



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Μοντελοποίηση, πειραματική επιβεβαίωση και βελτιστοποίηση γεωμετρίας κινητήρα μονίμων μαγνητών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τρις Ειρήνη Κ. Κουκουβίνη

Επιβλέπων : Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Μοντελοποίηση, πειραματική επιβεβαίωση και βελτιστοποίηση γεωμετρίας κινητήρα μονίμων μαγνητών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τρις Ειρήνη Κ. Κουκουβίνη

Επιβλέπων : Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 25^η Οκτωβρίου του 2016.

Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Στέφανος Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σταύρος Παπαθανασίου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

.....

Τρις Ειρήνη Κ. Κουκουβίνη

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

Copyright © Τρις Ειρήνη Κ. Κουκουβίνη, 2016

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 την συγγραφέα.

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

Περίληψη

Η παρούσα εργασία επιχειρεί τη μελέτη ενός υφιστάμενου σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών (350ΣΑΛ, 400W) και στη συνέχεια τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση και να μειωθεί το βάρος του στα πλαίσια εφαρμογής ηλεκτρικού οχήματος. Συγκεκριμένα η εργασία περιλαμβάνει τρία στάδια: ανάπτυξη κατάλληλου μοντέλου προσομοίωσης, πειραματική εξακρίβωση των παραμέτρων του συγκεκριμένου κινητήρα και βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του.

Αρχικά, μετά από μία σύντομη παρουσίαση των ηλεκτρικών μηχανών και των διάφορων ειδών που χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, αναλύθηκε ο τρόπος λειτουργίας και αναπαράστασης όσο και τα χαρακτηριστικά των σύγχρονων μηχανών επιφανειακών μονίμων μαγνητών. Στη συνέχεια, αναπτύσσεται ένα παραμετρικό μοντέλο που αναπαριστά με ικανοποιητική ακρίβεια μία μηχανή μονίμων μαγνητών, ανάλογα με τα διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τα οποία αποτελούν εισόδους του μοντέλου. Κατόπιν, πραγματοποιήθηκε η πειραματική εξακρίβωση των λειτουργικών χαρακτηριστικών της υφιστάμενης μηχανής, με βάση πειραματική διάταξη που διαμορφώθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος. Τα πειραματικά αποτελέσματα της μηχανής αυτής συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα προσομοιωμένα, αναδεικνύοντας την πολύ καλή σύγκλιση, και επομένως την ακρίβεια του αναπτυχθέντος μοντέλου. Στο τελικό βήμα της διπλωματικής, πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της μηχανής ώστε να προκύψουν βέλτιστες διαμορφώσεις ανταγωνιστικές της παρούσας. Αυτό επιχειρήθηκε με χρήση δύο διαδεδομένων πολυκριτηριακών εξελικτικών αλγορίθμων: Εξελικτικού Μετώπου Pareto (Strength Pareto Evolutionary Algorithm II) και Επιλογής Ομαδικού Μετώπου Pareto (Pareto Envelope-based Selection Algorithm II), ώστε να προκύψει και μία έμμεση σύγκριση της αποδοτικότητας έκαστης μεθοδολογίας. Εντέλει, επελέγησαν ορισμένες συγκεκριμένες γεωμετρίες από το πλήθος βέλτιστων λύσεων που δίνουν οι παραπάνω αλγόριθμοι, οι οποίες ικανοποιούν τα κριτήρια καλύτερης απόδοσης και μείωσης βάρους που αναφέρθηκαν παραπάνω αλλά και εξασφαλίσθηκε μέσω κατάλληλης τρισδιάστατης θερμικής ανάλυσης, ότι δεν παρουσιάζουν κάποιο θερμικό πρόβλημα.

Στις προσομοιώσεις που έγιναν, χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων FEMM, αριθμητικής ολοκλήρωσης διαφορικών εξισώσεων MATLAB και τρισδιάστατου μηχανολογικού σχεδιασμού Solidworks.

Λέξεις κλειδιά: Κινητήρες μονίμων μαγνητών, ηλεκτρικά οχήματα, σχεδίαση ηλεκτρικού κινητήρα, επιφανειακοί μαγνήτες, πειραματική διάταξη, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, παραμετροποιημένη σχεδίαση, βελτιστοποίηση γεωμετρίας, θερμική ανάλυση, SPEA II, PESA II, εξελικτικοί αλγόριθμοι, πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, μέτωπο Pareto

Abstract

The present diploma thesis undertakes a study of the structure and operation of an existing synchronous permanent magnet motor (350rpm, 400W) and its geometry optimization in order to achieve greater efficiency and lower weight characteristics for electric vehicle applications. More specifically, the study is developed in three steps: the development of a simulation model, the laboratory measurements in order to determine the operating characteristics of the given machine and the geometry optimization.

In a first step an introduction to electric machines and the different available choices for electric vehicle applications is presented, while the operating principles and the equivalent circuit of synchronous machines with surface mounted permanent magnets are described. Next, a parametric geometry model is developed in order to simulate the operation of such a motor with accuracy. Moreover, the experimental verification of the operating characteristics of the given motor is performed through an experimental setup in the Laboratory of Electric Machinery and Power Electronics. The experimental results obtained were compared with the simulation ones validating the developed model's accuracy. In the final stage of the thesis, an optimization of the machine geometry was undertaken in order to achieve greater efficiency and less weight. The optimization was performed using two different multi-objective, evolutionary algorithms: Strength Pareto Evolutionary Algorithm II (SPEA II) and Pareto Envelope-based Selection Algorithm II (PESA II), in order to compare the efficiency of the two algorithms. Finally, from the obtained pool of optimized geometries a couple of them were chosen, that exhibit improved efficiency and lower weight. In order to ensure that no thermal problems appear, an appropriate 3D thermal analysis has been implemented for the reference motor and the optimized geometry cases proposed.

The simulations presented developed in this diploma thesis use the finite elements software FEMM, multi-paradigm numerical computing software MATLAB and 3D CAD design and analysis software Solidworks.

Key Words: Permanent magnets, electric vehicles, electric motor design, surface mounted magnets, finite element method, parametric design, design optimization, evolutionary algorithms, thermal analysis, SPEA II, PESA II, experimental verification, multi-objective optimization, Pareto front

Ευχαριστίες

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

Ευχαριστώ θερμά, τον Καθηγητή μου κ. Αντώνιο Κλαδά για την εμπιστοσύνη που έδειξε αναθέτοντάς μου την παρούσα εργασία, για την στήριξη και την καθοδήγησή του καθώς και την άψογη συνεργασία καθόλη τη διάρκεια, ως την περάτωσή της.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Χρήστο Θ. Κρασόπουλο για την πρόθυμη καθοδήγηση και στήριξή του σε κάθε βήμα της διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερος ευχαριστώ, επίσης, τον Τεχνικό του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος κ. Παναγιώτη Ζάννη για την πολύτιμη βοήθεια του και προθυμία του κατά την διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και ιδιαίτερα τον αδερφό μου καθώς και τους φίλους μου για την πολύτιμη στήριξή τους.

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Εισαγωγή στην ηλεκτροκίνηση	1
1.2 Συνιστώσες συστημάτων ηλεκτροκίνησης	2
1.3 Σκοπός της εργασίας.....	4
1.4 Δομή της εργασίας	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	7
2.1 Είδη ηλεκτρικών μηχανών	7
2.1.1 Κινητήρες DC	8
2.1.2 Κινητήρες επαγωγής	9
2.1.3 Σύγχρονοι Κινητήρες	9
2.2 Μηχανές μονίμων μαγνητών	11
2.2.1 Διαμόρφωση ηλεκτρικής μηχανής.....	14
2.2.2 Λειτουργικά χαρακτηριστικά.....	15
2.2.3 Αναπαράσταση μηχανής και ισοδύναμο κύκλωμα.....	16
2.2.4 Ισχύς και ροπή της μηχανής.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	21
3.1 Εισαγωγή	21
3.2 Πειραματική διάταξη	21
3.3 Αποτελέσματα μετρήσεων.....	25
3.3.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας	26
3.3.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά.....	40
3.3.3 Δομή και χαρακτηριστικά τυλιγμάτων	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ	45
4.1 Προσομοίωση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.....	45
4.2 Ανάπτυξη μοντέλου αναπαράστασης ηλεκτρικής μηχανής.....	47
4.2.1 Κατασκευή γεωμετρίας.....	47
4.2.2 Υπολογισμός ροπής διακένου	49
4.2.3 Υπολογισμός ηλεκτρεγερτικής δύναμης	49
4.2.4 Υπολογισμός απωλειών	50

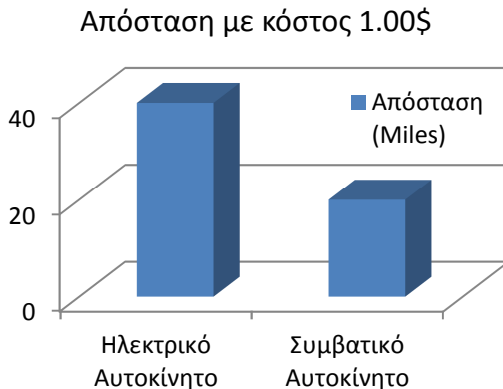
4.2.5. Υπολογισμός βάρους μηχανής.....	54
4.3 Σύγκριση προσομοιωμένων με πειραματικά αποτελέσματα	55
4.3.1. Καμπύλη κενού φορτίου	55
4.3.2. Ροπή εξόδου και βαθμός απόδοσης	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	63
5.1 Εισαγωγή.....	63
5.2 Θεμελιώδεις αρχές βελτιστοποίησης	63
5.2.1. Βελτιστοποίηση πραγματικών συναρτήσεων	64
5.2.2. Χώροι αναζήτησης και αποτίμησης	64
5.2.3 Η κλασική βελτιστοποίηση	66
5.2.4 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση	66
5.3. Εξελικτικοί Αλγόριθμοι	68
5.3.1 Αλγόριθμος SPEA II.....	70
5.3.2 Αλγόριθμος PESA II.....	73
5.4 Αποτελέσματα αλγορίθμων	75
5.4.1 Κριτήριο υπερόγκου για την αξιολόγηση του μετώπου Pareto	77
5.4.2 Βελτιστοποίηση με τον αλγόριθμο PESA II	77
5.4.3 Βελτιστοποίηση με τον αλγόριθμο SPEA II	95
5.4.4 Θερμικός έλεγχος των βελτιστοποιημένων μοντέλων	99
5.5 Συγκεντρικά αποτελέσματα.....	110
5.6 Συμπεράσματα βελτιστοποίησης	112
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	115
6.1 Κυριότερα συμπεράσματα	115
6.2 Σημεία επιστημονικής συνεισφοράς.....	116
6.3 Θέματα προς περαιτέρω διερεύνηση	116
Βιβλιογραφία.....	117
Παράρτημα.....	119

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1. Εισαγωγή στην ηλεκτροκίνηση

Τα τελευταία χρόνια γίνεται όλο και πιο έντονη η τάση στροφής προς εναλλακτικές πηγές ενέργειας, λόγω της αναπόφευκτης μείωσης των φυσικών πόρων και της μαζικότερης ευαισθητοποίησης προς το περιβάλλον. Τα εναπομείναντα αποθέματα πετρελαίου υπολογίζονται, με τους τρέχοντες ρυθμούς κατανάλωσης, να τελειώνουν στα επόμενα 50-100 χρόνια, ενώ πλέον όλο και περισσότερες χώρες αντιλαμβάνονται την δραματικότητα της κατάστασης στον τομέα της περιβαλλοντικής μόλυνσης. Οι απαιτήσεις αυτές έχουν φέρει στο προσκήνιο την χρήση των ηλεκτρικών κινητήρων σε ηλεκτρικά οχήματα, ως μία ρεαλιστική εναλλακτική από πλευράς απόδοσης, επίδοσης και κατανάλωσης σε σχέση με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης.

Συγκεκριμένα, οι ηλεκτρικοί κινητήρες έχουν πολύ μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης, φτάνοντας ως και τριπλάσιες τιμές. Η ηλεκτρική μηχανή αυτή καθεαυτή έχει απόδοση της τάξης του 80% και δυνατότητα αξιοποίησης αντίστροφης λειτουργίας απορροφώντας ενέργεια από φρεναρίσματα. Σε συνδυασμό με τις επιμέρους μετατροπές ενέργειας και την τροφοδοσία από το δίκτυο η απόδοση πέφτει σε τιμές περί 60%, έχοντας στον αντίποδα τους συμβατικούς κινητήρες με απόδοση που δεν ξεπερνά το 20%, λόγω μεγάλων απωλειών σε θερμότητα.



Σχήμα 1.1: Χονδρική σύγκριση κόστους μετακίνησης με ηλεκτροκίνηση και συμβατικές μεθόδους [23]

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

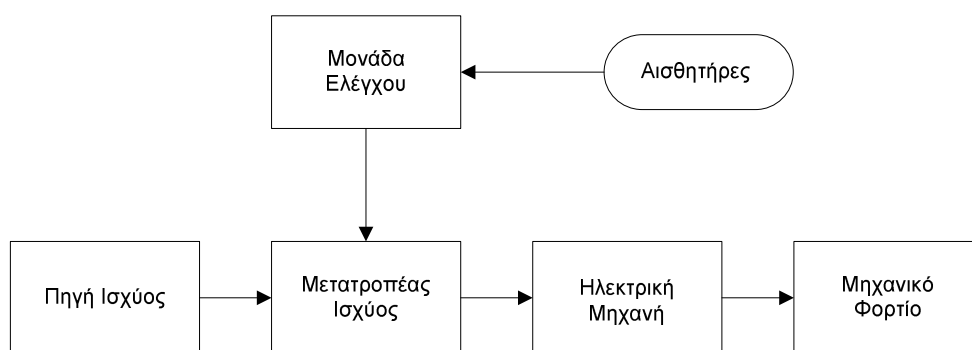
Λόγω των παραπάνω πλεονεκτημάτων, πολλές φορές χρησιμοποιήθηκαν οι ηλεκτρικοί κινητήρες για την κίνηση οχημάτων, με τις πρώτες απόπειρες να ξεκινούν τον 19ο αιώνα. Στα τέλη του 20ού και στις αρχές του 21ου έκαναν πάλι έντονη την εμφάνισή τους, αλλά η εξέλιξη της τεχνολογίας στον τομέα του

αντίπαλου δέους, των μηχανών εσωτερικής καύσης, καθώς και οι μειώσεις στην τιμή του πετρελαίου, παραγκώνισαν την διάδοση των ηλεκτρικών οχημάτων. Άλλωστε, δεν είχε λυθεί ακόμα το θέμα της αποθήκευσης της απαιτούμενης ενέργειας για την αυτονομία του ηλεκτρικού αυτοκινήτου, επιβάλλοντας μικρή εμβέλεια κίνησης.

Έχοντας μειωθεί πλέον τα κόστη των μπαταριών σε μεγάλο βαθμό, αλλά και όντας αποδοτικότερες πλέον με μεγαλύτερη χωρητικότητα, ήρθε τα τελευταία χρόνια πάλι η ηλεκτροκίνηση στο επίκεντρο, με μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες να στρέφουν το βλέμμα προς αυτό το κομμάτι της αγοράς.

1.2 Συνιστώσες συστημάτων ηλεκτροκίνησης:

Στην ηλεκτροκίνηση, η ισχύς για την πρόωση του αυτοκινήτου παρέχεται από έναν ή περισσότερους ηλεκτρικούς κινητήρες που τροφοδοτούνται από πηγή επάνω στο όχημα. Συνήθως την πηγή του συστήματος αποτελεί μπαταρία που εξασφαλίζει τροφοδότηση συνεχούς ρεύματος. Το συνεχές ρεύμα περνά από τον ελεγκτή - μετατροπέα, ο οποίος θα προσαρμόσει το ρεύμα στην απαραίτητη τιμή και συχνότητα. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται η οδήγηση του ηλεκτρικού κινητήρα, ο οποίος μέσω του συστήματος μετάδοσης επιβάλλει την επιθυμητή πρόωση.



Σχήμα 1.2: Σχηματική δομή του συστήματος ηλεκτροκίνησης

Πιο αναλυτικά, η τροφοδότηση εξασφαλίζεται από ηλεκτροχημικούς συσσωρευτές οι οποίοι μπορεί να είναι πολλών ειδών. Οι πιο φθηνοί και μέχρι πρόσφατα πιο διαδεδομένοι συσσωρευτές ήταν οι συσσωρευτές μολύβδου - οξέος, οι οποίοι έχουν την δυνατότητα παρά την μικρή πυκνότητα ενέργειας, να εξασφαλίζουν μεγάλης έντασης ρεύματα άρα και μεγάλη πυκνότητα ισχύος. Γενικά αποτελούν μία φθηνή λύση με χαμηλή αποδοτικότητα και αρκετά προβλήματα που περιλαμβάνουν την χωρητικότητα, το μέγεθος, την τοξικότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται, ακόμα και την ασφάλειά τους.

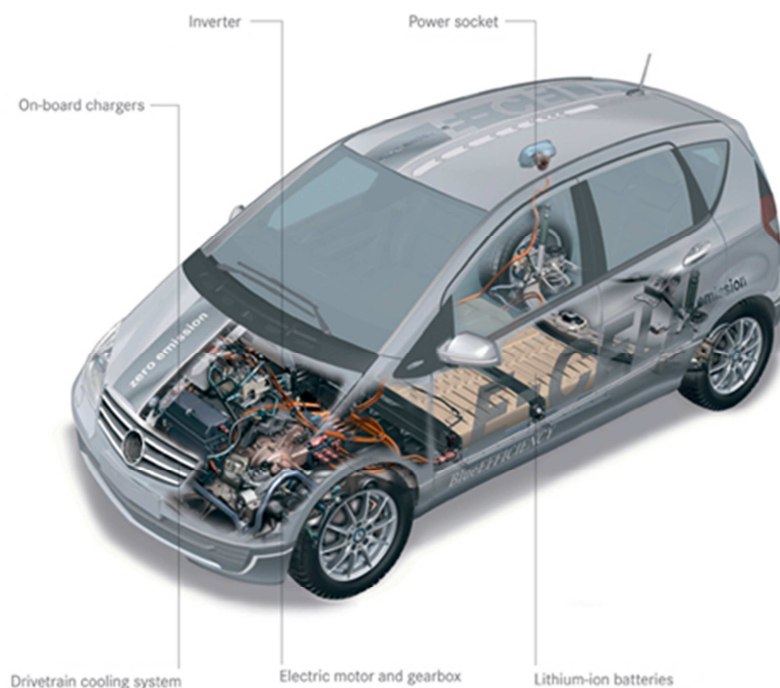
Οι απαιτήσεις σε μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, επέβαλαν στροφή σε άλλες τεχνολογίες συσσωρευτών. Οι βασικότερες νέες τεχνολογίες μπαταριών που αναπτύχθηκαν είναι οι συσσωρευτές νικελίου - μετάλλου και οι λιθίου - ιόντων. Οι μεν συσσωρευτές νικελίου - μετάλλου, έχουν πολύ υψηλή πυκνότητα ενέργειας και πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής, αλλά μικρή αποδοτικότητα και

λειτουργία που εξαρτάται από τις θερμοκρασιακές συνθήκες, μειώνοντας την αποδοτικότητα περαιτέρω σε ψυχρό περιβάλλον.

Οι μπαταρίες λιθίου από την άλλη πλευρά, πλέον είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη επιλογή σε ηλεκτρικά οχήματα, έχοντας πολύ μεγάλη πυκνότητα ενέργειας, αρκετά καλή πυκνότητα ισχύος και αποδοτικότητα φόρτισης/ εκφόρτισης που φτάνει ως και 90%. Παρόλα τα πολύ καλά αυτά χαρακτηριστικά τους, έχουν επίσης μικρό χρόνο ζωής και εκφυλίζονται με την πάροδο του χρόνου.

Γενικότερο μειονέκτημα των συσσωρευτών αποτελεί η μικρή αυτονομία τους, σε συνδυασμό με το μη ανεπτυγμένο δίκτυο σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων και με το μεγάλο χρόνο που απαιτούν για επαναφόρτιση. Λόγω αυτού, πέραν από τον συμβατικό τρόπο τροφοδότησης, έχουν γίνει απόπειρες τροφοδότησης με εναλλακτικές πηγές ενέργειας, όπως με χρήση ηλιακών πανέλων και κυψέλες υδρογόνου. Προς το παρόν, όμως, η χαμηλή αποδοτικότητα των συγκεκριμένων τρόπων τροφοδότησης σε σχέση με τις μπαταρίες, καθιστά τους συσσωρευτές την βασική επιλογή, τουλάχιστον μέχρι την περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας στους παραπάνω τομείς. [1]

Η τροφοδότηση ακολουθείται από τους μετατροπείς τάσης, που είναι απαραίτητοι για την οδήγηση του ηλεκτρικού κινητήρα. Οι μετατροπείς αναλαμβάνουν να παρέχουν την απαιτούμενη τριφασική τάση με ελεγχόμενες τιμές πλάτους, φάσεως και συχνότητας, ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις του οχήματος. Η λειτουργία τους βασίζεται σε διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος σε συνδυασμό με μικροεπεξεργαστή ή ψηφιακό επεξεργαστή σήματος και η αποδοτικότητά τους συμβάλλει κατά μεγάλο βαθμό στην αποδοτικότητα όλου του οχήματος. Εξελίξεις σε αυτό το κομμάτι της τεχνολογίας έχουν συντελέσει σε αποδοτικές διατάξεις μετατροπέων, μεγάλης αντοχής και ταχύτητας, με πολύ μικρότερο κόστος από ότι στο παρελθόν.



Σχήμα 1.3: Μέρη του συστήματος ηλεκτροκίνησης σε αυτοκίνητο [25]

Από ηλεκτρολογικής άποψης, το τελευταίο και πλέον βασικό κομμάτι της πρόωσης είναι αυτός καθ' εαυτός ο ηλεκτροκινητήρας, που μπορεί να είναι είτε συνεχούς ρεύματος, είτε επαγωγής, είτε σύγχρονος, με κάθε κατηγορία να έχει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά της όπως αυτά θα εξεταστούν αργότερα, σε παρακάτω κεφάλαιο.

1.3. Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας

Ο κινητήρας ενός ηλεκτρικού οχήματος, αποτέλεσε και το επίκεντρο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, που εκπονήθηκε στο εργαστήριο ηλεκτρικών μηχανών και ηλεκτρονικών ισχύος. Βασικός σκοπός ήταν η εξακρίβωση των χαρακτηριστικών και η βελτιστοποίηση μίας δοθείσας κινητήριας σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών για χρήση σε ηλεκτροκίνηση.

Συγκεκριμένα, αρχικά έπρεπε να γίνουν πειραματικές μετρήσεις για να γίνουν γνωστές οι δυνατότητες της υπό κρίση μηχανής τόσο σε απόδοση όσο και σε επίδοση, καθώς και να εξακριβωθούν τα στοιχεία της γεωμετρίας που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της, όπως επίσης και ο τρόπος σύνδεσης των τυλιγμάτων. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα γεωμετρίας, αναπτύχθηκε προσομοιωτικό μοντέλο με τη βοήθεια λογισμικού, ώστε να μπορεί να γίνει αρκετά ικανοποιητική αναπαράσταση της παραπάνω μηχανής, δίνοντας αποτελέσματα που επαληθεύονται από τις πειραματικές μετρήσεις. Η υλοποίηση του μοντέλου έκανε χρήση παραμετροποιημένων μεθόδων σχεδίασης και βασίστηκε σε πεδιακή ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Εφαρμόζοντας στο παραπάνω προσομοιωτικό μοντέλο εξελικτικούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης όπως έχουν αναπτυχθεί στην βιβλιογραφία, με κριτήρια τη μέγιστη δυνατή απόδοση με το ελάχιστο δυνατό βάρος, προέκυψε η νέα βελτιστοποιημένη γεωμετρία μηχανής.

1.4. Δομή της Εργασίας:

Η διπλωματική εργασία, λόγω του αντικειμένου εξέτασης, περιλαμβάνει πειραματική μελέτη και ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης καθώς και εφαρμογή αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Οπότε η δομή της εργασίας χωρίζεται στις ανάλογες ενότητες.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι σύγχρονοι κινητήρες μονίμων μαγνητών, στους οποίους ανήκει και ο προς εξέταση κινητήρας και περιγράφονται τα πλεονεκτήματά τους, καθώς και ο λόγος που έχουν εδραιωθεί ως κινητήρες ηλεκτροκίνησης.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η πειραματική διάταξη που διαμορφώθηκε στο εργαστήριο ηλεκτρικών μηχανών και ηλεκτρονικών ισχύος για την διεξαγωγή των απαιτούμενων μετρήσεων, καθώς και τα δεδομένα όπως προέκυψαν στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύεται το μοντέλο προσομοίωσης που αναπτύχθηκε για την αναπαράσταση της μηχανής. Τέλος, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του προσομοιωτικού μοντέλου που αναπτύχθηκε με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Κατόπιν, στο Κεφάλαιο 5 γίνεται εφαρμογή των αλγορίθμων βελτιστοποίησης, που θεωρήθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν για καλύτερα και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα και γίνεται και η θερμική ανάλυση των προκύπτουσων γεωμετριών. Επίσης, με βάση τα αποτελέσματα των αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν γίνεται η μεταξύ τους σύγκριση.

Τέλος, στο 6ο Κεφάλαιο της εργασίας, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα όπως προκύπτουν από το σύνολο της εργασίας, από τις πειραματικές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν ως και το κομμάτι της βελτιστοποίησης.

Κεφάλαιο 2: Επιλογή και Χαρακτηριστικά Ηλεκτρικού Κινητήρα

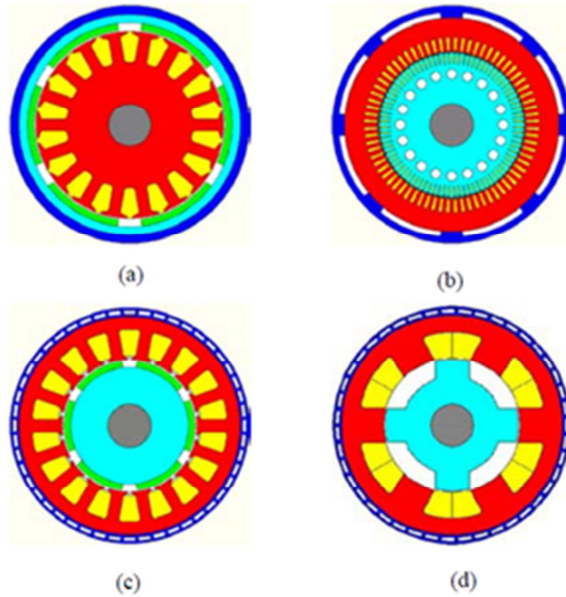
2.1. Είδη ηλεκτρικών Μηχανών

Για την ηλεκτροκίνηση οχημάτων, το βασικότερο υποσύστημα για την επίτευξη της απαιτούμενης πρόωσης είναι η ηλεκτρική μηχανή που αποτελεί αυτόν καθεαυτό τον μετατροπέα της ηλεκτρικής ενέργειας σε κίνηση, και το αντίστροφο σε ιδιαίτερες λειτουργίες. Εξ αυτού, η σχεδίαση και η βελτιστοποίηση του κινητήρα, ώστε να πληροί τις απαιτούμενες προδιαγραφές, καθίσταται μάλλον το βασικότερο κομμάτι της κατασκευής ενός συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης. Ιδιαίτερη είναι η πολυπλοκότητα για την επίτευξη της ιδανικής γεωμετρίας, καθώς η ικανοποίηση των απαιτήσεων αποτελεί μία πολύ λεπτή ισορροπία μεταξύ πολλών αλληλεξαρτημένων παραμέτρων και συμβιβασμών.

Συγκεκριμένα, μία ηλεκτρική μηχανή οφείλει να παρέχει υψηλή και εύκολα ελεγχόμενη ροπή σε χαμηλές ταχύτητες, ώστε να επιτυγχάνεται ομαλή και μεγάλη επιτάχυνση, ενώ παράλληλα να εξασφαλίζει σταθερή ισχύ εξόδου σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων λειτουργίας. Πέραν των παραπάνω, οι τιμές των απωλειών θα πρέπει να κρατούνται στα ελάχιστα δυνατά επίπεδα, παρέχοντας υψηλή απόδοση και υψηλή πυκνότητα ισχύος.

Ταυτόχρονα, οφείλει να ακολουθεί υψηλές προδιαγραφές αντοχών, τόσο μηχανικών όσο και θερμοκρασιακών, έτσι ώστε να συνδυάζει μεγάλη διάρκεια ζωής και μικρές απαιτήσεις συντήρησης. Τέλος, φυσικά είναι επιθυμητό το ελάχιστο δυνατό κόστος και βάρος της ηλεκτρικής μηχανής, αλλά και διάφορες εξειδικευμένες απαιτήσεις, αναλόγως της εφαρμογής και των ιδιαιτεροτήτων του κάθε συστήματος.

Στην ηλεκτροκίνηση, όπως αναφέρθηκε εισαγωγικά, είναι δυνατή η χρήση και των τριών τύπων ηλεκτρικών μηχανών και η επιλογή γίνεται ανάλογα με τις ιδιαίτερες απαιτήσεις κάθε περίπτωσης, καθώς καθεμία από τις δυνατές επιλογές έχει και διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.



Σχήμα 2.1: (a) DC μηχανή, (b) Μηχανή Επαγωγής, (c) Μηχανή Μονίμων Μαγνητών (d) Μηχανή Μαγνητικής Αντίδρασης [2]

2.1.1 Κινητήρες DC:

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

Το μεγάλο μειονέκτημα, όμως των DC μηχανών είναι το μεγάλο κόστος τους καθώς και η μικρή αξιοπιστία τους, σε βαθμό που αντισταθμίζονται τα παραπάνω πλεονεκτήματα. Λόγω των ψηφιακών και του συλλέκτη, που είναι ιδιαίτερα ευπαθείς και φθείρονται διαρκώς, καθώς εκεί πραγματοποιείται η μηχανική ανόρθωση του ρεύματος, οι ανάγκες σε συντηρήσεις είναι υψηλές και η διάρκεια ζωής τους επιβαρύνεται από πολλούς παράγοντες, όπως υγρασία, πίεση αλλά και το ίδιο το φορτίο. Η πρόοδος στην τεχνολογία ελέγχου των υπόλοιπων κατηγοριών κινητήρων εκτόπισε τους DC κινητήρες από το προσκήνιο. Παρόλα αυτά, εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται για εφαρμογές μικρής ισχύος.

Τέλος, υπάρχουν οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς συλλέκτη και ψήκτρες (Brushless DC). Οι κινητήρες αυτοί, επιτυγχάνουν υψηλές τιμές απόδοσης, με μικρό μέγεθος, άρα και μεγάλη πυκνότητα ενέργειας. Σημειώνεται, επίσης, ότι παρέχουν μεγάλη ροπή, λόγω της ορθογώνιας μορφής μαγνητικής ροής και ρεύματος. Το μειονέκτημά τους είναι ότι απαιτείται η γνώση της ακριβούς θέσης του δρομέα για την οδήγησή τους. Τόσο η δομή, όσο και η λειτουργία τους είναι ίδια με αυτή των σύγχρονων μηχανών μονίμων μαγνητών.[2][3][4]

2.1.2 Κινητήρες επαγωγής:

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

Γενικά οι κινητήρες επαγωγής έχουν μικρό κόστος και μικρές απαιτήσεις συντήρησης, παρέχοντας έτσι υψηλή αξιοπιστία, σε αντίθεση με τους DC κινητήρες. Παράλληλα, έχουν πιο ώριμη τεχνολογία σε σχέση με τις σύγχρονες μηχανές, οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω. Η αρνητική πλευρά είναι ότι παρουσιάζουν καλή απόδοση και μεγάλη ισχύ εξόδου μόνο για ορισμένες τιμές στροφών, ανάλογα με τις προδιαγραφές κατασκευής. Παρόλα αυτά, με την βοήθεια ηλεκτρονικών ισχύος είναι δυνατός ο καλός σχετικά έλεγχος της μηχανής και η μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας, που μπορεί να προσαρμόσει τις στροφές στις επιθυμητές τιμές. [2][3] [4]

2.1.3 Σύγχρονοι Κινητήρες:

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

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

Η κατηγορία των σύγχρονων κινητήρων μαγνητικής αντίδρασης (SRM), από την άλλη μεριά, έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον λόγω του ιδιαίτερα χαμηλού κόστους τους σε συνδυασμό με την απλή κατασκευή τους. Η απλότητα αυτή οφείλεται στο ότι απουσιάζει τύλιγμα διέγερσης και μόνιμοι μαγνήτες στο δρομέα, καθώς η λειτουργία τους βασίζεται στην μεταβολή της μαγνητικής αντίστασης του δρομέα, εκμεταλλευόμενοι την ροπή εκτυπότητας. Πέραν αυτών, έχουν εύκολο έλεγχο και πολύ καλή χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας.

Τα προβλήματα που παρουσιάζουν αυτοί οι κινητήρες είναι αρκετά και έχουν μεγάλη επιρροή στις εφαρμογές ηλεκτροκίνησης. Συγκεκριμένα παρουσιάζουν έντονη κυμάτωση ροπής, έντονο θόρυβο λειτουργίας, μικρή δυνατότητα σε παροχή ισχύος εξόδου και απαιτούν ιδιαίτερες τοπολογίες μετατροπέα. [5][2][3][4]

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

Χαρακτηριστικά	Κινητήρας			
	DC	Επαγωγής	Μονίμων Μαγνητών	Κινητήρας Μαγνητικής Αντίδρασης
Πυκνότητα Ισχύος	2.5	3.5	5	3.5
Απόδοση	2.5	3.5	5	3.5
Έλεγχος	5	5	4	3
Αξιοπιστία	3	5	4	5
Τεχνολογική Πρόοδος	5	5	4	4
Κόστος	4	5	3	4
Συνολική Αξιολόγηση	22	27	25	23

Πίνακας 2.1: Σύγκριση διαφόρων τύπων μηχανών [2][3]

Όπως προκύπτει, οι κινητήρες που προσφέρονται κυρίως για την ηλεκτρική πρόωση είναι οι κινητήρες επαγωγής και μονίμων μαγνητών. Ιδίως λαμβάνοντας υπόψη τις εξελίξεις στην τεχνολογία μαγνητών και τη μείωση του κόστους τους, οι κινητήρες αυτοί μονίμων μαγνητών αποτελούν όλο και δελεαστικότερη λύση.

2.2. Μηχανές Μονίμων Μαγνητών:

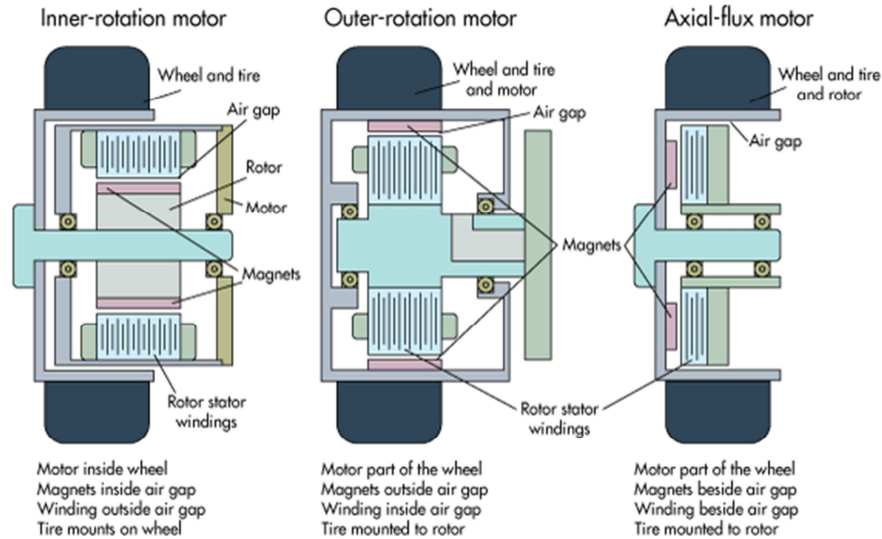
Οι μηχανές αυτές είναι μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος, με την τριφασική τροφοδοσία να επιβάλλεται στο τύλιγμα τυμπάνου, διαμορφώνοντας έτσι μαγνητικό πεδίο στο στάτη. Ταυτόχρονα, μαγνητικό πεδίο αναπτύσσεται και στο δρομέα της μηχανής και ανάλογα με την μέθοδο δημιουργίας πεδίου στο δρομέα χωρίζονται και στις αντίστοιχες κατηγορίες. Από την αλληλεπίδραση των δύο μαγνητικών πεδίων, γίνεται η ηλεκτρομηχανική μετατροπή.

Στις brushed DC μηχανές, η λειτουργία των ψηκτρών και του συλλέκτη, εξασφαλίζουν ότι το ρεύμα περνά από το κάθε τύλιγμα με κατεύθυνση ανάλογα με το μόνιμο μαγνητικό πεδίο. Επίσης, μέσω των ψηκτρών, ενώ το ρεύμα σε κάθε τύλιγμα έχει ημιτονοειδή μορφή, γίνεται μηχανική ανόρθωση και μετατρέπεται σε DC, και αντίστροφα ανάλογα τη λειτουργία. Στις μηχανές brushless DC, αντί να γίνεται αυτή η ανόρθωση μηχανικά, γίνεται με ηλεκτρονικούς εξωτερικούς αντιστροφείς. Η παρουσία του συλλέκτη προκαλεί πολλά προβλήματα, τόσο στο ότι, επειδή αναλαμβάνει τη μετατροπή μεγάλων ρευμάτων, φθείρεται και απαιτεί συντήρηση, όσο και ότι, λόγω της χωροθέτησης και της κατασκευής της μηχανής, προκαλεί εμφάνιση απωλειών στο ρότορα, μέρος της μηχανής που είναι δύσκολο να επιτευχθεί ικανοποιητική ψύξη. Αντίθετα με τις brushless DC μηχανές, τοποθετώντας τους μόνιμους μαγνήτες στον ρότορα και τα τυλίγματα στο στάτη, όχι μόνο μειώνεται η πολυπλοκότητα της διάταξης, αλλά είναι αποτελεσματικότερη η ψύξη.

Ένα κριτήριο διαχωρισμού των μηχανών αυτών είναι με βάση τη σχέση του διανύσματος ροής με τον άξονα της μηχανής, οπότε διακρίνονται σε μηχανές αξονικής ροής και μηχανές ακτινικής ροής.

Γενικώς, οι μηχανές αξονικής ροής, αποδίδουν υψηλότερες τιμές ροπής διακένου και πυκνότητας ροπής και ισχύος σε σχέση με τις μηχανές ακτινικής ροής, όταν ο άξονας της μηχανής έχει μικρό μήκος και ο αριθμός των πόλων είναι μεγάλος (μεγαλύτερος των 10). Λόγω αυτού, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, όπου υπάρχουν σημαντικοί περιορισμοί για τις διαστάσεις. Επίσης, έχουν μεγάλο λόγο διαμέτρου του πυρήνα προς το αξονικό μήκος, δίνοντας έτσι τα περιθώρια εγκατάστασης μεγάλου αριθμού πόλων. Αυτό τις καθιστά ελκυστική λύση για εφαρμογές υψηλής συχνότητας ή χαμηλών ταχυτήτων. Τέλος, έχοντας μεγάλη εσωτερική διάμετρο πυρήνα σε σχέση με τη διάμετρο του άξονα περιστροφής, δίνουν τη δυνατότητα για καλύτερο αερισμό και καλύτερη ψύξη.

Οι γεννήτριες αυτές, παρουσιάζουν και αρκετά μειονεκτήματα. Συγκεκριμένα, η μεγάλη ελκτική δύναμη μεταξύ στάτη και δρομέα, δημιουργεί θέματα ισορροπίας της μηχανής, οδηγώντας σε ιδιαίτερες διαμορφώσεις με διπλό στάτη. Πέραν αυτού, κάθε αύξηση στο μήκος της μηχανής συνεπάγεται και αύξηση της διαμέτρου του διακένου, που προϋποθέτει νέα σχεδίαση. Διαφορετικά μπορούν να προστεθούν δίσκοι στον δρομέα, αυξάνοντας το κόστος της μηχανής. [6][7][4]



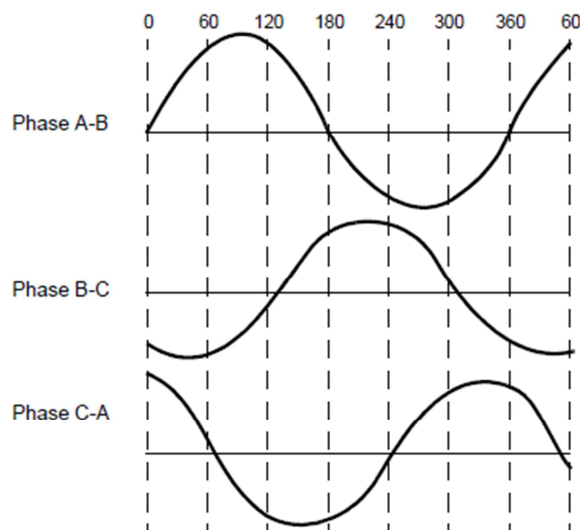
Σχήμα 2.2: Μηχανές Ακτινικής (εσωτερικού και εξωτερικού δρομέα) και αξονικής ροής. [26]

Από την άλλη, οι γεννήτριες ακτινικής ροής, έχουν χαμηλότερο κόστος και είναι πιο απλές στην κατασκευή τους σε σχέση με τις αξονικής ροής. Πλεονέκτημά τους είναι ότι για αύξηση της ισχύος αρκεί η αύξηση του μήκους της μηχανής, χωρίς νέο σχεδιασμό.

Για τις μηχανές ακτινικής ροής είναι δυνατή και η κατηγοριοποίηση:

- α) Σε ημιτονοειδείς σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη.
- β) Σε τραπεζοειδείς ή τετραγωνικού ή διακοπτικής διέγερσης σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη ανάλογα με τη μορφή των φασικών ρευμάτων του στάτη.

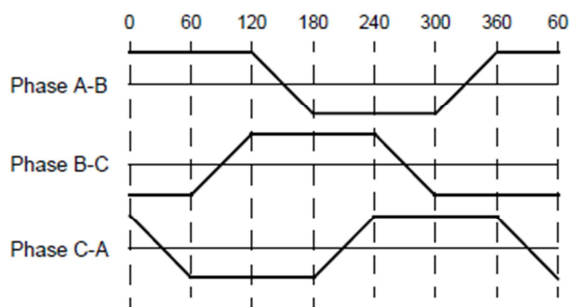
Στις ημιτονοειδείς σύγχρονες μηχανές μόνιμων μαγνητών ο στάτης αποτελείται από τριφασικό ημιτονοειδές τυλίγμα, το οποίο προκαλεί μαγνητικό πεδίο στρεφόμενο με τη σύγχρονη ταχύτητα, ενώ ο δρομέας αποτελείται από επιφανειακούς μαγνήτες. Εάν η μηχανή στρέφεται από εξωτερική πηγή τα τυλίγματα του στάτη παράγουν συμμετρικές τριφασικές ημιτονοειδείς τάσεις. Η μηχανή αυτή δεν εμφανίζει εκτυπότητα, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα μειωμένη εμφάνιση του φαινομένου της αντίδρασης τυμπάνου, εξαιτίας της χαμηλής μαγνητίζουσας αντίδρασης. Συνεπώς, οι μηχανές αυτές λειτουργούν με σταθερή διέγερση, οπότε ο λειτουργικός συντελεστής ισχύος ή η μαγνητεγερτική δύναμη του δρομέα υπό ονομαστική τάση και ρεύμα, δύσκολα μπορεί να μεταβληθεί. Οι μηχανές αυτές αναφέρονται και ως Brushless AC, αν και συνήθως για λόγους ευκολίας συμπεριλαμβάνονται στις Brushless DC.



Σχήμα 2.3: Ημιτονοειδής κυματομορφή της EMF για τις τρεις φάσεις μηχανής μονίμων μαγνητών [8]

Όπως στην ημιτονοειδή σύγχρονη μηχανή, επίσης στην κατηγορία των τραπεζοειδών σύγχρονων μηχανών μονίμων μαγνητών δεν εμφανίζεται εκτυπότητα και ο δρομέας αποτελείται από επιφανειακούς μαγνήτες. Η διαφορά των δύο κατηγοριών έγκειται στο τύλιγμα του στάτη. Σε αντίθεση με την ημιτονοειδή σύγχρονη μηχανή, ο στάτης έχει συγκεντρωμένα τυλίγματα πλήρους βήματος αντί ημιτονοειδούς κατανομής. Για να επιτευχθεί καλή προσέγγιση της ημιτονοειδούς κατανομής στις μηχανές αυτές είναι συνήθης η χρήση κλασματικού βήματος στα τυλίγματα του στάτη. Εάν η μηχανή είναι σε λειτουργία γεννήτριας, παράγει τραπεζοειδείς κυματομορφές φασικής τάσης. Είναι εμφανώς, λοιπόν, απαραίτητη η χρήση μετατροπέα ιδίως για την οδήγηση της μηχανής ως κινητήρα.

Χρησιμοποιώντας σύστημα αντιστροφή και αισθητήρα θέσης, ο οποίος τοποθετείται στον άξονα της μηχανής, είναι δυνατός ο έλεγχος των μηχανών αυτών ώστε να λειτουργούν με χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας παρόμοιας των μηχανών DC χωρίς ψήκτρες, γι' αυτό και χαρακτηρίζονται και ως Brushless DC. Σημειώνεται ότι οι τραπεζοειδείς μηχανές έχουν πλησιέστερη επίδοση σε DC μηχανές, σε σχέση με τις ημιτονοειδούς ροής.



Σχήμα 2.4: Τραπεζοειδής κυματομορφή της EMF για τις τρεις φάσεις μηχανής μονίμων μαγνητών [8]

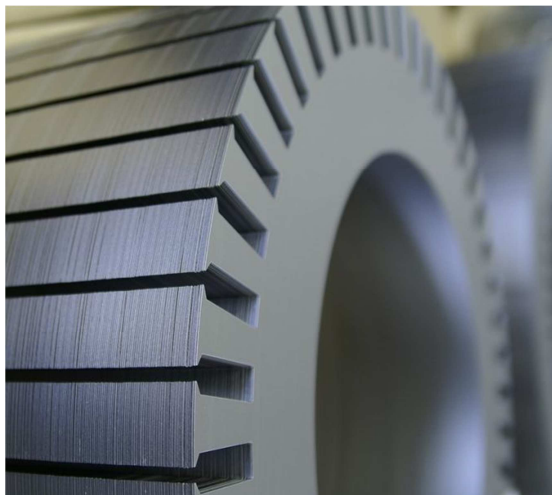
Το πλεονέκτημα των τραπεζοειδών μηχανών είναι ότι είναι απλής κατασκευής και ενώ έχουν μικρό κόστος, παρουσιάζουν σχετικά μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος από τις ημιτονοειδείς μηχανές. [8]

Παρακάτω, θα εμβαθύνουμε στην κατηγορία ημιτονοειδούς σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών, καθώς σε αυτήν την κατηγορία ανήκει η μηχανή πάνω στην οποία έγιναν οι πειραματικές μετρήσεις και εφαρμόστηκαν οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης.

2.2.1. Διαμόρφωση ηλεκτρικής μηχανής:

Οι μηχανές αυτές, ανήκοντας στην κατηγορία των σύγχρονων μηχανών, βασίζουν τη λειτουργία τους στη σύγχρονη περιστροφή των μαγνητικών πεδίων στάτη και δρομέα. Μπορεί να είναι μονοφασικές, διφασικές ή τριφασικές, με πιο διαδεδομένες τις τριφασικές, έχοντας τον αντίστοιχο αριθμό φάσεων στα τυλίγματα του στάτη.

Ο στάτης των μηχανών αυτών, αποτελείται από ατσάλινα ελάσματα, πρεσαρισμένα μεταξύ τους. Τα ελάσματα αυτά κατασκευάζονται είτε σε μηχανουργεία με πρέσες, είτε κόβονται με την χρήση λέιζερ. Κατόπιν, τα ελάσματα συμπιέζονται μεταξύ τους με ειδικές διατάξεις, ώστε να δημιουργηθεί μία ενιαία μάζα. Η διαδικασία αυτή αποσκοπεί στη μείωση των δινορρευμάτων. Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του δρομέα, προκαλεί την ροή επαγόμενων ρευμάτων, τα οποία για ενιαίο στάτη μπορούν να φτάσουν σε πολύ μεγάλες τιμές, προκαλώντας προβλήματα υπερθέρμανσης.



Σχήμα 2.5: Στάτης μηχανής, με εμφανείς τις πρεσαρισμένες λαμαρίνες [27]

Ο στάτης των μηχανών αυτών πρακτικά είναι αντίστοιχος του στάτη των μηχανών επαγωγής. Η διαφοροποίηση αφορά την κατανομή των τυλιγμάτων στα αυλάκια. Συνήθως οι μηχανές Brushless DC έχουν τις τρεις φάσεις συνδεδεμένες ως αστέρα, με την καθεμία διαμορφωμένη σε τυλίγματα. Ένα ή περισσότερα τυλίγματα, περιτυλιγμένα επιπλέον φορές γύρω από τα δόντια του στάτη, τοποθετούνται στις

αυλάκες της μηχανής. Το πώς κατανέμονται τα τυλίγματα στα αυλάκια καθορίζει και τη μορφή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ημιτονοειδή-τραπεζοειδή).

Ο δρομέας της μηχανής είναι κατασκευασμένος επίσης από ατσάλι και μπορεί να είναι είτε συμπαγής, είτε να είναι κατασκευασμένος και αυτός από πρεσαρισμένες λαμαρίνες. Πάνω σε αυτόν είναι τοποθετημένοι οι μόνιμοι μαγνήτες, με εναλλασσόμενη κατεύθυνση του μαγνητικού τους πεδίου.

Με βάση την απαιτούμενη ένταση του μαγνητικού πεδίου, ώστε να ικανοποιούνται οι προδιαγραφές της μηχανής, επιλέγεται το υλικό των μαγνητών. Για πολλά χρόνια η πρώτη επιλογή ήταν οι φερριτικοί μαγνήτες, καθώς έχουν αρκετά μικρό κόστος σε σχέση με τους μαγνήτες σπάνιων γαιών. Επίσης, έχουν μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση, οπότε και μικρές απώλειες δινορρευμάτων, που, όπως θα αναλυθεί σε παρακάτω κεφάλαιο, εξαρτώνται από την ηλεκτρική αντίσταση. Τέλος, έχουν μεγάλη αντοχή σε πεδία απομαγνήτισης. Παρόλα αυτά, το κύριο και κρίσιμο μειονέκτημά τους είναι η μικρή πυκνότητα μαγνητικής ροής.

Με τις τεχνολογικές προόδους στο τομέα των μαγνητών, έχουν γίνει πιο προσιτοί οι μαγνήτες σπάνιων γαιών, αποτελώντας πλέον και τη βασική επιλογή για μηχανές μόνιμων μαγνητών. Αν και εξακολουθούν να έχουν αυξημένο κόστος σε σχέση με τους υπόλοιπους διαθέσιμους μαγνήτες, έχουν τα καλύτερα μαγνητικά χαρακτηριστικά, με υψηλές τιμές παραμένουσας μαγνήτισης και καμπύλη απομαγνήτισης σχεδόν ευθεία. Ιδιαίτερος διαδεδομένος είναι ο μαγνήτης Νεοδημίου, Σαμαρίου-Κοβαλτίου και Φερρίτη-Βορίου, με τους δεύτερους να εμφανίζουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά αλλά και το υψηλότερο κόστος, λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας των στοιχείων τους. [8]

2.2.2 Λειτουργικά χαρακτηριστικά:

Ταχύτητα περιστροφής:

Οι σύγχρονες μηχανές, χαρακτηρίζονται έτσι, λόγω του ότι η ηλεκτρική συχνότητα που δημιουργείται είναι καθοριζόμενη ευθέως από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της μηχανής. Η σχέση μεταξύ των δύο μεγεθών δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad (2.1)$$

όπου f_e η ηλεκτρική συχνότητα σε Hz, n_m η μηχανική ταχύτητα περιστροφής σε στροφές ανά λεπτό και P ο αριθμός των πόλων της μηχανής. [9][10]

Παραγόμενη ΗΕΔ γεννήτριας:

Η τάση που αναπτύσσεται σε μία φάση του στάτης μίας AC μηχανής δίνεται από τον τύπο:

$$E_A = \sqrt{2}\pi \cdot N_c \cdot \phi \cdot f \quad (2.2)$$

όπου ϕ αντιστοιχεί στην ροή, f στη συχνότητα λειτουργίας και N_c στον αριθμό των τυλιγμάτων στο στάτη.

Όπως φαίνεται η παραγόμενη τάση εξαρτάται από τη ροή στη μηχανή, από τη συχνότητα (άρα και την ταχύτητα περιστροφής) και τα χαρακτηριστικά της μηχανής. Στην περίπτωση της σύγχρονης μηχανής, η παραπάνω σχέση απλοποιείται ως εξής:

$$E_A = K \cdot \phi \cdot \omega \quad (2.3)$$

με το K να αποτελεί σταθερά κατασκευής της μηχανής και το ω να αναπαριστά την γωνιακή συχνότητα. Όταν το ω αναφέρεται στο ηλεκτρικό φαινόμενο η σταθερά K παίρνει τιμή:

$$K = \frac{N_c}{\sqrt{2}} \quad (2.4)$$

Η παραγόμενη τάση E_A είναι ευθέως ανάλογη όπως φαίνεται από τα παραπάνω, από την ροή και την ταχύτητα της μηχανής. Σημειώνεται ότι η ροή στις μηχανές μονίμων μαγνητών είναι περίπου σταθερή, καθώς καθορίζεται κυρίως από το μόνιμο πεδίο που διαμορφώνουν οι μαγνήτες. [9][10]

2.2.3 Αναπαράσταση μηχανής και ισοδύναμο κύκλωμα:

Για την ευκολότερη αναπαράσταση της μηχανής και για την απλοποίηση της διαδικασίας επίλυσης και εύρεσης των χαρακτηριστικών της, είναι ανάγκη να αναπαρασταθεί με έναν απλό και βολικό τρόπο. Αυτό γίνεται μέσω του ισοδύναμου κυκλώματος.

Η παραγόμενη ΗΕΔ E_A δεν είναι αυτή που εμφανίζεται στα άκρα της γεννήτριας, παραμόνο εάν το ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του στάτη είναι μηδενικό. Η απόκλιση μεταξύ της τάσης E_A και της τάσης V_ϕ που εμφανίζεται στα άκρα μίας σύγχρονης γεννήτριας δικαιολογείται από τα εξής:

1. Την παραμόρφωση του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο, λόγω του ρεύματος στάτη, την λεγόμενη αντίδραση τυμπάνου
2. Την αυτεπαγωγή των τυλιγμάτων
3. Την αντίσταση των τυλιγμάτων
4. Την εκτυπότητα των πόλων

Το πιο έντονο από αυτά τα φαινόμενα είναι η αντίδραση τυμπάνου. Όταν ο ρότορας της μηχανής περιστρέφεται, επάγεται η τάση E_A στα τυλίγματα του στάτη. Όταν υπάρχει φορτίο συνδεδεμένο, αναπτύσσεται ροή ρεύματος, που προκαλεί δεύτερο μαγνητικό πεδίο, που επιδρά πάνω στο υπάρχον. Αυτή η

παραμόρφωση του μαγνητικού πεδίου της μηχανής, έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή της E_A . Η μεταβολή της φάσης, επειδή είναι ανάλογη του ρεύματος και είναι 90 ηλεκτρικές μοίρες πίσω από το ρεύμα, μπορεί υπολογιστεί ως:

$$E_{stat} = -jX I_A \quad (2.6)$$

Οπότε τελικά, η φασική τάση στα άκρα της γεννήτριας βρίσκεται ως εξής:

$$V_\phi = E_A - E_{stat} = E_A - jX I_A$$

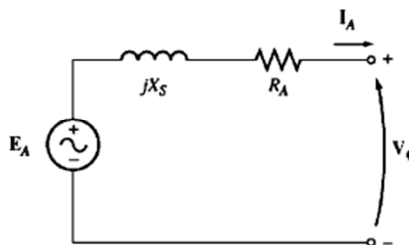
Πέραν της αντίδρασης τυμπάνου, το τύλιγμα έχει μία αυτεπαγωγή L_A (άρα και αντίδραση X_A) και μία αντίσταση R_A , οπότε τελικά η συνολική διαφορά μεταξύ των E_A και V_ϕ δίνεται από τον τύπο:

$$V_\phi = E_A - jX I_A - jX_A I_A - R_A I_A$$

Θεωρώντας $X_s = X + X_A$ η παραπάνω σχέση απλοποιείται περαιτέρω ως:

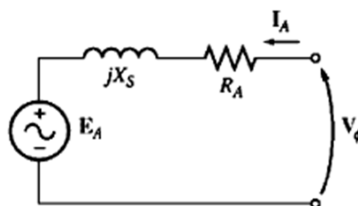
$$V_\phi = E_A - jX_s I_A - R_A I_A \quad (2.7)$$

και προκύπτει το παρακάτω ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας για καθεμία από τις τρεις φάσεις:



Σχήμα 2.6: Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας για τη φάση A [9]

Η αναπαράσταση των μεγεθών αυτών πέραν από τη χρήση του ισοδύναμου κυκλώματος γίνεται και με διανυσματικό διάγραμμα, που εκμεταλλεύεται την έκφραση των διανυσμάτων με την χρήση φασιθετών. Το διανυσματικό διάγραμμα, χρησιμοποιεί κάθε φορά ένα μέγεθος ως αναφορά, συνήθως εδώ το V_ϕ , και τοποθετεί τα υπόλοιπα ανάλογα με τη διαφορά φάσης τους.



