



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

Θερμική Ανάλυση Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πάυλος Ι. Πολυμενάκος

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα , Φεβρουάριος 2024



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

Θερμική Ανάλυση Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πάυλος Ι. Πολυμενάκος

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 29^η Φεβρουαρίου 2024

.....
Κλαδάς Αντώνιος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

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

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

Αθήνα , Φεβρουάριος 2024

.....
Πάυλος Ι. Πολυμενάκος

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

Copyright © Πάυλος Πολυμενάκος, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η διαρκής προσπάθεια για την βελτίωση της απόδοσης και τη μείωση του κόστους παραγωγής των ηλεκτρικών κινητήρων, έχει οδηγήσει τους ερευνητές στην αναζήτηση νέων και καινοτόμων τεχνικών κατασκευής τους. Μια νέα τεχνική παραγωγής συνιστωσών είναι η τρισδιάστατη εκτύπωση. Η παραγωγή μηχανικών εξαρτημάτων μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης, παρότι βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο, φαίνεται να προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα. Έτσι, το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας για τον προσδιορισμό της ποιότητας, της αξιοπιστίας και των επιδόσεων των τρισδιάστατα εκτυπωμένων υποσυστημάτων κινητήρων αυξάνεται συνεχώς.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί τη θερμική ανάλυση ενός πρότυπου σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών, υψηλών ταχυτήτων και μικρού όγκου, που διαθέτει τρισδιάστατα εκτυπωμένα μέρη μαγνητικών κυκλωμάτων. Σκοπός είναι η μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς του στάτη του κινητήρα στην μεταβατική και μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Η θερμική συμπεριφορά των ηλεκτρικών μηχανών αποτελεί κρίσιμη παράμετρο που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη σχεδίαση τους. Στην παρούσα εργασία σε πρώτο βήμα, μελετώνται τα θερμικά φαινόμενα που διέπουν τη λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών και αποτυπώνονται οι μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν τους μηχανισμούς μετάδοσης των θερμικών φαινομένων. Στη συνέχεια επιλύεται ένα απλουστευμένο θερμικό πρόβλημα για το οποίο υπάρχουν αναλυτικές λύσεις μέσω του κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων που εξασφαλίζει η συγκεκριμένη μεθοδολογία. Σε επόμενο βήμα, αφού οριστούν οι παράμετροι εισόδου και οι οριακές συνθήκες, προσομοιώνεται το θερμικό πρόβλημα στον πρότυπο κινητήρα με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων θεωρώντας γεωμετρίες δύο και τριών διαστάσεων, αντίστοιχα. Η δισδιάστατη ανάλυση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας "ελεύθερο" κώδικα διαθέσιμο στο διαδίκτυο για την ανάλυση των θερμοκρασιών σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, σε εγκάρσια τομή του κινητήρα. Ακολούθως επιχειρείται τρισδιάστατη μοντελοποίηση του κινητήρα μέσω εμπορικού λογισμικού τόσο για τη μόνιμη όσο και για την μεταβατική κατάσταση λειτουργίας. Τέλος, παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν στο χώρο του εργαστηρίου και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, προκειμένου να ελεγχθεί η ακρίβεια των μοντέλων που αναπτύχθηκαν.

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας αναδεικνύεται η εγκυρότητα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων στην δισδιάστατη και στην τρισδιάστατη μοντελοποίηση, ενώ αναλύεται η θερμική συμπεριφορά του μαγνητικού κυκλώματος του στάτη του κινητήρα που κατασκευάσθηκε μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Λέξεις κλειδιά: Σύγχρονος κινητήρας μονίμων μαγνητών, τρισδιάστατη εκτύπωση, στάτης, θερμικά φαινόμενα, μετάδοση θερμότητας, θερμική ανάλυση, θερμική συμπεριφορά, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, δισδιάστατη ανάλυση, τρισδιάστατη μοντελοποίηση.

Abstract

The continuous effort to improve the efficiency and reduce the production costs of electric motors has led researchers to search for new and innovative manufacturing techniques. Such a new technique enabling construction of electric motor parts is 3D printing. The production of mechanical components by means of 3D printing, although is actually at an early stage of adoption, seems to offer important advantages. Thus, the interest of the research community in determining the quality, reliability and performance of 3D printed motor parts is growing.

The present thesis undertakes the thermal analysis of a modern high speed permanent magnet synchronous motor prototype, comprising 3D printed parts. The aim of this work is to study the thermal behaviour of the motor stator under both transient and steady state operation.

The thermal behaviour of electrical machines is a critical parameter that must be taken into account in their design process. In a first step, the thermal phenomena governing the operation of electrical machines are studied and then, the mathematical relationships describing the mechanisms of these phenomena are presented. Followingly, a simple thermal problem with existing analytical relations is calculated by using the finite element code to check the precision of the obtained results. In a next step, after defining the input parameters and boundary conditions, the thermal analysis of the motor is performed by using the finite element method by considering geometries of two and three dimensions, respectively. The two dimensional analysis is carried out by using a "free" finite element code for the temperature analysis under steady state operation along the motor cross section. Subsequently, three-dimensional modelling of the stator is attempted by using a commercial software, under both steady and transient operating conditions, representing the temperatures increase starting from the environmental ones. Finally, respective experimental measurements performed in the laboratory are equally presented and compared to the simulation results, in order to check the precision of the developed models.

With the completion of the thesis, the precision provided by the finite element method in two-dimensional and three-dimensional modeling is highlighted, while the thermal behavior of the motor consisted of 3D magnetic stator is reported.

Key words: permanent magnet synchronous motor, 3D printing, stator, thermal phenomena, heat transfer, thermal analysis, thermal behavior, finite element method, two-dimensional analysis, three-dimensional modeling.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χωρίς τους οποίους θα ήταν δύσκολη η ολοκλήρωση της.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή κ. Αντώνιο Κλαδά για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου με την ανάθεση του ενδιαφέροντος θέματος καθώς και την πολύτιμη συμβολή του σε όλη την προσπάθεια μου.

Ευχαριστώ εξίσου την υποψήφια διδάκτορα κ. Μαρία Πεχλιβανίδου για τις πολύτιμες συμβουλές, επισημάνσεις, παρατηρήσεις και εν γένει την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Επίσης αφιερώνω την εργασία αυτή στους γονείς μου και σε όλους τους φίλους μου για την διαρκή στήριξη που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων.

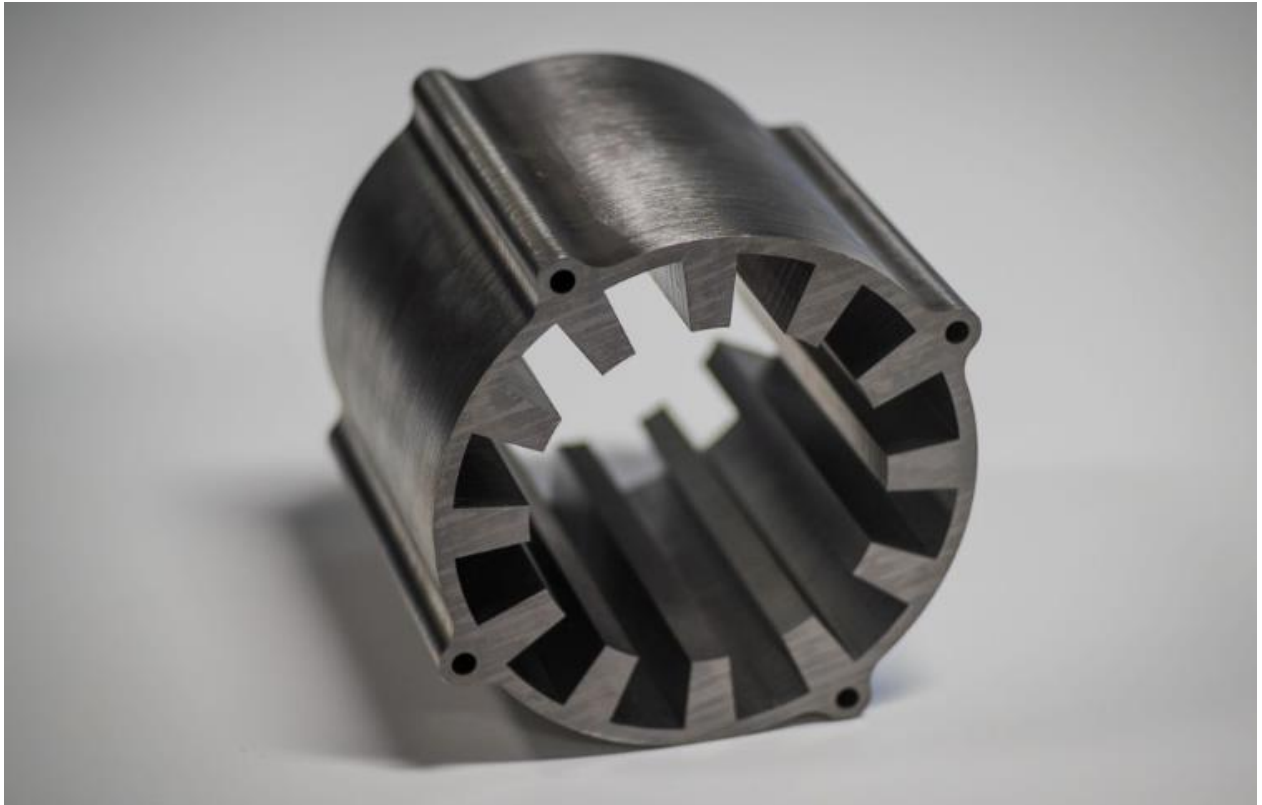
Πίνακας Περιεχομένων

| | |
|---|-----------|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ..... | 5 |
| ABSTRACT..... | 7 |
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ..... | 9 |
| Κεφάλαιο 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 14 |
| 1.1 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ..... | 15 |
| 1.2 ΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΚΙΝΗΤΗΤΡΕΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ..... | 15 |
| 1.2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ..... | 16 |
| 1.2.2 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ..... | 18 |
| 1.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ..... | 21 |
| 1.4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ..... | 23 |
| 1.5 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ..... | 26 |
| Κεφάλαιο 2: ΘΕΡΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ..... | 28 |
| 2.1 ΤΡΟΠΟΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ..... | 29 |
| 2.2 ΑΓΩΓΗ..... | 30 |
| 2.2.1 ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ..... | 31 |
| 2.2.2 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ..... | 32 |
| 2.3 ΣΥΝΑΓΩΓΗ..... | 34 |
| 2.3.1 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ | 36 |
| 2.3.2 ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ ΣΤΟ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ..... | 38 |
| 2.4 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ..... | 39 |
| 2.5 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ..... | 40 |
| 2.5.1 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ..... | 41 |

| | |
|---|-----------|
| 2.5.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΣΤΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ | 42 |
| 2.5.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΨΥΞΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ..... | 43 |
| 2.5.4 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ..... | 44 |
| 2.6 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ..... | 45 |
| 2.6.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ..... | 45 |
| 2.6.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ..... | 52 |
| 2.6.3 ΣΥΣΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ..... | 57 |
| 2.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ..... | 58 |
| Κεφάλαιο 3 : ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ..... | 59 |
| 3.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ..... | 60 |
| 3.2 ΘΕΡΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΟΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ | 60 |
| 3.2.1 ΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ | 61 |
| 3.2.2 ΣΥΝΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ..... | 61 |
| 3.3 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ..... | 62 |
| 3.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΑΤΗ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ..... | 63 |
| 3.4.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ..... | 63 |
| 3.4.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ..... | 66 |
| 3.4.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ..... | 67 |
| 3.4.4 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ..... | 68 |
| 3.5 ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ..... | 68 |
| 3.5.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ FEMM..... | 68 |
| 3.5.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΤΑΤΗ ΚΑΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ..... | 69 |
| 3.5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ..... | 74 |
| 3.6 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ..... | 81 |
| 3.6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ANSYS..... | 81 |
| 3.6.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ..... | 82 |
| 3.6.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ..... | 88 |
| 3.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΚΑΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ..... | 95 |

| | |
|--|-----|
| Κεφάλαιο 4 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ - ΑΚΡΙΒΕΙΑ | |
| ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ | 97 |
| 4.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ..... | 98 |
| 4.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ | 100 |
| 4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ..... | 102 |
| | |
| Κεφάλαιο 5 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 111 |
| 5.1 ΚΥΡΙΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ..... | 112 |
| 5.2 ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗΣ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑΣ..... | 113 |
| 5.3 ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΥΡΕΥΝΗΣΗ..... | 113 |
| | |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ-1 | 115 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ-2 | 117 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 119 |
| ΚΩΔΙΚΕΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ | 121 |

