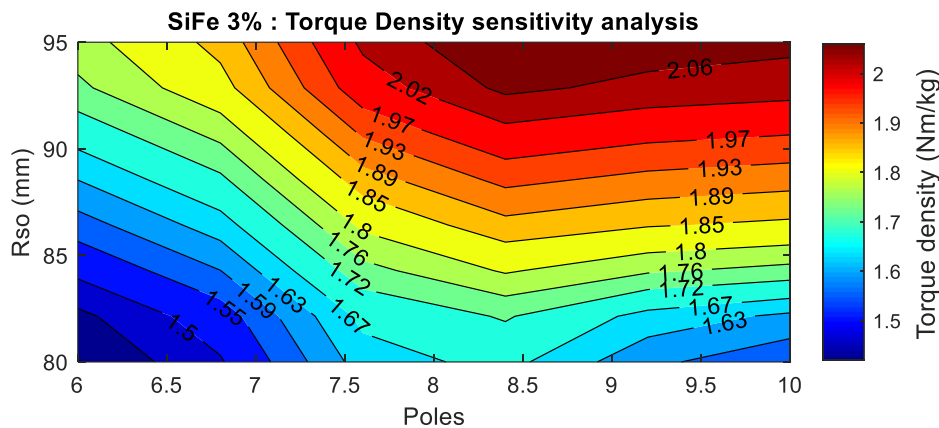
Σχήμα 8.17. Συνολική μάζα μηχανής SiFe 3% ως συνάρτηση της εξωτερικής ακτίνας στάτη και του αριθμού των πόλων, για τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά μικρογεωμετρίας

Όσον αφορά την μάζα της μηχανής, παρατηρείται ανάλογη σχέση τόσο με τον αριθμό των πόλων όσο και με την ακτίνα στάτη. Η αύξηση της ακτίνας στάτη αυξάνει τον όγκο της μηχανής και κατ' επέκταση την μάζα, ενώ η αύξηση του αριθμού των πόλων φαίνεται να αυξάνει την μάζας της μηχανής όπως προκύπτει και στο [93].



Σχήμα 8.18. Απώλειες μηχανής SiFe 3% ως συνάρτηση της εξωτερικής ακτίνας στάτη και του αριθμού των πόλων, για τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά μικρογεωμετρίας

Όπως εξηγήθηκε παραπάνω, η αύξηση των πόλων επιφέρει σημαντική αύξηση των απωλειών πυρήνα, ενώ η αύξηση της ακτίνας και του αριθμού των πόλων επιφέρει επίσης αύξηση των απωλειών χαλκού και μαγνητών. Όσον αφορά τις απώλειες χαλκού, η αύξηση των απωλειών με την αύξηση της ακτίνας είναι αναμενομένη λόγω της αντίστοιχης αύξησης του εμβαδού των αυλάκων και κατ' επέκταση του όγκου των τυλιγμάτων της μηχανής. Οι απώλειες μαγνητών όπως είδαμε στην υποενότητα 7.4.3 εξαρτώνται από την θεμελιώδη συχνότητα των αρμονικών συνιστωσών του ρεύματος τροφοδότησης, επομένως η αύξηση του αριθμού των πόλων αυξάνει την απαιτούμενη συχνότητα και κατ' επέκταση τις απώλειες στους μαγνήτες με τη μορφή δινορρευμάτων.



Σχήμα 8.19. Πυκνότητα ροπής ως συνάρτηση της εξωτερικής ακτίνας στάτη και του αριθμού των πόλων, για τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά μικρογεωμετρίας

Τέλος, όσον αφορά την πυκνότητα ροπής, ακολουθεί όπως πριν τις μεταβολές της παραγόμενης ροπής, χωρίς να επηρεάζεται έντονα από τις τάσεις ελαχιστοποίησης της μάζας.

Μετά την κατανόηση των μοτίβων σχεδίασης και επιλογής παραμέτρων, βάση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης ευαισθησίας, σειρά έχει η επιλογή των βέλτιστων μηχανών βάσει ενός επιπλέον κριτηρίου (εκτός της παραγόμενης ροπής) κάθε φορά, όπως αυτό παρουσιάζεται στις επόμενες ενότητες. Με αυτό τον τρόπο η επιλογή της βέλτιστης μηχανής γίνεται με αντικειμενικό τρόπο, αφού πολλές φορές η βελτιστοποίηση των παραμέτρων απόδοσης, μάζας και απωλειών, οδηγούν σε τελείως διαφορετικές διαμορφώσεις μηχανών ανάλογα με το βάρος της κάθε παραμέτρου στην εκάστοτε εφαρμογή.

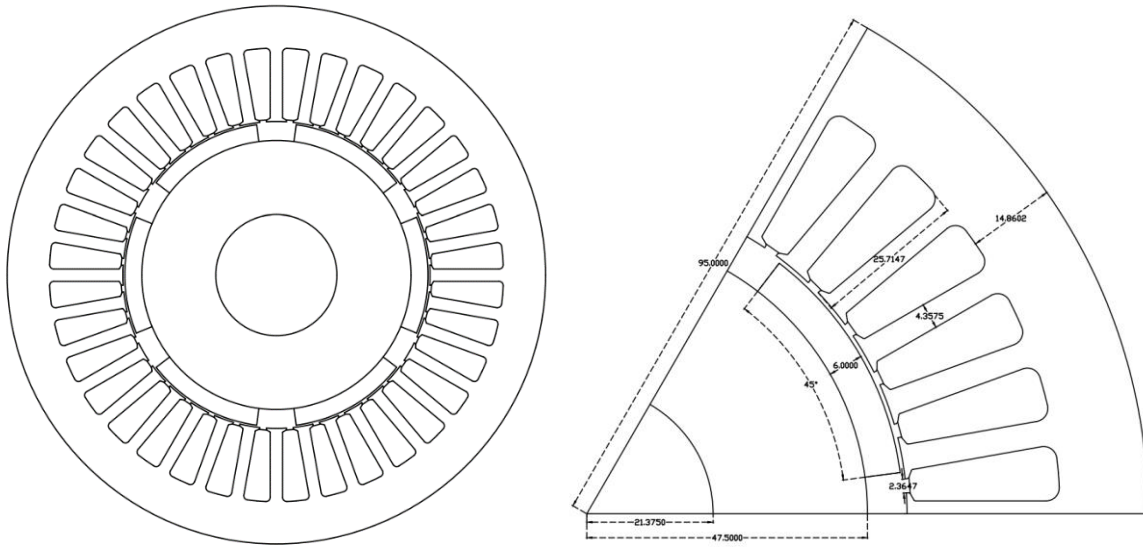
8.2.1 Μηχανή SiFe 3% με τις ελάχιστες συνολικές απώλειες

Η μηχανή SiFe 3% με τις ελάχιστες συνολικές απώλειες, προκύπτει για τις παρακάτω τιμές των μεταβλητών σχεδίασης.

Πίνακας 8.4. Τιμές μεταβλητών παραμέτρων της μηχανής SiFe 3% με τις ελάχιστες συνολικές απώλειες

Χαρακτηριστικά μηχανής SiFe 3% ελάχιστων συνολικών απωλειών	
Παράμετροι	Τιμές
<i>Poles</i>	6
<i>R_{so} (mm)</i>	95
<i>L (mm)</i>	90
<i>Yoke2Tooth</i>	3.5
<i>Tooth2SlotPercentage (%)</i>	45

Στη συνέχεια παρατίθεται ενδεικτικά η διατομή και οι διαστάσεις για την πλήρη γεωμετρία, καθώς και για τη διαμόρφωση ενός πόλου.



Σχήμα 8.20. Διατομή και διαστάσεις επιλεγμένης μηχανής

Όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 5.4, θα πρέπει να γίνει έλεγχος τήρησης των ορίων για φυσική ψύξη της μηχανής βάσει του γινομένου $A \cdot J$. Πιο συγκεκριμένα για την επιλεγμένη μηχανή θα έχουμε:

$$A \cdot J = \frac{J^2 \cdot A_{cu}}{\tau_u} = \frac{4^2 \cdot (10^6)^2 \cdot 0.5 \cdot 184.1 \cdot 10^{-6}}{\frac{\pi \cdot 0.1077}{36}} = 15.67 \cdot 10^{10} \text{ A}^2/\text{m}^3 \quad (8.1)$$

Το γινόμενο $A \cdot J = 15.67 \cdot 10^{10} \text{ A}^2/\text{m}^3$ είναι μικρότερο του ανώτατου ορίου ψύξης που υπολογίστηκε στη σχέση (5.8), επομένως η μηχανή λειτουργεί καλά σε κατάσταση μέγιστης ροπής, υποθέτοντας φυσική ψύξη. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την πεδιακή ανάλυση της ανωτέρω μηχανής.

Πίνακας 8.5. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης της μηχανής SiFe 3% με τις ελάχιστες συνολικές απώλειες

Αποτελέσματα μηχανής SiFe 3% ελάχιστων συνολικών απωλειών	
Παράμετροι	Τιμές
Απόδοση η (%)	93.36
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	45.29
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	35.08
Επίδοση P_{out} (kW)	7.11
Μάζα (kg)	25.42
Απώλειες σιδήρου (W)	164.56
Απώλειες χαλκού (W)	278.68
Απώλειες μαγνητών (W)	62.67
Σύνολο απωλειών (W)	505.98

8.2.2 Μηχανή SiFe 3% με την υψηλότερη απόδοση

Η μηχανή SiFe 3% με την υψηλότερη απόδοση, προκύπτει για τις παρακάτω τιμές των μεταβλητών σχεδίασης. Όπως εύκολα γίνεται αντιληπτό, πρόκειται για την ίδια σχεδόν διατομή με την μηχανή της ενότητας 8.2.1 , με λεπτότερο yoke.

Πίνακας 8.6. Τιμές μεταβλητών παραμέτρων της μηχανής SiFe 3% με την υψηλότερη απόδοση

Χαρακτηριστικά μηχανής SiFe 3% υψηλότερης απόδοσης	
Παράμετροι	Τιμές
<i>Poles</i>	6
<i>R_{So} (mm)</i>	95
<i>L (mm)</i>	85
<i>Yoke2Tooth</i>	3
<i>Tooth2SlotPercentage (%)</i>	45

Όσον αφορά τις απαιτήσεις ψύξης της επιλεγμένης μηχανής θα έχουμε:

$$A \cdot J = \frac{J^2 \cdot A_{cu}}{\tau_u} = \frac{4^2 \cdot (10^6)^2 \cdot 0.5 \cdot 204.4 \cdot 10^{-6}}{\frac{\pi \cdot 0.1077}{36}} = 17.40 \cdot 10^{10} \text{ A}^2/\text{m}^3 \quad (8.2)$$

Το γινόμενο $A \cdot J = 17.40 \cdot 10^{10} \text{ A}^2/\text{m}^3$ είναι μικρότερο του ανώτατου ορίου ψύξης που υπολογίστηκε στη σχέση (5.8), επομένως η μηχανή λειτουργεί καλά σε κατάσταση μέγιστης ροπής, υποθέτοντας φυσική ψύξη. Λόγω του λεπτότερου yoke αυξάνεται το εμβαδό των αυλάκων και κατ' επέκταση το εμβαδό των αγωγών, επομένως αυξάνεται η ηλεκτρική φόρτιση και κατ' αντιστοιχία αυξάνονται οι απαιτήσεις ψύξης. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την πεδιακή ανάλυση της ανωτέρω μηχανής.

Πίνακας 8.7. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης της μηχανής SiFe 3% με την υψηλότερη απόδοση

Αποτελέσματα μηχανής SiFe 3% υψηλότερης απόδοσης	
Παράμετροι	Τιμές
Απόδοση η (%)	93.44
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	46.81
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	30.76
Επίδοση P_{out} (kW)	7.35
Μάζα (kg)	24.35
Απώλειες σιδήρου (W)	167.31
Απώλειες χαλκού (W)	295.80
Απώλειες μαγνητών (W)	53.47
Σύνολο απωλειών (W)	516.21

Όσον αφορά τα παραπάνω αποτελέσματα σε σχέση τα αντίστοιχα της μηχανής με τις ελάχιστες απώλειες (βλ.

Πίνακας 8.5), παρατηρούνται ελαφρώς αυξημένες συνολικές απώλειες και ιδιαίτερα απώλειες χαλκού, παρά το μικρότερο ενεργό μήκος, λόγω του μεγαλύτερου εμβαδού αυλάκων. Παρόλα αυτά, λόγω της μεγαλύτερης ηλεκτρικής φόρτισης, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ικανότητα παραγωγής ροπής και κατ' επέκταση μεγαλύτερη ισχύς εξόδου και υψηλότερος βαθμός απόδοσης.

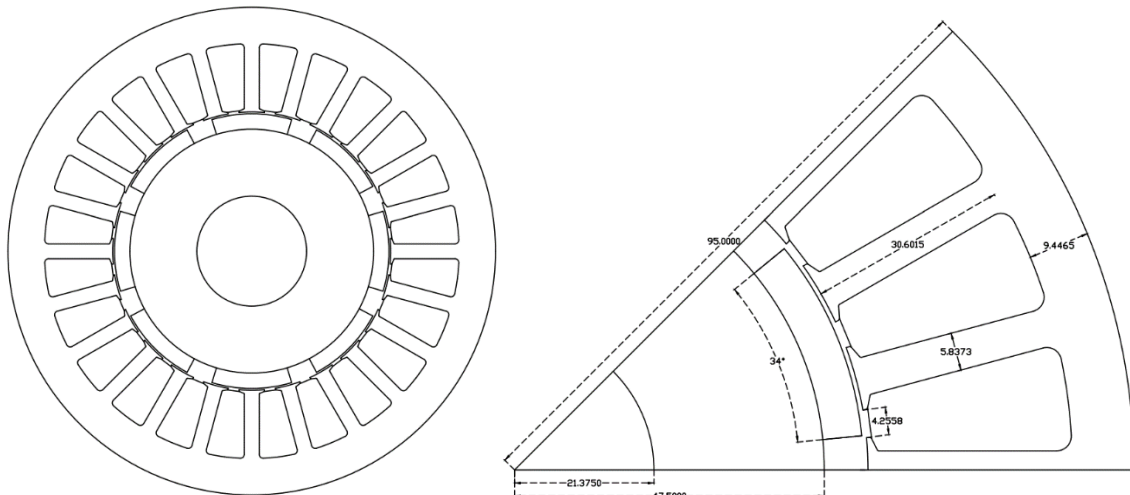
8.2.3 Μηχανή SiFe 3% με την ελάχιστη μάζα

Η μηχανή SiFe 3% με την μικρότερη μάζα, προκύπτει για τις παρακάτω τιμές των μεταβλητών σχεδίασης. Λόγω της 8πολικής διαμόρφωσης, η μηχανή έχει μεγαλύτερη ικανότητα παραγωγής ροπής, επομένως η επιθυμητή μέγιστη ροπή 45 Nm επιτυγχάνεται για μικρό ενεργό μήκος, οδηγώντας σε δισκοειδή διαμόρφωση μηχανής, όπως αυτή του κινητήρα του οχήματος «Πυρφόρου» της ερευνητικής ομάδας «Προμηθεάς» του ΕΜΠ [8].

Πίνακας 8.8. Τιμές μεταβλητών παραμέτρων της μηχανής SiFe 3% με την ελάχιστη μάζα

Χαρακτηριστικά μηχανής SiFe 3% ελάχιστης μάζας	
Παράμετροι	Τιμές
<i>Poles</i>	8
<i>R_{so}</i> (mm)	95
<i>L</i> (mm)	65
<i>Yoke2Tooth</i>	2.5
<i>Tooth2SlotPercentage</i> (%)	40

Στη συνέχεια παρατίθεται ενδεικτικά η διατομή και οι διαστάσεις για την πλήρη γεωμετρία, καθώς και για τη διαμόρφωση ενός πόλου.



Σχήμα 8.21. Διατομή και διαστάσεις επιλεγμένης μηχανής

Όσον αφορά τις απαιτήσεις ψύξης της επιλεγμένης μηχανής θα έχουμε:

$$A \cdot J = \frac{J^2 \cdot A_{cu}}{\tau_u} = \frac{4^2 \cdot (10^6)^2 \cdot 0.5 \cdot 379.58 \cdot 10^{-6}}{\frac{\pi \cdot 0.1077}{24}} = 21.54 \cdot 10^{10} \text{ A}^2/\text{m}^3 \quad (8.3)$$

Το γινόμενο $A \cdot J = 21.54 \cdot 10^{10} A^2/m^3$ είναι μικρότερο του ανώτατου ορίου ψύξης που υπολογίστηκε στη σχέση (5.8), επομένως η μηχανή λειτουργεί καλά σε κατάσταση μέγιστης ροπής, υποθέτοντας φυσική ψύξη. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την πεδιακή ανάλυση της ανωτέρω μηχανής.

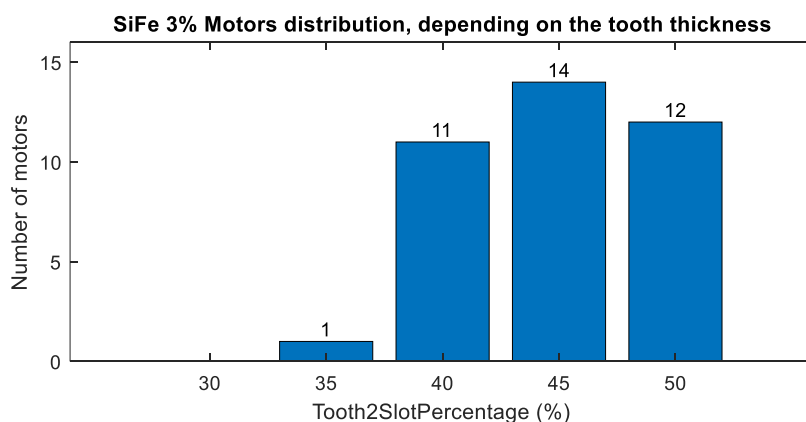
Πίνακας 8.9. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης της μηχανής SiFe 3% με την ελάχιστη μάζα

Αποτελέσματα μηχανής SiFe 3% ελάχιστης μάζας	
Παράμετροι	Τιμές
Απόδοση η (%)	84.10
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	45.30
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	52.63
Επίδοση P_{out} (kW)	7.12
Μάζα (kg)	21.90
Απώλειες σιδήρου (W)	752.75
Απώλειες χαλκού (W)	364.24
Απώλειες μαγνητών (W)	228.67
Σύνολο απωλειών (W)	1345.30

Παρατηρούμε πως η 8πολική διαμόρφωση οδηγεί τελικά σε περίπου 12% μείωση της μάζας σε σχέση με τις προηγούμενες διαμορφώσεις, αυξάνει όμως κατά 1.64 φορές τις συνολικές απώλειες, κυρίως λόγω των πολύ μεγαλύτερων απωλειών πυρήνα που προκύπτουν από την αύξηση της συχνότητας για την επίτευξη των 1500 ΣΑΔ.

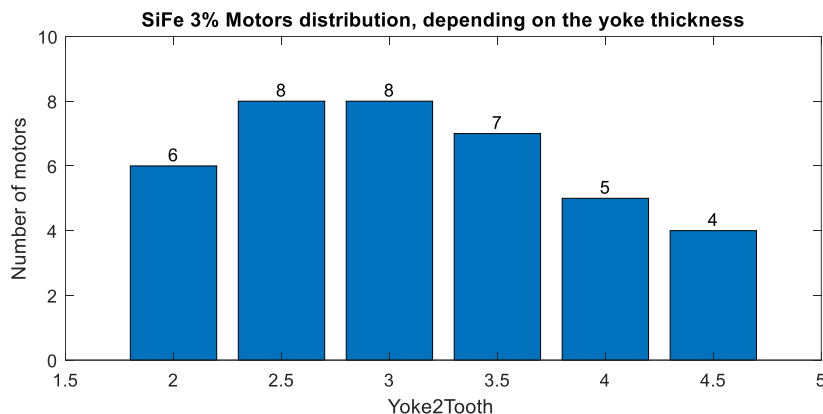
8.3 Τάση σχεδίασης μηχανών SiFe 3%

Μετά την επιλογή των βέλτιστων μηχανών βάση κάθε κριτηρίου, μελετήθηκε η κατανομή των μηχανών με επίδοση 45 – 47 Nm και απόδοση άνω του 93%, προκειμένου να γίνει αντιληπτή η τάση (trend) σχεδίασης σχετικά με το πάχος δοντιών και σώματος στάτη. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής παρατίθενται σε ιστογράμματα παρακάτω.



Σχήμα 8.22. Κατανομή μηχανών SiFe 3% που παράγουν ροπή 45Nm – 47Nm και έχουν απόδοση > 93%, ανάλογα με το πάχος του δοντιού στάτη

Όσον αφορά τα δόντια του στάτη, παρατηρείται πως η κατανομή των μηχανών που επιτυγχάνουν τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης, συγκεντρώνονται σε παχύτερα δόντια και συγκεκριμένα μεταξύ 40 και 50% του συνολικού μεγέθους άυλακος και δοντιού, με την ιδανική επιλογή να είναι το 45%, όπως προκύπτει και για τη μηχανή υψηλότερης απόδοσης.



Σχήμα 8.23. Κατανομή μηχανών SiFe 3% που παράγουν ροπή 45Nm – 47Nm και έχουν απόδοση > 93%, ανάλογα με το πάχος του σώματος στάτη

Όσον αφορά το πάχος του yoke, παρατηρείται πως η κατανομή των μηχανών που επιτυγχάνουν τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης, συγκεντρώνονται σε τιμές 2.5-3.5 φορές του πάχους του δοντιού.

8.4 Ανάλυση μηχανών αναφοράς για τα μη συμβατικά ατσάλια

Όπως προαναφέρθηκε, η παραπάνω μελέτη αφορά την εύρεση της βέλτιστης μηχανής με πυρήνα SiFe 3% και συγκεκριμένα με λαμαρίνα NO20 1200. Όσον αφορά λοιπόν την εύρεση των βέλτιστων μηχανών για τα υπόλοιπα προς μελέτη υλικά, κρίνεται σκόπιμο να δημιουργηθεί αρχικά μια βάση μηχανών αναφοράς (reference machines), προκειμένου να υπάρχει μέτρο σύγκρισης των αποτελεσμάτων των βέλτιστων μηχανών που θα προκύψουν αργότερα. Οι reference μηχανές για κάθε υλικό προκύπτουν ως εξής:

- Αρχικά επιλέγεται η διατομή των βέλτιστων μηχανών συμβατικού ατσαλιού που αναλύθηκαν παραπάνω και εισάγονται στο FEMM, αλλάζοντας το υλικό πυρήνα στο επιθυμητό κάθε φορά.
- Η γεωμετρία επιλύεται ανά μονάδα μήκους και εξάγονται τα αποτελέσματα ροπής, απόδοσης και μάζας ανά μονάδα μήκος, τα οποία στη συνέχεια ανάγονται σε ένα εύρος ενεργών μηκών $L = 0.1 - 15 \text{ cm}$.
- Επιλέγεται το ενεργό μήκος το οποίο δίνει την επιθυμητή μέγιστη παραγόμενη ροπή 45 Nm και υπολογίζεται σε αυτό το μήκος η απόδοση και η μάζα της μηχανής.
- Υπολογίζεται το η πυκνότητα ροπής (torque density) σε Nm/kg για κάθε μηχανή ως εξής:

$$TRW = \frac{T_{em}}{\text{total mass}} \quad (8.4)$$

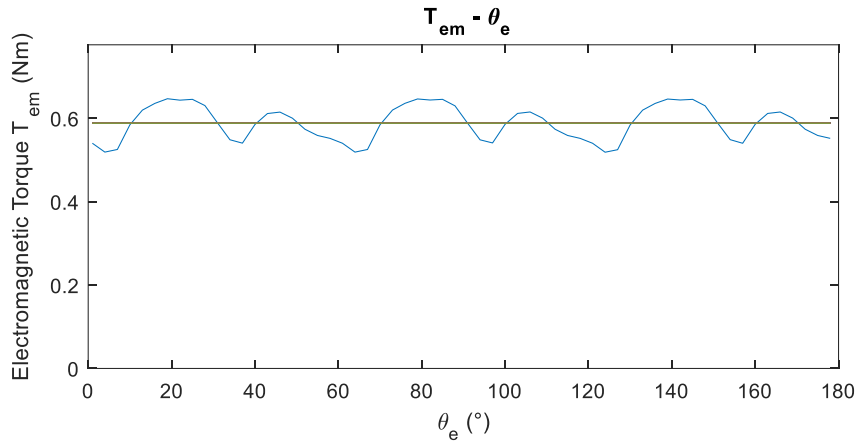
Η πυκνότητα ροπής αποτελεί δείκτη ικανότητας παραγωγής ροπής μιας μηχανής και σχεδιαστικό στόχο αποτελεί η μεγιστοποίηση της.

Βάση της ανωτέρω μελέτης θα προκύψει λοιπόν μέτρο σύγκρισης των βέλτιστων μηχανών για κάθε υλικό σε σχέση με τις αντίστοιχες reference μηχανές, σε όρους πυκνότητας ροπής και απόδοσης. Η διαδικασία αυτή κρίνεται σκόπιμη αφού η προσαρμογή του ενεργού μήκους μιας υπάρχουσας διατομής σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή, αποτελεί συνήθη τεχνική απλούστευσης της διαδικασίας βελτιστοποίησης σε επίπεδο βιομηχανίας,

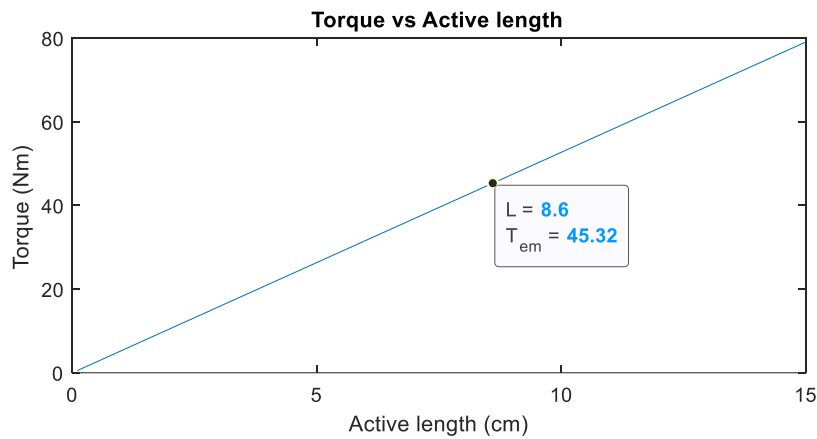
προκειμένου να μειωθούν οι υπολογιστικοί χρόνοι και πόροι που απαιτεί η διαδικασία αναλυτικής βελτιστοποίησης των γεωμετρικών παραμέτρων.