Σχήμα 2.7: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα για τη φάση A [9]

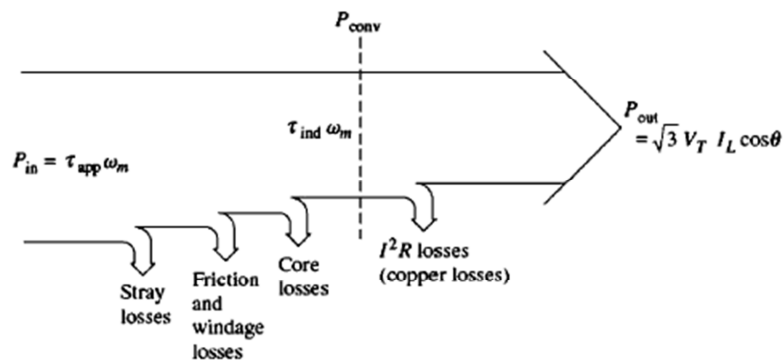
Η σύγχρονη μηχανή, λειτουργώντας ως κινητήρας, είναι πανομοιότυπη με την περίπτωση λειτουργίας ως γεννήτρια, με τη μόνη διαφορά την αναστροφή της ροής της ισχύος, οπότε και της φοράς του ρεύματος. Αυτό συνεπάγεται ότι και το ισοδύναμο κύκλωμα είναι πανομοιότυπο στις δύο περιπτώσεις με αντίθετη κατεύθυνση ρεύματος όπως φαίνεται παραπάνω. Προφανώς, λόγω αυτής της αντιστροφής, πλέον η σχέση (2.7) γίνεται:

$$V_{\phi} = E_A + jX_S I_A + R_A I_A \quad (2.8)$$

[9][10]

2.2.4 Ισχύς και ροπή της μηχανής:

Για τη λειτουργία γεννήτριας, γίνεται η ηλεκτρομηχανική μετατροπή, έχοντας σαν είσοδο μηχανική κίνηση, που επιβάλλεται εξωτερικά και ως έξοδο ηλεκτρική ισχύ. Προφανώς, όλη η μηχανική ισχύς δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρική, καθώς μεσολαβούν απώλειες. Συγκεκριμένα για μία σύγχρονη γεννήτρια η ροή ισχύος έχει ως εξής:



Σχήμα 2.8: Ροή Ισχύος για λειτουργία γεννήτριας [10]

Όπως φαίνεται η είσοδος είναι η μηχανική ισχύς που δίνεται από τη σχέση:

$$P_{in} = \tau_{app} \omega \quad (2.9)$$

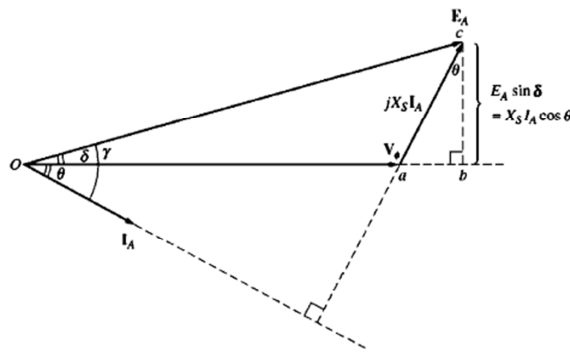
όπου με τ συμβολίζεται η αντίστοιχη ροπή και με ω η μηχανική γωνιακή ταχύτητα. Η εσωτερική ισχύς που μετατρέπεται σε ηλεκτρική είναι η ισχύς διακένου:

$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega = 3E_A I_A \cos \gamma \quad (2.10)$$

όπου γ είναι η γωνία μεταξύ E_A και I_A . Η διαφορά μεταξύ των P_{in} και P_{conv} οφείλεται στις μεσολαβούσες απώλειες, οι οποίες αντιστοιχούν στις μηχανικές, στις απώλειες πυρήνα και στις διαφεύγουσες. Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της μηχανής είναι επιπρόσθετα μειωμένη λόγω των απωλειών χαλκού και δίνεται από τις σχέσεις:

$$P_{out} = 3V_\phi I_A \cos \phi \quad (2.11) \quad \text{και} \quad Q_{out} = 3V_\phi I_A \sin \phi \quad (2.12)$$

όπου ϕ είναι η διαφορά φάσης μεταξύ V_ϕ και I_A και καθορίζεται από το φορτίο.



Σχήμα 2.9: Διανυσματικό διάγραμμα γεννήτριας σε μία τυχαία περίπτωση επαγωγικού φορτίου [10]

Θεωρώντας μικρές τιμές αντίστασης R_A , τόσο ώστε να είναι αμελητέες, με βάση το διανυσματικό διάγραμμα εύκολα προκύπτει ότι:

$$I_A \cos \phi = \frac{E_A \sin \delta}{X_s}$$

όπου δ είναι η γωνία ροπής, δηλαδή η γωνία μεταξύ E_A και V_ϕ . Οπότε προκύπτει η εναλλακτική σχέση για την ενεργό ισχύ εξόδου:

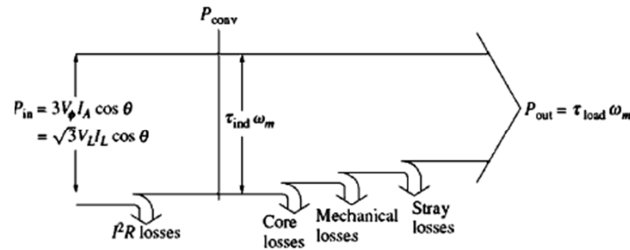
$$P_{out} = 3 \frac{V_\phi E_A \sin \delta}{X_s} \quad (2.13)$$

Οπότε, όπως φαίνεται η ισχύς εξόδου μεγιστοποιείται για όσο το δυνατόν μεγαλύτερη γωνία δ . Το σημείο μέγιστης ροπής, δηλαδή η ισχύς για γωνία δ 90 μοιρών, αντιστοιχεί στο όριο ευστάθειας της μηχανής. Στην πραγματικότητα, οι σύγχρονες μηχανές λειτουργούν σε γωνία ροπής πολύ μικρότερη της μέγιστης δυνατής, με τιμές να κυμαίνονται περί τις 15 με 20 μοίρες στο πλήρες φορτίο. [10]

Με βάση την παραπάνω σχέση και η ροπή διακένου τ_{ind} μπορεί να υπολογιστεί και ως:

$$\tau_{ind} = 3 \frac{V_{\phi} E_A \sin \delta}{\omega X_s} \quad (2.14)$$

Στη λειτουργία της μηχανής ως κινητήρα, η μηχανή τροφοδοτείται με τάση και αποδίδει στην έξοδο μηχανική ισχύ με τη μορφή ροπής. Οι σχέσεις ανάγονται με πλήρη αντιστοιχία με την μόνη διαφορά ότι πλέον η ροή ισχύος έχει την εξής μορφή:



Σχήμα 2.10: Ροή ισχύος κινητήρα [10]

Ανεξαρτήτως της λειτουργίας της μηχανής ως κινητήρα ή ως γεννήτρια, οι απώλειες που παρουσιάζονται είναι ίδιες, απλά εμφανίζονται με διαφορετική σειρά κατά τη λειτουργία. Τα παραπάνω θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα κεφάλαια, τόσο για την αποτελεσματική δημιουργία πειραματικής διάταξης, όσο και για την δημιουργία προσομοιωτικού μοντέλου και την καλύτερη κατανόηση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων. [10]

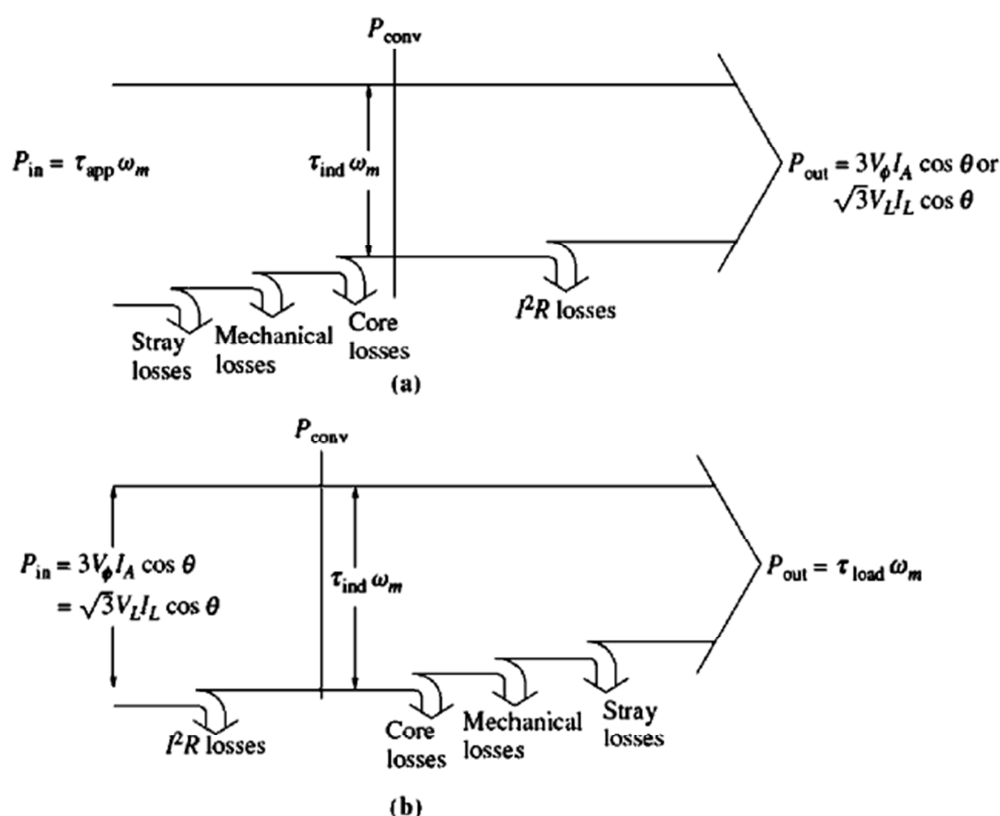
Κεφάλαιο 3^ο: Πειραματικές Μετρήσεις

3.1.Εισαγωγή:

Το πρώτο βήμα για την κατασκευή μιας βελτιστοποιημένης γεωμετρίας της δοθείσας μηχανής, είναι να εξακριβωθούν τα χαρακτηριστικά της. Για τη μηχανή που εξετάστηκε δεν υπήρχε καμία πληροφορία τόσο για τα ονομαστικά της χαρακτηριστικά, όσο και για την διαμόρφωσή της και τα υλικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της. Οπότε αρχικά πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις ώστε να προκύψουν οι βασικές χαρακτηριστικές καμπύλες της και κατόπιν η μηχανή ανοίχθηκε ώστε να εξακριβωθούν η χρησιμοποιούμενη γεωμετρία καθώς και η διαμόρφωση των τυλιγμάτων.

3.2. Πειραματική Διάταξη:

Για τη λειτουργία μιας ηλεκτρικής και κυρίως brushless dc μηχανής ως κινητήρα, απαιτείται οδήγηση με ηλεκτρονικό σύστημα, πράγμα που καθιστά ιδιαίτερος πολύπλοκη την διεξαγωγή μετρήσεων σε σχέση με την αντίστοιχη διαδικασία κατά τη λειτουργία της μηχανής ως γεννήτρια.



Σχήμα 3.1: Ροή Ισχύος για τριφασική εναλλασσόμενη γεννήτρια (a) και κινητήρα (b) [10]

Θεωρώντας ότι οι επί μέρους απώλειες και στις δύο λειτουργίες είναι περίπου ίσες, επιλέγουμε χάριν ευκολίας, να πραγματοποιήσουμε τις μετρήσεις στη δοθείσα μηχανή σε λειτουργία γεννήτριας και όχι κινητήρα όπως θα λειτουργήσει για την ηλεκτροκίνηση του οχήματος.

Η πειραματική διάταξη διαμορφώθηκε με βάση τα επιθυμητά εξαγόμενα μεγέθη. Συγκεκριμένα, μας ενδιέφερε πρωτίστως ο βαθμός απόδοσης της μηχανής και η ροπή διακένου που μπορεί να αναπτύξει, για διάφορες καταστάσεις λειτουργίας. Οπότε, τα εξαγόμενα μεγέθη ήταν η ισχύς εισόδου και εξόδου της μηχανής, οι τιμές των ρευμάτων και των τάσεων στα άκρα της γεννήτριας και τέλος η ακριβής τιμή των στροφών της μηχανής. Οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν για διάφορες τιμές στροφών της μηχανής, καθώς και για διάφορες τιμές ρευμάτων εξόδου, όπως επιβάλλονται από το φορτίο που εφαρμόζεται στην έξοδο.

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από την μηχανή προς εξακρίβωση που έχει λειτουργία γεννήτριας, από δεύτερη μηχανή-κινητήρα για οδήγηση της πρώτης, από την τροφοδοσία του κινητήρα, από τις αντιστάσεις - φορτίο και τα μετρητικά όργανα.

Για την λειτουργία της προς εξέταση μηχανής ως γεννήτριας, απαιτείται η επιβολή ροπής στον άξονά της. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση βοηθητικού κινητήρα οδήγησης, ο οποίος εξ επαφής, επιβάλλει την γεννήτρια σε περιστροφή. Συγκεκριμένα αυτό γίνεται, με τη βοήθεια ρόδας εφαρμοσμένης στον άξονα του κινητήρα που εφάπτεται πάνω στην περιφέρεια της γεννήτριας. Για να επιτευχθεί καλύτερη πρόσφυση των δύο σωμάτων και να αποφευχθούν φαινόμενα ολίσθησης, που εμποδίζουν την ανάπτυξη υψηλών στροφών στην προς εξέταση μηχανή, εφαρμόστηκε ειδική αντιολισθητική ταινία πάνω στην περιφέρεια της γεννήτριας.

Μέσω του κινητήρα, είναι δυνατό να καθοριστούν επακριβώς οι στροφές που αναπτύσσει ο δρομέας της γεννήτριας. Αυτό επιτυγχάνεται με τον έλεγχο της τροφοδοσίας του κινητήρα, με τις κατάλληλες τιμές τάσης.

Κατά την πειραματική διαδικασία έγιναν μετρήσεις με και χωρίς αντιστάσεις. Οι πρώτες έγιναν για να λάβουμε την καμπύλη κενού φορτίου. Στη συνέχεια έγινε χρήση εξωτερικών αντιστάσεων ως φορτίο, ώστε να υπάρχει ισχύς εξόδου για να είναι εφικτή η μέτρηση του βαθμού απόδοσης της μηχανής και των λοιπών χαρακτηριστικών της. Οι τιμές ισχύος και ροπής των μετρήσεων, θέλαμε να κινούνται σε υψηλές σχετικά τιμές ώστε να μειωθεί όσο το δυνατόν η συνεισφορά του σφάλματος των μετρήσεων. Με βάση αυτό, καθορίστηκαν οι τιμές που τα ρεύματα εξόδου θα έπρεπε να πλησιάζουν επιθυμητά. Για να επιτευχθούν οι τιμές αυτές έπρεπε να χρησιμοποιηθούν δύο είδη αντιστάσεων. Αρχικά για τα χαμηλά ρεύματα χρησιμοποιήθηκαν αντιστάσεις των 60Ω , που επέτρεπαν ρεύματα ως $4A$, και κατόπιν αντιστάσεις των 4.2Ω που επέτρεπαν τιμές ρευμάτων ως και $10A$. Επίσης, ελέγχθηκε η παρασιτική επαγωγική συμπεριφορά του φορτίου, που βρέθηκε να κινείται στην τάξη των μH . Επειδή, όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, οι μετρήσεις με χρήση φορτίου περιορίστηκαν σε τιμές ως $600 \Sigma A$, δηλαδή τιμές συχνοτήτων

ως 230Hz, η επαγωγική αντίδραση του φορτίου σε σύγκριση με την αντίδραση της μηχανής είναι αμελητέα και για αυτό από εδώ και πέρα το φορτίο θα θεωρείται καθαρά ωμικό.

Πέραν των παραπάνω διατάξεων, χρησιμοποιούνται και τα μετρητικά όργανα όπως περιγράφονται παρακάτω.

Η γεννήτρια στην οποία έγιναν οι μετρήσεις προσαρμόστηκε πάνω σε σταθερή διάταξη, ώστε ο άξονας της μαζί με τον στάτη να είναι απόλυτα σταθεροί. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η επαπτομενική δύναμη, που επιβάλλεται από την βοηθητική ρόδα, και η ροπή που εμφανίζει ο δρομέας, να δημιουργούν μία δύναμη στον άξονα της μηχανής, η οποία είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση της εμφανιζόμενης ροπής, μέσω ροπομέτρου. Συγκεκριμένα, το ροπόμετρο που χρησιμοποιήθηκε είναι το “20kg Compression Load Cell” από την RS components. Η λειτουργία αυτού του είδους των οργάνων, βασίζεται σε διατάξεις που αλλάζουν την τιμή της αντίστασής τους με βάση την παραμόρφωση που εμφανίζουν (AKA strain gauge). Η συνδεσμολογία των διατάξεων αυτών γίνεται συνήθως σε γέφυρα Wheatstone, οπότε οι αλλαγές στην επιβαλλόμενη δύναμη συνεπάγονται και διαφορετικές τιμές τάσης εξόδου. Η τροφοδοσία του οργάνου έγινε στο εργαστήριο με τη χρήση τροφοδοτικού, με τιμή τροφοδοσίας την προτεινόμενη από τον κατασκευαστή στα 10V. Με τη χρήση πολύμετρου, μετρήθηκε η τάση εξόδου του ροπόμετρο, που ήταν στην τάξη των mV. Για να υπάρχει καλή ακρίβεια της μετρούμενης τιμής η μέτρηση έγινε με μοχλοβραχίονα ροπομέτρου 27 εκατοστά.

Στη συνέχεια, για την μέτρηση των τιμών τάσης και ρεύματος στα άκρα της γεννήτριας έγινε χρήση ηλεκτρονικού παλμογράφου Handyscope HS4 με επίβλεψη μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή και του κατάλληλου λογισμικού “TiePie Multi Channel”. Ο παλμογράφος, έχοντας τέσσερα κανάλια, στο ένα κατέγραφε την πολική τάση στα άκρα δύο φάσεων της γεννήτριας, ενώ τα άλλα τρία κανάλια κατέγραφαν το ρεύμα που διέρρεε την κάθε φάση. Ο λόγος που απαιτήθηκε η καταγραφή και των τριών φάσεων είναι η απαίτηση για καλύτερη ακρίβεια, πράγμα που υπογραμμίζεται από το ότι οι αντιστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν είχαν χειροκίνητο σύστημα αλλαγής τιμής. Αυτό σε συνδυασμό με τη διαφορετική συμπεριφορά κάθε αντίστασης στις ίδιες αλλαγές, καθιστά τον έλεγχο των τιμών των ρευμάτων που τις διαρρέουν αναγκαίο.

Τέλος, για τη μέτρηση των στροφών του δρομέα κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων ακολουθήθηκαν τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις. Αρχικά, έγινε η θεώρηση ότι οι στροφές της γεννήτριας ήταν περίπου ίδιες με αυτές του κινητήρα, οπότε με βάση την γνωστή αναλογία της τροφοδοσίας του κινητήρα και των στροφών του, υπήρχε μία εκτίμηση για τις στροφές. Παρόλα αυτά, αν και η μέθοδος ήταν αρκετά ακριβής για μικρές τιμές στροφών, όπου η ολίσθηση ήταν μικρή, σε μεγάλες στροφές οι αποκλίσεις αυτής της προσέγγισης και των πραγματικών τιμών ήταν αυξημένες.

Κατόπιν, έγινε χρήση οπτικού ταχύμετρου, όπου τοποθετώντας χρωματικές ενδείξεις πάνω σε σταθερά σημεία πάνω στην μηχανή, με χρήση του οργάνου παίρναμε την τιμή των στροφών. Κατά την

πορεία των μετρήσεων αποδείχθηκε σαν μέθοδος όχι αποτελεσματική, λόγω της περιορισμένης ακρίβειάς της.

Τέλος, καταλήξαμε στην μέτρηση των στροφών με βάση τη συχνότητα των ρευμάτων εξόδου. Έχοντας παλμογράφο πολύ καλής ακρίβειας, και γνωρίζοντας ότι διαφορετικές τιμές στροφών σημαίνουν και διαφορετικές τιμές συχνοτήτων έγινε η αναγωγή μεταξύ των δύο μεγεθών, επιτυγχάνοντας πολύ καλή ακρίβεια στη μέτρηση των στροφών της μηχανής.

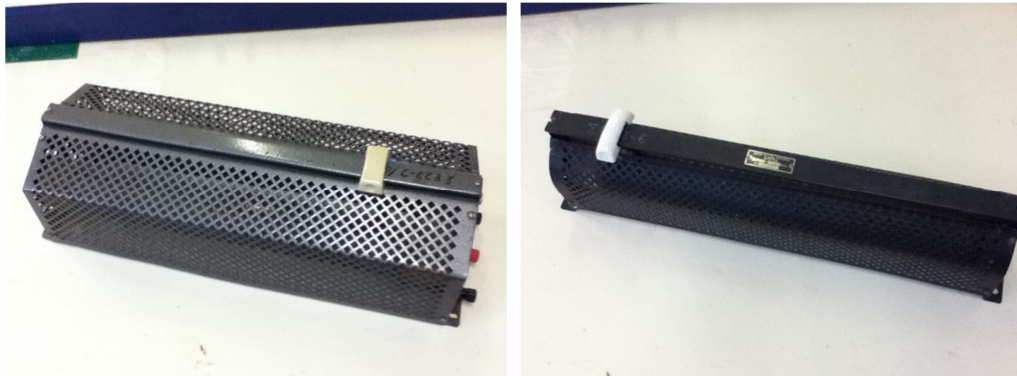
Παρακάτω φαίνονται φωτογραφίες από την διάταξη.



Σχήμα 3.2: Η οδήγηση της μηχανής ως γεννήτρια με την χρήση του βοηθητικού κινητήρα μέσω ρόδας και το ροπόμετρο εφαρμοσμένο στον άξονα της προς εξέταση μηχανής



Σχήμα 3.3: Το σύστημα τροφοδοσίας του βοηθητικού κινητήρα



Σχήμα 3.4: Οι δύο ειδών αντιστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν. Αριστερά είναι μία από τις αντιστάσεις των 60Ω και δεξιά των 4.2Ω

3.3.Αποτελέσματα μετρήσεων:

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για το σχηματισμό της καμπύλης τάσεως κενού φορτίου συναρτήσει των στροφών, οπότε εδώ λάβαμε τις τιμές της τάσης για εύρος στροφών που κυμαίνεται από 50 ως 1000 στροφές ανά λεπτό. Κατόπιν για τα υπόλοιπα μεγέθη λάβαμε μετρήσεις με φορτίο πλέον, συλλέγοντας τις τιμές ροπής εισόδου, ρεύμα και στις τρεις φάσεις, τάση εξόδου και συχνότητα ρευμάτων,

για διάφορες τιμές στροφών. Συγκεκριμένα οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν για για τιμές στροφών στις 100, 220, 350, 380 και 600 στροφές ανά λεπτό, ώστε να καλύπτεται ένα ικανοποιητικό εύρος λειτουργίας.

3.3.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας:

Ξεκινώντας, λοιπόν, με τη καμπύλη κενού φορτίου, ενώ μεταβάλλαμε την τροφοδοσία του κινητήρα όπως αναφέρθηκε, λάβαμε μέσω του παλμογράφου τις αντίστοιχες τιμές τάσης στα άκρα τις γεννήτριας. Από τη στιγμή που η δοκιμή είναι κενού φορτίου, δεν διαρρέεται το ισοδύναμο κύκλωμα με ρεύμα, άρα δεν υπάρχει πτώση τάσης στην μηχανή και άρα οι τιμές που λαμβάνουμε στα άκρα της γεννήτριας θεωρούμε ότι ταυτίζονται με την ηλεκτρεγερτική δύναμη της μηχανής. Κατόπιν, για παρακάτω βήματα επεξεργασίας των μετρήσεων, θα θεωρήσουμε ότι οι τιμές της ηλεκτρεγερτικής δύναμης, κινούνται πάνω στην δημιουργούμενη ευθεία και ότι δεν μεταβάλλονται με το φορτίο.

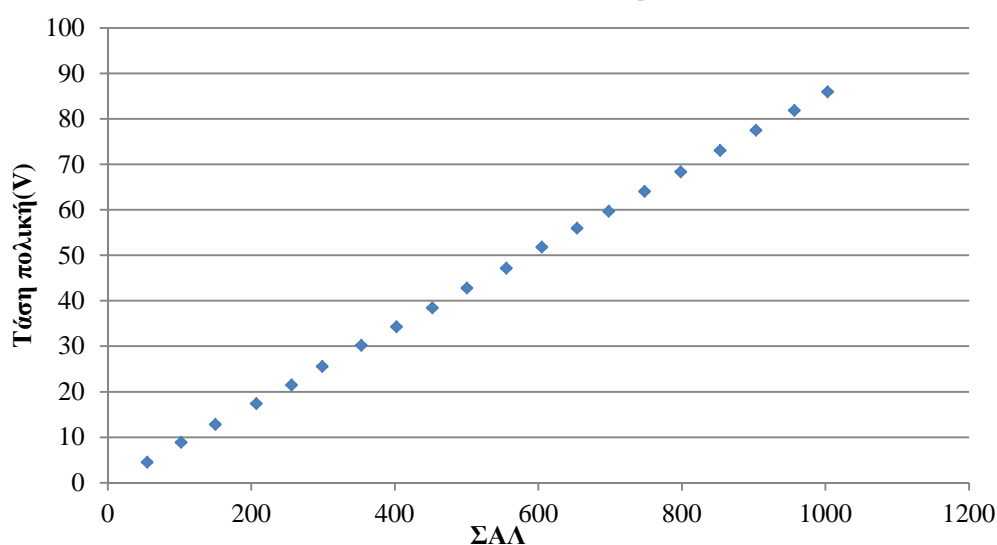
Οι τιμές που λάβαμε κατά την πειραματική διαδικασία σε σχέση με τις στροφές τις μηχανές είναι οι εξής:

Τάση εξόδου πολική	ΣΑΛ	Τάση εξόδου πολική	ΣΑΛ
4.50	55.00	47.20	555.50
8.90	102.50	51.80	605.00
12.80	150.00	56.00	654.00
17.40	207.00	59.70	698.33
21.50	256.00	64.10	748.33
25.55	298.83	68.40	798.33
30.20	353.33	73.10	853.33
34.30	402.67	77.50	903.33
38.45	452.33	81.90	956.67
42.80	500.50	86.00	1003.33

Πίνακας 3.1: Τιμές τάσεως κενού φορτίου για διάφορες στροφές της μηχανής

Οπότε προκύπτει η ακόλουθη γραφική παράσταση:

ΗΕΔ-ΣΑΛ Κενού Φορτίου



Σχήμα 3.5: Καμπύλη τάσεως κενού φορτίου – στροφών της μηχανής

Όπως φαίνεται, η ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι ανάλογη των στροφών, όπως και θα έπρεπε να είναι. Συγκεκριμένα, από τη στιγμή που η παραγόμενη EMF δίνεται από τον τύπο:

$$E_A = \sqrt{2}\pi N_c \phi f = K\phi\omega \quad (3.1)$$

όπου K είναι χαρακτηριστικό μέγεθος της μηχανής, ϕ η ροή που εξαρτάται από το πεδίο που δημιουργούν οι μαγνήτες και ω είναι η ηλεκτρική γωνιακή συχνότητα. Μεταβάλλοντας την ταχύτητα της μηχανής, μεταβάλλεται ανάλογα και η γωνιακή συχνότητα, άρα και η EMF.

Κατόπιν, για τις καμπύλες ροπής και βαθμού απόδοσης ακολούθησαν δοκιμές με φορτίο. Παρακάτω ακολουθεί μία σύντομη επεξήγηση του τρόπου επεξεργασίας των δεδομένων για την εξαγωγή των κατάλληλων μεγεθών.

Με βάση την τιμή της συχνότητας των ρευμάτων, που γνωρίζουμε μέσω του παλμογράφου, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, βρίσκουμε τις στροφές περιστροφής της μηχανής. Έχοντας τη ροπή εισόδου από τον ροπόμετρο και τις στροφές του δρομέα, άρα και τη γωνιακή συχνότητα, με βάση τον τύπο (2.9):

$$P_{in} = T_{in} \omega$$

υπολογίζουμε την ισχύ εισόδου της γεννήτριας.

Για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης και των απωλειών, απαιτείται η τιμή της ισχύος εξόδου. Για την ισχύ εξόδου ισχύει η σχέση (2.11):

$$P_{out} = \sqrt{3}V_{polar} I \cos \phi$$

όπου V_{polar} αντιστοιχεί στην πολική τάση και I στο ρεύμα που μετράται μέσω παλμογράφου, ενώ με ϕ συμβολίζεται η διαφορά φάσης μεταξύ ρεύματος και τάσης εξόδου. Επειδή το φορτίο που χρησιμοποιήθηκε είναι καθαρά ωμικό, η γωνία αυτή ισούται με μηδέν.

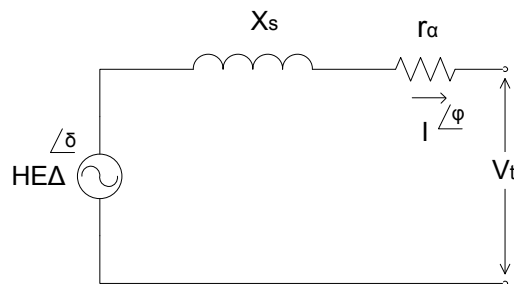
Με βάση τα παραπάνω υπολογισμένα μεγέθη, είναι δυνατή η εξαγωγή του ποσοστιαίου βαθμού απόδοσης, ως ο λόγος :

$$n(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

Ενώ οι συνολικές απώλειες τις μηχανές βρίσκονται ως:

$$P_{losses} = P_{in} - P_{out}$$

Τέλος, με βάση τα στοιχεία που έχουμε στην έξοδο της μηχανής μπορούμε να λάβουμε την τιμή της ροπής διακένου. Το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα της σύγχρονης μηχανής έχει την εξής μορφή:



Σχήμα 3.6: Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας

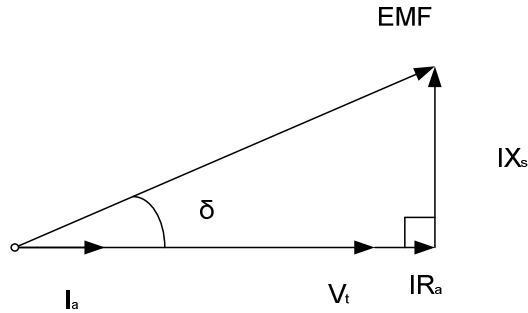
Παρατηρούμε σε συνδυασμό με την εικόνα 3.1 ότι η ισχύς διακένου είναι πρακτικά η ισχύς εξόδου συν τις απώλειες χαλκού. Συγκεκριμένα με βάση το παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα εύκολα προκύπτει ότι ισχύει η σχέση (2.10):

$$P_{conv} = 3 \cdot EMF \cdot I \cdot \cos(\delta - \phi)$$

με δ να αντιστοιχεί στην γωνία ροπής. Όπως προαναφέρθηκε, η γωνία φορτίου ϕ είναι μηδενική οπότε ο παραπάνω τύπος απλοποιείται ως:

$$P_{conv} = 3 \cdot EMF \cdot I \cdot \cos \delta$$

Η τιμή της HEΔ παραμένει πρακτικά σταθερή και ίση με την τιμή στις αντίστοιχες στροφές όπως προέκυψε από την καμπύλη κενού φορτίου. Για την εύρεση της γωνίας ροπής δ , λύνεται το διανυσματικό διάγραμμα της μηχανής, που έχει ως εξής:



Σχήμα 3.7: Διανυσματικό διάγραμμα γεννήτριας

Με βάση το διανυσματικό διάγραμμα λαμβάνουμε τις εξής σχέσεις μεταξύ των μεγεθών:

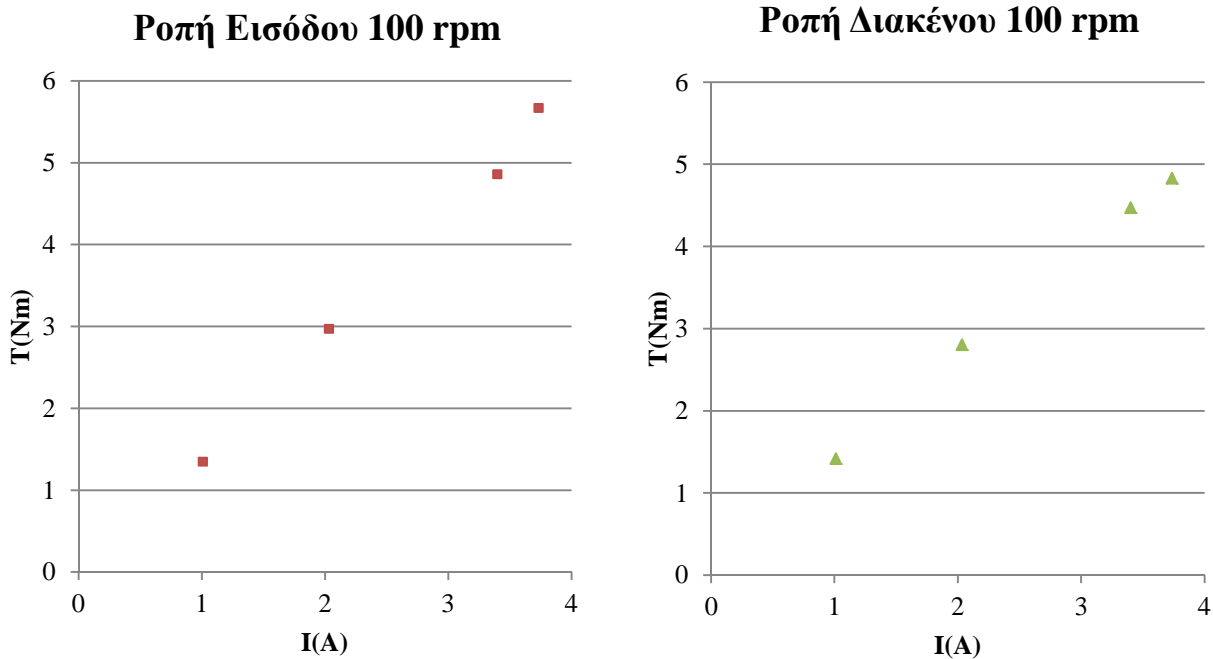
$$\cos \delta \cdot EMF = V_t + IR_a \quad (3.3a) \text{ και } \sin \delta \cdot EMF = IX_s \quad (3.3b)$$

Από τη παραπάνω σχέση (3.3a), λαμβάνουμε την γωνία ροπής οπότε με βάση την σχέση (2.10) είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε τη ροπή διακένου της μηχανής.

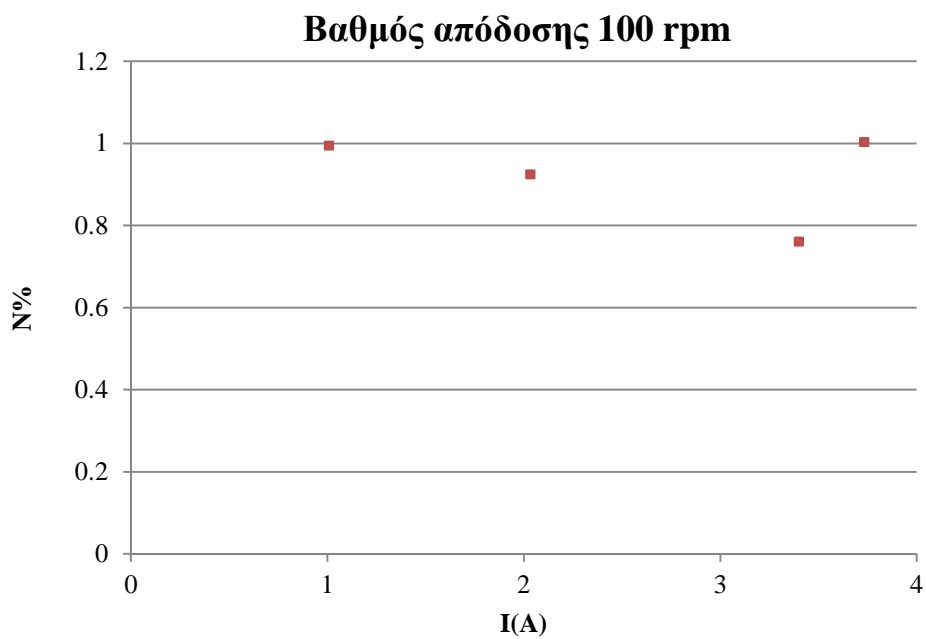
Έχοντας όλα τα παραπάνω στοιχεία, σε κάθε τιμή στροφών της μηχανής λαμβάνουμε τις καμπύλες ροπής εισόδου – ρεύματος εξόδου, ροπής διακένου – ρεύματος εξόδου και βαθμού απόδοσης – ρεύματος εξόδου, όπως φαίνεται παρακάτω, ομαδοποιημένες ανά τιμές στροφών.

Σημειώνεται ότι από την στιγμή που η ροπή διακένου προέκυψε από επεξεργασία των μετρήσεων μέσω αναλυτικών σχέσεων, θεωρείται σκόπιμο να παρουσιαστεί σε ξεχωριστό γράφημα, αν και αυτό θα είναι το μέγεθος που θα χρησιμοποιήσουμε στην σύγκριση των αποτελεσμάτων του προσομοιωτικού μοντέλου.

Στροφές: 100 ανά λεπτό

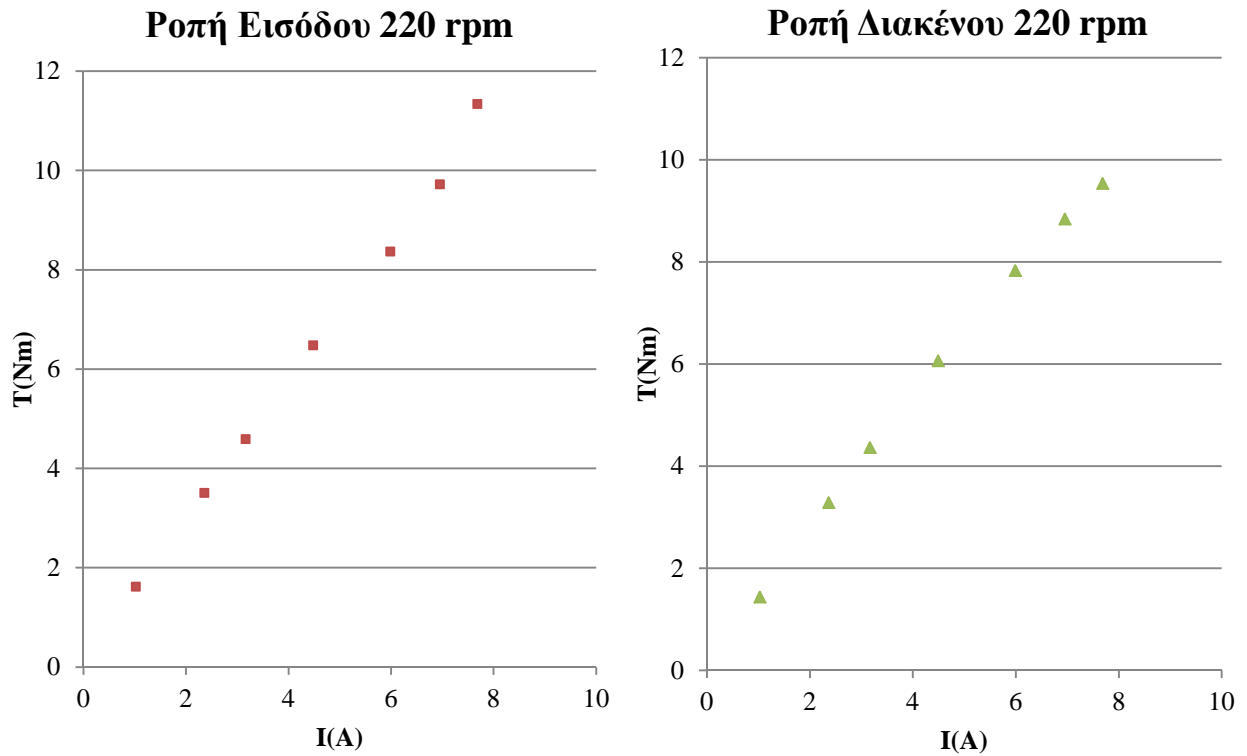


Σχήμα 3.8: Καμπύλη ροπής εισόδου και διακένου συναρτήσει ρεύματος για 100ΣΑΛ

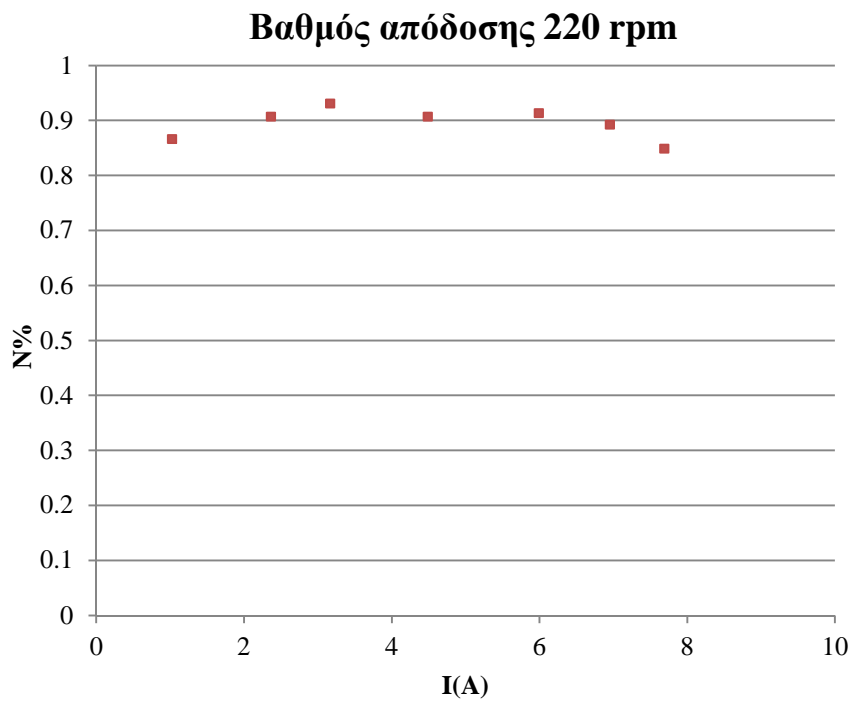


Σχήμα 3.9: Καμπύλη απόδοσης συναρτήσει ρεύματος για 100ΣΑΛ

Στροφές: 220 ανά λεπτό

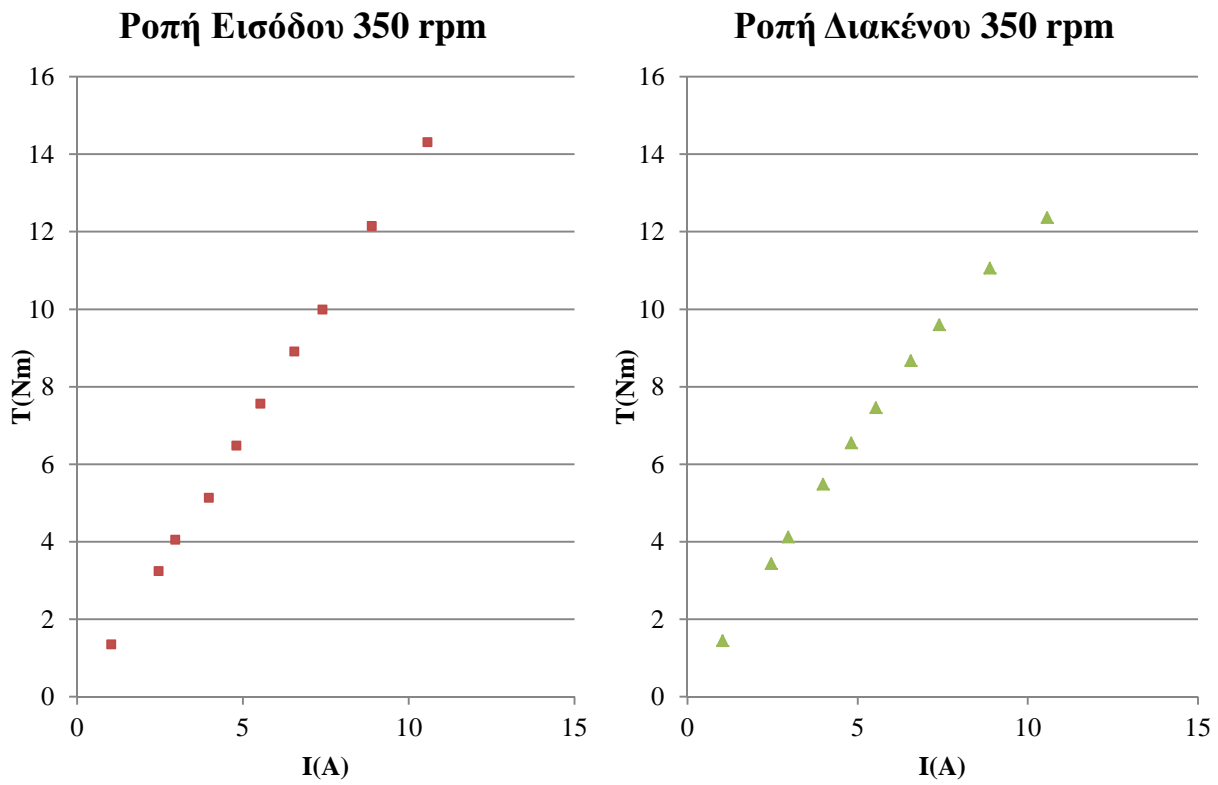


Σχήμα 3.10: Καμπύλη ροπής εισόδου και διακένου συναρτήσει ρεύματος για 220ΣΑΛ

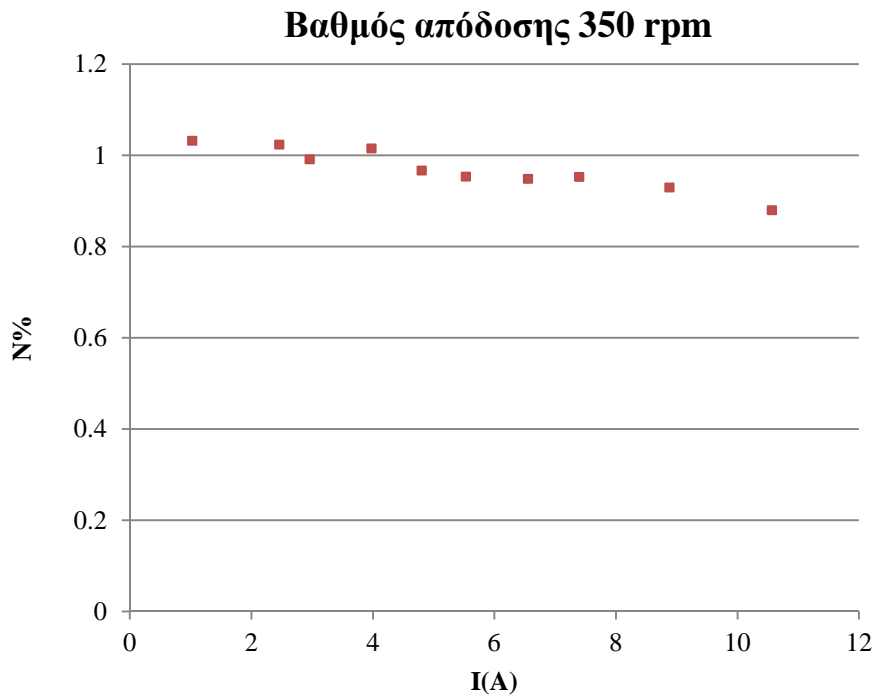


Σχήμα 3.11: Καμπύλη απόδοσης συναρτήσει ρεύματος για 220ΣΑΛ

Στροφές: 350 ανά λεπτό

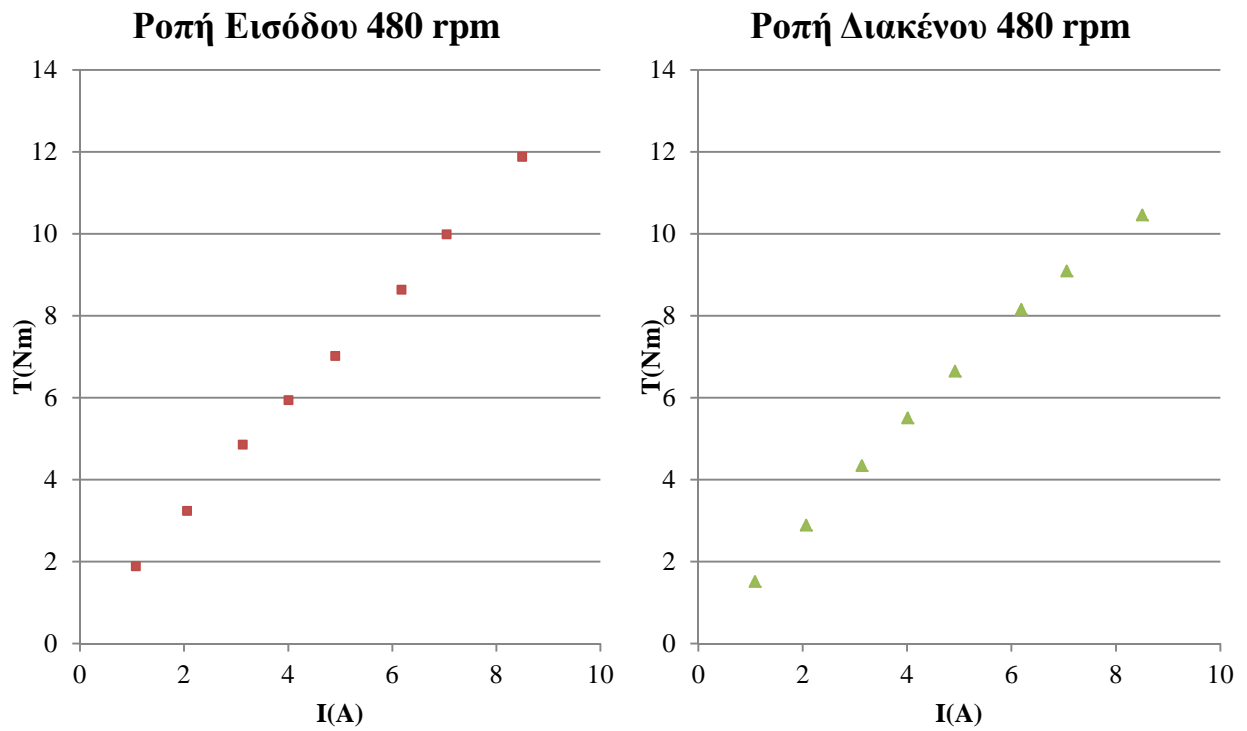


Σχήμα 3.12: Καμπύλη ροπής εισόδου και διακένου συναρτήσει ρεύματος για 350ΣΑΛ

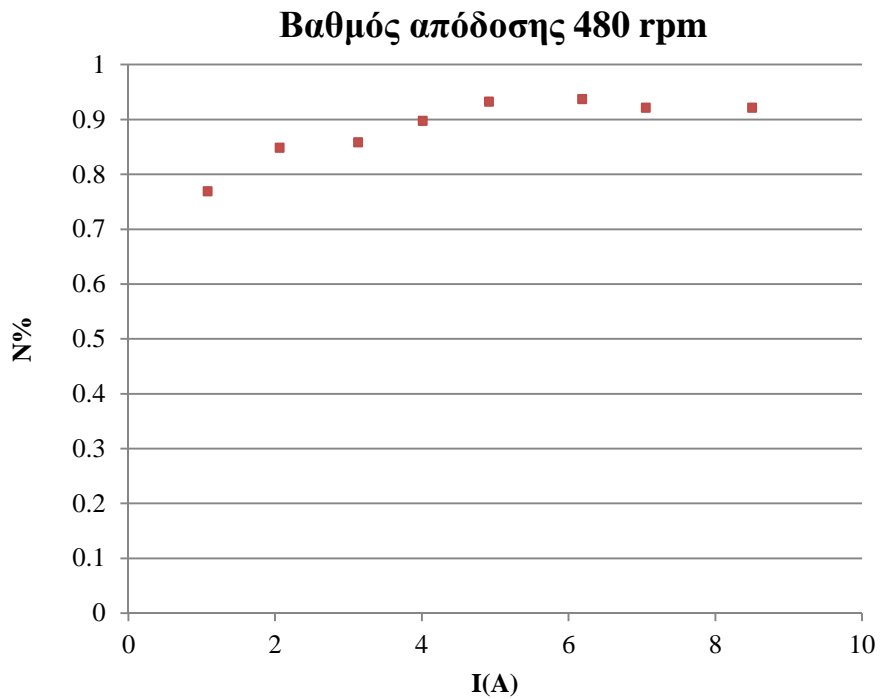


Σχήμα 3.13: Καμπύλη απόδοσης συναρτήσει ρεύματος για 350ΣΑΛ

Στροφές: 480 ανά λεπτό

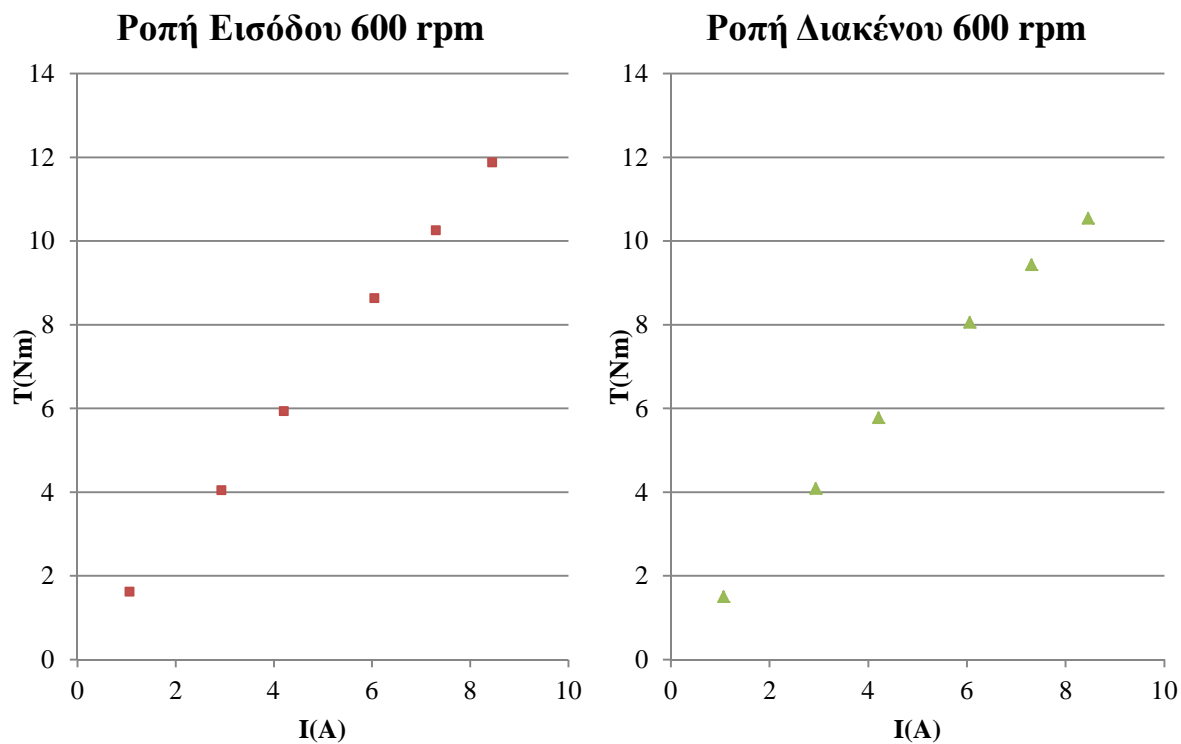


Σχήμα 3.14: Καμπύλη ροπής εισόδου και διακένου συναρτήσει ρεύματος για 480ΣΑΛ

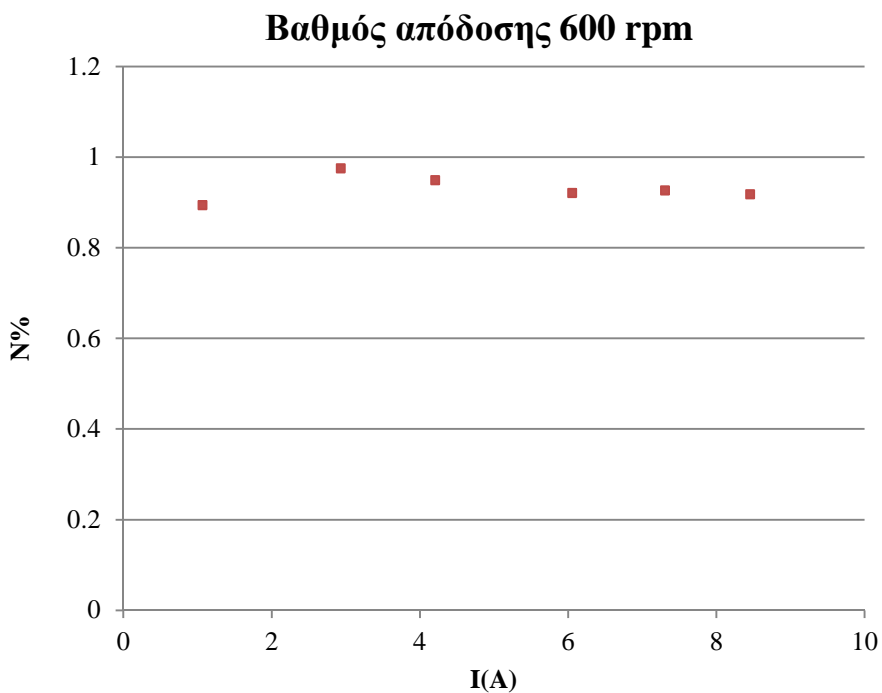


Σχήμα 3.15: Καμπύλη απόδοσης συναρτήσει ρεύματος για 480ΣΑΛ

Στροφές: 600 ανά λεπτό

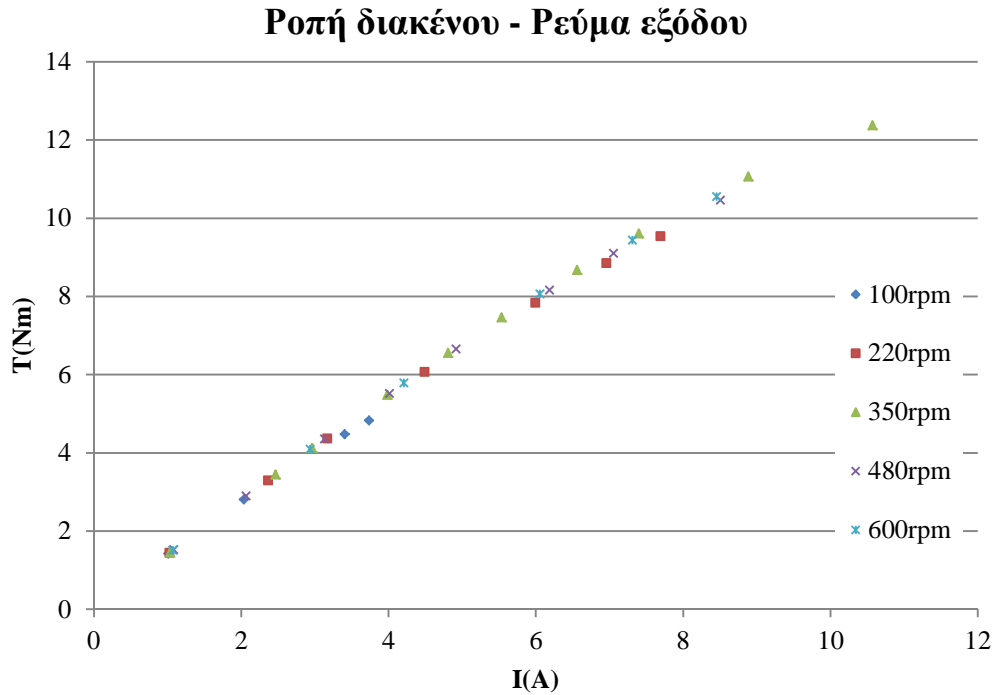


Σχήμα 3.16: Καμπύλη ροπής εισόδου και διακένου συναρτήσει ρεύματος για 600ΣΑΛ

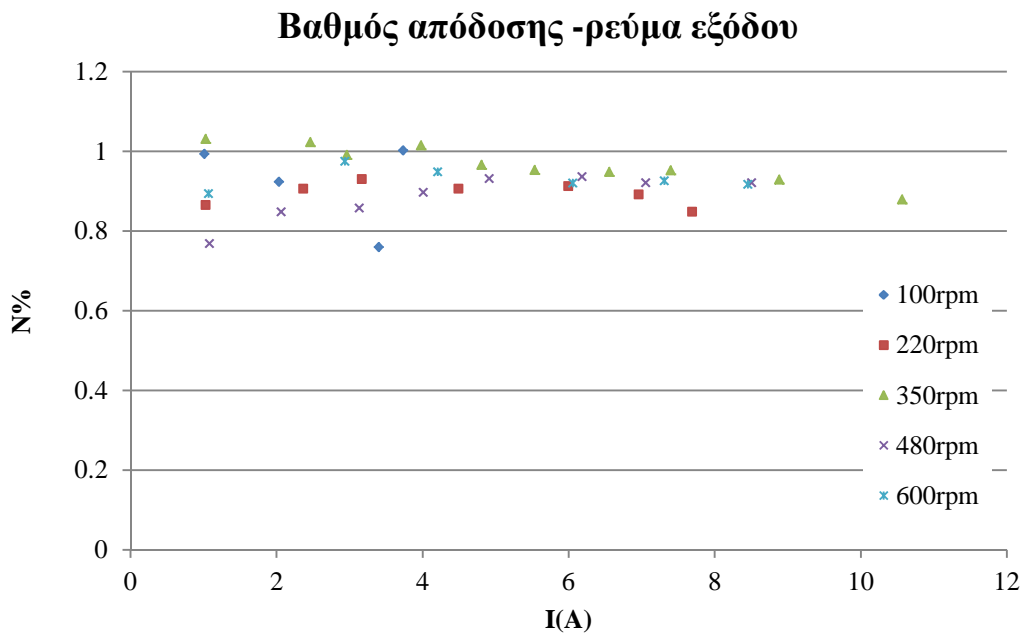


Σχήμα 3.17: Καμπύλη απόδοσης συναρτήσει ρεύματος για 600ΣΑΛ

Σημειώνεται ότι οι ακριβές τιμές των μετρήσεων παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4, της κατασκευής του προσομοιωτικού μοντέλου, όπου και γίνεται η σύγκριση των μεταξύ τους τιμών. Παρακάτω σε κοινό διάγραμμα παρουσιάζονται οι γραφικές για όλες τις τιμές στροφών. (Σημειώνεται ότι για τη ροπή, παρουσιάζεται μόνο η διακένου, για καλύτερη εποπτική):

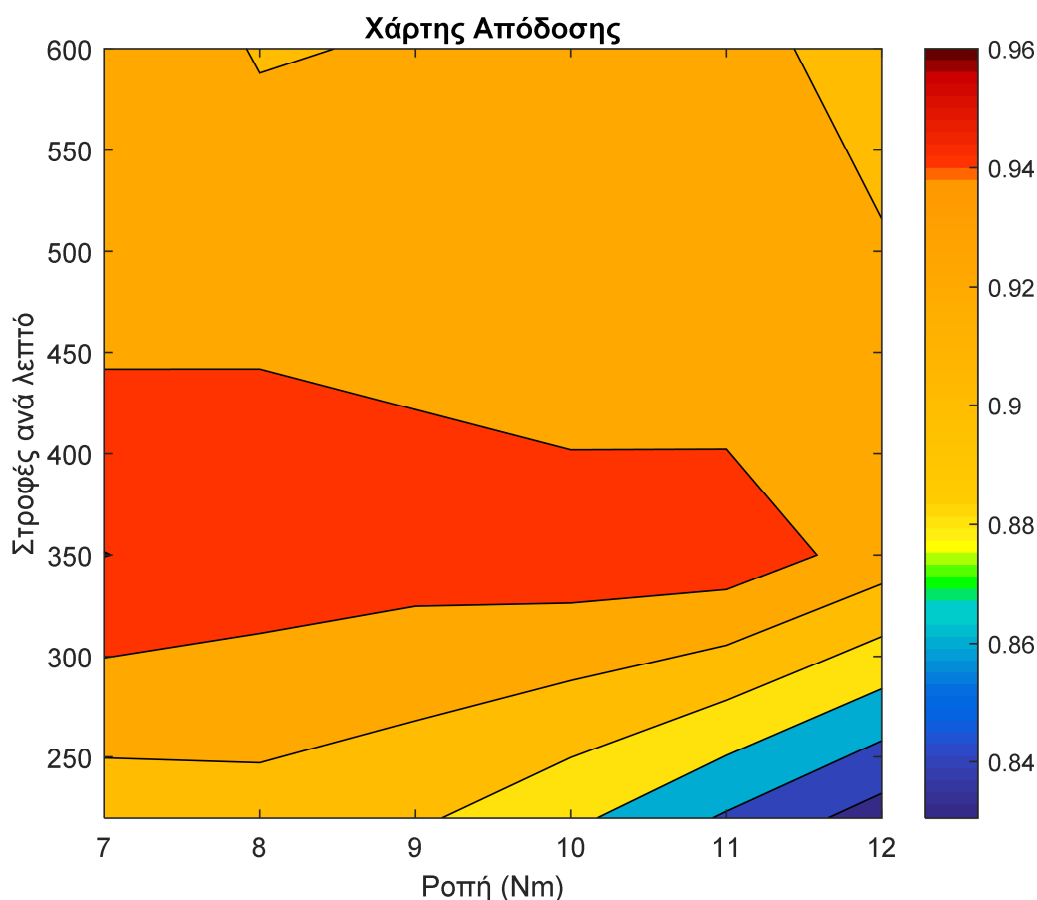


Σχήμα 3.18: Συγκεντρωτική καμπύλη ροπής διακένου συναρτήσει ρεύματος



Σχήμα 3.19: Συγκεντρωτική καμπύλη απόδοσης συναρτήσει ρεύματος

Παρακάτω παρουσιάζεται ο χάρτης απόδοσης της μηχανής, όπου λαμβάνονται υπόψη μόνο οι τιμές που λάβαμε για μεγάλες τιμές ροπής, έχοντας ικανοποιητική ακρίβεια:



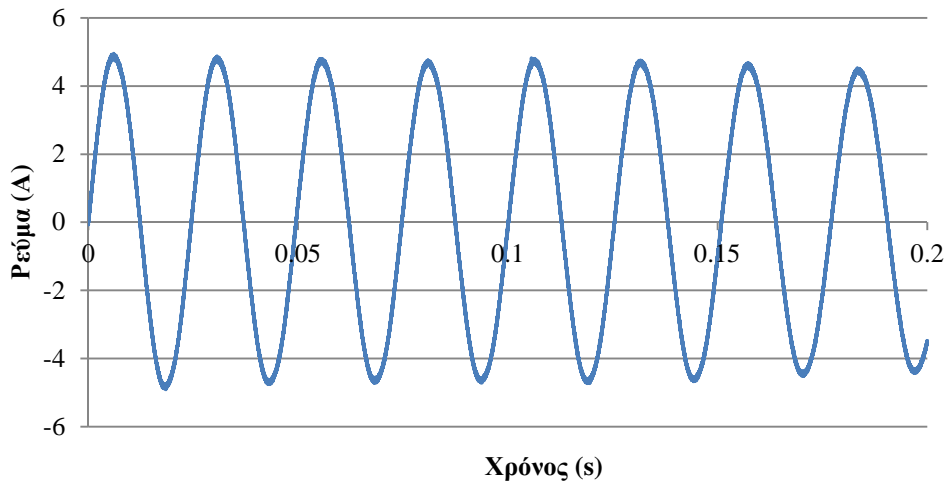
Σχήμα 3.20: Χάρτης απόδοσης για την μηχανή για στροφές 220 ως 600 ανά λεπτό

Για την περίπτωση της ροπής διακένου, παρατηρούμε αρκετά καλά αποτελέσματα, καθώς οι γραφικές για όλες τις τιμές στροφών παρουσιάζουν ίδια κλίση, πράγμα που δείχνει λογική συμπεριφορά. Κάπου εδώ οφείλουμε να αναφέρουμε, ότι γενικώς σε χαμηλές τιμές ροπής, δηλαδή σε χαμηλές στροφές και σε χαμηλά ρεύματα, τα σφάλματα του ροπομέτρου αλλοίωσαν αρκετά την μέτρηση. Γενικώς, η ακρίβεια της διάταξής μας ήταν σχετικά περιορισμένη. Και αν αυτό δεν γίνεται τόσο εμφανές στο κομμάτι της ροπής διακένου, γίνεται ξεκάθαρο στην μέτρηση του βαθμού απόδοσης.