Κεφάλαιο 1



Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος και πραγματεύεται τη θερμική ανάλυση ενός δεκαοκταπολικού σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών, ο οποίος περιέχει 3D-εκτυπωμένα μέρη. Η διερεύνηση των συνθηκών λειτουργίας τρισδιάστατων κατασκευασμένων μηχανών βρίσκεται ακόμα σε πρωταρχικό στάδιο και αποτελεί πολύ καινοτόμα τεχνολογία. Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας θα εστιάσουμε την προσοχή μας στην θερμική συμπεριφορά του στάτη του κινητήρα, με στόχο να συμπεράνουμε αν το υλικό του είναι κατάλληλο για τέτοια χρήση καθώς και ποια είναι τα θερμικά του όρια.

Η ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς του στάτη έγινε προσομοιώνοντας τον κινητήρα με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων σε δύο και τρεις διαστάσεις. Στη συνέχεια αφού πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών στο τέλος έγινε η σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων με τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης προσομοίωσης. Σκοπός αυτής της σύγκρισης είναι να διαπιστωθεί η ορθότητα του κατασκευασμένου μοντέλου και οι συνθήκες λειτουργίας του στάτη στην μόνιμη κατάσταση.

1.1 Διάρθρωση παρούσας εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρείται η θερμική ανάλυση του στάτη κινητήρα μονίμου μαγνητών . Η εργασία αναπτύσσεται σε πέντε κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύονται οι στόχοι της εργασίας και περιγράφεται η πορεία που ακολουθήθηκε. Επιπλέον γίνεται μικρή αναφορά στους Σύγχρονους Κινητήρες Μονίμων Μαγνητών καθώς και στην επίδραση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στις ηλεκτρικές μηχανές. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται ο κινητήρας που θα μελετηθεί στα επόμενα κεφάλαια.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται τα θερμικά φαινόμενα που χαρακτηρίζουν τις ηλεκτρικές μηχανές και οι αντίστοιχοι τρόποι μετάδοσης της θερμότητας. Επίσης, γίνεται εισαγωγή στις θερμικές ιδιότητες των ηλεκτρικών μηχανών ,ενώ στο τέλος προβάλλεται η λύση ενός στοιχειώδους θερμικού προβλήματος με σκοπό να ελεγχθεί η αξιοπιστία του προγράμματος προσομοίωσης.

Στο τρίτο κεφάλαιο προσεγγίζουμε την θερμική ανάλυση του κινητήρα με την εφαρμογή του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων. Αρχικά γίνεται μια θεωρητική περιγραφή της μεθόδου καθώς και οι οριακές συνθήκες που ισχύουν και στη συνέχεια με τη βοήθεια δύο προγραμμάτων από το διαδίκτυο πραγματοποιείται η θερμική ανάλυση τόσο σε δισδιάστατη όσο και σε τρισδιάστατη γεωμετρία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μετρήσεις που προέκυψαν από την πειραματική διάταξη, η σύγκριση των προσομοιώσεων με τα αποτελέσματα της πειραματικής διάταξης και τα συμπεράσματα που προκύπτουν.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία, ενώ απαριθμούνται και τα σημεία καινοτομίας της εργασίας. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τα θέματα που επιδέχονται περαιτέρω διερεύνησης.

Στο παράρτημα της εργασίας παρατίθενται πίνακες με τις ιδιότητες των υλικών, τα τρισδιάστατα σχέδια του στάτη του σύγχρονου κινητήρα, τις πηγές και τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της εργασίας.

1.2 Σύγχρονοι κινητήρες μονίμων μαγνητών

Τα τελευταία χρόνια η ραγδαία εξέλιξη στην κατασκευή καινούργιων μαγνητών (από φερρίτη και σπάνιες γαίες) έχει οδηγήσει στην αυξανόμενη χρήση των μηχανών μονίμων μαγνητών. Οι μηχανές αυτές χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου έχουν κύριο στόχο την αύξηση της αποδοτικότητας και τη μείωση των απωλειών . Βασίζουν την λειτουργία τους στην αλληλεπίδραση των πεδίων του δρομέα (παράγεται από τους μόνιμους μαγνήτες) και του στάτη , μειώνοντας σημαντικά το ρεύμα που ρέει στο πυρήνα του στάτη. Έχουν αντικαταστήσει τις μηχανές επαγωγής σε μεγάλο βαθμό για εφαρμογές σερβοκινητήρων και ηλεκτροκινητήρων τροφοδοτούμενους από μετατροπείς . Έρευνες προβλέπουν, ότι με την αυξανόμενη τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας , οι μηχανές μονίμων μαγνητών θα αποτελέσουν μελλοντικά φθηνότερη εναλλακτική για την παροχή ρεύματος. [1]

Στις παρακάτω υποενότητες θα αναφερθούμε στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά , τις συνθήκες λειτουργίας και το ισοδύναμο κύκλωμα λειτουργίας των σύγχρονων κινητήρων μονίμων μαγνητών (ΣΚΜΜ) .

1.2.1 Γενικά στοιχεία ΣΚΜΜ

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες έχουν μεγάλο μερίδιο στην παγκόσμια αγορά, με περισσότερους από 5 δισεκατομμύρια να κατασκευάζονται κάθε χρόνο. Οι σύγχρονοι κινητήρες μονίμων μαγνητών αποτελούν μία δημοφιλή λύση σε πληθώρα εφαρμογών λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν έναντι των επαγωγικών κινητήρων . Σκόπιμο λοιπόν είναι να αναφέρουμε αυτά τα πλεονεκτήματα, καθώς και τα γενικότερα λειτουργικά χαρακτηριστικά των κινητήρων μονίμου μαγνήτη.

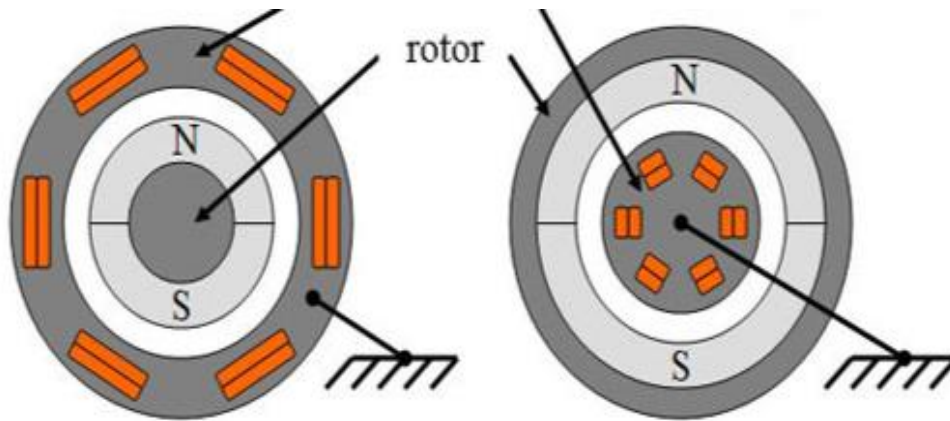
Στους ΣΚΜΜ, τοποθετούνται επί της επιφάνειας του δρομέα μόνιμοι μαγνήτες που δημιουργούν το πεδίο διέγερσής του. Οι μόνιμοι μαγνήτες αποθηκεύουν στο εσωτερικό τους μαγνητική ενέργεια η οποία συμβάλλει, με την δημιουργία του πεδίου διέγερσης, στην ανάπτυξη ροπής για την περιστροφή του δρομέα. Έτσι, τα τυλίγματα διέγερσης αντικαθίστανται από τους μόνιμους μαγνήτες με αποτέλεσμα την εξάλειψη των απωλειών χαλκού που θα δημιουργούσαν τα τυλίγματα. Επομένως ο βαθμός απόδοσης βελτιώνεται σημαντικά, αφού δεν υπάρχουν απώλειες χαλκού στα τυλίγματα του δρομέα προκειμένου να ιδρυθεί το πεδίο και έτσι έχουμε μεγαλύτερη αξιοπιστία της μηχανής αφού δεν χρησιμοποιούνται ψήκτρες. Οι κινητήρες μονίμων μαγνητών έχουν μεγαλύτερη ροπή, υψηλή πυκνότητα ισχύος, μικρότερο μέγεθος, μεγαλύτερη πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο σε σύγκριση με τους κινητήρες που διαθέτουν τύλιγμα διέγερσης. Ως μειονεκτήματα των μηχανών μονίμων μαγνητών διαπιστώνουμε τον πολύπλοκο έλεγχο τους καθώς ότι η μόνιμη τιμή μαγνήτισης τους , δυσκολεύει τον έλεγχο της διέγερσης. Επιπλέον υπάρχει κίνδυνος ,μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας και των μηχανικών καταπονήσεων, να απομαγνητιστούν οι μαγνήτες , γεγονός που θα οδηγήσει στην καταστροφή του κινητήρα.[2]

Ο σχεδιασμός και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ΣΚΜΜ ποικίλουν ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Ορισμένες κατηγορίες, σύμφωνα με τις οποίες μπορούμε να διαχωρίσουμε τους σύγχρονους κινητήρες μονίμων μαγνητών , είναι οι παρακάτω :

Θέση του δρομέα

Ανάλογα με τη θέση του δρομέα και του στάτη οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη υποδιαιρούνται σε δύο κατηγορίες :