8.4.1 CoFe

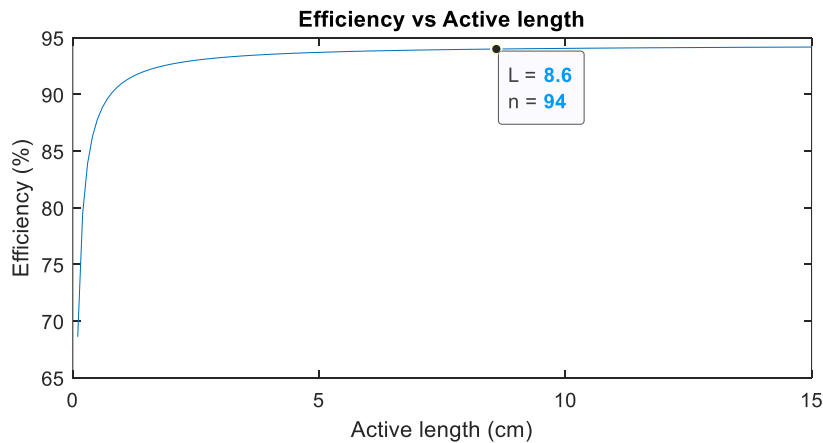
Προσαρμόζοντας το cross section της μηχανής SiFe 3% ελάχιστων συνολικών απωλειών και εφαρμόζοντας λαμαρίνα κοβαλτίου – σιδήρου πάχους 0.1 mm στον πυρήνα στάτη – δρομέα, τα λειτουργικά χαρακτηριστικά σε παραγωγή ροπής 45 Nm είναι:



Σχήμα 8.24. Κυματομορφή ροπής της reference μηχανής CoFe, συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας των ρευμάτων στάτη



Σχήμα 8.25. Παραγόμενη ροπή της reference μηχανής CoFe, συναρτήσει του ενεργού μήκους L



Σχήμα 8.26. Απόδοση της reference μηχανής CoFe, συναρτήσει του ενεργού μήκους L

Αναμενόμενα, η μηχανή με πυρήνα CoFe λόγω του υψηλότερου σημείου κορεσμού το οποίο χαρακτηρίζει το συγκεκριμένο υλικό, έχουμε υψηλότερη ροπή για την ίδια διατομή ανά μονάδα μήκος, που επιφέρει μικρότερο απαιτούμενο ενεργό μήκος για την παραγωγή ροπής 45 Nm. Έτσι αν και το κράμα αυτό έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από το συμβατικό ατσάλι, οδηγούμαστε σε ελαφρύτερη μηχανή λόγω του μειωμένου όγκου μηχανής. Ακόμα, όσον αφορά την απόδοση, δεδομένων των υψηλών φορτίσεων που μπορεί να δεχθεί σαν υλικό, σε τροφοδότηση τυλιγμάτων με πυκνότητα ρεύματος 4 A/mm², λειτουργεί μακριά σε μαγνητική φόρτιση μακριά από τον κορεσμό, οι απώλειες πυρήνα εμφανίζονται μειωμένες και σε συνδυασμό με τις μικρότερες απώλειες χαλκού λόγω των «κοντύτερων» τυλιγμάτων, η μηχανή οδηγείται σε μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης. Τέλος, η μειωμένη κυμάτωση ροπής που παρατηρείται, οφείλεται επίσης στην μαγνητική φόρτιση του πυρήνα που είναι εκτός της περιοχής κορεσμού, αφού ο κορεσμός του μαγνητικού κυκλώματος της μηχανής αποτελεί βασικό παράγοντα επίδρασης στην κυμάτωση της ροπής [94]. Η πυκνότητα ροπής της reference μηχανής ελάχιστων συνολικών απωλειών με πυρήνα CoFe υπολογίζεται:

$$TRW_{CoFe} = \frac{45.32 \text{ Nm}}{24.75 \text{ kg}} \Rightarrow TRW_{CoFe} = 1.83 \frac{\text{Nm}}{\text{kg}} \quad (8.5)$$

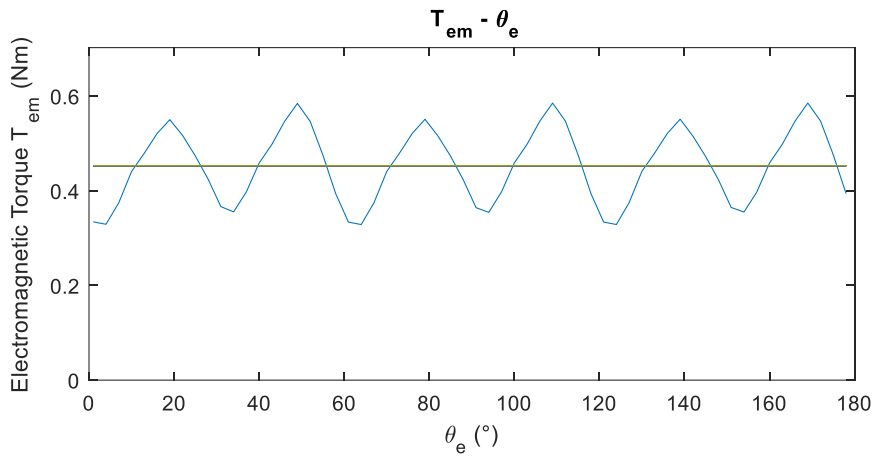
Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία για τα cross sections των μηχανών υψηλότερης απόδοσης και χαμηλότερης μάζας με υλικό πυρήνα CoFe, θα έχουμε:

Πίνακας 8.10. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης reference μηχανών CoFe

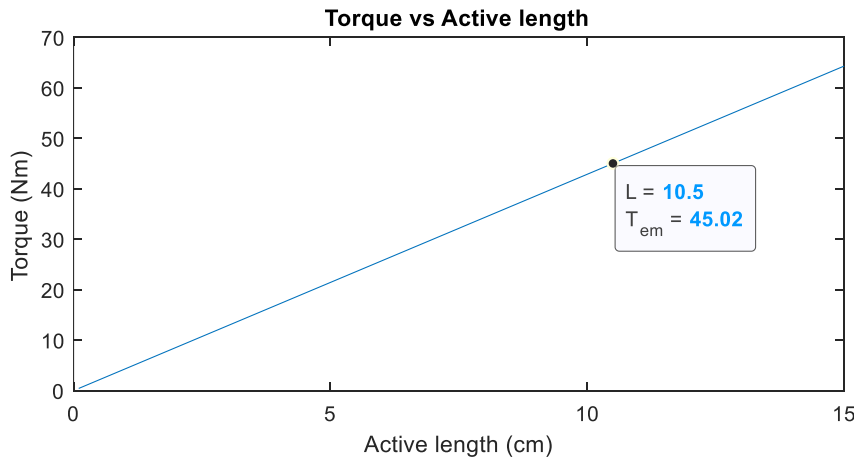
Αποτελέσματα reference μηχανών CoFe			
Παράμετροι	Ελάχιστες συνολικές απώλειες	Υψηλότερη απόδοση	Ελάχιστη μάζα
Απόδοση η (%)	94.0	93.9	84.54
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	45.32	45.49	45.94
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	21.82	22.13	36.21
Επίδοση P_{out} (kW)	7.12	7.15	7.22
Ενεργό μήκος (mm)	86	78	60
Μάζα (kg)	24.75	22.77	20.59
Απώλειες σιδήρου (W)	114.40	114.16	590.59
Απώλειες χαλκού (W)	267.76	274.52	342.69
Απώλειες μαγνητών (W)	72.48	68.74	373.98
Σύνολο απωλειών (W)	454.47	464.48	1320.34
Πυκνότητα ροπής (Nm/kg)	1.83	2	2.23

8.4.2 NiFe

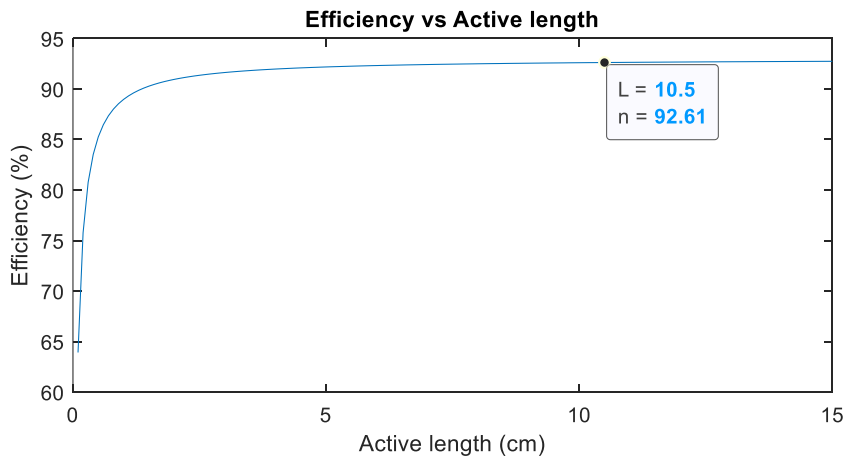
Προσαρμόζοντας το cross section της μηχανής SiFe 3% ελάχιστων συνολικών απωλειών και εφαρμόζοντας λαμαρίνα νικελίου – σιδήρου πάχους 0.35 mm στον πυρήνα στάτη – δρομέα, τα λειτουργικά χαρακτηριστικά σε παραγωγή ροπής 45 Nm είναι:



Σχήμα 8.27. Κυματομορφή ροπής της reference μηχανής NiFe, συναρτήσεως της ηλεκτρικής γωνιάς των ρευμάτων στάτη



Σχήμα 8.28. Παραγόμενη ροπή της reference μηχανής NiFe, συναρτήσεως του ενεργού μήκους L



Σχήμα 8.29. Απόδοση της reference μηχανής NiFe, συναρτήσεως του ενεργού μήκους L

Όπως ήταν αναμενόμενο, η λαμαρίνα NiFe εμφανίζει χαμηλότερη ικανότητα παραγωγής ροπής, λόγω του μειωμένου σημείου κορεσμού της σε σύγκριση με τα υπόλοιπα υλικά, γεγονός που οδηγεί σε ανάγκη μιας επιμήκους μηχανής, προκειμένου να παραχθεί η απαιτούμενη ροπή. Σε αντίθεση με την μηχανή κοβαλτίου – σιδήρου, εδώ εμφανίζονται περισσότερες απώλειες πυρήνα λόγω του υψηλού κορεσμού που φτάνει το υλικό σε φόρτιση τυλιγμάτων με 4 A/mm^2 , παρά τις χαμηλότερες ειδικές απώλειες πυρήνα που εμφανίζει, επομένως η μηχανή οδηγείται σε περιοχή λειτουργίας χαμηλότερης απόδοσης. Η πυκνότητα ροπής της reference μηχανής με πυρήνα NiFe υπολογίζεται:

$$TRW_{NiFe} = \frac{45.01 Nm}{30.99 kg} \Rightarrow TRW_{NiFe} = 1.45 \frac{Nm}{kg} \quad (8.6)$$

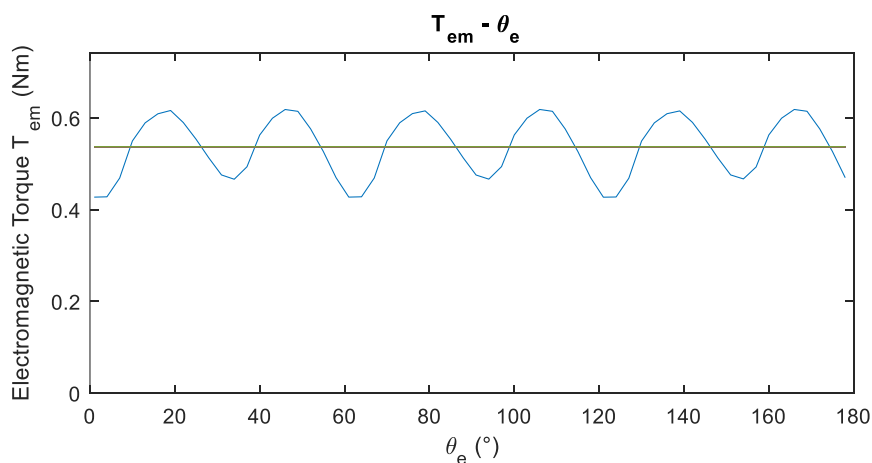
Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία για τα cross sections των μηχανών υψηλότερης απόδοσης και χαμηλότερης μάζας με υλικό πυρήνα NiFe, θα έχουμε:

Πίνακας 8.11. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης reference μηχανών NiFe

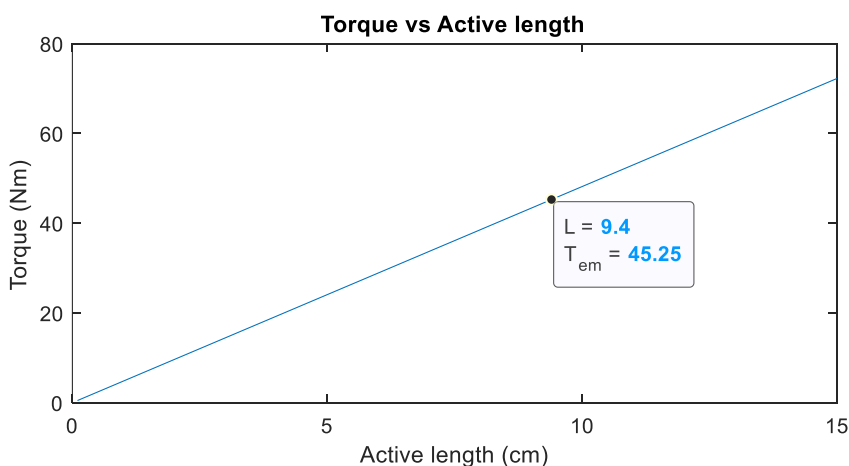
Αποτελέσματα reference μηχανών NiFe			
Παράμετροι	Ελάχιστες συνολικές απώλειες	Υψηλότερη απόδοση	Ελάχιστη μάζα
Απόδοση η (%)	92.61	92.78	85.74
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	45.01	45.33	45.35
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	56.62	51.14	87.30
Επίδοση P_{out} (kW)	7.07	7.12	7.12
Ενεργό μήκος (mm)	105	95	77
Μάζα (kg)	30.99	28.40	26.51
Απώλειες σιδήρου (W)	123.07	125.81	475.78
Απώλειες χαλκού (W)	319.63	326.20	415.95
Απώλειες μαγνητών (W)	121.19	101.85	292.69
Σύνολο απωλειών (W)	564.17	554.10	1184.77
Πυκνότητα ροπής (Nm/kg)	1.45	1.60	1.71

8.4.3 SiFe 6.5%

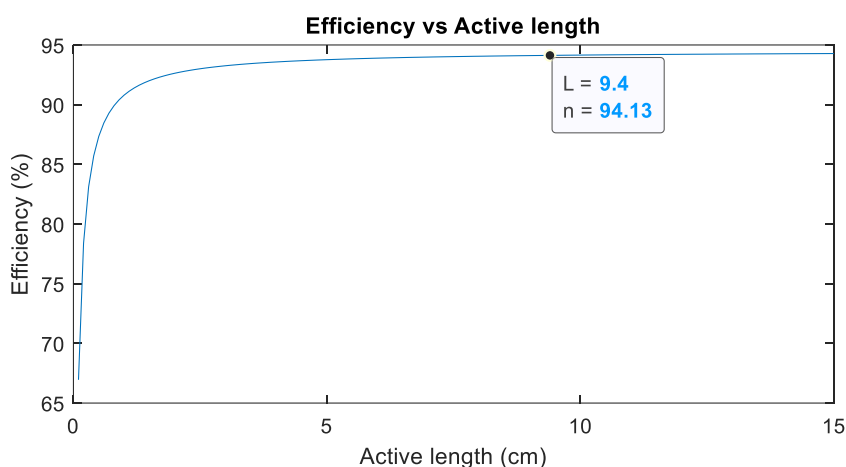
Προσαρμόζοντας το cross section της μηχανής SiFe 3% ελάχιστων συνολικών απωλειών, με εφαρμογή λαμαρίνας SiFe 6.5% (και συγκεκριμένα του υλικού Super Core της JFE Steel) πάχους 0.1 mm στον πυρήνα στάτη – δρομέα, τα λειτουργικά χαρακτηριστικά σε παραγωγή ροπής 45 Nm είναι:



Σχήμα 8.30. Κυματομορφή ροπής της reference μηχανής SiFe 6.5%, συνάρτησε της ηλεκτρικής γωνίας των ρευμάτων στάτη



Σχήμα 8.31. Παραγόμενη ροπή της reference μηχανής SiFe 6.5%, συναρτήσει του ενεργού μήκους L



Σχήμα 8.32. Απόδοση της reference μηχανής SiFe 6.5%, συναρτήσει του ενεργού μήκους L

Λόγω της ομοιότητας του SiFe 6.5% με το συμβατικό ατσάλι, όσον αφορά το σημείο κορεσμού της μαγνητικής επαγωγής, οι διαστάσεις των δυο μηχανών είναι περίπου ίδιες, ενώ η κύρια διαφορά βρίσκεται στην απόδοση της μηχανής, αφού λόγω των χαμηλών ειδικών απωλειών που εμφανίζει ο σίδηρος υψηλής περιεκτικότητας σε πυρίτιο σε συνδυασμό με την λεπτή λαμαρίνα που έχει επιλεγεί, οι απώλειες πυρήνα αυτής της μηχανής είναι σημαντικά χαμηλότερες, με αποτέλεσμα ο βαθμός απόδοσης να είναι υψηλότερος. Η πυκνότητα ροπής της reference μηχανής με πυρήνα SiFe 6.5% υπολογίζεται:

$$TRW_{SiFe6.5} = \frac{45.25 \text{ Nm}}{26.02 \text{ kg}} \Rightarrow TRW_{SiFe6.5} = 1.74 \frac{\text{Nm}}{\text{kg}} \quad (8.7)$$

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία για τα cross sections των μηχανών υψηλότερης απόδοσης και χαμηλότερης μάζας με υλικό πυρήνα SiFe 6.5%, θα έχουμε:

Πίνακας 8.12. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης reference μηχανών SiFe 6.5%

Αποτελέσματα reference μηχανών SiFe 6.5%			
Παράμετροι	Ελάχιστες συνολικές απώλειες	Υψηλότερη απόδοση	Ελάχιστη μάζα
Απόδοση η (%)	94.13	94.12	88.97
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	45.25	45	45.44
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	35.59	31.64	49.24
Επίδοση P_{out} (kW)	7.11	7.07	7.14
Ενεργό μήκος (mm)	94	86	69
Μάζα (kg)	26.02	24.17	22.71
Απώλειες σιδήρου (W)	94.76	91.25	276.40
Απώλειες χαλκού (W)	289.60	298.84	381.47
Απώλειες μαγνητών (W)	59.03	51.55	226.74
Σύνολο απωλειών (W)	443.39	441.69	884.89
Πυκνότητα ροπής (Nm/kg)	1.74	1.86	2

8.4.4 Συγκριτικοί πίνακες ανάλυσης μηχανών αναφοράς

Παρακάτω παρατίθενται οι συγκεντρωτικοί πίνακες με τα επιμέρους χαρακτηριστικά για κάθε υλικό, καθώς και τη σχετική διαφορά των χαρακτηριστικών κάθε υλικού σε σχέση με το συμβατικό ασάλι.

Πίνακας 8.13. Σύγκριση μηχανών διαφορετικών υλικών με αναγωγή του ενεργού μήκους, για την διατομή SiFe 3% με τις ελάχιστες συνολικές απώλειες

Σύγκριση μηχανών ίδιας διατομής: Ελάχιστες συνολικές απώλειες				
Παράμετροι	SiFe 3%	CoFe	NiFe	SiFe 6.5%
Απόδοση η (%)	93.36	94.0 (+0.68%)	92.61 (-0.8%)	94.13 (+0.8%)
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	45.29	45.32 (+0.07%)	45.01 (-0.6%)	45.25 (-0.08%)
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	35.08	21.82 (-37.8%)	56.62 (+61.4%)	35.59 (+1.45%)
Επίδοση P_{out} (kW)	7.11	7.12 (+0.1%)	7.07 (-0.6%)	7.11 (-)
Ενεργό μήκος (mm)	90	86 (-4.4%)	105 (+16.7%)	94 (+4.4%)
Μάζα (kg)	25.42	24.75 (-2.6%)	30.99 (21.9%)	26.02 (2.4%)
Απώλειες σιδήρου (W)	164.56	114.40 (-30.5%)	123.07 (-25.2%)	94.76 (-42.4%)
Απώλειες χαλκού (W)	278.68	267.76 (-3.9%)	319.63 (+14.7%)	289.60 (+3.9%)
Απώλειες μαγνητών (W)	62.67	72.48 (+15.7%)	121.19 (+93.4%)	59.03 (-5.8%)
Σύνολο απωλειών (W)	505.98	454.47 (-10.2%)	564.17 (+11.5%)	443.39 (-12.4%)
Πυκνότητα ροπής (Nm/kg)	1.78	1.83 (+2.8%)	1.45 (-18.5%)	1.74 (-2.2%)

Πίνακας 8.14. Σύγκριση μηχανών διαφορετικών υλικών με αναγωγή του ενεργού μήκους, για την διατομή SiFe 3% με την υψηλότερη απόδοση

Σύγκριση μηχανών ίδιας διατομής: Υψηλότερη απόδοση				
Παράμετροι	SiFe 3%	CoFe	NiFe	SiFe 6.5%
Απόδοση η (%)	93.44	93.9 (+0.5%)	92.78 (-0.7%)	94.12 (+0.7%)
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	46.81	45.49 (-2.8%)	45.33 (-3.2%)	45 (-3.9%)
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	30.76	22.13 (-28.1%)	51.14 (+66.3%)	31.64 (+2.9%)
Επίδοση P_{out} (kW)	7.35	7.15 (-2.72%)	7.12 (-3.1%)	7.07 (-3.8%)
Ενεργό μήκος (mm)	85	78 (-8.2%)	95 (+11.8%)	86 (+1.2%)
Μάζα (kg)	24.35	22.77 (-6.5%)	28.40 (+16.6%)	24.17 (-0.7%)
Απώλειες σιδήρου (W)	167.31	114.16 (-31.8%)	125.81 (-24.8%)	91.25 (-45.5%)
Απώλειες χαλκού (W)	295.80	274.52 (-7.2%)	326.20 (+10.3%)	298.84 (+1%)
Απώλειες μαγνητών (W)	53.47	68.74 (+28.6%)	101.85 (+90.5%)	51.55 (-3.6%)
Σύνολο απωλειών (W)	516.21	464.48 (-10%)	554.10 (+7.3%)	441.69 (-14.4%)
Πυκνότητα ροπής (Nm/kg)	1.92	2 (+4.2%)	1.60 (-16.7%)	1.86 (-3.1%)

Πίνακας 8.15. Σύγκριση μηχανών διαφορετικών υλικών με αναγωγή του ενεργού μήκους, για την διατομή SiFe 3% με την ελάχιστη μάζα

Σύγκριση μηχανών ίδιας διατομής: Ελάχιστη μάζα				
Παράμετροι	SiFe 3%	CoFe	NiFe	SiFe 6.5%
Απόδοση η (%)	84.10	84.54 (+0.5%)	85.74 (+2%)	88.97 (+5.8%)
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	45.30	45.94 (+1.4%)	45.35 (+0.1%)	45.44 (+0.3%)
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	52.63	36.21 (-31.2%)	87.30 (+65.9%)	49.24 (-6.4%)
Επίδοση P_{out} (kW)	7.12	7.22 (+1.4%)	7.12 (-)	7.14 (+0.3%)
Ενεργό μήκος (mm)	65	60 (-7.7%)	77 (+18.5%)	69 (+6.2%)
Μάζα (kg)	21.90	20.59 (-6%)	26.51 (+21.1%)	22.71 (+3.7%)
Απώλειες σιδήρου (W)	752.75	590.59 (-21.5%)	475.78 (-36.8%)	276.40 (-63.3%)
Απώλειες χαλκού (W)	364.24	342.69 (-5.9%)	415.95 (+14.2%)	381.47 (+4.7%)
Απώλειες μαγνητών (W)	228.67	373.98 (+63.6%)	292.69 (+28%)	226.74 (-0.8%)
Σύνολο απωλειών (W)	1345.30	1320.34 (-1.86%)	1184.77 (-11.9%)	884.89 (-34.2%)
Πυκνότητα ροπής (Nm/kg)	2.07	2.23 (+7.7%)	1.71 (-17.4%)	2 (-3.4%)

Το κοινό μοτίβο των ανωτέρω πινάκων είναι η αυξημένη πυκνότητα ροπής που παρουσιάζουν όλες οι μηχανές με πυρήνα CoFe και η μειωμένη πυκνότητα ροπής των μηχανών NiFe, δεδομένου πως πρόκειται για τα υλικά

με το υψηλότερο και το χαμηλότερο σημείο κορεσμού μαγνητικής επαγωγής, αντίστοιχα. Ακόμα, παρατηρείται πως κάθε διαμόρφωση με πυρήνα SiFe 6.5% έχει χαμηλότερες απώλειες πυρήνα και κατ' επέκταση υψηλότερη απόδοση από κάθε άλλο υλικό, γεγονός αναμενόμενο, δεδομένου πως η λαμαρίνα που επιλέχθηκε έχει τις χαμηλότερες ειδικές απώλειες πυρήνα.

Αξίζει ακόμα να σημειωθεί πως η πλειονότητα των αποτελεσμάτων για τα κράματα SiFe 3% και SiFe 6.5%, είναι σχεδόν ίδια, δεδομένου πως έχουν την ίδια βάση υλικών αλλά με διαφορετική περιεκτικότητα, με την κυριότερη διαφορά τους να εμφανίζεται στις απώλειες πυρήνα. Τέλος, παρατηρείται μια άμεση σχέση με το σημείο κορεσμού του κάθε υλικού και του ενεργού μήκους που δίνει την απαιτούμενη ροπή, με τα πιο «αδύναμα» υλικά να απαιτούν περισσότερο μήκος, επιβεβαιώνοντας το γεγονός πως ο κορεσμός της μαγνητικής επαγωγής J_{sat} αποτελεί δείκτη ικανότητας παραγωγής ροπής για κάθε υλικό.

Στόχος της παραπάνω μελέτης των χαρακτηριστικών των μηχανών αναφοράς είναι τόσο η μεταξύ τους σύγκριση για την επιβεβαίωση των διαφορετικών μαγνητικών ιδιοτήτων των υλικών, όσο και η σύγκριση με τις βέλτιστες μηχανές για κάθε υλικό, οι οποίες υπολογίζονται και παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια, προκειμένου να αναδειχθεί η ανάγκη ή μη της βελτιστοποίησης μέσω ανάλυσης ευαισθησίας των γεωμετρικών παραμέτρων.

9. ΟΡΙΣΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΗΧΑΝΩΝ CoFe

Οι βασικές παράμετροι που παραμένουν σταθερές σε όλες τις προς σχεδίαση μηχανές πυρήνα CoFe είναι ίδιες με τις σταθερές παραμέτρους κατά τη σχεδίαση μηχανών SiFe 3%, όπως αυτές παρατέθηκαν προηγουμένως (Πίνακας 8.1). Οι παράμετροι σάρωσης για τις προς μελέτη γεωμετρίες ορίζονται ως εξής:

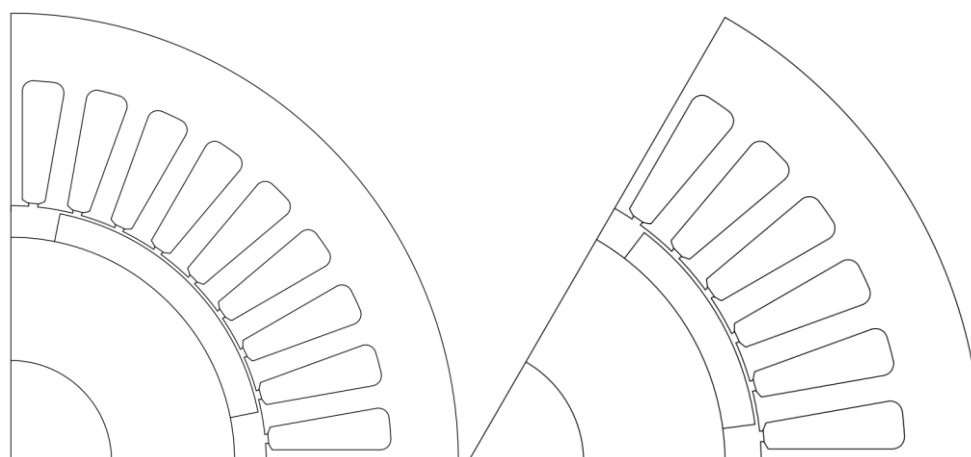
Πίνακας 9.1. Παράμετροι σάρωσης κατά τη σχεδίαση των μηχανών CoFe

Παράμετροι σάρωσης κατά τη σχεδίαση μηχανών	
Παράμετροι	Τιμές
<i>Poles</i>	[4 6 8]
<i>Tooth2SlotPercentage (%)</i>	[30 : 5 : 50]
<i>Yoke2ToothPercentage (%)</i>	[200 : 50 : 450]
R_{so} (mm)	[80 : 5 : 95]

Ο λόγος που εξετάζονται μικρότερος αριθμός πόλων είναι η μεγαλύτερη ικανότητα ροπής του πυρήνα CoFe, επομένως δεν υπάρχει η ανάγκη πολυπολικών διαμορφώσεων με σκοπό την αύξηση της παραγόμενης ροπής. Όσον αφορά τον αριθμό και τη διαμόρφωση των αυλάκων, επιλέγεται η μελέτη των εξής συνδυασμών:

- Για μηχανές με *Poles* = 4, ορίζονται *Spp* = 3, *Layers* = 1 και *Overlap* = 0.
- Για μηχανές με *Poles* = 6, ορίζονται *Spp* = 2, *Layers* = 1 και *Overlap* = 0.
- Για μηχανές με *Poles* = 8, ορίζονται *Spp* = 1, *Layers* = 1 και *Overlap* = 0.

Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται η διατήρηση παρόμοιου αριθμού αυλάκων σε κάθε διαμόρφωση, όπως φαίνεται παρακάτω, επομένως παρόμοια μαγνητική φόρτιση των δοντιών της μηχανής.



Σχήμα 9.1. Διαμορφώσεις 4πολικής μηχανής και 6πολικής μηχανής με *spp* = 3 και *spp*=2 αντίστοιχα

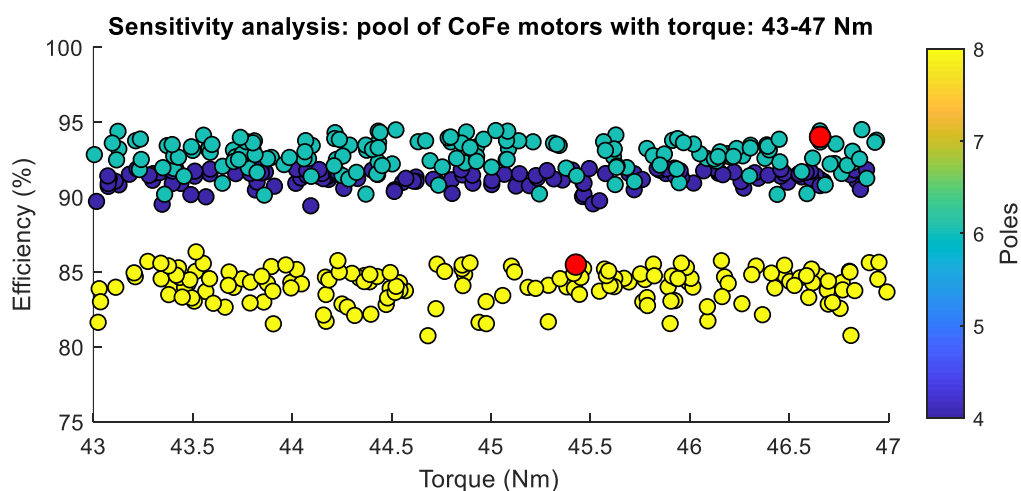
Βάση των ανωτέρω παραμέτρων, θα σχεδιαστούν και θα αναλυθούν 360 μηχανές διαφορετικής διατομής και μοναδιαίου ενεργού μήκους. Ακόμα, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του μήκους της μηχανής στις ανωτέρω διατομές, αναλόγως την εξωτερική ακτίνα στάτη μελετώνται διαφορετικές τιμές ενεργού μήκους μηχανής, όπως φαίνεται παρακάτω.

Πίνακας 9.2. Εύρος τιμών ενεργού μήκους κατά τη σχεδίαση των μηχανών SiFe 3%

Εξωτερική ακτίνα στάτη R_{so} (mm)	Ενεργό μήκος L (mm)
80,85	[80 : 5 : 120]
90,95	[60 : 5 : 100]

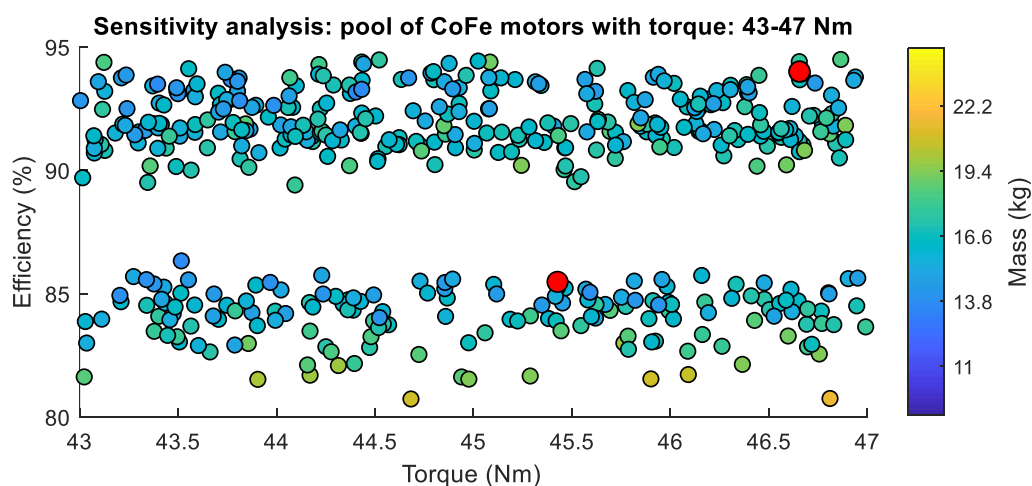
9.1 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για τις 3240 μηχανές CoFe που προέκυψαν, ενώ υποδεικνύονται οι επιλεγμένες μηχανές που πληρούν τα κριτήρια ελάχιστων απωλειών, υψηλότερης απόδοσης και μικρότερης μάζας.

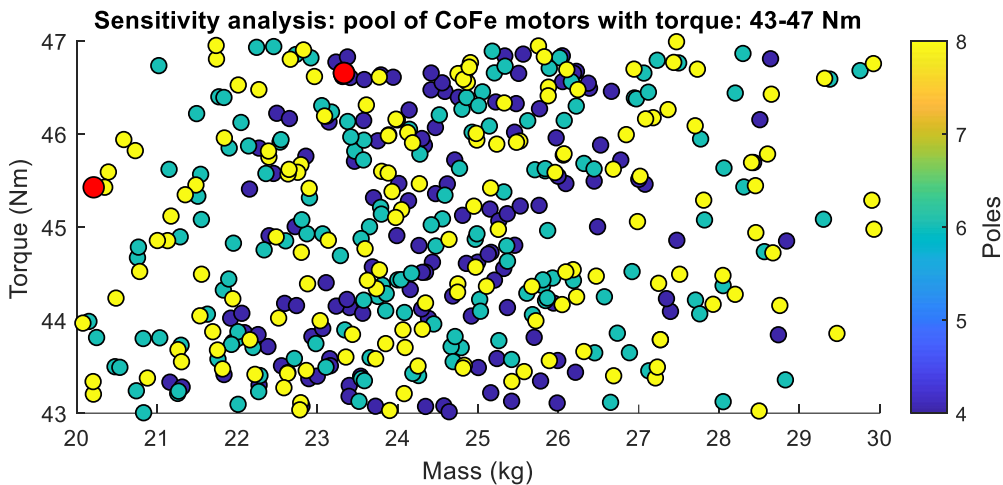


Σχήμα 9.2. Γραφική αναπαράσταση απόδοσης μηχανών που επιτυγχάνουν ροπή 43-47 Nm, συναρτήσει του αριθμού των πόλων. Υποδεικνύονται οι επιλεγμένες μηχανές CoFe.

Όσον αφορά την κατανομή των μηχανών ως προς τους πόλους, η πλειοψηφία των μηχανών 4 και 6 πόλων έχουν απόδοση άνω του 90% – με τις 6πολικές να κυριαρχούν – ενώ και πάλι οι 8πολικές μηχανές βρίσκονται σε χαμηλότερο βαθμό απόδοσης, για τους λόγους που εξηγήθηκαν προηγουμένως.



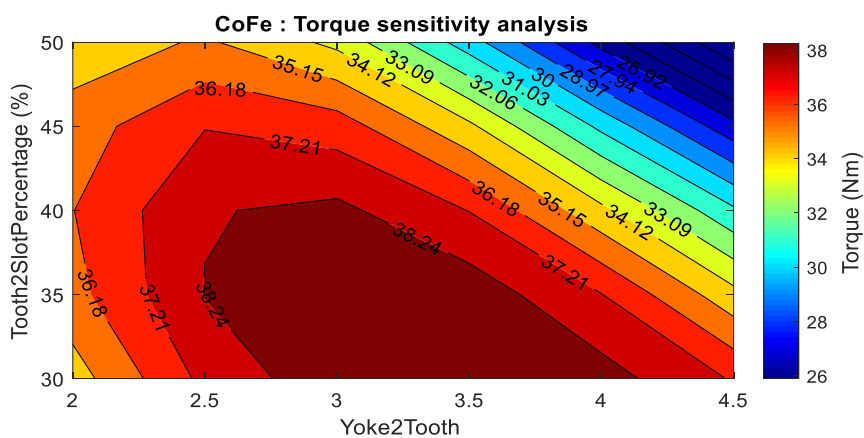
Σχήμα 9.3. Γραφική αναπαράσταση απόδοσης μηχανών που επιτυγχάνουν ροπή 43-47 Nm, συναρτήσει της μάζας. Υποδεικνύονται οι επιλεγμένες μηχανές CoFe.



Σχήμα 9.4. Γραφική αναπαράσταση ροπής και μάζας μηχανών που επιτυγχάνουν ροπή 43 – 47 Nm, συναρτήσει του αριθμού των πόλων. Υποδεικνύονται οι επιλεγμένες μηχανές CoFe.

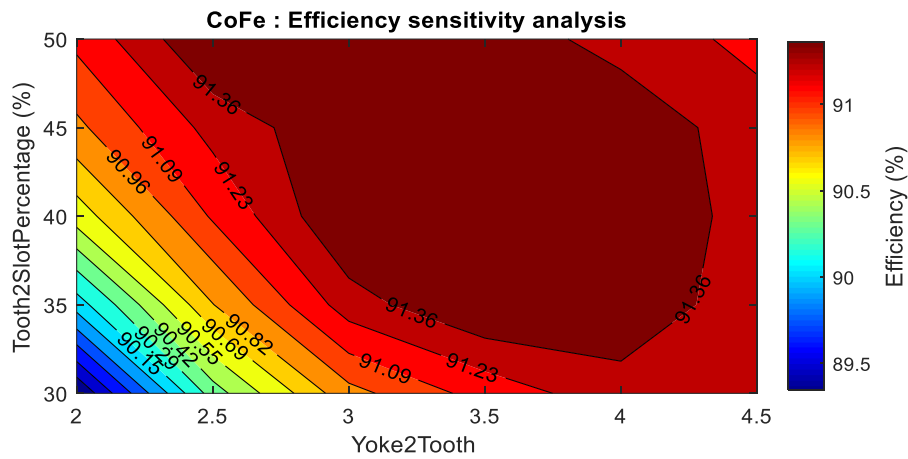
Όσον αφορά την κατανομή των μηχανών ως προς τη μάζα, παρατηρούμε πως οι περισσότερες μηχανές συγκεντρώνονται στα 22 – 25 kg, ενώ φαίνεται πως οι 4πολικές μηχανές δεν εμφανίζονται στις χαμηλότερες μάζες, γεγονός που εξηγείται από την ανάγκη μεγαλύτερου μήκους στις μηχανές μικρού αριθμού πόλων, προκειμένου να παράξουν την απαραίτητη ροπή, σε αντίθεση με τις πολυπολικές μηχανές, που επωφελούνται από δισκοειδείς διαμορφώσεις μηχανών.

Στις παρακάτω αναλύσεις ευαισθησίας επιλέγεται να μελετηθεί η επίδραση του πάχους δοντιού και σώματος στάτη (yoke) σε βπολικές μηχανές, σταθερής εξωτερικής ακτίνας στάτη $R_{s0} = 90mm$ και σταθερού ενεργού μήκους $L = 80mm$.



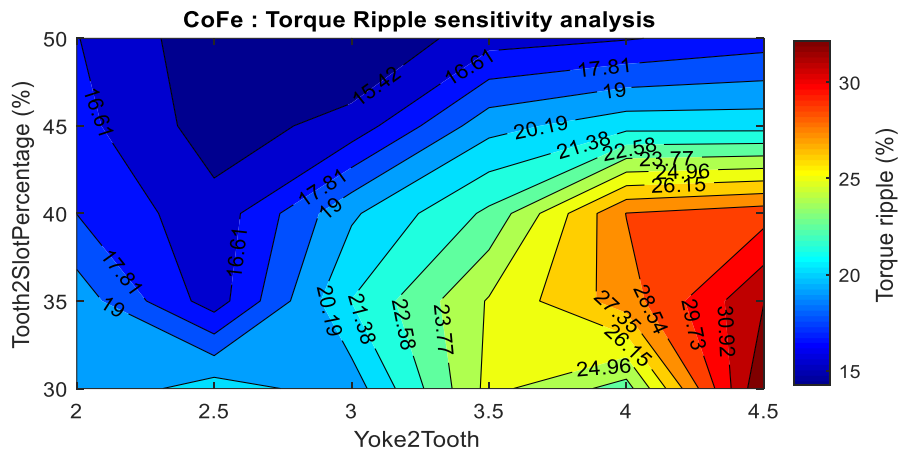
Σχήμα 9.5. Παραγόμενη ροπή επιλεγμένης μηχανής CoFe ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού και σώματος στάτη

Όσον αφορά την παραγόμενη ροπή, παρατηρούμε πως μεγιστοποιείται για λεπτότερα δόντια και ιδιαίτερα στην περιοχή μεσαίων τιμών σώματος στάτη, σε αντίθεση με τη περισσότερη γραμμική συμπεριφορά του συμβατικού ατσαλιού όπως είδαμε προηγουμένως (Σχήμα 8.8).



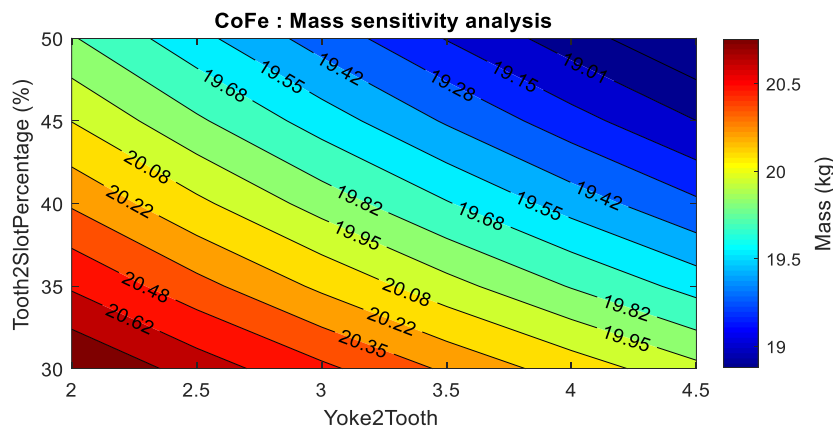
Σχήμα 9.6. Απόδοση επιλεγμένης μηχανής CoFe ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού και σώματος στάτη

Η απόδοση των μηχανών CoFe παραμένει σε υψηλά επίπεδα για τους περισσότερους συνδυασμούς εκτός των ακραίων συνδυασμών λεπτών δοντιών και λεπτού yoke. Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, αυτό συμβαίνει διότι σε διαμορφώσεις που μειώνεται σημαντικά ο όγκος σιδήρου για την ίδια ακτίνα, αυξάνεται ο όγκος των τυλιγμάτων και κατ' επέκταση οι απώλειες χαλκού της μηχανής.



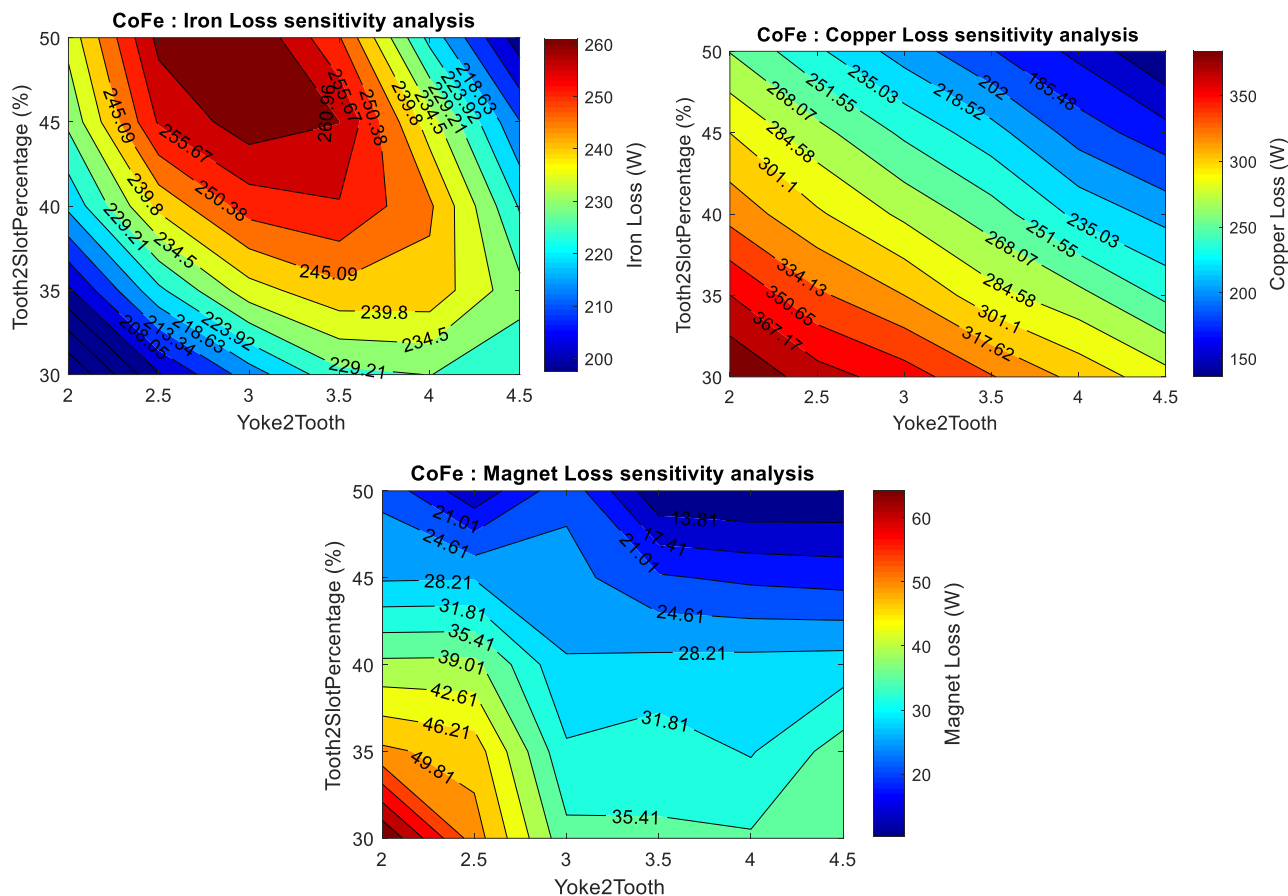
Σχήμα 9.7. Κυμάτωση ροπής επιλεγμένης μηχανής CoFe ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού και σώματος στάτη

Η κυμάτωση της ροπής παίρνει τις μικρότερες τιμές από όλα τα υπόλοιπα υλικά στην περίπτωση του CoFe, αφού όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η κυμάτωση επηρεάζεται άμεσα από τα επίπεδα κορεσμού στα οποία λειτουργεί το υλικό. Έτσι δεδομένων των υψηλών ηλεκτρικών φορτίσεων που απαιτούνται προκειμένου να εισέλθει ο πυρήνας CoFe σε κορεσμό, η μηχανή για το σύνολο των παραπάνω διαμορφώσεων λειτουργεί μακριά από το σημείο κορεσμού της μαγνητικής επαγωγής, γεγονός που οδηγεί σε μικρότερη κυμάτωση ροπής.



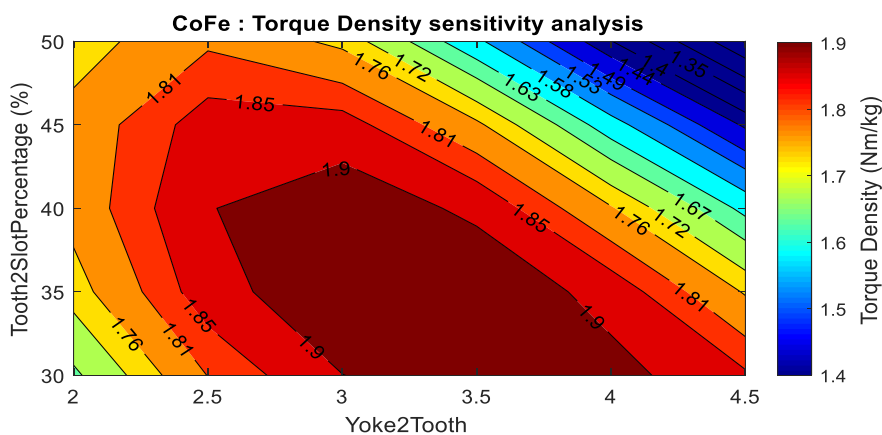
Σχήμα 9.8. Συνολική μάζα επιλεγμένης μηχανής CoFe ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού και σώματος στάτη

Η μάζα εμφανίζει γραμμική εξάρτηση από τα πάχη δοντιών και σώματος στάτη, όπως και για το συμβατικό ατσάλι που μελετήθηκε προηγουμένως.



Σχήμα 9.9. Απώλειες επιλεγμένης μηχανής CoFe ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού και σώματος στάτη

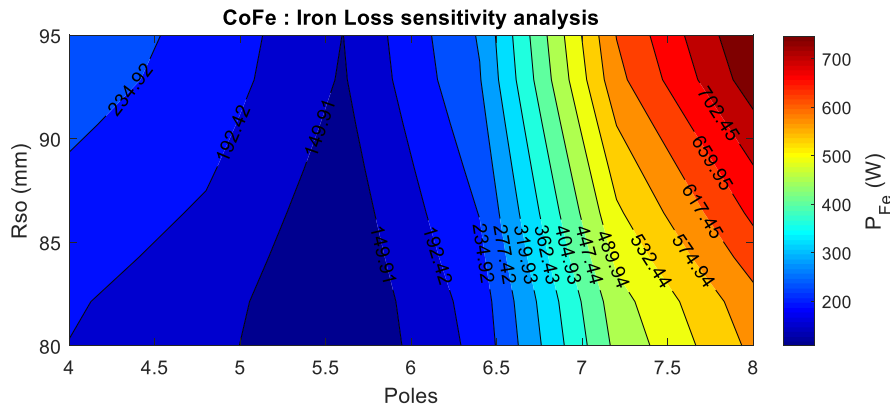
Όπως ήταν αναμενόμενο, οι απώλειες πυρήνα μεγιστοποιούνται κυρίως για μεγάλα πάχη δοντιών, λόγω του περισσότερου υλικού που χρησιμοποιείται και λόγω της μεγαλύτερης μαγνητικής ροής που περνάει από τα δόντια. Όσον αφορά τις απώλειες χαλκού των μηχανών CoFe, μεταβάλλονται όμοια με την περίπτωση του συμβατικού ατσάλιου, αφού η αύξηση του εμβαδού καθώς και του όγκου των τυλιγμάτων έχει άμεση συνέπεια την αύξηση των απωλειών χαλκού. Τέλος, οι απώλειες μαγνητών φαίνεται να μεταβάλλονται αντίστροφα σε σχέση με τις μηχανές SiFe, αφού εδώ μεγιστοποιούνται στην μηχανή με τα λεπτότερα δόντια και yoke, γεγονός που οφείλεται στην αυξημένη ηλεκτρική φόρτιση της μηχανής αυτής.



Σχήμα 9.10. Πυκνότητα ροπής επιλεγμένης μηχανής CoFe ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού και σώματος στάτη

Τέλος, όσον αφορά την πυκνότητα ροής, ακολουθεί τις μεταβολές της ροής κατά την μεταβολή των γεωμετρικών παραμέτρων του στάτη.

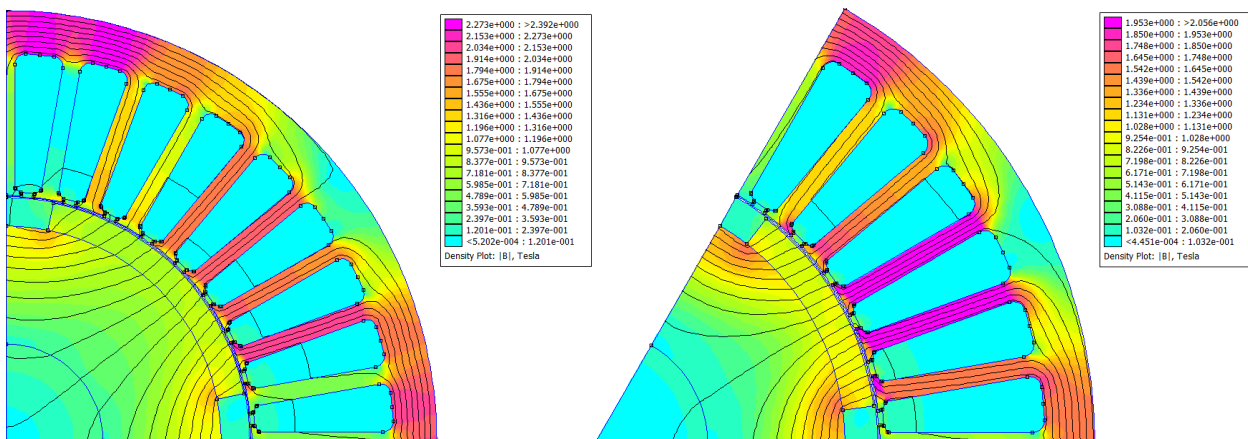
Όσον αφορά την μεταβολή των βασικών μεγεθών επίδοσης και απόδοσης συναρτήσει των πόλων και της ακτίνας, ισχύουν τα ίδια αποτελέσματα και στην περίπτωση των CoFe μηχανών, εκτός από ορισμένες περιπτώσεις μεγεθών, όπως οι απώλειες πυρήνα και κατ' επέκταση η απόδοση, που παρουσιάζουν ενδιαφέρον και μελετώνται παρακάτω. Για τον σκοπό αυτό, τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας στάτη που πριν μεταβάλλονταν, τώρα παραμένουν σταθερά ως $Yoke2Tooth = 2.5$ και $Tooth2Slot = 40\%$.



Σχήμα 9.11. Απώλειες πυρήνα μηχανής CoFe ως συνάρτηση της εξωτερικής ακτίνας στάτη και του αριθμού των πόλων, για τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά μικρογεωμετρίας

Όπως αναμέναμε από τα αποτελέσματα για τις μηχανές SiFe 3%, θα έπρεπε η αύξηση του αριθμού των πόλων να επιφέρει αύξηση των απωλειών πυρήνα, λόγω της αύξησης της συχνότητας τροφοδοσίας. Παρόλα αυτά, παρατηρούμε στο διάγραμμα απωλειών πυρήνα πως οι δπολικές μηχανές έχουν λιγότερες απώλειες από ότι οι αντίστοιχες 4πολικές ίδιας ακτίνας.

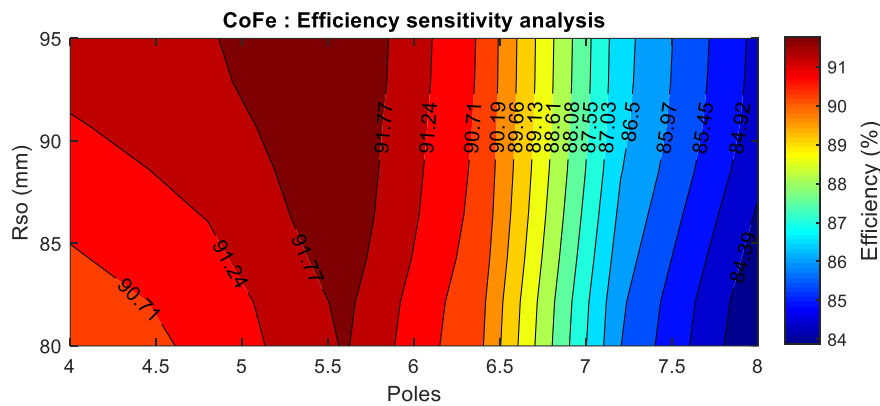
Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η 4πολική μηχανή εμφανίζει μεγαλύτερο κορεσμό σε σχέση με την όμοια δπολική, όπως μπορεί να φανεί στην χρωματική απεικόνιση της πυκνότητας της μαγνητικής ροής στα διάφορα σημεία της γεωμετρίας.