Όπως αναδείξαμε παραπάνω, η ροπή εισόδου είναι βασικό στοιχείο για την εξαγωγή του βαθμού απόδοσης. Παρόλα αυτά, λόγω σφαλμάτων, η μέτρηση μας σε μικρές τιμές ροπών δεν είναι ακριβής, εξ ου και προκύπτουν βαθμοί απόδοσης μεγαλύτεροι της μονάδας, πράγμα που είναι λάθος να ληφθεί υπόψη ως συγκρίσιμη μέτρηση. Ο κύριος λόγος που παρουσιάζονται αυτά τα αποτελέσματα στην παρούσα εργασία είναι για να προβληθεί και ο ρόλος της πειραματικής διάταξης και της δυσκολίας να επιτευχθεί η κατάλληλη ακρίβεια σε μικρές τιμές, με χαμηλό κόστος διάταξης.

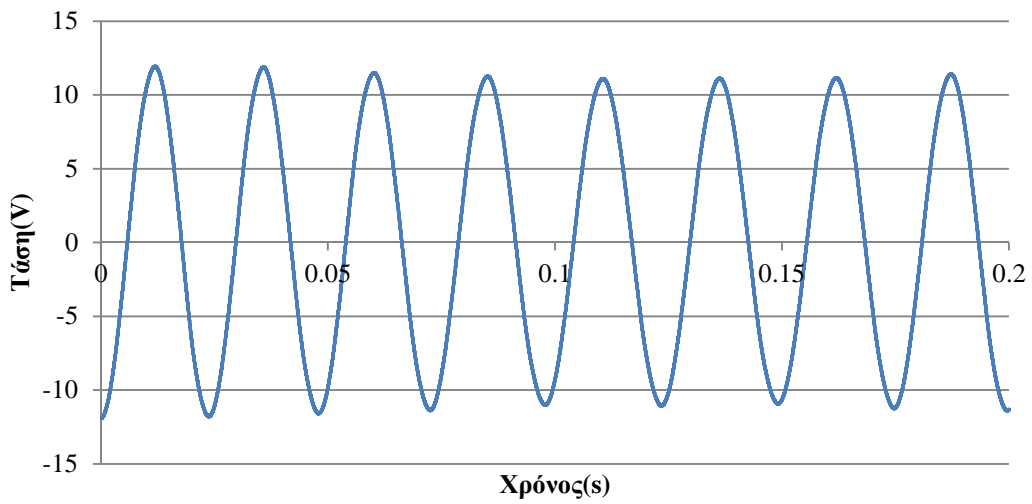
Τέλος, παρακάτω, παρουσιάζονται οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος για διάφορες τιμές στροφών, όπως εξάγονται από τον ηλεκτρονικό παλμογράφο.

Κυματομορφή Ρεύματος 100ΣΑΛ



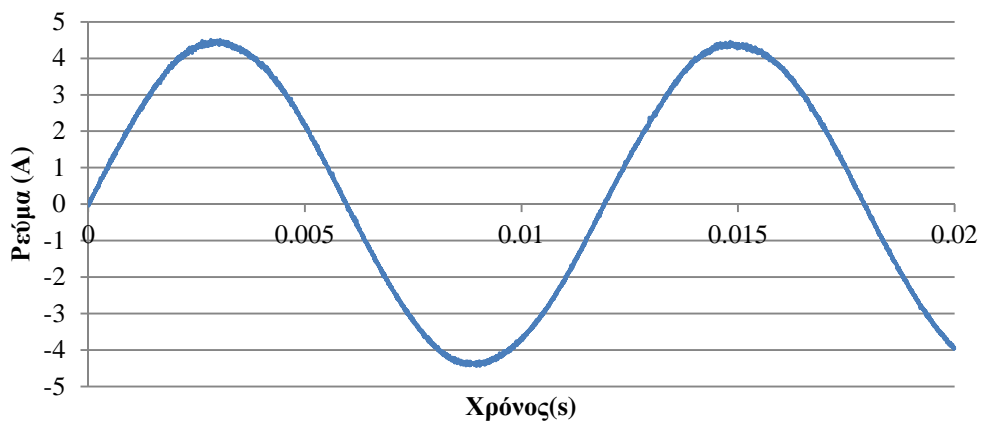
Σχήμα 3.21: Κυματομορφή ρεύματος για φορτίο για 100ΣΑΛ

Κυματομορφή τάσης 100ΣΑΛ



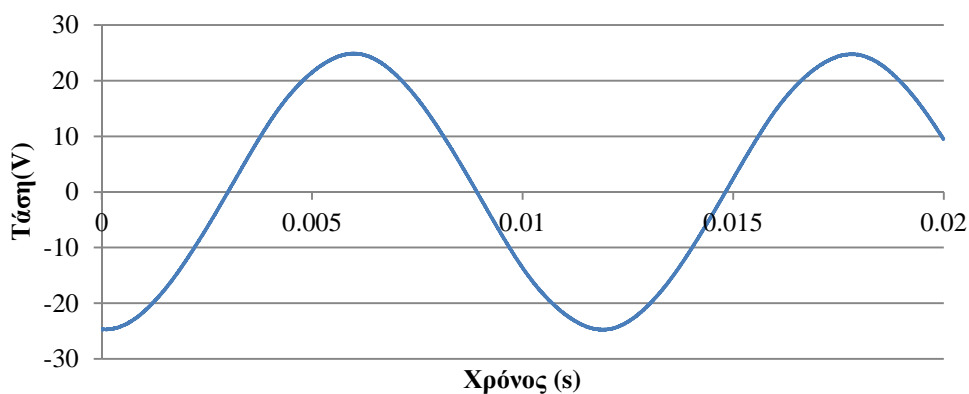
Σχήμα 3.22: Κυματομορφή τάσεως για τυχαίο φορτίο για 100ΣΑΛ

Κυματομορφή Ρεύματος 220ΣΑΛ



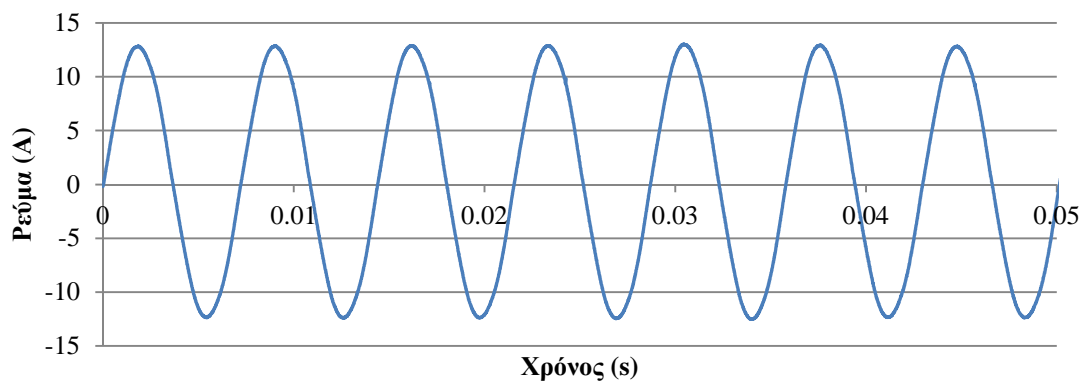
Σχήμα 3.23: Κυματομορφή ρεύματος για φορτίο για 220ΣΑΛ

Κυματομορφή Τάσης 220ΣΑΛ



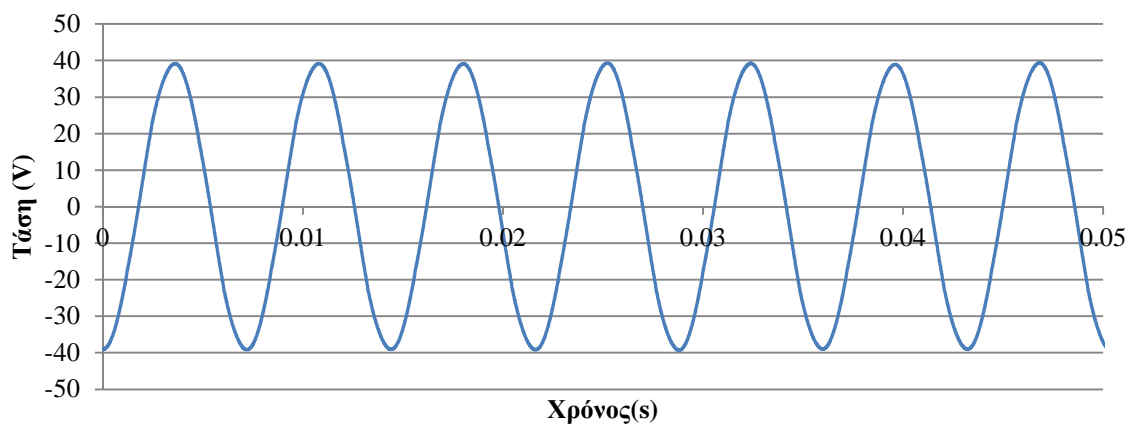
Σχήμα 3.24: Κυματομορφή τάσεως για τυχαίο φορτίο για 220ΣΑΛ

Κυματομορφή Ρεύματος 350ΣΑΛ



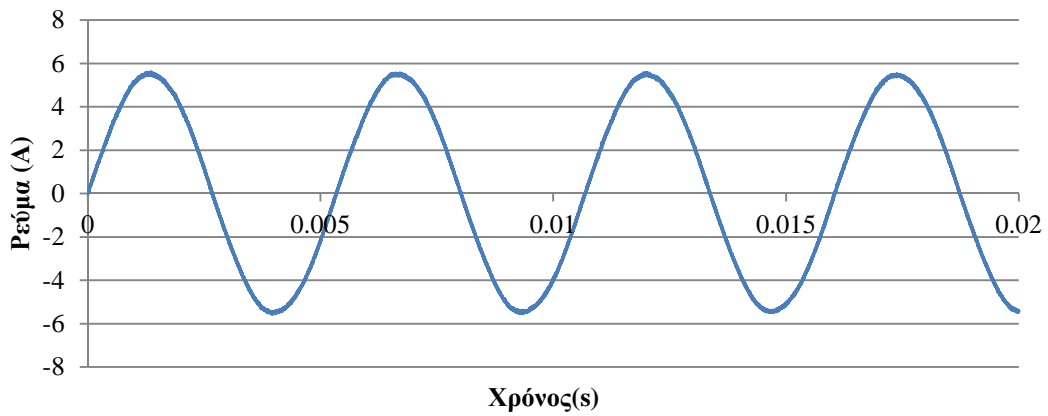
Σχήμα 3.25: Κυματομορφή ρεύματος για φορτίο για 350ΣΑΛ

Κυματομορφή Τάσης 350ΣΑΛ



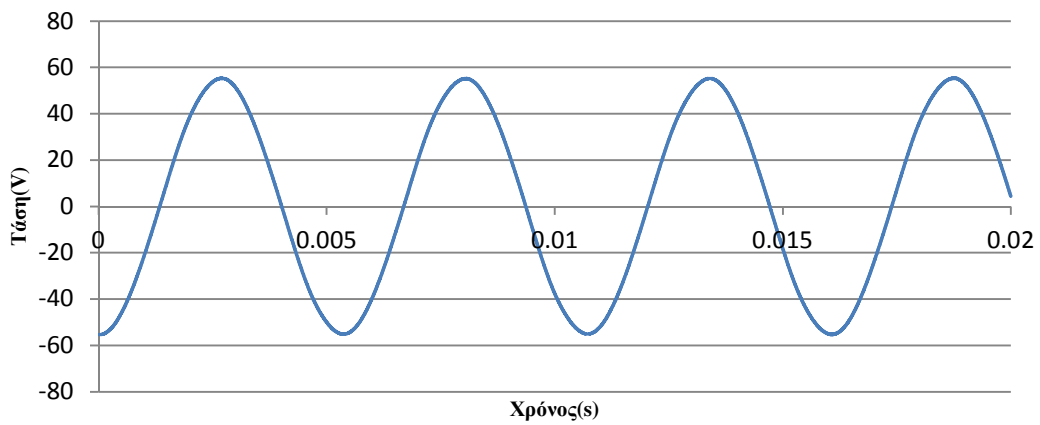
Σχήμα 3.26: Κυματομορφή τάσεως για τυχαίο φορτίο για 350ΣΑΛ

Κυματομορφή Ρεύματος 480ΣΑΛ



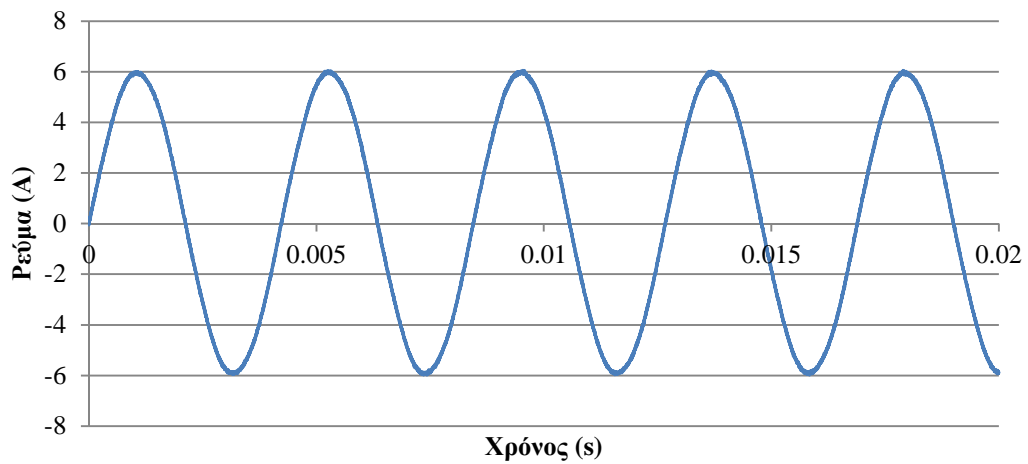
Σχήμα 3.27: Κυματομορφή ρεύματος για φορτίο για 480ΣΑΛ

Κυματομορφή Τάσεως 480ΣΑΛ

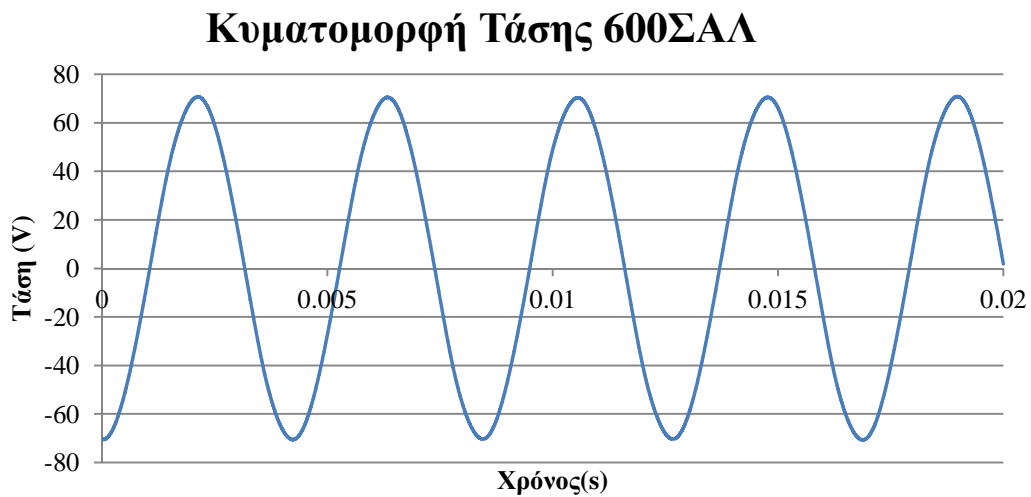


Σχήμα 3.28: Κυματομορφή τάσεως για τυχαίο φορτίο για 480ΣΑΛ

Κυματομορφή Ρεύματος 600ΣΑΛ



Σχήμα 3.29: Κυματομορφή ρεύματος για φορτίο για 600ΣΑΛ

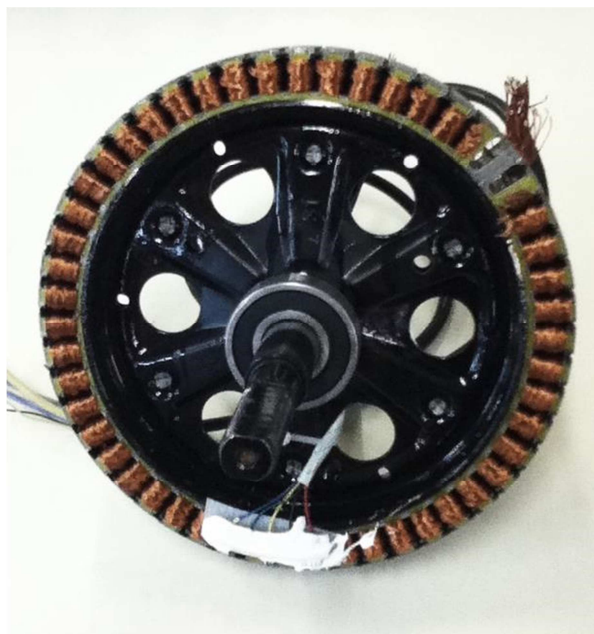


Σχήμα 3.30: Κυματομορφή τάσεως για τυχαίο φορτίο για 600ΣΑΛ

3.3.2.Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά:

Αφού πραγματοποιήθηκε η διεξαγωγή των μετρήσεων, στο εργαστήριο ανοίχθηκε η μηχανή ώστε να εξακριβωθούν τα στοιχεία της γεωμετρίας της καθώς και η δομή των τυλιγμάτων της.

Καταρχάς, μετρήθηκαν οι πόλοι και τα αυλάκια της μηχανής. Εμφανώς η μηχανή είχε 46 πόλους και 51 αυλάκια. Κατόπιν, μετρήθηκαν οι υπόλοιπες διαστάσεις που έχουν όπως παρουσιάζεται παρακάτω:



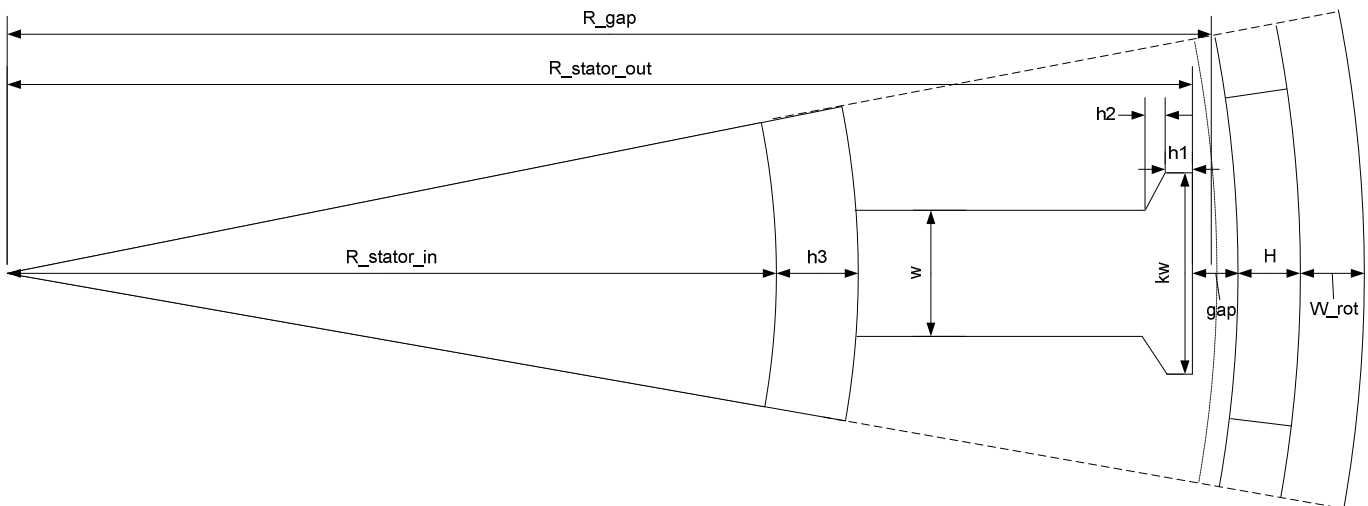
Σχήμα 3.31: Εσωτερικό της μηχανής, με τον στάτορα απομονωμένο



Σχήμα 3.32: Εσωτερικό της μηχανής, με τον ρότορα απομονωμένο



Σχήμα 3.33: Το κέλυφος της μηχανής



Σχήμα 3.34: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διαμόρφωση γεννήτριας

Με διαστάσεις:

Μέγεθος	Μήκος(mm)
w	6
k	10/6
h1	1
h2	2
h3	4
gap	0.5
R_gap	99.15
R_stator_out	98.9
R_stator_in	78.25
H	3
W_rot	8

Πίνακας 3.2: Τιμές μεγεθών της γεωμετρίας της γεννήτριας

Και συνολικό μήκος άξονα μηχανής L 29.5mm.

Σημειώνεται επίσης, ότι μεταξύ των μαγνητών στο δρομέα δεν υπάρχει κανένα κενό, οπότε έχουμε εύρος κάλυψης του πόλου από τον μαγνήτη 100%.

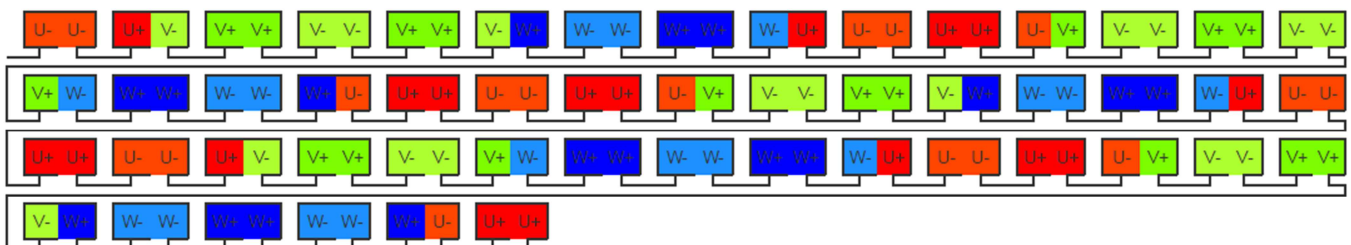
3.3.3.Δομή και χαρακτηριστικά τυλιγμάτων:

Κατόπιν, καταγράφηκαν τα χαρακτηριστικά των τυλιγμάτων. Όπως φαίνεται και στην εικόνα, κάθε αυλάκι καλύπτεται από διπλή στρώση τυλιγμάτων. Επίσης, συνολικά σε ένα αυλάκι μετρήθηκαν 140

καλώδια, 70 σε έκαστη στρώση. Ταυτόχρονα, διαπιστώθηκε ότι η μία φάση αποτελείται από 10 παραλληλισμένα καλώδια. Οπότε τα 70 καλώδια της κάθε στρώσης αντιστοιχούν σε 7 περιελίξεις μίας φάσης.

Για την εύρεση της αντίστασης των τυλιγμάτων πραγματοποιήσαμε δοκιμή με dc τροφοδοσία. Συγκεκριμένα επιβάλλοντας DC τάση με τροφοδοτικό μεταξύ δύο φάσεων της μηχανής, μετρήθηκε το ρεύμα που διέρρευσε τα καλώδια, οπότε με βάση τον νόμο του Ohm βρέθηκε η αντίσταση που αντιστοιχεί σε δύο εν σειρά τυλίγματα. Αφού, αφαιρέθηκε από αυτή η αντίσταση των καλωδίων που χρησιμοποιήθηκαν για την σύνδεση των μετρητικών οργάνων, και έγινε η αναγωγή στην αντίσταση της μίας φάσης μόνο, υπολογίστηκε η αντίσταση του ενός τυλιγματος σε 0.048Ω.

Τέλος, έγινε η αποτύπωση της κατανομής των φάσεων στις αύλακες της μηχανής. Όπως φαίνεται παρακάτω, η κατανομή στις αύλακες έχει ως εξής:



Σχήμα 3.35: Κατανομή των τυλιγμάτων στα αυλάκια της μηχανής [11]

όπου U,V,W αντιστοιχούν στις φάσεις A,B,C αντίστοιχα. Η κατανομή αυτή αντιστοιχεί στη βέλτιστη κατανομή των τυλιγμάτων για την περίπτωση των 46 πόλων και 51 αυλακιών. Όπως διαπιστώθηκε στο εργαστήριο η κατανομή αυτή επαληθεύεται για την παρούσα μηχανή. [11]

Κεφάλαιο 4^ο: Ανάπτυξη Προσομοιωτικού Μοντέλου

4.1 Προσομοίωση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων:

Για την ανάλυση και τη δημιουργία ενός μοντέλου αναπαράστασης της μηχανής, πρέπει να βασιστούμε στην πεδιακή ανάλυση, καθώς μπορεί να δώσει λεπτομερή ανάλυση του μαγνητικού πεδίου και να οδηγήσει στην επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών της μηχανής. Με χρήση της κατανομής του μαγνητικού πεδίου, όπως αυτό προκύπτει από την πεδιακή ανάλυση, μπορούμε να λάβουμε τιμές για μεγέθη όπως ροπή, δύναμη, απώλειες καθώς και την εξακρίβωση του αν υπάρχουν περιοχές κορεσμού στον πυρήνα.

Για την πεδιακή ανάλυση της μηχανής γίνεται χρήση του ελεύθερου λογισμικού FEMM, το οποίο βασίζεται στην επίλυση δισδιάστατων μαγνητοστατικών προβλημάτων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η λειτουργία του προγράμματος βασίζεται στην λογική που ακολουθούν και τα υπόλοιπα παρόμοια λογισμικά όπου ο χώρος διακριτοποιείται με τη χρήση πλέγματος σε μικρότερες τριγωνικές επιφάνειες, σε καθεμία από τις οποίες η λύση του μαγνητοστατικού προβλήματος, βρίσκεται μέσω γραμμικής παρεμβολής μεταξύ των τιμών των κορυφών.

Ο λόγος που η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι αυτή των πεπερασμένων στοιχείων είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα και η δυσκολία της επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων που χαρακτηρίζουν το μαγνητοστατικό πρόβλημα, σε βαθμό που η αναλυτική λύση είναι αδύνατη ειδικά σε πολύπλοκες γεωμετρίες. Οπότε, με αυτόν τον τρόπο, η πολύπλοκη γεωμετρία χωρίζεται σε επιμέρους υποπροβλήματα πολύ απλούστερης γεωμετρίας, όπου οι αναλυτικές λύσεις είναι εύκολες και γρήγορες και συνθέτουν την λύση του ολικού προβλήματος.

Η επίλυση του προγράμματος FEMM γίνεται σε μαγνητοστατικά προβλήματα, δηλαδή προβλήματα, όπου το μαγνητικό πεδίο θεωρείται ανεξάρτητο και σταθερό με τον χρόνο. Η επίλυση βασίζεται στις εξισώσεις του Maxwell σύμφωνα με τις οποίες:

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (4.1)$$

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

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (4.3)$$

$$\nabla \times B = \mu \left(J + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right) \quad (4.4)$$

Από τις παραπάνω οι σχέσεις (4.2) και (4.4) αφορούν το μαγνητικό πεδίο, όπου στην περίπτωση του μαγνητοστατικού προβλήματος, οι όροι που σχετίζονται με τη μεταβολή του μεγέθους στο χρόνο μηδενίζονται, οπότε οι σχέσεις απλοποιούνται στις:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4.2b) \quad \text{και} \quad \nabla \times B = \mu J \quad (4.4b)$$

Επίσης, ισχύει ότι $B = \mu H$ με το μ να συμβολίζει την διαπερατότητα. Η διαπερατότητα έχει σχέση με το μαγνητικό πεδίο που εξαρτάται από το υλικό και μπορεί να έχει σταθερή τιμή, να έχει γραμμική εξάρτηση από το H ή ακόμα και να είναι πιο πολύπλοκη συνάρτηση του μαγνητικού πεδίου. Για την εύρεση του μαγνητικού πεδίου απαιτείται ο υπολογισμός του διανυσματικού δυναμικού A , καθώς ισχύει η συσχέτιση:

$$B = \nabla \times A \quad (4.5)$$

Οπότε αντικαθιστώντας στην (4.2b) έχουμε:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J \quad (4.6)$$

Θεωρώντας ιστροπικό μέσο η σχέση γίνεται:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \cdot A = J \quad (4.6b)$$

Έχοντας γνωστή την ρευματική κατανομή, μέσω του προγράμματος FEMM γίνεται η επίλυση και η εύρεση του διανυσματικού δυναμικού A , οπότε και της κατανομής του μαγνητικού πεδίου. Για την επίλυση είναι απαραίτητες οι οριακές συνθήκες. Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος χωρίζονται στις εξής κατηγορίες στις διαφορικές εξισώσεις:

1. Dirichlet: Οι οριακές συνθήκες Dirichlet, δηλώνουν την τιμή του δυναμικού A πάνω στο όριο της επιφάνειας.
2. Neumann: Σε αυτές τις οριακές συνθήκες ορίζεται η κάθετη παράγωγος του δυναμικού πάνω στο όριο.
3. Robin: Οι οριακές συνθήκες Robin αποτελούν συνδυασμό των παραπάνω συνοριακών συνθηκών καθώς καθορίζουν στο όριο μια σχέση της παραγώγου του δυναμικού με την τιμή του.
4. Περιοδικές: Η συνθήκη αυτή καθορίζει τη σχέση δύο ορίων. Τα όρια σε αυτήν την περίπτωση, βασιζόμενα στην έννοια της περιοδικότητας έχουν την ίδια οριακή τιμή.
5. Αντιπεριοδικές: Η αντιπεριοδική είναι η δυική της προηγούμενης συνθήκης, επιβάλλοντας τιμές ίσου μέτρου και αντίθετου προσήμου στα δύο όρια.

Η διαδικασία ώστε να κάνουμε την ανάλυση μέσω του προγράμματος Femm ακολουθεί συγκεκριμένα στάδια. Αρχικά θα πρέπει να ορισθεί και να παρασταθεί με ακρίβεια η επιθυμητή γεωμετρία. Κατόπιν, σε αυτήν τη γεωμετρία πρέπει να ορισθούν οι συνοριακές συνθήκες με βάση τα παραπάνω, καθώς

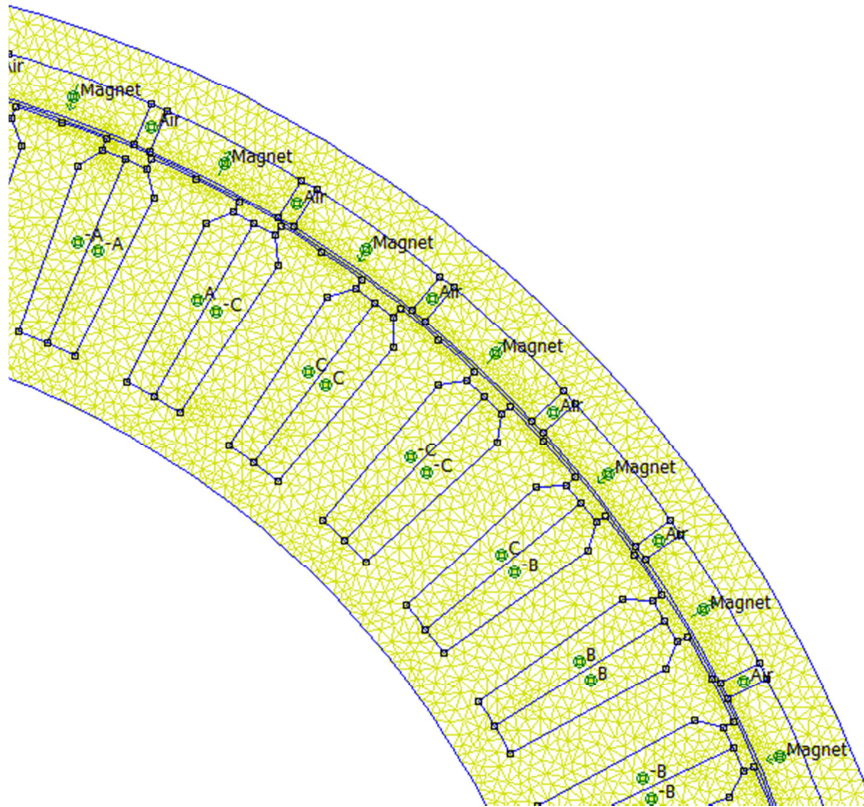
και οι ιδιότητες των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν. Ακολουθεί η δημιουργία του πλέγματος, ώστε να επιτευχθεί η επιμέρους επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος. Στην συνέχεια γίνεται η επεξεργασία και αυτή καθεαυτή η επίλυση του προβλήματος, ώστε να επιτευχθεί η εύρεση του διανυσματικού δυναμικού. Τέλος, αφού πλέον έχει γίνει αυτό, με απλή επεξεργασία των αποτελεσμάτων, γίνεται η αναπαράσταση και ο υπολογισμός των επιθυμητών μεγεθών. [12][13]

4.2 Ανάπτυξη μοντέλου αναπαράστασης ηλεκτρικής μηχανής:

Το μοντέλο στο Femm που θα δημιουργηθεί θα πρέπει να είναι σε θέση να υπολογίζει τις τιμές των βασικών χαρακτηριστικών της μηχανής με σχετική ακρίβεια, ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση με τις πειραματικές μετρήσεις. Οπότε, θα πρέπει να είναι σε θέση να προσμοιώνει με ακρίβεια την τιμή της ροπής διακένου, της τάσης στα άκρα της μηχανής, των απωλειών και του βαθμού απόδοσης. Τέλος, επειδή στο τελικό στάδιο της εργασίας, είναι επιθυμητή η ανάπτυξη μιας βελτιστοποιημένης γεωμετρίας, για την οποία κριτήριο πρέπει να είναι και το βάρος, το μοντέλο θα πρέπει να εκτιμά ρεαλιστικά και το βάρος της μηχανής.

4.2.1 Κατασκευή γεωμετρίας:

Αρχικά, όπως αναφέρθηκε το πρώτο βήμα είναι η δημιουργία της γεωμετρίας. Δεδομένου, ότι στο κομμάτι της βελτιστοποίησης οι διάφορες παράμετροι του σχεδιασμού της γεωμετρίας θα μεταβάλλονται για την εύρεση της βέλτιστης, είναι σκόπιμη η ανάπτυξη ενός παραμετρικού κώδικα, ο οποίος θα μπορεί κάθε φορά ανάλογα με τις τιμές των εκάστοτε παραμέτρων να σχεδιάζει την ζητούμενη γεωμετρία. Εξ αυτού, η δημιουργία του κώδικα έγινε μέσω του προγράμματος Matlab. Οι παράμετροι εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν ήταν, καταρχάς, ο αριθμός των πόλων και των αυλακιών της μηχανής. Επιπλέον, γεωμετρικά μεγέθη, και συγκεκριμένα αυτά που λάβαμε ως στοιχεία της γεωμετρίας της μηχανής (βλ. Εικόνα 3.10), καθώς και το ποσοστό πληρότητας του ρότορα από τους μαγνήτες τέθηκαν ως παραμετροποιημένες εισοδοί. Τέλος, επιπρόσθετα στοιχεία αριθμού καλωδίων, πάχους καλωδίων, συχνότητας και χαρακτηριστικών των υλικών χρησιμοποιήθηκαν ως εισοδοί. Το τελευταίο βήμα πριν την εύρεση του διανυσματικού δυναμικού είναι ο ορισμός των οριακών συνθηκών, που επιβάλλουν το πεδίο να έχει μηδενική κατανομή εξωτερικά της μηχανής, όπως είναι λογικό. Με βάση όλα τα παραπάνω στοιχεία ο κώδικας, είναι σε θέση να αναπτύξει την αντίστοιχη γεωμετρία και κατόπιν να προχωρήσει στην επίλυσή της.



Σχήμα 4.1: Λεπτομέρεια στο πλέγμα του υπολογιστικού προγράμματος Femm

Όσον αφορά το πλέγμα, το πρόγραμμα Femm δημιουργεί αυτόματα μίας αρκετά καλής ποιότητας και πυκνότητας πλέγμα, πράγμα που είναι πολύ βασικό για την επίλυση του προβλήματος. Παραπάνω φαίνεται το πλέγμα όπως δημιουργείται. Να σημειωθεί, ότι όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα του πλέγματος, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια έχουμε στην επίλυση και για αυτόν το λόγο το πλέγμα στην περιοχή του διακένου εξασφαλίζεται να είναι πιο πυκνό. Παρόλα αυτά, γενικώς, πρέπει να γίνει ένας συμβιβασμός μεταξύ ποιότητας πλέγματος και ταχύτητας επίλυσης, καθώς όσο αυξάνεται ο αριθμός των κελιών τόσο πιο πολύπλοκο γίνεται το πρόβλημα και τόσο πιο μεγάλο υπολογιστικό κόστος έχει, σε σημείο που μπορεί για ένα μεμονωμένο πρόβλημα να μην είναι απαγορευτικό, αλλά κατά την διαδικασία της βελτιστοποίησης, όπου θα εξετάζονται εκατοντάδες μηχανές, έχει μεγάλη σημασία. Συγκεκριμένα το πλέγμα μας έχει 29554 κόμβους, που μεταφράζεται σε 57808 τρίγωνα, στην περίπτωση της αρχικής μηχανής, εξοικονομώντας χρόνο και υπολογιστική δύναμη, αμελώντας το κεντρικό τμήμα της μηχανής. Ας σημειωθεί, ότι ως προσέγγιση δικαιολογείται, από τη στιγμή που η ροή του μαγνητικού πεδίου περιορίζεται στο κομμάτι του στάτη που συμμετέχει στο πλέγμα. Πέραν αυτού, για να εξασφαλιστεί πλήρως ότι δεν παραποιούνται τα αποτελέσματα, έγιναν ορισμένες δοκιμές, που ανέδειξαν ότι όντως, η μη δημιουργία πλέγματος στο εσωτερικό τμήμα δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα.

Από το Femm με την εύρεση του διανυσματικού δυναμικού μπορούν να προκύψουν διάφορα μεγέθη που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην εύρεση των χαρακτηριστικών της μηχανής.

4.2.2. Υπολογισμός ροπής διακένου:

Αρχικά για τον υπολογισμό της ροπής διακένου της μηχανής, χρησιμοποιήθηκε μέθοδος υπολογισμού με βάση τον ταυστή τάσης του Maxwell. Με τη χρήση του εν λόγω ταυστή γίνεται πολύ γρήγορα ο υπολογισμός των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων που επιδρούν πάνω σε ένα σώμα, όσο αυτό βρίσκεται σε ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

Αρχικά, επιλέγεται προσεκτικά η επιφάνεια που περικλείει το επιθυμητό σώμα. Η δύναμη υπολογίζεται ως το ολοκλήρωμα πάνω στην επιφάνεια των μεγεθών που προκύπτουν απευθείας από το δυναμικό που περιγράφει το πεδίο. Ανάλογα με την περίπτωση το δυναμικό μπορεί να είναι είτε βαθμωτό, είτε διανυσματικό.

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των μονίμων μαγνητών και των τυλιγμάτων του στάτη, προκαλεί την ροπή στο διάκενο της μηχανής. Οπότε, επιλέγουμε κυλινδρική επιφάνεια που κόβει στη μέση το διάκενο της μηχανής. Πρακτικά, επειδή στο προσομοιωτικό πρόγραμμα δουλεύουμε με μία δισδιάστατη ανάλυση, αυτή η επιφάνεια εκφυλίζεται στην περίπτωση μας σε απλώς έναν κύκλο στο μέσο του διακένου της μηχανής. Οπότε, για τον υπολογισμό της ροπής, γίνεται η ολοκλήρωση του ταυστή Maxwell πάνω σε αυτή τη γραμμή και κατόπιν, το αποτέλεσμα πολλαπλασιάζεται με το ενεργό μήκος της μηχανής. Για μία μηχανή με p ζεύγη πόλων η ροπή δίνεται ως:

$$T_{cog} = \frac{D-g}{2} \frac{L_{Fe}}{\mu_0} p \int_{l_g} B_r B_g dl \quad (4.7)$$

Όπου B_r η ακτινική συνιστώσα της πυκνότητας ροής, κάθετη στη γραμμή διακένου l_g , B_g η αζιμουθιακή συνιστώσα, εφαπτομενική στη γραμμή διακένου, D η εσωτερική διάμετρος του στάτη και g το μήκος διακένου. Διαφορετική εκδοχή του τύπου, για μεγαλύτερη ακρίβεια, υπολογίζει τη ροπή σε όλο το δακτύλιο του διακένου S_g μετατρέποντας τον παραπάνω τύπο ως εξής:

$$T_{cog} = \frac{L_{Fe}}{g\mu_0} p \int_{S_g} r B_r B_g dS \quad (4.7b)$$

Εμείς παρακάτω στην ανάλυση θα αρκεστούμε στο τύπο (4.7). [13]

4.2.3. Υπολογισμός ηλεκτρεγερτικής δύναμης:

Για την εύρεση της ηλεκτρεγερτικής δύναμης ΗΕΔ που αναπτύσσεται σε κάθε κατάσταση λειτουργίας της μηχανής, καταρχάς για να γίνει και σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα που έχουμε, υπολογίζεται για μικρές τιμές ρεύματος, πρακτικά μηδενικές. Άλλωστε οι τιμές των ρευμάτων δεν

επηρεάζουν την ΗΕΔ, καθώς εξαρτάται πρωτίστως από το πεδίο της μηχανής, που στις μηχανές μονίμου μαγνήτη επηρεάζεται ελάχιστα από το πεδίο που προκαλούν τα τυλίγματα του στάτη. Ο υπολογισμός της ΗΕΔ βασίζεται στη πεπλεγμένη ροή του μαγνητικού πεδίου, οπότε αρχικά πρέπει να υπολογιστεί αυτή. Η ανάλυση παρακάτω επικεντρώνεται σε μία φάση, αλλά αντίστοιχα γίνεται και για τις υπόλοιπες.

Αφού γίνει η επίλυση του πλέγματος, είναι γνωστή παντού η τιμή του διανυσματικού δυναμικού. Η μαγνητική ροή λόγω των μονίμων μαγνητών που είναι πεπλεγμένη με την j φάση των τυλιγμάτων δίνεται από τον τύπο:

$$\Lambda_{j,pm} = 2pL_{Fe} \frac{n_q}{n_{pp}} \sum_{q=1}^{Q/2p} k_{jq} \frac{1}{S_q} \int_{S_q} A_z dS \quad (4.8), \text{ με } j=a,b,c$$

Όπου n_q είναι το πλήθος των καλωδίων στο αυλάκι, n_{pp} ο αριθμός των παράλληλων καλωδίων στο τύλιγμα, $Q/2p$ ο αριθμός των αυλακιών ανά πόλων και k_{jq} συντελεστής που παίρνει τιμές $0, \pm 1, \pm 0.5$ ανάλογα με την κατεύθυνση των τυλιγμάτων και τη φάση που ανήκουν. Οπότε με τον παραπάνω τύπο είναι δυνατός ο υπολογισμός της ροής σε κάθε φάση.

Για τον υπολογισμό της ηλεκτρεγερτικής δύναμης, υπολογίζεται η μεταβολή της ροής σε κάθε φάση, μεταξύ δύο διαδοχικών θέσεων λειτουργίας. Όντας μαγνητοστατική η αντιμετώπιση του προβλήματος από το Femm, για αναπαράσταση δύο διαδοχικών χρονικών στιγμών, μεταβάλλονται οι τιμές των ρευμάτων και η θέση του ρότορα αντίστοιχα και ακολουθεί νέα επίλυση του πλέγματος. Οπότε, λαμβάνοντας τιμές ροής μεταξύ δύο κοντινών χρονικών στιγμών με βάση τον τύπο:

$$e(\vartheta_m) = \frac{d\Lambda_{pm}(\vartheta_m)}{dt} = \frac{d\Lambda_{pm}(\vartheta_m)}{d\vartheta_m} \frac{d\vartheta_m}{dt} = \frac{d\Lambda_{pm}(\vartheta_m)}{d\vartheta_m} \omega_m \quad (4.9)$$

υπολογίζεται η τιμή της ΗΕΔ σε μία χρονική στιγμή. Επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία για 360 ηλεκτρικές μοίρες, δηλαδή για χρονικά έναν κύκλο, λαμβάνουμε την καμπύλη της ΗΕΔ, η οποία παρουσιάζει και αρμονικά περιεχόμενα. Με FFT ανάλυση γίνεται η ανάλυση αρμονικού περιεχομένου και λαμβάνεται και η RMS τιμή της. [13][14]

4.2.4 Υπολογισμός απωλειών:

Για την εύρεση της απόδοσης της μηχανής, απαιτείται ο υπολογισμός των απωλειών, οι οποίες διαχωρίζονται σε μηχανικές, οι οποίες προφανώς δεν μπορούν να υπολογιστούν μέσω Femm, σε χαλκού, σιδήρου και απώλειες μαγνητών. Για τις τελευταίες τρεις μπορούμε να αναπτύξουμε μοντέλο υπολογισμού μέσω Matlab με βάση τα αποτελέσματα του Femm.

A. Απώλειες χαλκού:

Οι απώλειες χαλκού είναι απώλειες που οφείλονται στην μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμότητα, καθώς ρεύμα διαρρέει τα τυλίγματα. Συγκεκριμένα, η ισχύς των απωλειών μπορεί να υπολογιστεί πολύ απλά από τον τύπο:

$$P_{cu} = 3I R_a^2 \quad (4.10)$$

Όπου I είναι το ρεύμα των τυλιγμάτων σε rms τιμή και R_a η αντίσταση των τυλιγμάτων της μίας φάσης. Για τον υπολογισμό της αντίστασης, χρησιμοποιούνται στοιχεία μήκους των καλωδίων και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή της με την θερμοκρασία, η οποία κατά τη λειτουργία της μηχανής αυξάνεται. Συνήθως αυτές οι απώλειες είναι και οι μεγαλύτερες από όλες τις υπόλοιπες.

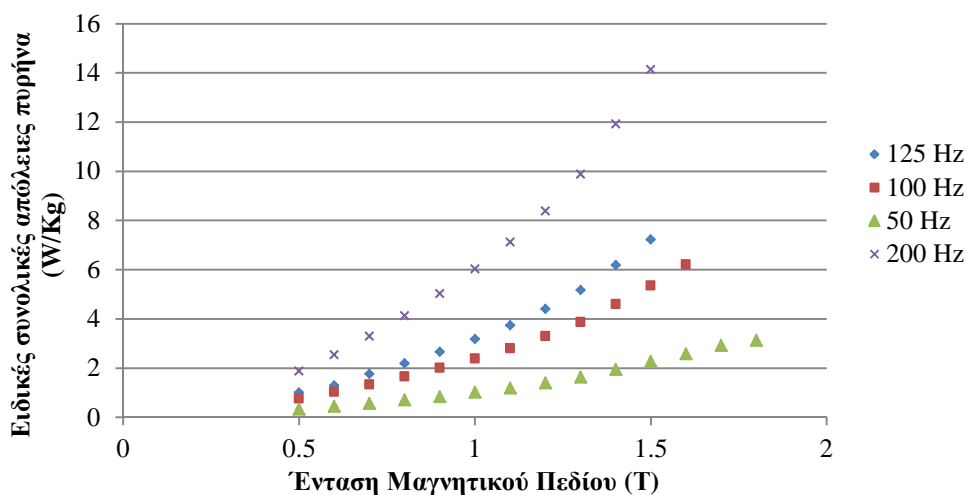
B.Απώλειες πυρήνα:

Οι απώλειες πυρήνα στα φερρομαγνητικά μέρη της μηχανής είναι οι αμέσως επόμενες σημαντικές απώλειες. Είναι αποτέλεσμα των απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων πάνω στο σίδηρο και γενικώς, αν και για τις αιτίες που τις προκαλούν έχει γίνει πολύ διεξοδική ανάλυση, οι τρόποι για την μοντελοποίηση τους χωλύνουν λόγω διαφόρων προβλημάτων.

Συγκεκριμένα, οι απώλειες αυτές δημιουργούνται σε μικροσκοπική κλίμακα, αλλά τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται είναι σε μακροσκοπική και βασίζονται σε αρκετές παραδοχές. Επίσης, αρκετά δεδομένα για τις απώλειες πυρήνα υπάρχουν κυρίως για μικρές συχνότητες λειτουργίας περί τα 50 με 60 Hz για ημιτονοειδή κατανομή πεδίου, οπότε για άλλες συχνότητες τα δεδομένα δεν είναι αρκετά. Αλλά ακόμα και σε αυτές τις περιπτώσεις τα δεδομένα προκύπτουν με τη δοκιμή Epstein Square, με αμφισβητήσιμα αποτελέσματα καθώς οι συνθήκες λειτουργίας της μηχανής κατά τη δοκιμή δεν είναι ίδιες με αυτές της κανονικής λειτουργίας. Πέραν αυτού, τα χαρακτηριστικά των υλικών μεταβάλλονται ως και 30% από παρτίδα σε παρτίδα παραγωγής, οπότε τα δεδομένα μπορεί να μην ανταποκρίνονται πλήρως στην συγκεκριμένη παρτίδα που αφορά την εκάστοτε μηχανή. Αν λάβουμε, επιπλέον, υπόψη ότι οι απώλειες πυρήνα επηρεάζονται από τις τάσεις και τις παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της μηχανής, αλλά και το γεγονός ότι σπάνια η κατανομή του μαγνητικού πεδίου μέσα στην μηχανή είναι πλήρως ημιτονοειδής καταλαβαίνουμε ότι τα διαθέσιμα στοιχεία είναι αρκετά προσεγγιστικά.

Παρόλα αυτά, στην προσομοίωσή μας γίνεται μία προσπάθεια αποτύπωσης των απωλειών πυρήνα. Θεωρώντας ότι η λαμαρίνα που χρησιμοποιείται για την μηχανή, είναι η πλέον συνήθης που χρησιμοποιείται M235-35A, έχουμε δεδομένα για την τιμή των απωλειών ανά κιλό του υλικού με βάση την ένταση του μαγνητικού πεδίου και τη συχνότητα λειτουργίας. Έχοντας τη δυνατότητα μέσω του προγράμματος προσομοίωσης Femm να εξετάσουμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου σε κάθε κελί του πλέγματος ξεχωριστά καθώς και τον όγκο του, βρίσκουμε τις απώλειες σε κάθε κελί, άρα και τις συνολικές, κάνοντας τις απαραίτητες αναγωγές σε συχνότητα και σε τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου, με γραμμικές παρεμβολές στο δοσμένο γράφημα.

Απώλειες Πυρήνα



Σχήμα 4.2: Απώλειες Σιδήρου σε W/Kg συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου

Να σημειωθεί ότι η μείωση των απωλειών αυτών μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες μεθόδους. Από τις πλέον συνηθισμένες είναι η χρήση αρκετά λεπτών λαμαρίνων για την κατασκευή του σώματος της μηχανής. Θεωρητικά οι απώλειες δινορρευμάτων είναι ανάλογες με το τετράγωνο του πάχους των λαμαρίνων, οπότε μία μείωση στο μισό του πάχους τους μπορεί να φέρει τις απώλειες δινορρευμάτων στο ¼ της αρχικής τους τιμής. Ταυτόχρονα, η αύξηση της αντίστασης του υλικού της λαμαρίνας μπορεί να μειώσει τις απώλειες, αφού υπάρχει αντιστρόφως ανάλογη εξάρτηση μεταξύ των δύο μεγεθών, πράγμα που επιτυγχάνεται συχνά με την προσθήκη πυριτίου στις λαμαρίνες. Επίσης, για μεγαλύτερη αντοχή της λαμαρίνας στις καταπονήσεις γίνεται θέρμανση τους σε υψηλές θερμοκρασίες.