- Στους ΣΚΜΜ εξωτερικού δρομέα
- Στους ΣΚΜΜ εσωτερικού δρομέα

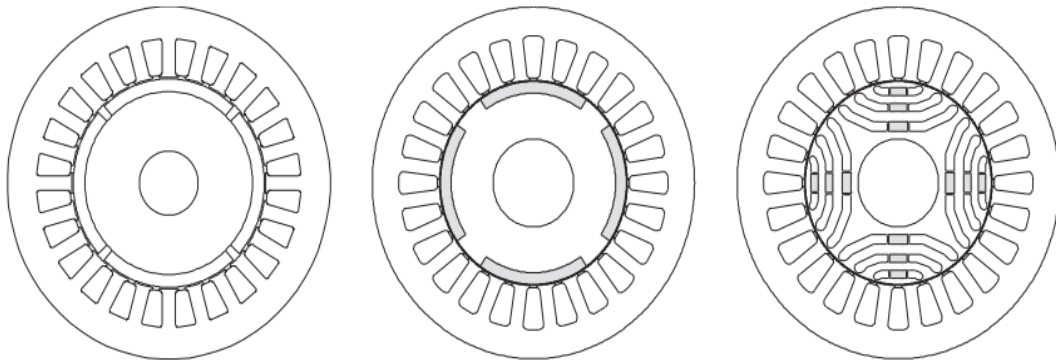


Σχήμα 1.1 Αριστερά ΣΚΜΜ εσωτερικού δρομέα, Δεξιά ΣΚΜΜ εξωτερικού δρομέα [3]

Τοποθέτηση μονίμων μαγνητών

Ο δρομέας των μηχανών μπορεί να θεωρηθεί σε διαφορετικές τοπολογίες ανάλογα με το πώς είναι τοποθετημένοι οι μόνιμοι μαγνήτες :

- Κινητήρες επιφανειακών μονίμων μαγνητών : Οι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του δρομέα. Η μηχανή μπορεί να στρέφεται από εξωτερική πηγή και τα τυλίγματα του στάτη παράγουν συμμετρικές τριφασικές ημιτονοειδείς τάσεις. Αποτελούν την πιο συνηθισμένη τοπολογία κινητήρων και προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα όπως την απλότητα κατασκευής τους, το χαμηλότερο κόστος συγκριτικά με τις άλλες διαμορφώσεις και κυρίως την πολύ υψηλή επίδοση της λόγω της συγκέντρωσης του πεδίου διέγερσης πρακτικά στο διάκενο της μηχανής. Κυριότεροι κίνδυνοι που αντιμετωπίζουν οι μηχανές τέτοιου τύπου είναι η απομαγνήτιση των μαγνητών λόγω εξωτερικών πεδίων και η αποκόλληση τους από το δρομέα σε εφαρμογές με πολύ υψηλές ταχύτητες.[4]
- Κινητήρες εμφυτευμένων μονίμων μαγνητών : Οι μαγνήτες τοποθετούνται στο εσωτερικό του μαγνητικού κυκλώματος του δρομέα. Αυτή η διαμόρφωση των μαγνητών προσφέρεται για συγκέντρωση ροής και υψηλή πυκνότητα ισχύος. Επιπλέον, οι μαγνήτες είναι καλύτερα προστατευμένοι από τις υψηλές αρμονικές των πόλων και διαθέτουν πιο συμπαγή μορφή. Το κόστος κατασκευής τους όμως είναι αρκετά υψηλό.
- Κινητήρες εσωτερικών επιφανειακών μαγνητών: Οι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του δρομέα, αλλά τα μεταξύ τους διάκενα είναι πληρωμένα με σίδηρο. Η εκτυπότητα λόγω σιδήρου, προκαλεί μια επιπλέον συνιστώσα ροπής ενώ σε σχέση με τους εξωτερικά επιφανειακούς μαγνήτες, παρέχουν αυξημένη ικανότητα συγκράτησης των μαγνητών. Παρόλα αυτά παρουσιάζουν χειρότερη θερμική συμπεριφορά. [5]



Σχήμα 1.2 – Κύριες τοπολογίες κινητήρων μόνιμων μαγνητών: Επιφανειακών μόνιμων μαγνητών, εσωτερικών επιφανειακών μαγνητών, εμφυτευμένων μόνιμων μαγνητών.[5]

Σχεδιασμός τυλιγμάτων

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι περιελίξεων στις σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη :

- Με διανεμημένα τυλίγματα στάτη : Όπου τα τυλίγματα είναι τριφασικά και κατανέμονται σε αυλάκια στην περιφέρεια του στάτη.
- Με συγκεντρωμένα τυλίγματα στάτη : Όπου το πηνίο της κάθε φάσης τυλίγεται γύρω από τους αντίστοιχους έκτυπους πόλους του πυρήνα του στάτη. [6]

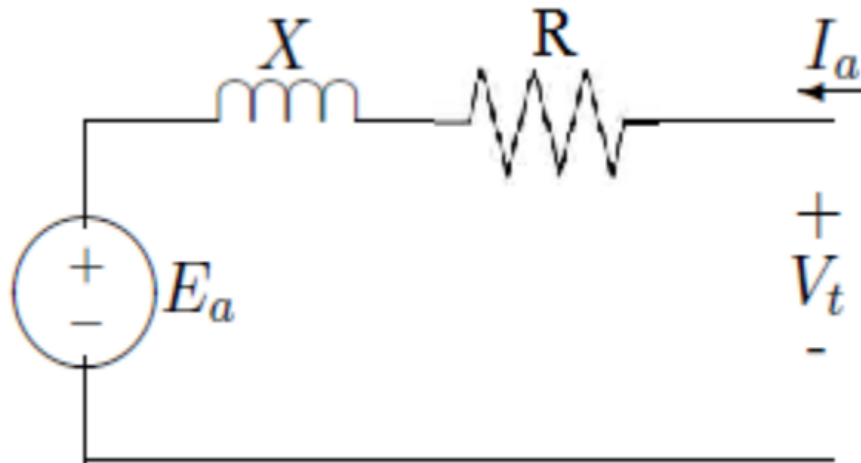
Διεύθυνση μαγνητικής ροής

Οι ΣΚΜΜ κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την διεύθυνση της μαγνητικής ροής που παράγεται από τους μόνιμους μαγνήτες :

- Κινητήρες αξονικού πεδίου : Η μαγνητική ροή που παράγεται είναι κάθετη στην ακτίνα της μηχανής και διέρχεται από το διάκενο, ακτινικά στα τυλίγματα του στάτη για να κλείσει το μαγνητικό κύκλωμα.
- Κινητήρες ακτινοειδούς πεδίου : Η μαγνητική ροή του πεδίου είναι ακτινική και οι ενεργοί ρευματοφόροι αγωγοί έχουν αξονική διεύθυνση.[7]

1.2.2 Ισοδύναμο κύκλωμα λειτουργίας

Το ισοδύναμο κύκλωμα λειτουργίας κινητήρα που βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας δίνεται στην παρακάτω εικόνα :



Σχήμα1.3 Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονου κινητήρα.

$$\text{Ισχύει : } V_t = E_a + (R + j \cdot X) \cdot I_a \Leftrightarrow E_a = V_t - (R + j \cdot X) \cdot I_a \quad (1.1)$$

Όπου :

V_t : Η τάση στα άκρα κάθε φάση του στάτη του κινητήρα. [V]

E_a : Η ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται λόγω περιστροφής του δρομέα. [V]

R : Η ωμική αντίσταση του τυλίγματος μιας φάσης. [Ω]

$j \cdot X$: Η σύγχρονη αντίδραση της κάθε φάσης του στάτη, η οποία είναι το άθροισμα της επαγωγικής αντίδρασης του τυλίγματος και της συνολικής αντίδρασης σπλισμού. [Ω]

I_a : Το ρεύμα που διαρρέει κάθε φάση του στάτη. [A]

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη E_a εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, την ταχύτητα περιστροφής και τη μαγνητική ροή του του κινητήρα. Συνεπώς το μέτρο της E_a δίνεται από τον τύπο:

$$E_a = \kappa \cdot \varphi \cdot \omega \quad (1.2)$$

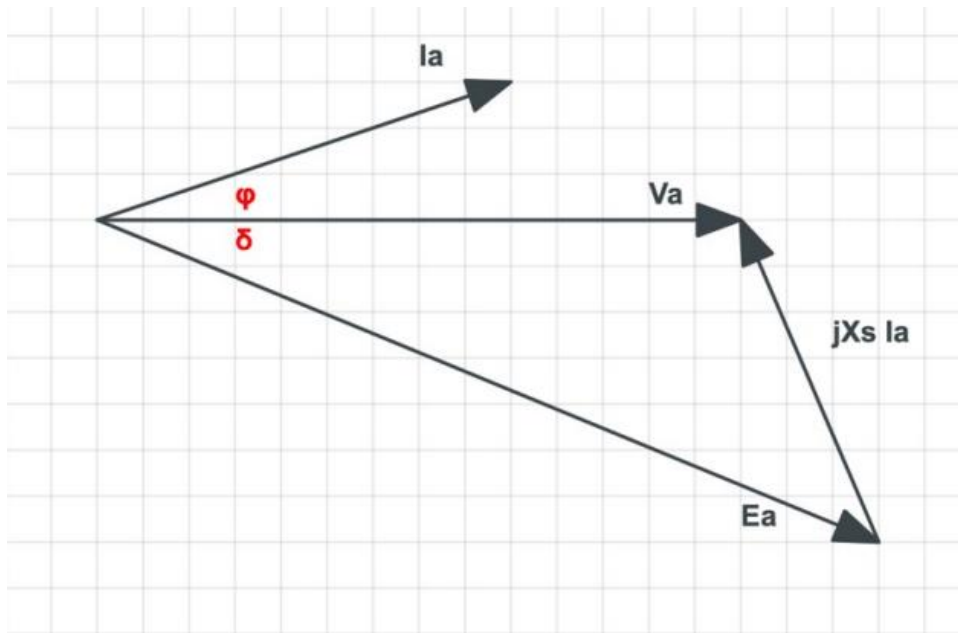
Όπου:

κ : Σταθερά εξαρτώμενη από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κάθε κινητήρα.

φ : Η μαγνητική ροή .

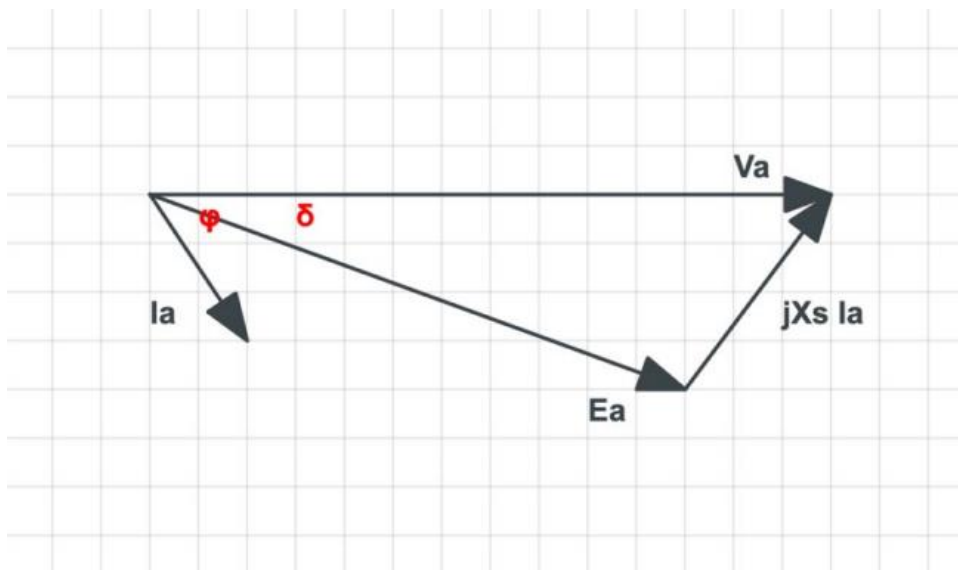
ω : Η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα .

Όταν το μέτρο του διανύσματος της ηλεκτρεγερτικής δύναμης είναι μεγαλύτερο από το μέτρο του διανύσματος της τάσης ακροδεκτών του V_a , λέμε πως ο κινητήρας βρίσκεται σε υπερδιέγερση (χωρητική συμπεριφορά κινητήρα). Ο κινητήρας απορροφά πραγματική ισχύ P και αποδίδει άεργο ισχύ Q στο δίκτυο.



Σχήμα 1.4 Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονου κινητήρα σε υπερδιέγερση.

Αντίθετα όταν το μέτρο της ηλεκτρεγερτικής δύναμης είναι μικρότερο ή ίσο της τάσης ακροδεκτών, ο κινητήρας βρίσκεται σε υποδιέγερση (επαγωγική συμπεριφορά). Ο κινητήρας απορροφά πραγματική ισχύ P και άεργο ισχύ Q από το δίκτυο.



Σχήμα 1.5 Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονου κινητήρα σε υποδιέγερση.

Η ταχύτητα του σύγχρονου κινητήρα εξαρτάται από τον αριθμό των πόλων αλλά και από την συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα, μεγέθη τα οποία παραμένουν σταθερά ανεξάρτητα από το φορτίο.

Η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας δίνεται από την σχέση:

$$T = \frac{3 \cdot Vt \cdot Ea \cdot \sin \delta}{\omega_m \cdot X_s} \quad (1.3)$$

Για $\delta = \pi/2 \Leftrightarrow \sin \delta = 1$ ο κινητήρας έχει μέγιστη ροπή. Αν ο κινητήρας ξεπεράσει την τιμή αυτή τότε αρχίζει και χάνει τον συγχρονισμό του, καθώς ο δρομέας επιβραδύνεται και αδυνατεί να ακολουθήσει το πεδίο του στάτη. Η ροπή εξαρτάται από την Ea και επομένως όσο μεγαλύτερη διέγερση έχει τόσο μεγαλύτερη η ροπή που μπορεί να αναπτύξει ο κινητήρας μας.[8]

1.3 Ηλεκτρικές μηχανές και προσθετική κατασκευή

Η προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing) ή όπως είναι ευρύτερα γνωστή τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing) αποτελεί μια σχετικά νέα τεχνολογία η οποία μας επιτρέπει την παραγωγή αντικειμένων και εξαρτημάτων απευθείας από ψηφιακά δεδομένα CAD (Computer Aided Design). Με την χρήση ψηφιακών μοντέλων (CAD/CAM), η τρισδιάστατη εκτύπωση κάνει δυνατή την κατασκευή προϊόντων, βιομηχανικής ποιότητας και ακρίβειας, χωρίς την ανάγκη συστήματος γραμμής παραγωγής. Ουσιαστικά αναλύει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ψηφιακών μοντέλων και παράγει τα φυσικά αντίγραφα τους. Έτσι, δύσκολα και περίπλοκα εξαρτήματα μπορούν να κατασκευαστούν με σημαντική μείωση του χρόνου και του κόστους κατασκευής. Σήμερα, η τρισδιάστατη εκτύπωση παρουσιάζει ταχεία ανάπτυξη παγκοσμίως, λόγω του πλεονεκτήματος της να φέρνει την παραγωγή πλησίον του τελικού χρήστη, μειώνοντας έτσι τους περιορισμούς της εφοδιαστικής αλυσίδας.[9]

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης, οι οποίες εξαρτώνται από την μορφή του υλικού πρώτης ύλης. Με βάση την εφαρμογή των εξαρτημάτων, οποιαδήποτε τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί [10]:

Συστήματα κονιοποιημένης πρώτης ύλης (σκόνη)

Το σύστημα με βάση τη σκόνη χρησιμοποιεί κανονικές και παραδοσιακές κεφαλές εκτύπωσης inkjet για την κατασκευή εξαρτημάτων. Τα συστήματα με βάση τη σκόνη μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες:

- Laser Metal Deposition (LMD)
- Direct Metal Laser Sintering (DMLS)
- Selective Laser Melting (SLM)
- Electron Beam Melting (EBM)

Συστήματα με στερεά πρώτη ύλη

Χρησιμοποιεί στερεά υλικά (κυρίως πολυεστέρες) ως βασικό συστατικό στην κατασκευή εξαρτημάτων και μοντέλων. Τα συστήματα αυτά ταξινομούνται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες :

- Fused Deposition Modeling (FDM)
- Electron Beam Freeform Fabrication (EBFF)
- Wire Pulse Arc Additive Manufacturing (WPAAM)

Συστήματα με υγρή πρώτη ύλη

Η μέθοδος με βάση το υγρό περιλαμβάνει τη μείωση ή τη στερεοποίηση ενός φωτοευαίσθητου πολυμερούς όταν μία ισχυρή ακτίνα λέιζερ φτάνει στην επιφάνεια του. Οι εκτυπωτές 3D συναρμολογούν το αντικείμενο από τα στρώματα του πολυμερούς μέσα σε μια δεξαμενή υγρού. Το σύστημα με βάση τα υγρά μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο κατηγορίες:

- Direct Light Processing (DLP)
- Στερεολιθογραφία (SLA)

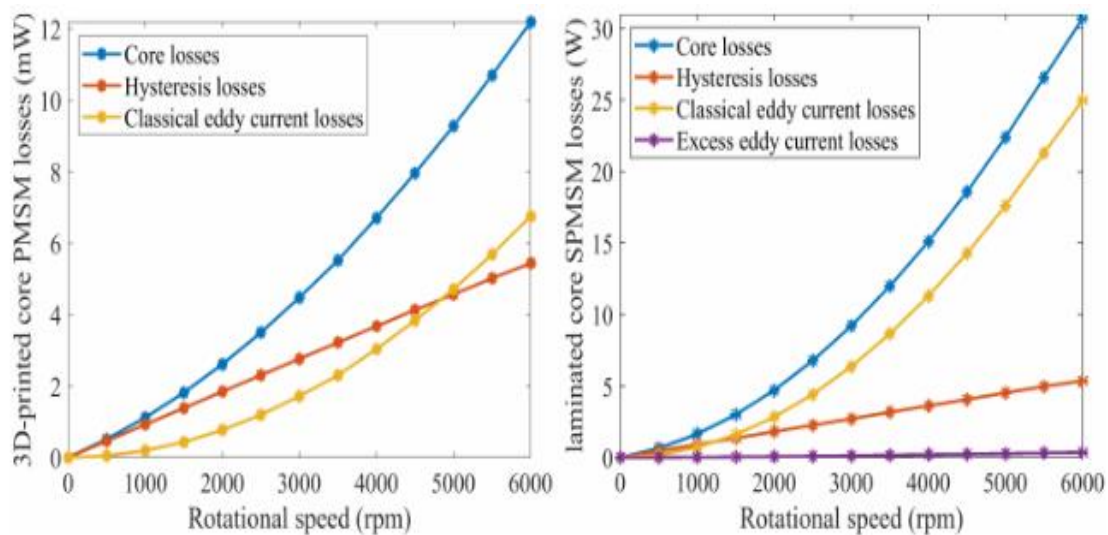


Σχήμα 1.6 Διάγραμμα τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης.[10]

Η προσθετική κατασκευή δεν χρησιμοποιείται ακόμη ευρέως στη βιομηχανική παραγωγή, καθώς η χρήση της περιορίζεται σε ειδικές εφαρμογές. Τα αποτελέσματα των εφαρμογών αυτών, όμως καταδεικνύουν σαφώς τις μεγάλες δυνατότητες της προσθετικής κατασκευής στην ηλεκτρολογική μηχανική. Παράδειγμα ειδικής εφαρμογής είναι η κατασκευή σύγχρονων κινητήρων μόνιμων μαγνητών και υψηλής ταχύτητας. Τα ελκυστικά τους χαρακτηριστικά όπως η υψηλή απόδοση, η πυκνότητα ισχύος, το μικρό μέγεθος και ο χαμηλός ακουστικός θόρυβος, έχουν κάνει τους κινητήρες τέτοιου τύπου πολύ δημοφιλείς τα τελευταία χρόνια. Ο σχεδιασμός και η παραγωγή τους όμως αποτελούν ιδιαίτερα δύσκολη και επίπονη διαδικασία. Η διαρκής προσπάθεια των επιστημόνων για την ελαχιστοποίηση των προβλημάτων παραγωγής αλλά και την βελτίωση της αποδοτικότητας των κινητήρων, έχει οδηγήσει στην έρευνα νέων υλικών και τεχνικών κατασκευής. Η προσθετική κατασκευή ανοίγει το δρόμο για νέες καινοτομίες λόγω της φθηνότερης κατασκευής πρωτοτύπων,

τους μειωμένους χρόνους παράδοσης και την συντομότερη αλυσίδα εφοδιασμού. Επομένως , η εκτύπωση τρισδιάστατων εξαρτημάτων μηχανών αποτελεί ενδιαφέρουσα τεχνολογική πρόκληση με μεγάλη προοπτική.[11]

Στην παρούσα διπλωματική εργασία , ο κινητήρας που μελετήσαμε περιέχει πολλά τρισδιάστατα εκτυπωμένα μέρη [12]. Κατασκευάστηκε από την υποψήφια διδάκτορα Πεχλιβανίδου Μαρία και είναι ένας σύγχρονος κινητήρας μόνιμων μαγνητών και υψηλών ταχυτήτων χωρίς ψήκτρες με Halbach διάταξη μαγνητών. Σε έρευνα όπου συγκρίθηκε η ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά του με έναν κινητήρα παρόμοιων γεωμετρικών χαρακτηριστικών αλλά με πυρήνες κατασκευασμένους από χάλυβα πυριτίου M235-35A και επιφανειακούς μόνιμους μαγνήτες , παρατηρήθηκε , πως ο 3d-print κινητήρας παρουσιάζει καλύτερη απόδοση από τον κινητήρα μεταλλικού πυρήνα σε υψηλές ταχύτητες. Παράλληλα , ο στάτης του 3d-print κινητήρα εμφάνισε μικρότερες απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων.[13]



Σχήμα 1.7 Σύγκριση απωλειών πυρήνα - Κινητήρας τρισδιάστατου εκτυπωμένου πυρήνα (αριστερά)- Κινητήρας πυρήνα χάλυβα (δεξιά) [13]

Τέτοιες εφαρμογές έχουν σκοπό να αποδείξουν πως η έννοια της προσθετικής κατασκευής είναι βιώσιμη και μπορεί να προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στην παραγωγή ηλεκτρικών κινητήρων.