Σχήμα 9.12. Αναπαράσταση γεωμετριών 4πολικής και δπολικής μηχανής CoFe. Φαίνονται τόσο οι μαγνητικές γραμμές που διασχίζουν το δρομέα και στάτη, όσο και η χρωματική απεικόνιση της πυκνότητας της μαγνητικής ροής.

Η υψηλότερη μαγνητική επαγωγή που αναπτύσσεται στον πυρήνα της 4πολικής μηχανής, έχει ως αποτέλεσμα την ακόμα μεγαλύτερη αύξηση των απωλειών πυρήνα, ανάλογη του B^2 , όπως γίνεται αντιληπτό από την εξίσωση (7.3). Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο ότι η αύξηση του αριθμού των πόλων επιφέρει αύξηση του

ποσοστού της σκέδασης (leakage) επί του συνόλου της μαγνητικής ροής, επομένως η δπολική μηχανή έχει λιγότερο μαγνητική ροή εντός του πυρήνα και αντίστοιχα λιγότερο κορεσμό της μαγνητικής επαγωγής.



Σχήμα 9.13. Απόδοση μηχανής CoFe ως συνάρτηση της εξωτερικής ακτίνας στάτη και του αριθμού των πόλων, για τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά μικρογεωμετρίας

Τέλος, η ύπαρξη υψηλότερων απωλειών πυρήνα στις 4πολικές μηχανές, έχει αντίστοιχη επίδραση και στην απόδοση της μηχανής, με τις 4πολικές μηχανές να παρουσιάζουν μικρότερη απόδοση από τις αντίστοιχες δπολικές ίδιας γεωμετρίας στάτη, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα.

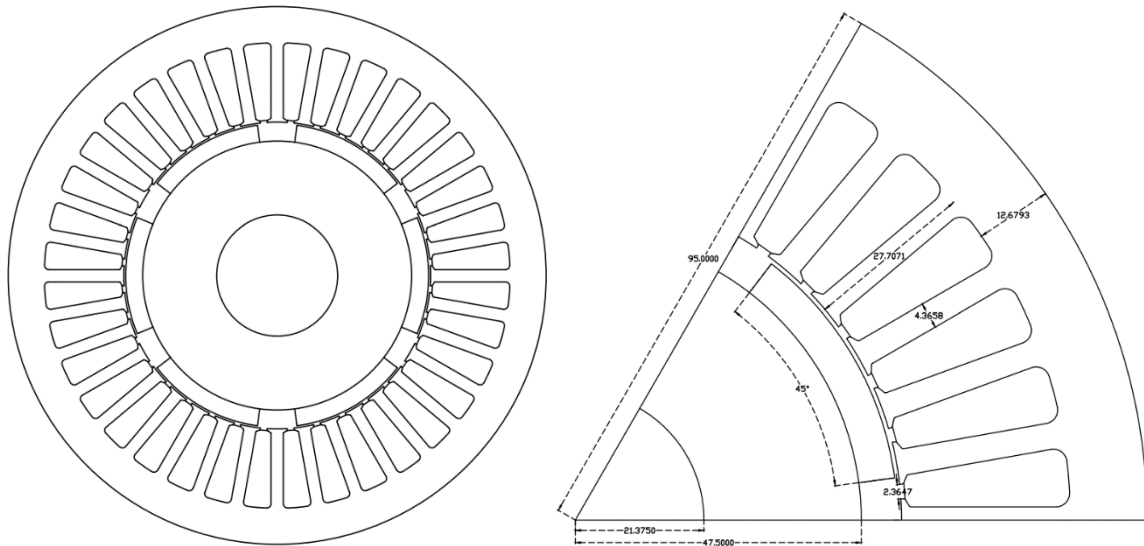
9.1.1 Μηχανή CoFe με τις ελάχιστες συνολικές απώλειες και την υψηλότερη απόδοση

Η μηχανή CoFe με τις ελάχιστες συνολικές απώλειες έχει και την υψηλότερη απόδοση από όλο το pool των μηχανών που προέκυψαν κατά την ανάλυση ευαισθησίας. Παρακάτω φαίνονται οι τιμές των μεταβλητών σχεδίασης για τις οποίες προκύπτει η βέλτιστη αυτή μηχανή.

Πίνακας 9.3. Τιμές μεταβλητών παραμέτρων της μηχανής CoFe με την υψηλότερη απόδοση

Χαρακτηριστικά μηχανής CoFe υψηλότερης απόδοσης	
Παράμετροι	Τιμές
<i>Poles</i>	6
<i>R_{so} (mm)</i>	95
<i>L (mm)</i>	80
<i>Yoke2Tooth</i>	3
<i>Tooth2SlotPercentage (%)</i>	45

Στη συνέχεια παρατίθεται ενδεικτικά η διατομή και οι διαστάσεις για την πλήρη γεωμετρία, καθώς και για τη διαμόρφωση ενός πόλου.



Σχήμα 9.14. Διατομή και διαστάσεις επιλεγμένης μηχανής CoFe

Όσον αφορά τις απαιτήσεις ψύξης της επιλεγμένης μηχανής θα έχουμε:

$$A \cdot J = \frac{J^2 \cdot A_{cu}}{\tau_u} = \frac{4^2 \cdot (10^6)^2 \cdot 0.5 \cdot 204.4 \cdot 10^{-6}}{\frac{\pi \cdot 0.1077}{36}} = 17.40 \cdot 10^{10} \text{ A}^2/\text{m}^3 \quad (9.1)$$

Το γινόμενο $A \cdot J = 17.40 \cdot 10^{10} \text{ A}^2/\text{m}^3$ είναι μικρότερο του ανώτατου ορίου ψύξης που υπολογίστηκε στη σχέση (5.8), επομένως η μηχανή λειτουργεί καλά σε κατάσταση μέγιστης ροπής, υποθέτοντας φυσική ψύξη. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την πεδιακή ανάλυση της ανωτέρω μηχανής.

Πίνακας 9.4. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης της μηχανής CoFe με την υψηλότερη απόδοση

Αποτελέσματα μηχανής CoFe υψηλότερης απόδοσης	
Παράμετροι	Τιμές
Απόδοση η (%)	94.0
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	46.66
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	22.13
Επίδοση P_{out} (kW)	7.33
Μάζα (kg)	23.32
Απώλειες σιδήρου (W)	117.09
Απώλειες χαλκού (W)	280.60
Απώλειες μαγνητών (W)	70.51
Σύνολο απωλειών (W)	467.83

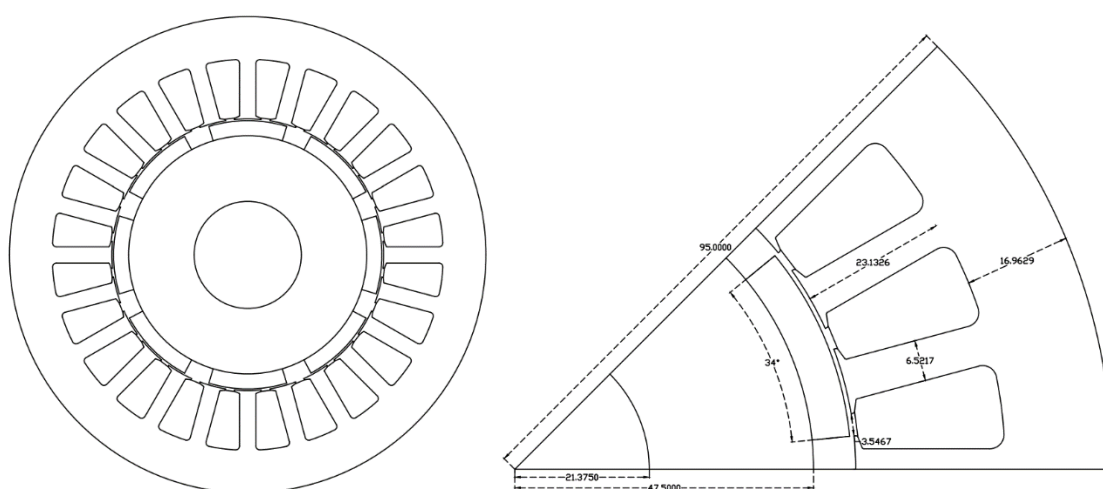
9.1.2 Μηχανή CoFe με την ελάχιστη μάζα

Η μηχανή CoFe με την μικρότερη μάζα, προκύπτει για τις παρακάτω τιμές των μεταβλητών σχεδίασης.

Πίνακας 9.5. Τιμές μεταβλητών παραμέτρων της μηχανής CoFe με την ελάχιστη μάζα

Χαρακτηριστικά μηχανής CoFe ελάχιστης μάζας	
Παράμετροι	Τιμές
<i>Poles</i>	8
<i>R_{so} (mm)</i>	95
<i>L (mm)</i>	60
<i>Yoke2Tooth</i>	4
<i>Tooth2SlotPercentage (%)</i>	45

Στη συνέχεια παρατίθεται ενδεικτικά η διατομή και οι διαστάσεις για την πλήρη γεωμετρία, καθώς και για τη διαμόρφωση ενός πόλου.



Σχήμα 9.15. Διατομή και διαστάσεις επιλεγμένης μηχανής CoFe

Όσον αφορά τις απαιτήσεις ψύξης της επιλεγμένης μηχανής θα έχουμε:

$$A \cdot J = \frac{J^2 \cdot A_{cu}}{\tau_u} = \frac{4^2 \cdot (10^6)^2 \cdot 0.5 \cdot 248.08 \cdot 10^{-6}}{\frac{\pi \cdot 0.1077}{24}} = 14.08 \cdot 10^{10} \text{ A}^2/\text{m}^3 \quad (9.2)$$

Το γινόμενο $A \cdot J = 14.08 \cdot 10^{10} \text{ A}^2/\text{m}^3$ είναι μικρότερο του ανώτατου ορίου ψύξης που υπολογίστηκε στη σχέση (5.8), επομένως η μηχανή λειτουργεί καλά σε κατάσταση μέγιστης ροπής, υποθέτοντας φυσική ψύξη.

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την πεδιακή ανάλυση της ανωτέρω μηχανής.

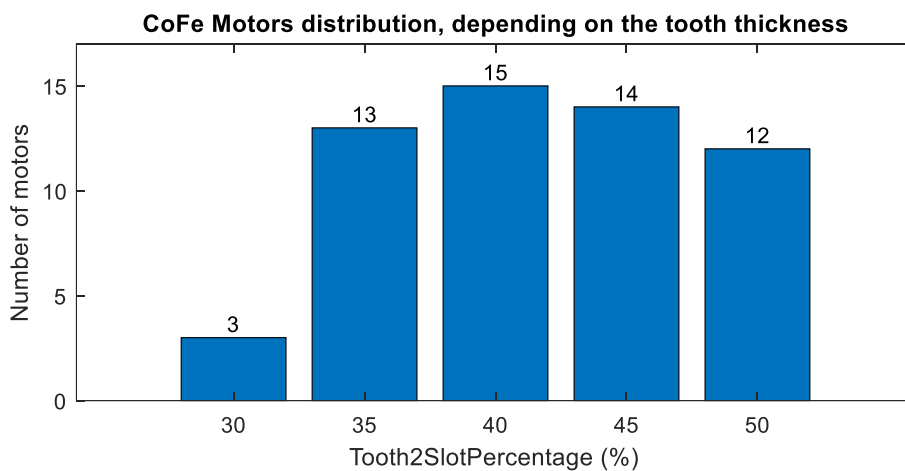
Πίνακας 9.6. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης της μηχανής CoFe με την ελάχιστη μάζα

Αποτελέσματα μηχανής CoFe ελάχιστης μάζας	
Παράμετροι	Τιμές
Απόδοση η (%)	85.47
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	45.43
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	22.83
Επίδοση P_{out} (kW)	7.33
Μάζα (kg)	20.21
Απώλειες σιδήρου (W)	648.54
Απώλειες χαλκού (W)	307.73
Απώλειες μαγνητών (W)	243.27
Σύνολο απωλειών (W)	1246.11

Ο λόγος που η ελαφρύτερη διαμόρφωση είναι και πάλι 8πολική, είναι λόγω του μικρότερου ενεργού εμβαδού τυλιγμάτων και κατ' επέκταση του μικρότερου όγκου τυλιγμάτων, δεδομένου πως οι 8πολικές διαμορφώσεις σχεδιάζονται με 1 αυλάκι ανά πόλο και φάση.

9.2 Τάση σχεδίασης μηχανών CoFe

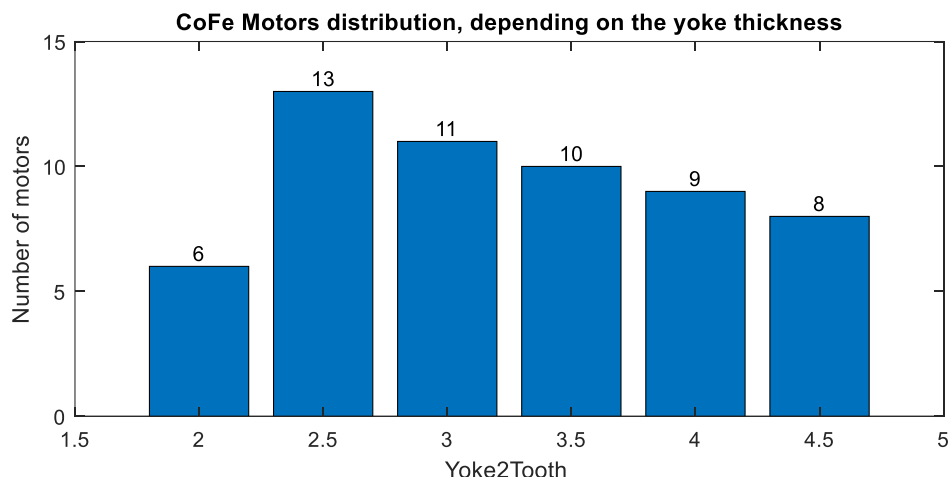
Μετά την επιλογή των βέλτιστων μηχανών βάση κάθε κριτηρίου, μελετήθηκε η κατανομή των μηχανών με επίδοση 45 – 47 Nm και απόδοση άνω του 94%, προκειμένου να γίνει αντιληπτή η τάση (trend) σχεδίασης σχετικά με το πάχος δοντιών και σώματος στάτη υλικού CoFe. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής παρατίθενται σε ιστογράμματα παρακάτω.



Σχήμα 9.16. Κατανομή μηχανών CoFe που παράγουν ροπή 45Nm – 47Nm και έχουν απόδοση > 94%, ανάλογα με το πάχος του δοντιού στάτη

Όσον αφορά τα δόντια του στάτη, παρατηρείται πως η κατανομή των μηχανών που επιτυγχάνουν τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης, συγκεντρώνονται σε δόντια πάχους 35-45% του συνολικού μεγέθους αύλακος και δοντιού, με την ιδανική επιλογή να είναι το 40%, όπως προκύπτει και για τη μηχανή υψηλότερης απόδοσης. Ακόμα, γεγονός αποτελεί πως πρόκειται για το μόνο σιδηρομαγνητικό

υλικό της παρούσας μελέτης που παρουσιάζει μηχανές που επιτυγχάνουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά και σε λεπτότερα δόντια (30-35% του συνολικού μεγέθους αύλακος και δοντιού). Αυτό συμβαίνει λόγω της μεγαλύτερης ικανότητας του κράματος κοβαλτίου – σιδήρου να αναπτύξει μαγνητικό πεδίο για μια δεδομένη ηλεκτρική φόρτιση, επομένως απαιτείται μικρότερη επιφάνεια σιδήρου για να περάσει η μαγνητική ροή.



Σχήμα 9.17. Κατανομή μηχανών CoFe που παράγουν ροπή 45Nm – 47Nm και έχουν απόδοση > 94%, ανάλογα με το πάχος του σώματος στάτη

Όσον αφορά το πάχος του yoke, παρατηρείται πως η κατανομή των μηχανών που επιτυγχάνουν τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης, συγκεντρώνονται σε τιμές 2.5-3.5 φορές του πάχους του δοντιού. Έτσι επιβεβαιώνεται πως μια μηχανή με φαινομενικά μικρό πάχος δοντιού και σώματος στάτη από CoFe, έχουν τη δυνατότητα επίτευξης των επιθυμητών χαρακτηριστικών.

9.3 Σύγκριση βέλτιστων μηχανών CoFe με τις μηχανές αναφοράς

Μετά την εξαγωγή των βέλτιστων μηχανών από το pool που δημιουργήθηκε κατά την ανάλυση ευαισθησίας, σειρά έχει η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μεθόδου, σε σχέση με τις μηχανές αναφοράς που δημιουργήθηκαν βάση της βέλτιστης διατομής SiFe 3% στο Κεφάλαιο 8.

Πίνακας 9.7. Σύγκριση χαρακτηριστικών reference και βελτιστοποιημένης μηχανής CoFe, με κριτήριο τις ελάχιστες συνολικές απώλειες

Μηχανές CoFe ελάχιστων συνολικών απωλειών			
Κριτήρια σύγκρισης	Μηχανή αναφοράς	Βέλτιστη μηχανή	Διαφορά
Απόδοση η (%)	94.0	94.0	-
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	45.32	46.66	+3%
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	21.82	22.13	+1.4%
Απώλειες σιδήρου (W)	114.40	117.09	+2.4%
Απώλειες χαλκού (W)	267.76	280.60	+4.8%
Απώλειες μαγνητών (W)	72.48	70.51	-2.7%
Σύνολο απωλειών (W)	454.47	467.83	+2.9%
Μάζα (kg)	24.75	23.32	-5.8%
Πυκνότητα ροπής (Nm/kg)	1.83	2	+9.3%

Πίνακας 9.8. Σύγκριση χαρακτηριστικών reference και βελτιστοποιημένης μηχανής CoFe, με κριτήριο την υψηλότερη απόδοση

Μηχανές CoFe υψηλότερης απόδοσης			
Κριτήρια σύγκρισης	Μηχανή αναφοράς	Βέλτιστη μηχανή	Διαφορά
Απόδοση η (%)	93.9	94.0	+0.11%
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	45.49	46.66	+2.6%
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	22.13	22.13	-
Απώλειες σιδήρου (W)	114.16	117.09	+2.6%
Απώλειες χαλκού (W)	274.52	280.60	+2.2%
Απώλειες μαγνητών (W)	68.74	70.51	+2.6%
Σύνολο απωλειών (W)	464.48	467.83	+0.7%
Μάζα (kg)	22.77	23.32	+2.4%
Πυκνότητα ροπής (Nm/kg)	2	2	-

Πίνακας 9.9. Σύγκριση χαρακτηριστικών reference και βελτιστοποιημένης μηχανής CoFe, με κριτήριο την ελάχιστη μάζα

Μηχανές CoFe ελάχιστης μάζας			
Κριτήρια σύγκρισης	Μηχανή αναφοράς	Βέλτιστη μηχανή	Διαφορά
Απόδοση η (%)	84.54	85.47	+1.1%
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	45.94	45.43	-1.1%
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	36.21	22.83	-37%
Απώλειες σιδήρου (W)	590.59	648.54	+9.8%
Απώλειες χαλκού (W)	342.69	307.73	-10.2%
Απώλειες μαγνητών (W)	373.98	243.27	-35%
Σύνολο απωλειών (W)	1320.34	1246.11	-5.6%
Μάζα (kg)	20.59	20.21	-1.9%
Πυκνότητα ροπής (Nm/kg)	2.23	2.25	+0.9%

Από τις ανωτέρω συγκρίσεις γίνεται κατανοητό πως η διαδικασία της ανάλυσης ευαισθησίας δεν έχει σημαντική επίδραση όσον αφορά την ελαχιστοποίηση των απωλειών και την επίτευξη υψηλότερου βαθμού απόδοσης, αφού οι βέλτιστες μηχανές που προέκυψαν κατά την ανάλυση ευαισθησίας έχουν σχεδόν τις ίδιες γεωμετρικές παραμέτρους με αυτές των αντίστοιχων μηχανών αναφοράς. Έτσι, στην περίπτωση που κριτήριο σχεδίασης αποτελεί η επίτευξη της υψηλότερης απόδοσης, η απλούστευση της διαδικασίας βελτιστοποίησης μέσω της αναγωγής μιας υπάρχουσας «βέλτιστης» διατομής στο επιθυμητό ενεργό μήκος, φαίνεται να προσεγγίζει καλά το αποτέλεσμα που θα προέκυπτε από μια αναλυτική και χρονοβόρα ανάλυση ευαισθησίας.

Αντίθετα, τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας είναι ενθαρρυντικά στην περίπτωση που κριτήριο αποτελεί η ελαχιστοποίηση της μάζας, όπου και υπήρξε σημαντική βελτίωση στο σύνολο των

χαρακτηριστικών επίδοσης και απόδοσης της μηχανής με πυρήνα CoFe. Τα κυριότερα επιτεύγματα της βέλτιστης ως προς την μάζα μηχανής είναι:

- Μείωση των συνολικών απωλειών κατά **5.6%**
- Μείωση της μάζας κατά **1.9%**
- Μείωση της κυμάτωσης ροπής κατά **37%**

10. ΟΡΙΣΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΗΧΑΝΩΝ NiFe

Οι βασικές παράμετροι που παραμένουν σταθερές σε όλες τις προς σχεδίαση μηχανές πυρήνα NiFe είναι οι εξής:

Πίνακας 10.1. Σταθερές παράμετροι σχεδίασης μηχανών NiFe

Σταθερές παράμετροι σχεδίασης μηχανών	
Παράμετροι	Τιμές
m	3
lg (mm)	0.7
r_{edge} (mm)	1.5
$ToothTips$ (%)	13
$Tips2Tooth$ (%)	10
$SplitRatio$ (%)	50
$InnerRatio$ (%)	45
$MagnetDC$ (%)	75
$MagnetHeight$ (mm)	6

Οι παράμετροι σάρωσης για τις προς μελέτη γεωμετρίες ορίζονται ως εξής:

Πίνακας 10.2. Παράμετροι σάρωσης κατά τη σχεδίαση των μηχανών NiFe

Παράμετροι σάρωσης κατά τη σχεδίαση μηχανών	
Παράμετροι	Τιμές
$Poles$	[6 8 10]
$Tooth2SlotPercentage$ (%)	[30 : 5 : 50]
$Yoke2ToothPercentage$ (%)	[200 : 50 : 450]
R_{so} (mm)	[85 : 5 : 100]

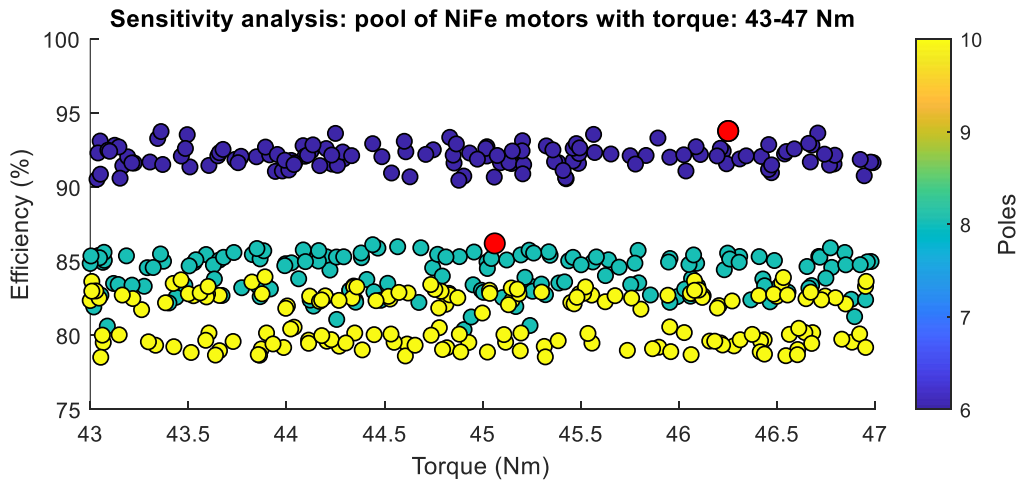
Ομοίως με πριν, θα σχεδιαστούν και θα αναλυθούν 360 μηχανές διαφορετικής διατομής και μοναδιαίου ενεργού μήκους. Ακόμα, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του μήκους της μηχανής στις ανωτέρω διατομές, αναλόγως την εξωτερική ακτίνα στάτη μελετώνται διαφορετικές τιμές ενεργού μήκους μηχανής, όπως εξηγείται παρακάτω.

Πίνακας 10.3. Σταθερές παράμετροι σχεδίασης μηχανών και εύρος τιμών προς εξέταση

Εξωτερική ακτίνα στάτη R_{so} (mm)	Ενεργό μήκος L (mm)
85, 90	[80 : 5 : 120]
95, 100	[60 : 5 : 100]

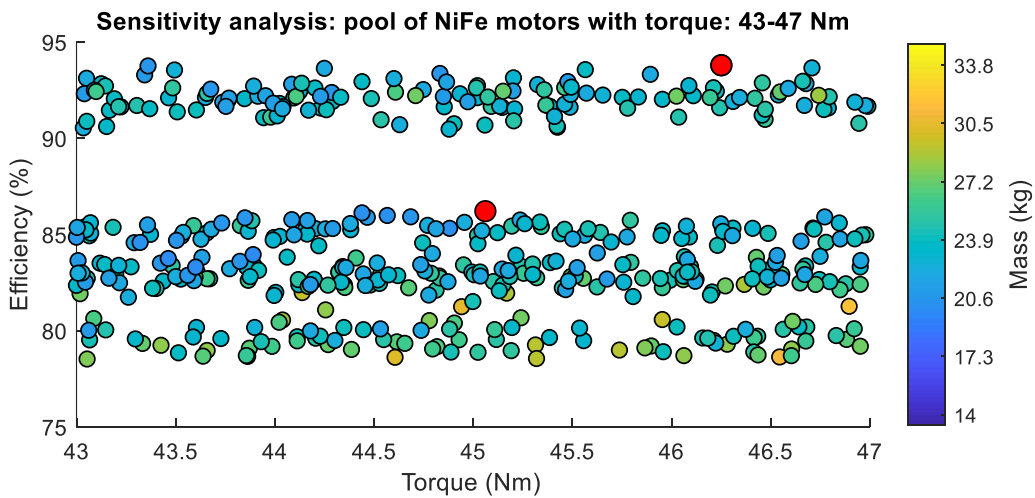
10.1 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για τις 3240 μηχανές που προέκυψαν, ενώ υποδεικνύονται οι επιλεγμένες μηχανές που πληρούν τα κριτήρια ροπής, απόδοσης και μάζας που θα αναπτυχθούν στη συνέχεια.

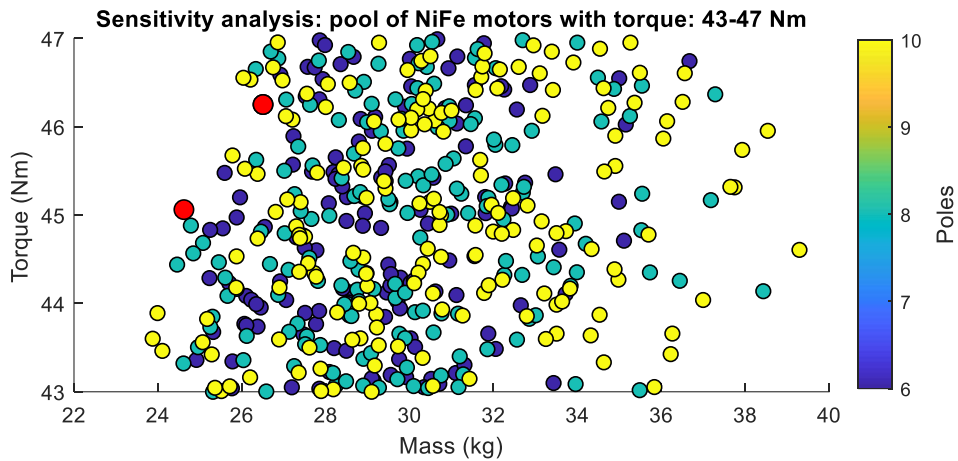


Σχήμα 10.1. Γραφική αναπαράσταση απόδοσης μηχανών που επιτυγχάνουν ροπή 43-47 Nm, συναρτήσει του αριθμού των πόλων. Υποδεικνύονται οι επιλεγμένες μηχανές NiFe.

Παρατηρείται πως οι 6πολικές κυριαρχούν όσον αφορά τον βαθμό απόδοσης, με τις 8πολικές και 10πολικές να μην διαφέρουν κατά πολύ μεταξύ τους όσον αφορά την απόδοση.