Τέλος, φυσικά για να μειωθούν οι απώλειες, μία λύση είναι η μείωση του πλάτους της έντασης του μαγνητικού πεδίου, καθώς όσο αυξάνεται πάνω από τα 1.5 Tesla οι απώλειες επίσης αυξάνονται σε υπερβολικές τιμές. Συγκεκριμένα, για τιμές 1.5 με 2.5T οι απώλειες υστέρησης είναι ανάλογες του πεδίου, ενώ οι απώλειες δινορρευμάτων είναι ανάλογες του τετραγώνου του. Το πρόβλημα παίρνοντας ένα τέτοιο μέτρο είναι ότι η μείωση του μαγνητικού πεδίου, μειώνει και την παραγόμενη ροπή. [14]

Γ. Απώλειες Μονίμων Μαγνητών

Πέραν των παραπάνω απωλειών μία μικρή συνιστώσα εμφανίζεται με τη μορφή δινορρευμάτων στους μαγνήτες. Οι συγκεκριμένες απώλειες είναι ακόμα πιο πολύπλοκες στον υπολογισμό και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εύρεσή τους είναι μειωμένης ακρίβειας. Στο μοντέλο μας, δεδομένου ότι η συνιστώσα τους είναι μικρή, αφού έγινε προσέγγιση υπολογισμού τους θεωρήθηκε σκόπιμο να αμεληθούν. Παρόλα αυτά για λόγους πληρότητας, παρακάτω αναφέρονται ορισμένοι τρόποι υπολογισμού τους.

Ο πρώτος τρόπος και απλούστερος, εφαρμόζεται συνήθως σε τμηματοποιημένους μαγνήτες και αγνοεί τις αρμονικές χώρου λόγω κατανομής των τυλιγμάτων, χρησιμοποιώντας τη μέγιστη τιμή της

μαγνητικής επαγωγής για κάθε αρμονική ρεύματος. Θεωρούμε την πυκνότητα μαγνητικού πεδίου που προκαλεί τις απώλειες δινορρευμάτων:

$$B(a_r) = \hat{B} \cos[p_r(a_r - \beta)] \quad (4.11)$$

όπου p_r ο αριθμός των ζευγών πόλων του δρομέα, β η μηχανική γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στον άξονα συμμετρίας του μαγνήτη και τον άξονα χ και δίνει την αρχική γωνιακή απόκλιση του από τον άξονα αναφοράς και a_r η μηχανική γωνιακή απόκλιση από τον άξονα συμμετρίας του μαγνήτη. Με βάση τη σχέση (4.11) η πυκνότητα δινορρευμάτων ανά μονάδα όγκου δίνεται από τη σχέση:

$$k_{m,k} = \frac{b_m^2}{12\rho_m} \left(\frac{d}{dt} \left\{ \hat{B} \cos(p(a_k - \beta)) \right\} \right)^2 \quad (4.12)$$

Για την εύρεση των απωλειών στον k μαγνήτη, απλά πολλαπλασιάζεται η παραπάνω σχέση με τον όγκο του μαγνήτη. Τέλος, αθροίζουμε τις απώλειες των μαγνητών και καταλήγουμε στη σχέση για μικρό μήκος μαγνήτη b_m :

$$P_m = \frac{r_s l_m l_s b_m^2}{12\rho_m} \times \left\{ (pa_m + \sin(pa_m)) \left(\frac{d}{dt} \left\{ \hat{B} \cos(p\beta) \right\} \right)^2 + (pa_m - \sin(pa_m)) \left(\frac{d}{dt} \left\{ \hat{B} \sin(p\beta) \right\} \right)^2 \right\} \quad (4.13)$$

όπου, l_m το πάχος του μαγνήτη, a_m η γωνία του μαγνήτη, r_s η ακτίνα ως τη μέση του διακένου, l_s το ενεργό μήκος της μηχανής.

Για ακτινικό μαγνήτη η σχέση (4.13) μπορεί να απλοποιηθεί ως:

$$P_m = \frac{V_m b_m^2 B^2 \omega^2}{12\rho_m} \quad (4.14)$$

Η χρήση του παραπάνω μοντέλου προϋποθέτει ότι:

1. Το πλάτος (ή εύρος του μαγνήτη ανάλογα με την μηχανή) είναι μικρότερο από το βάθος διείσδυσης δ για την εκάστοτε συχνότητα, ώστε να μπορεί να αμεληθεί το επιδερμικό φαινόμενο.
2. Το μαγνητικό πεδίο να είναι ομοιογενές πάνω σε όλη την επιφάνεια του μαγνήτη.
3. Το πλάτος (ή εύρος) να είναι μικρότερο από το αξονικό μήκος ώστε να αμελούνται τα φαινόμενα των άκρων.

Να σημειωθεί ότι το βάθος διείσδυσης δίνεται από τον τύπο:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_r\mu_0}} \quad (4.15)$$

με ρ την ειδική αντίσταση του αγωγού, μ τη μαγνητική διαπερατότητα (με r και 0 του αγωγού και του κενού αντίστοιχα) και ω την κυκλική συχνότητα του ρεύματος του αγωγού.

Εναλλακτικός τρόπος υπολογισμού των απωλειών είναι με υπολογισμό των απωλειών δινορρευμάτων με άθροιση των στοιχειωδών απωλειών, ξεκινώντας με την θεώρηση ότι το ρεύμα τροφοδοσίας είναι ημιτονικό και ίσο με:

$$J_s(t) = J_s \cos(\omega t)$$

Με παραγόμενο μαγνητικό πεδίο:

$$H_z(x, t) = \operatorname{Re}\{e^{j\omega t} H_z(x)\}$$

$$\text{και } H_z(0) = J_s = H_z(w_{mag})$$

Οπότε η λύση προκύπτει:

$$H_z(x) = J_s \frac{\cosh(k(x - w_{mag}/2))}{\cosh(kw_{mag}/2)} \quad (4.16)$$

με $k = \sqrt{\omega\mu\sigma} \frac{(1+j)}{\sqrt{2}} = \frac{1+j}{\delta}$ με $\sigma = 1/\rho$ η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού.

$$J_s(x) = -\frac{\partial H_z(x)}{\partial x} = -kJ_s \frac{\sinh(k(x - w_{mag}/2))}{\cosh(kw_{mag}/2)} \quad (4.17)$$

Και η μέση πυκνότητα ισχύος απωλειών δινορρευμάτων σε μία περίοδο:

$$P_{el} = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \left(\frac{1}{w_{mag}} \int_0^{w_{mag}} \frac{(\operatorname{Re}\{e^{j\omega t} J_x(z)\})^2}{\sigma} dz \right) dt$$

Η οποία τελικώς καταλήγει στην:

$$P_{el} = \frac{J_s^2}{\sigma d^2} \gamma \frac{\sinh \gamma - \sin \gamma}{\cosh \gamma + \cos \gamma} \quad (\text{W/m}^3) \quad (4.18)$$

[15][16][17][13]

4.2.5 Υπολογισμός βάρους μηχανής:

Το βάρος της μηχανής είναι πολύ σημαντική πληροφορία, γιατί καθορίζει την πυκνότητα ισχύος. Ο υπολογισμός της μάζας της είναι αρκετά απλός, το μόνο που χρειάζεται είναι η πυκνότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται και ο όγκος κάθε μέρους. Ακριβώς η σύσταση των υλικών δεν είναι γνωστή, παρόλα αυτά, ένας προσεγγιστικός υπολογισμός είναι δυνατός, χρησιμοποιώντας τυπικές τιμές για κάθε μέρος της μηχανής. Να σημειωθεί ότι το βάρος υπολογίζεται μόνο για την περιοχή του ρότορα, των τυλιγμάτων και του στάτη, αλλά όχι του άξονα. Ο λόγος είναι ότι στο κομμάτι του άξονα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές για την μείωση του βάρους του, ανάλογα και με την υπόλοιπη δομή της μηχανής, αλλά και του χώρου τοποθέτησής της. Οπότε, έχει νόημα να υπολογίζουμε μόνο το βάρος για το οποίο μπορούμε να είμαστε βέβαιοι.

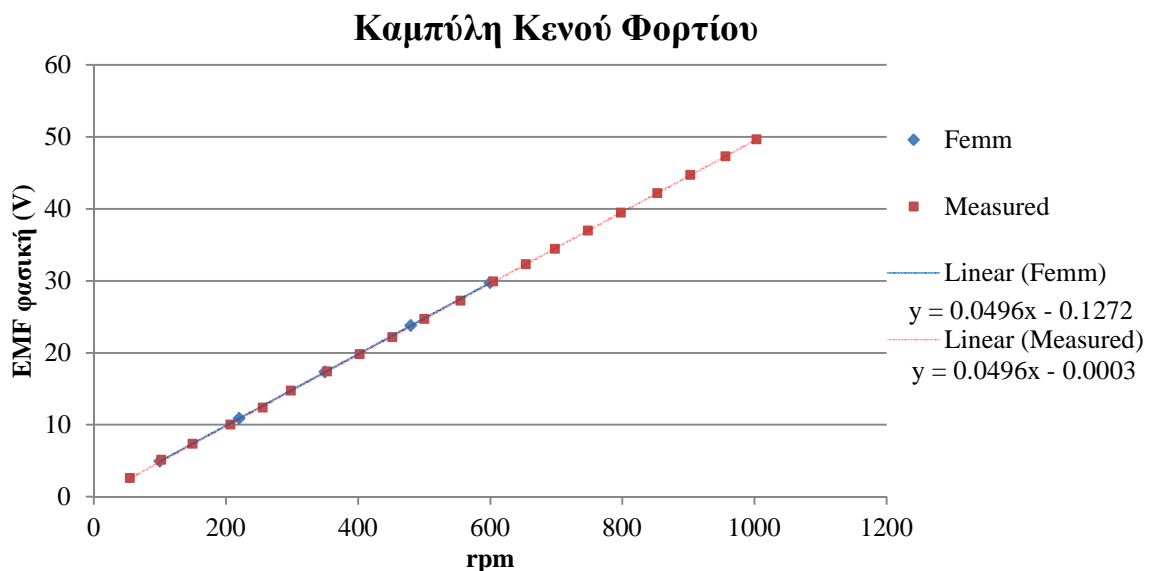
4.3.Αποτελέσματα Μοντέλου και Σύγκριση με Πειραματικά

Για να επαληθευτεί η ακρίβεια του μοντέλου που αναπτύχθηκε, έγιναν προσομοιώσεις για κάθε σετ πειραματικών μετρήσεων και κατόπιν έγινε η σύγκριση με τις μετρήσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα συγκριτικά για κάθε περίπτωση.

4.3.1.Καμπύλη κενού φορτίου:

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, δεν έχουμε στοιχεία για τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή της μηχανής, οπότε υπάρχει μία απροσδιοριστία και ως προς το υλικό των μαγνητών. Το υλικό των μαγνητών είναι μία παράμετρος που επιδρά καθοριστικά στην παραγόμενη ΗΕΔ και ροπή της μηχανής. Συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι το μοντέλο δοκιμάστηκε για διαφορετικές τιμές των μεγεθών της γεωμετρίας μέσα στα ανεκτά όρια λάθους και τα αποτελέσματα που προέκυψαν είχαν ελάχιστες διαφοροποιήσεις, της τάξης δεύτερου δεκαδικού. Οπότε ο βασικός παράγοντας απροσδιοριστίας ήταν το υλικό το μαγνητών. Ακολούθησαν δοκιμές για διάφορες τιμές συνεκτικότητας μαγνήτη και με γνώμονα ότι η προσομοίωση της καμπύλης κενού φορτίου θα πρέπει να δίνει αποτελέσματα πολύ κοντά στα πειραματικά, καταληκτική τιμή συνεκτικότητας προέκυψε η τιμή 764KA/m. Η επιλογή της συγκεκριμένης τιμής έγινε και λόγω του ότι είναι η πλησιέστερη τιμή στην περιοχή καλής ακρίβειας, που αντιστοιχεί σε μαγνήτες διαθέσιμους στην αγορά.

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω έχουμε τα εξής δεδομένα για την καμπύλη κενού φορτίου και την αντίστοιχη σύγκλιση με τα πειραματικά:



Σχήμα 4.3: Σύγκριση μεταξύ πειραματικών και προσομοιωτικών αποτελεσμάτων για την ηλεκτρεγερτική δύναμη

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα οι τιμές μεταξύ πειραματικών και προσομοιωτικών αποτελεσμάτων έχουν πολύ καλή σύγκλιση, με τις καμπύλες να έχουν ακριβώς την ίδια κλίση.

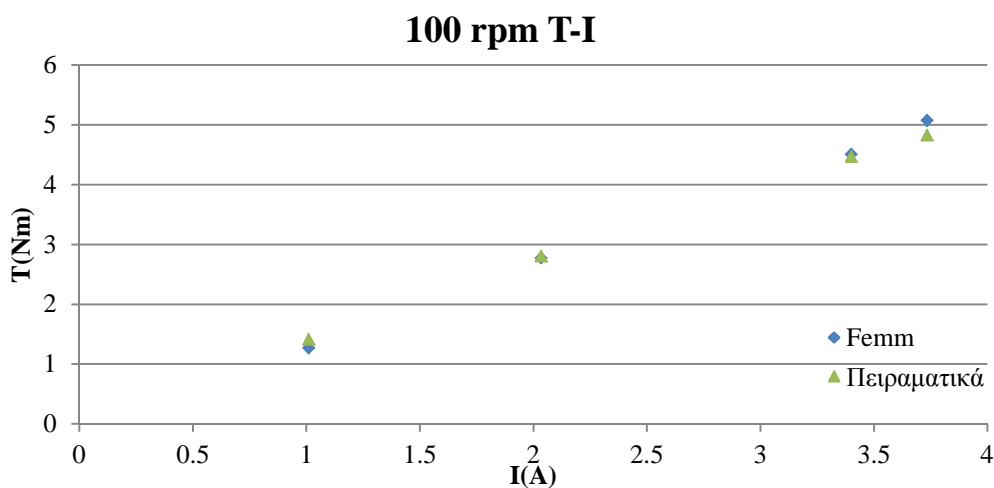
4.3.2.Ροπή εξόδου και βαθμός απόδοσης:

Μετακινώντας τον ρότορα στην αντίστοιχη γωνία ροπής για κάθε κατάσταση λειτουργίας, βάζοντας τις αντίστοιχες τιμές των ρευμάτων και συχνοτήτων/στροφών ως εισόδους, εξάγονται για τη ροπή διακένου τα εξής αποτελέσματα, τα οποία συγκρίνονται με την ροπή διακένου των μετρήσεων. Παρακάτω δίνεται και η ποσοστιαία απόκλιση μεταξύ των τιμών:

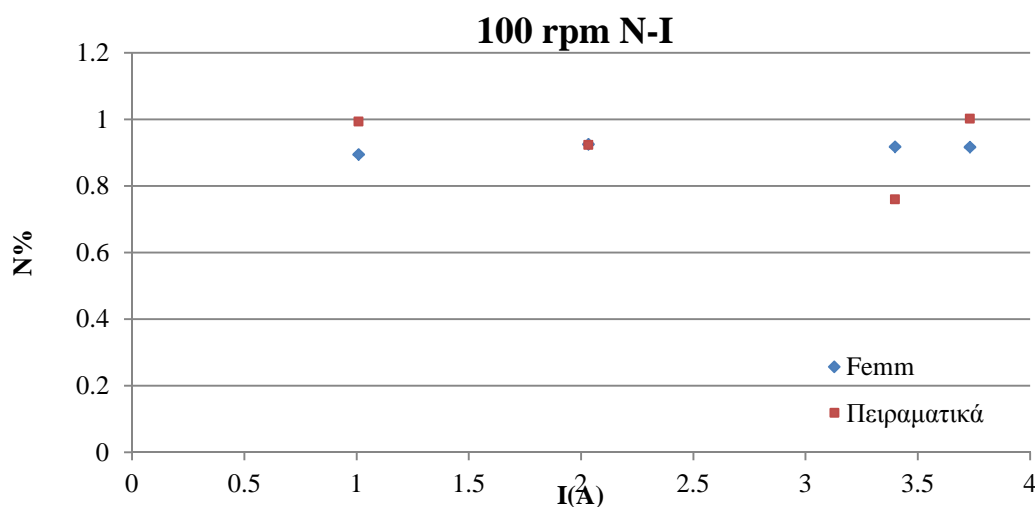
Στροφές: 100rpm

Ρεύμα Εξόδου(A)	Ροπή πειραματική (Nm)	Ροπή Femm(Nm)	Απόκλιση Ροπής %	Απόδοση Πειραματική	Απόδοση Femm	Απόκλιση Απόδοσης %
1.01	1.42	1.27	10.26	0.99	0.90	9.97
2.03	2.81	2.78	1.02	0.92	0.93	-0.15
3.40	4.47	4.51	-0.90	0.76	0.92	-20.68
3.73	4.83	5.08	-5.16	1.00	0.92	8.58

Πίνακας 4.1: Συγκριτικά αποτελέσματα πειραματικών και προσομοιωτικών τιμών για ροπή διακένου και απόδοση της μηχανής για 100 ΣΑΛ



Σχήμα 4.4: Σύγκριση μεταξύ πειραματικών και προσομοιωτικών αποτελεσμάτων για τη ροπή διακένου για 100ΣΑΛ

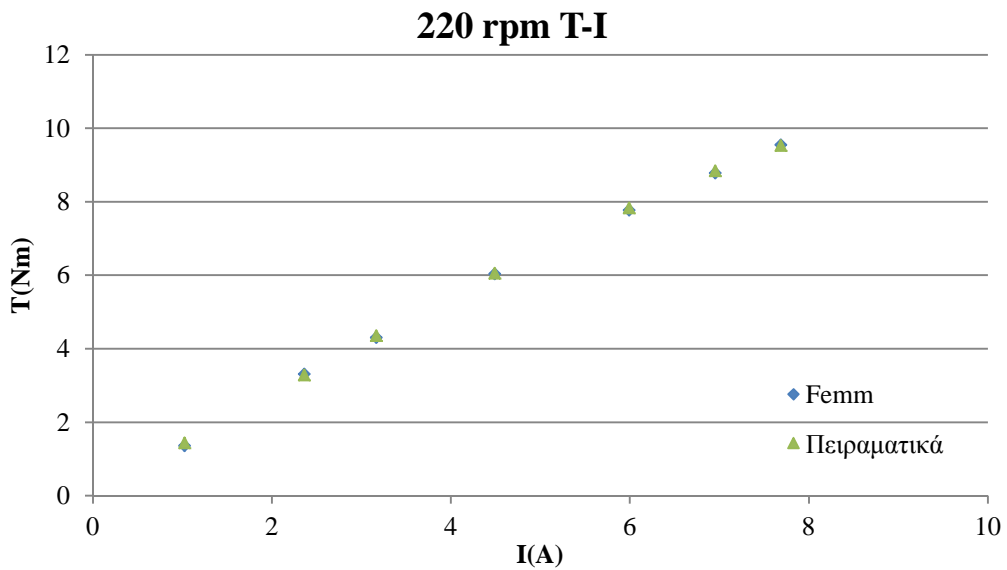


Σχήμα 4.5: Σύγκριση μεταξύ πειραματικών και προσομοιωτικών αποτελεσμάτων για την απόδοση για 100ΣΑΛ

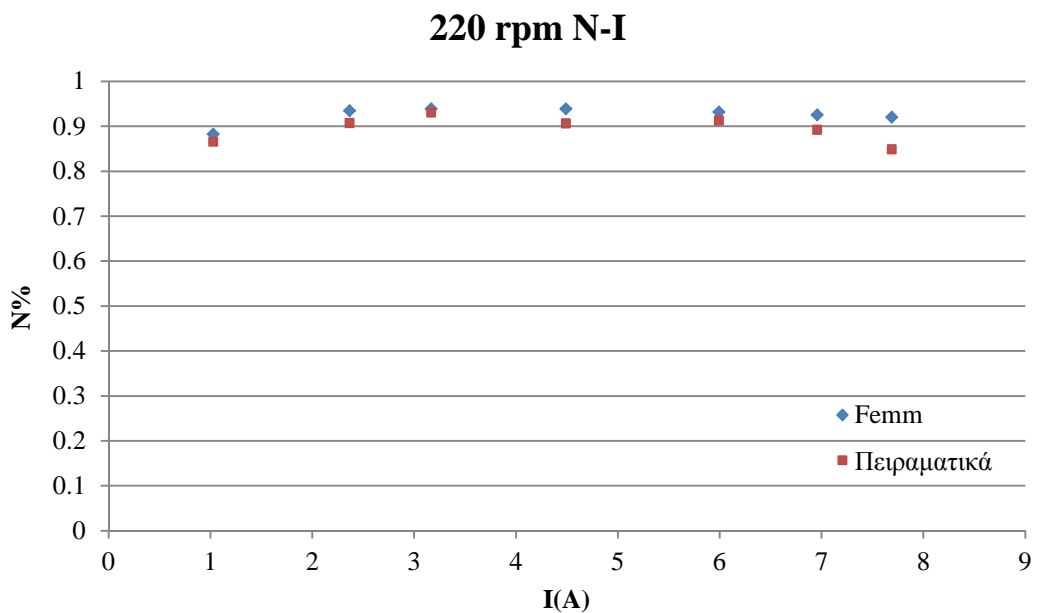
Στροφές: 220rpm

Ρεύμα Εξόδου(A)	Ροπή πειραματική (Nm)	Ροπή Femm(Nm)	Απόκλιση Ροπής %	Απόδοση Πειραματική	Απόδοση Femm	Απόκλιση Απόδοσης %
1.03	1.44	1.36	5.30	0.87	0.88	-1.95
2.36	3.29	3.32	-1.04	0.91	0.93	-3.09
3.17	4.36	4.31	1.18	0.93	0.94	-0.91
4.49	6.06	6.04	0.39	0.91	0.94	-3.55
5.99	7.83	7.77	0.75	0.91	0.93	-2.05
6.96	8.85	8.79	0.62	0.89	0.93	-3.72
7.69	9.54	9.55	-0.18	0.85	0.92	-8.46

Πίνακας 4.2: Συγκριτικά αποτελέσματα πειραματικών και προσομοιωτικών τιμών για ροπή διακένου και απόδοση της μηχανής για 220 ΣΑΛ



Σχήμα 4.6: Σύγκριση μεταξύ πειραματικών και προσομοιωτικών αποτελεσμάτων για τη ροπή διακένου για 220ΣΑΛ

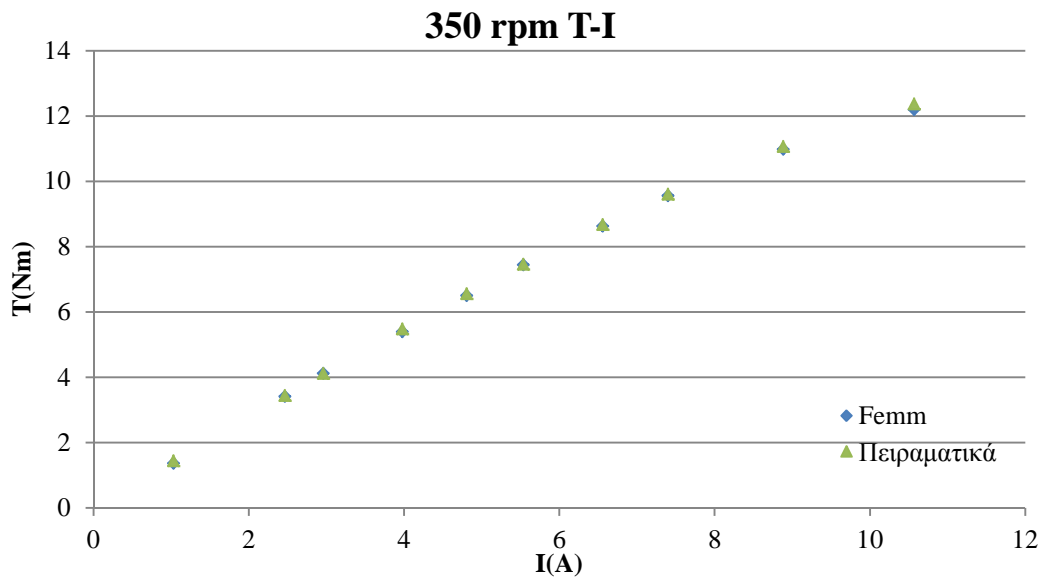


Σχήμα 4.7: Σύγκριση μεταξύ πειραματικών και προσομοιωτικών αποτελεσμάτων για την απόδοση για 220ΣΑΛ

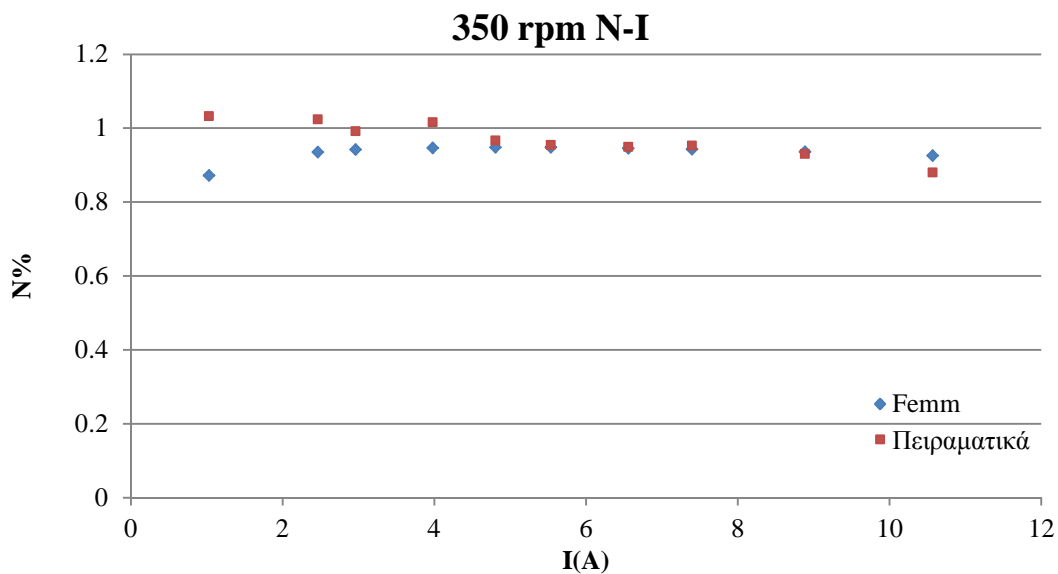
Στροφές: 350rpm

Ρεύμα Εξόδου(A)	Ροπή πειραματική (Nm)	Ροπή Femm(Nm)	Απόκλιση Ροπής %	Απόδοση Πειραματική	Απόδοση Femm	Απόκλιση Απόδοσης %
1.03	1.45	1.37	5.43	1.03	0.87	15.50
2.46	3.44	3.42	0.71	1.02	0.94	8.64
2.96	4.12	4.12	-0.02	0.99	0.94	5.01
3.98	5.49	5.40	1.66	1.02	0.95	6.83
4.81	6.56	6.50	0.86	0.97	0.95	1.95
5.53	7.46	7.45	0.25	0.95	0.95	0.63
6.56	8.68	8.62	0.60	0.95	0.95	0.35
7.40	9.61	9.56	0.49	0.95	0.94	1.03
8.88	11.07	10.98	0.77	0.93	0.94	-0.71
10.57	12.37	12.20	1.41	0.88	0.93	-5.21

Πίνακας 4.3: Συγκριτικά αποτελέσματα πειραματικών και προσομοιωτικών τιμών για ροπή διακένου και απόδοση της μηχανής για 350ΣΑΛ



Σχήμα 4.8: Σύγκριση μεταξύ πειραματικών και προσομοιωτικών αποτελεσμάτων για τη ροπή διακένου για 350ΣΑΛ

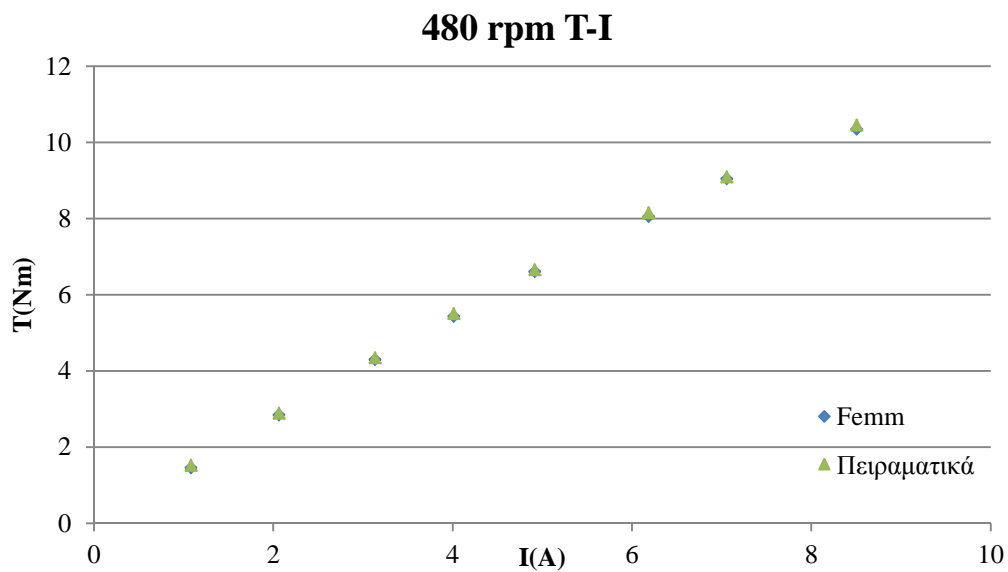


Σχήμα 4.9: Σύγκριση μεταξύ πειραματικών και προσομοιωτικών αποτελεσμάτων για την απόδοση για 350ΣΑΛ

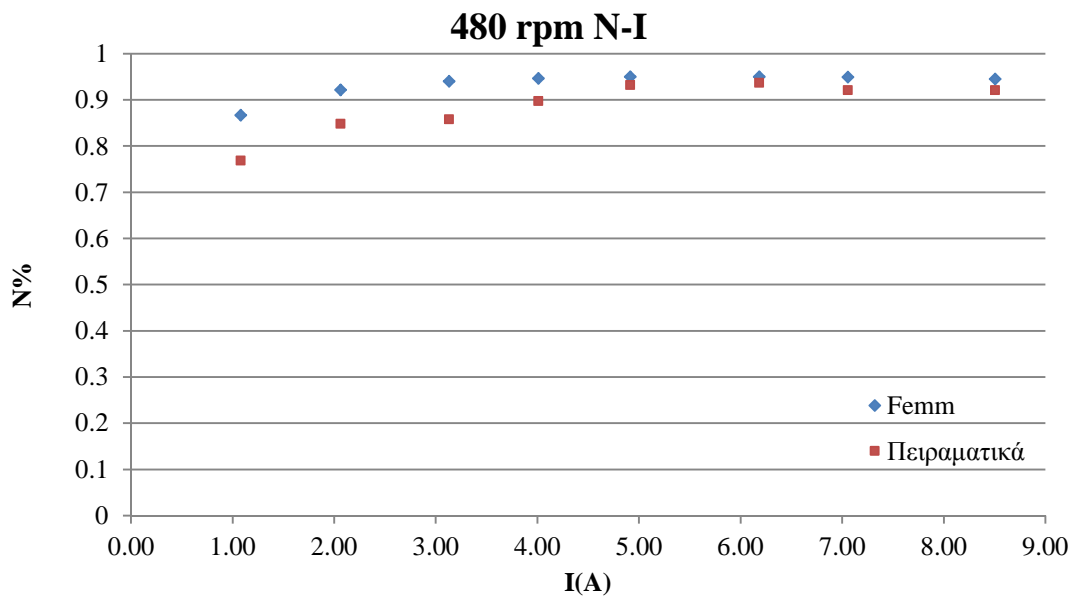
Στροφές: 480rpm

Ρεύμα Εξόδου(A)	Ροπή πειραματική (Nm)	Ροπή Femm(Nm)	Απόκλιση Ροπής %	Απόδοση Πειραματική	Απόδοση Femm	Απόκλιση Απόδοσης %
1.08	1.52	1.46	4.10	0.77	0.87	-12.83
2.06	2.89	2.84	1.73	0.85	0.92	-8.72
3.13	4.35	4.30	1.23	0.86	0.94	-9.67
4.01	5.51	5.43	1.51	0.90	0.95	-5.54
4.91	6.66	6.61	0.72	0.93	0.95	-1.97
6.18	8.16	8.06	1.26	0.94	0.95	-1.48
7.05	9.10	9.05	0.54	0.92	0.95	-3.08
8.50	10.46	10.35	1.09	0.92	0.95	-2.65

Πίνακας 4.4: Συγκριτικά αποτελέσματα πειραματικών και προσομοιωτικών τιμών για ροπή διακένου και απόδοση της μηχανής για 480ΣΑΛ



Σχήμα 4.10: Σύγκριση μεταξύ πειραματικών και προσομοιωτικών αποτελεσμάτων για τη ροπή διακένου για 480ΣΑΛ

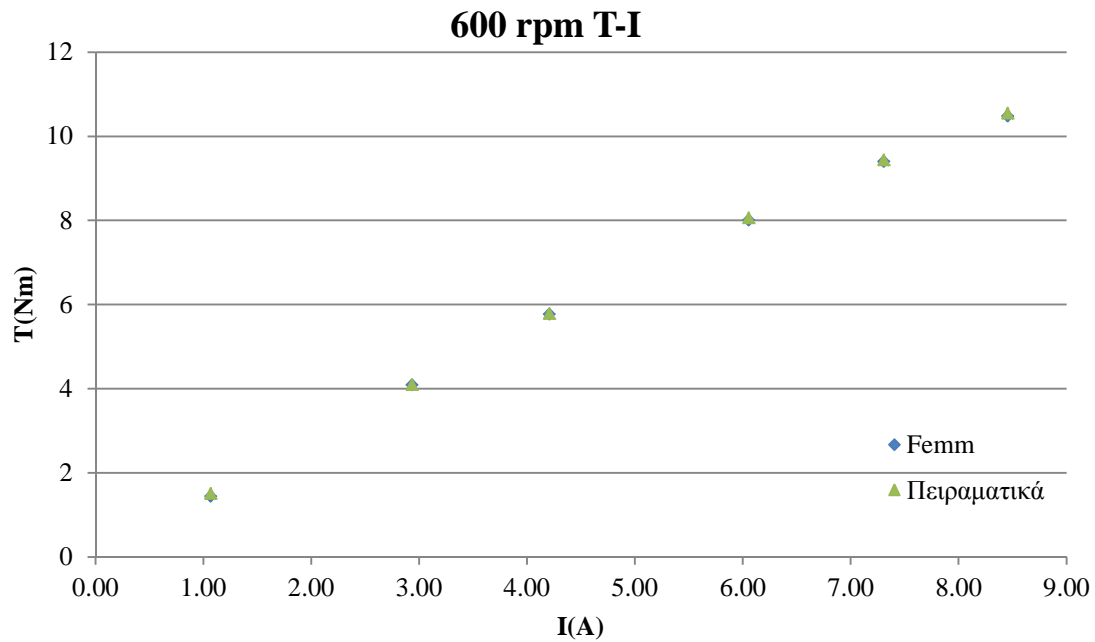


Σχήμα 4.11: Σύγκριση μεταξύ πειραματικών και προσομοιωτικών αποτελεσμάτων για την απόδοση για 480ΣΑΛ

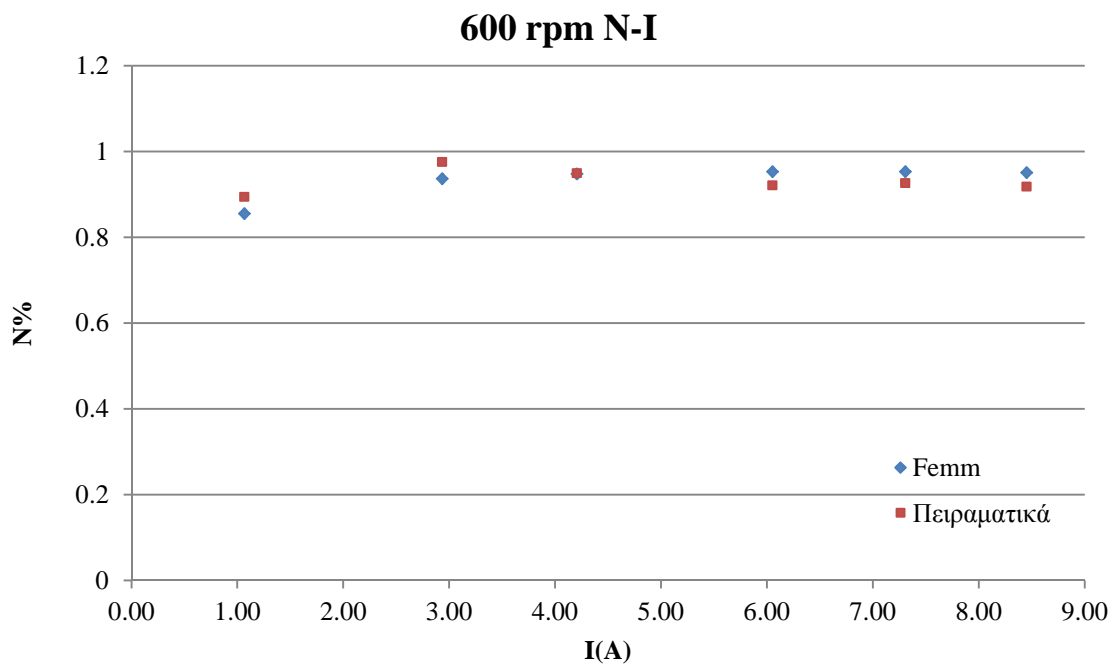
Στροφές: 600rpm

Ρεύμα Εξόδου(A)	Ροπή πειραματική (Nm)	Ροπή Femm(Nm)	Απόκλιση Ροπής %	Απόδοση Πειραματική	Απόδοση Femm	Απόκλιση Απόδοσης %
1.07	1.51	1.44	4.42	0.89	0.85	4.36
2.93	4.09	4.09	0.07	0.98	0.94	3.96
4.21	5.79	5.77	0.29	0.95	0.95	0.11
6.05	8.06	8.01	0.63	0.92	0.95	-3.50
7.31	9.44	9.40	0.40	0.93	0.95	-2.85
8.45	10.55	10.48	0.66	0.92	0.95	-3.60

Πίνακας 4.5: Συγκριτικά αποτελέσματα πειραματικών και προσομοιωτικών τιμών για ροπή διακένου και απόδοση της μηχανής για 600ΣΑΛ



Σχήμα 4.12: Σύγκριση μεταξύ πειραματικών και προσομοιωτικών αποτελεσμάτων για τη ροπή διακένου για 600ΣΑΛ



Σχήμα 4.13: Σύγκριση μεταξύ πειραματικών και προσομοιωτικών αποτελεσμάτων για την απόδοση για 600ΣΑΛ

Από τα παραπάνω, παρατηρούμε πολύ καλή σύγκλιση όσον αφορά τις τιμές ροπής διακένου. Συγκεκριμένα, για ροπές σχετικά μεγάλες, όπου το σφάλμα μέτρησης δεν αλλοιώνει τις μετρήσεις πλέον, δηλαδή πάνω από 5Nm, η μέγιστη απόκλιση που παρατηρείται μεταξύ προσομοιωτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων είναι 1.41%. Με βάση αυτό θεωρούμε ότι έχουμε ικανοποιητικά καλή σύγκλιση για τις τιμές ροπής διακένου.

Για το κομμάτι της απόδοσης, τα αποτελέσματα δεν είναι στον ίδιο βαθμό ικανοποιητικά. Επικεντρώνουμε την προσοχή πάλι σε τιμές ροπής άνω των 5Nm, καθώς η ακρίβεια στη μέτρηση επηρεάζει και την απόδοση. Για στροφές 480 και 600 ανά λεπτό, η μέγιστη απόκλιση που εμφανίζεται είναι 3.08% και 3.6% αντίστοιχα, με γενικότερη σύγκλιση, αρκετά ικανοποιητική. Για στροφές 350 ανά λεπτό η μέγιστη απόκλιση ανεβαίνει στο -5.21%, εξακολουθώντας όμως να έχει καλή σύγκλιση. Για τις 220 στροφές, ενώ διατηρείται μικρή απόκλιση για όλο το εύρος των τιμών ροπής, ακόμα και στις χαμηλές, για τη μέγιστη τιμή ροπής, το προσομοιωτικό μοντέλο υπερεκτιμά κατά 8.46% την απόδοση. Τέλος, για 100 rpm η σύγκλιση είναι πολύ κακή αγγίζοντας απόκλιση της τάξης του 20%, αλλά οι τιμές των μετρήσεων δείχνουν ότι το πρόβλημα υπάρχει στην διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων, αφού ο βαθμός απόδοσης φλερτάρει με τιμές μονάδας και πέραν αυτού δεν ακολουθεί ομαλή κατανομή, αφού εναλλάσσεται από 0.99 σε 0.76 και μετά σε 1.

Αναδεικνύεται εδώ, λοιπόν, αυτό που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο ανάλυσης της πειραματικής διάταξης, για την ανάγκη καλής διάταξης με μικρή αβεβαιότητα των μετρήσεων. Παρόλα αυτά, εμείς θα επικεντρωθούμε στις τιμές με ικανοποιητική ακρίβεια, όπου όπως φαίνεται η σύγκλιση είναι ικανοποιητική.

Οι διαφορές, αφού η παραπάνω ανάλυση έδειξε ότι η προσέγγιση της ροπής είναι εξαιρετικά καλή, οφείλονται κυρίως στις απώλειες του συστήματος. Αυτό, μερικώς, εξηγείται στο ότι το Femm δεν έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει μηχανικές απώλειες, οι οποίες εξ αυτού δεν συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο μας. Επίσης, όπως αναφέρθηκε αγνοήθηκαν οι απώλειες των μαγνητών. Αλλά ακόμα και στο κομμάτι των απωλειών που υπολογίστηκαν, έγιναν ορισμένες απλοποιήσεις. Καταρχάς, για τις απώλειες χαλκού, η αντίσταση των τυλιγμάτων δεν παραμένει σταθερή, αλλά κατά τη λειτουργία της μηχανής, η θερμοκρασία αυξάνεται, οπότε αντίστοιχα αυξάνεται και η αντίσταση. Η θερμοκρασία που θεωρήσαμε ότι φτάνει η μηχανή στα τυλίγματά της είναι αναγκαστικά προσεγγιστική, οπότε υπάρχει πιθανότητα υποεκτίμησης των απωλειών. Ταυτόχρονα, για τις απώλειες πυρήνα αναφέρθηκαν και στην αντίστοιχη παράγραφο η δυσκολία που υπάρχει στον υπολογισμό τους, αναδεικνύοντας έτσι την αβεβαιότητα που υπάρχει στη τιμή των ειδικών απωλειών σιδήρου συναρτήσει της έντασης μαγνητικής ροής. Τέλος, υπάρχουν και οι λεγόμενες διαφεύγουσες απώλειες που δεν μπορούμε να υπολογίσουμε.

Πέραν των παραπάνω, δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι ένα προσομοιωτικό μοντέλο αποτελεί μια προσέγγιση της πραγματικότητας και ανάλογα με το επίπεδο εργασίας είναι απαιτούμενη και η αντίστοιχη προσέγγιση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, για την συγκεκριμένη εργασία, θεωρούμε την παρούσα σύγκλιση αρκετά ικανοποιητική.

Κεφάλαιο 5^ο: Βελτιστοποίηση

5.1. Εισαγωγή:

Αφού προηγήθηκε η ανάπτυξη ενός προσομοιωτικού μοντέλου, που περιγράφει ικανοποιητικά την λειτουργία της δοθείσας μηχανής, με το πλεονέκτημα του παραμετροποιημένου σχεδιασμού, σκοπός της διπλωματικής είναι η κατασκευή μιας βελτιστοποιημένης γεωμετρίας. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η παρουσίαση των θεμελιωδών αρχών βελτιστοποίησης, η παρουσίαση των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται με έμφαση στους δύο που χρησιμοποιήσαμε εμείς. Τέλος, γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων από τους αλγορίθμους.

5.2 Θεμελιώδεις αρχές βελτιστοποίησης:

Η βελτιστοποίηση ως έννοια, αποτελεί την εύρεση εναλλακτικών λύσεων του ίδιου προβλήματος που αποδίδουν καλύτερα από τις υπόλοιπες. Συγκεκριμένα, η επίλυση ενός προβλήματος βασίζεται σε ένα πλήθος εναλλακτικών επιλογών – αποφάσεων (decisions), καθεμία από τις οποίες δίνει διαφορετικά αποτελέσματα – αποτιμήσεις (evaluation). Ορίζοντας ως (x_1, x_2, \dots, x_n) μια ομάδα εναλλακτικών αποφάσεων, που ικανοποιούν τους περιορισμούς του συστήματος, αυτή μπορεί να αποτελέσει τη βέλτιστη απόφαση αν μεγιστοποιεί την επίδοση του προβλήματος. Για το χαρακτηρισμό του βέλτιστου συστήματος χρησιμοποιείται ο ορισμός του Pierre (1984) σύμφωνα με τον οποίο: Ένα σύστημα είναι βέλτιστο προς ένα δεδομένο μέτρο επίδοσης και ένα δεδομένο σύνολο περιορισμών, εφόσον λειτουργεί/ αποδίδει τουλάχιστον ίσα, αν όχι καλύτερα από κάθε άλλο σύστημα που ικανοποιεί τους ίδιους περιορισμούς.

Να σημειωθεί εδώ, ότι η διαδικασία της βελτιστοποίησης βασίζεται σε ορισμένες έννοιες, οι οποίες πρέπει να οριστούν. Ως σύστημα ορίζεται ένα σύνολο ανεξάρτητων μεταξύ τους στοιχείων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Το σύστημα χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο που καθορίζει αν το εκάστοτε σημείο ανήκει στο σύστημα ή στο περιβάλλον, από αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον με τη μορφή εισόδων και εξόδων και τέλος, από σχέσεις μεταξύ των στοιχείων του και των εισόδων εξόδων.

Με την έννοια της εισόδου (input) του συστήματος εννοούμε κάθε δράση η οποία προέρχεται από το εξωτερικό περιβάλλον, επιφέροντας μεταβολές στο σύστημα, ενώ ως έξοδοι (output) ορίζονται οι αντιδράσεις που παράγονται από το σύστημα και είναι τα αποτελέσματά του προς το περιβάλλον. Πέραν αυτών των στοιχείων αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον, υπάρχουν και οι λεγόμενες μεταβλητές κατάστασης που αποτελούν εσωτερικές ιδιότητες του συστήματος και περιγράφουν το τρέχον καθεστώς του συστήματος, ανάλογα με τις αντίστοιχες εισόδους.

Η βελτιστοποίηση ανάγεται σε μία διαδικασία εύρεσης της ακρότατης τιμής της επίδοσης του συστήματος, ανάλογα με τις εκάστοτε εισόδους. Οπότε, η επίλυση βασίζεται στην εύρεση των ακροτάτων. Έστω μια πραγματική συνάρτηση $f(x)$ ορισμένη στο $D \subseteq \mathbb{R}^n$, παρουσιάζει τοπικό ελάχιστο στ σημείο $x^* \in D$ όταν υπάρχει περιοχή $D_0 \subset D$ του x^* , τέτοια ώστε για κάθε $x \in D_0$ να ισχύει:

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

Αντίστοιχα ορίζεται και το τοπικό μέγιστο. Τα τοπικά μέγιστα ή ελάχιστα αποτελούν τα τοπικά ακρότατα, ενώ όταν το σύνολο D_0 ταυτίζεται με το D , τότε χαρακτηρίζονται ως απόλυτα ή ολικά ακρότατα. Κοινώς, το ολικό ακρότατο είναι το μέγιστο ή ελάχιστο από όλα τα υπόλοιπα τοπικά μέγιστα ή ελάχιστα αντίστοιχα. [18][13]

5.2.1. Βελτιστοποίηση πραγματικών συναρτήσεων:

Έστω $P = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ το βαθμωτό μέτρο της επίδοσης ενός συστήματος, όπου $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ μία πραγματική συνάρτηση ορισμένη στο πεδίο $D \subseteq R^n$ και $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ το διάνυσμα στήλη των ανεξάρτητων μεταβλητών. Το μέτρο f καλείται συνάρτηση στόχου (objective function) ή αλλιώς συνάρτηση κόστους (cost function), ενώ οι συνιστώσες του x καλούνται μεταβλητές απόφασης ή παράμετροι του συστήματος.

Το πεδίο στο οποίο ορίζεται η συνάρτηση, δηλαδή το πεδίο D , είναι η εφικτή περιοχή ή χώρος αναζήτησης (feasible/ search space) και περιλαμβάνει το χώρο από τον οποίο το διάνυσμα x μπορεί να λαμβάνει τιμές. Τα αποτελέσματα της συνάρτησης, δηλαδή το πεδίο τιμών της, προβάλλονται στο χώρο αποτίμησης ή αντικειμενικό χώρο (evaluation space) F . Θεωρώντας ότι το μέτρο επίδοσης είναι βαθμωτό, σε κάθε διάνυσμα x αντιστοιχεί μία πραγματική τιμή της P , που αντιπροσωπεύει την τιμή ενός κριτηρίου του συστήματος για τις τρέχουσες τιμές μεταβλητών εισόδου. Οπότε, το πρόβλημα της βελτιστοποίησης ανάγεται στην εύρεση τιμών κριτηρίων τέτοιων ώστε:

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

Το ζητούμενο της ελαχιστοποίησης, όπως προκύπτει στην παραπάνω σχέση, δεν είναι αναγκαστικό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η απαίτηση της μεγιστοποίησης. Σε κάθε περίπτωση, απλά χρειάζεται να είναι αντίστοιχα ορισμένα τα μεγέθη ανάλογα με το τι απαιτείται κάθε φορά. Επίσης, είναι πολύ εύκολη η μετατροπή ενός προβλήματος μεγιστοποίησης σε ελαχιστοποίηση και το ανάποδο με ορισμό συνάρτησης κόστους ως:

$$f(x) = -f(x) \text{ ή } f(x) = \frac{1}{f(x)}$$

[18][13]

5.2.2. Χώροι αναζήτησης και αποτίμησης:

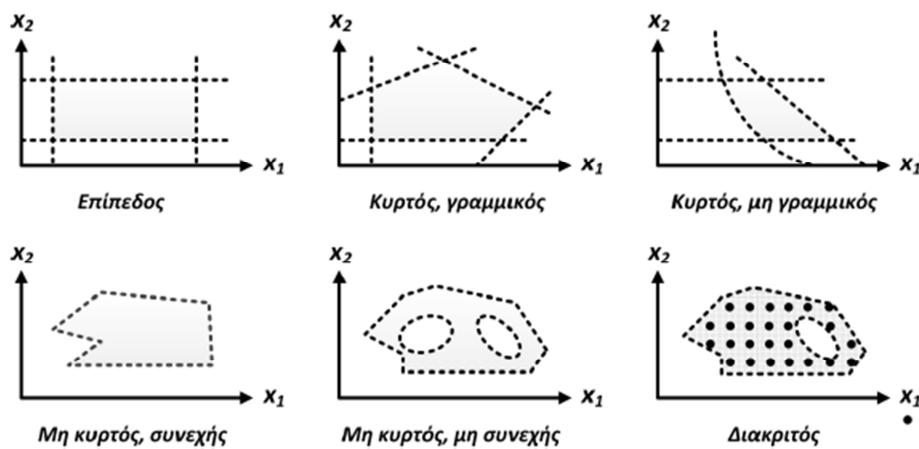
Γενικώς, σπάνια, όπως είναι λογικό, ένα πρόβλημα εμφανίζεται χωρίς περιορισμούς στην αναζήτηση των ανεξάρτητων μεταβλητών εισόδου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το πεδίο D να περιορίζεται μαθηματικώς από περιορισμούς των μεταβλητών μέσα σε συγκεκριμένα όρια, τα λεγόμενα όρια

διακύμανσης των παραμέτρων. Πέραν από την απλή χρήση ορίων, μπορεί οι περιορισμοί να δίνονται από πιο πολύπλοκες μαθηματικές σχέσεις που σχετίζονται κυρίως με τους στόχους και τις λειτουργικές απαιτήσεις του συστήματος και δεν έχουν φυσική αντιστοιχία στις δυνατές επιλογές. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν περιορισμοί, προφανώς το πεδίο ορισμού D , ταυτίζεται με τον R^n χώρο.

Το πρόβλημα που προκαλούν οι περιορισμοί είναι η πιθανότητα η βέλτιστη λύση να βρίσκεται εκτός του δυνατού πεδίου ορισμού. Αυτό σημαίνει, ότι μπορεί οι λύσεις του προβλήματος να βρίσκονται σε περιοχές του R^n οι οποίες δεν ικανοποιούν τους περιορισμούς και άρα αποκλείονται από το πεδίο D . Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στις υπολογιστικές διαδικασίες, αλλά και μεγαλύτερο πλήθος δοκιμών για την εύρεση του βέλτιστου.

Ανάλογα με τους χρησιμοποιούμενους περιορισμούς, μεταβάλλεται η γεωμετρία του πεδίου της αναζήτησης, δηλαδή του χώρου που αντικατροπτίζει το πεδίο ορισμού, οπότε επιβάλλεται η διαφορετική προσέγγιση για την αναζήτηση των λύσεων. Ανάλογα με τους περιορισμούς, εμφανίζονται οι εξής κατηγορίες πεδίων:

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



Σχήμα 5.1: Αποτύπωση μορφών διαφόρων χώρων αναζήτησης [13]

Γενικώς, η κυρτότητα υποδηλώνει ότι κάθε γραμμικός συνδυασμός μεταξύ των σημείων, εγγυάται τη γέννηση νέων σημείων εντός του χώρου αναζήτησης, οπότε την σίγουρη παραγωγή εφικτών λύσεων. Η κυρτότητα έχει μεγάλη σημασία και στο πεδίο τιμών – επιφάνεια απόκρισης. Όταν μία μη γραμμική συνάρτηση είναι κυρτή, η επιφάνεια απόκρισης περιλαμβάνει ένα και μόνο ακρότατο, που αντιστοιχεί και στην ολικώς βέλτιστη λύση. Αντίθετα, όταν δεν υπάρχει κυρτότητα, το αποτέλεσμα είναι μια πιο πολύπλοκη γεωμετρία με πολλαπλά ακρότατα, πέραν του ολικού. [13]

5.2.3 Η κλασική βελτιστοποίηση:

Για τη διατύπωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης πρέπει να οριστούν η συνάρτηση στόχου και οι περιορισμοί. Η συνάρτηση στόχου μπορεί να είναι αρκετά απλή, οπότε το πρόβλημα ανάγεται σε βελτιστοποίηση ενός κριτηρίου. Σε αυτήν την περίπτωση η συνάρτηση στόχου είναι ένα βαθμωτό μέγεθος και το πρόβλημα ανάγεται στην εύρεση των τιμών των μεταβλητών απόφασης, ώστε να ελαχιστοποιείται ή να μεγιστοποιείται η $f(x)$. Για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης ακολουθείται μια διαδικασία τυπικών βημάτων που έχει ως εξής:

- Σχηματοποίηση υπό μελέτη συστήματος
- Καθορισμός μεταβλητών απόφασης
- Καθορισμός συνάρτησης στόχου
- Μαθηματική έκφραση φυσικών διεργασιών – κατάρτιση περιορισμών
- Επίλυση με εφαρμογή τεχνικής βελτιστοποίησης
- Έλεγχος αποτελεσμάτων – ανάλυση ευαισθησίας

Για τον γραμμικό προγραμματισμό, όπως και για κάθε τεχνική μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης ο κύριος στόχος είναι να γίνει ο εντοπισμός μονοσήμαντης λύσης του προβλήματος. Το πρόβλημα των κλασικών μεθόδων είναι αυτό ακριβώς, καθώς σε πολύπλοκα συστήματα, η χρήση ενός μοναδικού κριτηρίου βελτιστοποίησης είναι μη ρεαλιστική και μπορεί να δώσει υπερβολικά μεροληπτικές λύσεις. Ακόμα και στην περίπτωση που με βάρη πολλά κριτήρια εισάγονται σε μία συνάρτηση κόστους, η προσέγγιση μπορεί να είναι και πάλι πολύ υποκειμενική.

Οδηγούμενοι με βάση τα παραπάνω, αλλά και ακολουθώντας πιο πιστά την νοοτροπία του μηχανικού που πρέπει να λαμβάνει υπόψη του ταυτόχρονα πολλαπλά κριτήρια για να καταλήξει σε ένα τελικό αποτέλεσμα, καταλήγουμε στη χρήση πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. [13]

5.2.4 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση:

Θεωρήσαμε μέχρι στιγμής, ότι η επίδοση του συστήματος χαρακτηρίζεται από τη συνάρτηση στόχου, με βάση την τιμή της οποίας αξιολογούνται τα αποτελέσματα των εναλλακτικών λύσεων. Σε περίπτωση που εξετάζονται πολλά κριτήρια ταυτόχρονα, όπως αναφέραμε παραπάνω, η αξιολόγηση δεν γίνεται στα επιμέρους κριτήρια αλλά στην άθροισή τους, έχοντας ως αποτέλεσμα μεγάλη αβεβαιότητα ως προς τις επιμέρους τιμές. Αυτές οι αβεβαιότητες εισάγουν μεγάλα ποσοστά υποκειμενικότητας, τα οποία γίνονται ακόμα πιο έντονα ειδικά σε περιπτώσεις όπου έχουμε να κάνουμε με αντικρουόμενα κριτήρια. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος γίνεται η ανάπτυξη της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης.

Αντίστοιχα με πριν, ορίζεται το διανυσματικό, πλέον, μέτρο επίδοσης – συνάρτηση κόστους, ως εξής:

$$P = (P_1, P_2, \dots, P_m)^T = f(x)$$

με την $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))^T$ συνάρτηση - διάνυσμα ορισμένη στο $D \subseteq R^n$ και $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, όπως ορίστηκε και πριν το διάνυσμα των ανεξάρτητων μεταβλητών. Οι συνιστώσες του P αποτελούν τα m κριτήρια της επίδοσης της βελτιστοποίησης, με καθεμία από τις f να έχει αντίκρισμα στο πεδίο τιμών $F \subseteq R^m$, που υποδηλώνει το σύνολο των εφικτών τιμών των επιμέρους συναρτήσεων. Όπως και στην μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση έτσι και εδώ θεωρούμε ως στόχο της βελτιστοποίησης, την ελαχιστοποίηση των συναρτήσεων f . Συνήθως τα κριτήρια της βελτιστοποίησης είναι αντικρουόμενα, οπότε δεν υπάρχει μονοσήμαντα βέλτιστα ορισμένη λύση. Για την βελτίστοποιήση, λοιπόν, γίνεται χρήση της έννοιας της κυριαρχίας Pareto.

Όπως είναι λογικό, όσο περισσότερα είναι τα κριτήρια βελτιστοποίησης, τόσο πιο συγκεκριμένη γίνεται η έννοια της σύγκρισης των επιμέρους λύσεων, αφού δεν είναι δυνατή η απόλυτη διάταξη των διανυσμάτων επίδοσης. Για την σύγκριση, λοιπόν, των επιμέρους λύσεων ορίζονται οι εξής σχέσεις κυριαρχίας μεταξύ των εφικτών λύσεων:

Έστω a και b δύο διαφορετικές εφικτές λύσεις.

- Αν ισχύει: $f(a) < f(b)$ τότε το a κυριαρχεί ισχυρώς στο b
- Αν ισχύει: $f(a) \leq f(b)$ τότε το a κυριαρχεί ασθενώς στο b
- Αν ισχύει: $f(a) \approx f(b)$ τότε το a είναι αδιάφορο ως προς το b

Με βάση αυτή την έννοια της κυριαρχίας, την βέλτιστη λύση τη διακρίνουμε στα πολυκριτηριακά προβλήματα σύμφωνα με τον εξής ορισμό:

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

Διαφορετικά:

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

Πρέπει να σημειωθεί ότι η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση δεν οδηγεί σε μοναδική λύση. Οι λύσεις που προκύπτουν από την βελτιστοποίηση γίνονται κατανοητές από τον δεύτερο ορισμό που δόθηκε παραπάνω. Δηλαδή, οι λύσεις αυτές είναι τα βέλτιστα κατά Pareto, ή μη κατώτερα/κυριαρχούμενα, τα οποία

είναι πολλαπλές τιμές εφικτών σημείων $x^* \in D$ το σύνολο των οποίων συμβολίζεται ως X^* και καλείται ως σύνολο Pareto. Η προβολή των $f(x^*)$ στο m-διάστατο πεδίο αποτίμησης, αντικατροπτίζει το μέτωπο Pareto.