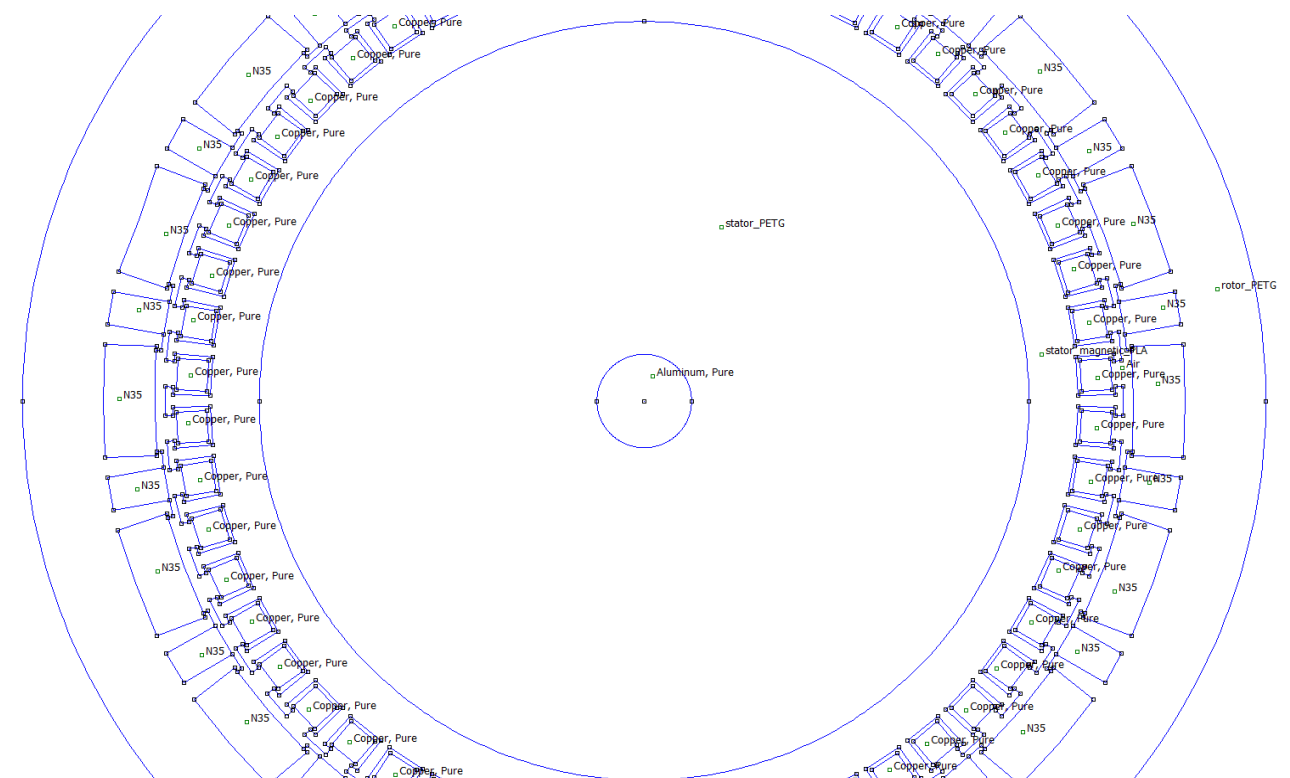
1.4 Παρουσίαση χαρακτηριστικών του υπό μελέτη κινητήρα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε τις προδιαγραφές και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα που αναλύουμε [12]. Όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη ενότητα , ο κινητήρας , ο οποίος κατασκευάστηκε από την κ. Πεχλιβανίδου Μαρία , είναι ένας σύγχρονος κινητήρας μόνιμων μαγνητών , υψηλών ταχυτήτων χωρίς ψήκτρες και με Halbach διάταξη μαγνητών. Η συστοιχία Halbach είναι μια διάταξη μόνιμων μαγνητών που δημιουργεί ένα ισχυρότερο πεδίο στη μία πλευρά, ενώ μειώνει το πεδίο στην άλλη πλευρά σχεδόν στο μηδέν. Αυτό επιτυγχάνεται με τον προσανατολισμό των μαγνητών έτσι ώστε οι πόλοι τους να είναι εκτός φάσης, συνήθως κατά 90

μοίρες. Ο κινητήρας διαθέτει 18 πόλους και 54 αυλάκια ,ενώ είναι εξωτερικού δρομέα με μέγιστη ταχύτητα περιστροφής 6000 ΣΑΛ. Στον πυρήνα του δρομέα είναι μερικώς εμφυτευμένοι μαγνήτες σε δύο διαφορετικές διαστάσεις . Οι μαγνήτες είναι τύπου κράματος νεοδυμίου-σιδήρου-βορίου (NdFeB) και έχουν κατάλληλη πολικότητα. Οι μαγνήτες NdFeB φέρουν μεγάλες τιμές παραμένοντα μαγνητισμού και συνεκτικού πεδίου, ωστόσο η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους περιορίζεται στους 150°C, περιορισμός που επιβάλλεται να ληφθεί υπόψη κατά τη χρήση και το σχεδιασμό της μηχανής [Παράρτημα-1]. Ο δρομέας και ο στάτης του κινητήρα δημιουργήθηκαν μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης. Ο δρομέας και η βάση του στάτη κατασκευάστηκαν από νήμα τερεφθαλικού πολυαιθυλενίου (PETG), το οποίο διαθέτει πολύ καλές θερμικές ιδιότητες και υψηλή ανθεκτικότητα σε σχέση με τους υπόλοιπους πολυεστέρες. Ο πυρήνας του στάτη αποτελείται από νήμα κράματος σιδηρομαγνήτη (magnetic iron PLA filament). Το υλικό αυτό είναι ένα μείγμα πολυ-γαλακτικού οξέος με σκόνη σιδήρου. Έχει χαμηλό κόστος και είναι εύκολο στην χρήση, ενώ διαθέτει ικανοποιητικές θερμικές ιδιότητες και η μαγνητική του συμπεριφορά είναι παρόμοια με αυτή του καθαρού σιδήρου[14]. Πρέπει να αναφερθεί ότι η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του magnetic iron pla εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη τεχνική που χρησιμοποιήθηκε για την τρισδιάστατη εκτύπωση του. Κάθε μία από τις υπάρχουσες τεχνολογίες, μπορεί να έχει διαφορετικό αντίκτυπο στις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού.



Σχήμα 1.8 Διάταξη του κινητήρα.[12]



Σχήμα 1.9 Κάτοψη σχεδίου του κινητήρα

Στον πίνακα 1.1 καταγράφονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών :

| Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κινητήρα | | |
|--|------------------------------|-------------|
| Αριθμός πόλων κινητήρα | p | 18 |
| Αριθμός εξωτερικών αυλάκων κινητήρα | N_{out} | 54 |
| Αριθμός εσωτερικών αυλάκων κινητήρα | N_{in} | 18 |
| Αξονικό ενεργό μήκος κινητήρα (mm) | L | 48.6 |
| Εσωτερική διάμετρος στάτη (mm) | D_s | 65 |
| Εξωτερική διάμετρος στάτη (mm) | D_{sout} | 81 |
| Εσωτερική διάμετρος δρομέα (mm) | D_{RS} | 82 |

| | | |
|---|--------------------------------|------------------------|
| Εξωτερική διάμετρος δρομέα (mm) | D_{RSOUT} | 105 |
| Ύψος/Πλάτος μικρού μόνιμου μαγνήτη (mm) | H_{SM}/W_{SM} | 4.8/2.84 |
| Ύψος/Πλάτος μεγάλου μόνιμου μαγνήτη (mm) | H_{LM}/H_{LM} | 4.37/947 |
| Ύψος εξωτερικών αυλακώσεων στάτη/ Άνοιγμα αυλακώσεων (mm) | H_S/H_{TIP} | 3.2/0.68 |
| Πλάτος εξωτερικών αυλακώσεων στο άνοιγμα/ στο μέσο/στο τέλος (mm) | $W_{OP} /W_M /W_{end}$ | 2.23/3.55/3.3 |
| Ύψος εσωτερικών αυλακώσεων στάτη/ Άνοιγμα αυλακώσεων/Εξόγκωμα αυλακώσεων (mm) | $H_{inS}/H_{inTIP} /H_{in}$ | 3.99/1.5/1.97 |
| Πλάτος εσωτερικών αυλακώσεων στο άνοιγμα/ στο μέσο/στο τέλος (mm) | $W_{inOP} /W_{inM} /W_{inend}$ | 5.58/8.27/6.5 |
| Όγκος στάτη (m ³) | V_S | 4.639×10^{-5} |
| Όγκος δρομέα (m ³) | V_R | 9.263×10^{-5} |
| Όγκος μόνιμων μαγνητών (m ³) | V_M | 3.971×10^{-5} |

Πίνακας 1.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κινητήρα.

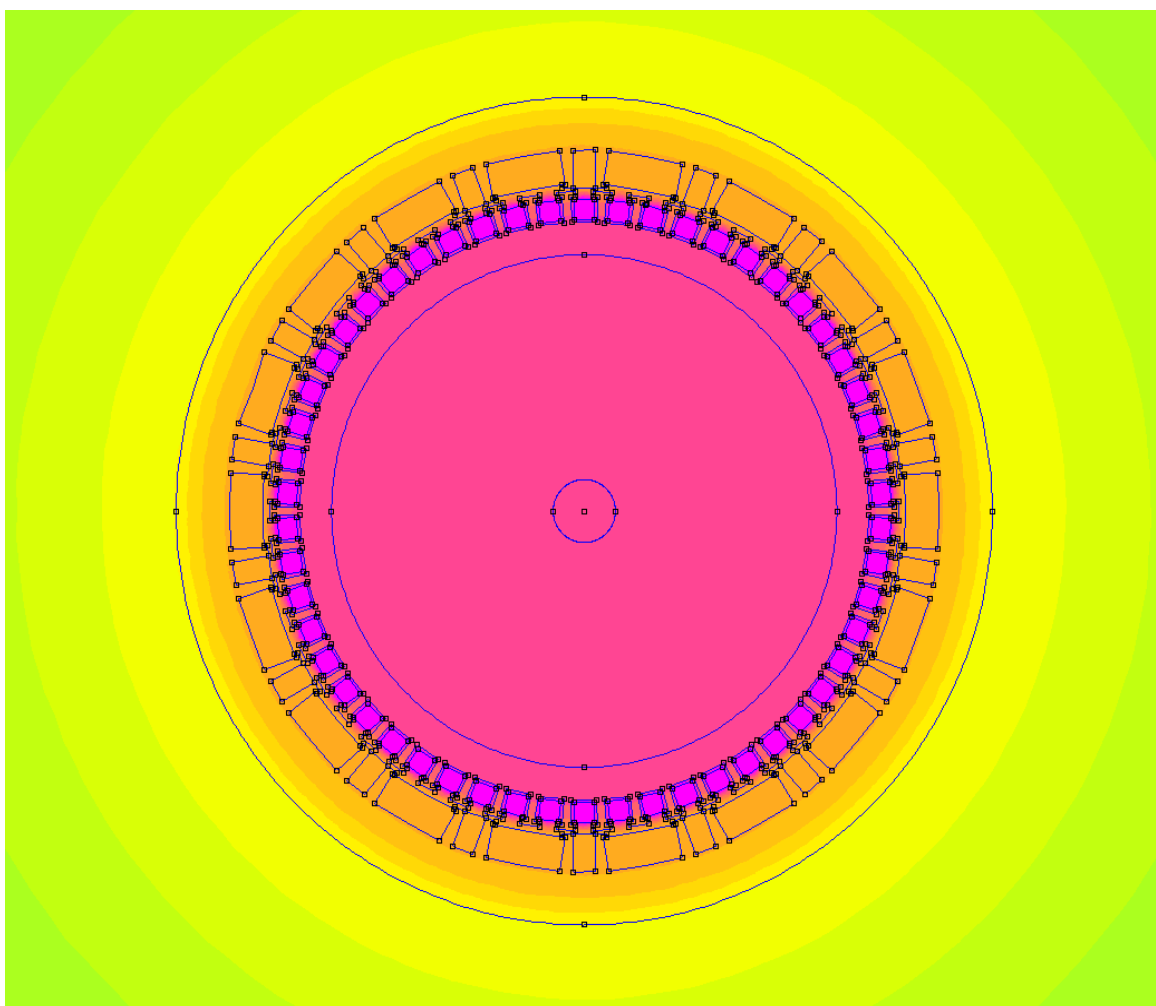
1.5 Μετάδοση θερμότητας στις ηλεκτρικές μηχανές