Σχήμα 10.2. Γραφική αναπαράσταση απόδοσης μηχανών που επιτυγχάνουν ροπή 43-47 Nm, συναρτήσει της μάζας. Υποδεικνύονται οι επιλεγμένες μηχανές NiFe.

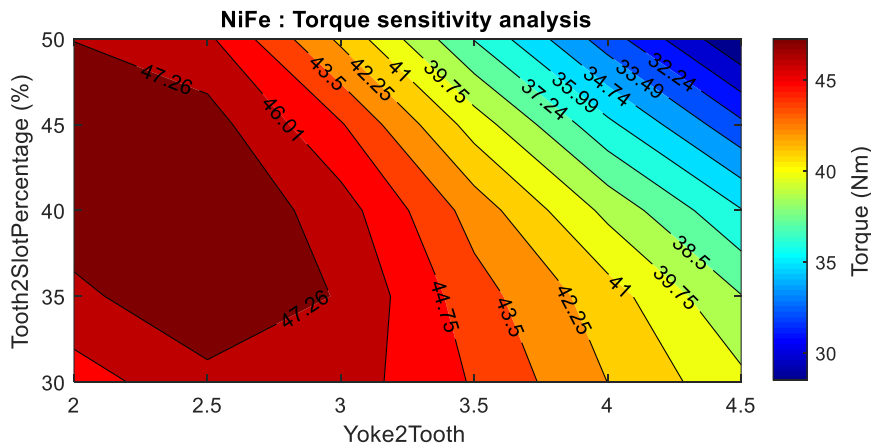


Σχήμα 10.3. Γραφική αναπαράσταση ροπής και μάζας μηχανών που επιτυγχάνουν ροπή 43-47 Nm, συναρτήσει του αριθμού των πόλων. Υποδεικνύονται οι επιλεγμένες μηχανές NiFe.

Όσον αφορά την κατανομή των μηχανών ως προς τη μάζα, παρατηρούμε πως οι περισσότερες μηχανές συγκεντρώνονται στα 26 – 32 kg, δηλαδή σε μεγαλύτερες μάζες από όλες τις άλλες μηχανές. Αυτό οφείλεται τόσο στην μεγάλη πυκνότητα που εμφανίζει το υλικό (βλ. Πίνακας 7.1), όσο και στην μικρότερη ικανότητα ανάπτυξης μαγνητικού πεδίου, που αντικατοπτρίζεται από την ανάγκη μεγαλύτερου ενεργού μήκους και ακτίνας. Ακόμα αξίζει να αναφερθεί πως οι μηχανές μεγαλύτερων πόλων φαίνεται να ξεκινάν από μικρότερες μάζας, δεδομένου του ελαφρύτερου μαγνητικού κυκλώματος που διαθέτουν.

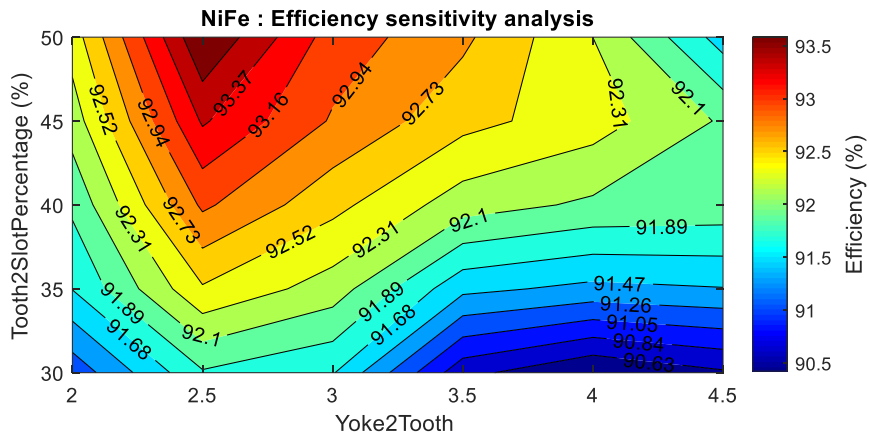
Όσον αφορά την μεταβολή των βασικών μεγεθών επίδοσης και απόδοσης γεωμετρικών παραμέτρων, τα περισσότερα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά των μηχανών SiFe 3%, επομένως παρακάτω θα μελετηθούν μόνο εκείνα τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν ενδιαφέρον με την αλλαγή του υλικού.

Στις παρακάτω αναλύσεις ευαισθησίας επιλέγεται να μελετηθεί η επίδραση του πάχους δοντιού και σώματος στάτη (yoke) σε βολικές μηχανές, σταθερής εξωτερικής ακτίνας στάτη $R_{SO} = 100mm$ και σταθερού ενεργού μήκους $L = 80mm$.

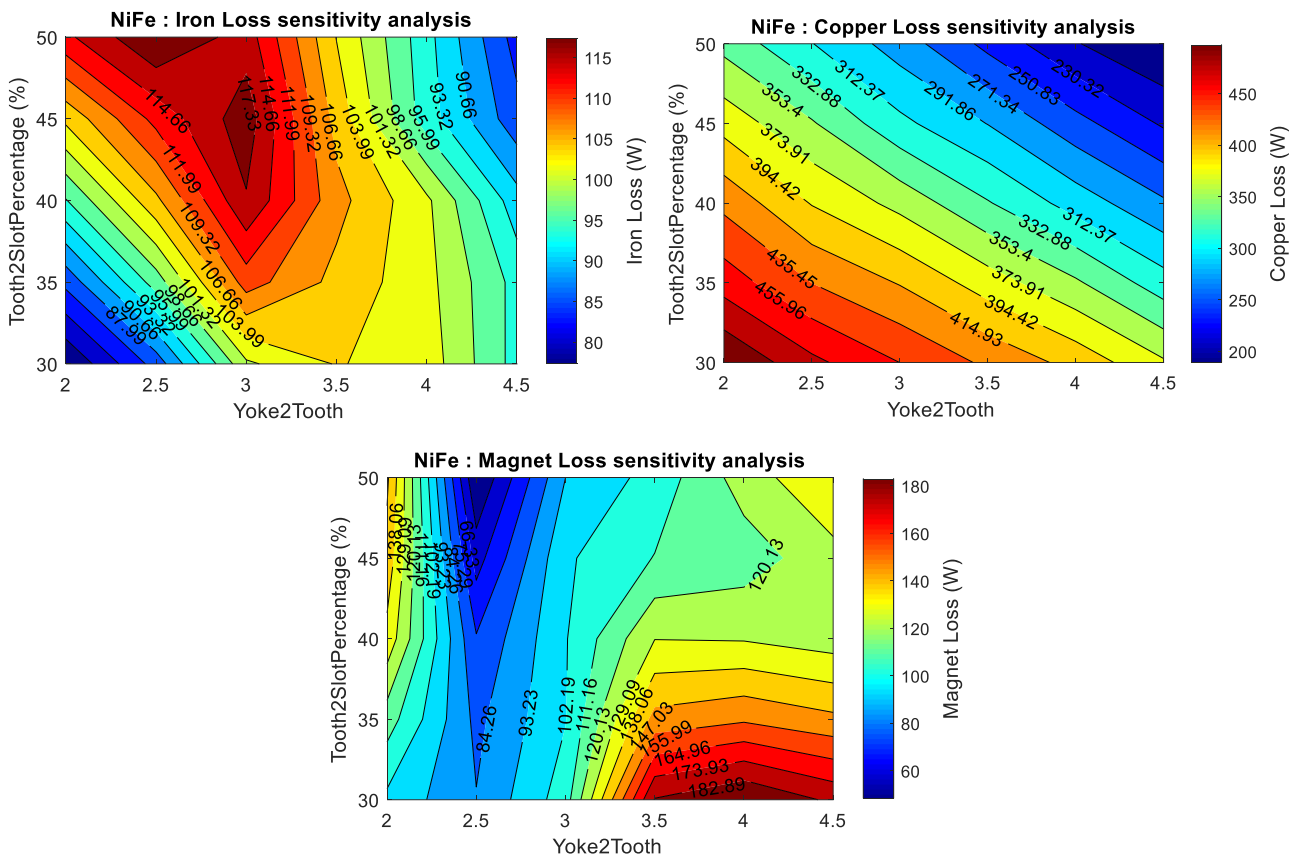


Σχήμα 10.4. Παραγόμενη ροπή επιλεγμένης μηχανής NiFe ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού και σώματος στάτη

Όπως ήταν αναμενόμενο, η αύξηση του πάχους των δοντιών ωφελεί τις γεωμετρίες NiFe όσον αφορά την παραγόμενη ροπή, ενώ αντίθετα η αύξηση του yoke μειώνει το εμβαδό της αύλακος και κατ' επέκταση την ηλεκτρική φόρτιση της μηχανής, οδηγώντας σε μείωση της ροπής.



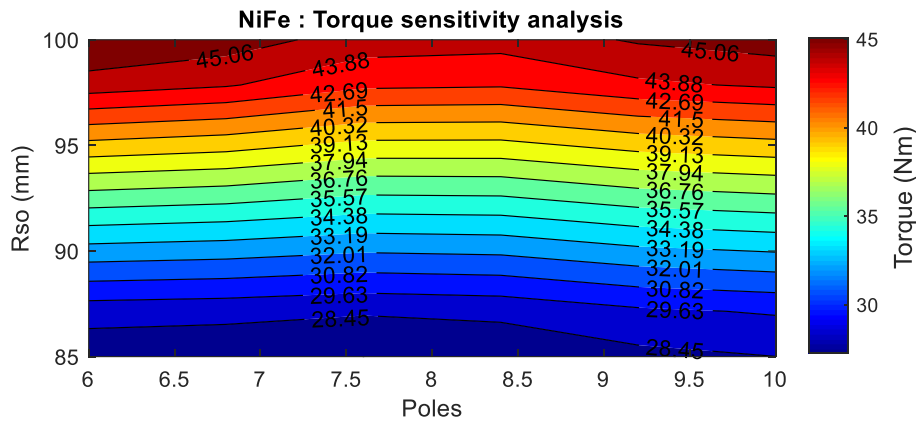
Σχήμα 10.5. Απόδοση επιλεγμένης μηχανής NiFe ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού και σώματος στάτη



Σχήμα 10.6. Απώλειες επιλεγμένης μηχανής NiFe ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού και σώματος στάτη

Όσον αφορά τις απώλειες χαλκού της μηχανής, φαίνεται να μειώνονται με την αύξηση του όγκου του σιδήρου (μεγαλύτερα πάχη δοντιών και yoke), αφού όπως είχαμε δει με αυτό τον τρόπο μειώνεται το εμβαδό και ο όγκος των τυλιγμάτων και κατ' επέκταση οι απώλειες χαλκού.

Οι απώλειες μαγνητών φαίνεται να μεγιστοποιούνται όσο αυξάνεται το πάχος του yoke. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί, δεδομένης της μείωσης της μαγνητικής αντίστασης του μαγνητικού κυκλώματος του πυρήνα της μηχανής όταν αυξάνεται το yoke [95], το οποίο αυξάνει αντίστοιχα την μαγνητική επαγωγή διακένου, στο οποίο βρίσκονται οι επιφανειακοί μαγνήτες.



Τέλος, μελετώντας μηχανές NiFe με $Yoke2Tooth = 2.5$ και $Tooth2SlotPercentage = 45\%$, προκύπτει πως η αύξηση του αριθμού των πόλων δεν φαίνεται να έχει ιδιαίτερη επίδραση στην παραγόμενη ροπή, ιδιαίτερα για τις μικρές ακτίνες, σε αντίθεση με την αύξηση της εξωτερικής ακτίνας στάτη που επιφέρει σημαντική αύξηση της παραγόμενης ροπής, όπως ήταν αναμενόμενο.

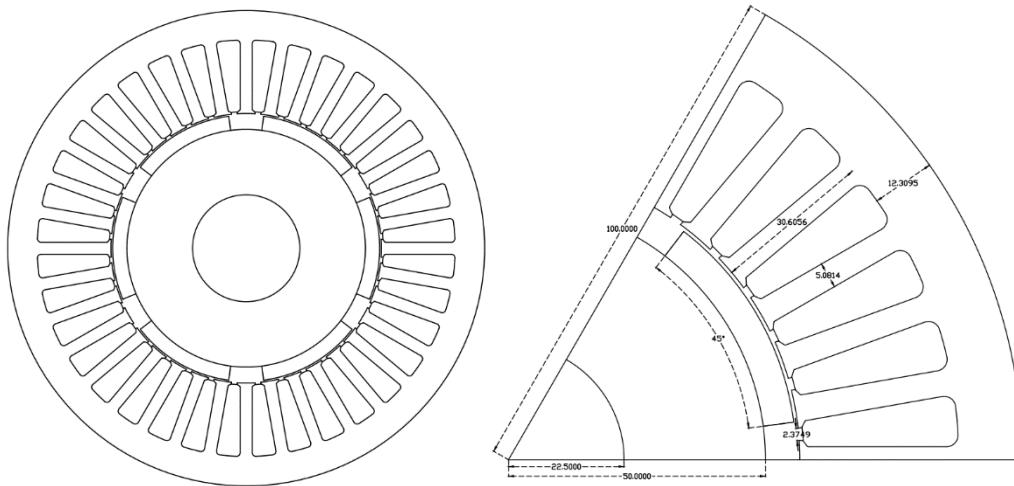
10.1.1 Μηχανή NiFe με τις ελάχιστες συνολικές απώλειες και την υψηλότερη απόδοση

Η μηχανή NiFe με τις ελάχιστες συνολικές απώλειες έχει και την υψηλότερη απόδοση από όλο το pool των μηχανών που προέκυψαν κατά την ανάλυση ευαισθησίας. Παρακάτω φαίνονται οι τιμές των μεταβλητών σχεδίασης για τις οποίες προκύπτει η βέλτιστη αυτή μηχανή.

Πίνακας 10.4. Τιμές μεταβλητών παραμέτρων της μηχανής NiFe με την υψηλότερη απόδοση

Χαρακτηριστικά μηχανής NiFe υψηλότερης απόδοσης	
Παράμετροι	Τιμές
<i>Poles</i>	6
<i>R_{so} (mm)</i>	100
<i>L (mm)</i>	80
<i>Yoke2Tooth</i>	2.5
<i>Tooth2SlotPercentage (%)</i>	50

Στη συνέχεια παρατίθεται ενδεικτικά η διατομή και οι διαστάσεις για την πλήρη γεωμετρία, καθώς και για τη διαμόρφωση ενός πόλου.



Σχήμα 10.7. Διατομή και διαστάσεις επιλεγμένης μηχανής NiFe

Όσον αφορά τις απαιτήσεις ψύξης της επιλεγμένης μηχανής θα έχουμε:

$$A \cdot J = \frac{J^2 \cdot A_{cu}}{\tau_u} = \frac{4^2 \cdot (10^6)^2 \cdot 0.5 \cdot 225.15 \cdot 10^{-6}}{\frac{\pi \cdot 0.1127}{36}} = 18.31 \cdot 10^{10} A^2/m^3 \quad (10.1)$$

Το γινόμενο $A \cdot J = 18.31 \cdot 10^{10} A^2/m^3$ είναι μικρότερο του ανώτατου ορίου ψύξης που υπολογίστηκε στη σχέση (5.8), επομένως η μηχανή λειτουργεί καλά σε κατάσταση μέγιστης ροπής, υποθέτοντας φυσική ψύξη. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την πεδιακή ανάλυση της ανωτέρω μηχανής.

Πίνακας 10.5. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης της μηχανής NiFe με την υψηλότερη απόδοση

Αποτελέσματα μηχανής NiFe υψηλότερης απόδοσης	
Παράμετροι	Τιμές
Απόδοση η (%)	93.79
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	46.25
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	26.07
Επίδοση P_{out} (kW)	7.27
Μάζα (kg)	26.51
Απώλειες σιδήρου (W)	119.99
Απώλειες χαλκού (W)	313.03
Απώλειες μαγνητών (W)	48.39
Σύνολο απωλειών (W)	481.02

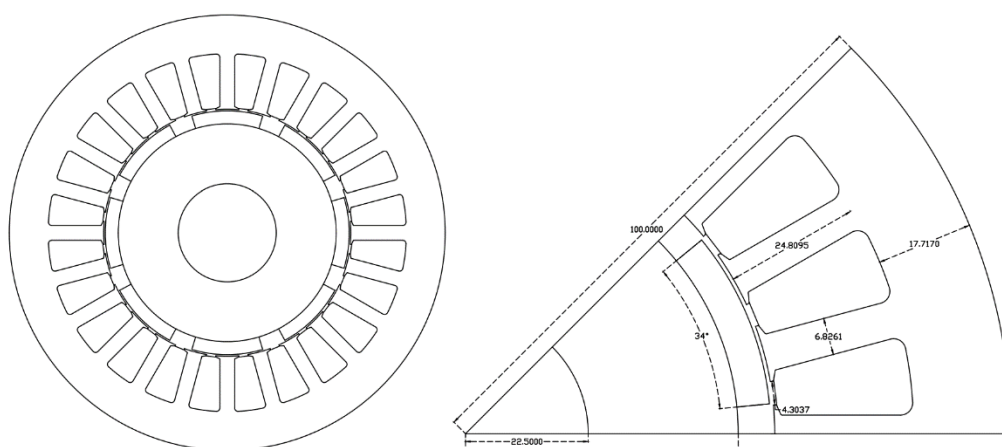
10.1.2 Μηχανή NiFe με την ελάχιστη μάζα

Η μηχανή CoFe με την μικρότερη μάζα, προκύπτει για τις παρακάτω τιμές των μεταβλητών σχεδίασης.

Πίνακας 10.6. Τιμές μεταβλητών παραμέτρων της μηχανής NiFe με την ελάχιστη μάζα

Χαρακτηριστικά μηχανής NiFe ελάχιστης μάζας	
Παράμετροι	Τιμές
<i>Poles</i>	8
<i>R_{so}</i> (mm)	100
<i>L</i> (mm)	80
<i>Yoke2Tooth</i>	4
<i>Tooth2SlotPercentage</i> (%)	45

Στη συνέχεια παρατίθεται ενδεικτικά η διατομή και οι διαστάσεις για την πλήρη γεωμετρία, καθώς και για τη διαμόρφωση ενός πόλου.



Σχήμα 10.8. Διατομή και διαστάσεις επιλεγμένης μηχανής NiFe

Όσον αφορά τις απαιτήσεις ψύξης της επιλεγμένης μηχανής θα έχουμε:

$$A \cdot J = \frac{J^2 \cdot A_{cu}}{\tau_u} = \frac{4^2 \cdot (10^6)^2 \cdot 0.5 \cdot 280.51 \cdot 10^{-6}}{\frac{\pi \cdot 0.1127}{24}} = 15.21 \cdot 10^{10} \text{ A}^2/\text{m}^3 \quad (10.2)$$

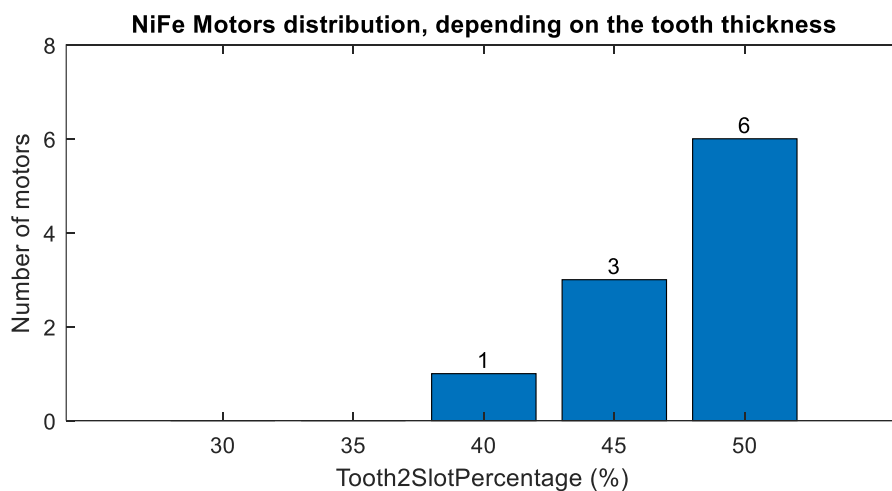
Το γινόμενο $A \cdot J = 15.21 \cdot 10^{10} \text{ A}^2/\text{m}^3$ είναι μικρότερο του ανώτατου ορίου ψύξης που υπολογίστηκε στη σχέση (5.8), επομένως η μηχανή λειτουργεί καλά σε κατάσταση μέγιστης ροπής, υποθέτοντας φυσική ψύξη. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την πεδιακή ανάλυση της ανωτέρω μηχανής.

Πίνακας 10.7. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης της μηχανής NiFe με την ελάχιστη μάζα

Αποτελέσματα μηχανής NiFe ελάχιστης μάζας	
Παράμετροι	Τιμές
Απόδοση η (%)	86.20
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	45.06
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	62.25
Επίδοση P_{out} (kW)	7.08
Μάζα (kg)	24.62
Απώλειες σιδήρου (W)	494.86
Απώλειες χαλκού (W)	365.93
Απώλειες μαγνητών (W)	272.16
Σύνολο απωλειών (W)	1133.14

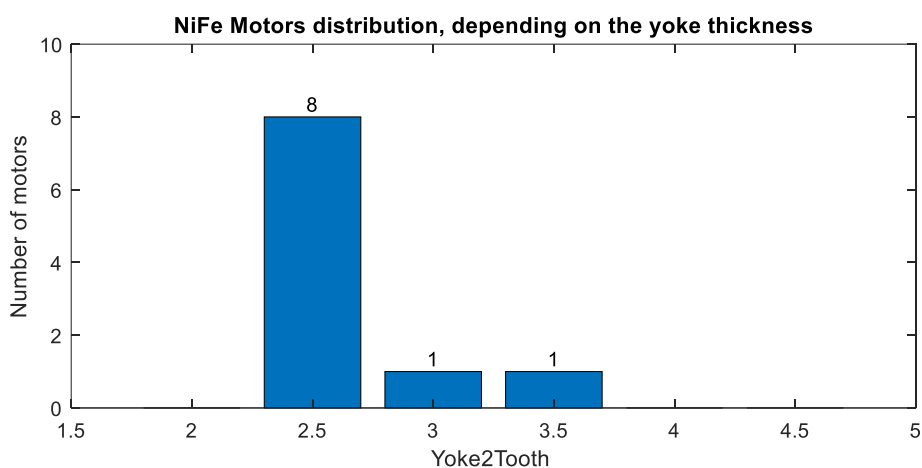
10.2 Τάση σχεδίασης μηχανών NiFe

Μετά την επιλογή των βέλτιστων μηχανών βάση κάθε κριτηρίου, μελετήθηκε η κατανομή των μηχανών με επίδοση 45 – 47 Nm και απόδοση άνω του 93%, προκειμένου να γίνει αντιληπτό το trend σχεδίασης σχετικά με το πάχος δοντιών και σώματος στάτη υλικού NiFe. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής παρατίθενται σε ιστογράμματα παρακάτω.



Σχήμα 10.9. Κατανομή μηχανών NiFe που παράγουν ροπή 45Nm – 47Nm και έχουν απόδοση > 93%, ανάλογα με το πάχος του δοντιού στάτη

Όσον αφορά τα δόντια του στάτη, παρατηρείται πως η κατανομή των μηχανών που επιτυγχάνουν τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης, συγκεντρώνονται σε δόντια πάχους 50% του συνολικού μεγέθους άλακος και δοντιού. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει την μικρότερη ικανότητα του υλικού όσον αφορά την ανάπτυξη μαγνητικής επαγωγής, αφού απαιτείται μεγαλύτερη επιφάνεια σιδήρου προκειμένου να περάσει αρκετή μαγνητική ροή από τα δόντια προς το yoke. Επιβεβαιώνεται με αυτό τον τρόπο η αρχική μας θεώρηση πως υλικά χαμηλότερων δυνατοτήτων μαγνητικής διαπερατότητας, επωφελούνται από σχεδιάσεις παχύτερων δοντιών.



Σχήμα 10.10. Κατανομή μηχανών NiFe που παράγουν ροπή 45Nm – 47Nm και έχουν απόδοση > 93%, ανάλογα με το πάχος του σώματος στάτη

Όσον αφορά το πάχος του yoke, παρατηρείται πως ιδανική επιλογή αποτελεί το σώμα στάτη να είναι 2.5 φορές το πάχος του δοντιού. Το trend αυτό είναι απολύτως λογικό, μιας και οι περισσότερες διαμορφώσεις δοντιών είναι 45-50%, επομένως αν το *Yoke2Tooth* έπαιρνε μεγαλύτερες τιμές από 2.5, θα προέκυπταν διαμορφώσεις υπερβολικά μεγάλου yoke που δεν συνεισφέρει στην παραγωγή ροπής, αλλά απλώς αυξάνει τις απώλειες πυρήνα.

10.3 Σύγκριση βέλτιστων μηχανών NiFe με τις μηχανές αναφοράς

Μετά την εξαγωγή των βέλτιστων μηχανών NiFe από το pool που δημιουργήθηκε κατά την ανάλυση ευαισθησίας των γεωμετρικών παραμέτρων, σειρά έχει η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μεθόδου, σε σχέση με τις μηχανές αναφοράς που δημιουργήθηκαν βάση της βέλτιστης διατομής SiFe 3% στο Κεφάλαιο 8.

Πίνακας 10.8. Σύγκριση χαρακτηριστικών *reference* και βελτιστοποιημένης μηχανής NiFe, με κριτήριο τις ελάχιστες συνολικές απώλειες

Μηχανές NiFe ελάχιστων συνολικών απωλειών			
Κριτήρια σύγκρισης	Μηχανή αναφοράς	Βέλτιστη μηχανή	Διαφορά
Απόδοση η (%)	92.61	93.79	+1.3%
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	45.01	46.25	+2.8%
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	56.62	26.07	-54%
Απώλειες σιδήρου (W)	123.07	119.99	-2.5%
Απώλειες χαλκού (W)	319.63	313.03	-2.1%
Απώλειες μαγνητών (W)	121.19	48.39	-60.1%
Σύνολο απωλειών (W)	564.17	481.02	-14.7%
Μάζα (kg)	30.99	26.51	-14.5%
Πυκνότητα ροπής (Nm/kg)	1.45	1.74	+20%

Πίνακας 10.9. Σύγκριση χαρακτηριστικών *reference* και βελτιστοποιημένης μηχανής NiFe, με κριτήριο την υψηλότερη απόδοση

Μηχανές NiFe υψηλότερης απόδοσης			
Κριτήρια σύγκρισης	Μηχανή αναφοράς	Βέλτιστη μηχανή	Διαφορά
Απόδοση η (%)	92.78	93.79	+1.1%
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	45.33	46.25	+2%
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	51.14	26.07	-49%
Απώλειες σιδήρου (W)	125.81	119.99	-4.6%
Απώλειες χαλκού (W)	326.20	313.03	-4%
Απώλειες μαγνητών (W)	101.85	48.39	-52.5%
Σύνολο απωλειών (W)	554.10	481.02	-13.2%
Μάζα (kg)	28.40	26.51	-6.7%
Πυκνότητα ροπής (Nm/kg)	1.59	1.74	+9.4%

Πίνακας 10.10. Σύγκριση χαρακτηριστικών reference και βελτιστοποιημένης μηχανής CoFe, με κριτήριο την ελάχιστη μάζα

Μηχανές NiFe ελάχιστης μάζας			
Κριτήρια σύγκρισης	Μηχανή αναφοράς	Βέλτιστη μηχανή	Διαφορά
Απόδοση η (%)	85.74	86.20	+0.5%
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	45.35	45.06	-0.6%
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	87.30	62.25	-28.7%
Απώλειες σιδήρου (W)	475.78	494.86	+4%
Απώλειες χαλκού (W)	415.95	365.93	-12%
Απώλειες μαγνητών (W)	292.69	272.16	-7%
Σύνολο απωλειών (W)	1184.77	1133.14	-4.4%
Μάζα (kg)	26.51	24.62	-7.1%
Πυκνότητα ροπής (Nm/kg)	1.71	1.83	+7%

Οι ανωτέρω συγκρίσεις των αποτελεσμάτων φανερόνουν την σημαντική επίδραση της βελτιστοποίησης μέσω ανάλυσης ευαισθησίας παραμέτρων στα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης για όλα τα προς μελέτη κριτήρια, με την μεγαλύτερη διαφορά να επιτυγχάνεται στη μηχανή NiFe με τις ελάχιστες συνολικές απώλειες. Τα κυριότερα επιτεύγματα της βελτιστοποίησης των μηχανών είναι:

- Αύξηση του βαθμού απόδοσης όλων των μηχανών από 0.5% έως και **1.3%**
- Αύξηση της πυκνότητας ροπής όλων των μηχανών από 7% έως και **20%**
- Μείωση της μάζας όλων των μηχανών από 6.7% έως και **14.5%**
- Μείωση της κυμάτωσης ροπής όλων των μηχανών από 28.7% έως και **54%**

Ο βασικότερος λόγος της σημαντικής βελτίωσης των μηχανών όσον αφορά το NiFe, είναι πως οι βέλτιστες μηχανές που επιλέχθηκαν είχαν στο σύνολο τους δόντια στάτη με σημαντικά μεγαλύτερο πάχος από αυτό των

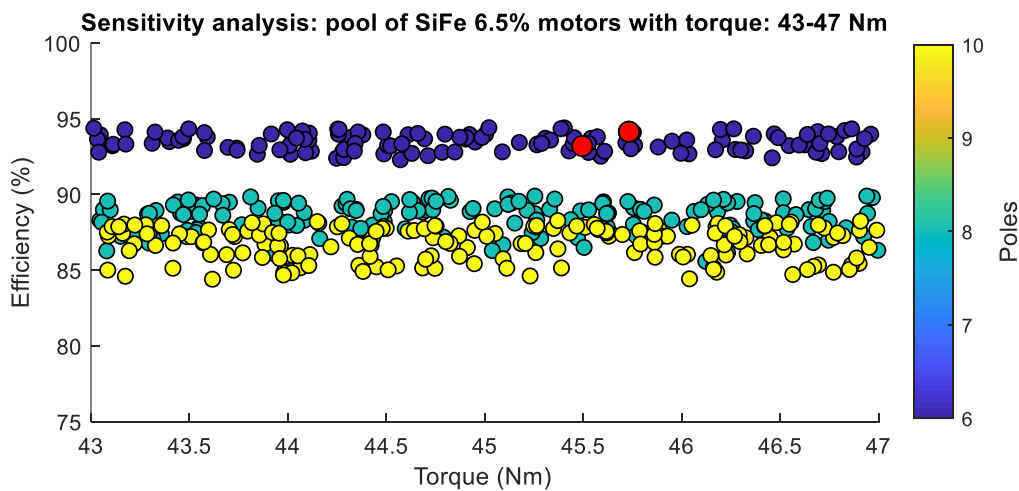
μηχανών αναφοράς, ενώ ακόμα η βέλτιστη ακτίνα προέκυψε στα $100mm$, με αποτέλεσμα να μειωθεί σημαντικά το μεγάλο ενεργό μήκος των μηχανών αναφοράς, οδηγώντας έτσι σε πιο δισκοειδή μορφή μηχανής.

11. ΟΡΙΣΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΗΧΑΝΩΝ SiFe 6.5%

Οι βασικές παράμετροι που παραμένουν σταθερές σε όλες τις προς σχεδίαση μηχανές πυρήνα SiFe 6.5% είναι ίδιες με τις σταθερές παραμέτρους κατά τη σχεδίαση μηχανών SiFe 3%, όπως αυτές παρατέθηκαν προηγουμένως (Πίνακας 8.1). Ομοίως ισχύει για τις μεταβλητές σχεδίασης, καθώς και για τον αριθμό πόλων και αυλάκων ανά πόλο και φάση (Πίνακας 8.2).

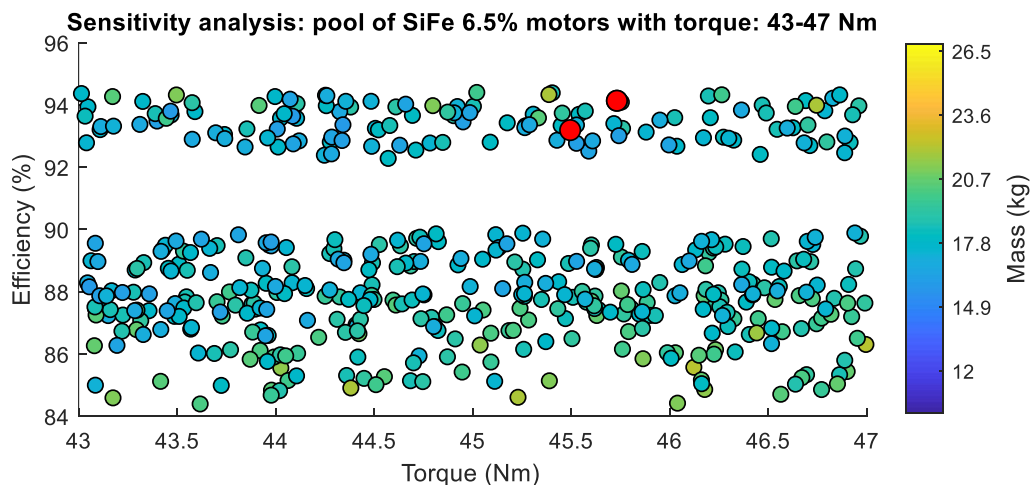
11.1 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για τις 3240 μηχανές SiFe 6.5% που προέκυψαν, ενώ υποδεικνύονται οι επιλεγμένες μηχανές που πληρούν τα κριτήρια ελάχιστων απωλειών, υψηλότερης απόδοσης και μικρότερης μάζας.

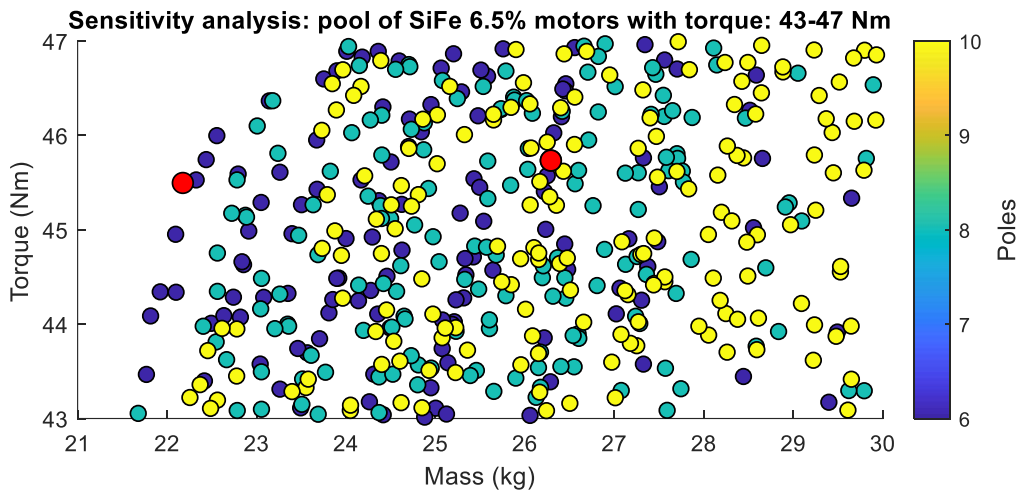


Σχήμα 11.1. Γραφική αναπαράσταση απόδοσης μηχανών που επιτυγχάνουν ροπή 43-47 Nm, συναρτήσει του αριθμού των πόλων. Υποδεικνύονται οι επιλεγμένες μηχανές SiFe 6.5%.

Όπως ήταν αναμενόμενο από τα αντίστοιχα αποτελέσματα του SiFe 3%, οι 6πολικές μηχανές φαίνεται να κυριαρχούν όσον αφορά την απόδοση, αν και είναι εμφανής η βελτίωση της απόδοσης (που αυξάνεται έως και 10% σε κάποιες περιπτώσεις) των 8πολικών και 10πολικών σε σχέση με τις μηχανές συμβατικού ατσαλιού (βλ. Σχήμα 8.4).



Σχήμα 11.2. Γραφική αναπαράσταση απόδοσης μηχανών που επιτυγχάνουν ροπή 43-47 Nm, συναρτήσει της μάζας. Υποδεικνύονται οι επιλεγμένες μηχανές SiFe 6.5%.

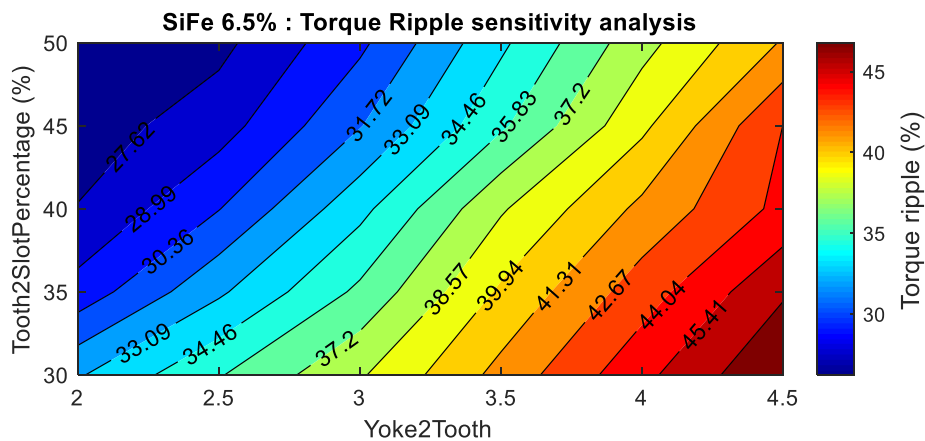


Σχήμα 11.3. Γραφική αναπαράσταση ροπής και μάζας μηχανών που επιτυγχάνουν ροπή 43-47 Nm, συναρτήσει του αριθμού των πόλων. Υποδεικνύονται οι επιλεγμένες μηχανές SiFe 6.5%.

Όσον αφορά την κατανομή των μηχανών ως προς τη μάζα, παρατηρούμε πως οι περισσότερες μηχανές συγκεντρώνονται στα 23 – 27 kg, ενώ η αύξηση του αριθμού των πόλων οδηγεί σε βαρύτερες μηχανές, κατ' αντιστοιχία με τα αποτελέσματα του SiFe 3% (βλ. Σχήμα 8.6).

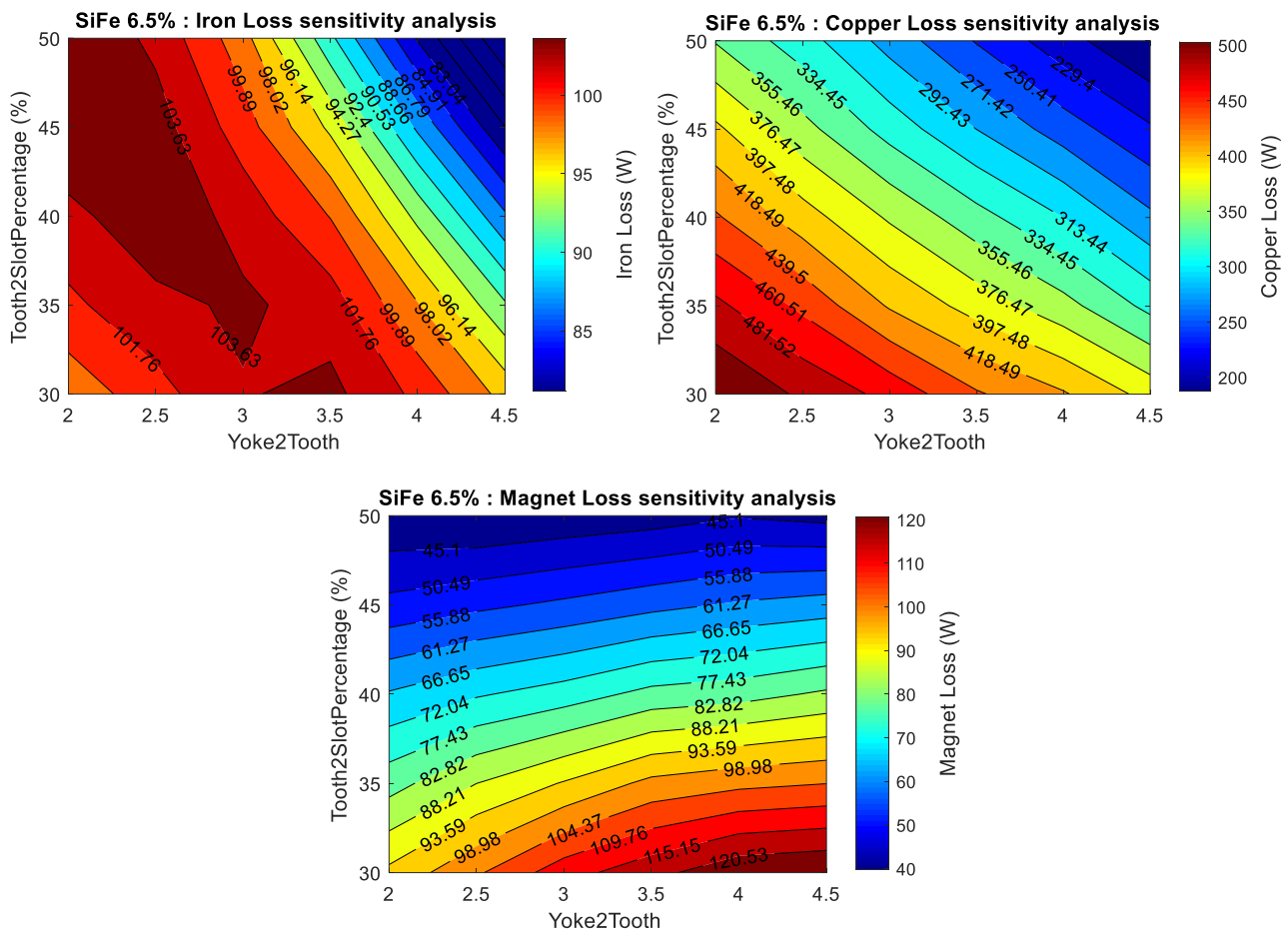
Όσον αφορά την μεταβολή των βασικών μεγεθών επίδοσης και απόδοσης γεωμετρικών παραμέτρων, τα περισσότερα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά των μηχανών SiFe 3%, επομένως παρακάτω θα μελετηθούν μόνο εκείνα τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν ενδιαφέρον με την αλλαγή του υλικού.

Στις παρακάτω αναλύσεις ευαισθησίας επιλέγεται να μελετηθεί η επίδραση του πάχους δοντιού και σώματος στάτη (yoke) σε βπολικές μηχανές, σταθερής εξωτερικής ακτίνας στάτη $R_{SO} = 95mm$ και σταθερού ενεργού μήκους $L = 95mm$.



Σχήμα 11.4. Κυμάτωση ροπής επιλεγμένης μηχανής SiFe 6.5% ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού και σώματος στάτη

Όσον αφορά την κυμάτωση ροπής, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η αύξηση του πάχους των δοντιών μειώνει την κυμάτωση ροπής, αποτέλεσμα το οποίο συμφωνεί με την αναλυτική μελέτη της επίδρασης τους πάχους των δοντιών και του σχήματος του πέλδου των δοντιών στο [95]. Ακόμα, αξίζει να σημειωθεί πως κύρια διαφορά αποτελούν οι υψηλότερες τιμές που λαμβάνει σε όλο το πεδίο ορισμού των γεωμετρικών παραμέτρων. Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, αυτό συμβαίνει λόγω του χαμηλότερου σημείου κορεσμού του SiFe 6.5%, επομένως για την ίδια τροφοδότηση ρευμάτων, η μηχανή λειτουργεί πιο βαθιά στον κορεσμό, επομένως εμφανίζει υψηλότερη κυμάτωση ροπής.



Σχήμα 11.5. Απώλειες επιλεγμένης μηχανής SiFe 6.5% ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού και σώματος στάτη

Οι μεταβολές των απωλειών πυρήνα, χαλκού και μαγνητών είναι αντίστοιχες με αυτές των μηχανών SiFe 3% (βλ. Σχήμα 8.12), με την κύρια διαφορά πως οι απώλειες πυρήνα είναι σημαντικά μειωμένες (έως και 50% σε ορισμένες περιπτώσεις) λόγω των πολύ χαμηλών ειδικών απωλειών πυρήνα του SiFe 6.5%, ενώ οι απώλειες μαγνητών εμφανίζονται ελαφρώς αυξημένες, λόγω της λειτουργίας του πυρήνα πιο βαθιά στον κορεσμό.

11.1.1 Μηχανή SiFe 6.5% με τις ελάχιστες συνολικές απώλειες και την υψηλότερη απόδοση

Η μηχανή SiFe 6.5% με την υψηλότερη απόδοση, προκύπτει για τις παρακάτω τιμές των μεταβλητών σχεδίασης.

Πίνακας 11.1. Τιμές μεταβλητών παραμέτρων της μηχανής SiFe 6.5% με την υψηλότερη απόδοση

Χαρακτηριστικά μηχανής SiFe 6.5% υψηλότερης απόδοσης	
Παράμετροι	Τιμές
<i>Poles</i>	6
<i>R_{so}</i> (mm)	95
<i>L</i> (mm)	95
<i>Yoke2Tooth</i>	3.5
<i>Tooth2SlotPercentage</i> (%)	45

Όσον αφορά τις απαιτήσεις ψύξης της επιλεγμένης μηχανής θα έχουμε:

$$A \cdot J = \frac{J^2 \cdot A_{cu}}{\tau_u} = \frac{4^2 \cdot (10^6)^2 \cdot 0.5 \cdot 184.1 \cdot 10^{-6}}{\frac{\pi \cdot 0.1077}{36}} = 15.67 \cdot 10^{10} A^2/m^3 \quad (11.1)$$

Το γινόμενο $A \cdot J = 15.67 \cdot 10^{10} A^2/m^3$ είναι μικρότερο του ανώτατου ορίου ψύξης που υπολογίστηκε στη σχέση (5.8), επομένως η μηχανή λειτουργεί καλά σε κατάσταση μέγιστης ροπής, υποθέτοντας φυσική ψύξη. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την πεδιακή ανάλυση της ανωτέρω μηχανής.

Πίνακας 11.2. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης της μηχανής SiFe 6.5% με την υψηλότερη απόδοση

Αποτελέσματα μηχανής SiFe 6.5% υψηλότερης απόδοσης	
Παράμετροι	Τιμές
Απόδοση η (%)	94.13
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	45.73
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	35.59
Επίδοση P_{out} (kW)	7.18
Μάζα (kg)	26.29
Απώλειες σιδήρου (W)	95.76
Απώλειες χαλκού (W)	292.33
Απώλειες μαγνητών (W)	59.66
Σύνολο απωλειών (W)	447.95

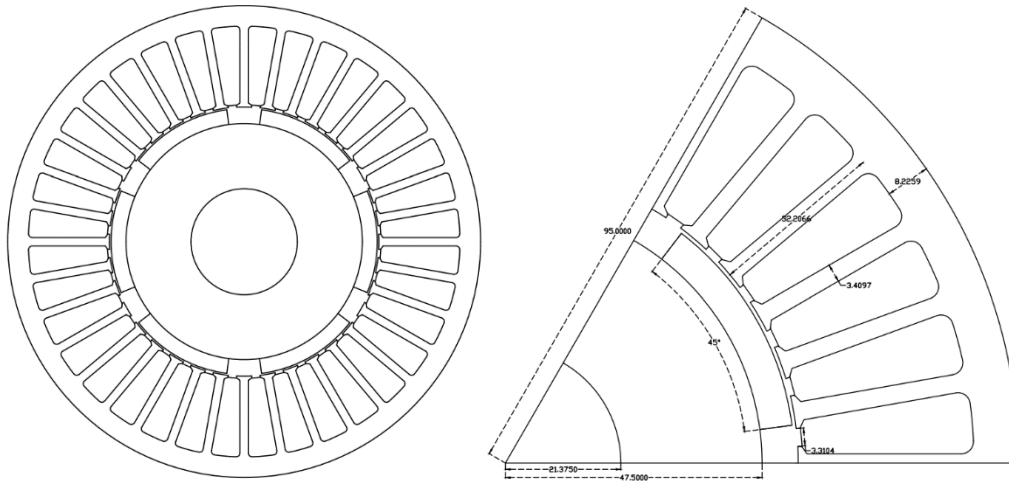
11.1.2 Μηχανή SiFe 6.5% με την ελάχιστη μάζα

Η μηχανή SiFe 6.5% με την ελάχιστη μάζα, προκύπτει για τις παρακάτω τιμές των μεταβλητών σχεδίασης.

Πίνακας 11.3. Τιμές μεταβλητών παραμέτρων της μηχανής SiFe 6.5% με την ελάχιστη μάζα

Χαρακτηριστικά μηχανής SiFe 6.5% ελάχιστης μάζας	
Παράμετροι	Τιμές
<i>Poles</i>	6
R_{so} (mm)	95
L (mm)	75
<i>Yoke2Tooth</i>	2.5
<i>Tooth2SlotPercentage</i> (%)	35

Στη συνέχεια παρατίθεται ενδεικτικά η διατομή και οι διαστάσεις για την πλήρη γεωμετρία, καθώς και για τη διαμόρφωση ενός πόλου.



Σχήμα 11.6. Διατομή και διαστάσεις επιλεγμένης μηχανής SiFe 6.5%

Όσον αφορά τις απαιτήσεις ψύξης της επιλεγμένης μηχανής θα έχουμε:

$$A \cdot J = \frac{J^2 \cdot A_{cu}}{\tau_u} = \frac{4^2 \cdot (10^6)^2 \cdot 0.5 \cdot 184.1 \cdot 10^{-6}}{\frac{\pi \cdot 0.1077}{36}} = 15.67 \cdot 10^{10} A^2/m^3 \quad (11.2)$$

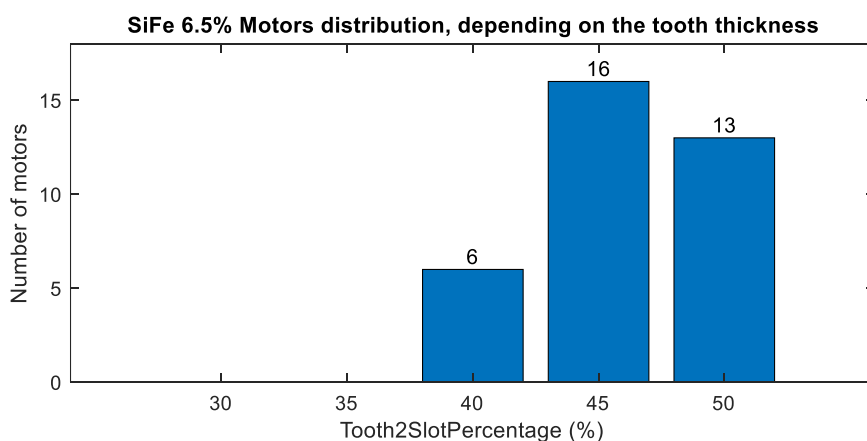
Το γινόμενο $A \cdot J = 15.67 \cdot 10^{10} A^2/m^3$ είναι μικρότερο του ανώτατου ορίου ψύξης που υπολογίστηκε στη σχέση (5.8), επομένως η μηχανή λειτουργεί καλά σε κατάσταση μέγιστης ροπής, υποθέτοντας φυσική ψύξη. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την πεδιακή ανάλυση της ανωτέρω μηχανής.

Πίνακας 11.4. Αποτελέσματα σχεδίασης και πεδιακής ανάλυσης της μηχανής SiFe 6.5% με την ελάχιστη μάζα

Αποτελέσματα μηχανής SiFe 6.5% ελάχιστης μάζας	
Παράμετροι	Τιμές
Απόδοση η (%)	93.19
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	45.50
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	32.86
Επίδοση P_{out} (kW)	7.15
Μάζα (kg)	22.18
Απώλειες σιδήρου (W)	81.37
Απώλειες χαλκού (W)	371.30
Απώλειες μαγνητών (W)	69.63
Σύνολο απωλειών (W)	522.29

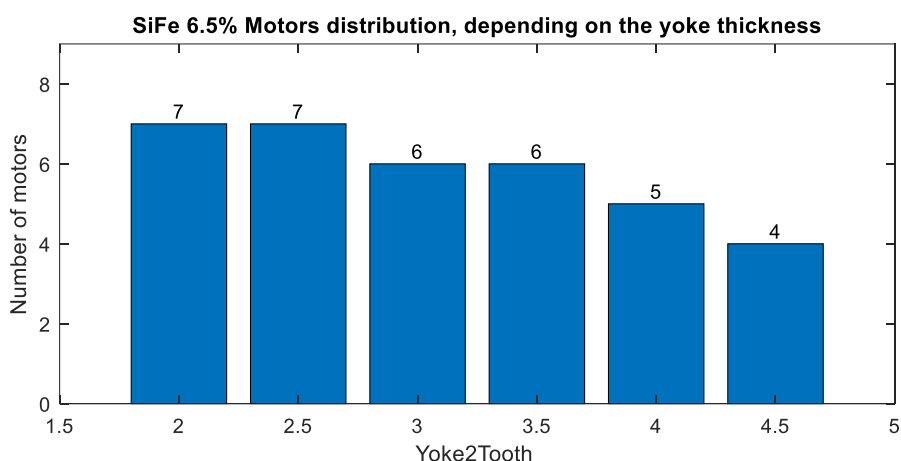
11.2 Τάση σχεδίασης μηχανών SiFe 6.5%

Μετά την επιλογή των βέλτιστων μηχανών βάση κάθε κριτηρίου, μελετήθηκε η κατανομή των μηχανών με επίδοση 45 – 47 Nm και απόδοση άνω του 94%, προκειμένου να γίνει αντιληπτή η τάση (trend) σχεδίασης σχετικά με το πάχος δοντιών και σώματος στάτη υλικού SiFe 6.5%. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής παρατίθενται σε ιστογράμματα παρακάτω.



Σχήμα 11.7. Κατανομή μηχανών SiFe 6.5% που παράγουν ροπή 45Nm – 47Nm και έχουν απόδοση > 94%, ανάλογα με το πάχος του δοντιού στάτη

Όσον αφορά τα δόντια του στάτη, παρατηρείται πως η κατανομή των μηχανών που επιτυγχάνουν τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης, συγκεντρώνονται σε παχύτερα δόντια και συγκεκριμένα μεταξύ 40 και 50% του συνολικού μεγέθους αύλακος και δοντιού, με την ιδανική επιλογή να είναι το 45%. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά του συμβατικού ατσαλιού που παρουσιάζονται στην ενότητα 8.3, αφού τα υλικά μοιράζονται περίπου τις ίδιες ιδιότητες, αν και η μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε σίδηρο, έχει ως αποτέλεσμα μικρότερες απώλειες πυρήνα και τελικά μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης, όπως φαίνεται παραπάνω.



Σχήμα 11.8. Κατανομή μηχανών SiFe 6.5% που παράγουν ροπή 45Nm – 47Nm και έχουν απόδοση > 94%, ανάλογα με το πάχος του σώματος στάτη

Τέλος, όσον αφορά το πάχος του σώματος στάτη SiFe 6.5%, δεν φαίνεται να υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο επιλογής, αν και η ελαφρώς μεγαλύτερη συγκέντρωση μηχανών παρατηρείται σε μικρότερα πάχη yoke.

11.3 Σύγκριση βέλτιστων μηχανών SiFe 6.5% με τις μηχανές αναφοράς

Μετά την εξαγωγή των βέλτιστων μηχανών SiFe 6.5% από το pool που δημιουργήθηκε κατά την ανάλυση ευαισθησίας των γεωμετρικών παραμέτρων, σειρά έχει η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μεθόδου, σε σχέση με τις μηχανές αναφοράς που δημιουργήθηκαν βάση της βέλτιστης διατομής SiFe 3% στο Κεφάλαιο 8.