Παρόλα αυτά, τίθεται το πρόβλημα επιλογής της μίας, προτιμητέας λύσης από το μέτωπο Pareto. Για να γίνει η επιλογή, λαμβάνονται υπόψη υποκειμενικά κριτήρια από τον σχεδιαστή, πράγμα που δίνει και τελικά έναν υποκειμενικό χαρακτήρα και στην όλη βελτιστοποίηση, ανεξάρτητα του αντικειμενικού τρόπου εύρεσης των επιμέρους βέλτιστων. Για τον προσδιορισμό της καλύτερης συμβιβαστικής λύσης, έχουν χρησιμοποιηθεί διάφοροι μέθοδοι. Παλιότερα, με την κλασική προσέγγιση, γινόταν μία έμμεση επιλογή πριν την αναζήτηση, ενσωματώνοντας τα επιμέρους κριτήρια σε μία ενιαία αριθμητική έκφραση. Οπότε, η συμβιβαστική λύση ταυτίζεται ικανοποιεί καλύτερα αυτήν την αριθμητική έκφραση. Η σύγχρονη προσέγγιση, βασίζεται στην μετεπεξεργασία του συνόλου Pareto, το οποίο έχοντας προκύψει από κατάλληλους αλγορίθμους δίνει όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικές λύσεις. Μελλοντικά ο στόχος είναι να υπάρχει διαδραστική επικοινωνία χρήστη – υπολογιστικής διαδικασίας, ώστε στο ενδιάμεσο να προστίθενται ή να αφαιρούνται κριτήρια και να αξιολογούνται τα παρόντα αποτελέσματα.

Για την επίλυση της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται διάφοροι αλγόριθμοι, με τους κυριότερους να είναι:

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

[18][13]

5.3. Εξελικτικοί Αλγόριθμοι:

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι, χρησιμοποιούν ως πρότυπο τις εξελικτικές διαδικασίες, βρίσκοντας το βέλτιστο σετ λύσεων προσομοιώνοντάς το με έναν πληθυσμό, στον οποίο εμφανίζονται οι διαδικασίες της φυσικής διαλογής, της αναπαραγωγής/ανασυνδυασμού και της μετάλλαξης. Ο πληθυσμός στην περίπτωση του εξελικτικού αλγορίθμου είναι ένα σύνολο εφικτών μεταβλητών απόφασης. Πάνω σε αυτόν τον

πληθυσμό η μετάλλαξη σημαίνει την μετατροπή των χαρακτηριστικών του – μεταβλητών απόφασής του, ενώ η έννοια της διασταύρωσης εκφράζεται ως δημιουργία πληθυσμού με συνδυασμό χαρακτηριστικών – μεταβλητών απόφασης δύο άλλων μελών του.

Για την επιλογή των μελών για τον ανασυνδυασμό, καθορίζονται οι ευκαιρίες αναπαραγωγής κάθε μέλους με βάση ένα τελεστή που καθορίζει την ικανότητα επιβίωσης. Η ικανότητα αυτή αντικατοπτρίζει την συνάρτηση στόχου για κάθε μέλος. Με βάση αυτόν τον τελεστή αντιγράφονται τα μέλη σε μία «δεξαμενή ζευγαρώματος» (mating pool) ανάλογο αριθμό φορών με την ικανότητα επιβίωσης του. Κατόπιν, από αυτή τη δεξαμενή επιλέγονται τα εκάστοτε μέλη. Για την επιλογή τους χρησιμοποιούνται διάφοροι τρόποι:

- Τροχός ρουλέτας: Θεωρούμε εικονικό τροχό με πλήθος εγχοπών όσο και το μέγεθος του πληθυσμού, ενώ το πλάτος της εγχοπής είναι ανάλογο της ικανότητας επιβίωσης των στοιχείων.
- Διαγωνισμού: Επιλέγονται τυχαία μέλη του πληθυσμού, με το ισχυρότερο από αυτό να αντιγράφεται σε βοηθητικό σύνολο. Επαναλαμβάνοντας αυτή τη διαδικασία όσες φορές απαιτείται καταλήγουμε στο τελικό πληθυσμό.
- Εκλεκτικισμού: Σε αυτή την περίπτωση η τρέχουσα βέλτιστη λύση στον πληθυσμό αντιγράφεται πάντα στη δεξαμενή ζευγαρώματος, ώστε σε καμία περίπτωση, λόγω του στοχαστικού χαρακτήρα της διαδικασίας, να μην μπορεί να χαθεί.
- Βαθμολόγησης: Σε αυτή τη μέθοδο, θέλοντας να αποφευχθεί η πρόωμη σύγκλιση, μειώνεται η πίεση της επιλογής όταν η διασπορά της συνάρτησης κόστους είναι πολύ μεγάλη, ενώ όταν είναι μικρή αυξάνεται.
- Σταθερής κατάστασης: Σε αυτή την περίπτωση, μόνο λίγα, τα πιο αδύναμα μέλη του πληθυσμού αντικαθίστανται σε κάθε επανάληψη, με τα “παιδιά” των πιο ισχυρών μελών του πληθυσμού.

Για την παραγωγή των νέων μελών, αφού έχουν επιλεγεί τα μέλη που θα ανασυνδυαστούν, γίνεται η λεγόμενη διασταύρωση, ώστε να δημιουργηθούν τελικά νέα ισχυρότερα μέλη. Το ποσοστό των μελών που ανασυνδυάζονται καθορίζεται από την μέθοδο σε τιμές από 0.6 ως και 0.9, κατά αντιστοιχία με την φυσική διαδικασία. Για την διαδικασία της διασταύρωσης ακολουθούνται διάφορες μέθοδοι:

- Διασταύρωση ενός σημείου: Τα γενετικά χαρακτηριστικά των δύο γονιών ανταλλάσσονται από ένα σημείο και μετά και μεταφέρονται στα νέα μέλη.
- Διασταύρωση δύο σημείων: Αντίστοιχα με την διασταύρωση ενός σημείου, απλά η ανταλλαγή γίνεται ανάμεσα σε δύο σημεία.
- Διασταύρωση κοπής και επανασύνδεσης: Όμοια με τις παραπάνω μεθόδους, γίνεται η ανταλλαγή του γενετικού υλικού των δύο γονιών, αλλά το σημείο από το οποίο γίνεται η ανταλλαγή ορίζεται τυχαία ανάμεσα στους γονείς. Αυτό έχει ως συνέπεια, βέβαια, οι απόγονοι να έχουν διαφορετικό μέγεθος γενετικών χαρακτηριστικών.
- Ομοιόμορφης διασταύρωσης: Το γενετικό υλικό ανταλλάσσεται τυχαία μεταξύ των δύο γονιών, αλλά είναι καθορισμένο συγκεκριμένο ποσοστό από κάθε γονιό να περάσει στα παιδιά τους.

- Αριθμητική διασταύρωση: Στην περίπτωση αυτή, το γενετικό υλικό των δύο γονιών περνά από μία αριθμητική σχέση, ώστε να δώσει τα τελικά γενετικά χαρακτηριστικά των απογόνων.

Στον υπόλοιπο πληθυσμό, εφαρμόζεται ένας τελεστής μετάλλαξης, που τροποποιεί κατά ένα μικρό ποσοστό τα χαρακτηριστικά της νέας γενιάς. Η συχνότητα της μετάλλαξης γενικά διατηρείται σε μικρά ποσοστά, μεταξύ του 0.1 και 1%. Ο κύριος λόγος για τον οποίο ενσωματώνεται στον κώδικα η περίπτωση των μεταλλάξεων είναι η διασφάλιση ότι δεν θα κολλήσει ο αλγόριθμος σε τοπικά ακρότατα. Παρόλα αυτά, μεγάλη τιμή στον τελεστή μετάλλαξης, επιβραδύνει δραματικά τη σύγκλιση. Όμοια, για την μετάλλαξη υπάρχουν επίσης διάφοροι αλγόριθμοι, με κυριότερους:

- Ομοιόμορφη μετάλλαξη: Αντικατάσταση χαρακτηριστικού με μία τιμή μεταξύ των ορίων του.
- Οριακή μετάλλαξη: Αντικατάσταση γενετικού χαρακτηριστικού με μία από τις τιμές των ορίων του.
- Ανομοιόμορφη μετάλλαξη: Η πιθανότητα της μη εμφάνισης μετάλλαξης αυξάνεται όσο προχωρούν οι επαναλήψεις, χρησιμοποιώντας έναν μη ομοιόμορφο συντελεστή μετάλλαξης.

Κάπου εδώ να σημειωθεί, ότι γενικώς πολύ εναλλακτικοί αλγόριθμοι υπάρχουν για καθεμία από αυτές τις διαδικασίες, ανάλογα και με την κάθε συγκεκριμένη περίπτωση. Εδώ ενδεικτικά αναφέρονται οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες. Οι εξελεκτικοί αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται είναι επίσης ποικίλοι. Στην περίπτωσή μας, θα γίνει χρήση δύο εξελεκτικών αλγορίθμων: SPEA – II και PESA – II. [18][13][19]

5.3.1.Αλγόριθμος SPEA II:

Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στην εξέλιξη ενός άλλου μοντέλου εξελεκτικού αλγορίθμου, του SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm). Η λογική πίσω από τον αλγόριθμο είναι η χρήση ενός εξωτερικού συνόλου, P_0 , το οποίο περιέχει μόνο μη κατώτερες λύσεις του πληθυσμού, ιδανικά κυρίαρχες κατά Pareto, με μέγεθος καθοριζόμενο εξωτερικά από τον χρήστη. Με αυτόν τον τρόπο, καταλήγει ο αλγόριθμος σε συγκεκριμένο αριθμό δυνατών εναλλακτικών λύσεων. Ως αλγόριθμος ανήκει στην κατηγορία των εκλεκτικών.

Ο αλγόριθμος SPEA II είναι η εξέλιξη αυτού του αλγορίθμου, στο οποίο λαμβάνονται υπόψη και βελτιώνονται ορισμένα από τα μειονεκτήματα της. Συγκεκριμένα, έχει τα ακόλουθα επιπλέον χαρακτηριστικά:

- Περιλαμβάνει καινοτόμο σχήμα αποτίμησης καταλληλότητας, λαμβάνοντας υπόψη για κάθε μέλος του πληθυσμού, το πλήθος των μελών στα οποία κυριαρχεί και από τα οποία κυριαρχείται.
- Αποδοτικότερη διαδικασία αναζήτησης, αφού εκτιμά την πυκνότητα του πληθυσμού.
- Περικόπτει το εξωτερικό σύνολο, με τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η διατήρηση των οριακών λύσεων.

Πριν δοθεί η δομή του αλγορίθμου, θα πρέπει να αναφερθούν κάποιες βασικές διαδικασίες που απαιτούνται για την υλοποίηση της βελτιστοποίησης. Όπως αναφέρθηκε, γίνεται ο υπολογισμός της καταλληλότητας κάθε μέλους του πληθυσμού. Για την καταλληλότητα, πρέπει να υπολογιστεί η ισχύς s του στοιχείου, η οποία πρακτικά αντικατοπτρίζει το επί πόσων ατόμων κυριαρχεί. Κατόπιν, υπολογίζεται η αρχική καταλληλότητα R (Raw Fitness) του στοιχείου ως το άθροισμα των ισχύων s , όλων των στοιχείων που κυριαρχούν επί αυτού. Προφανώς, όσο πιο μικρή είναι η τιμή του R , τόσο λιγότερα άτομα κυριαρχούν σε αυτό, με τιμή μηδέν να αντιστοιχεί μόνο στα μη κυριαρχούμενα.

Για μέλη με ίδια αρχική καταλληλότητα, εισάγεται το μέτρο πυκνότητας. Πρακτικά, είναι μία εκτίμηση του πόσο κοντά σε αυτό το μέλος είναι το αμέσως επόμενο. Προτείνεται ως αντιπροσωπευτική τιμή πυκνότητας k , η τετραγωνική ρίζα του μεγέθους του πληθυσμού, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ικανοποιητικά αποτελέσματα και η τιμή της μονάδας. Εντέλει, το μέτρο πυκνότητας (Density) υπολογίζεται ως:

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

όπου το σ_i^k συμβολίζει την απόσταση του k -οστού στοιχείου από το μέλος i . Για την ολική καταλληλότητα F (Fitness) του κάθε στοιχείου, υπολογίζεται το άθροισμα της πυκνότητας και της αρχικής καταλληλότητας.

Παρακάτω, λοιπόν, με βάση τα παραπάνω, δίνεται με τη μορφή ψευδοκώδικα η δομή του αλγορίθμου:

Είσοδοι: Μέγεθος Πληθυσμού, Μέγεθος Φακέλου, Μέγεθος Προβλήματος, Παράγοντας διασταύρωσης, Παράγοντας Μετάλλαξης

Έξοδος: Φάκελος

Πληθυσμός < Αρχικοποίηση πληθυσμού: Μέγεθος πληθυσμού, Μέγεθος προβλήματος

Φάκελος < Δημιουργία κενού φακέλου

Ενώ: (Συνθήκη Τερματισμού)

Για κάθε στοιχείο του πληθυσμού: Υπολογισμός συνάρτησης κόστους

Ένωση: Στοιχείων Πληθυσμού και Στοιχείων Φακέλου

Για κάθε στοιχείο της ένωσης:

Υπολογισμός Αρχικής Καταλληλότητας

Υπολογισμός Πυκνότητας

Υπολογισμός Τελικής Καταλληλότητας

Φάκελος: Θέσε στο φάκελο κάθε μη κυριαρχούμενο στοιχείο της ένωσης

Εάν: το μέγεθος του Φακέλου είναι μικρότερο από το Μέγεθος Φακέλου

Φάκελος < Γέμισέ τον με τα εναπομείνοντα καλύτερα της ένωσης

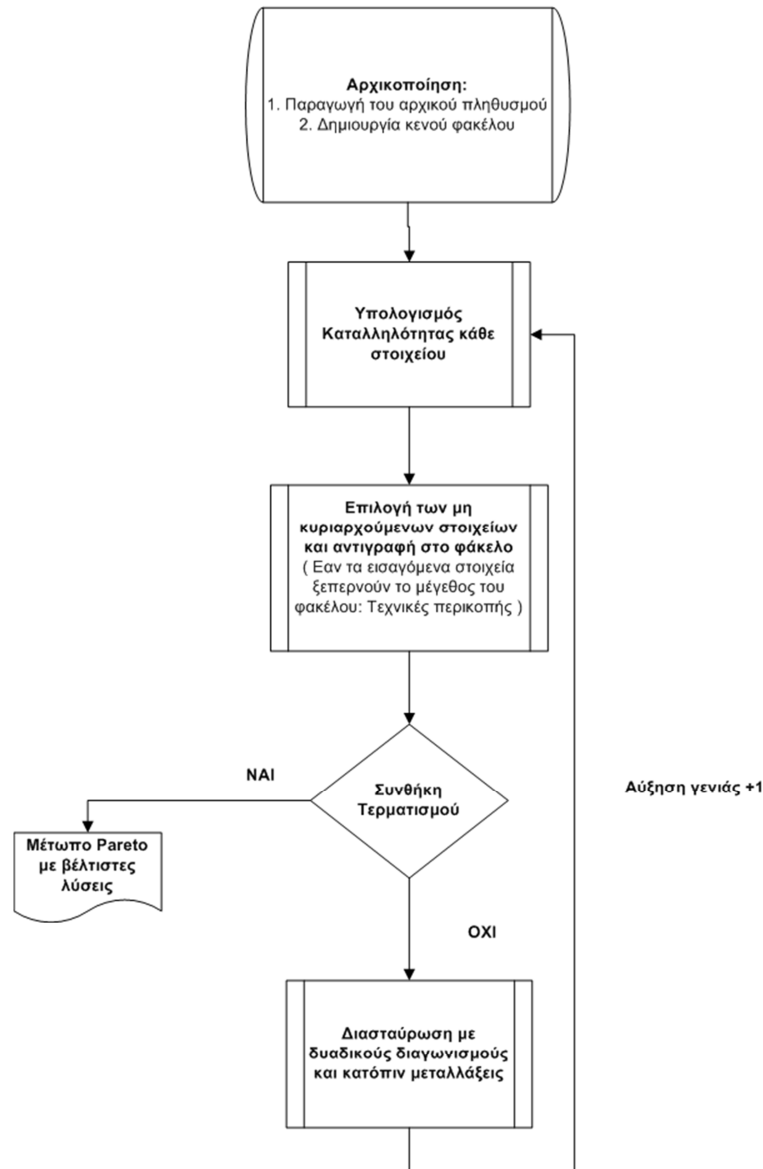
Αλλιώς εαν: το μέγεθος του Φακέλου είναι μεγαλύτερο από το Μέγεθος Φακέλου

Φάκελος < Αφαίρεσε τα πιο κοντινά στοιχεία

Πληθυσμός Ανανέωσης < Επέλεξε Μέλη του Πληθυσμού

Πληθυσμός < Παιδιά από Διασταύρωση, Παιδιά από Μετάλλαξη, Μεταφορά Μελών

Δώσε: τα μη κυριαρχούμενα μέλη του Φακέλου



Σχήμα 5.2: Δομικό διάγραμμα αλγορίθμου SPEA II

Όπως φαίνεται, λοιπόν, σε κάθε φάκελο εξασφαλίζεται να μεταφέρονται πρωτίστως οι μη κυριαρχούμενες λύσεις. Αν το πλήθος των λύσεων αυτών δεν καλύπτει το μέγεθος του φακέλου, αντιγράφονται σε αυτόν οι αμέσως επόμενες καλύτερες λύσεις. Αν από την άλλη, τα στοιχεία που είναι μη κυριαρχούμενα είναι πάρα πολλά και υπερβαίνουν το μέγεθος του φακέλου, τότε εισάγονται αυτά τα οποία απέχουν περισσότερο από τα γειτονικά τους. [20]

5.3.2 Αλγόριθμος PESA II:

Ένας δεύτερος προτεινόμενος αλγόριθμος είναι ο PESA II (Pareto Envelope-based Selection Algorithm). Ο αλγόριθμος αυτός είναι η εξελιγμένη μορφή του αλγορίθμου PESA. Η διαφοροποίηση της μεθόδου αυτής από την SPEA, είναι η χρήση παραμέτρων όχι μόνο για την διασταύρωση και την μετάλλαξη των στοιχείων αλλά και για το μέγεθος του πληθυσμού και μία παράμετρο για την υπερπλεγματική στρατηγική συνωστισμού. Συγκεκριμένα, για τον πληθυσμό χρησιμοποιούνται δύο παράμετροι, με την παράμετρο P_I να αφορά το μέγεθος του εσωτερικού πληθυσμού, και την παράμετρο P_E να αφορά το μέγεθος του εξωτερικού πληθυσμού – φακέλου. Η λογική που ακολουθείται είναι:

- Αρχικά δημιουργήσε και υπολόγισε τη συνάρτηση κόστους για καθένα από τα αρχικά μέλη του πληθυσμού και αρχικοποίησε τον φάκελο.
- Ένωση των στοιχείων του φακέλου με τα μη κυριαρχούμενα στοιχεία του πληθυσμού.
- Αν κάποιο κριτήριο τερματισμού ικανοποιείται, τότε τερματισμός του αλγορίθμου και επέστρεψε τα μέλη του φακέλου. Αλλιώς, διέγραψε τα παρόντα μέλη του πληθυσμού, και επανέλαβε μέχρι P_I νέοι υποψήφιοι δημιουργηθούν, την εξής διαδικασία: Με πιθανότητα p_C επέλεξε δύο γονείς από τον φάκελο, ώστε να δημιουργηθεί ένας απόγονος μέσω διασταύρωσης και μετάλλαξε τον δημιουργηθέντα απόγονο. Με πιθανότητα $1 - p_C$, επέλεξε έναν γονέα και μετάλλαξε τον δίνοντας απόγονο.
- Επιστροφή στο 2^ο βήμα.

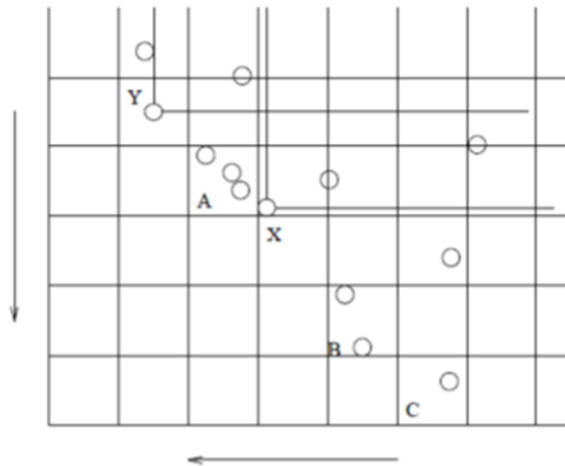
Όπως φαίνεται από τα παραπάνω το δομικό διάγραμμα του αλγορίθμου SPEA II ταυτίζεται με αυτό του αλγορίθμου PESA II. Η διαφοροποίηση έγκειται στον τρόπο επιλογής των στοιχείων για την είσοδο στον φάκελο, όπως θα δούμε πιο συγκεκριμένα παρακάτω.

Καταρχάς, στο βήμα της ένωσης των στοιχείων του φακέλου και των μη κυριαρχούμενων στοιχείων του πληθυσμού, το τρέχον σετ των υποψήφιων νέων λύσεων προστίθενται μία – μία, στην περίπτωση που δεν είναι κυριαρχούμενο τόσο από κανένα άλλο στοιχείο του πληθυσμού όσο και από τα υπόλοιπα στοιχεία του φακέλου, καθώς εάν τελικώς προστεθεί και κατόπιν διαπιστωθεί ότι κυριαρχείται από κάποιο άλλο στοιχείο μέσα στο φάκελο, τότε αφαιρείται. Εάν τα στοιχεία που δεν κυριαρχούνται και προστίθενται στο φάκελο προκαλούν πρόβλημα υπερπληθυσμού, τότε κάποιο από τα ήδη υπάρχοντα στοιχεία θα αφαιρεθεί.

Η επιλογή των γονιών βασίζεται στον συνωστισμό που εμφανίζεται μέσα στον φάκελο. Ο τρόπος με βάση τον οποίο διακρίνεται ο συνωστισμός μέσα στο φάκελο βασίζεται στη δημιουργία ενός υπερπλέγματος που χωρίζει τον χώρο σε υπερ-κουτιά. Κάθε μέλος στο φάκελο αντιστοιχίζεται σε ένα υπερ-κουτί και σε έναν παράγοντα “συμπύεσης”, ο οποίος δηλώνει πόσα άλλα στοιχεία μοιράζονται το ίδιο υπερ-κουτί. Ο παράγοντας συμπύεσης, πρακτικά είναι ένα αντίστοιχο μέτρο της πυκνότητας που χρησιμοποιήθηκε στον

αλγόριθμο SPEA και είναι δείγμα καταλληλότητας, με βάση τον οποίο η αναζήτηση γονέων στρέφεται κυρίως προς περιοχές με μικρότερη εκπροσώπηση στον πληθυσμό.

Ο παράγοντας συμπίεσης συμμετέχει και κατά την ανανέωση του φακέλου, στην περίπτωση υπερπληθυσμού του. Όμοια με πριν, μέσω του παράγοντα συμπίεσης εξασφαλίζεται η όσο το δυνατόν δίκαιη εκπροσώπηση κάθε περιοχής από στοιχεία. Αυτό σημαίνει ότι αν πρέπει να εισαχθεί ένα στοιχείο στο φάκελο, αφαιρείται ένα στοιχείο με ίδιο παράγοντα συμπίεσης.



Σχήμα 5.3: Το υπερπλέγμα του αλγορίθμου PESA II, όπως εμφανίζεται σε δισδιάστατη εκδοχή του μετώπου Pareto[22]

Στην περίπτωση της PESA II ακολουθείται διαφορετική λογική στην επιλογή των στοιχείων. Πλέον δεν βασίζεται στο στοιχείο αυτό καθαυτό αλλά σε περιοχές. Αυτό που εξασφαλίζεται με αυτή τη μέθοδο είναι οι μεγαλύτερες πιθανότητες να επιλεγούν τα λιγότερο πυκνοκατοικημένα υπερ – κουτιά. Έστω ότι στο μέτωπο Pareto, υπάρχουν b κατειλημμένα κουτιά, με n_i στοιχεία σε κάθε i κουτί, και P ο συνολικός αριθμός των υπάρχοντων στοιχείων, έτσι ώστε:

$$\sum_{i=1}^b n_i = P$$

Θεωρούμε ότι ένα υπερ-κουτί j έχει το μέγιστο n_i , έστω l , και ένα άλλο έχει το ελάχιστο n_i , έστω m . Με την επιλογή με βάση το στοιχείο, η πιθανότητα να επιλεγθεί ένα μέλος από το λιγότερο πυκνοκατοικημένο κουτί με πληθυσμό m , είναι $1 - ((P - l) / P)^2$, ενώ για το πιο πυκνοκατοικημένο είναι $((P - l) / P)^2 = (m / P)^2$, οπότε ο λόγος μεταξύ αυτών είναι: $(2Pl - l^2) / m^2$. Όσο το m είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το l , η πιθανότητα επιλογής ενός απομονωμένου στοιχείου μειώνεται δραματικά. Αντίθετα, στην περίπτωση της επιλογής με βάση την περιοχή, ο ίδιος λόγος παίρνει την τιμή $2b - 1$ που είναι ανεξάρτητη του πόσο πυκνά είναι καταναμημένα τα στοιχεία. [21][22]

5.4 Αποτελέσματα αλγορίθμων:

Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης, όπως προκύπτουν από τους χρησιμοποιούμενους αλγορίθμους. Η κατάσταση λειτουργίας με βάση την οποία βελτιστοποιούμε είναι αυτή των 350 στροφών λειτουργίας με ρεύμα τροφοδότησης 7.4A, καθώς στις 350 στροφές λειτουργίας όπως προκύπτει από τα πειραματικά δεδομένα έχει και την μέγιστη τιμή απόδοσης, οπότε πιθανότατα είναι και η κύρια κατάσταση λειτουργίας της. Να σημειωθεί επίσης ότι στην εν λόγω τιμή λειτουργίας έχουμε και καλή σύγκλιση μεταξύ προσομοιωτικών και πειραματικών δεδομένων, δίνοντας έτσι μεγαλύτερη αξιοπιστία στα αποτελέσματα.

Για την βελτιστοποίηση της μηχανής χρησιμοποιήθηκε αρχικά ο εξελικτικός αλγόριθμος PESA II και κατόπιν ο αλγόριθμος SPEA II. Ζητούμενα της βελτιστοποίησης, είναι η αυξημένη ροπή της μηχανής, οι μειωμένες απώλειες καθώς και η καλή ποιότητα ισχύος, όσον αφορά τις παραμορφώσεις σε ροπή και αρμονικές ρεύματος. Παρ' όλα αυτά, επειδή μας ενδιαφέρει η διατήρηση του βάρους της μηχανής σε λογικά πλαίσια, στην πορεία θεωρήθηκε σκόπιμο η χρήση των κριτηρίων: πυκνότητα ισχύος, βαθμός απόδοσης και ποιότητα ισχύος-ροπής. Στην ποιότητα ισχύος έγινε ένας συμψηφισμός της κυμάτωσης ροπής και της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης. Συγκεκριμένα τα κριτήρια είναι τα παρακάτω (με τον δείκτη «ο» σημειώνονται τα στοιχεία της μηχανής αναφοράς):

Για την πυκνότητα ισχύος:

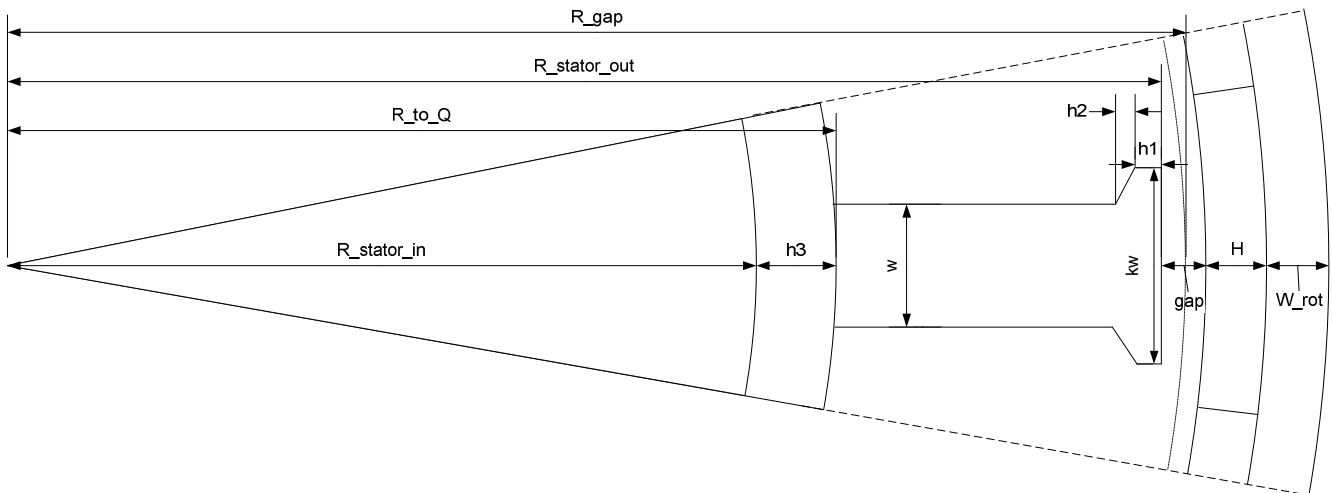
$$f_1 = \frac{T_o / Mass_o}{T / Mass}, \text{ όπου } T \text{ ροπή διακένου και } Mass \text{ η μάζα της μηχανής}$$

$$f_2 = \frac{N_o}{N}, \text{ όπου } N \text{ βαθμός απόδοσης}$$

$$f_3 = 0.5 \frac{THD}{THD_o} + 0.5 \frac{R}{R_o}, \text{ όπου } THD \text{ το ποσοστό της αρμονικής παραμόρφωσης και } R \text{ το ποσοστό της}$$

κυμάτωσης ροπής

Τα μεγέθη της μηχανής αναφοράς έχουν υπολογιστεί σε βάρος μηχανής (στάτης – ρότορας) 3.83Kg και στη συγκεκριμένη λειτουργία ροπή διακένου 10.44Nm, βαθμό απόδοσης 0.9435, αρμονική παραμόρφωση 10.8%, κυμάτωση ροπής 2.2%.



Σχήμα 5.4: Παρουσίαση των βασικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών της μηχανής

Η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε μεταβάλλοντας διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μηχανής, τα οποία ήταν οι εξής μεταβλητές:

- Πλάτος δοντιού: w και kw
- Πλάτος και πληρότητα μαγνήτη: H και ποσοστό $p\%$
- Πλάτος στάτη και εξωτερικού περιβλήματος: $h3$ και w_{rot}
- Ακτίνες διακένου και στάτη: R_{gap} και R_{to_Q}

Πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τους περιορισμούς της εκάστοτε χρήσης της μηχανής. Θεωρώντας ότι η μηχανή είναι προσαρμοσμένη πάνω σε μία ρόδα, της οποίας η ακτίνα έχει μεγαλύτερη ευελιξία τιμών, είναι δυνατό να μεταβάλλουμε αντίστοιχα και την ακτίνα της μηχανής, πάντα βέβαια μέσα σε ορισμένα πλαίσια. Αντίθετα, δεν είναι πάντα πιθανό να μπορούμε να μεταβάλλουμε το ενεργό μήκος της μηχανής, καθώς αυτό μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην υπόλοιπη διάταξη (φρένα, σασί κλπ).

Οπότε στην πρώτη προσέγγιση, κάνουμε βελτιστοποίηση μεταβάλλοντας μόνο τα παραπάνω μεγέθη, ενώ στη δεύτερη θα μεταβάλλουμε και το ενεργό μήκος της μηχανής.

Τα όρια που κυμαίνονται οι μεταβλητές επιλογής είναι τα εξής:

	Μέγιστο	Ελάχιστο
Ενεργό Μήκος L	20	37
w	4	7
kw	4	11
H	1	10
p%	80	100
h3, w_rot	4	20
R gap	91	120
R to Q	65.8	98.7

Πίνακας 5.1: Όρια των μεταβλητών βελτιστοποίησης

Η επιλογή των παραπάνω ορίων βασίστηκε στο γεγονός ότι επιπλέον μεταβολές μπορεί να προκαλούσαν προβλήματα είτε στην γεωμετρία – λειτουργικότητα της μηχανής, είτε στην ενσωμάτωση της μηχανής στην μηχανολογική διάταξη.

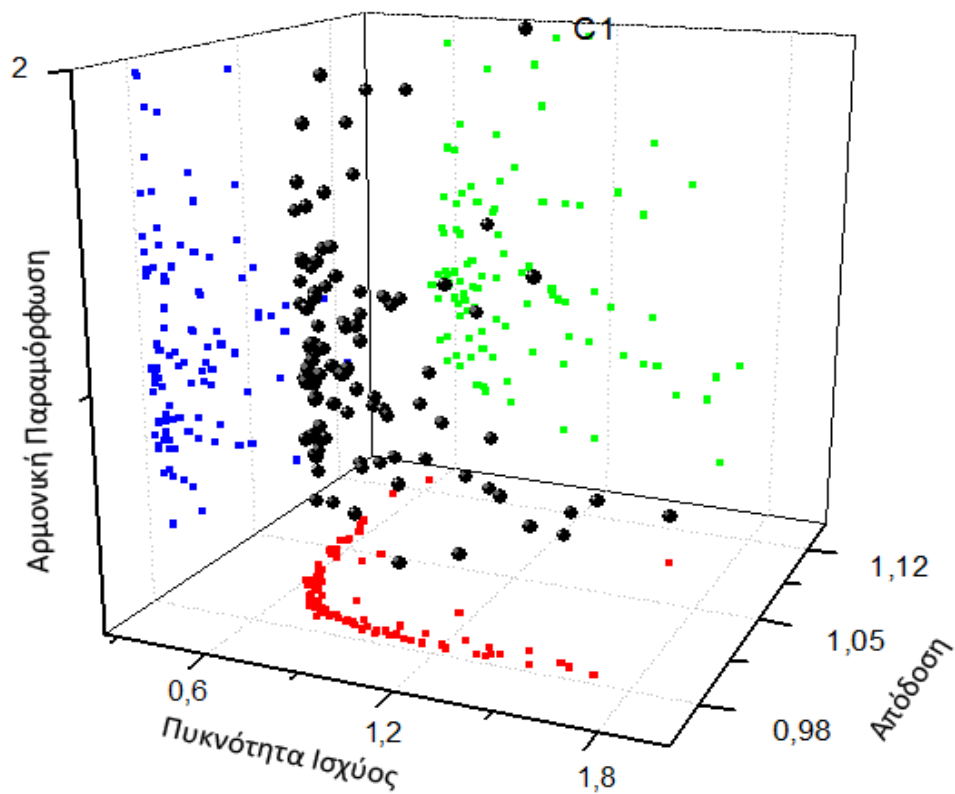
5.4.1 Κριτήριο υπερόγκου για την αξιολόγηση του μετώπου Pareto

Πριν παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των αλγορίθμων, είναι σκόπιμο να αναφέρουμε το μέτρο κρίσης των αποτελεσμάτων και συγκεκριμένα το μέτρο με βάση το οποίο θεωρούμε ότι η βελτιστοποίηση έχει προσεγγίσει τις βέλτιστες τιμές. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, από την βελτιστοποίηση προκύπτει η καμπύλη Pareto, με τις μη κυριαρχούμενες λύσεις. Όπως σχηματίζεται η καμπύλη στον n -διάστατο χώρο, όπου n είναι οι συναρτήσεις κόστους της βελτιστοποίησης, αν θέσουμε ένα σημείο αναφοράς και υπολογιστεί ο όγκος μεταξύ των επιπέδων παράλληλων στους άξονες που αντιστοιχούν στις n συναρτήσεις, και της καμπύλης Pareto, όσο ο όγκος αυξάνει τόσο καλύτερη είναι η προσέγγισή μας. Ο λόγος για αυτό είναι ότι όσο αυξάνει ο όγκος, μετακινείται η Pareto προς χαμηλότερα επίπεδα, πιο κοντά σε τιμές μικρότερες της μονάδας, άρα η βελτιστοποίηση έχει προσεγγίσει καλύτερες λύσεις. Για να κρίνουμε αν έχει νόημα να συνεχιστεί η υπολογιστική διαδικασία για παραπάνω επαναλήψεις, πρέπει να δούμε το ρυθμό μεταβολής του υπερόγκου. Συγκεκριμένα, όσο ο υπερόγκος μεταξύ των διαδοχικών επαναλήψεων παίρνει πολύ διαφορετικές τιμές, η βελτιστοποίηση δεν έχει προσεγγίσει τις βέλτιστες λύσεις, ενώ όταν σιγά σιγά ο υπερόγκος θα έχει τείνει σε μία ορισμένη τιμή, δεν έχει νόημα να περιμένουμε πολύ καλύτερα αποτελέσματα.

5.4.2 Βελτιστοποίηση με τον αλγόριθμο PESA II

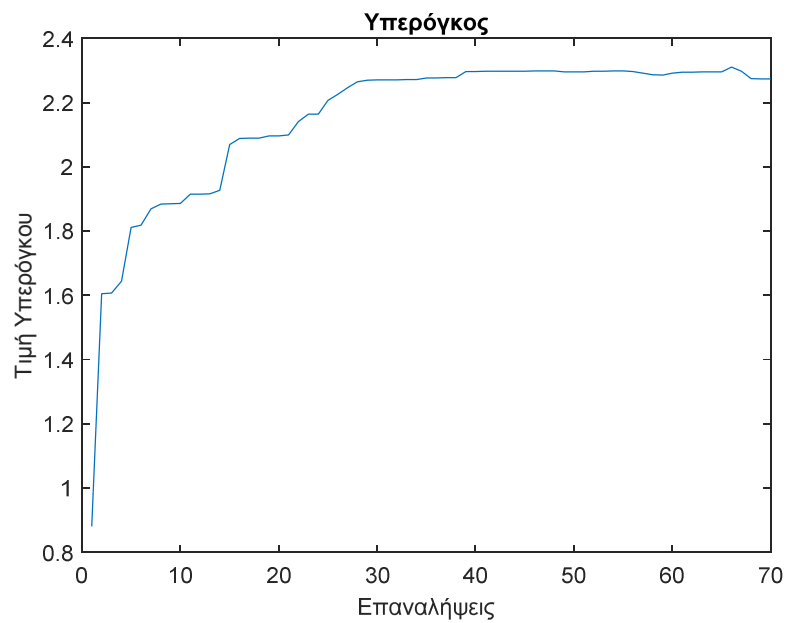
I. Βελτιστοποίηση PESA II – Με σταθερό ενεργό μήκος:

Μετά από 47 επαναλήψεις, η βελτιστοποίηση φαίνεται να έχει αρχίσει να συγκλίνει με το εξής τρισδιάστατο γράφημα να ναπαριστά το μέτωπο Pareto.



Σχήμα 5.5: Η τρισδιάστατη αναπαράσταση της καμπύλης Pareto και πώς προβάλλεται σε κάθε επίπεδο

Σημειώνεται ότι θεωρείται πως η βελτιστοποίηση έχει περατωθεί από την στιγμή που το γράφημα του υπερόγκου έχει πάρει αυτή τη μορφή, με τη μέγιστη τιμή να φαίνεται ότι έχει προσεγγισθεί:



Σχήμα 5.6: Ο υπερόγκος συναρτήσει των επαναλήψεων της βελτιστοποίησης PESA II με σταθερό το ενεργό μήκος

Από τη βελτιστοποίηση προέκυψαν πλήθος μηχανών με ορισμένα από τα κριτήρια λίγο χειρότερα αλλά με τα άλλα κριτήρια να είναι πολύ καλύτερα, αλλά προέκυψαν και εννιά απόλυτα καλύτερες λύσεις και για τα τρία κριτήρια. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των μηχανών φαίνονται παρακάτω:

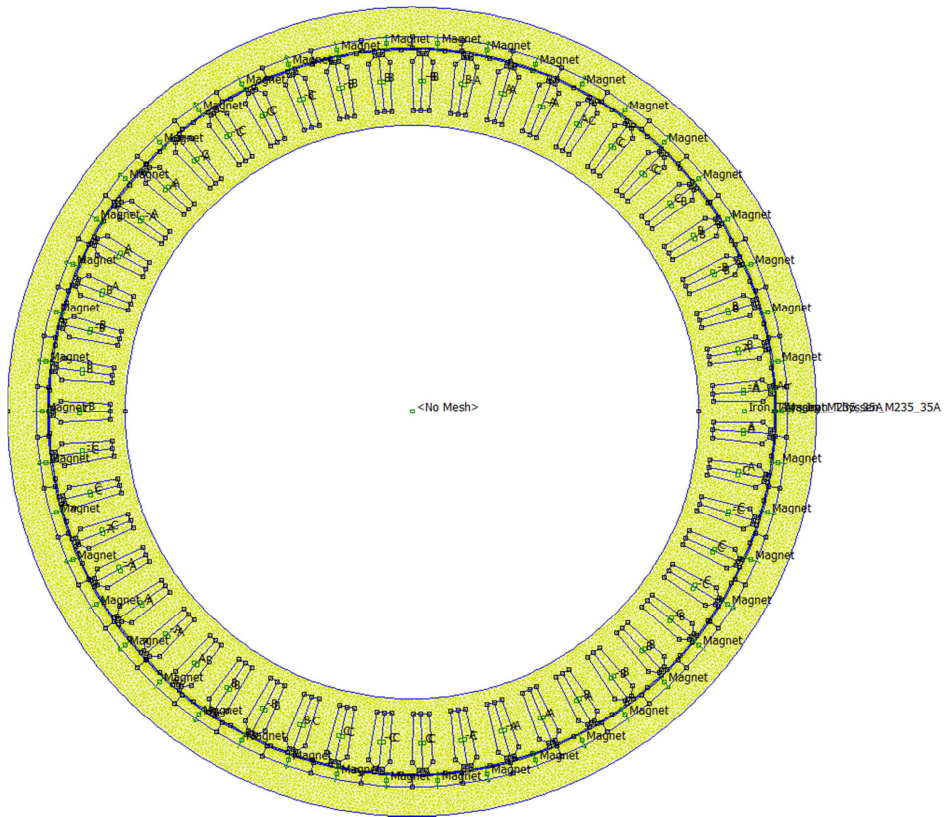
	Ροπή(Nm)	Μάζα (Kg)	Απόδοση	THD %	Κυμάτωση Ροπής %
Μηχανή 1a	10.56	3.7956	0.954	2.49	3.82
Μηχανή 2a	10.57	3.4333	0.9515	2.01	3.60
Μηχανή 3a	10.74	2.9626	0.9455	2.16	2.56
Μηχανή 4a	10.15	2.9902	0.9501	3.50	2.87
Μηχανή 5a	10.25	3.6996	0.9548	2.25	3.77
Μηχανή 6a	10.98	2.8657	0.9458	2.42	2.95
Μηχανή 7a	10.63	3.0009	0.947	2.20	3.24
Μηχανή 8a	9.11	3.0498	0.9487	1.71	2.83
Μηχανή 9a	10.37	3.0927	0.9478	1.74	2.24
<i>Αναφορά</i>	<i>10.44</i>	<i>3.82649</i>	<i>0.9435</i>	<i>10.79</i>	<i>2.20</i>

Πίνακας 5.2: Οι μηχανές που προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση PESA II με σταθερό το ενεργό μήκος

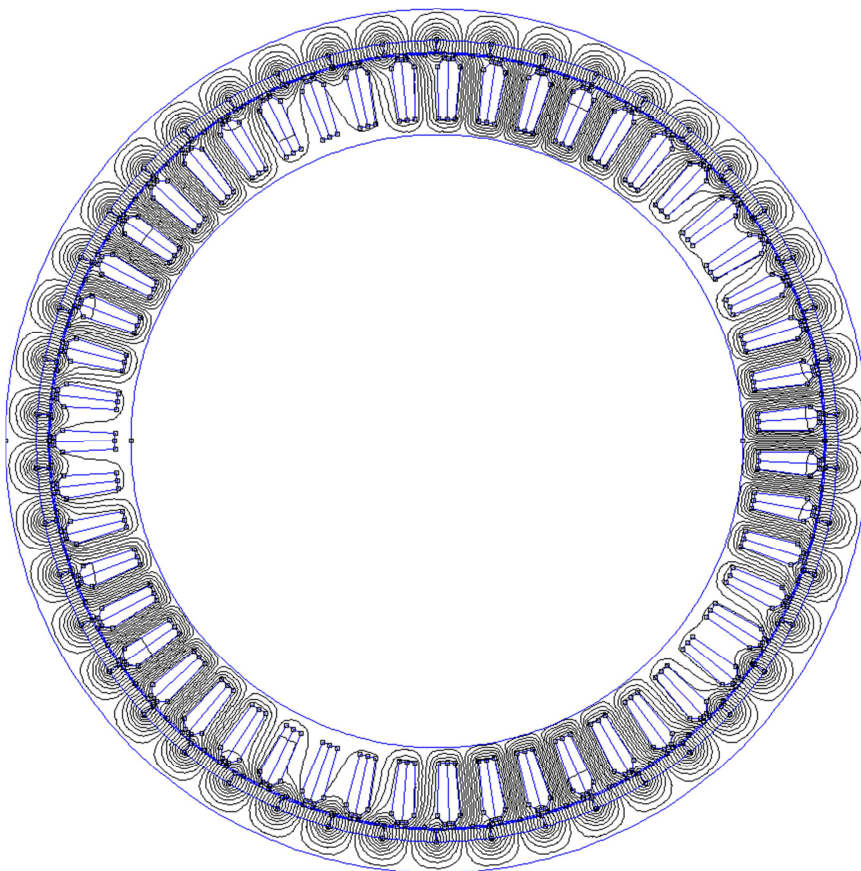
Παρατηρούμε γενικά, ότι επιτυγχάνεται με τις εναλλακτικές γεωμετρίες μικρότερο THD αλλά μεγαλύτερη, μέσα σε ανεκτά πλαίσια κυμάτωση ροπής. Από τις παραπάνω μηχανές θα προσανατολιστούμε στις δύο περιπτώσεις παρόμοιας ροπής και απόδοσης αλλά μικρότερου βάρους και παρόμοιου βάρους και ροπής αλλά μεγαλύτερης τιμής απόδοσης.

Για την πρώτη περίπτωση επιλέγεται η μηχανή η μηχανή ελάχιστου βάρους **Μηχανή 6a**, ενώ για τη δεύτερη περίπτωση μπορεί να επιλεγθεί η μηχανή με το πλησιέστερο βάρος Μηχανή 1a. Με μία γρήγορη επισκόπηση, όμως, προκύπτει ότι η **Μηχανή 5a** έχει και τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης αλλά και μικρότερο βάρος, οπότε αξίζει να εξεταστεί και αυτή στη θέση της Μηχανή 1a, σημειωθέντος και ότι έχει και υψηλότερη πυκνότητα ισχύος.

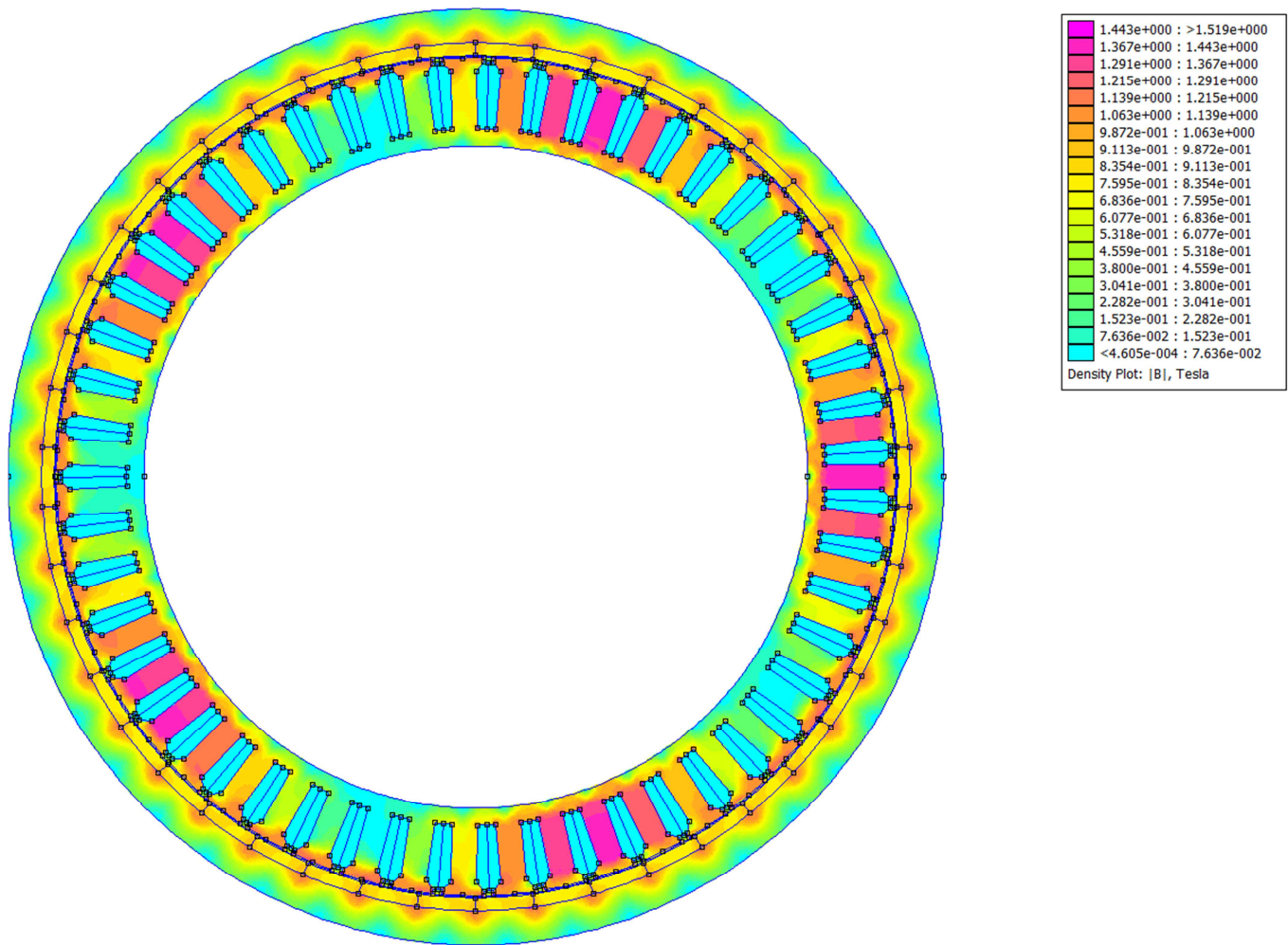
Τέλος, να σημειώσουμε ότι όλες οι μηχανές που επιλέχθηκαν, όπως φαίνεται και από τα στοιχεία τους, έχουν παραπλήσια τιμή ροπής. Επίσης, οι μηχανές αυτές έχουν rms τιμή τροφοδότησης από 16.77V (Μηχανή 5a) ως 18.01V (Μηχανή 6a), ενώ η αρχική μηχανή είχε περί τα 17.35V για τη συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας, οπότε παραμένουμε σε ανεκτά πλαίσια και σε αυτόν τον παράγοντα. Παρακάτω, ακολουθεί επιμέρους ανάλυση καθεμίας από τις μηχανές αφού πρώτα παρουσιαστούν τόσο η γεωμετρία μαζί με το πλέγμα όσο και η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στη μηχανή αναφοράς.



Σχήμα 5.7: Η γεωμετρία της μηχανής αναφοράς μαζί με το πλέγμα



Σχήμα 5.8: Η ροή μαγνητικού πεδίου στην μηχανή αναφοράς



Σχήμα 5.9: Η κατανομή του μαγνητικού πεδίου στη μηχανή αναφοράς

Μηχανή 5α: Μέγιστη απόδοση – μικρότερο βάρος:

Παρακάτω παρουσιάζονται τόσο τα λειτουργικά, όσο και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της προκύπτουσας μηχανής:

	Λειτουργικά Χαρακτηριστικά				
	T(Nm)	Μάζα(Kg)	Απόδοση	THD %	Κυμάτωση Ροπής %
Μηχανή 5α	10.25	3.6996	0.9548	2.25	3.77
Μηχανή Αναφοράς	10.44	3.82649	0.9435	10.79	2.20
Απόκλιση (%)	-1.78	-3.32	1.20	-79.15	71.31

Πίνακας 5.3: Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μηχανής 5α

Όπως ήδη αναφέρθηκε, σημειώνεται ότι η μηχανή επιτυγχάνει καλύτερα λειτουργικά χαρακτηριστικά και στα τρία κριτήρια, με μόνη λεπτομέρεια την αύξηση της κυμάτωσης ροπής, όχι όμως σε βαθμό που συνολικά προκαλεί μειωμένης ποιότητας ισχύ, αφού στο κριτήριο υπάρχει συμψηφισμός του THD και κυμάτωσης ροπής.

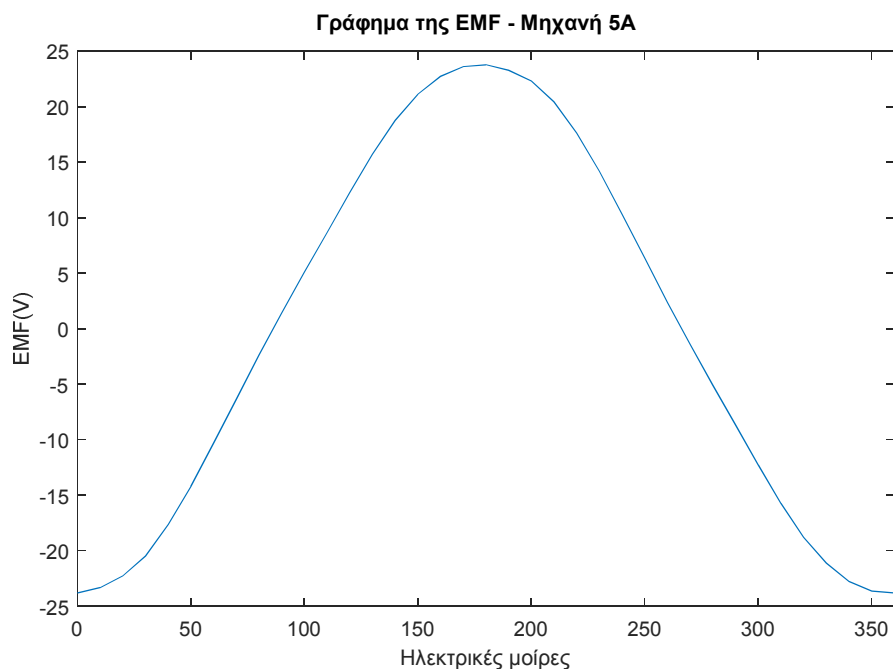
Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά								
	Πλάτος Δοντιού w	Πλάτος Δοντιού kw	Ακτίνα Διακένου	Ακτίνα Στάτη	Ποσοστό Μαγνητών	Ύψος Μαγνητών	Πάχος Στάτη	Πάχος Εξωτερικού Περιβλήματος
Μηχανή 5α	5.150	7.923	112.103	93.450	81.861	2.565	4.715	4.715
Μηχανή Αναφοράς	6.00	10.00	99.15	82.25	100.00	3.00	4.00	8.00
Απόκλιση (%)	-14.16	-20.77	13.06	13.62	-18.14	-14.49	17.89	-41.06

Πίνακας 5.4: Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μηχανής 5α

Παρατηρείται μείωση του πλάτους των δοντιών, αλλά αύξηση της ακτίνας της μηχανής. Να σημειωθεί επίσης η μείωση του συντελεστή πληρότητας των μαγνητών, επιβάλλοντας την ύπαρξη ενδιάμεσων κενών, πράγμα που δυσχεραίνει κάπως την κατασκευή του κινητήρα.