Η μετάδοση της θερμότητας αποτελούσε ανέκαθεν σημαντικό πεδίο έρευνας για πολλές επιστημονικές και μη εφαρμογές. Στις ηλεκτρικές μηχανές, η θερμική ανάλυση είναι το στάδιο σχεδίασης που δεν μπορεί να αγνοηθεί από τους κατασκευαστές, γιατί οι μεταβολές των θερμοκρασιών στο εσωτερικό της μηχανής, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την απόδοση και την διάρκεια ζωής της. Αυτό συμβαίνει γιατί οι υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζουν όχι μόνο τον ίδιο τον κινητήρα, αλλά και τα ηλεκτρονικά και μηχανικά εξαρτήματα του συστήματος, που βρίσκονται κοντά σε αυτόν. Για την περίπτωση των σύγχρονων μηχανών μόνιμων μαγνητών είναι απαραίτητη η πρόβλεψη της θερμοκρασίας τόσο στα τυλίγματα του στάτη όσο και στους μαγνήτες που αποτελούν τα πιο ευαίσθητα σημεία της μηχανής. Πιθανή αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από τα όρια μπορεί να οδηγήσει στην κατάρρευση της μόνωσης των τυλιγμάτων ή και ακόμα στην απομαγνήτιση των μαγνητών λόγω υπερθέρμανσης και αυτό πρακτικά συνεπάγεται την καταστροφή της μηχανής [15]. Ακόμη πιο ειδική περίπτωση αποτελούν οι 3D print μηχανές. Οι έρευνες για την θερμική συμπεριφορά τέτοιου είδους μηχανών βρίσκονται σε πολύ πρώιμο στάδιο. Σε πολλές περιπτώσεις, δεν είναι γνωστές οι θερμικές ιδιότητες των 3D print υλικών, διότι οι κατασκευαστές τους δεν διαθέτουν επαρκείς πληροφορίες γι' αυτά τα υλικά. Επομένως στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας μας κρίνεται απαραίτητο να μελετήσουμε τα θερμικά όρια του κινητήρα καθώς και να συλλέξουμε πληροφορίες για την μεταφορά θερμότητας στο εσωτερικό των υλικών του.

Πολλές διαφορετικές μέθοδοι μέτρησης και ανάλυσης θερμικών φαινομένων έχουν διερευνηθεί και χρησιμοποιηθεί. Επίσης όργανα διαφορετικής τεχνολογίας χρησιμοποιούνται για την παρατήρηση της μεταβολής των θερμοκρασιών και γενικότερα της θερμικής συμπεριφοράς των μηχανών. Μερικά από αυτά τα όργανα είναι η θερμοκάμερα, οι θερμικές επαφές, τα ψηφιακά θερμόμετρα με υπέρυθρες και το σκόπευτρο λέιζερ, με τα δύο τελευταία να χρησιμοποιούνται κυρίως για μετρήσεις θερμοκρασιών στα κινούμενα μέρη της μηχανής. Οι θερμικές επαφές τύπου θερμίστορ χρησιμοποιούνται κατά κόρον στα εργαστήρια και βασίζονται στη μεταβολή της αντίστασης ενός πολυμερούς, κεραμικού ή μετάλλου, όταν η θερμοκρασία μεταβάλλεται. Επίσης άλλες θερμικές επαφές χρησιμοποιούν τις ιδιότητες ενός διμεταλλικού ελάσματος, όπως CrAl, για την αξιόπιστη μέτρηση θερμοκρασιών. Οι θερμικές επαφές τοποθετούνται στα διάφορα τμήματα της μηχανής (κυρίως σε μη περιστρεφόμενα) που θέλουμε να μετρήσουμε, με τη μέθοδο αυτή να είναι αρκετά αξιόπιστη.[16]

Η θερμική ανάλυση ηλεκτρικών μηχανών στοχεύει στην πρόβλεψη και τη προσομοίωση της θερμικής τους συμπεριφοράς, ώστε να είναι δυνατή η λήψη αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Μπορεί να γίνει μέσω αναλυτικών θερμικών σχέσεων, εντούτοις όμως, επειδή η θερμική ανάλυση εμπεριέχει εκτενείς μαθηματικούς υπολογισμούς, η προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς της μηχανής συνήθως γίνεται μέσω λογισμικών προσομοίωσης ή χρησιμοποιώντας μοντέλα συγκεντρωμένων παραμέτρων. Στο επόμενο κεφάλαιο, αφού αναλυθούν τα θερμικά φαινόμενα που συμβαίνουν στις ηλεκτρικές μηχανές, θα γίνει μια πιο εκτενής παρουσίαση των μεθόδων θερμικής ανάλυσης.

Κεφάλαιο 2



Θερμικά Φαινόμενα

Σκοπός της θερμικής ανάλυσης είναι να συγκεντρώσουμε πληροφορίες για την θερμική συμπεριφορά της μηχανής ώστε να βελτιστοποιήσουμε την σχεδίαση της και να αποφύγουμε τυχόν φθορά των υλικών της. Ειδικότερα τέτοιες πληροφορίες αφορούν την κατανομή της θερμοκρασίας σε κάθε σημείο της μηχανής αλλά και την μετάδοση της θερμότητας σε διαφορετικές περιοχές της.

Με τον όρο μετάδοση θερμότητας, εννοούμε το ποσό της θερμικής ενέργειας που μεταφέρεται στο εσωτερικό ενός σώματος ή μεταξύ των σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή, λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς, με τη θερμότητα να μεταδίδεται πάντα από το σύστημα υψηλότερης προς το σύστημα χαμηλότερης θερμοκρασίας.

Η μετάδοση της θερμότητας ανάλογα με το ρυθμό και τον τρόπο που μεταφέρεται, έχει ταξινομηθεί σε διάφορους μηχανισμούς.

2.1 Τρόποι μετάδοσης θερμότητας

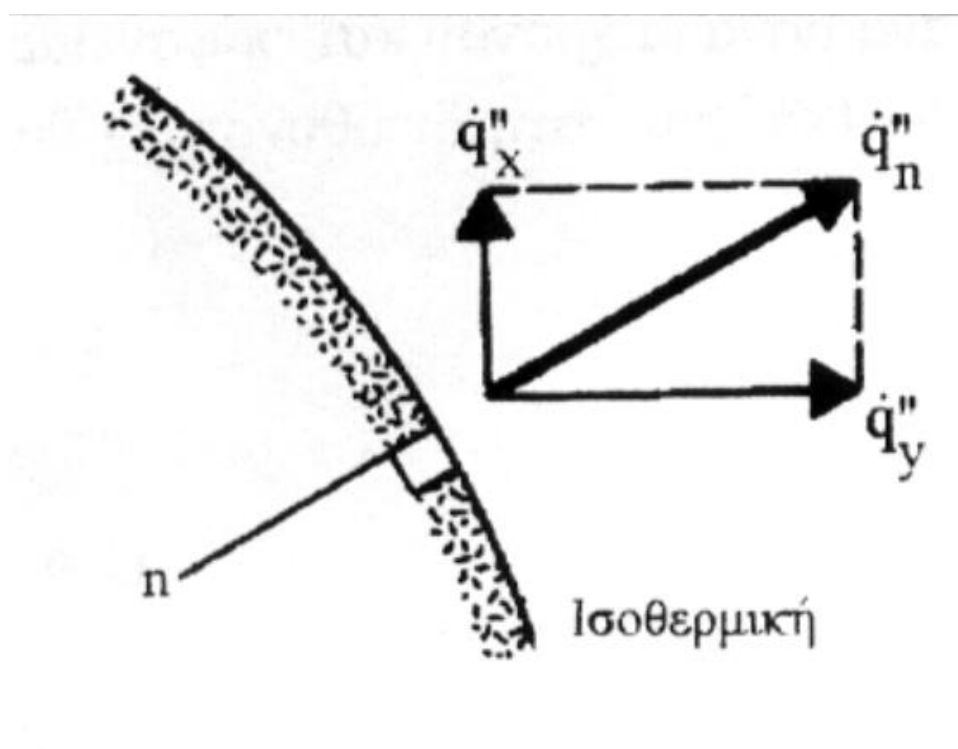
Οι μηχανισμοί με τους οποίους μεταφέρεται η θερμότητα στα διάφορα μέρη του συστήματος ή μεταξύ δύο συστημάτων είναι οι εξής :

- Αγωγή
- Συναγωγή
- Ακτινοβολία

Για τον μαθηματικό ορισμό των παραπάνω μηχανισμών, ορίζεται πρώτα το μέγεθος της πυκνότητας θερμορροής ή πυκνότητα ροής θερμότητας q [W/m^2], που για μετάδοση θερμότητας dQ [W] μέσω μιας επιφάνειας dS [m^2] προσδιορίζεται από τη σχέση :

$$q = dQ/dS \quad (2.1)$$

Το διάνυσμα της πυκνότητας θερμορροής είναι πάντα κάθετο στην ισοθερμική επιφάνεια μέσω της οποίας γίνεται η μετάδοση της θερμότητας [17].



Σχήμα 2.1 Διάνυσμα πυκνότητας θερμορροής [17]

2.2 Αγωγή

Με τον όρο Αγωγή (conduction) ή Διάχυση ή αλλιώς Θερμική Αγωγιμότητα αναφερόμαστε στο φαινόμενο κατά το οποίο η θερμότητα μεταδίδεται στο εσωτερικό ενός στερεού ή ενός ακίνητου ρευστού, όταν στο μέσο υπάρχει θερμοκρασιακή κλίση. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων ενός υλικού, που οδηγεί σε μεταφορά ενέργειας από τα σωματίδια μεγαλύτερης ενέργειας προς αυτά χαμηλότερης ενέργειας. Εάν δύο σωματίδια με διαφορετικές θερμοκρασίες έρθουν σε επαφή, τότε μέσω του μηχανισμού της αγωγής θα γίνει μετάδοση θερμότητας από το πιο θερμό σωματίδιο στο πιο ψυχρό ώστε να επιτευχθεί θερμική ισορροπία. Στο εσωτερικό ενός στερεού η ενέργεια των μορίων του είναι ίση με το άθροισμα της κινητικής και της δυναμικής τους ενέργειας. Η θερμοκρασία των μορίων είναι ανάλογη της κινητικής ενέργειας. Επομένως η αύξηση της, συνεπάγεται και αύξηση της θερμοκρασίας τους. [17]

Ο μηχανισμός της αγωγής συμβαίνει με δύο τρόπους :

- (I) Η θερμότητα μπορεί να μεταφερθεί από μοριακή αλληλεπίδραση, στην οποία τα μόρια από ένα υψηλότερο επίπεδο ενέργειας (σε υψηλότερη θερμοκρασία) απελευθερώνουν ενέργεια στα γειτονικά μόρια που βρίσκονται σε χαμηλότερο επίπεδο ενέργειας μέσω δονήσεων πλέγματος. Η μεταφορά θερμότητας με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή μεταξύ στερεών, υγρών και αερίων.
- (II) Το δεύτερο μέσο της αγωγιμότητας είναι η μεταφορά θερμότητας μεταξύ των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Ειδικότερα, αυτό είναι χαρακτηριστικό των υγρών και των καθαρών μετάλλων. Ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων σε κράματα ποικίλλει σημαντικά, ενώ σε υλικά (όχι μέταλλα), ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι μικρός. Η θερμική αγωγιμότητα των στερεών εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Τα καθαρά μέταλλα είναι οι καλύτεροι αγωγοί θερμότητας.