Πίνακας 11.5. Σύγκριση χαρακτηριστικών reference και βελτιστοποιημένης μηχανής SiFe 6.5%, με κριτήριο τις ελάχιστες συνολικές απώλειες

Μηχανές SiFe 6.5% ελάχιστων συνολικών απωλειών			
Κριτήρια σύγκρισης	Μηχανή αναφοράς	Βέλτιστη μηχανή	Διαφορά
Απόδοση η (%)	94.13	94.13	-
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	45.25	45.73	+1.1%
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	35.59	35.59	-
Απώλειες σιδήρου (W)	94.76	95.76	+1.1%
Απώλειες χαλκού (W)	289.60	292.33	+0.9%
Απώλειες μαγνητών (W)	59.03	59.66	+1.1%
Σύνολο απωλειών (W)	443.39	447.95	+1%
Μάζα (kg)	26.02	26.29	+1%
Πυκνότητα ροπής (Nm/kg)	1.74	1.74	-

Πίνακας 11.6. Σύγκριση χαρακτηριστικών reference και βελτιστοποιημένης μηχανής SiFe 6.5%, με κριτήριο την υψηλότερη απόδοση

Μηχανές SiFe 6.5% υψηλότερης απόδοσης			
Κριτήρια σύγκρισης	Μηχανή αναφοράς	Βέλτιστη μηχανή	Διαφορά
Απόδοση η (%)	94.12	94.13	+0.01%
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	45	45.73	+1.6%
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	31.64	35.59	+12.5%
Απώλειες σιδήρου (W)	91.25	95.76	+4.9%
Απώλειες χαλκού (W)	298.84	292.33	-2.2%
Απώλειες μαγνητών (W)	51.55	59.66	+15.7%
Σύνολο απωλειών (W)	441.69	447.95	+1.43%
Μάζα (kg)	24.17	26.29	+8.9%
Πυκνότητα ροπής (Nm/kg)	1.86	1.74	-6.45%

Πίνακας 11.7. Σύγκριση χαρακτηριστικών reference και βελτιστοποιημένης μηχανής SiFe 6.5%, με κριτήριο την ελάχιστη μάζα

Μηχανές SiFe 6.5% ελάχιστης μάζας			
Κριτήρια σύγκρισης	Μηχανή αναφοράς	Βέλτιστη μηχανή	Διαφορά
Απόδοση η (%)	88.97	93.19	+4.7%
Μέση ροπή T_{mean} (Nm)	45.44	45.50	+0.1%
Κυμάτωση ροπής T_{ripple} (%)	49.24	32.86	-33.3%
Απώλειες σιδήρου (W)	276.40	81.37	-70.6%
Απώλειες χαλκού (W)	381.47	371.30	-2.7%
Απώλειες μαγνητών (W)	226.74	69.63	-69.3%
Σύνολο απωλειών (W)	884.89	522.29	-41%
Μάζα (kg)	22.71	22.18	-2.3%
Πυκνότητα ροπής (Nm/kg)	2	2.05	+2.5%

Ομοίως με τα αποτελέσματα της ενότητας 9.3, φαίνεται πως η διαδικασία της ανάλυσης ευαισθησίας δεν έχει σημαντική επίδραση όσον αφορά την ελαχιστοποίηση των απωλειών και την επίτευξη υψηλότερου βαθμού απόδοσης, αφού οι βέλτιστες μηχανές που προέκυψαν κατά την ανάλυση ευαισθησίας έχουν σχεδόν τις ίδιες γεωμετρικές παραμέτρους με αυτές των αντίστοιχων μηχανών αναφοράς. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στα περίπου ίδια μαγνητικά χαρακτηριστικά των SiFe 3% και SiFe 6.5%, των οποίων η κυριότερη διαφορά είναι οι ειδικές απώλειες πυρήνα, οι οποίες είναι πολύ μικρότερες στην περίπτωση του SiFe 6.5%.

Αντίθετα, τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας είναι ενθαρρυντικά στην περίπτωση που κριτήριο αποτελεί η ελαχιστοποίηση της μάζας, όπου και υπήρξε σημαντική βελτίωση στο σύνολο των χαρακτηριστικών επίδοσης και απόδοσης της μηχανής με πυρήνα SiFe 6.5%. Τα κυριότερα επιτεύγματα της βέλτιστης ως προς την μάζα μηχανής είναι:

- Αύξηση της απόδοσης κατά **4.7%**
- Μείωση των απωλειών πυρήνα κατά **70.6%**
- Μείωση της μάζας κατά **2.3%**
- Μείωση της κυμάτωσης ροπής κατά **33.3%**

Από τα παραπάνω αποτελέσματα μπορεί με σχετική ασφάλεια να εξαχθεί το συμπέρασμα πως η απλούστευση της βελτιστοποίησης μιας μηχανής SiFe 6.5%, δεδομένης μιας ήδη «βέλτιστης» διατομής πυρήνα SiFe 3%, θα φέρει πολύ καλά αποτελέσματα όταν κριτήριο βελτιστοποίησης είναι η απόδοση της μηχανής, και θα μειώσει δραματικά τους υπολογιστικούς χρόνους και πόρους που απαιτούνται για την διεξαγωγή εκ νέου ανάλυσης ευαισθησίας.

12. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

12.1 Σύνοψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η επίδραση συμβατικών και εξωτικών σιδηρομαγνητικών λαμαρινών (SiFe 3%, CoFe, NiFe, SiFe 6.5%) στα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης επιφανειακών σύγχρονων μηχανών μονίμων μαγνητών, καθώς και στην διαδικασία βελτιστοποίησης των γεωμετρικών παραμέτρων μέσω ανάλυσης ευαισθησίας. Ακόμα διερευνήθηκαν σχεδιαστικές τάσεις για κάθε υλικό, τα οποία βελτιστοποιούν την επίδοση και απόδοση, και αποτελούν μια καλή αρχική προσέγγιση της βέλτιστης γεωμετρίας.

Αρχικά, αναλύθηκε το θεωρητικό υπόβαθρο των σιδηρομαγνητικών υλικών, παρουσιάστηκαν οι μαγνητικές ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των προς μελέτη σιδηρομαγνητικών λαμαρινών και παρουσιάστηκαν πρακτικά ζητήματα που προκύπτουν κατά την επεξεργασία των λαμαρινών για την κατασκευή πυρήνα. Στη συνέχεια, αναλύθηκε το θεωρητικό υπόβαθρο και οι μηχανισμοί που συνιστούν τις απώλειες πυρήνα, ενώ παρουσιάστηκαν και συγκρίθηκαν τα σημαντικότερα μοντέλα απωλειών πυρήνα που έχουν προταθεί έως σήμερα στη βιβλιογραφία, αφού κρίθηκε σημαντική η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου απωλειών προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι διαφορετικές ιδιότητες των υλικών κατά τον υπολογισμό της απόδοσης των μηχανών. Προκειμένου να προκύψουν ακριβή αποτελέσματα για κάθε σιδηρομαγνητικό υλικό από το επιλεγθέν μοντέλο, υλοποιήθηκε εργαλείο υπολογισμού των συντελεστών υστέρησης και δινορρευσμάτων, μέσω επιφανειακής προσαρμογής του μοντέλου απωλειών στις πειραματικές μετρήσεις της κάθε λαμαρίνας.

Μετά την προκαταρκτική σχεδίαση των μηχανών για κάθε υλικό, σειρά είχε η εύρεση της βέλτιστης μηχανής κάθε υλικού, για την οποία απαιτείται η συγκριτική μελέτη διαφορετικών διαμορφώσεων μηχανών επιφανειακών μονίμων μαγνητών. Η μεθοδολογία που υλοποιήθηκε απαρτίζεται από ανάλυση ευαισθησίας των γεωμετρικών παραμέτρων των μηχανών, από την οποία προέκυψαν 3240 διαφορετικές γεωμετρίες μηχανών για κάθε υλικό. Κατά την ανάλυση ευαισθησίας των μηχανών εξετάστηκαν διαφορετικοί συνδυασμοί πόλων, εξωτερικής ακτίνας στάτη, πάχους δοντιών στάτη και πάχους σώματος στάτη (yoke). Σκοπός αυτής της μεθόδου ήταν η δημιουργία ενός μεγάλου pool μηχανών, εκ του οποίου επιλέγεται κάθε φορά η βέλτιστη μηχανή με κριτήρια ελάχιστων συνολικών απωλειών, υψηλότερης απόδοσης και μικρότερης μάζας, προκειμένου να εξασφαλισθεί η αντικειμενική επιλογή της βέλτιστης διαμόρφωσης.

Η παραπάνω διαδικασία ανάλυσης ευαισθησίας γεωμετρικών παραμέτρων υλοποιήθηκε αρχικά για τις μηχανές με πυρήνα συμβατικού ατσαλιού, επιλέχθηκαν οι βέλτιστες μηχανές βάση των ανωτέρω κριτηρίων και στη συνέχεια βάση των βέλτιστων διατομών του συμβατικού ατσαλιού, υπολογίστηκαν οι reference μηχανές των υπόλοιπων υλικών, προκειμένου να προκύψει μέτρο σύγκρισης των βέλτιστων μηχανών για κάθε υλικό σε σχέση με τις αντίστοιχες reference μηχανές, σε όρους πυκνότητας ροπής και απόδοσης. Η διαδικασία αυτή κρίνεται σκόπιμη αφού η προσαρμογή του ενεργού μήκους μιας υπάρχουσας διατομής σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή, αποτελεί συνήθη τεχνική απλούστευσης της διαδικασίας βελτιστοποίησης σε επίπεδο βιομηχανίας. Στη συνέχεια η διαδικασία ανάλυσης ευαισθησίας επαναλαμβάνεται για κάθε υλικό, με σκοπό τη σύγκριση των πλέον βέλτιστων μηχανών, με αυτές που έδωσε η αναγωγή του ενεργού μήκους.

Τέλος, μετά την επιλογή των βέλτιστων μηχανών βάση κάθε κριτηρίου για όλα τα υλικά, μελετήθηκε η κατανομή των μηχανών με την καλύτερη επίδοση και απόδοση, όσον αφορά τις γεωμετρικές παραμέτρους του στάτη, προκειμένου να γίνει αντιληπτή η τάση (trend) σχεδίασης σχετικά με το πάχος δοντιών και σώματος στάτη και να γενικευθούν τα σχεδιαστικά μοτίβα που ωφελούν κάθε υλικό.

12.2 Κυριότερα συμπεράσματα

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία είναι παρατίθενται παρακάτω.

Όσον αφορά την **επίδραση των γεωμετρικών παραμέτρων** στα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης των μηχανών:

- Η παραγωγή ροπής μεγιστοποιείται γενικά με την ύπαρξη ελαφρώς λεπτότερων δοντιών και λεπτότερου yoke, παρόλα αυτά υπερβολικά λεπτό δόντι (μικρότερο του 1/3 του βήματος άυλακος) επιφέρει σημαντική μείωση της μαγνητικής ροής στο μαγνητικό κύκλωμα του στάτη, και κατ' επέκταση μείωση της μαγνητικής φόρτισης και της ροπής.
- Η κυμάτωση ροπής ελαττώνεται με την αύξηση του πάχους των δοντιών και κατ' επέκταση των πελμάτων των δοντιών, αφού έτσι ομαλοποιείται η μορφή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο.
- Η μάζα της μηχανής μειώνεται με την αύξηση του πάχους δοντιών και yoke, αφού έτσι μειώνεται ο όγκος των τυλιγμάτων χαλκού.
- Οι απώλειες πυρήνα αυξάνονται σημαντικά με την αύξηση του αριθμού των πόλων, αφού έτσι αυξάνεται και η συχνότητα τροφοδότησης της μηχανής. Η μείωση του όγκου του πυρήνα, μέσω της μείωσης του πάχους δοντιών και yoke, είναι θεμιτή για την μείωση των απωλειών πυρήνα, παρόλα αυτά, πολύ λεπτές γεωμετρίες οδηγούν σε κορεσμό την μηχανή και κατ' επέκταση σε αύξηση των απωλειών πυρήνα.

Όσον αφορά τα **αποτελέσματα των μεθόδων βελτιστοποίησης** που εξετάστηκαν για τα προς μελέτη σιδηρομαγνητικά υλικά:

- Οι βέλτιστες μηχανές NiFe που προέκυψαν από την ευαισθησία παραμέτρων είχαν σημαντική βελτίωση σε σχέση με τις αντίστοιχες μηχανές αναφοράς, αυξάνοντας έως και 1.3% την απόδοση, μειώνοντας έως 50% την κυμάτωση ροπής και έως 14.5% την μάζα των μηχανών. Επομένως η ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων κρίνεται σαφώς για την εύρεση της βέλτιστης μηχανής NiFe για μια δεδομένη εφαρμογή, σε σχέση με την προσαρμογή του ενεργού μήκους μιας υπάρχουσας διατομής συμβατικού ατσαλιού.
- Η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας μέσω ανάλυσης ευαισθησίας δεν έδωσε καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις μηχανές αναφοράς των CoFe και SiFe 6.5%, όταν το κριτήριο βελτιστοποίησης ήταν οι ελάχιστες συνολικές απώλειες και η υψηλότερη απόδοση, γεγονός αναμενόμενο κυρίως για το SiFe 6.5%, μιας και έχει παρόμοιες ιδιότητες με το SiFe 3%.
- Αντίθετα, τα αποτελέσματα ήταν πολύ διαφορετικά, στην περίπτωση που το κριτήριο βελτιστοποίησης ήταν η ελάχιστη μάζα, όπου προέκυψε σημαντική μείωση των συνολικών απωλειών έως 41%, μείωση της μάζας της μηχανής έως 2.3% και αύξηση της πυκνότητας ροπής έως 2.5%, και για τα δύο υλικά.

Επομένως, η προσαρμογή του ενεργού μήκους μιας υπάρχουσας διατομής συμβατικού ατσαλιού προτείνεται για τα υλικά CoFe και SiFe 6.5%, όταν κριτήριο αποτελεί η ελαχιστοποίηση των απωλειών και η υψηλότερη απόδοση. Έτσι, μέσω αυτής της απλουστευμένης τεχνικής βελτιστοποίησης, μειώνονται δραστικά οι υπολογιστικοί χρόνοι και πόροι που απαιτεί η διαδικασία αναλυτικής βελτιστοποίησης των γεωμετρικών παραμέτρων, και μπορεί να προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα.

Όσον αφορά τα **σχεδιαστικά μοτίβα** που προέκυψαν από τις αναλύσεις ευαισθησίας για τα εξεταζόμενα σιδηρομαγνητικά υλικά, ο παρακάτω πίνακας περιέχει τις βέλτιστες τιμές του πάχους δοντιού ως ποσοστό του βήματος άυλακος και τις τιμές του πάχους του yoke ως λόγο του πάχους του yoke προς το πάχος δοντιού, για κάθε υλικό. Κριτήριο αποτέλεσε η επίτευξη της επιθυμητής ροπής με την υψηλότερη δυνατή απόδοση, ενώ οι παρακάτω σχεδιαστικές οδηγίες (design guidelines) στόχο έχουν την επίτευξη καλού performance και απόδοσης, από το στάδιο της προκαταρκτικής σχεδίασης, προκειμένου η βελτιστοποίηση πλέον να επικεντρωθεί σε παραμέτρους της μικρογεωμετρίας του δοντιού του στάτη (μέγεθος, ύψος, κλίση πέλματος δοντιού).

Πίνακας 12.1. Σχεδιαστικές τάσεις για τις βασικές γεωμετρικές παραμέτρους στάτη ανά υλικό, όπως προέκυψαν από τις αναλύσεις ευαισθησίας

Σιδηρομαγνητικά υλικά	Πάχος δοντιού (Tooth2SlotPercentage)	Πάχος yoke (Yoke2Tooth)
SiFe 3%	40 – 50 %	2.5 – 3.5
CoFe	35 – 45 %	2.5 – 3.5
NiFe	50 %	2.5
SiFe 6.5%	45 – 50 %	2 – 3.5

Βάση των ανωτέρω αποτελεσμάτων, γενικό συμπέρασμα αποτελεί πως το CoFe επωφελείται από διαμορφώσεις λεπτότερων δοντιών και yoke, που μειώνουν τον όγκο του πυρήνα και κατ' επέκταση το κόστος του υλικού και τις απώλειες πυρήνα, τα SiFe 3% και SiFe 6.5% φαίνεται να επωφελούνται από ελαφρώς μεγαλύτερη πάχη δοντιών και yoke, ενώ τέλος το NiFe φαίνεται να επωφελείται από διαμορφώσεις παχύτερων δοντιών, προκειμένου να δύναται να περάσει περισσότερη μαγνητική ροή και να αυξηθεί η μαγνητική φόρτιση της μηχανής.

Τέλος, **γενικότερα συμπεράσματα** σχετικά με τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, είναι τα εξής:

- Ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την πλήρη επίλυση του ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος της σύγχρονης περιστροφής του δρομέα, μπορεί να μειωθεί δραστικά με την αξιοποίηση του ελάχιστου κλάσματος γεωμετρίας ανά διατομή μηχανής.
- Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου απωλειών πυρήνα είναι κομβικής σημασίας όσον αφορά την ορθότητα και ακρίβεια των αποτελεσμάτων απόδοσης, ιδιαίτερα στη συγκριτική μελέτη διαφορετικών υλικών. Ένα κατάλληλο μοντέλο απωλειών θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τουλάχιστον την επίδραση των αρμονικών χώρου λόγω γεωμετρίας στάτη, αφού η υπόθεση ημιτονοειδούς κατανομής του πεδίου είναι λανθασμένη, ιδιαίτερα στην περίπτωση των μηχανών επιφανειακών μονίμων μαγνητών.
- Το μοντέλο απωλειών πυρήνα που επιλέχθηκε και υλοποιήθηκε έχει ευρεία αποδοχή και χρήση στην έρευνα και στη βιομηχανία, παρόλα αυτά οι πολύ υψηλές απώλειες πυρήνα που εμφανίζονται στις υψηλότερες συχνότητες λειτουργίας, συνιστούν πως η υπέρθεση της επίδρασης των αρμονικών συνιστωσών της μαγνητικής επαγωγής δεν είναι απολύτως σωστή, καθώς τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα δεν είναι γραμμικά.

12.3 Σημεία προαγωγής της επιστήμης

Τα κυριότερα σημεία συνεισφοράς της εργασίας στην Επιστήμη είναι τα παρακάτω::

- Απόδειξη χρησιμότητας της διαδικασίας βελτιστοποίησης γεωμετρικών παραμέτρων για ορισμένα σιδηρομαγνητικά υλικά όπως το NiFe, όπου η αναγωγή μιας βέλτιστης διατομής συμβατικού ατσαλιού, οδηγεί σε υποβέλτιστα χαρακτηριστικά λειτουργίας.
- Εξαγωγή σχεδιαστικών τάσεων (trends) για κάθε σιδηρομαγνητικό υλικό, για δεδομένο σημείο λειτουργίας της μηχανής.
- Ενσωμάτωση του μετρικού μεγέθους $A \cdot J$ κατά την προκαταρκτική σχεδίαση μηχανών και εξαγωγή χαρτών $D - L$ με τις θερμικές απαιτήσεις του κάθε συνδυασμού (D, L) .
- Ανάπτυξη παραμετροποιημένου μοντέλου σχεδίασης και ανάλυσης σύγχρονων μηχανών επιφανειακών και inset μονίμων μαγνητών, με ενσωματωμένη βιβλιοθήκη πειραματικών δεδομένων διαφορετικών σιδηρομαγνητικών λαμαρινών.

- Συγκριτική μελέτη μεγάλου πλήθους διαφορετικών τοπολογιών μηχανών μέσω αλγορίθμου σάρωσης πεδίου ορισμού γεωμετρικών παραμέτρων για κάθε σιδηρομαγνητικό υλικό πυρήνα.

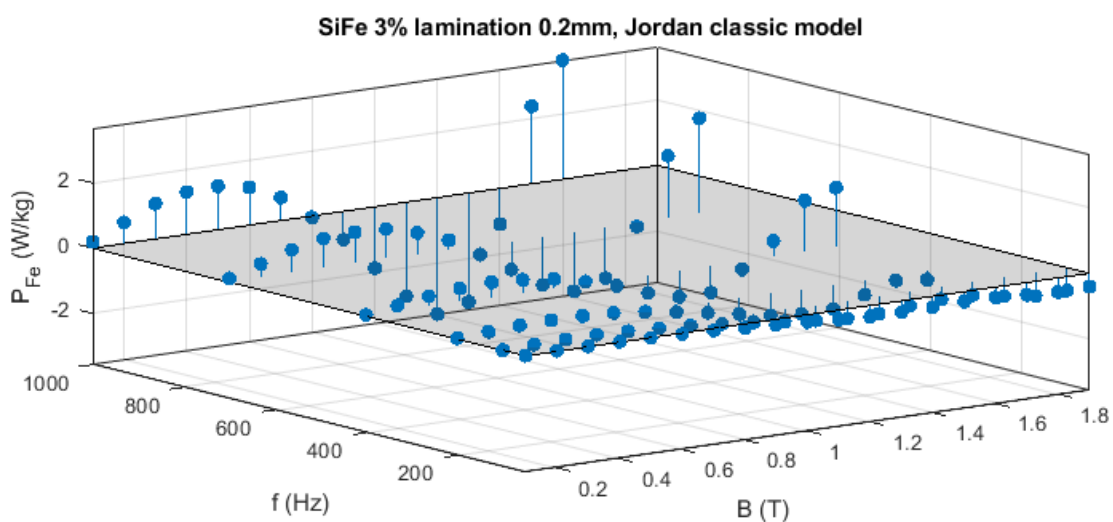
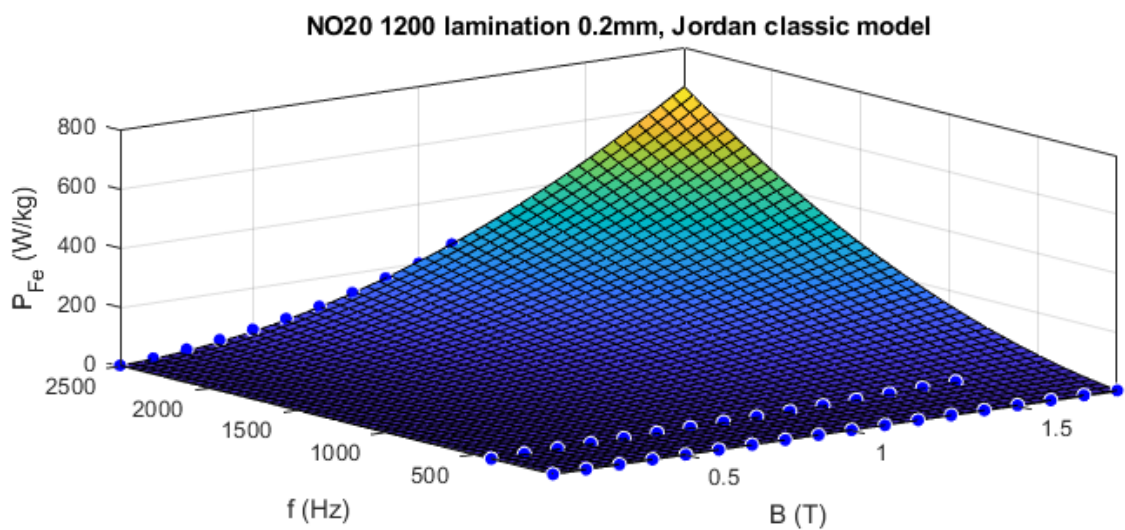
12.4 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αναδείχθηκαν τα παρακάτω σημεία που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.

- Ανάπτυξη μοντέλου απωλειών πυρήνα που να λαμβάνει υπόψη την επίδραση των απωλειών λόγω περιστροφής, καθώς και την επίδραση των αρμονικών που εισάγονται στα τυλίγματα του στάτη κατά τη τροφοδότηση του μέσω τεχνικών PWM. Πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων του μοντέλου.
- Κατασκευή μηχανής με πυρήνα εξαιρετικά λεπτής λαμαρίνας SiFe υψηλής περιεκτικότητας σε πυρίτιο, προκειμένου να επιβεβαιωθούν πειραματικά οι πολύ μικρές απώλειες πυρήνα που εμφανίζει σε επίπεδο δοκιμίου.
- Μελέτη της επίδρασης των ανωτέρω σιδηρομαγνητικών υλικών στα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης της μηχανής, όχι σε ένα σημείο λειτουργίας, αλλά σε εύρος ταχυτήτων και ροπών και εισαγωγή του κριτηρίου του κόστους της λαμαρίνας κατά την βελτιστοποίηση.