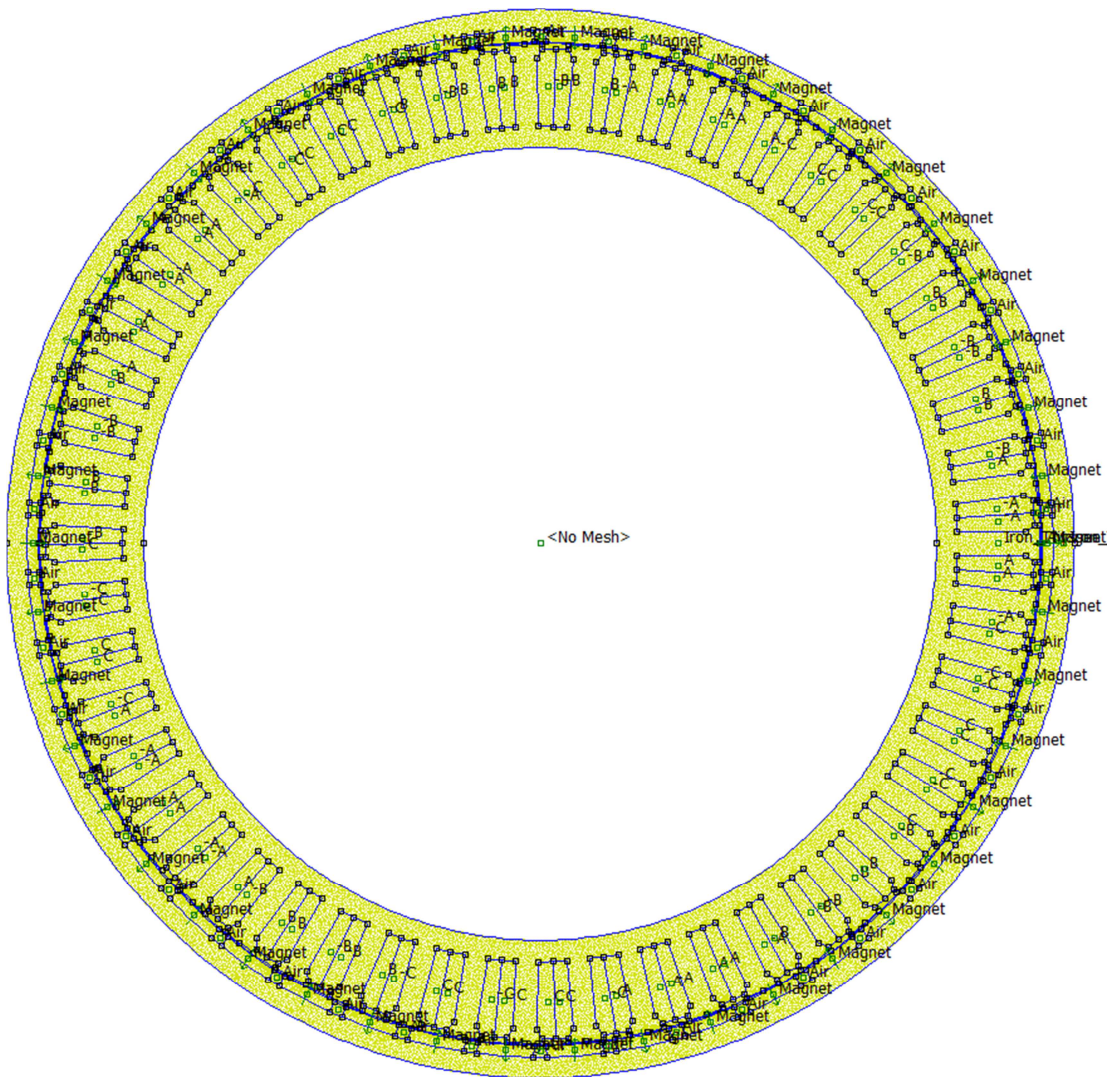
Μέγεθος αύλακας		
	Επιφάνεια Αύλακας (mm ²)	Ακτίνα καλωδίου(mm)
Μηχανή 5α	63.02	0.3655
Μηχανή Αναφοράς	37.75	0.2825
Απόκλιση (%)	66.93	29.38

Πίνακας 5.5: Τα χαρακτηριστικά της αύλακας και του καλωδίου της μηχανής 5α

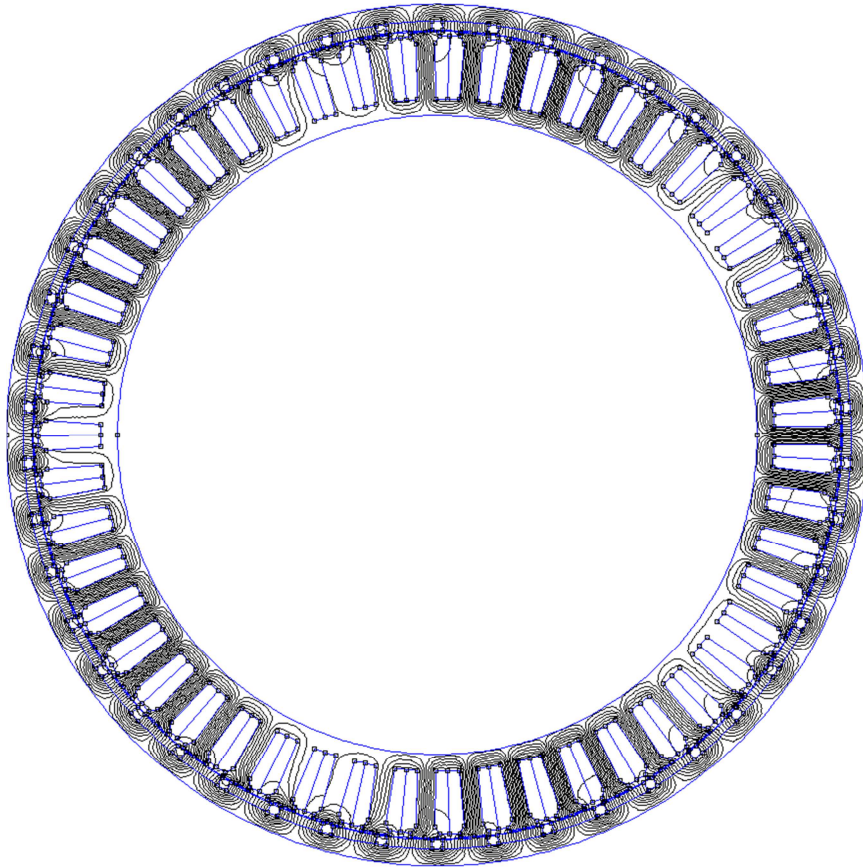


Σχήμα 5.10: Η κυματομορφή της EMF στη μηχανή 5α

Επίσης, έχει πλέον αυξηθεί η επιφάνεια της αύλακας, επιτρέποντας την χρήση καλωδίων μεγαλύτερης διαμέτρου, πράγμα που εξασφαλίζει μεγαλύτερες ηλεκτρικές αντοχές. Παρακάτω φαίνονται η γεωμετρία της μηχανής και η κατανομή του μαγνητικού πεδίου σε αυτή:

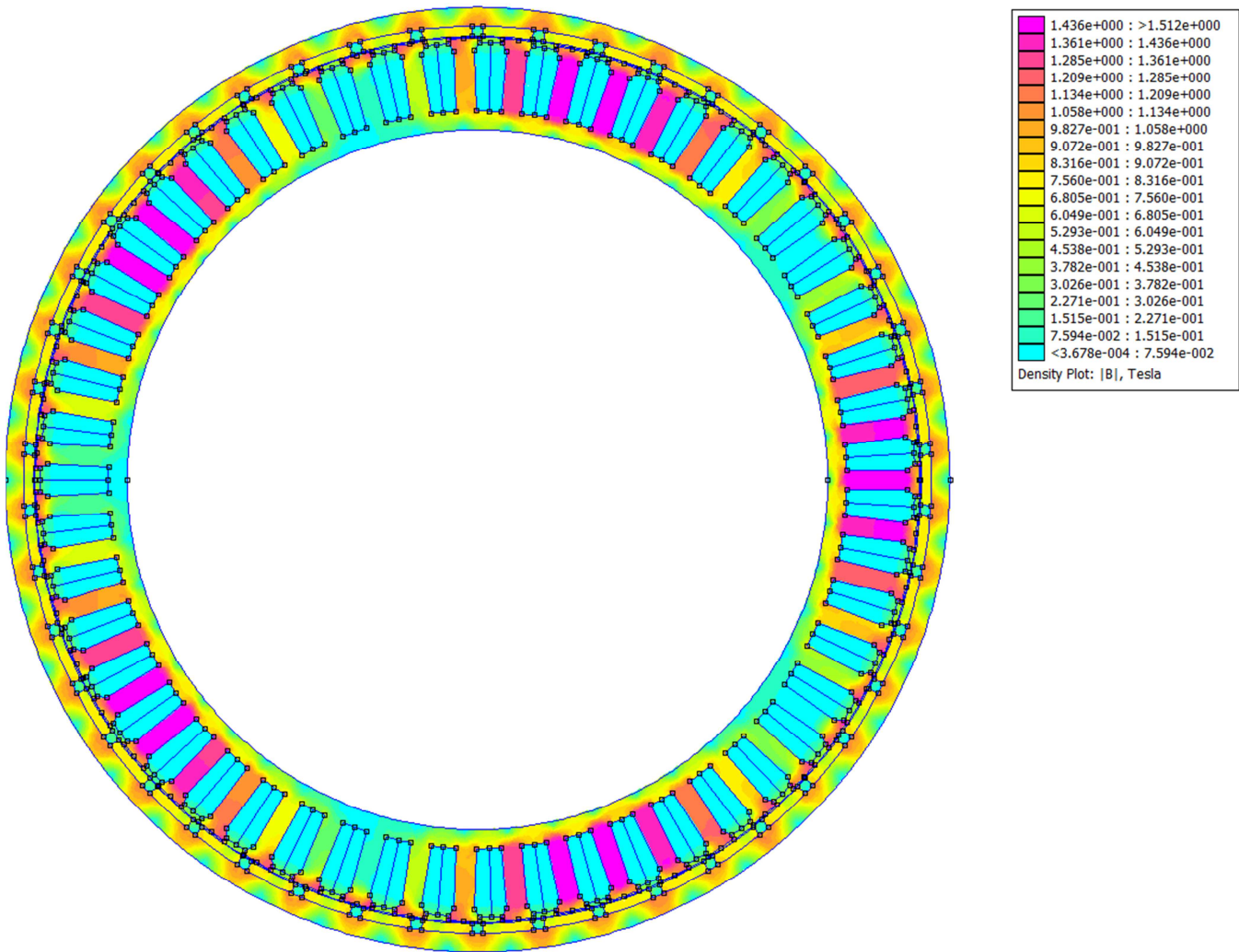


Σχήμα 5.11: Η γεωμετρία της μηχανής 5α μαζί με το πλέγμα



Σχήμα 5.12: Η ροή του μαγνητικού πεδίου στην μηχανή 5α

Παρατηρούμε εν γένει ότι η νέα μηχανή είναι μετατοπισμένη γεωμετρικά όλη σε μεγαλύτερη ακτίνα, με λίγο πιο τετραγωνισμένες αύλακες. Η κατανομή του μαγνητικού πεδίου δεν παρουσιάζει έντονες ανομοιομορφίες και διατηρεί τις τιμές μαγνητικού πεδίου σε ένα καλό επίπεδο, αντίστοιχο της μηχανής αναφοράς παρουσιάζοντας μέγιστη τιμή περί τα 1.5T.



Σχήμα 5.13: Η κατανομή του πεδίου στη μηχανή 5α

Μηχανή 6α: Παραπλήσια απόδοση – μικρότερο βάρος:

Όμοια με πριν, παρουσιάζονται παρακάτω τα βασικά λειτουργικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μηχανής, καθώς και η γεωμετρία σε συνδυασμό με το πλέγμα και την κατανομή του μαγνητικού πεδίου:

	Λειτουργικά Χαρακτηριστικά				
	T(Nm)	Μάζα(Kg)	Απόδοση	THD %	Κυμάτωση Ροπής %
Μηχανή 6α	10.98	2.8657	0.9458	2.42	2.95
Μηχανή Αναφοράς	10.44	3.82649	0.9435	10.79	2.20
Απόκλιση (%)	5.23	-25.11	0.24	-77.57	34.13

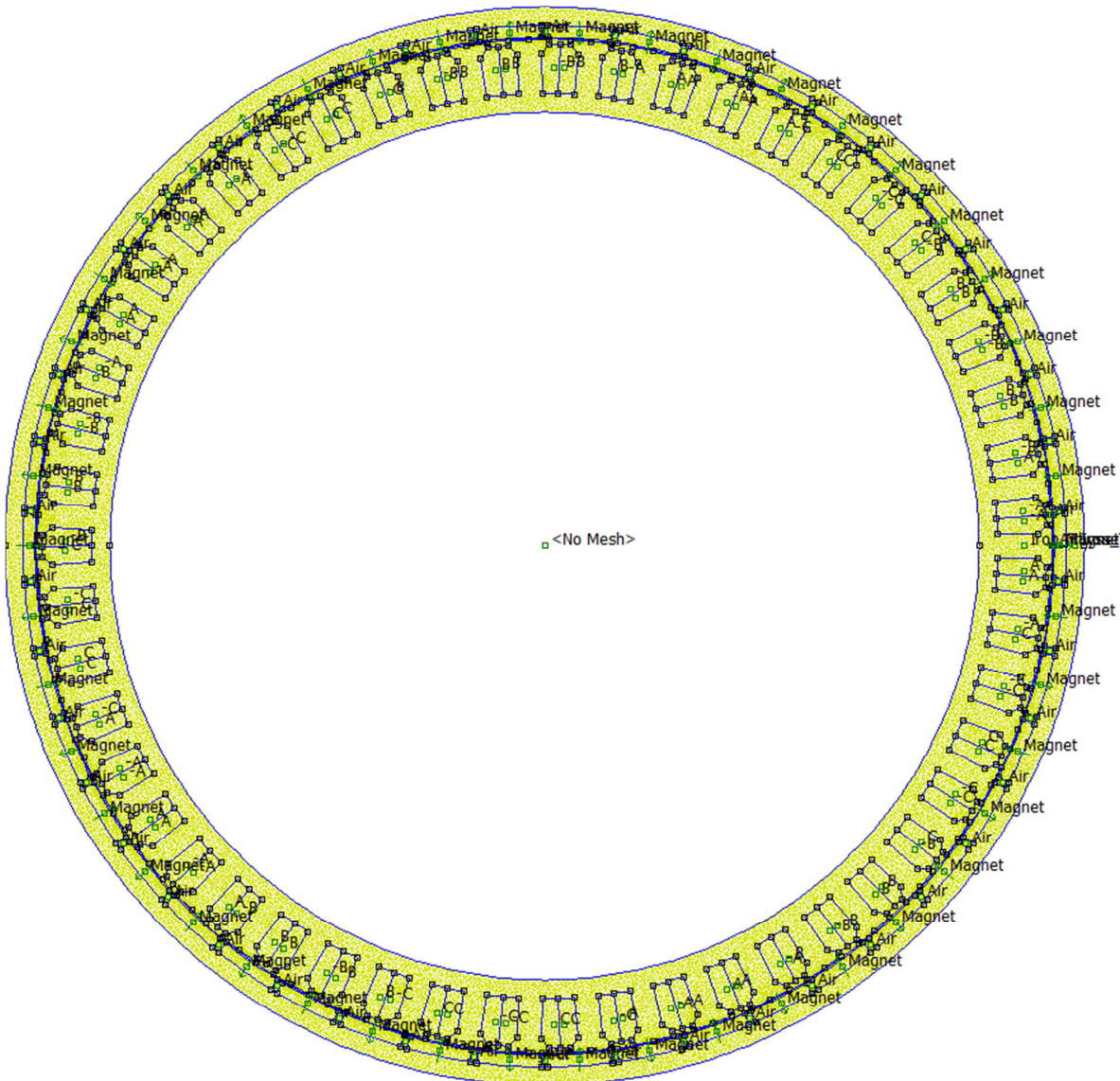
Πίνακας 5.6: Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μηχανής 6α

Παρατηρούμε ότι και πάλι έχουμε τιμές πλάτους δοντιών μικρότερες από αυτές της μηχανής αναφοράς και πάλι συντελεστή πληρότητας των μαγνητών μικρότερο του 100%.

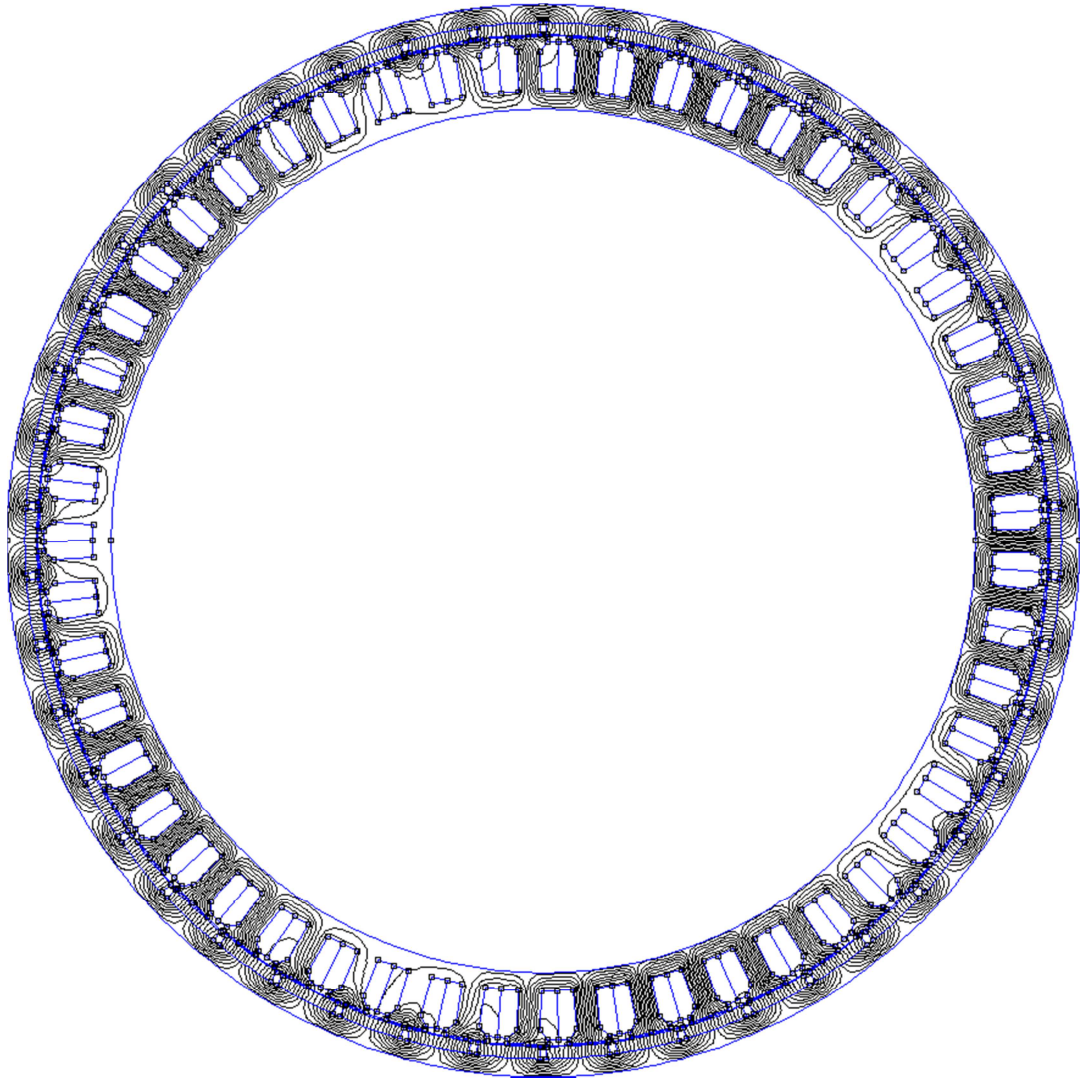
	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά							
	Πλάτος Δοντιού w	Πλάτος Δοντιού kw	Ακτίνα Διακένου	Ακτίνα Στάτη	Ποσοστό Μαγνητών	Ύψος Μαγνητών	Πάχος Στάτη	Πάχος Εξωτερικού Περιβλήματος
Μηχανή 6α	5.106	8.860	110.559	98.498	89.818	2.609	4.000	4.000
Μηχανή Αναφοράς	6.00	10.00	99.15	82.25	100.00	3.00	4.00	8.00
Απόκλιση (%)	-14.90	-11.40	11.51	19.75	-10.18	-13.03	0.00	-50.00

Πίνακας 5.7: Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μηχανής 6α

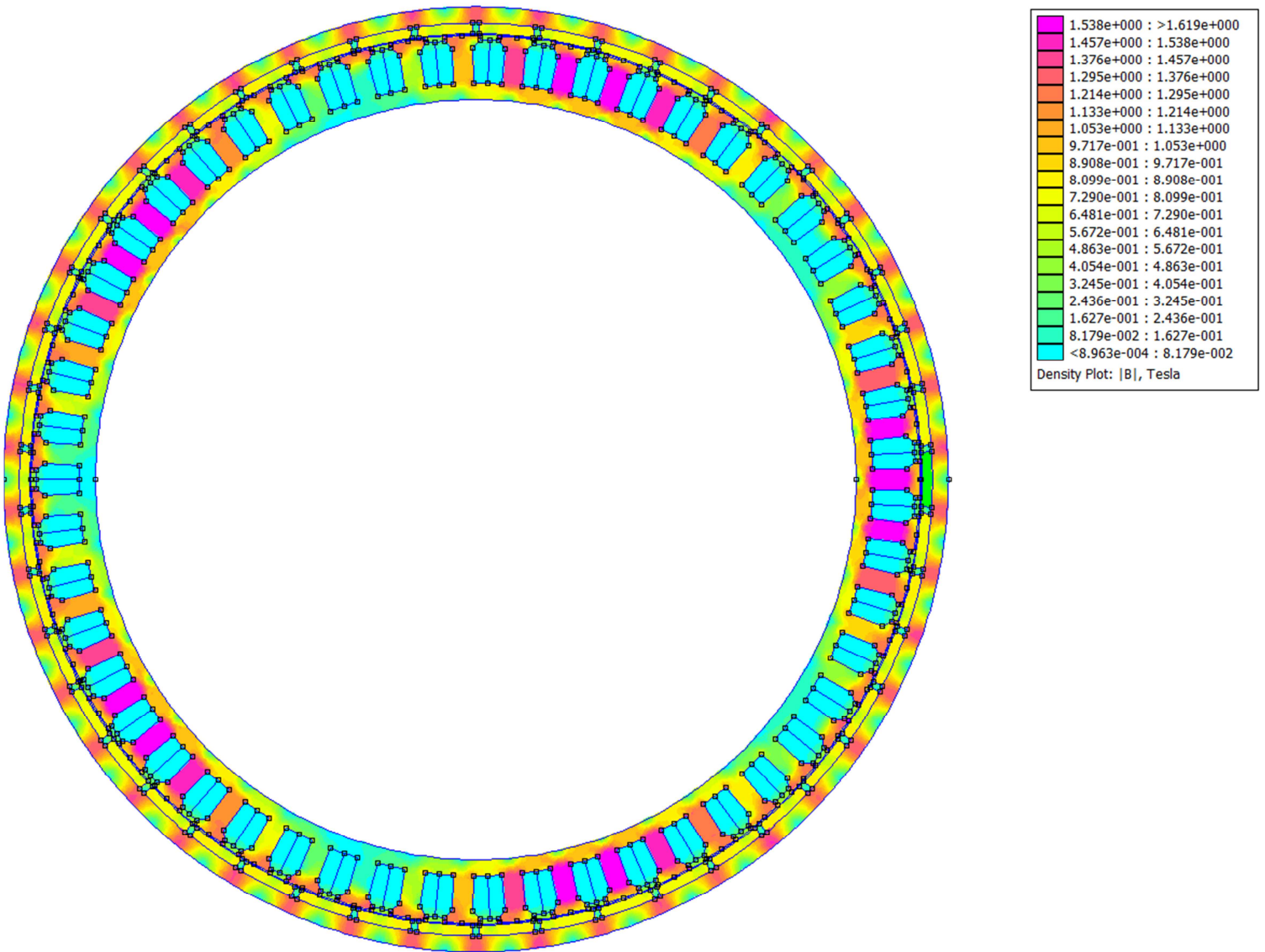
Παρακάτω έχουμε τη γεωμετρία και το πλέγμα όπως δημιουργούνται στο FEMM, καθώς και την κατανομή του μαγνητικού πεδίου:



Σχήμα 5.14: Η γεωμετρία της μηχανής 6α μαζί με το πλέγμα



Σχήμα 5.15: Η ροή του μαγνητικού πεδίου στη μηχανή 6α



Σχήμα 5.16: Η κατανομή του πεδίου στη μηχανή 6α

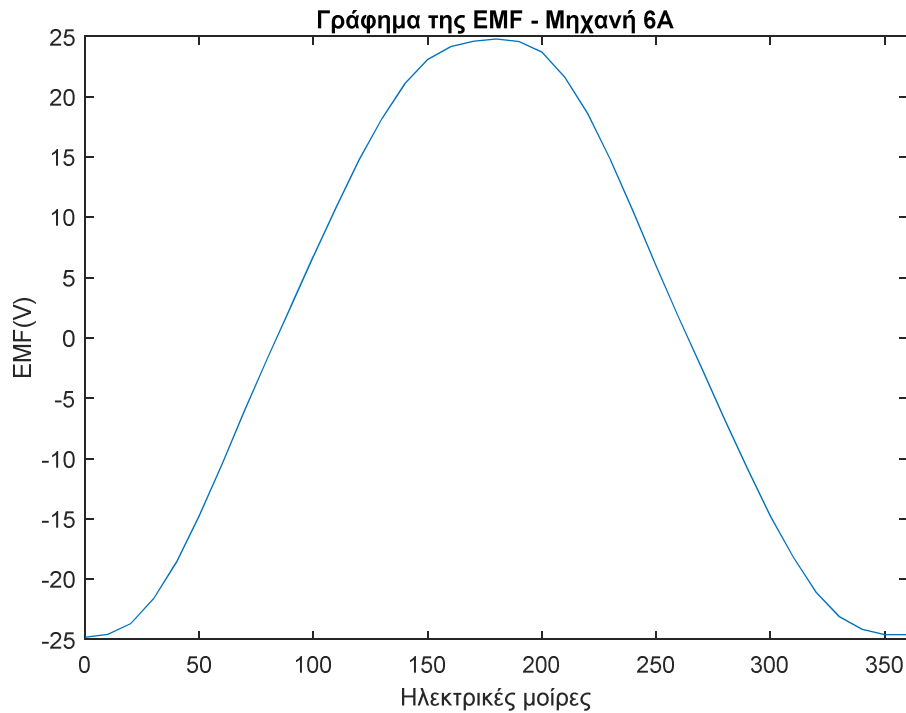
Οπότε με τη νέα γεωμετρία η αύλακα αυξάνει και έχουμε:

	Μέγεθος αύλακας	
	Επιφάνεια Αύλακας (mm ²)	Ακτίνα καλωδίου(mm)
Μηχανή 6α	39.56	0.2892
Μηχανή Αναφοράς	37.75	0.2825
Απόκλιση (%)	4.79	2.37

Πίνακας 5.8: Τα χαρακτηριστικά της αύλακας και του καλωδίου της μηχανής 6α

Παρατηρούμε ότι και αυτή η νέα μηχανή είναι μετατοπισμένη σε μεγαλύτερη ακτίνα, πάλι με λίγο πιο τετραγωνισμένες αύλακες. Όμως τώρα η κατανομή του μαγνητικού πεδίου αγγίζει λίγο μεγαλύτερες τιμές σε

σχέση με τη γεωμετρία αναφοράς, καθώς η μέγιστη τιμή είναι 1.619T σε σχέση με την παλιότερη τιμή που ήταν περί το 1.5T. Παρόλα αυτά, παραμένει σε ανεκτές τιμές.



Σχήμα 5.17: Η κυματομορφή της EMF στη μηχανή 6α

Τέλος παρακάτω παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις λειτουργικές διαφοροποιήσεις και διαφοροποιήσεις βάρους σε σχέση με τη μηχανή αναφοράς:

	Λειτουργικά Χαρακτηριστικά				
	T(%)	Μάζα(%)	Απόδοση(%)	THD(%)	Κυμάτωση Ροπής (%)
Μηχανή 1α	1.12	-0.81	1.11	-76.92	73.75
Μηχανή 5α	-1.78	-3.32	1.20	-79.15	71.31
Μηχανή 6α	5.23	-25.11	0.24	-77.57	34.13

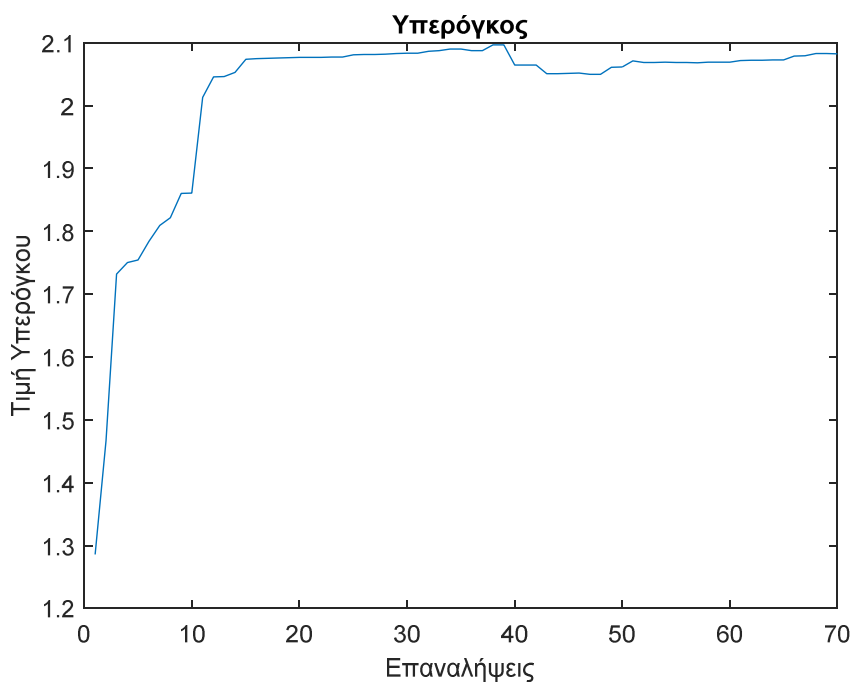
Πίνακας 5.9: Συγκριτικός πίνακας των τριών πιο ενδιαφέροντων αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, είναι ξεκάθαρο ότι στην περίπτωση που σκοπεύουμε στη δραστηκή μείωση του βάρους της μηχανής, πρέπει να επιλέξουμε την μηχανή 6α, σημειώνοντας ότι επιτυγχάνει επίσης σημαντική μείωση του THD, και μικρότερη σε σχέση με τις άλλες μηχανές, αύξηση της κυμάτωσης ροπής, διατηρώντας σχεδόν την ίδια απόδοση.

Στην περίπτωση που επιδιώκουμε αύξηση της απόδοσης, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιήσουμε την μηχανή 5α, αφού όχι μόνο παρουσιάζει μεγαλύτερη απόδοση, αλλά και μικρότερο βάρος κατά 3.32%. Πέραν αυτού, εξασφαλίζει αρκετά καλύτερο THD σε σχέση με την μηχανή 1 και μικρότερη αύξηση στην κυμάτωση ροπής.

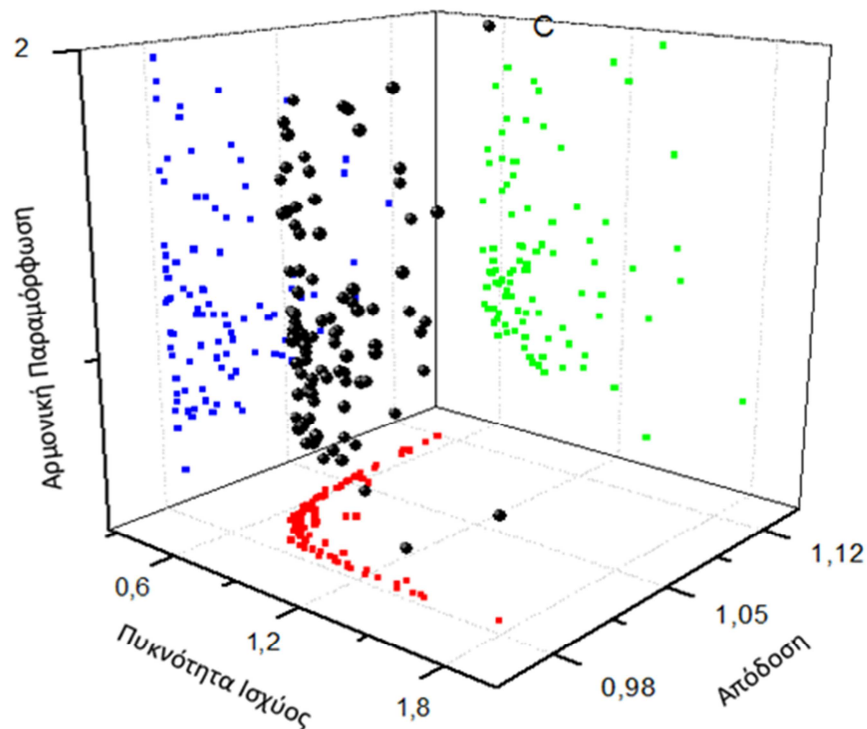
II. Βελτιστοποίηση PESA II –Μεταβλητό ενεργό μήκος:

Στη συγκεκριμένη βελτιστοποίηση, επειδή έχουμε ένα επιπλέον κριτήριο η σύγκλιση είναι πιο αργή σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση και η ποικιλία των λύσεων μεγαλύτερη, καθώς παίρνουμε μηχανές με τιμές EMF και ροπής, πολύ μικρότερες ή πολύ μεγαλύτερες των δεδομένων. Τα παρακάτω αποτελέσματα, αφορούν τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης με χρήση PESA αλγορίθμου μετά από 62 επαναλήψεις. Για να είμαστε σίγουροι ότι η βελτιστοποίηση δεν έχει νόημα να συνεχίσει περαιτέρω, χρησιμοποιούμε τη μέθοδο υπολογισμού υπερόγκου πάνω από την καμπύλη Pareto. Παρατηρούμε ότι έχει προσεγγιστεί η μέγιστη τιμή όπως φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 5.18: Ο υπερόγκος συναρτήσει των επαναλήψεων της βελτιστοποίησης PESA II με μεταβλητό το ενεργό μήκος

Δηλαδή, πλέον οι επαναλήψεις δεν προσφέρουν καλύτερη καμπύλη Pareto. Η καμπύλη που σχηματίζεται είναι η εξής:



Σχήμα 5.19: Η τρισδιάστατη αναπαράσταση της καμπύλης Pareto και πώς προβάλλεται σε κάθε επίπεδο

Οπότε, στη συγκεκριμένη φάση προέκυψαν οι εξής 6 βέλτιστες μηχανές:

	Ροπή(Nm)	Μάζα (Kg)	Απόδοση	THD %	Κυμάτωση Ροπής %
Μηχανή 1b	11.71	3.543	0.9456	1.98	2.78
Μηχανή 2b	8.06	2.722	0.9470	2.78	2.50
Μηχανή 3b	12.50	3.682	0.9471	5.58	2.80
Μηχανή 4b	11.23	3.490	0.9499	2.58	2.99
Μηχανή 5b	12.45	4.365	0.9539	3.35	2.83
Μηχανή 6b	11.65	3.938	0.9542	1.65	3.42
<i>Αναφορά</i>	<i>10.44</i>	<i>3.826</i>	<i>0.9435</i>	<i>10.79</i>	<i>2.20</i>

Πίνακας 5.10: Οι μηχανές που προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση PESA II με μεταβλητό το ενεργό μήκος

Παρατηρώντας τις παραπάνω μηχανές, εντοπίζουμε ότι η μηχανές που έχουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι η Μηχανή 2b, καθώς έχει πολύ μικρότερο βάρος από τη δεδομένη μηχανή έχοντας όμως και μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης, η Μηχανή 6b καθώς έχει το μεγαλύτερο βαθμο απόδοσης από τις άλλες.

Θα πρέπει να σημειώσουμε όμως ότι στην περίπτωση της Μηχανής 6b, όχι μόνο το βάρος είναι λίγο μεγαλύτερο από αυτό της αρχικής μηχανής, αλλά ο βαθμός απόδοσης είναι μικρότερος από την Μηχανή 5 της προηγούμενης βελτιστοποίησης. Δηλαδή, αν το ζητούμενό μας είναι η υψηλή απόδοση, τότε θεωρούμε καλύτερη την προηγούμενη λύση, καθώς εξασφαλίζει μικρότερο βαρος και η ποιότητα της ισχύος είναι παρεμφερής.

Όσον αφορά τη Μηχανή 2b, παρόλο που αποτελεί μία δελεαστική λύση, καθώς συνολικά είναι η μηχανή με το μικρότερο βάρος και με απόδοση μεγαλύτερη από την αρχική, παρουσιάζει μικρότερη παραγόμενη ροπή. Επίσης, η τάση τροφοδοσίας που απαιτεί είναι πολύ μικρότερη της αρχικής, με τιμές που κυμαίνονται περί τα 13.7V rms. Σε μία άλλη εφαρμογή, πιθανώς θα ήταν μία ικανοποιητική λύση, γι αυτό αναλύεται περαιτέρω παρακάτω.

	Λειτουργικά Χαρακτηριστικά				
	T(Nm)	Μάζα(Kg)	Απόδοση	THD %	Κυμάτωση Ροπής %
Μηχανή 2b	8.06	2.722	0.9470	2.780	2.50
Μηχανή Αναφοράς	10.44	3.82649	0.9435	10.79	2.20
Απόκλιση (%)	-0.23	-0.29	0.004	-0.74	0.14

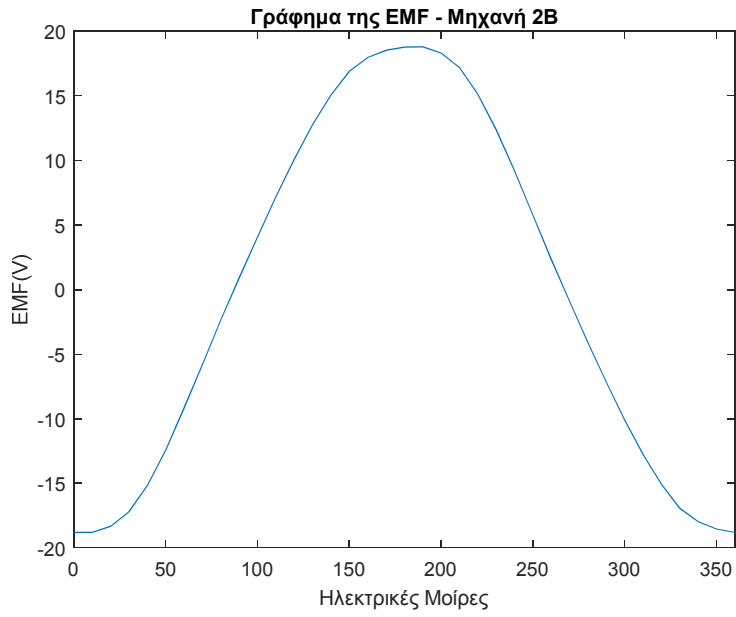
Πίνακας 5.11: Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μηχανής 2b

	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά								
	Πλάτος Δοντιού w	Πλάτος Δοντιού kw	Ακτίνα Διακένου	Ακτίνα Στάτη	Ποσοστό Μαγνητών	Ύψος Μαγνητών	Πάχος Στάτη	Πάχος Εξωτερικού Περιβλήματος	Ενεργό Μήκος
Μηχανή 2b	5.12	8.43	103.40	84.66	89.43	3.81	4.00	4.00	23.21
Μηχανή Αναφοράς	6.00	10.00	99.15	82.25	100.00	3.00	4.00	8.00	29.50
Απόκλιση (%)	-0.15	-0.16	0.04	0.03	-0.11	0.27	0.00	-0.50	-0.21

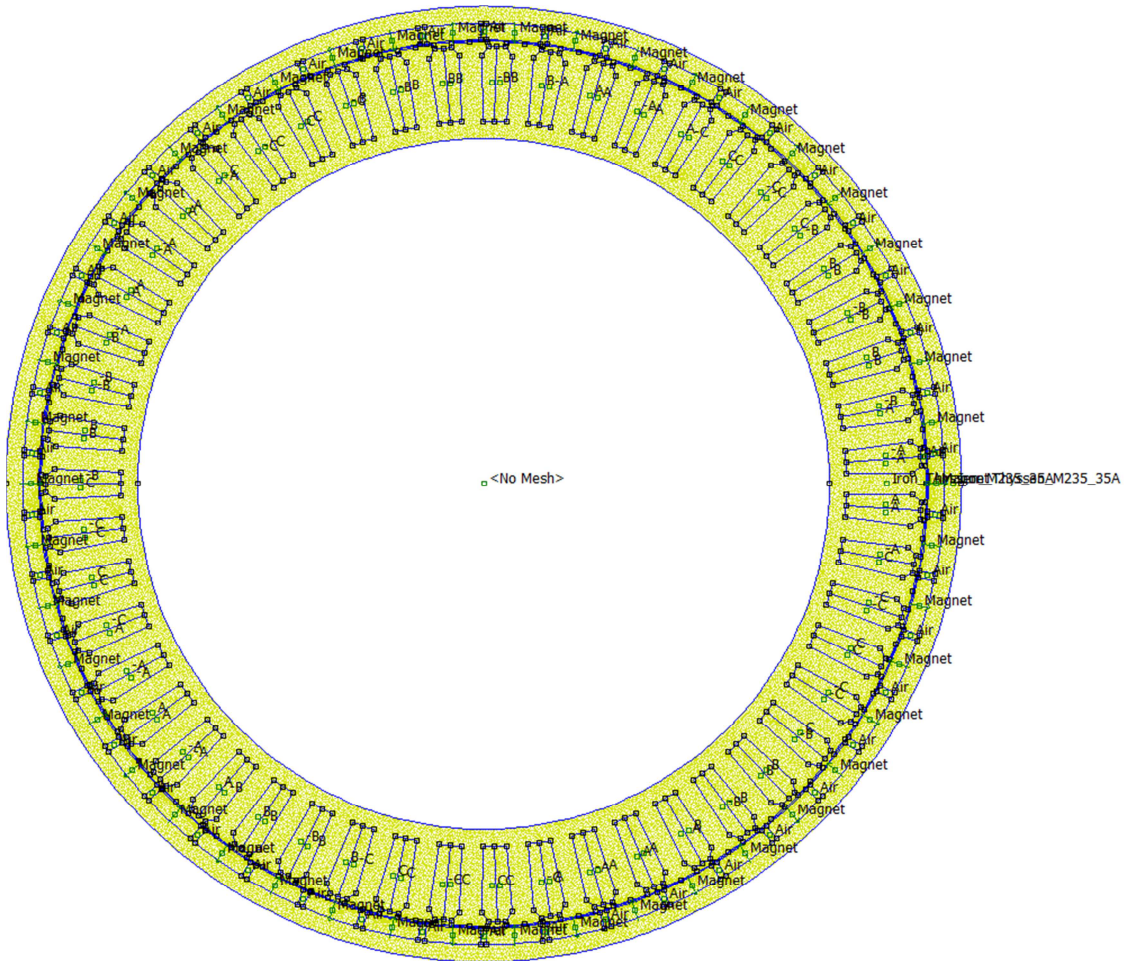
Πίνακας 5.12: Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μηχανής 2b

	Μέγεθος αύλακας	
	Επιφάνεια Αύλακας (mm ²)	Ακτίνα καλωδίου(mm)
Μηχανή 2b	107.98	0.3381
Μηχανή Αναφοράς	37.75	0.2825
Απόκλιση (%)	1.86	0.20

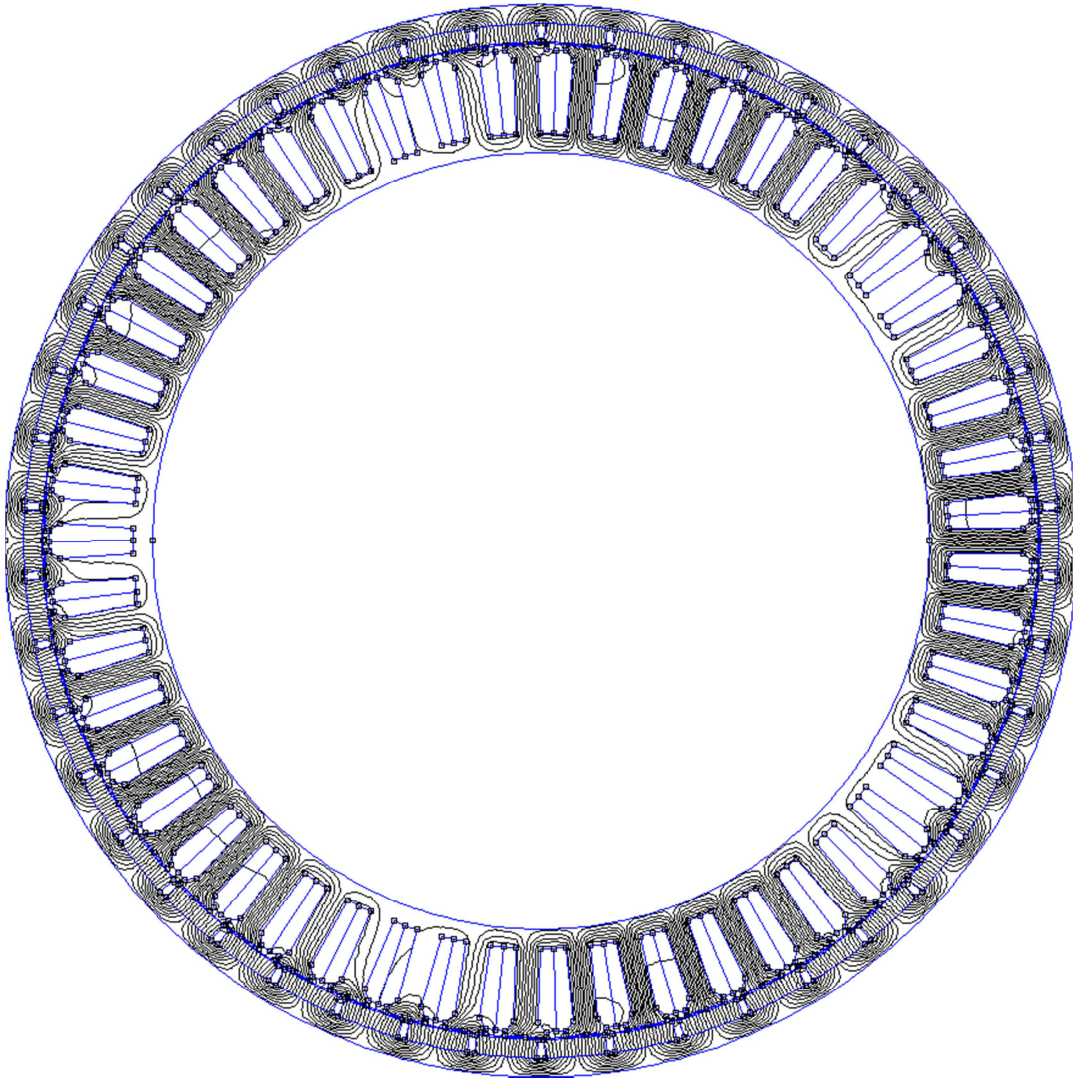
Πίνακας 5.13: Τα χαρακτηριστικά της αύλακας και του καλωδίου της μηχανής 2b



Σχήμα 5.20: Η κυματομορφή της EMF στη μηχανή 2b

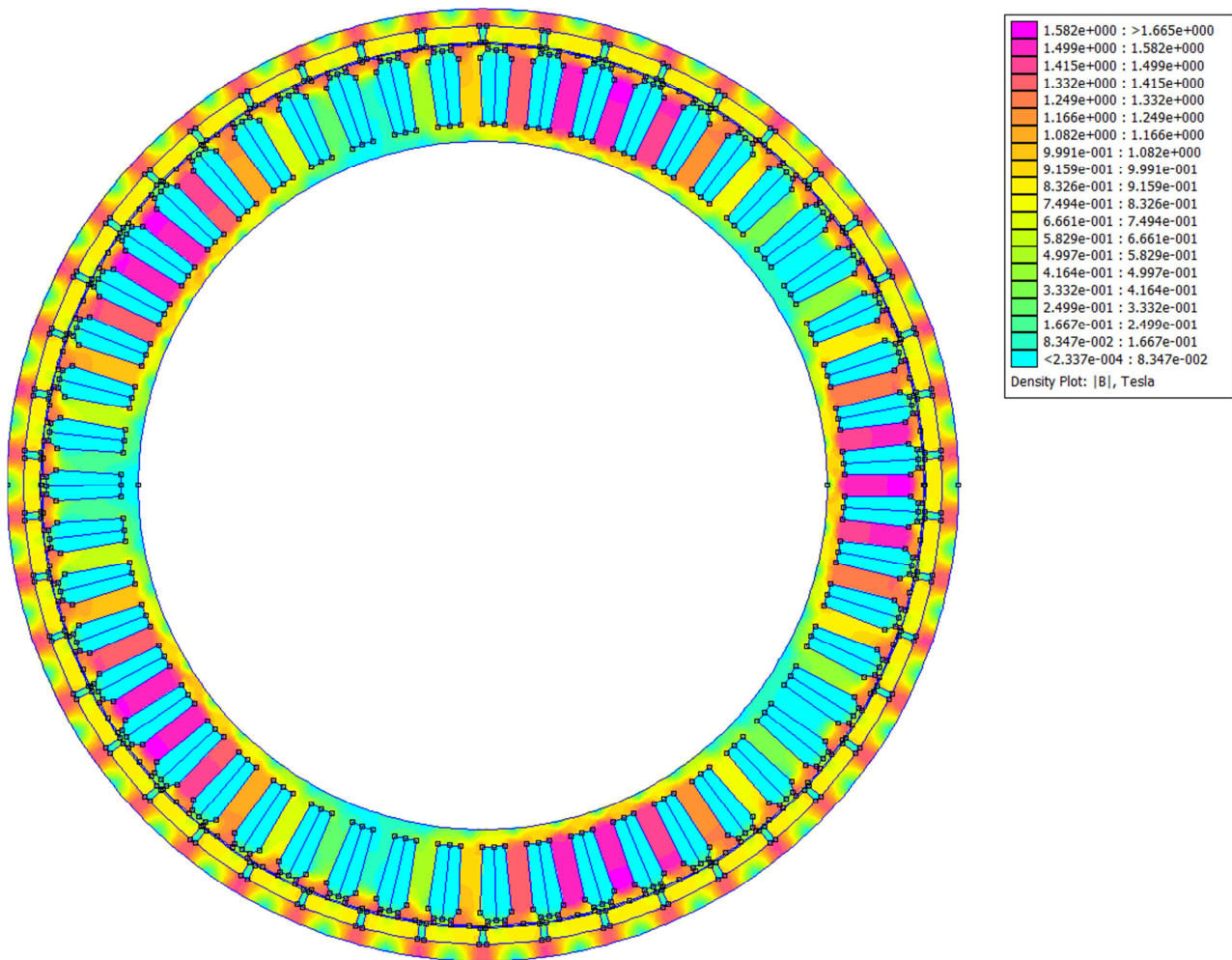


Σχήμα 5.21: Η γεωμετρία της μηχανής 2b μαζί με το πλέγμα



Σχήμα 5.22: Η ροή του μαγνητικού πεδίου στη μηχανή 2b

Ακόμα μία φορά έχουμε μικρότερα πλάτη δοντιών σε σχέση με την αρχική γεωμετρία και συντελεστή πληρότητας κάτω της μονάδας.



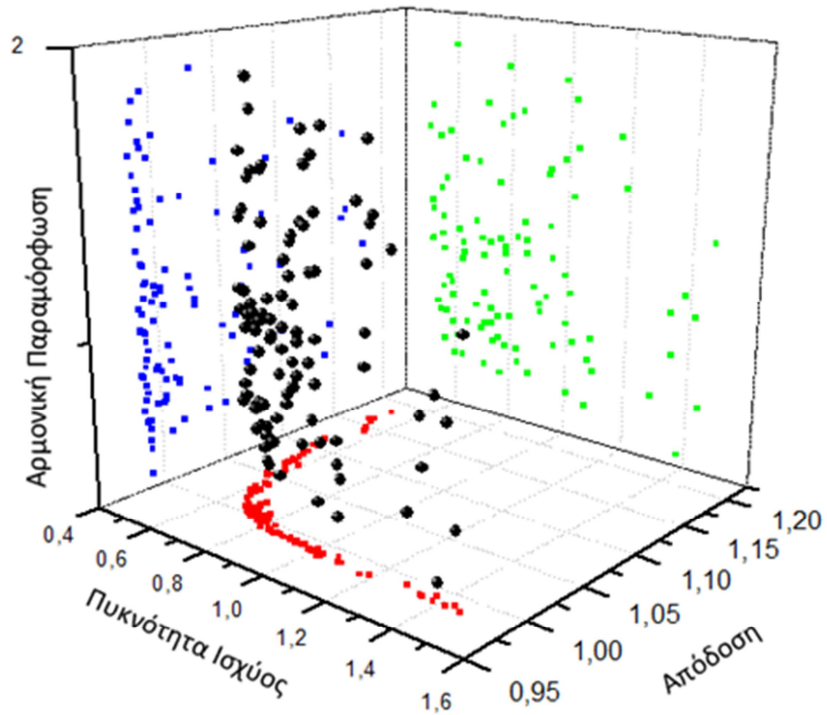
Σχήμα 5.23: Η κατανομή του πεδίου στη μηχανή 2b

Παρατηρούμε ότι και αυτή η νέα μηχανή είναι μετατοπισμένη σε μεγαλύτερη ακτίνα, αλλά με μικρότερο ενεργό μήκος. Να σημειωθεί ότι η κατανομή του μαγνητικού πεδίου αγγίζει λίγο μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τη γεωμετρία αναφοράς, καθώς η μέγιστη τιμή είναι περί τα 1.7T σε σχέση με την παλιότερη τιμή του 1.5T. Επίσης, η κατανομή του μαγνητικού πεδίου παρουσιάζει αρκετά έντονες ανομοιομορφίες προς τα άκρα, που δείχνει την σχετικά κακή αξιοποίηση του υλικού.

5.4.3 Βελτιστοποίηση με τον αλγόριθμο SPEA II

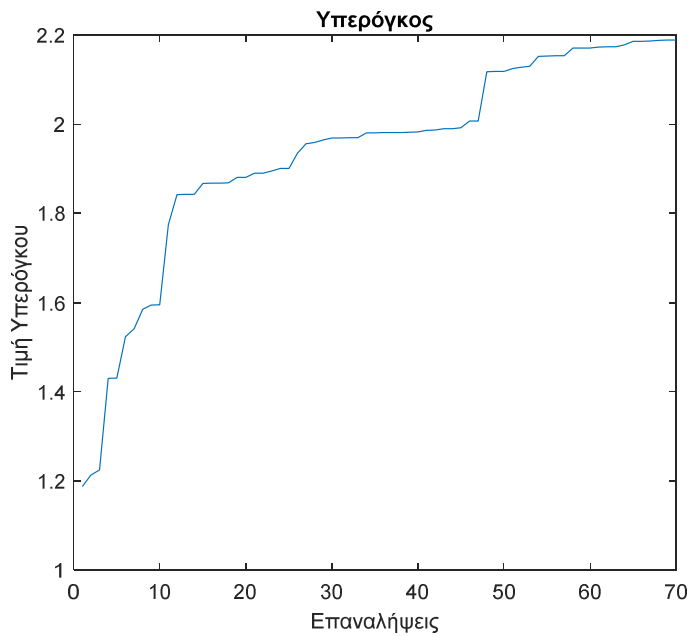
III. Βελτιστοποίηση SPEA II – Σταθερό ενεργό μήκος:

Ακολουθώντας τα ίδια βήματα μετεπεξεργασίας των αποτελεσμάτων με την περίπτωση της PESA II έχουμε το εξής μέτωπο Pareto μετά από 72 επαναλήψεις.



Σχήμα 5.24: Η τρισδιάστατη αναπαράσταση της καμπύλης Pareto και πώς προβάλλεται σε κάθε επίπεδο

Ο υπολογισμός του υπερόγκου σε αυτό το διάστημα έχει πάρει την παρακάτω μορφή. Παρατηρούμε την πολύ πιο αργή σύγκλιση σε σχέση με τον αλγόριθμο της PESA II, η οποία στις 30 πρώτες επαναλήψεις είχε πρακτικά ήδη φτάσει την μέγιστη τιμή της.



Σχήμα 5.25: Ο υπερόγκος συναρτήσει των επαναλήψεων της βελτιστοποίησης SPEA II με σταθερό το ενεργό μήκος

Οι μηχανές που προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση είναι οι παρακάτω:

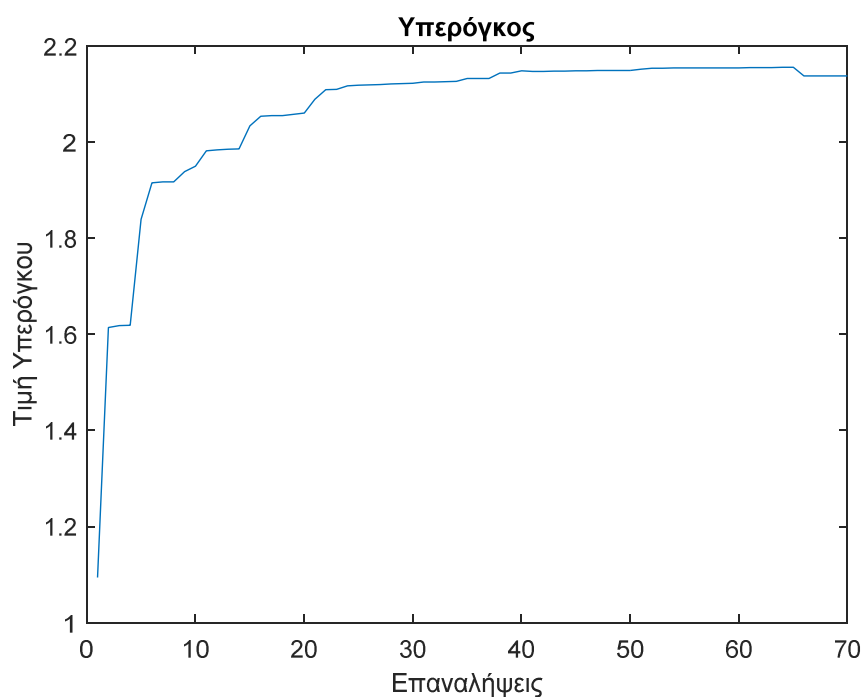
	Ροπή(Nm)	Μάζα (Kg)	Απόδοση	THD %	Κυμάτωση Ροπής %
Μηχανή 1c	10.76	2.886	0.944	2.82	3.11
Μηχανή 2c	9.78	2.966	0.945	1.84	2.71
Μηχανή 3c	10.33	3.040	0.946	3.58	2.91
Μηχανή 4c	10.96	3.341	0.951	2.21	2.39
Μηχανή 5c	11.03	3.531	0.951	4.12	1.85
Μηχανή 6c	9.89	3.294	0.951	2.38	3.50
Μηχανή 7c	10.64	3.745	0.952	2.78	2.74
Μηχανή 8c	10.14	3.385	0.952	1.78	3.49
Μηχανή 9c	9.76	3.335	0.952	1.53	3.83
Μηχανή 10c	10.40	3.393	0.953	1.72	3.93
Αναφορά	10.44	3.826	0.944	10.79	2.20

Πίνακας 5.14: Οι μηχανές που προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση SPEA II με σταθερό το ενεργό μήκος

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι αν και εμφανίζονται αρκετές μηχανές με πολύ καλά χαρακτηριστικά, ήδη από την αντίστοιχη βελτιστοποίηση της PESA II, έχουν βρεθεί μηχανές που καλύπτουν τις απαιτήσεις βάρους και απόδοσης.

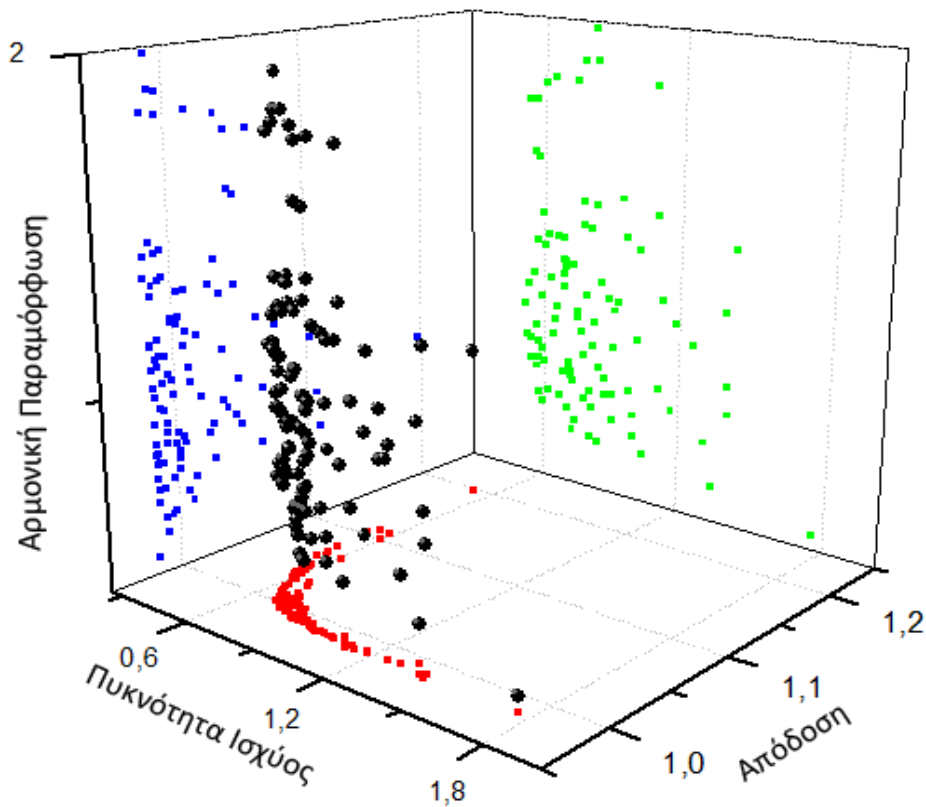
IV. Βελτιστοποίηση SPEA II –Μεταβλητό ενεργό μήκος:

Όπως λειτουργήσαμε στην περίπτωση του αλγορίθμου PESA, κινούμαστε και στην περίπτωση του αλγορίθμου SPEA, μεταβάλλοντας τώρα και το ενεργό μήκος. Μετά από 65 επαναλήψεις βλέπουμε ότι ο κώδικας φαίνεται να έχει καταλήξει στις βέλτιστες δυνατές λύσεις.