Μαθηματικά το φαινόμενο της αγωγής περιγράφεται στις διάφορες διαστάσεις από τον νόμο του Fourier [17] :

$$\Phi_{th} = -\lambda \cdot S \cdot \nabla T \quad (2.2)$$

Όπου

Φ_{th} : ο ρυθμός μεταφοράς της θερμότητας

λ : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας [$W/m \cdot K$]

S : η επιφάνεια δια μέσω της οποίας γίνεται η μεταφορά θερμότητας [m^2]

∇T : η παράγωγος της θερμοκρασίας

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ είναι χαρακτηριστικός για το κάθε υλικό και εξαρτάται από τη θερμοκρασία μέσω της σχέσης :

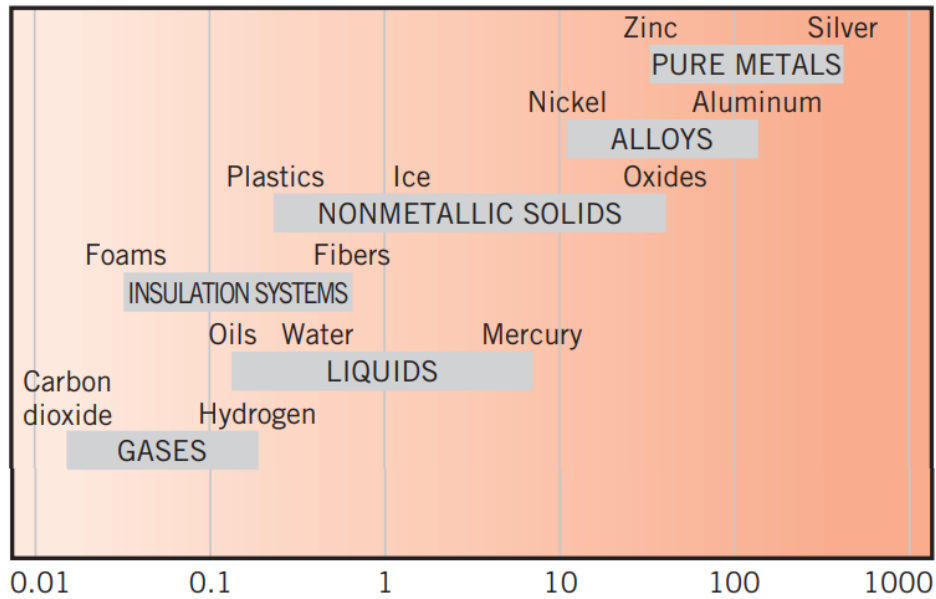
$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta T) \quad (2.3)$$

Με

λ_0 : η τιμή του συντελεστή στη θερμοκρασία αναφοράς T_0

β : μία σταθερά που προκύπτει πειραματικά

ΔT : η απόκλιση της θερμοκρασίας από τη θερμοκρασία αναφοράς



Σχήμα 2.2 Εύρος τιμών θερμικών αγωγιμοτήτων για διάφορες καταστάσεις της ύλης σε κανονικές θερμοκρασίες και πίεση [18]

2.2.1 Μονοδιάστατο πρόβλημα

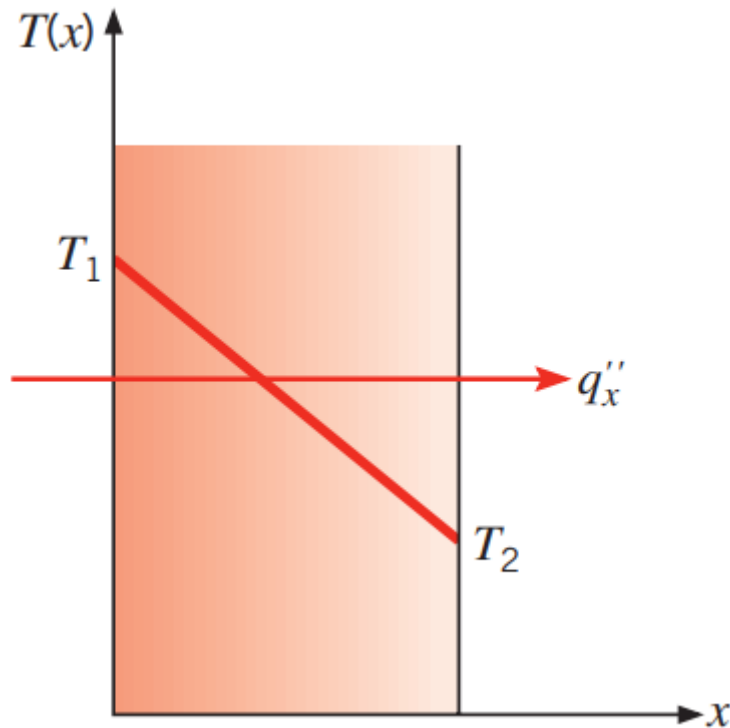
Έστω πως έχουμε ροή θερμότητας προς μία διεύθυνση \bar{x} κάθετη σε μια επιφάνεια S , με πυκνότητα θερμοροής q στη διεύθυνση \bar{x} , τότε ο νόμος του Fourier για την μία διάσταση είναι [17] :

$$q = -\lambda \cdot dT/dx \quad (2.4)$$

Επομένως η ροή θερμότητας Q [W] στην διεύθυνση \bar{x} δίνεται από την σχέση :

$$Q_x = q \cdot S = -\lambda \cdot S \cdot dT/dx \quad (2.5)$$

Όπου S [m^2] το εμβαδόν της κάθετης επιφάνειας μέσω της οποίας γίνεται η μεταφορά της θερμότητας.



Σχήμα 2.3 Η σχέση μεταξύ συστήματος συντεταγμένων, ροής θερμότητας και της κλίσης θερμοκρασίας σε μία διάσταση [18].

2.2.2 Τρισδιάστατο πρόβλημα

Στις τρεις διαστάσεις ο νόμος του Fourier δίνεται από την εξής σχέση [17]:

$$q_n = -\lambda \cdot dT/dn \quad (2.6)$$

Όπου n το κάθετο διάνυσμα στην ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια. Η ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που έχουν την ίδια θερμοκρασία και μέσω της οποίας γίνεται η διάδοση της θερμότητας.

Σε καρτεσιανές συντεταγμένες η γενίκευση της εξίσωσης (2.6) έχει την ακόλουθη μορφή :

$$q_n = -\lambda \nabla T = -\lambda \cdot \left(i \frac{dT}{dx} + j \frac{dT}{dy} + k \frac{dT}{dz} \right) \quad (2.7)$$

Με

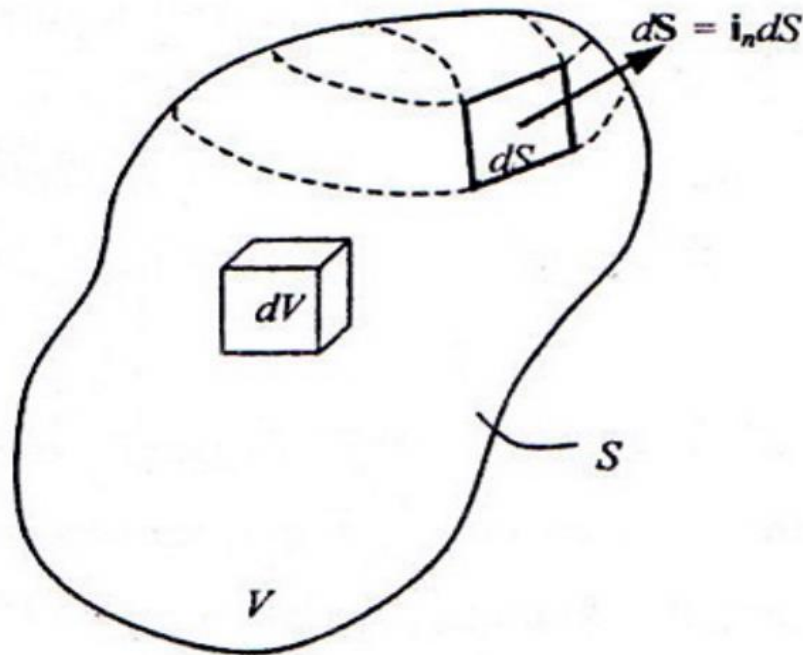
∇T : την κλίση της θερμοκρασίας στο χώρο

i, j, k : τα μοναδιαία διανύσματα στις διευθύνσεις x, y και z .

Η εξίσωση της θερμοκρασίας στο τρισδιάστατο πρόβλημα είναι συνάρτηση των μεταβλητών θέσης (x, y, z) και του χρόνου (t) δηλαδή $T = T(x, y, z, t)$. Αν υποθέσουμε ότι στον όγκο V (σχήμα 2.4), υπάρχουν πηγές που παράγουν θερμότητα συνολικής ισχύος Q_g (generated), η οποία μεταδίδεται μέσω της επιφάνειας του όγκου στο περιβάλλον με ρυθμό μεταφοράς θερμότητας Q_{out} , τότε

μπορούμε με χρήση της εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας να υπολογίσουμε την αναλυτική μορφή της εξίσωσης θερμικής αγωγής για τρισδιάστατο πρόβλημα. Συμβολίζοντας με E την κινητική ενέργεια των μορίων στο εσωτερικό του όγκου, από την αρχή διατήρησης της ενέργειας προκύπτει ότι [17]:

$$\frac{dE}{dt} = Q_g - Q_{out} \quad (2.8)$$



Σχήμα 2.4 Εξεταζόμενος όγκος σε τρισδιάστατο πρόβλημα

Συμβολίζοντας με $\dot{q} (W/m^3)$ την συνολική ισχύ των πηγών θερμότητας ανά μονάδα όγκου του στερεού προκύπτει η παρακάτω σχέση :

$$Q_g = \int_V \dot{q} dV \quad (2.9)$$

Ο ρυθμός μεταφοράς της εξερχόμενης θερμότητας από τον όγκο υπολογίζεται με χρήση της σχέσης (2.7) και μας δίνει :

$$Q_{out} = \int_S (-\lambda \cdot \nabla T) \cdot i_n^\wedge ds \quad (2.10)$$

Το παραπάνω ολοκλήρωμα μετατρέπεται από επιφανειακό σε ολοκλήρωμα χώρου με χρήση του θεωρήματος Gauss :

$$Q_{out} = - \int_V \nabla(\lambda \cdot \nabla T) dV \quad (2.11)$$

Τέλος, για να ολοκληρώσουμε τον υπολογισμό του ενεργειακού ισοζυγίου της εξίσωσης (2.8) πρέπει να ορίσουμε και τον ρυθμό μεταβολής της εσωτερικής ενέργειας, ο οποίος μας δίνεται από την παρακάτω σχέση [17]:

$$\frac{dE}{dt} = \int_V (\rho \cdot c_p \cdot dT/dt) dV \quad (2.12)$$

Όπου

ρ : η πυκνότητα του υλικού (kg/m^3)

c_p : η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού ($J/kg \cdot K$)