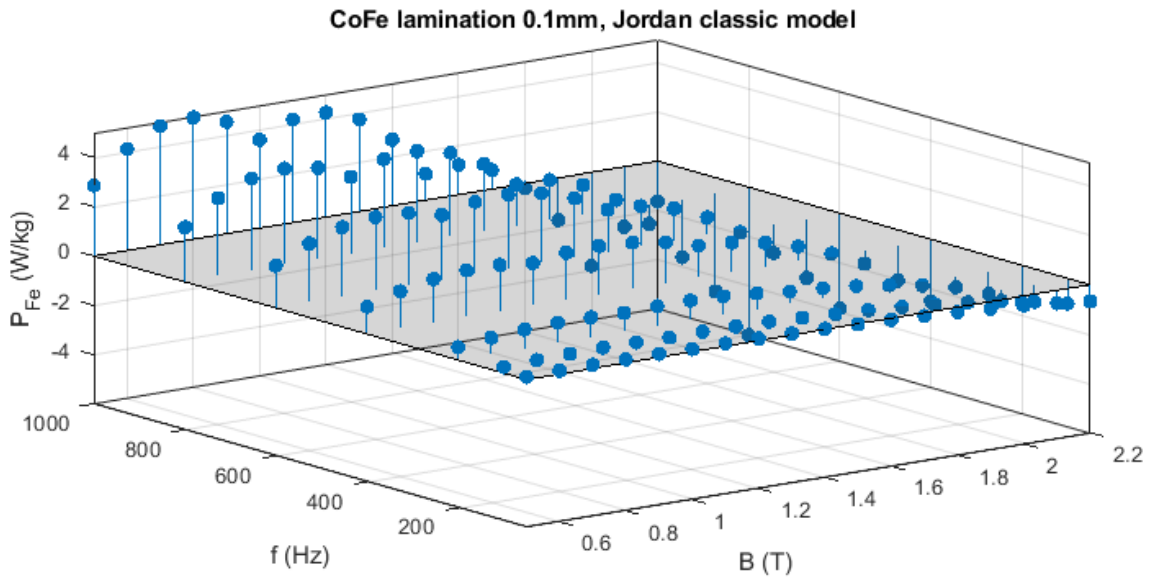
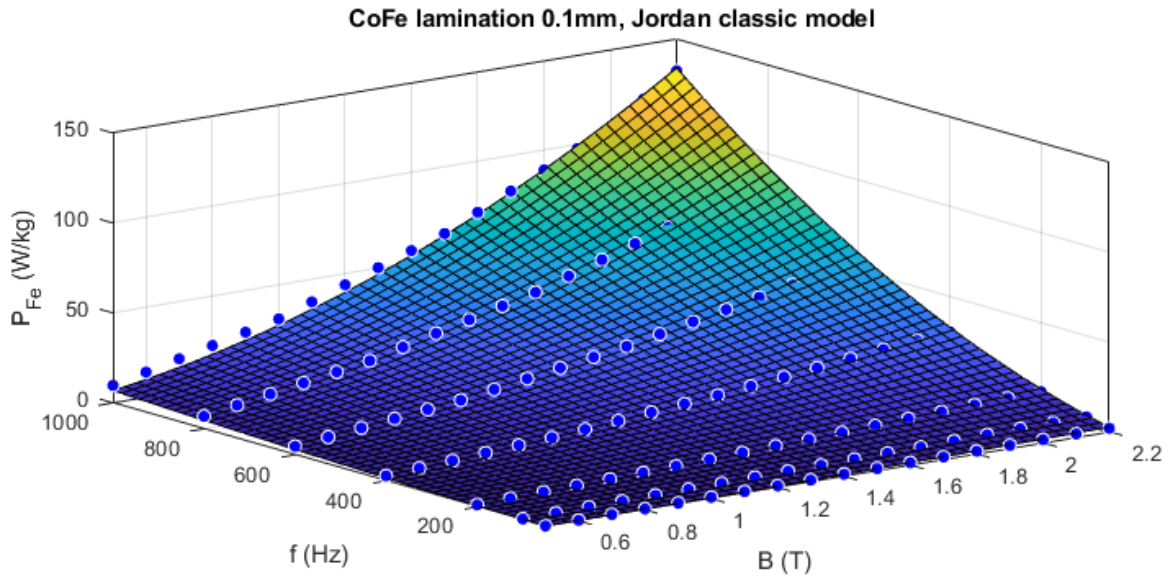
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

SiFe 3% (Cogent NO20 1200)



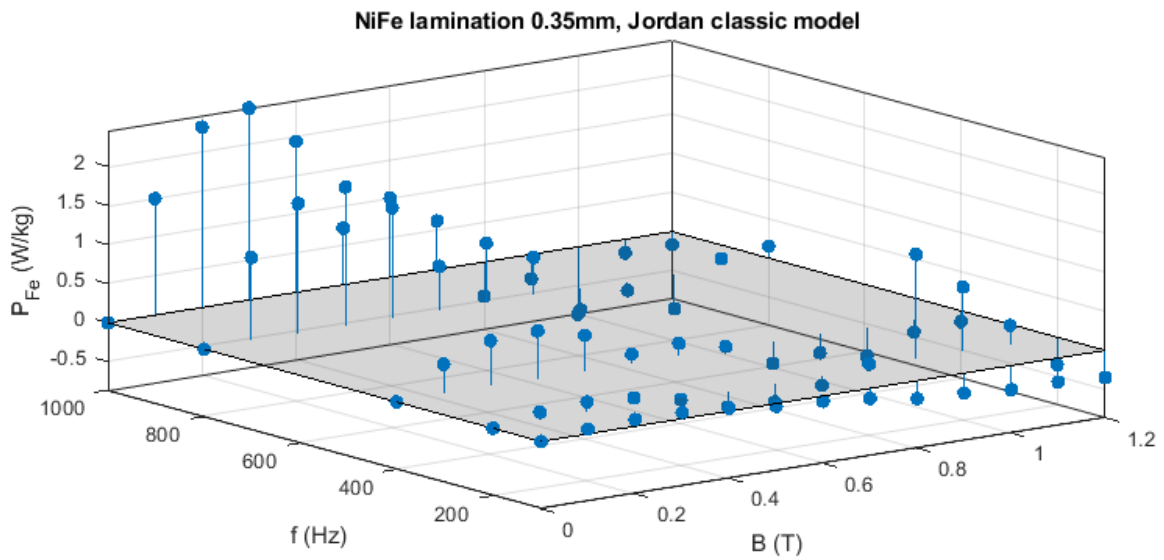
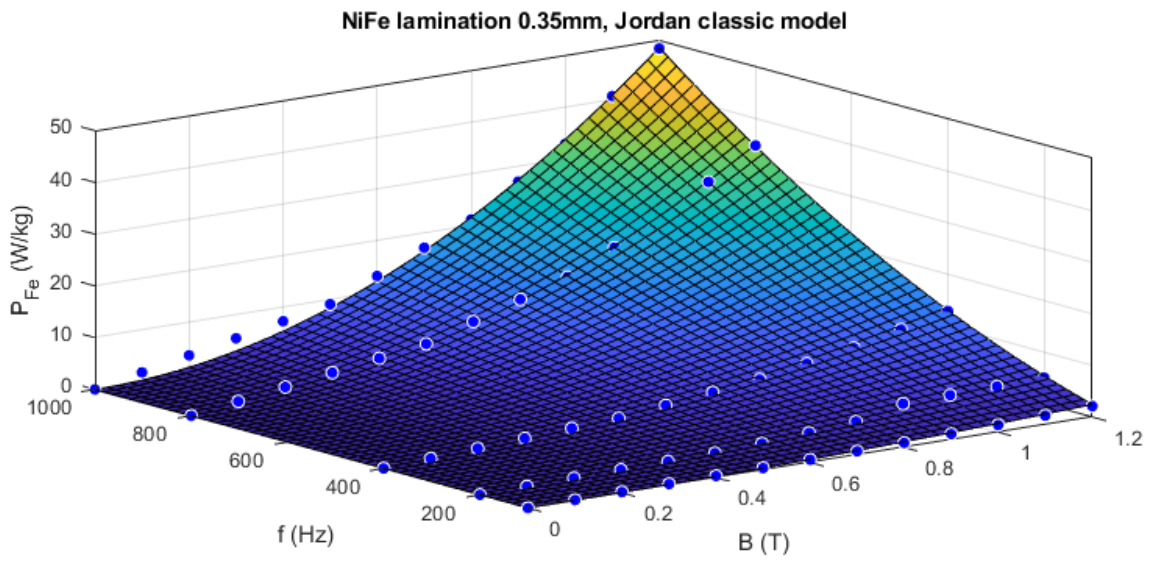
Fitting model	$k_{hys} \cdot f \cdot B^2 + k_{ec} \cdot f^2 \cdot B^2$
Loss coefficients	
Hysteresis loss coefficient	$k_{hys} = 2.485 \cdot 10^{-5}$
Eddy currents loss coefficient	$k_{ec} = 0.01943$
Goodness of fit	
SSE	103.5
R-square	0.9979
Adjusted R-square	0.9979
RMSE	1.017

CoFe



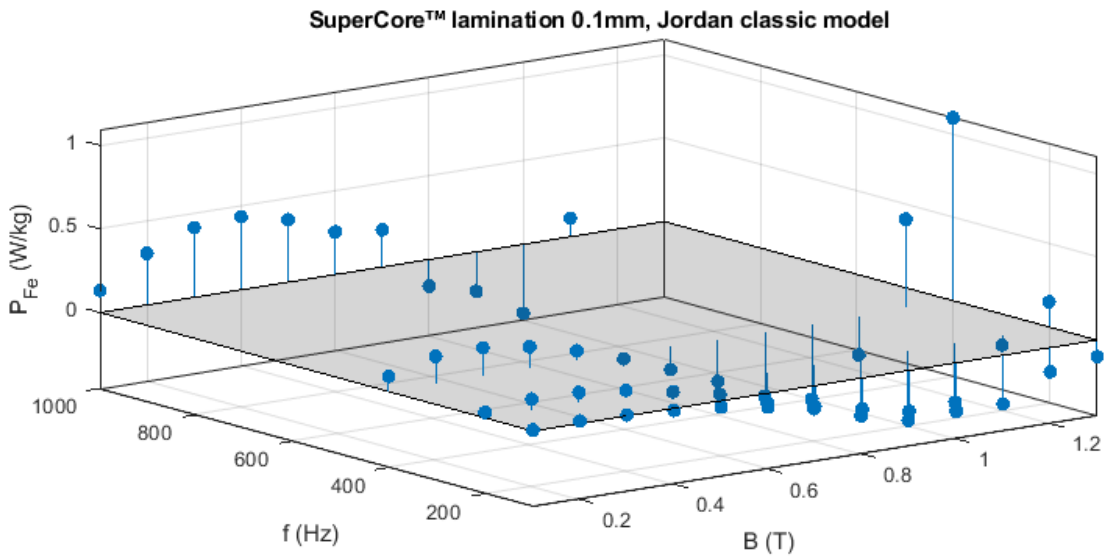
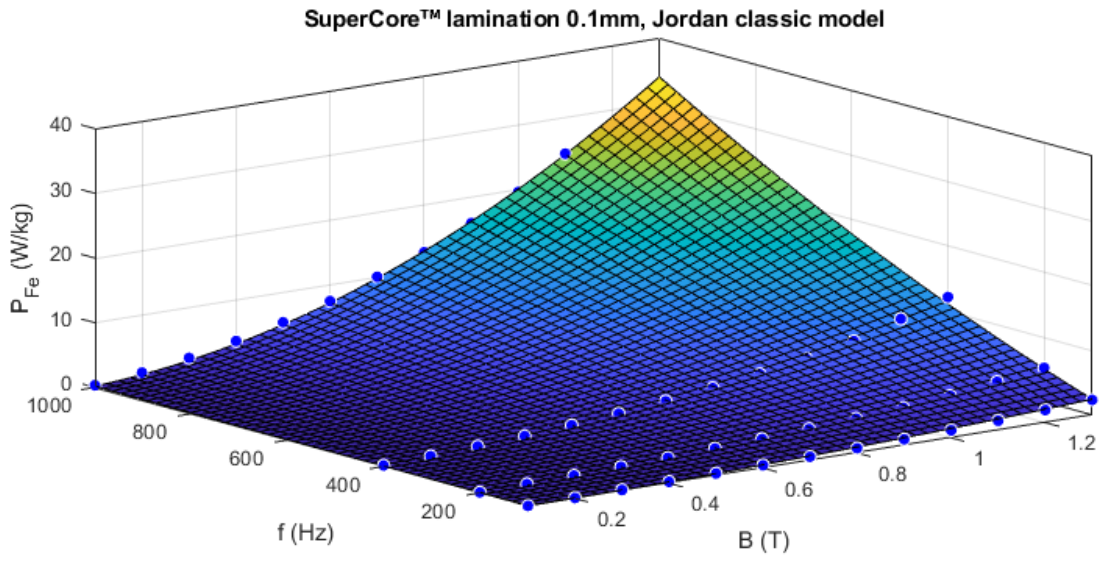
Fitting model	$k_{hys} \cdot f \cdot B^2 + k_{ec} \cdot f^2 \cdot B^2$
Loss coefficients	
Hysteresis loss coefficient	$k_{hys} = 1.782 \cdot 10^{-5}$
Eddy currents loss coefficient	$k_{ec} = 0.009768$
Goodness of fit	
SSE	530.8
R-square	0.9944
Adjusted R-square	0.9943
RMSE	2.069

NiFe



Fitting model	$k_{hys} \cdot f \cdot B^2 + k_{ec} \cdot f^2 \cdot B^2$
Loss coefficients	
Hysteresis loss coefficient	$k_{hys} = 1.856 \cdot 10^{-5}$
Eddy currents loss coefficient	$k_{ec} = 0.01511$
Goodness of fit	
SSE	35.76
R-square	0.9951
Adjusted R-square	0.9951
RMSE	0.7534

SiFe 6.5%



Fitting model: $k_{hys} \cdot f \cdot B^2 + k_{ec} \cdot f^2 \cdot B^2$	
Loss coefficients	
Hysteresis loss coefficient	$k_{hys} = 6.283 \cdot 10^{-6}$
Eddy currents loss coefficient	$k_{ec} = 0.01381$
Goodness of fit	
SSE	3.955
R-square	0.9971
Adjusted R-square	0.997
RMSE	0.2871

13. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] European Commission, “A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030,” no. 2014, pp. 1–18, 2012.
- [2] European Commission, “A Clean Planet for all. A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy,” *Com(2018) 773*, p. 114, 2018.
- [3] R. D. Cepoi, F. F. Jaşcău, and L. Szabó, “Current trends in energy efficient electrical machines,” *J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 13–18, 2017.
- [4] EEA, “Electric vehicles and the energy sector-impacts on Europe’s future emissions Main messages,” *EEA Brief.*, pp. 1–5, 2016.
- [5] International Energy Agency, World energy outlook, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, France, Report Number 1026-1141, 2013.
- [6] Α. Γ. Σαρηγιαννίδης, “Βέλτιστος Σχεδιασμός και Διαχείριση Συστημάτων Κίνησης Ηλεκτρικών Οχημάτων,” Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2016.
- [7] R. de Doncker, D. W. J. Pulle, and A. Veltman, “Advanced Electrical Drives: Analysis, Modeling, Control,” *Power Syst.*, vol. 52, pp. 1–443, 2011.
- [8] Η. Αντωκακάκης, Γ. Βαμβακάς, “Σχεδίαση Ηλεκτρικού Κινητήρα για Χρήση σε Όχημα Εξοικονόμησης Ενέργειας”, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2019.
- [9] Κωνσταντίνος Ι. Λάσκαρης, “Σχεδιασμός Και Κατασκευή Κινητήρων Μονίμων Μαγνητών Για Ηλεκτρικά Οχήματα”, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2011.
- [10] Ι. Παναγόπουλος, “Συγκριτική Σχεδιομελέτη Ηλεκτρικής Μηχανής Μονίμων Μαγνητών Και Μηχανής Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης Για Εφαρμογή Πρωτότυπου Ηλεκτρικού Οχήματος”, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2017.
- [11] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*. McGraw-Hill, 2005.
- [12] N. Bianchi, “Electromagnetic and Thermal Analysis of Permanent Magnet Synchronous Machines,” M. Barcaro, Ed. Rijeka: IntechOpen, 2012, p. Ch. 17.
- [13] E. Schubert, S. Li and B. Sarlioglu, "High-speed surface permanent magnet machines - rotor design analysis, considerations, and challenges," 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Dearborn, MI, 2016, pp. 1-6.
- [14] Y. Yang et al., "Design and Comparison of Interior Permanent Magnet Motor Topologies for Traction Applications," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 3, no. 1, pp. 86-97, March 2017.
- [15] J. F. Gieras, *Permanent Magnet Motors Technology: Design and Applications*, 3rd ed., CRC Press 2010.
- [16] C. Patsios, E. Tsampouris, M. Beniakar, P. Rovolis, and A. G. Kladas, “Dynamic finite element hysteresis model for iron loss calculation in non-oriented grain iron laminations under PWM excitation,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 5, pp. 1130–1133, 2011.
- [17] C. Oikonomou, “Surface Characterization of Soft Magnetic Composite Powder and Compacts”, no. April 2014, p. 31, 2014.

- [18] J. M. D. Coey, *Magnetism and Magnetic Materials*, 1st ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2010.
- [19] A. Krings, A. Boglietti, A. Cavagnino, and S. Sprague, "Soft Magnetic Material Status and Trends in Electric Machines", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 3, pp. 2405–2414, 2017.
- [20] N. Denis, M. Inoue, K. Fujisaki, H. Itabashi, and T. Yano, "Iron Loss Reduction in Permanent Magnet Synchronous Motor by Using Stator Core Made of Nanocrystalline Magnetic Material", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 11, pp. 11–16, 2017.
- [21] Cogent NO20 Datasheet: https://cogent-power.com/cms-data/downloads/Hi-Lite_NO20.pdf.
- [22] VAC – Cobalt Iron Datasheet: <https://vacuumschmelze.com/Assets/Cobalt-Iron%20Alloys.pdf>
- [23] VAC – Nickel Iron Datasheet: <https://www.vacuumschmelze.com/Products/Soft-Magnetic-Materials-and-Stamped-Parts/40-to-50-Nickel-Iron>
- [24] JFE – Supercore™ Datasheet: <https://www.jfe-steel.co.jp/en/products/electrical/catalog/f1e-002.pdf>
- [25] D. Steiner Petrovic, "Non-Oriented Electrical Steel Sheets," *Materials and Technology*, vol. 44, no. 6, 2010.
- [26] E. A. Starke, "Aluminum Alloys: Properties and Applications," *Encycl. Mater. Sci. Technol.*, pp. 114–116, 2001.
- [27] J. Ou, Y. Liu, P. Breining, T. Gietzelt, T. Wunsch and M. Doppelbauer, "Study of the Electromagnetic and Mechanical Properties of a High-silicon Steel for a High-speed Interior PM Rotor," 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Harbin, China, 2019, pp. 1–4.
- [28] N. Fernando, G. Vakil, P. Arumugam, E. Amankwah, C. Gerada, and S. Bozhko, "Impact of Soft Magnetic Material on Design of High-Speed Permanent-Magnet Machines", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 3, pp. 2415–2423, 2017.
- [29] A. Krings, M. Cossale, A. Tenconi, J. Soulard, A. Cavagnino, and A. Boglietti, "Magnetic materials used in electrical machines: A comparison and selection guide for early machine design", *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 23, no. 6, pp. 21–28, 2017.
- [30] R. V. Major and C. M. Orrock, "High saturation ternary cobalt-iron basalt alloys," *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 24, no. 2, pp. 1856–1858, March 1988.
- [31] R. Yu, S. Basu, L. Ren, Y. Zhang, A. Parvizi-Majidi, K. Unruh, and J. Q. Xiao, "High temperature soft magnetic materials: FeCo alloys and composites", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, no. 5, pp. 3388–3393, Sept. 2000.
- [32] K. Bourchas, "Manufacturing Effects on Iron Losses in Electrical Machines," KTH Royal Institute of Technology, 2015.
- [33] A. Krings, "Iron Losses in Electrical Machines- Influence of Material Properties, Manufacturing Processes and Inverter Operation," PhD thesis, KTH Royal Institute of Technology, 2014.
- [34] Z. Gmyrek and K. Smółka, "Efficiency analysis of fractional kilowatt reluctance motors with various frame sizes, taking into account the impact of the punching process," *Energies*, vol. 13, no. 2, 2020.
- [35] R. Rygal, A. J. Moses, N. Derebasi, J. Schneider, and A. Schoppa, "Influence of cutting stress on magnetic field and flux density distribution in non-oriented electrical steels," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 215, pp. 687–689, 2000.

- [36] N. Boubaker, D. Matt, P. Enrici, F. Nierlich, and G. Durand, "Measurements of iron loss in PMSM stator cores based on CoFe and SiFe lamination sheets and stemmed from different manufacturing processes," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 55, no. 1, 2019.
- [37] R. Siebert, J. Schneider and E. Beyer, "Laser Cutting and Mechanical Cutting of Electrical Steels and its Effect on the Magnetic Properties," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 4, pp. 1-4, April 2014, Art no. 2001904.
- [38] K. Bourchas et al., "Influence of cutting and welding on magnetic properties of electrical steels," 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Lausanne, 2016, pp. 1815-1821.
- [39] K. Bourchas et al., "Quantifying Effects of Cutting and Welding on Magnetic Properties of Electrical Steels," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 5, pp. 4269-4278, Sept.-Oct. 2017.
- [40] D. Gerada, A. Mebarki, N. L. Brown, C. Gerada, A. Cavagnino and A. Boglietti, "High-Speed Electrical Machines: Technologies, Trends, and Developments," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 6, pp. 2946-2959, June 2014.
- [41] M. Enokizono, N. Soda, D. Wakabayashi, S. Ueno and Y. Tsuchida, "Development of High Efficiency and High-Speed Motor with High Power Density," 2019 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2019 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Istanbul, Turkey, 2019, pp. 178-185.
- [42] M. Enokizono, "Required Technology for Upgrading Efficiency of High-Speed Motor with High Power Density," 2019 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2019 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Istanbul, Turkey, 2019, pp. 41-50.
- [43] N. Soda and M. Enokizono, "Stator core shape design for low core loss and high power density of a small SPM motor," 2019 19th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF), Nancy, France, 2019, pp. 1-2.
- [44] Arnold Magnetic Technologies – Lamination of permanent magnets: <https://www.arnoldmagnetics.com/permanent-magnets/capabilities/lamination/>
- [45] Z. Xu et al., "A semi-flooded cooling for a high speed machine: Concept, design and practice of an oil sleeve," IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Beijing, 2017, pp. 8557-8562.
- [46] C. Liu et al., "Experimental Investigation on Oil Spray Cooling With Hairpin Windings," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 9, pp. 7343-7353, Sept. 2020.
- [47] V. Madonna, A. Walker, P. Giangrande, G. Serra, C. Gerada and M. Galea, "Improved Thermal Management and Analysis for Stator End-Windings of Electrical Machines," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 7, pp. 5057-5069, July 2019.
- [48] S. Nategh, A. Krings, O. Wallmark and M. Leksell, "Evaluation of Impregnation Materials for Thermal Management of Liquid-Cooled Electric Machines," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 11, pp. 5956-5965, Nov. 2014.
- [49] Γεώργιος Δ. Καλοκύρης, "Καινοτομικά υλικά για συστήματα κίνησης μηδενικής εκπομπής ρύπων," Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2006.
- [50] Steinmetz, C.: On the law of hysteresis (originally published in 1892), *Proceedings of the IEEE*, vol. 72, no. 2, pp 197-221, 1984.
- [51] H. Jordan, "Die ferromagnetischen konstanten für schwache wechselfelder.," *Elektr. Nach. Techn.*, vol. 1, p. 8, 1924.

- [52] R. H. Pry and C. P. Bean, "Calculation of the energy loss in magnetic sheet materials using a domain model," *Journal of Applied Physics*, vol. 29, no. 3, pp. 532–533, 1958.
- [53] G. Bertotti, "Physical interpretation of eddy current losses in ferromagnetic materials. I. theoretical considerations," *Journal of Applied Physics*, vol. 57, no. 6, pp. 2110–2117, 1985.
- [54] G. Bertotti, "Physical interpretation of eddy current losses in ferromagnetic materials. II. analysis of experimental results," *Journal of Applied Physics*, vol. 57, no. 6, pp. 2118–2126, 1985.
- [55] F. Preisach, "Über die magnetische Nachwirkung," *Zeitschrift für Physik*, vol. 94, no. 5, pp. 277–302, 1935.
- [56] I. D. Mayergoyz, *Mathematical Models of Hysteresis and their Applications*, 2nd ed. Academic Press, Aug. 2003.
- [57] A. Bergqvist, "Magnetic vector hysteresis model with dry friction-like pinning," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 233, no. 4, pp. 342–347, Jun. 1997.
- [58] T. Chevalier, A. Kedous-Lebouc, B. Cornut, and C. Cester, "A new dynamic hysteresis model for electrical steel sheet," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 275, no. 1–3, pp. 197–201, 2000.
- [59] A. Krings and J. Soulard, "Overview and Comparison of Iron Loss Models for Electrical Machines," *J. Electr. Eng.*, vol. 10, no. 3, pp. 162–169, 2010.
- [60] Μίνωας Η. Μπενιακάς, "Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση κινητήρων με θεώρηση των απωλειών των μόνιμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης," Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2014.
- [61] Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen, Valeria Hrabovcova, "*Design of Rotating Electrical Machines*", John Wiley & Sons Ltd., 2008.
- [62] Αντώνιος Κλαδάς, "Υποδειγματική Προκαταρκτική Σχεδίαση Γεννήτριας Μόνιμων Μαγνητών Ισχύος 25 kW", ΕΜΠ, Αθήνα, 2019.
- [63] F. Meier, S. Meier and J. Soulard, "Emetor - An educational web-based design tool for permanent-magnet synchronous machines," *2008 18th International Conference on Electrical Machines*, Vilamoura, 2008, pp. 1–6.
- [64] A. G. Sarigiannidis, M. E. Beniakar, P. E. Kakosimos and A. G. Kladas, "Performance evaluation and thermal analysis of interior permanent magnet traction motor over a wide load range," *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Lausanne, 2016, pp. 2662–2668.
- [65] A. M. EL-Refaie and T. M. Jahns, "Optimal flux weakening in surface PM machines using fractional-slot concentrated windings," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 3, pp. 790–800, May–June 2005.
- [66] F. Libert and J. Soulard, "Investigation on pole-slot combinations for permanent-magnet machines with concentrated windings," *Int. Conf. Electr. Mach.*, pp. 5–8, 2004.
- [67] J. Zhao, Y. Liu and X. Xu, "Comparisons of Concentrated and Distributed Winding PMSM in MV Power Generation," *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Alexandroupoli, 2018, pp. 2437–2443.
- [68] Y. Y. Choe *et al.*, "Comparison of concentrated and distributed winding in an IPMSM for vehicle traction," *Energy Procedia*, vol. 14, pp. 1368–1373, 2012.
- [69] Emetor - Electric motor winding calculator: <https://www.emetor.com/glossary/integer-slot-winding/>

- [70] S. Raj, R. Aziz, and M. Z. Ahmad, "Influence of pole number on the characteristics of permanent magnet synchronous motor (PMSM)," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 13, no. 3, pp. 1318–1323, 2019.
- [71] A. O. Di Tommaso, F. Genduso, R. Miceli, and C. Nevoloso, "Fast Procedure for the Calculation of Maximum Slot Filling Factors in Electrical Machines," no. May 2020, 2017.
- [72] J. D. Widmer, R. Martin, and M. Kimiabeigi, "Electric vehicle traction motors without rare earth magnets," *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 3, pp. 7–13, 2015.
- [73] A. Kallaste, T. Vaimann, and O. Pabut, "Slow-speed ring-shaped permanent magnet generator for wind applications Slow-Speed Ring-Shaped Permanent Magnet Generator for Wind Applications," *ResearchGate*, no. January, pp. 66–69, 2012.
- [74] Arnold Magnetic Technologies – N48M Datasheet: <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/11/N40SH-151021.pdf>
- [75] Rashid, M., Bianchi, N, *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements*, CRC Press, Boca Raton (USA), 2005.
- [76] D. Meeker, "Finite Element Method Magnetics manual v4.2," 2018.
- [77] T. Ohnishi and N. Takahashi, "Optimal design of efficient IPM motor using finite element method," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, no. 5, pp. 3537-3539, Sept 2000.
- [78] T. Nur and M. Mulyadi, "Improve cogging torque method in inset-permanent magnet synchronous machine," *Proc. 4th IEEE Int. Conf. Appl. Syst. Innov. 2018, ICASI 2018*, pp. 1211–1213, 2018.
- [79] ARMCO® – Pure Iron Datasheet: www.aksteel.nl/files/downloads/172888_armco_pure_iron_pdb_euro_final_secured_92.pdf
- [80] H. Wang, M. Yang, L. Niu and D. Xu, "Improved deadbeat predictive current control strategy for permanent magnet motor drives," *2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Beijing, 2011, pp. 1260-1264.
- [81] R. D. Findlay, N. Stranges and D. K. MacKay, "Losses due to rotational flux in three phase induction motors," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 9, no. 3, pp. 543-549, Sept. 1994.
- [82] N. Stranges and R. D. Findlay, "Measurement of rotational iron losses in electrical sheet," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, no. 5 I, pp. 3457–3459, 2000.
- [83] A. Sarigiannidis, M. Beniakar, and A. Kladas, "Computationally efficient permanent magnet traction motor loss assessment," *COMPEL - Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, vol. 37, no. 6, pp. 2093–2108, 2018.
- [84] Jeong-Jong Lee, Young-Kyoun Kim, Hyuk Nam, Kyung-Ho Ha, Jung-Pyo Hong and Don-Ha Hwang, "Loss distribution of three-phase induction motor fed by pulsewidth-modulated inverter," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 40, no. 2, pp. 762-765, March 2004.
- [85] Emetor - Stacking factor: <https://www.emetor.com/glossary/stacking-factor/>
- [86] X. Θ. Κρασόπουλος, "Σχεδίαση και βελτιστοποίηση λειτουργίας κινητήρων μονίμων μαγνητών: ανάπτυξη αλγορίθμων εκμάθησης και θεώρηση του κύκλου φόρτισης," Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2017.
- [87] L. T. Ergene and Y. Dönmezer, "A study of end turn inductance calculation of BLDC motors," *SPEEDAM 2010, Pisa, 2010*, pp. 111-114.

- [88] A. G. Sarigiannidis and A. G. Kladas, "Switching Frequency Impact on Permanent Magnet Motors Drive System for Electric Actuation Applications," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 3, pp. 1-4, March 2015, Art no. 8202204.
- [89] D. Ishak, Z. Q. Zhu and D. Howe, "Eddy-current loss in the rotor magnets of permanent-magnet brushless machines having a fractional number of slots per pole," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 9, pp. 2462-2469, Sept. 2005.
- [90] M. S. Islam, R. Mikail and I. Husain, "Slotless Lightweight Motor for Aerial Applications," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 6, pp. 5789-5799, Nov.-Dec. 2019.
- [91] A. Usoltsev, G. L. Demidova, D. V. Lukichev, and S. Bratchikov, "Number of Poles Pairs Effects on Electromagnetic Torque Permanent Magnet Synchronous Motor," *2019 IEEE 60th Annu. Int. Sci. Conf. Power Electr. Eng. Riga Tech. Univ. RTUCON 2019 - Proc.*, vol. 2, no. 4, 2019.
- [92] G. Artetxe, J. Paredes, B. Prieto, M. Martinez-Iturralde, and I. Elosegui, "Optimal pole number and winding designs for low speed-high torque synchronous reluctance machines," *Energies*, vol. 11, no. 1, 2018.
- [93] M. Hadžiselimović, M. Mlakar, and B. Štumberger, "Impact of pole pair number on the efficiency of an induction generator for a mini hydro power plant," *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 89, no. 2 B, pp. 17–20, 2013.
- [94] M. S. Islam, S. Mir, T. Sebastian and S. Underwood, "Design considerations of sinusoidally excited permanent magnet machines for low torque ripple applications," *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting.*, Seattle, WA, USA, 2004, pp. 1723-1730 vol.3.
- [95] N. Soda and M. Enokizono, "Relation Between Stator Core Shape and Torque Ripple for SPM Motor," *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Alexandroupoli, 2018, pp. 955-960.