Σχήμα 5.26: Ο υπερόγκος συναρτήσει των επαναλήψεων της βελτιστοποίησης SPEA II με μεταβλητό το ενεργό μήκος

Παρατηρούμε ότι γενικώς ο αλγόριθμος της PESA έχει πιο γρήγορη σύγκλιση, όπως φαίνεται από τις τιμές που παίρνει ο υπερόγκος πάνω από την καμπύλη Pareto. Το πρόβλημα που μπορεί να προκαλέσει αυτό είναι ο εγκλωβισμός σε τοπικά ακρότατα, πράγμα που οδηγεί σε λύση όχι ολικά βέλτιστη. Η αλήθεια είναι βέβαια, ότι και στην συγκεκριμένη βελτιστοποίηση θα αναμέναμε ο υπερόγκος να πάρει την μέγιστη τιμή που έχει βρεθεί, δηλαδή 2.3 όπως προέκυψε από την χρήση του αλγορίθμου PESA II χωρίς την εξέταση του ενεργού μήκους, πράγμα που δεν γίνεται και αναδεικνύει έτσι την επιπλέον πολυπλοκότητα των πολλαπλών κριτηρίων. Παρόλα αυτά ο υπερόγκος στην περίπτωση της SPEA II- εξέταση ενεργού μήκους φτάνει το 2.16, ενώ στην περίπτωση της PESA II –εξέταση ενεργού μήκους φτάνει το 2.08. Παρακάτω παρουσιάζεται η καμπύλη Pareto όπως προκύπτει:



Σχήμα 5.27: Η τρισδιάστατη αναπαράσταση της καμπύλης Pareto και πώς προβάλλεται σε κάθε επίπεδο

Οι μηχανές που προέκυψαν από τη διαδικασία είναι οι εξής:

	Ροπή(Nm)	Μάζα (Kg)	Απόδοση	THD %	Κυμάτωση Ροπής %
Μηχανή 1d	11.78	3.336	0.9437	0.040	3.39
Μηχανή 2d	12.71	3.369	0.9437	0.061	2.26
Μηχανή 3d	11.20	3.361	0.9449	0.021	2.13
Μηχανή 4d	11.78	3.285	0.9453	0.031	3.75
Μηχανή 5d	10.35	3.113	0.9459	0.021	2.60
Μηχανή 6d	10.88	3.395	0.9473	0.027	1.97
Μηχανή 7d	12.50	3.582	0.9483	0.040	3.00
Μηχανή 8d	12.30	3.828	0.9493	0.064	2.38
Μηχανή 9d	11.02	3.546	0.9498	0.045	2.61
Μηχανή 10d	11.83	3.572	0.9502	0.037	3.24
Μηχανή 11d	13.03	3.956	0.9512	0.034	3.69
Μηχανή 12d	12.25	4.127	0.9517	0.033	2.24
Μηχανή 13d	12.60	4.072	0.9522	0.046	2.34
Μηχανή 14d	12.34	4.141	0.9543	0.017	2.94
Μηχανή 15d	12.33	4.460	0.9558	0.012	3.17
<i>Αναφορά</i>	<i>10.44</i>	<i>3.826</i>	<i>0.9435</i>	<i>0.108</i>	<i>2.20</i>

Πίνακας 5.15: Οι μηχανές που προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση SPEA II με μεταβλητό το ενεργό μήκος

Όπως φαίνεται παραπάνω προέκυψε μεγαλύτερο πλήθος μηχανών, με τις πιο αξιόλογες περιπτώσεις αυτές της Μηχανής 5d, με το ελάχιστο βάρος σε συνδυασμό με τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και οι Μηχανές 11d με λίγο μεγαλύτερο βάρος (3.398%) και αρκετά μεγαλύτερη απόδοση (0.82%) και 15d με αρκετά μεγαλύτερο βάρος (16.6%) και την μέγιστη απόδοση (1.3% αύξηση). Παρ'όλα αυτά παρατηρούμε ότι οι μηχανές που έχουν ήδη βρεθεί, αποτελούν ικανοποιητικότερες λύσεις, αφού εξασφαλίζουν καλύτερες τιμές τόσο βάρους όσο και απόδοσης, που είναι και τα βασικότερα κριτήρια επιλογής μηχανής.

5.4.4 Θερμικός έλεγχος των βελτιστοποιημένων γεωμετριών

Παρακάτω παρουσιάζεται μία στοιχειώδης θερμική ανάλυση της δοθείσας γεωμετρίας καθώς και των βελτιστοποιημένων γεωμετριών, ώστε να εξετάσουμε αν δημιουργείται κάποιο θερμικό πρόβλημα στις βέλτιστες μηχανές. Σαφώς το να έχουμε τιμές πειραματικές για τη δοθείσα μηχανή, ειδικά στο εσωτερικό δεν είναι τόσο εύκολο και δεδομένου ότι η θερμική ανάλυση είναι μία ιδιαίτερος πολύπλοκη διαδικασία που κάνει χρήση πολλών παραμέτρων και αρκετών μοντέλων, όπως θερμικών κυκλωμάτων, δείχνει και το προς τα που προσανατολίζεται η εν λόγω ανάλυση. Δεν έχει ως σκοπό, αυτό καθεαυτό, μία μεγάλης ακριβείας πρόβλεψη της θερμικής συμπεριφοράς της μηχανής, ιδίως δεδομένου ότι αυτό είναι κάτι που εξαρτάται κατά

ένα πολύ μεγάλο βαθμό από τα υλικά για τα οποία δεν έχουμε ακριβείς πληροφορίες, αλλά μία συγκριτική ανάλυση μεταξύ της αρχικής γεωμετρίας και των βελτιστοποιημένων, ώστε να εξασφαλίζεται ότι δεν θα προκύψουν θερμικά προβλήματα.

Η θερμική ανάλυση έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος Solidworks. Η διαδικασία αρχικά προϋποθέτει την δημιουργία κατάλληλης γεωμετρίας της μηχανής με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που έχουμε λάβει τόσο από τα πειραματικά δεδομένα όσο και από τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Στο καθεαυτό κομμάτι της θερμικής ανάλυσης αρχικά έπρεπε να οριστούν τα υλικά των διαφόρων τμημάτων της μηχανής. Όπως αναφέρθηκε, δεν έχουμε ακριβείς τιμές για τα υλικά και ούτως ή άλλως η ανάλυση είναι περισσότερο συγκριτική, οπότε χρησιμοποιήθηκαν προσεγγιστικές τιμές από πίνακες υλικών. Συγκεκριμένα θέσαμε τις εξής ιδιότητες:

	Σταθερά Θερμικής Διαστολής(1/K)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/(m.K))	Ειδική Θερμότητα(J/(kg.K)
Σίδηρος	1.20E-05	45	510
Μαγνήτες	3.40E-06	8.96	502
Χαλκός	2.40E-05	390	390
Αέρας	0.003	0.0285	1009

Πίνακας 5.16: Τα θερμικά χαρακτηριστικά των διαφόρων υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση

Για την ανάλυση, επίσης, ορίστηκαν οι επαφές μεταξύ των σωμάτων: των πηνίων με τα δόντια του στάτη και των υπόλοιπων τμημάτων, στάτης, άξονας, κέλυφος, ρότορας, μαγνήτες, διάκενο, μεταξύ τους.

Τέλος, ορίστηκαν και τα θερμικά φορτία ως εξής:

- Συναγωγής στο εξωτερικό περίβλημα τιμής $10W/(m^2.K)$ με θερμοκρασία 298K
- Θερμική ισχύς ίση με τις απώλειες χαλκού 13.838W συνολικά στα πηνία
- Θερμική ισχύς ίση με τις απώλειες σιδήρου στον ρότορα 1.591W συνολικά στο ρότορα
- Θερμική ισχύς ίση με τις απώλειες σιδήρου στον στάτη 5.878W συνολικά στο στάτορα

Συγκεκριμένα σε κάθε περίπτωση είχαμε τα εξής φορτία απωλειών:

	Απώλειες Χαλκού (W)	Απώλειες Στάτη (W)	Απώλειες Ρότορα (W)
Μηχανή Αναφοράς	13.84	5.88	1.59
Μηχανή 5a	8.49	6.23	1.64
Μηχανή 6a	13.83	5.40	2.01
Μηχανή 2a	8.24	5.33	1.66

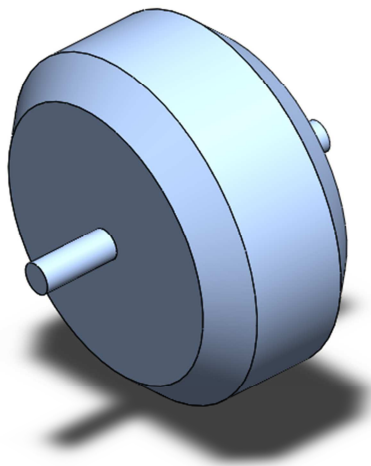
Πίνακας 5.17: Τα θερμικά φορτία που τέθηκαν σε κάθε μηχανή στη θερμική ανάλυση

Τα θερμικά φορτία προκύπτουν από τις απώλειες ισχύος όπως προκύπτουν από την προσομοίωση καθώς χάνονται με τη μορφή θερμότητας. Όσον αφορά την τιμή της συναγωγής είναι μία τυπική τιμή φυσικού ανεμισμού, η οποία αναπαριστά τον ανεμισμό που εμφανίζεται στο περίβλημα της μηχανής στην περίπτωση σταθερής θέσης.

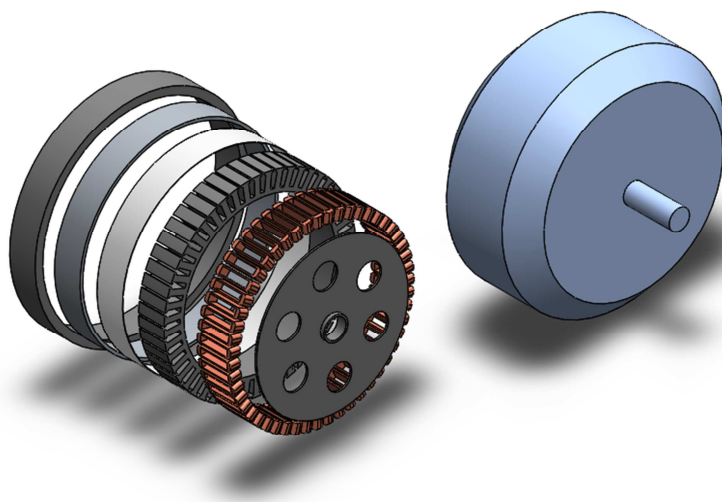
Στο εσωτερικό της μηχανής πρέπει να σημειώσουμε ότι υπάρχει αέρας, οπότε εξακολουθούν να υπάρχουν φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας μεταξύ στάτη – ρότορα. Αυτό που πρέπει να υπογραμμιστεί είναι ότι δεδομένου ότι δεν γνωρίζουμε τη θερμοκρασία που αγγίζει εσωτερικά ο αέρας της μηχανής και του ότι δεν υπάρχει μεγάλη κυκλοφορία αέρα, ο τρόπος για να αναπαραστήσουμε τη μεταφορά θερμότητας είναι με χρήση στο διάκενο ενός υλικού-σφήνας που έχει τα θερμικά χαρακτηριστικά του αέρα. Να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα με αυτή τη θεώρηση ελαφρώς υπερεκτιμούν την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία, όσον αφορά το κέλυφος καθώς η μεταφορά θερμότητας είναι πιο έντονη εξαιτίας της συναγωγής. Επίσης, μία τελευταία σημείωση πρέπει να γίνει όσον αφορά τον άξονα. Ο άξονας κανονικά δεν πρέπει να είναι σφηνωμένος πάνω στο περίβλημα, καθώς αυτό θα πρέπει να περιστρέφεται όντας συνδεδεμένο με το στάτη. Θα πρέπει να παρεμβάλονται κάποια ρουλεμάν. Θεωρώντας τα ρουλεμάν πολύ θερμικά αγωγίμα και για λόγους απολποίησης του μοντέλου αναπτύχθηκε ως έχει.

Να σημειωθεί, τέλος, ότι η ανάλυση είναι σταθερής κατάστασης.

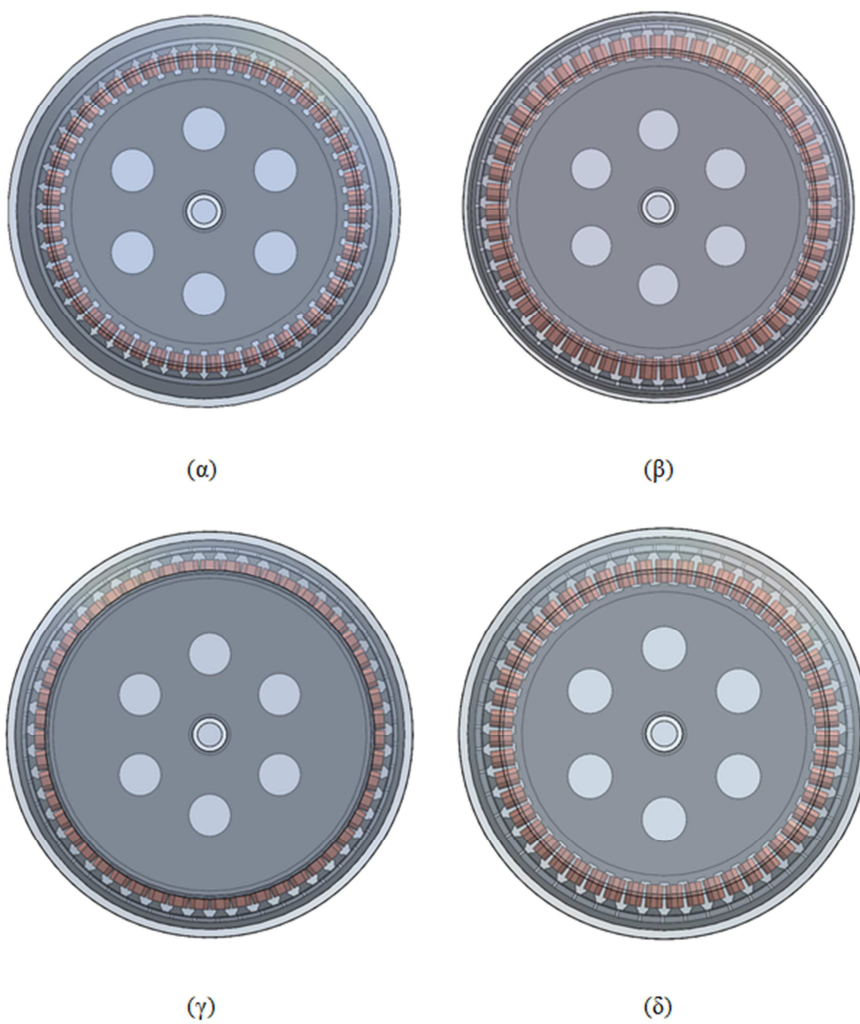
Παρακάτω παρουσιάζονται οι γεωμετρίες των τεσσάρων μηχανών όπως προκύπτουν από τη σχεδίαση στο Solidworks και κατόπιν για καθεμία ξεχωριστά γίνεται η θερμική ανάλυση της. Τα θερμικά γραφήματα είναι υπό την ίδια κλίμακα ώστε να είναι ευκολότερη η σύγκριση της θερμικής συμπεριφοράς των 4 μηχανών, χάνοντας όμως έτσι λίγο από την ακρίβεια του γραφήματος. Για μεγαλύτερη ακρίβεια στο παράρτημα παρατίθενται τα θερμικά γραφήματα κάθε μηχανής ώστε να ευνοείται η καλύτερη κατανόηση της κατανομής της θερμοκρασίας.



Σχήμα 5.28: Η πλήρης δομή της μηχανής (εικονιζόμενη η αναφοράς)

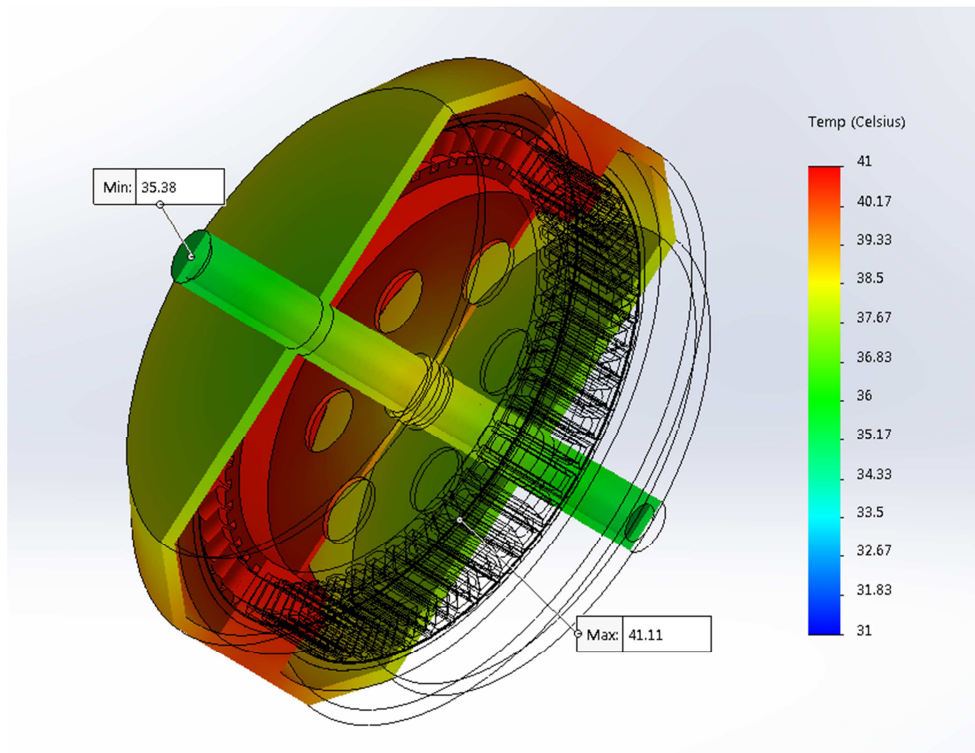


Σχήμα 5.29: Λεπτομέρεια των επιμέρους τμημάτων της μηχανής (εικονιζόμενη η αναφοράς)

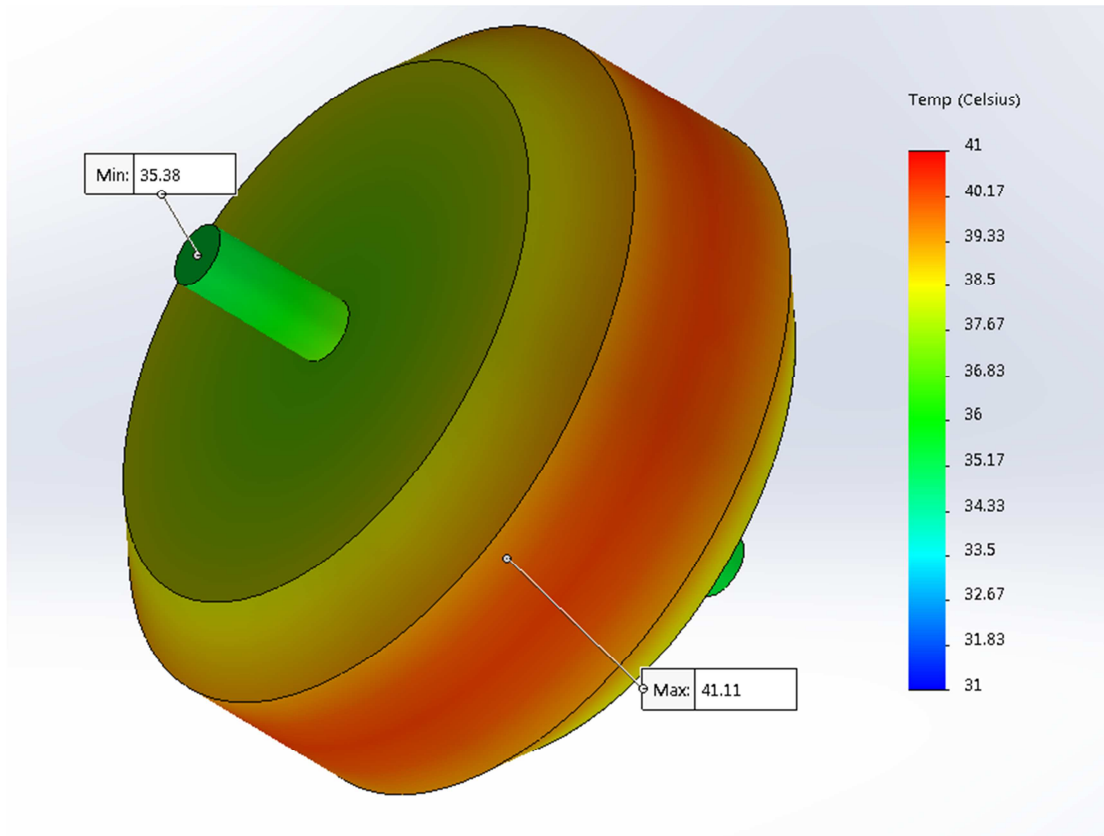


Σχήμα 5.30: Σύγκριση της γεωμετρίας των τεσσάρων μηχανών: (α) Αναφοράς, (β) Μηχανή 5α, (γ) Μηχανή 6α, (δ) Μηχανή 2b

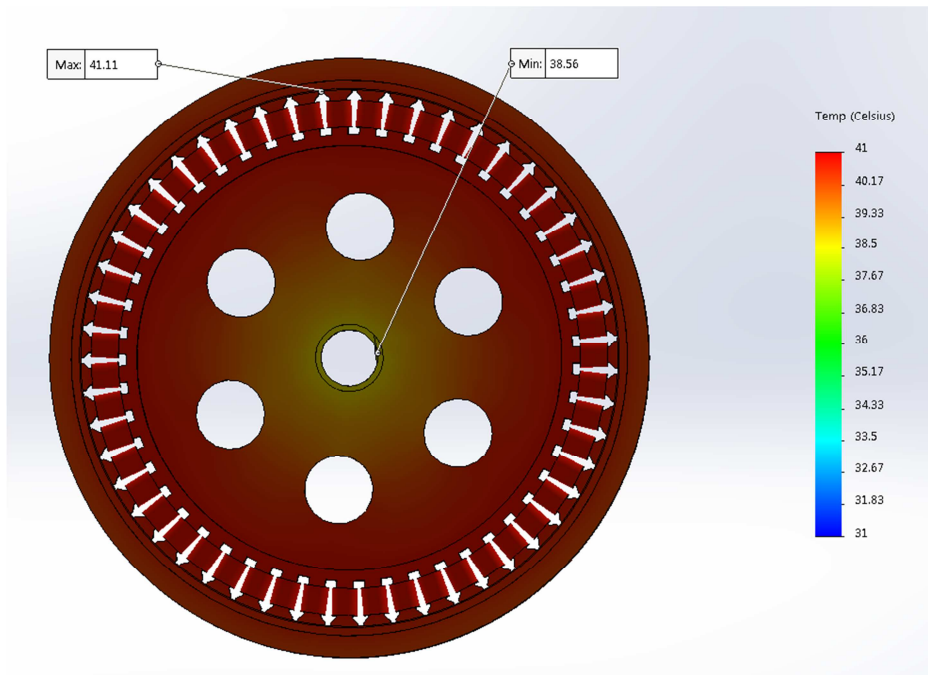
I. Θερμικά διαγράμματα μηχανής αναφοράς:



Σχήμα 5.31: Η θερμική ανάλυση στην μηχανή αναφοράς συνολικά



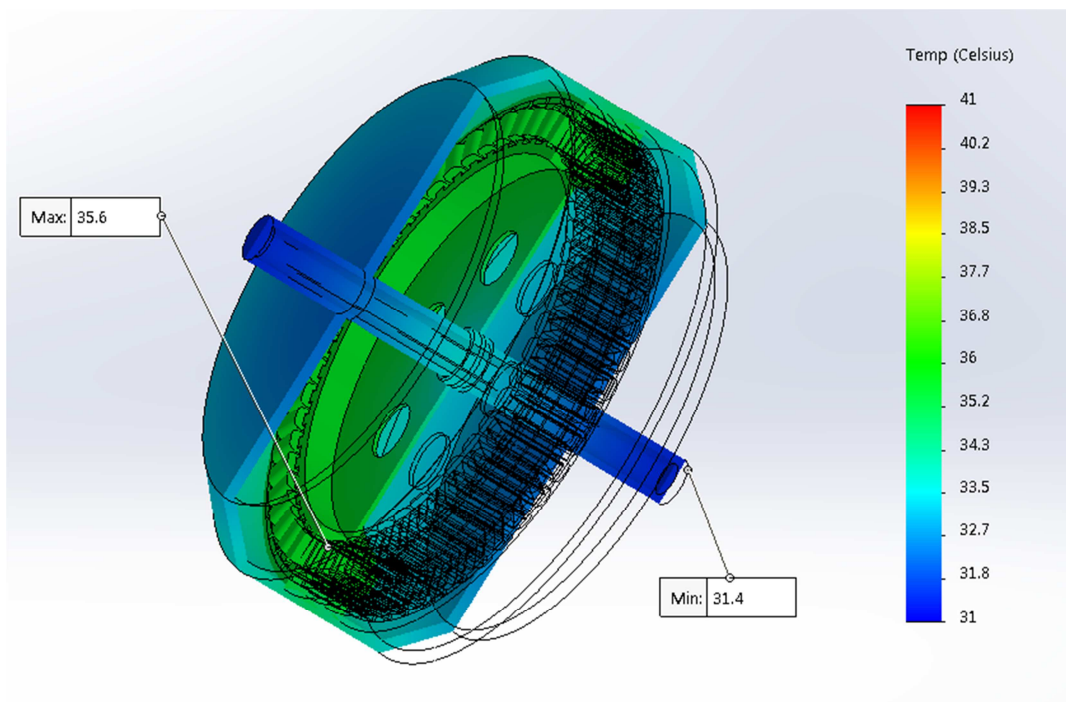
Σχήμα 5.32: Η θερμική ανάλυση στο κέλυφος της μηχανή αναφοράς



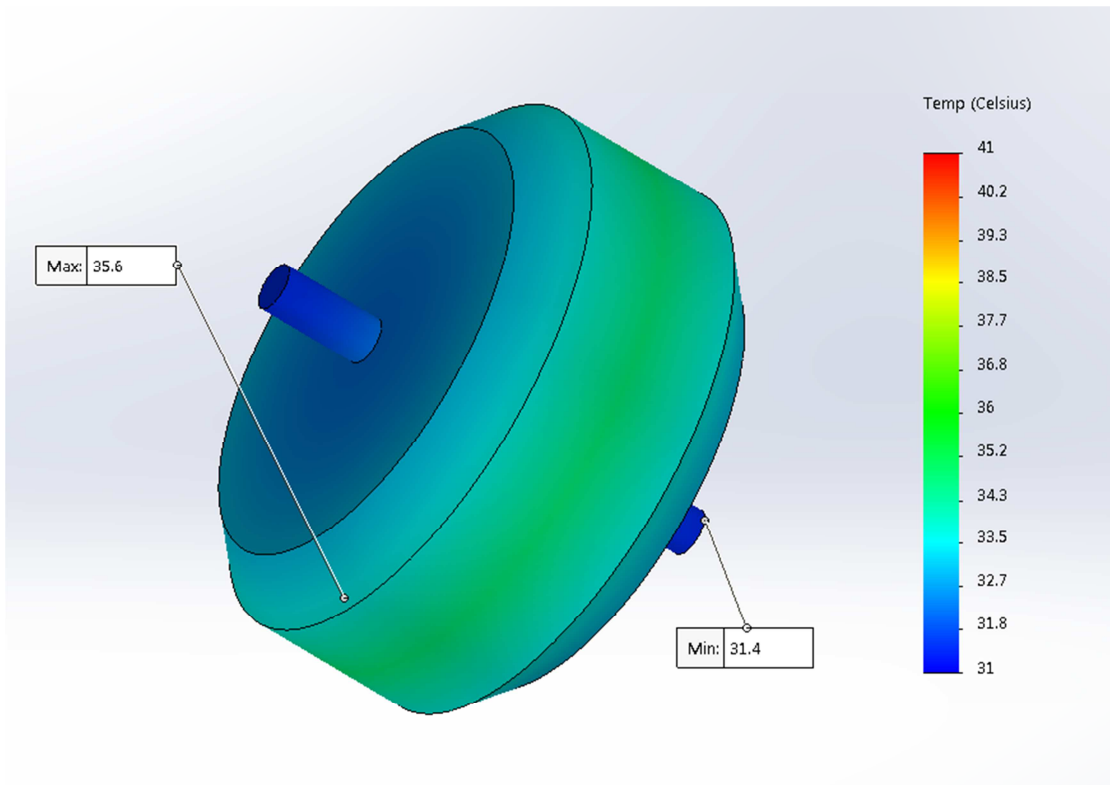
Σχήμα 5.33: Η θερμική ανάλυση στο εσωτερικό της μηχανή αναφοράς

Όπως φαίνεται στα παραπάνω γραφήματα, η θερμοκρασία στη μηχανή αναφοράς δεν υπερβαίνει τους 42°C, παρουσιάζοντας μία καλή θερμική συμπεριφορά. Σαφώς πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η ανάλυση αφορά όχι την πιο ακραία φόρτισή της, αλλά την τυπική σε 7.4A, σε 350 στροφές ανά λεπτό, οπότε κάποιος θα αναμένει υψηλότερες τιμές σε υψηλότερες φορτίσεις.

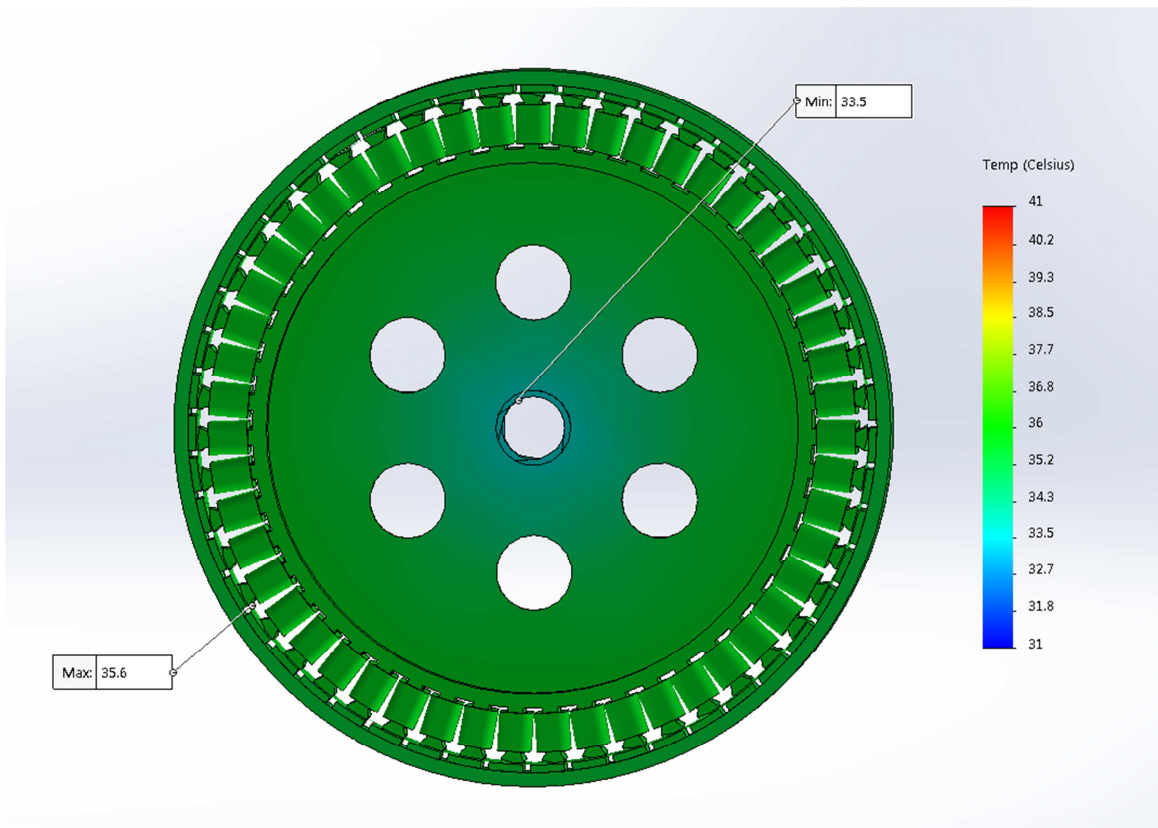
II. Θερμικά διαγράμματα μηχανής 5a



Σχήμα 5.34 : Η θερμική ανάλυση στην μηχανή 5a συνολικά



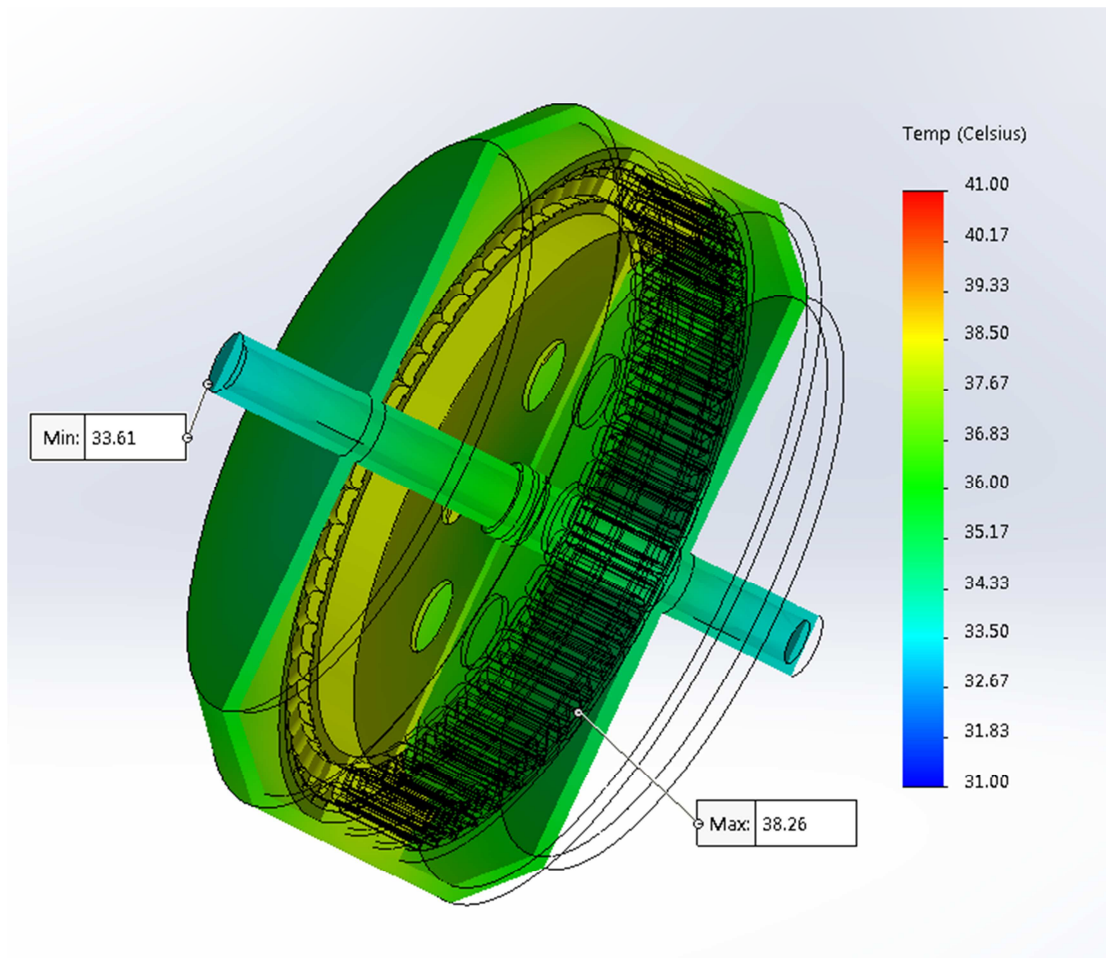
Σχήμα 5.35 : Η θερμική ανάλυση στο κέλυφος της μηχανής 5a



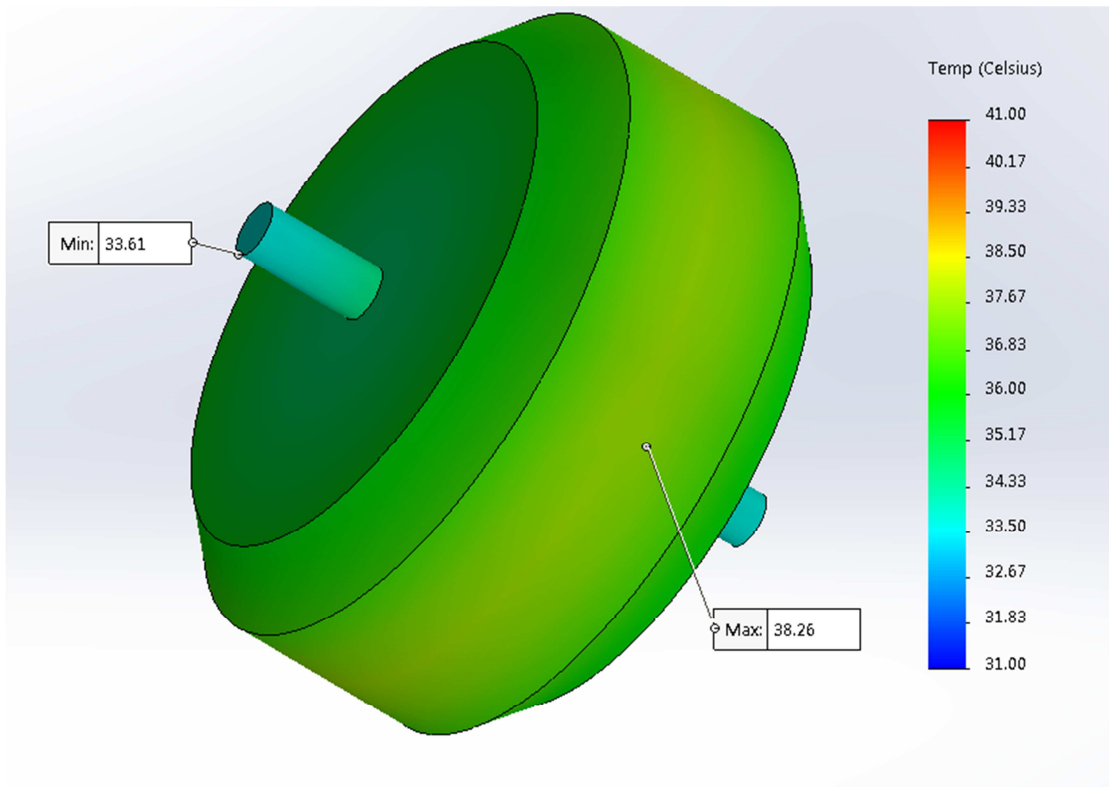
Σχήμα 5.36: Η θερμική ανάλυση στο εσωτερικό της μηχανής 5a

Παρατηρούμε στην μηχανή 5A καλύτερη συμπεριφορά από τη μηχανή αναφοράς, αφού όπως φαίνεται και παραπάνω στα γραφήματα, η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στη μηχανή είναι 35.6°C. Πιθανώς, ο λόγος για τον οποίο γίνεται αυτό, είναι ότι η μηχανή έχει πιο τετραγωνισμένες αύλακες και η ακτίνα διακένου έχει πάρει μεγαλύτερες τιμές, επιτρέποντας μεγαλύτερη μεταφορά θερμότητας στην περιφέρεια της μηχανής λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειας.

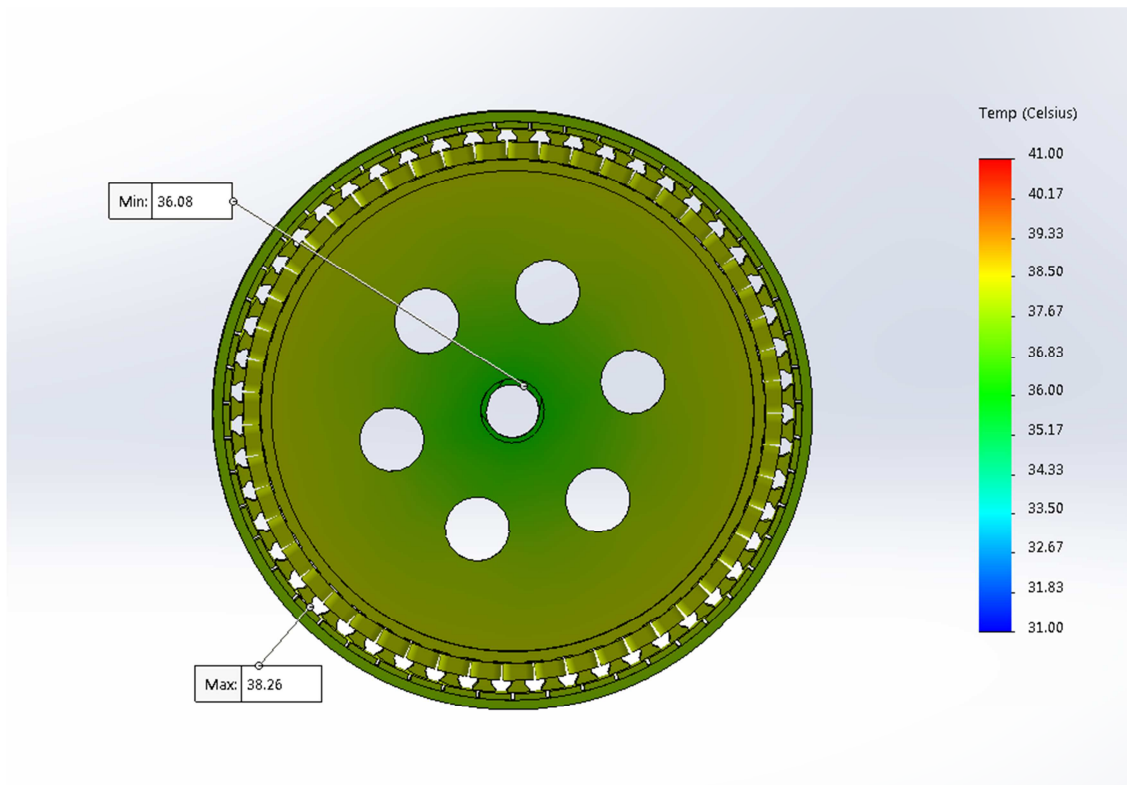
III. Θερμικά διαγράμματα μηχανής 6a



Σχήμα 5.37: Η θερμική ανάλυση στην μηχανή 6a συνολικά



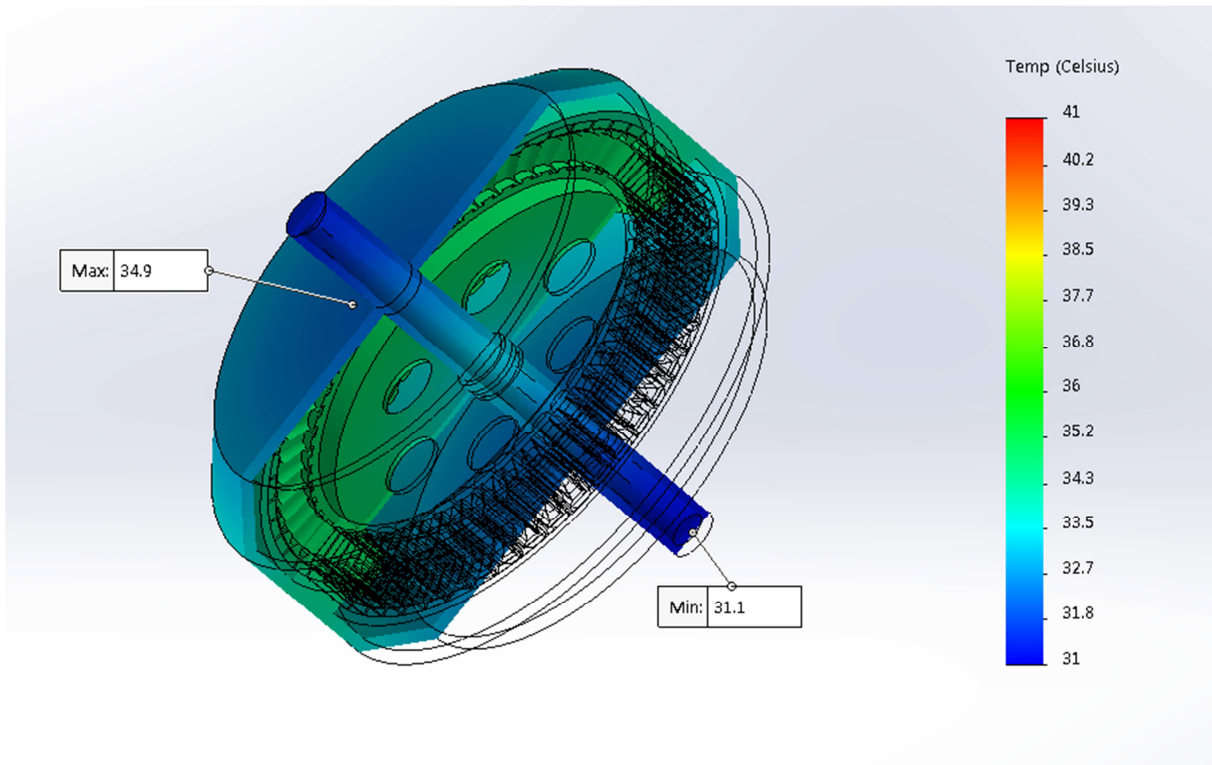
Σχήμα 5.38: Η θερμική ανάλυση στο κέλυφος της μηχανής 6α



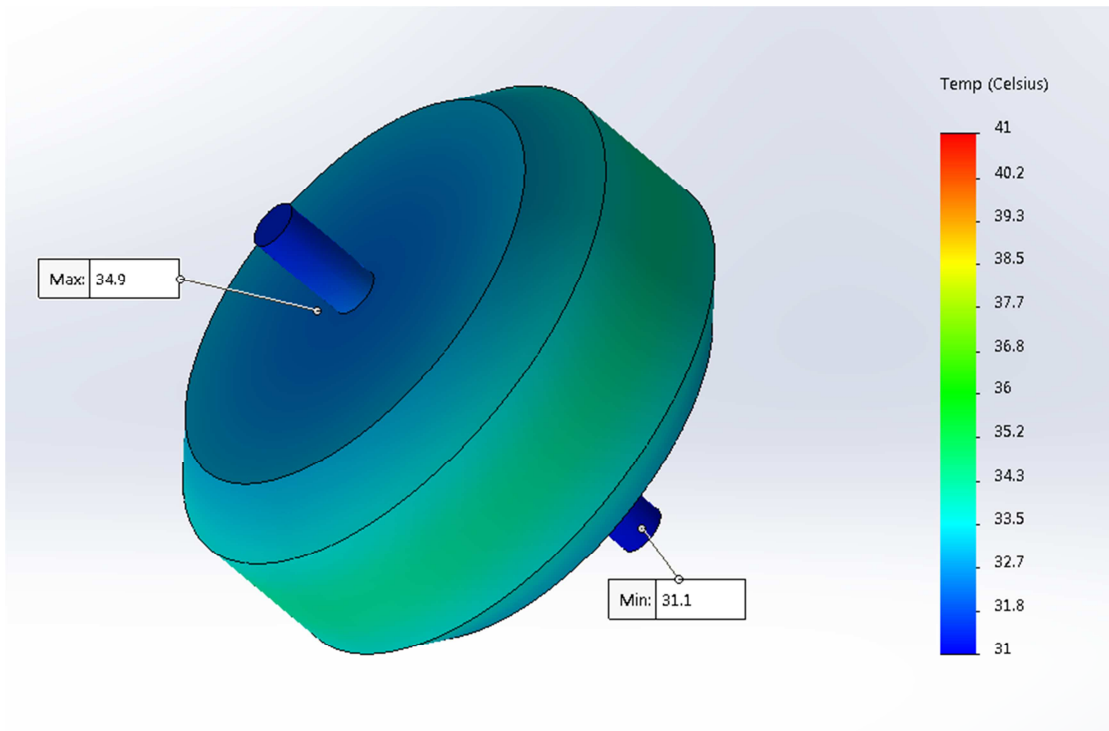
Σχήμα 5.39: Η θερμική ανάλυση στο εσωτερικό της μηχανής 6α

Παρόμοια με πριν, η μηχανή 6a έχει καλύτερη συμπεριφορά από τη μηχανή αναφοράς, αφού όπως φαίνεται στα γραφήματα, η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στη μηχανή είναι 38.26°C έναντι 41.11 °C. Αυτό δικαιολογείται αντίστοιχα από την μεγαλύτερη ακτίνα διακένου. Σε σύγκριση με τη μηχανή 5A, όμως, εμφανίζει χειρότερη θερμική συμπεριφορά, πιθανότατα λόγω της μικρότερης επιφάνειας αυλακιών. Να σημειωθεί ότι όπως προέκυψε από τα δεδομένα των γεωμετριών των μηχανών, η μηχανή 5a έχει σχεδόν 1.5 φορά μεγαλύτερη επιφάνεια αύλακας από την μηχανή 6a.

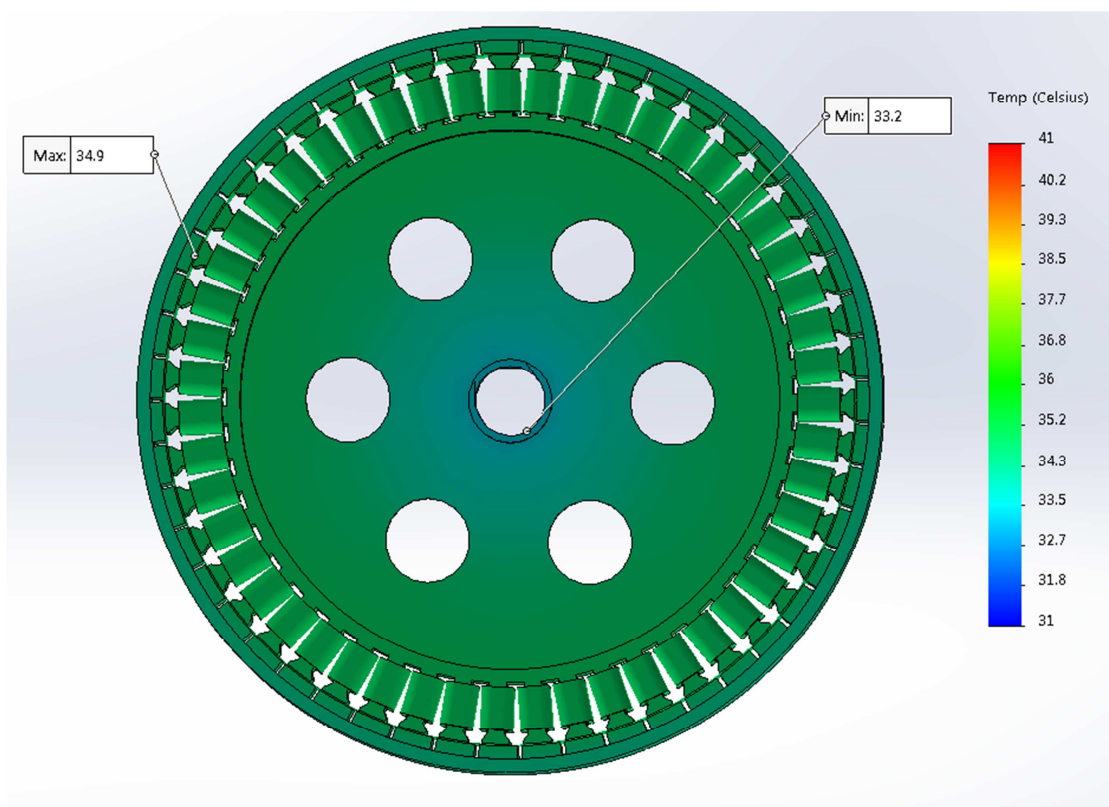
IV. Θερμικά διαγράμματα μηχανής 2b



Σχήμα 5.40: Η θερμική ανάλυση στην μηχανή 2b συνολικά



Σχήμα 5.41: Η θερμική ανάλυση στο κέλυφος της μηχανής 2b



Σχήμα 5.42: Η θερμική ανάλυση στο εσωτερικό της μηχανής 2b

Τέλος, και η μηχανή 2b έχει πολύ καλή θερμική συμπεριφορά, φτάνοντας 34.9°C μέγιστη τιμή. Οπότε συμπεραίνουμε ότι καμία από τις παραπάνω μηχανές δεν παρουσιάζει κάποιο θερμικό πρόβλημα.

5.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα:

Παρακάτω για καλύτερη εποπτική παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλα τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν κατά τις παραπάνω διαδικασίες.

Αρχικά ο πίνακας που συνοψίζει τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά των μηχανών σε σχέση με την αρχική, τόσο σε απόλυτο μέγεθος όσο και ως ποσοστιαία μεταβολή:

	T(Nm)	Μάζα(Kg)	Απόδοση	THD (%)	Κυμάτωση Ροπής (%)
<i>Αναφοράς</i>	10.44	3.8265	0.9435	10.79	2.20
Μηχανή 5a	10.25	3.6996	0.9548	2.25	3.77
Μηχανή 6a	10.98	2.8657	0.9458	2.42	2.95
Μηχανή 2b	8.06	2.7220	0.9470	2.78	2.50

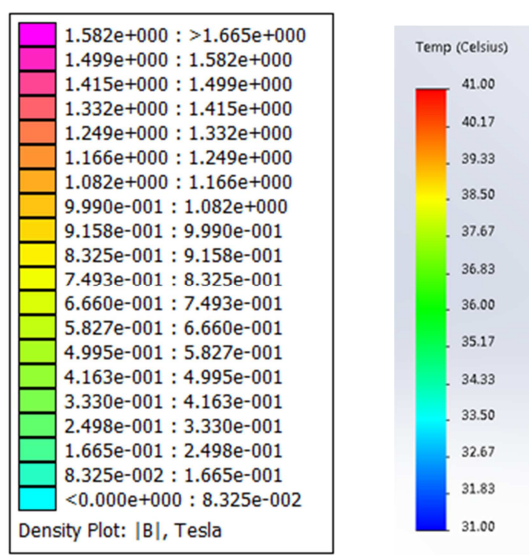
Πίνακας 5.18: Οι τιμές των κυριότερων χαρακτηριστικών όλων των επιλεγμένων μηχανών

	T(%)	Μάζα(%)	Απόδοση(%)	THD (%)	Κυμάτωση Ροπής (%)
Μηχανή 5a	-1.78	-3.32	1.20	-79.15	71.31
Μηχανή 6a	5.23	-25.11	0.24	-77.57	34.13
Μηχανή 2b	-22.75	-28.87	0.37	-74.24	13.68

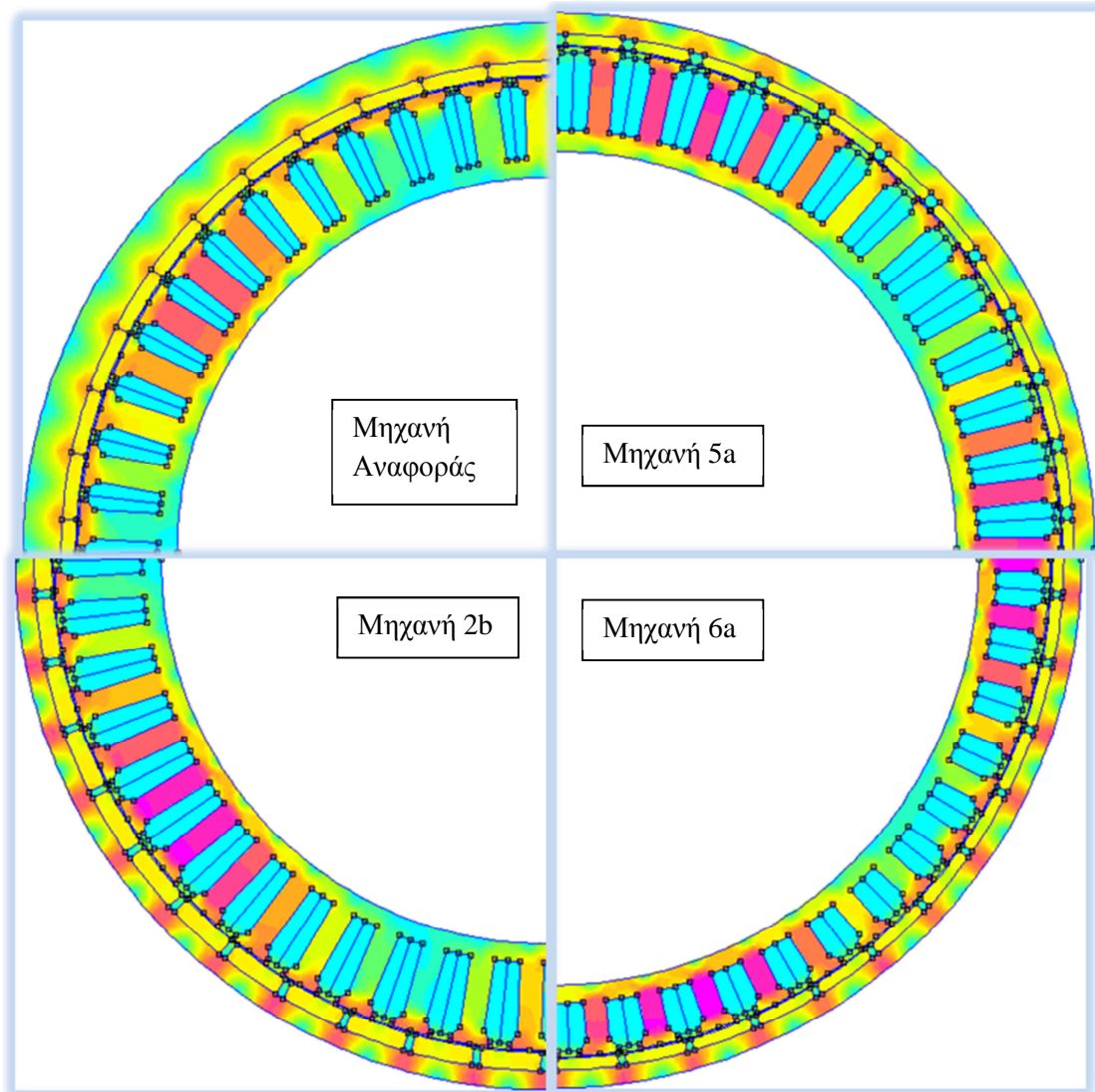
Πίνακας 5.19: Οι τιμές των κυριότερων χαρακτηριστικών όλων των βελτιστοποιημένων μηχανών ως ποσοστιαία απόκλιση από την μηχανή αναφοράς

Οι μηχανές 6a και 2b πετυχαίνουν την μέγιστη μείωση του βάρους, διατηρώντας έναν καλό βαθμό απόδοσης, ενώ η μηχανή 5a αυξάνει αρκετά τον βαθμό απόδοσης μειώνοντας λίγο το βάρος της μηχανής. Όλες οι μηχανές εξασφαλίζουν πολύ καλύτερες τιμές THD, αλλά αυξάνουν αρκετά την κυμάτωση ροπής.

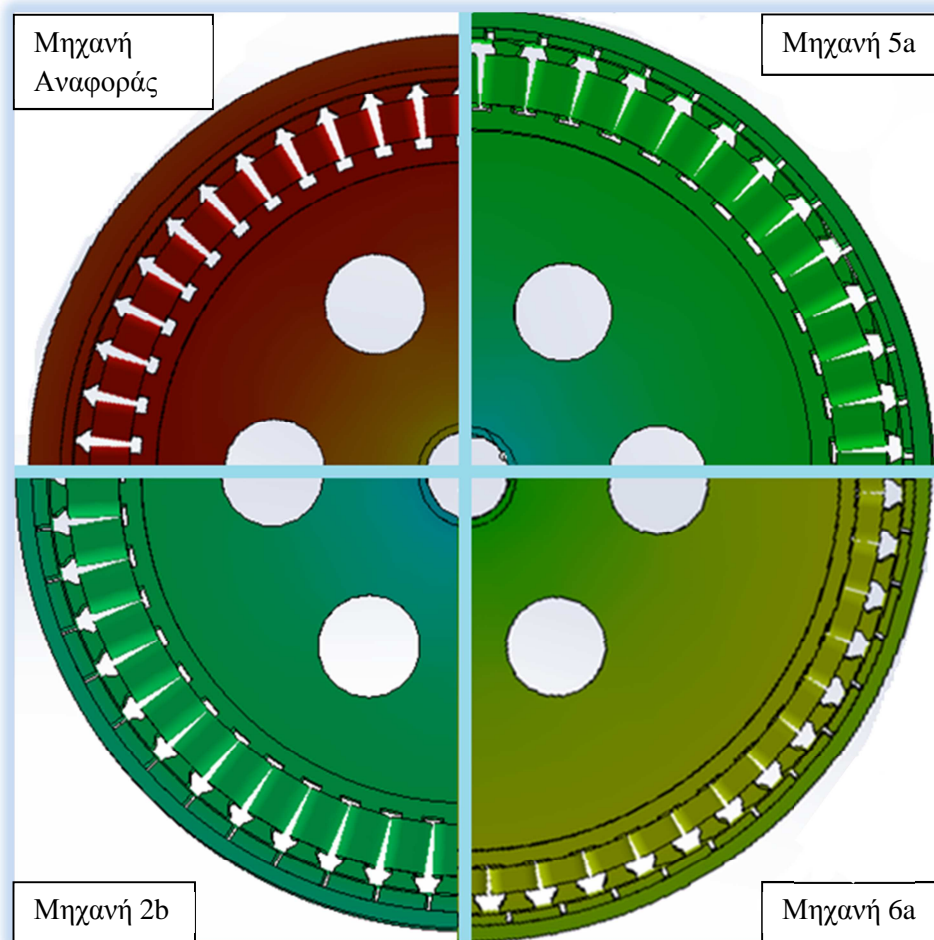
Η κατανομή του μαγνητικού πεδίου συγκριτικά στις τέσσερις μηχανές, είναι όπως φαίνεται στην εικόνα 5.31, όπου παρατηρούμε και τις τέσσερις να έχουν τιμές μαγνητικού πεδίου σε ανεκτά επίπεδα χωρίς να επιβαρύνουν ιδιαίτερα τις απώλειες πυρήνα.



Σχήμα 5.43: Υπομνήματα εικόνας 5.42 και 5.43 αντίστοιχα



Σχήμα 5.44: Κατανομή μαγνητικού πεδίου συγκριτικά στις μηχανές



Σχήμα 5.45: Θερμική ανάλυση συγκριτικά στις μηχανές

5.6 Συμπεράσματα βελτιστοποίησης:

Καταρχάς, όσον αφορά στο κομμάτι των αποτελεσμάτων, παρατηρούμε ότι έχουμε προκύπτουσες γεωμετρίες από τη βελτιστοποίηση που παρουσιάζουν καλύτερα χαρακτηριστικά από την αρχική μηχανή ως έναν βαθμό, πράγμα που αποτελεί επιτυχία δεδομένου ότι η δοθείσα μηχανή αποτελεί μηχανή η οποία είναι βιομηχανικώς κατασκευασμένη. Επίσης, η βελτίωση των χαρακτηριστικών με 25% μείωση του βάρους και 1.2% αύξηση της απόδοσης αντίστοιχα είναι ικανοποιητικά ως αποτελέσματα. Από τις μηχανές που προέκυψαν κρίνονται καλύτερες επιλογές αυτές των μηχανών 5a και 6a όπως αναλύθηκαν παραπάνω, επιτυγχάνοντας την ραγδαία μείωση του βάρους διατηρώντας περίπου ίδιο βαθμό απόδοσης και την αύξηση του βαθμού απόδοσης μειώνοντας λίγο το βάρος.

Πέραν αυτού από την ταυτόχρονη χρήση δύο αλγορίθμων, υπό το πρίσμα των ίδιων απαιτήσεων βελτιστοποίησης μπορούμε να παρουσιάσουμε μία συγκριτική ανάλυση των δύο αλγορίθμων.

Καταρχάς, είναι εμφανές ότι ένα τέτοιο πρόβλημα που εξαρτάται από πλήθος παραμέτρων παρουσιάζει πολλά τοπικά ελάχιστα στα οποία μπορούν να παγιδευτούν οι αλγόριθμοι κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, πράγμα που γίνεται φανερό στην περίπτωση II κατά την οποία γίνεται χρήση του

αλγορίθμου PESA II και ενώ η τιμή του υπερόγκου θα έπρεπε να πλησιάζει την μέγιστη τιμή που έχει υπολογιστεί, ήτοι 2.3, αυτή παγιδεύεται σε τιμές περί το 2.1. Εφόσον η βελτιστοποίηση γίνεται με ακριβώς τις ίδιες προδιαγραφές, αλλά απλά με μία επιπλέον παράμετρο, η οποία κινείται σε όρια όπου συμπεριλαμβάνεται η τιμή της προηγούμενης βελτιστοποίησης, θεωρητικά θα έπρεπε να μας δώσει τουλάχιστον ίδια και πολύ πιθανόν καλύτερη Pareto καμπύλη, αφού θεωρητικά μέσα στον αλγόριθμο που τρέχει εξετάζει και τις μηχανές της προηγούμενης βελτιστοποίησης. Αυτό σημαίνει ότι ο υπερόγκος θα πρέπει να υπολογίζεται σε αυτή την περίπτωση τουλάχιστον ίσος με την προηγούμενη και να προκύπτουν κατά τη βελτιστοποίηση μηχανές που βρέθηκαν προηγουμένως. Ο λόγος που δεν γίνεται αυτό είναι ότι ο πληθυσμός ορίζεται να είναι 35 δειγμάτων, ώστε να μειωθεί ο χρόνος της όλης διαδικασίας, οπότε η βελτιστοποίηση έχει βρεθεί σε κάποιο τοπικό ακρότατο, πράγμα που αναδεικνύει την αυξημένη πολυπλοκότητα που συνεπάγονται τα επιπλέον κριτήρια της βελτιστοποίησης. Ένας ακόμα παράγοντας που συντελεί στον εγκλωβισμό στα τοπικά ελάχιστα είναι η ταχύτητα σύγκλισης καθώς όταν αυτή είναι πολύ μεγάλη ο αλγόριθμος δεν προλαβαίνει να αναπροσαρμοστεί γύρω από τα ολικά ελάχιστα αλλά περιορίζεται πολύ γρήγορα σε ένα ελάχιστο το οποίο μπορεί να είναι και τοπικό. Αντίθετα ο μειωμένος ρυθμός σύγκλισης έχει ως αποτέλεσμα την πιο σταδιακή προσαρμογή του πληθυσμού σε τιμές κοντά στο ολικό ελάχιστο.

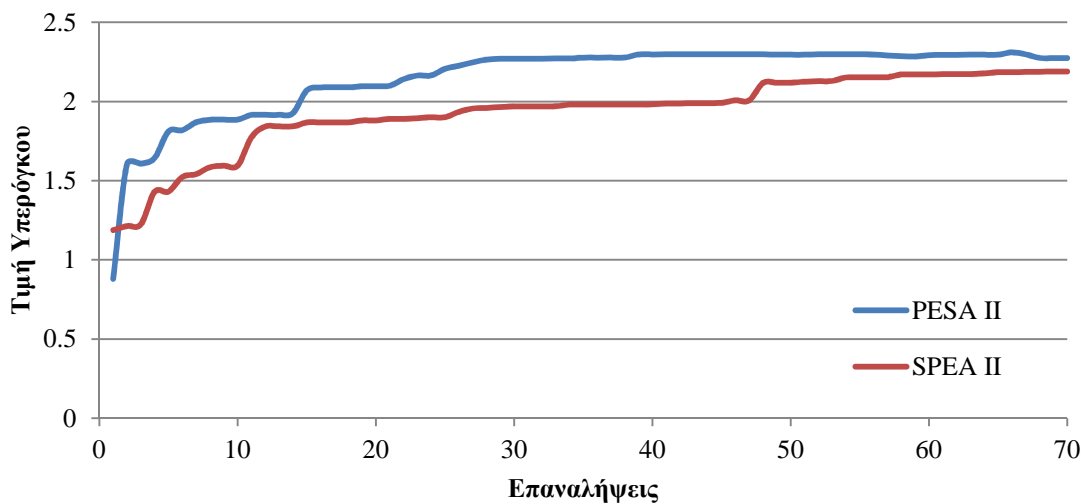
Συγκρίνοντας την ταχύτητα σύγκλισης των αλγορίθμων με βάση το κριτήριο του υπερόγκου όπως φαίνεται παρακάτω, είναι ξεκάθαρο ότι ο αλγόριθμος της PESA συγκλίνει πολύ πιο γρήγορα, όντας πιο ριψοκίνδυνο να παγιδευτεί σε περιοχή τοπικών ελαχίστων, ενώ ο αλγόριθμος της SPEA είναι αρκετά πιο αργός, αποφεύγοντας πιο αποτελεσματικά τέτοιες περιπτώσεις. Παρόλα αυτά, όλα είναι θέμα συμβιβασμών· ανάλογα με την ειδική περίπτωση που εξετάζουμε κάθε φορά, πρέπει να επιλέξουμε και τον αντίστοιχο αλγόριθμο. Συγκεκριμένα, όταν το πρόβλημα δεν παρουσιάζει τόσο πολλές μεταβλητές επειδή έχει αρκετά πιο απλό πεδίο τιμών, ίσως είναι προτιμότερη η χρήση ενός ταχύτερου αλγορίθμου όπως η PESA, ενώ στην περίπτωση που εμφανίζει ιδιαίτερα πολλές μεταβλητές άρα και πιο πολύπλοκο πεδίο τιμών, είναι προτιμότερη η χρήση ενός πιο αργού αλλά πιο σίγουρου αλγορίθμου όπως η SPEA.

Τιμή Υπερόγκου	Επαναλήψεις			
	Σταθερό Ενεργό Μήκος		Μεταβλητό Ενεργό Μήκος	
	PESA	SPEA	PESA	SPEA
>1.5	2	6	3	2
>1.6	2	11	3	2
>1.7	5	11	3	5
>1.8	5	15	10	5
>1.9	11	24	14	9
>2.0	15	46	14	18
>2.1	22	48	-	25
>2.2	25	-	-	-
Μέγιστη Τιμή	2.2979	2.1881	2.097	2.155
Συνολικές επαναλήψεις	70			

Πίνακας 5.20: Οι τιμές του υπερόγκου σε σχέση με τις επαναλήψεις ανάλογα με τον αλγόριθμο

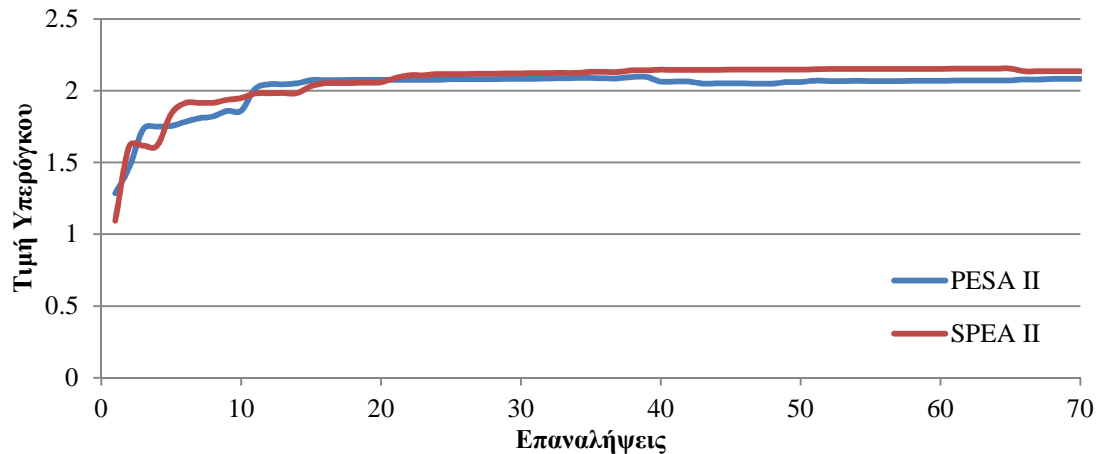
Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε το γεγονός ότι ο αλγόριθμος της PESA συγκλίνει πολύ πιο γρήγορα από αυτόν της SPEA. Συγκεκριμένα, πιο συχνά εμφανίζεται να κάνει απότομες αλλαγές στην τιμή του υπερόγκου χωρίς να παίρνει αρκετές ενδιάμεσα, έχοντας ως αποτέλεσμα να εγκλωβίζεται γρήγορα σε συγκεκριμένο τμήμα του πεδίου τιμών. Αυτό στα αρχικά στάδια μπορεί να μην προκαλεί ιδιαίτερα προβλήματα, αλλά όταν πλησιάζει στην σύγκλιση και ξαφνικά μεταπηδάει σε πολύ μεγαλύτερες τιμές υπερόγκου είναι πρόβλημα, όπως για παράδειγμα στην 14^η επανάληψη του αλγορίθμου της PESA, συνυπολογίζοντας στις μεταβλητές βελτιστοποίησης το ενεργό μήκος. Παρ'όλα αυτά επιταχύνοντας την σύγκλιση μειώνει κατά πολύ τον υπολογιστικό χρόνο: η μέγιστη τιμή του αλγορίθμου PESA – με σταθερό ενεργό μήκος εμφανίστηκε στην 43 επανάληψη και ήταν και η ολική μέγιστη που μας έδωσε οποιοσδήποτε περίπτωση βελτιστοποίησης, ενώ στην SPEA η μέγιστη τιμή εμφανίστηκε μετά από 70 επαναλήψεις χωρίς να φαίνεται να υπάρχει ιδιαίτερο νόημα να συνεχιστεί η διαδικασία. Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα του υπερόγκου PESA και SPEA σε κάθε περίπτωση στο ίδιο γράφημα προς καλύτερη κατανόηση των παραπάνω:

Σταθερό Ενεργό Μήκος



Σχήμα 5.44: Η ταχύτητα σύγκλισης των δύο αλγορίθμων με σταθερό ενεργό μήκος

Μεταβλητό Ενεργό Μήκος



Σχήμα 5.45: Η ταχύτητα σύγκλισης των δύο αλγορίθμων με μεταβλητό ενεργό μήκος

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

6.1 Κυριότερα συμπεράσματα

Κατά τη διεξαγωγή της διπλωματικής εργασίας ακολουθήθηκε μία μεθοδολογία που συνδύασε τόσο την πειραματική διαδικασία όσο και την επεξεργασία των δεδομένων και την περαιτέρω ανάλυσή τους με σκοπό τη διερεύνηση μίας βέλτιστης γεωμετρίας. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας έπρεπε να αντιμετωπιστούν προβλήματα κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, να χρησιμοποιηθούν διάφοροι αλγόριθμοι και να γίνει η επιλογή των βέλτιστων γεωμετριών μηχανής με έναν ολοκληρωμένο τρόπο. Από την παραπάνω πορεία εξήχθησαν γνώσεις και πολύτιμα συμπεράσματα για μία βαθύτερη κατανόηση του αντικειμένου. Συγκεκριμένα, τα κυριότερα συμπεράσματα παρουσιάζονται παρακάτω:

- ❖ Βρέθηκαν, δύο κύριες γεωμετρίες βέλτιστων μηχανών. Συγκεκριμένα, προσδιορίστηκε μία γεωμετρία η οποία έχει απόδοση κατά απόλυτη τιμή 0.955 μετά από αύξηση κατά 1.2% σε σχέση με την αρχική γεωμετρία, με βάρος 3.7Kg, μετά από μείωση κατά 3.32% σε σχέση με την αρχική γεωμετρία, αποδίδοντας τη ζητούμενη ροπή καθώς και μία γεωμετρία η οποία εξασφαλίζει απόδοση αυξημένη κατά 0.37%, αγγίζοντας το 0.946 και παράλληλα έχει το ελάχιστο δυνατό βάρος 2.87Kg, παρουσιάζοντας μείωση κατά 25,1% από το αρχικό βάρος.
- ❖ Διαπιστώθηκε η καλή σύγκλιση μεταξύ πειραματικών και προσομοιωμένων αποτελεσμάτων, αναδεικνύοντας ότι το μοντέλο που αναπτύχθηκε είναι αρκετά ακριβές για την ανάλυση ηλεκτρικών μηχανών.
- ❖ Μέσω της διαδικασίας της βελτιστοποίησης με τους αλγορίθμους SPEA II και PESA II, ακολούθησε σύγκριση των αποτελεσμάτων. Από τη σύγκριση γίνεται αντιληπτό ότι ο αλγόριθμος PESA II είναι αρκετά ταχύτερος σε σχέση με τον αλγόριθμο SPEA II, επιτυγχάνοντας εύρεση λύσεων με μικρότερο αριθμό επαναλήψεων. Παρ'όλα αυτά, η ταχεία σύγκλιση του αυξάνει τον κίνδυνο για εγκλωβισμό του αλγορίθμου σε τοπικά μέγιστα/ελάχιστα, έχοντας ως αποτέλεσμα εντέλει, πιθανώς να μην οδηγήσει στην ολικώς βέλτιστη λύση. Αντίθετα, ο αλγόριθμος της SPEA II παρότι είναι πιο αργός, περιορίζει λιγότερο απότομα το εύρος στο οποίο ψάχνει για λύσεις, οπότε είναι πιο εύκολο να εντοπίσει το ολικό βέλτιστο.
- ❖ Επίσης διαπιστώθηκε η αναγκαιότητα βελτίωσης της ακρίβειας σε χαμηλά φορτία της πειραματικής διάταξης, καθώς σε μικρές τιμές ροπής, τα σφάλματα των οργάνων δεν επιτρέπουν ικανοποιητική ακρίβεια.
- ❖ Αναδείχθηκε η πολυπλοκότητα και δυσκολία αναπαράστασης των απωλειών σε μία ηλεκτρική μηχανή, κυρίως στα σιδηρομαγνητικά υλικά και στους μόνιμους μαγνήτες. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε η δυσκολία στην αποτύπωση των απωλειών σιδήρου λόγω αβεβαιοτήτων που αφορούν κυρίως τη μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού και η μαθηματική πολυπλοκότητα που απαιτείται για τον προσδιορισμό με αναλυτικό τρόπο των απωλειών στους μόνιμους μαγνήτες.

- ❖ Κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης αναδείχθηκε η πολυπλοκότητα που εισάγουν οι πολλαπλές παράμετροι βελτιστοποίησης, λόγω του ότι καθιστούν πιο πολύπλοκο το επίπεδο επίλυσης, και εισάγουν επιπλέον τοπικά ελάχιστα στα οποία οι χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι είναι πιθανόν να εγκλωβιστούν.

6.2 Σημεία επιστημονικής συνεισφοράς:

Με βάση τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τα σημεία επιστημονικής συνεισφοράς της είναι τα εξής:

- ❖ Διερευνήθηκε η καταλληλότητα πολυκριτηριακών εξελικτικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης στη διαδικασία εύρεσης της καταλληλότερης γεωμετρίας για εφαρμογές πολυπολικών μηχανών μονίμων μαγνητών για ελαφριά ηλεκτρικά οχήματα.
- ❖ Πραγματοποιήθηκε συγκριτική ανάλυση των αλγορίθμων SPEA II και PESA II, υπό τις ίδιες συνθήκες βελτιστοποίησης ώστε να εντοπιστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα έκαστου αλγορίθμου, συντελώντας στην ανάδειξη του αποδοτικότερου τρόπου για τη διεξαγωγή της συγκεκριμένης διαδικασίας βελτιστοποίησης.
- ❖ Διερευνήθηκε ο καταλληλότερος συσχετισμός αριθμού και τύπου μεταβλητών βελτιστοποίησης με το μέγεθος πληθυσμού.
- ❖ Αναπτύχθηκε ένα μοντέλο που αναπαριστά και επιλύει με ικανοποιητική ακρίβεια και ταχύτητα σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών, όπως αποδείχθηκε από πειραματική επιβεβαίωση.

6.3 Θέματα προς περαιτέρω διερεύνηση:

Παρακάτω παρουσιάζονται προτάσεις με τις οποίες θα μπορούσε να επεκταθεί περαιτέρω το έργο που αναλύθηκε στην παρούσα εργασία.

- ❖ Για την επίτευξη καλύτερης ακρίβειας, σε μία επόμενη φάση, θα μπορούσαν να μελετηθούν σε μεγαλύτερο βάθος οι απώλειες των μονίμων μαγνήτη ώστε να ενσωματωθούν στο μοντέλο επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ακρίβεια στο βαθμό απόδοσης και να επιχειρηθεί ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων ως προς τις απώλειες αυτές ώστε να διαπιστωθεί πώς ακριβώς επηρεάζονται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μηχανής.
- ❖ Επίσης, είναι σκόπιμο να κατασκευαστούν οι προτεινόμενες γεωμετρίες.

Βιβλιογραφία:

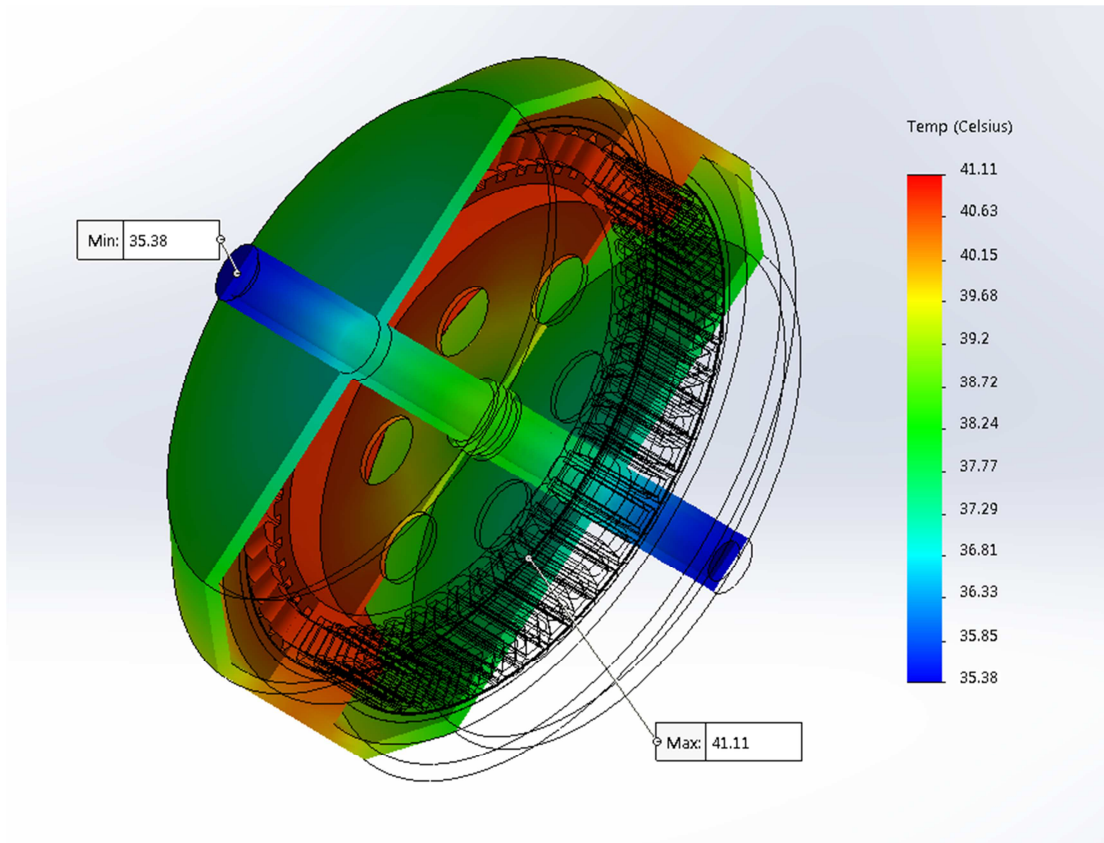
- [1] Peter Moreton, *Industrial Brushless Servomotor*, Εκδόσεις Newnes, 2000
- [2] M. Zeraoulia, M.E.H. Benbouzid, D. Diallo, *Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 55, Issue: 6, Nov. 2006
- [3] Nasser Hashernnia, Behzad Asaei, *Comparative Study of Using Different Electric Motors in the Electric Vehicles*, Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines
- [4] Χρήστος Θ. Κρασόπουλος, *Σχεδίαση και κατασκευή κινητήρα μονίμων μαγνητών για πρότυπο ηλεκτρικό όχημα*, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2013, ΕΜΠ
- [5] M. Azizur Rahman, *Analysis of Brushless Permanent Magnet Synchronous Motors*, IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 43, No. 2, April 1996
- [6] Andrea Cavagnino, Mario Lazzari, Francesco Profumo, Alberto Tenconi, *A Comparison Between the Axial Flux and the Radial Flux Structures for PM Synchronous Motors*, IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 38, No. 6, November/December 2002
- [7] Αγγελική Δ. Ιωάννου, *Σχεδιασμός και Ανάλυση Σύγχρονης Μηχανής Μόνιμου Μαγνήτη για εφαρμογή σε Α.Π.Ε.*, Διπλωματική Εργασία, Πάτρα, 2013, ΠΠ
- [8] Padmaraja Yedamale, Microchip Technology Inc., AN885, *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*, 2003
- [9] Stephen D. Umans, *Fitzgerald & Kingsley's Electric Machinery*, Εκδόσεις McGraw Hill, 2014
- [10] Stephen J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, Εκδόσεις McGraw Hill, 2005.
- [11] Emetor: www.emetor.com
- [12] Nicola Bianchi, *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements*, Εκδόσεις CRC Press, 2005
- [13] Μίνωας Η. Μπενιακάς, *Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση κινητήρων με θεώρηση των απωλειών των μίνιμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης*, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 2014, ΕΜΠ
- [14] Duane Hanselman, *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, Εκδόσεις Magna Physics, 2006
- [15] Alfredo Bermúdez, Dolores Gómez, Pilar Salgado, *Eddy-Current Losses in Laminated Cores and the Computation of an Equivalent Conductivity*, IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 44, No. 12, December 2008
- [16] Wan-Ying Huang, Adel Bettayeb, Robert Kaczmarek, Jean-Claude Vannier, *Optimization of Magnet Segmentation for Reduction of Eddy-Current Losses in Permanent Magnet Synchronous Machine*, IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 25, No. 2, June 2010
- [17] H.Polinder and M.J.Hoeijmakers, *Eddy-current losses in the segmented surface-mounted magnets of a PM machine*, IEE Proc.-Elecrr. Power Appl., Vol. 146, No. 3, May 1999
- [18] Kalyanmoy Deb, *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, Εκδόσεις Wiley & Sons, 2009

- [19] Jorge Magalhães-Mendes, *A Comparative Study of Crossover Operators for Genetic Algorithms to Solve the Job Shop Scheduling Problem*, WSEAS Transactions On Computers, Issue 4, Volume 12, April 2013
- [20] Eckart Zitzler, Marco Laumanns, and Lothar Thiele, *SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm*, Proceedings of the EUROGEN 2001. Athens. Greece, September 19-21
- [21] David W.Corne, Joshua D. Knowles, Martin J. Oates, *The Pareto Envelope-based Selection Algorithm for Multiobjective Optimization*, Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI, Volume 1917 of the series Lecture Notes in Computer Science pp 839-848, Εκδόσεις Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [22] David W.Corne, Nick R. Jeram, Joshua D. Knowles, Martin J. Oates, *Pesa-II: Region based Selection in Evolutionary Multiobjective Optimization*, Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference 2001
- [23] Advanced Vehicle Testing Activity: avt.inl.gov
- [24] U.S. Department of Energy: www.fueleconomy.gov
- [25] theautochannel.com
- [26] machinedesign.com
- [27] partzsch.de

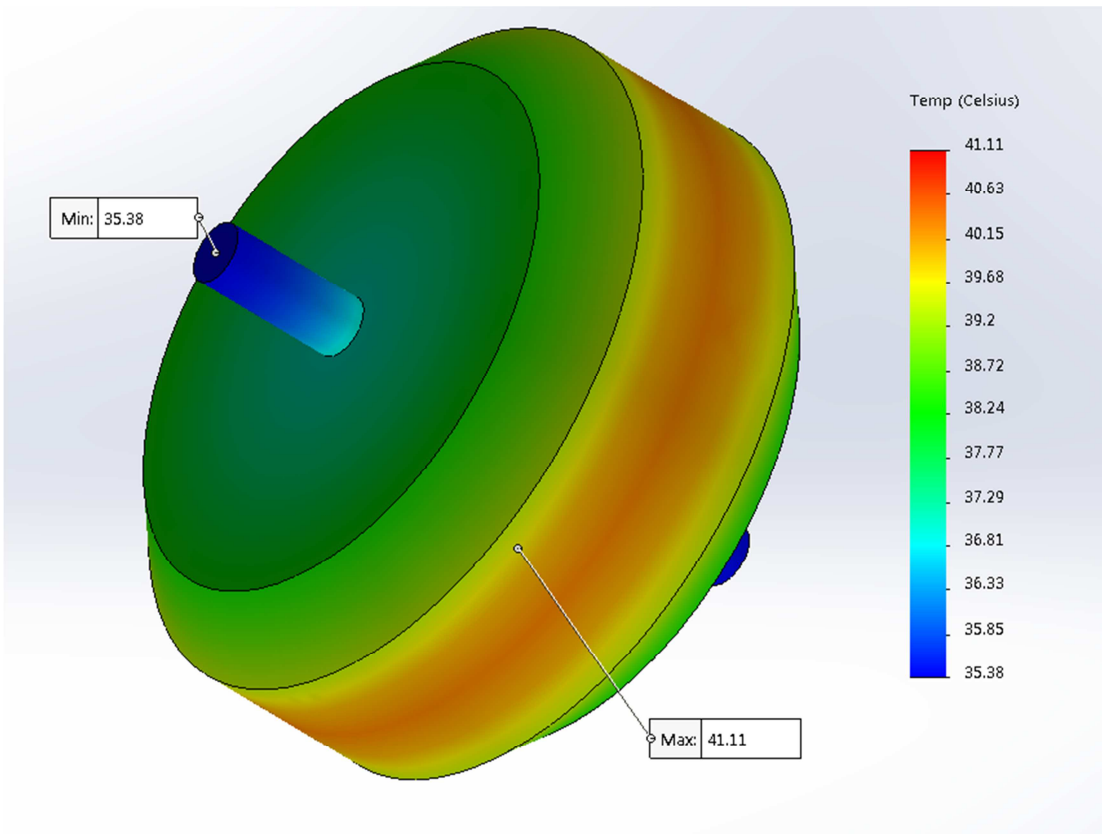
Παράρτημα

Παρακάτω παρουσιάζονται τα θερμικά γραφήματα με κατάλληλες κλίμακες σε κάθε περίπτωση ώστε να εξασφαλίζεται η καλύτερη ακρίβεια:

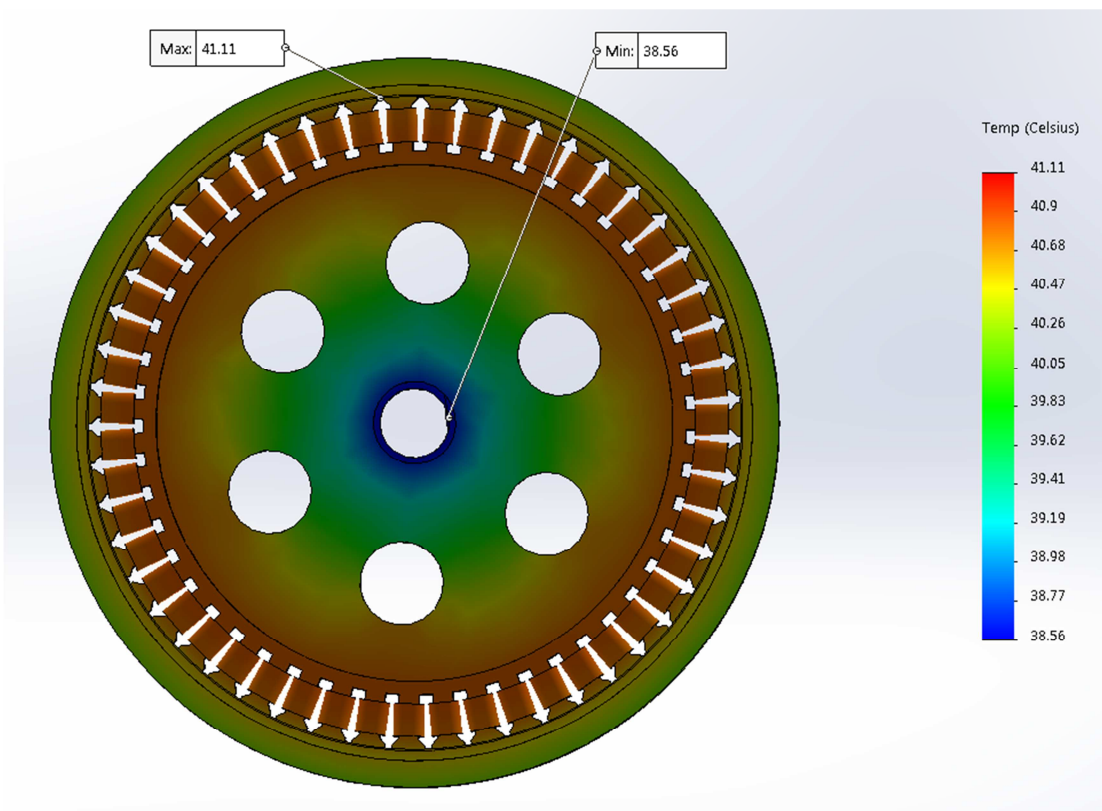
Μηχανή Αναφοράς:



Σχήμα 1: Η θερμική ανάλυση στην μηχανή αναφοράς συνολικά

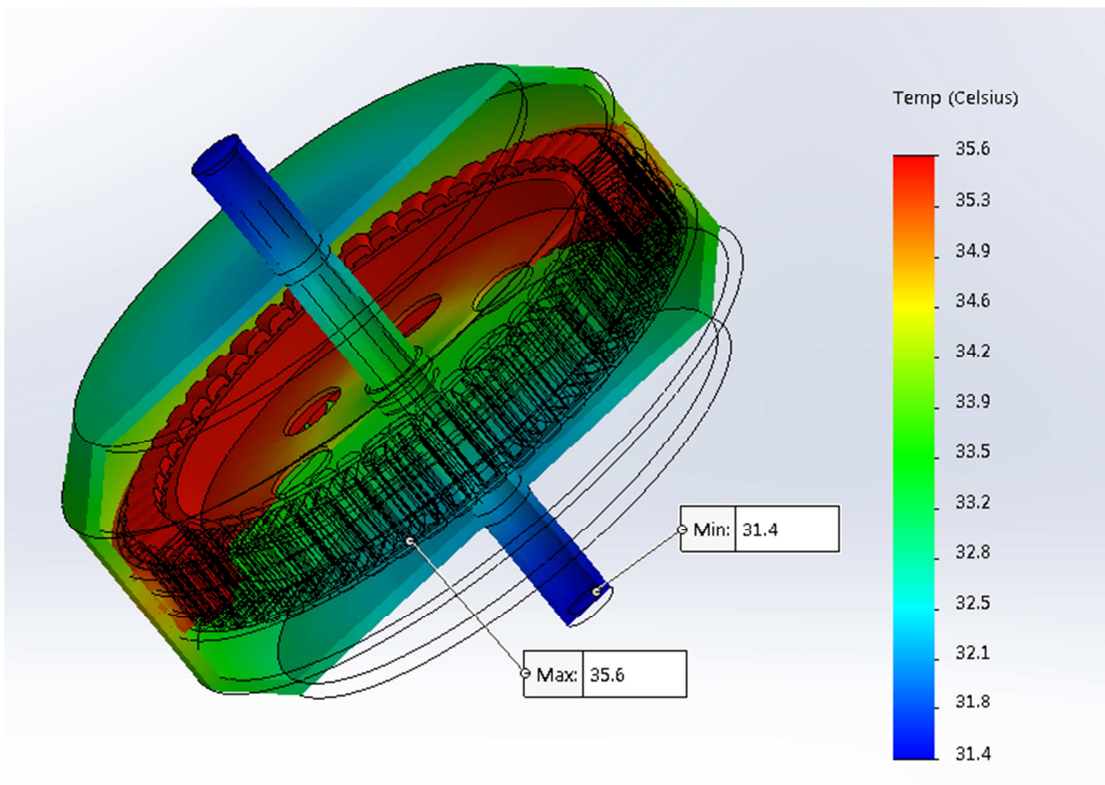


Σχήμα 2: Η θερμική ανάλυση στο κέλυφος της μηχανής αναφοράς

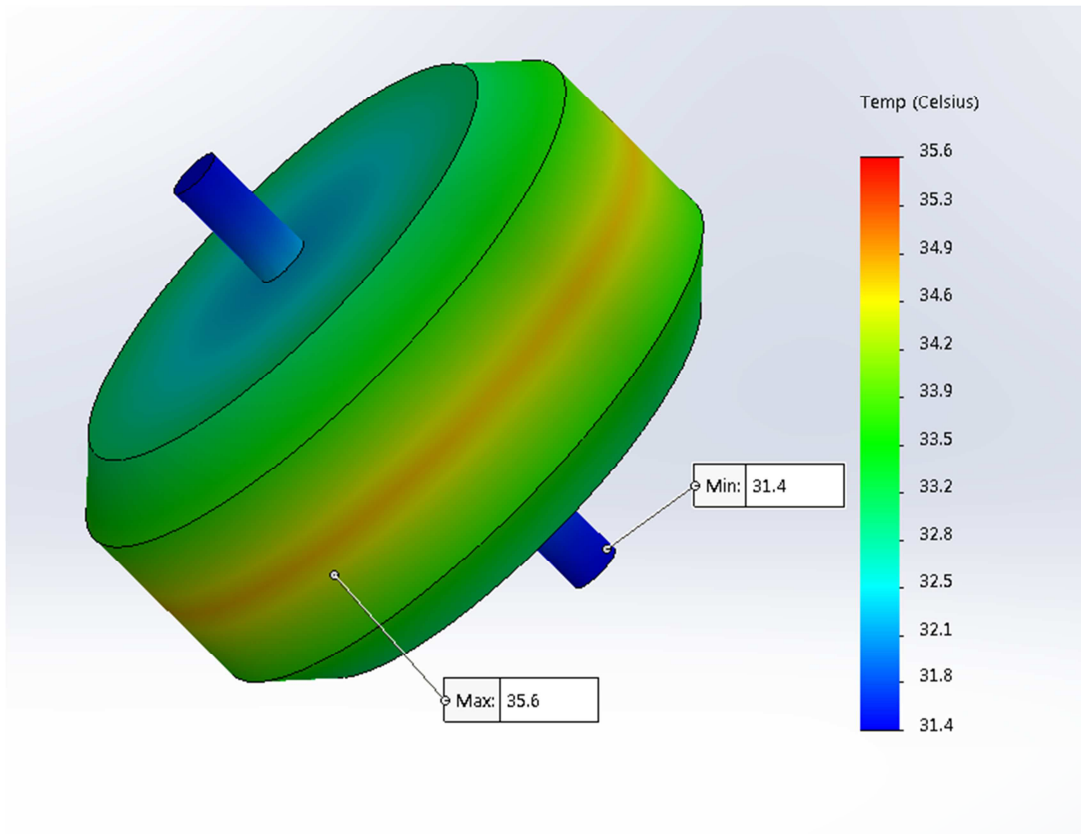


Σχήμα 3: Η θερμική ανάλυση στο εσωτερικό της μηχανής αναφοράς

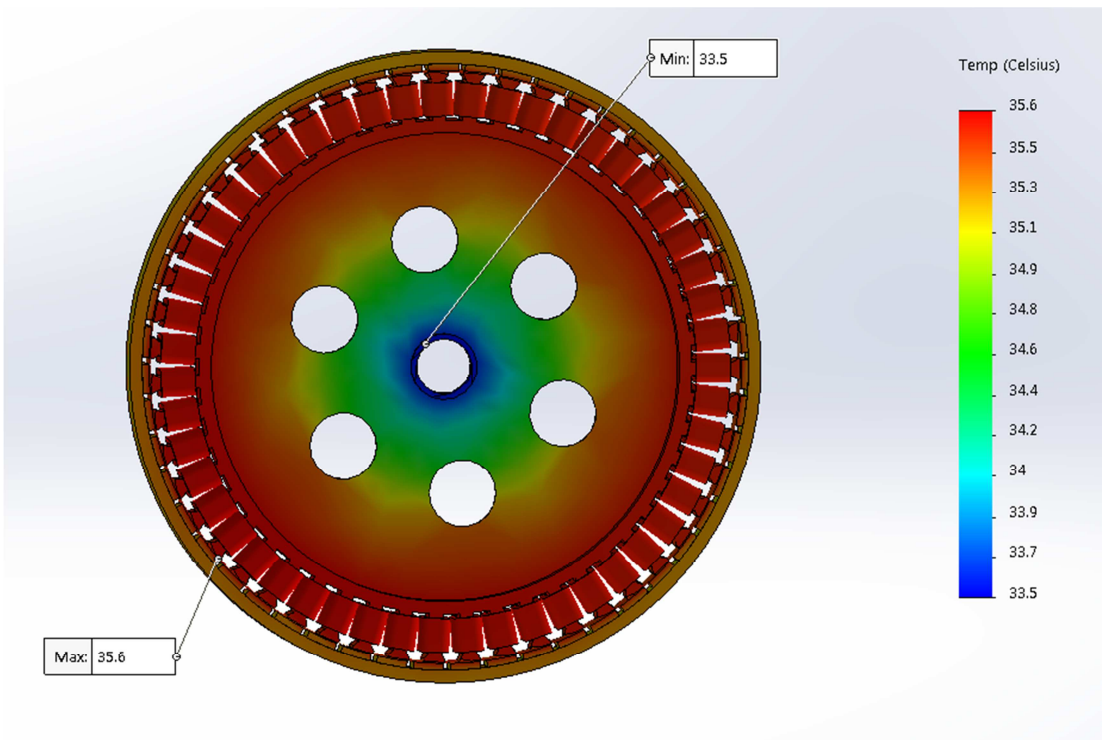
Μηχανή 5A:



Σχήμα 4: Η θερμική ανάλυση στην μηχανή 5A συνολικά

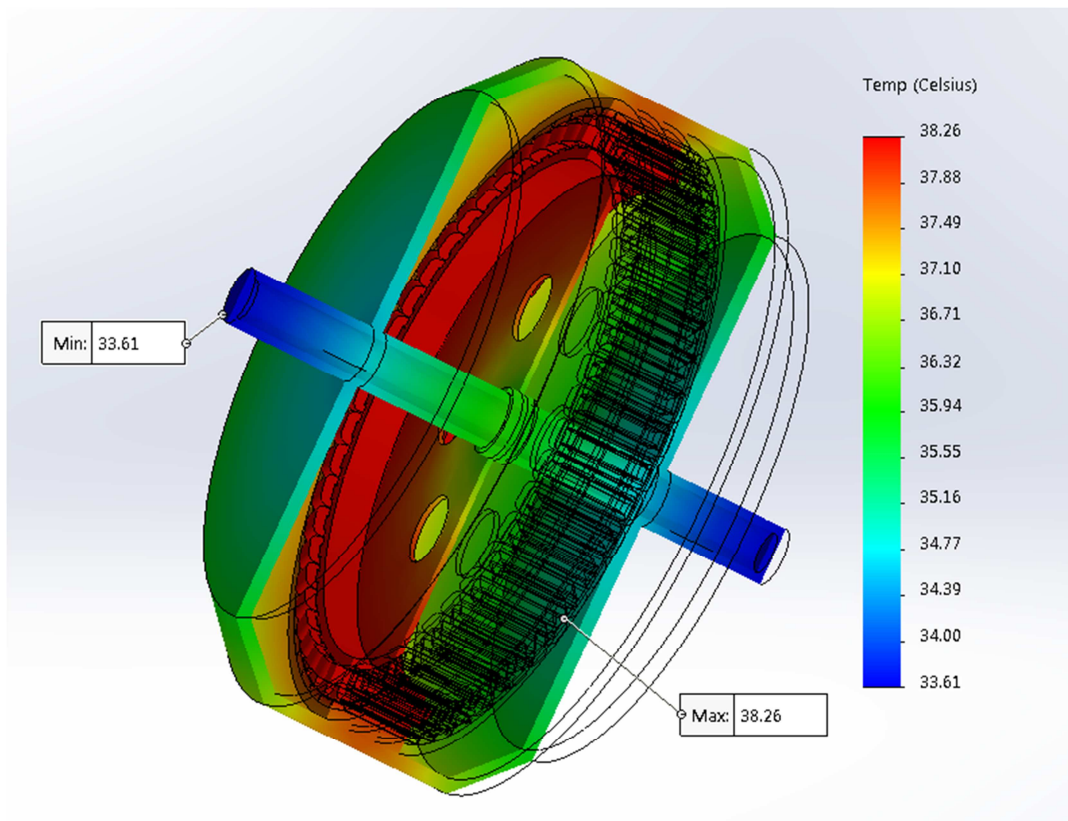


Σχήμα 5: Η θερμική ανάλυση στο κέλυφος της μηχανής 5A

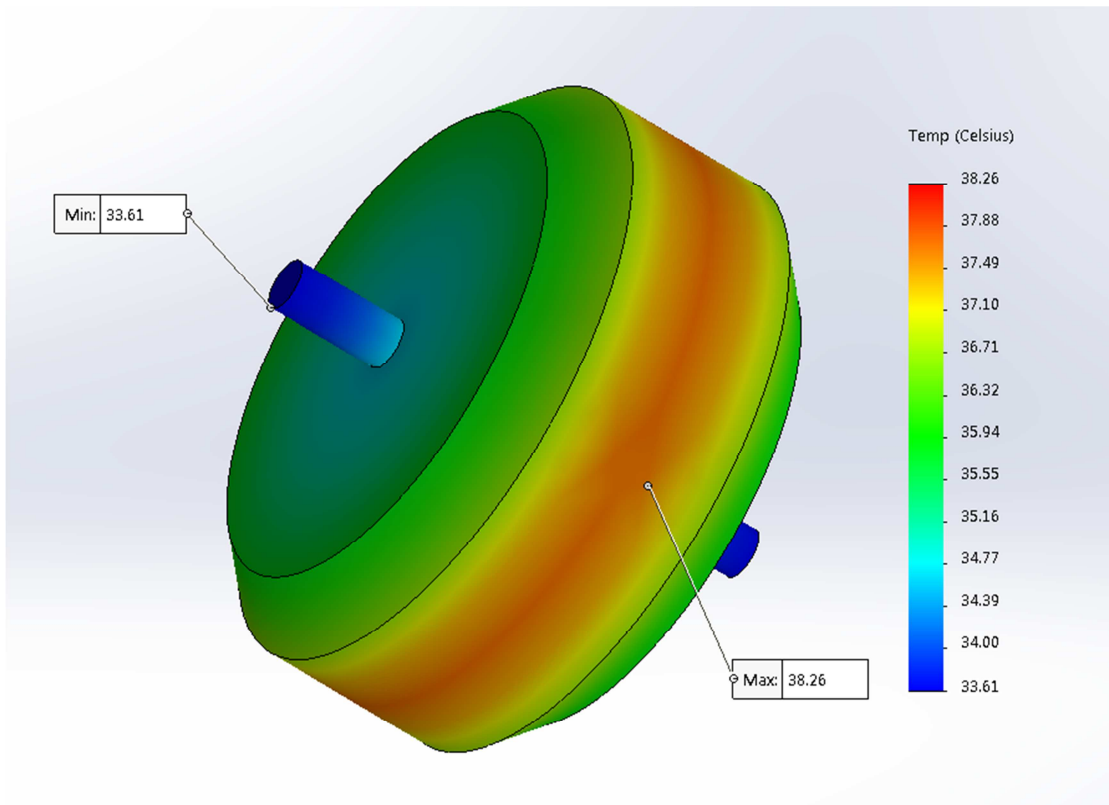


Σχήμα 6: Η θερμική ανάλυση στο εσωτερικό της μηχανής 5A

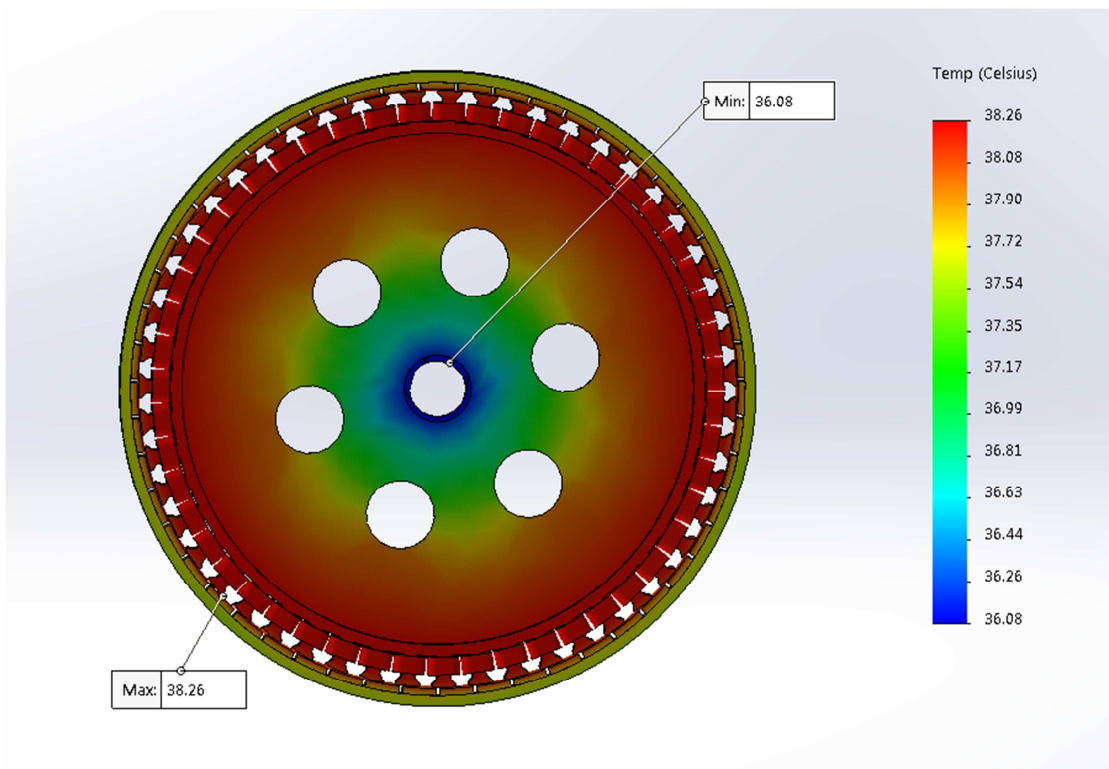
Μηχανή 6A:



Σχήμα 7: Η θερμική ανάλυση στην μηχανή 6A συνολικά

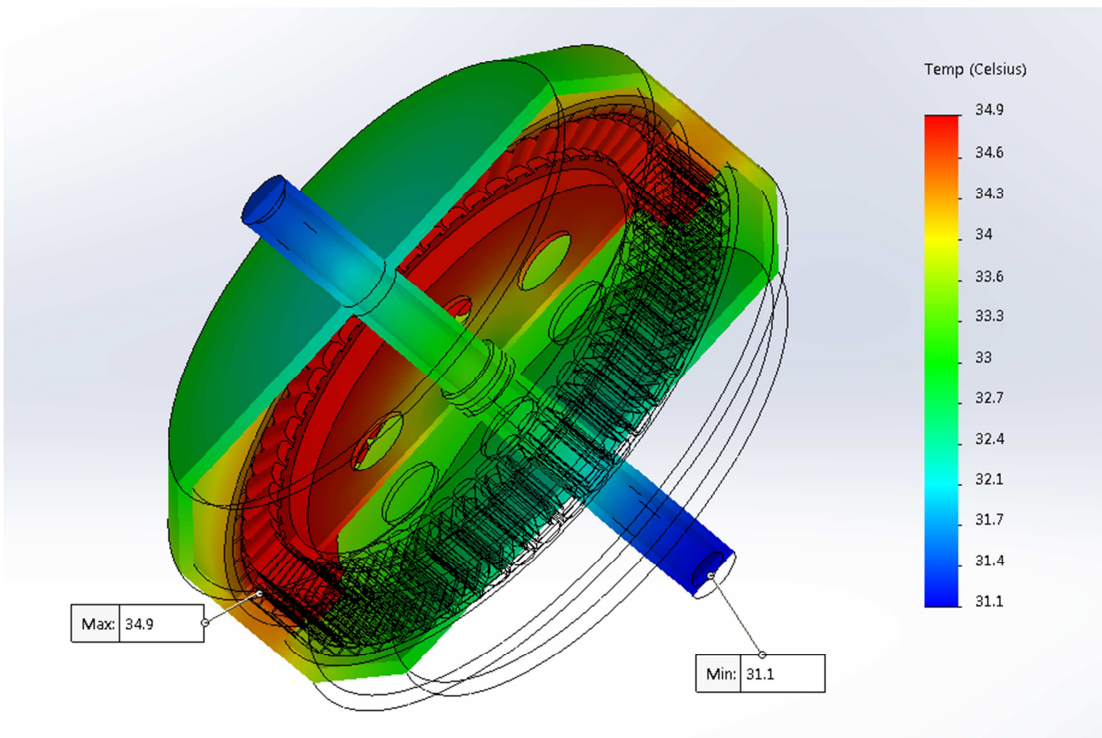


Σχήμα 8: Η θερμική ανάλυση στο κέλυφος της μηχανής 6A

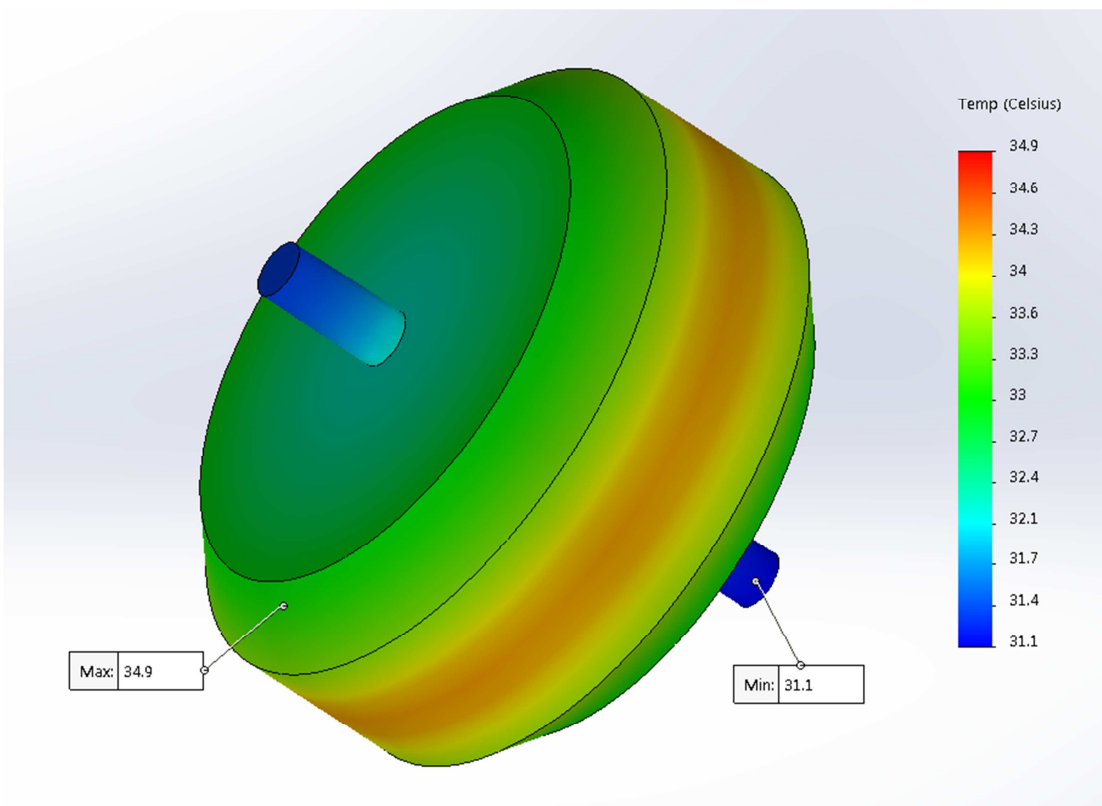


Σχήμα 9: Η θερμική ανάλυση στο εσωτερικό της μηχανής 6A

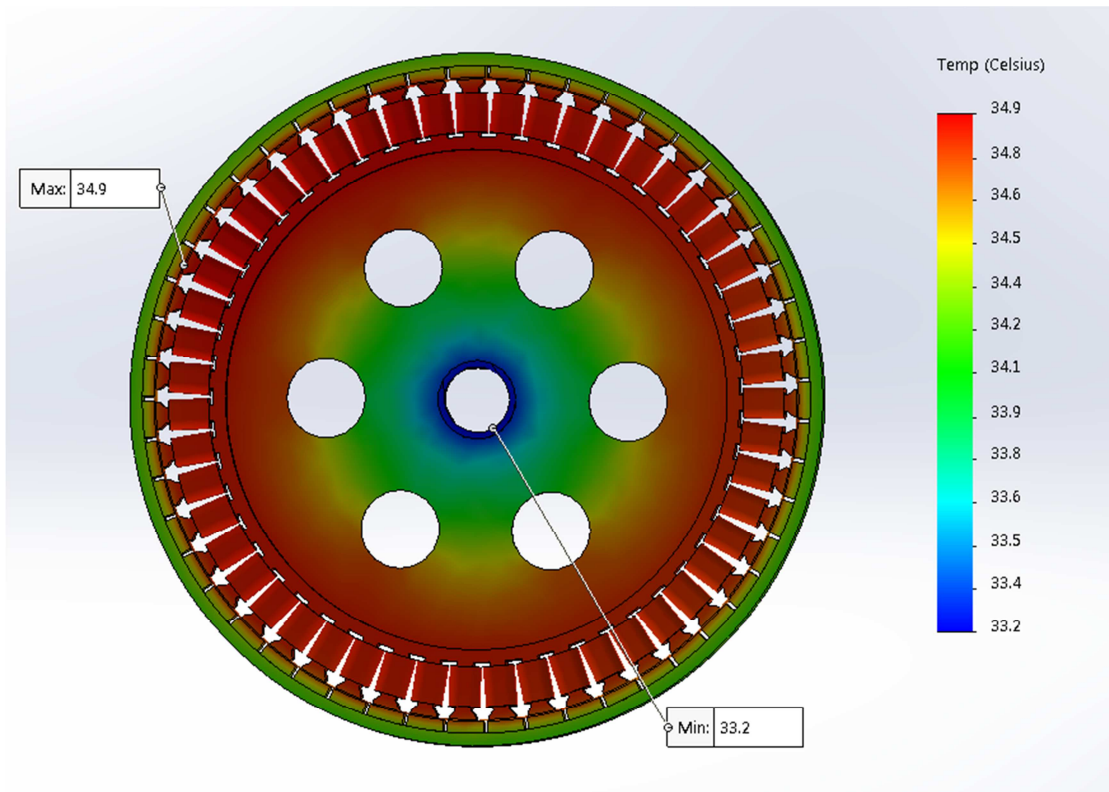
Μηχανή 2B:



Σχήμα 10: Η θερμική ανάλυση στην μηχανή 2B συνολικά



Σχήμα 11: Η θερμική ανάλυση στο κέλυφος της μηχανής 2B



Σχήμα 12: Η θερμική ανάλυση στο εσωτερικό της μηχανής 2B