Άρα, η εξίσωση (2.8) της αρχής διατήρησης της ενέργειας γράφεται ως :

$$\int_V (\rho \cdot c_p \cdot dT/dt) dV = \int_V \dot{q} dV + \int_V \nabla(\lambda \cdot \nabla T) dV$$
$$\Leftrightarrow \rho \cdot c_p \cdot dT/dt = \dot{q} + \nabla(\lambda \cdot \nabla T) \quad (2.13)$$

Ο τύπος αυτός περιγράφει το ενεργειακό ισοζύγιο για κάθε σύστημα σε πολυδιάστατο χώρο για τον μηχανισμό της θερμικής αγωγής. Στις παραπάνω εξισώσεις που αναλύσαμε ο συντελεστής αγωγιμότητας λ ήταν εξίσωση της θέσης και περιγράφεται από τους χωρικούς συντελεστές, σε περίπτωση όμως που είναι ανεξάρτητος από το σημείο του υλικού στο οποίο βρίσκεται τότε ο τύπος (2.13) του ισοζυγίου απλοποιείται στον [17]:

$$\rho \cdot c_p \cdot dT/dt = \dot{q} + \lambda \cdot \nabla^2 T$$
$$\Leftrightarrow \frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{d^2 T}{dz^2} + \frac{\dot{q}}{\lambda} = \frac{1}{a} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (2.14)$$

Όπου $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$ ο συντελεστής θερμικής διάχυσης του υλικού

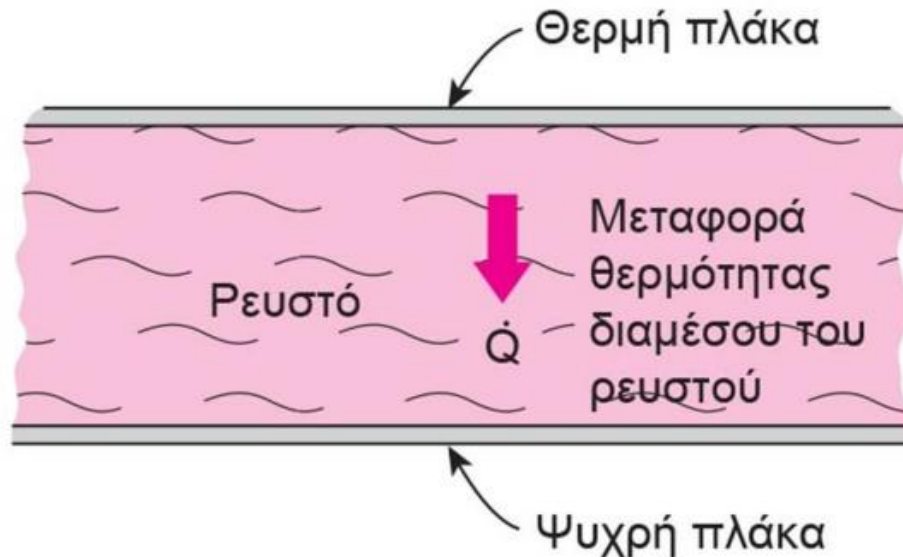
2.3 Συναγωγή

Συναγωγή (Convection) ονομάζεται ο μηχανισμός εκείνος κατά τον οποίο η θερμότητα μεταδίδεται μεταξύ μιας επιφάνειας και ενός κινούμενου ρευστού όταν αυτά βρίσκονται σε επαφή και διαφορετική θερμοκρασία. Αν και συχνά θεωρείται ως ξεχωριστή μέθοδος μεταφοράς θερμότητας, η συναγωγή περιλαμβάνει τις συνδυασμένες διεργασίες της αγωγιμότητας (διάχυση θερμότητας) και οριζόντιας μεταφοράς (μεταφορά θερμότητας με μαζική ροή ρευστού). Η διαδικασία της μεταφοράς της θερμότητας από ένα στερεό σε ένα υγρό, ή το αντίστροφο, απαιτεί όχι μόνο τη μεταφορά της θερμότητας από το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης του ρευστού, αλλά επίσης και τη διάχυση (diffusion) της θερμότητας μέσω του σταθερού ορίου δίπλα στο στερεό[18].

Το φαινόμενο της συναγωγής ανάλογα με την ροή του ρευστού μπορεί να διακριθεί σε :

- (I) **Ελεύθερη συναγωγή** όταν η ροή προκαλείται με φυσικό τρόπο από τις διαφορετικές πυκνότητες που οφείλονται σε θερμοκρασιακές διαφορές μέσα στον όγκο του ρευστού. Η ροή προκαλείται από δυνάμεις άνωσης οι οποίες οφείλονται στην διαφορά πυκνότητας στον όγκο του ρευστού.
- (II) **Εξαναγκασμένη συναγωγή** όταν η ροή προκαλείται από ανεμιστήρες, αντλίες ή γενικότερα εξωτερικά μέσα .

- (III) **Συνδυασμένη συναγωγή** όταν συνυπάρχουν και οι δύο μηχανισμοί που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Αυτό παρατηρείται όταν η ταχύτητα του ρευστού, λόγω της εξαναγκασμένης κυκλοφορίας είναι μικρή και οι δυνάμεις άνωσης λόγω της φυσικής συναγωγής μεγάλες.



Σχήμα 2.5 Μεταφορά θερμότητας διαμέσου ενός ρευστού που βρίσκεται τοποθετημένο ανάμεσα σε δύο παράλληλες πλάκες.[19]

Ο νόμος του Νεύτωνα για την ψύξη περιγράφει μαθηματικά τον μηχανισμό της συναγωγής, με την προϋπόθεση ότι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι ανεξάρτητος ή σχετικά ανεξάρτητος από τη διαφορά θερμοκρασίας, μεταξύ του αντικειμένου και του περιβάλλοντος. Ο νόμος του Νεύτωνα αναφέρει ότι ο ρυθμός απώλειας θερμότητας ενός σώματος είναι ανάλογος προς τη διαφορά της θερμοκρασίας, μεταξύ του σώματος και του περιβάλλοντος του. Επομένως εάν θεωρήσουμε πως το περιβάλλον είναι ρευστό και ρέει γύρω από ένα στερεό σώμα και q (W/m^2) η πυκνότητα θερμοροής τότε [17]:

$$q = h \cdot (T_s - T_{\text{ρευστού}}) \quad (2.15)$$

Όπου

h : ο συντελεστής συναγωγής [$W/m^2 \cdot K$]

T_s : θερμοκρασία επιφάνειας [K]

$T_{\text{ρευστού}}$: θερμοκρασία του ρευστού [K]

Ο συντελεστής συναγωγής h δεν εξαρτάται μόνο από την ιδιότητα του υλικού. Η ροή και η ταχύτητα του ρευστού, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος και τα θερμοδυναμικά και ρευστομηχανικά χαρακτηριστικά του ρευστού αποτελούν επιπλέον παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή του. Έτσι ο ακριβής υπολογισμός του συντελεστή είναι μια πολύ δύσκολη διαδικασία για αυτό

αρκετά συχνά χρησιμοποιούνται εμπειρικές τιμές ή τύποι. Ο εμπειρικός τύπος υπολογισμού του h για κυλινδρική επιφάνεια επαφής με διάμετρο D που φέρνει σε επαφή ένα στερεό θερμοκρασίας T_s και ένα ρευστό θερμοκρασίας $T_{\text{ρευστου}}$ δίνεται από τον τύπο [20]:

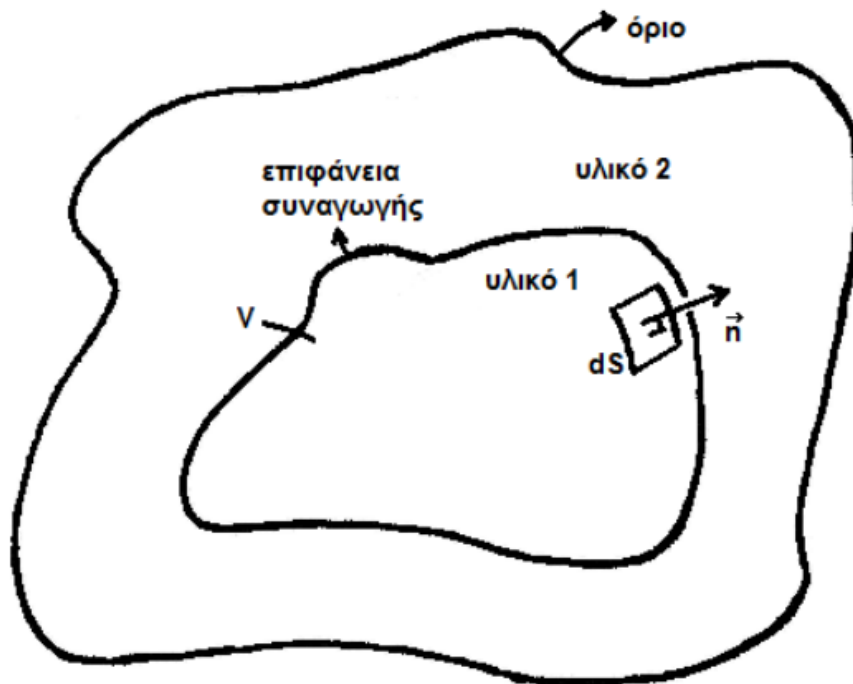
$$h \cong 1.32 \left[\frac{T(t)_s - T(t)_{\text{ρευστου}}}{D} \right]^{0.25} \quad (2.16)$$

Κατά τη θερμική ανάλυση των μηχανών ο συντελεστής συναγωγής παίζει μεγάλο ρόλο στο διάκενο του κινητήρα.

2.3.1 Τρισδιάστατο πρόβλημα

Η εξίσωση της θερμοκρασίας στο τρισδιάστατο πρόβλημα είναι συνάρτηση των μεταβλητών θέσης (x, y, z) και του χρόνου (t) δηλαδή $T = T(x, y, z, t)$.

Θεωρώντας ότι δυο υλικά διαφορετικής θερμοκρασίας, ένα στερεό (υλικό1) και ένα ρευστό (υλικό2), έρχονται σε επαφή μέσω μιας επιφάνειας S , με χρήση της αρχής διατήρησης της ενέργειας μπορούμε να υπολογίσουμε την σχέση που περιγράφει την μετάδοση θερμότητας μέσω του μηχανισμού συναγωγής[17].



Σχήμα 2.6 Αναπαράσταση συναγωγής μεταξύ στερεού και ρευστού[17]

Έστω ότι τα μόρια του υλικού 1 (στερεό) έχουν εσωτερική ενέργεια E_1 και τα μόρια του υλικού 2 (ρευστό) έχουν εσωτερική ενέργεια E_2 , τότε η συνολική μεταβολή των εσωτερικών ενεργειών της μάζας ελέγχου θα είναι $\frac{dE_1}{dt}$ και $\frac{dE_2}{dt}$ αντίστοιχα. Υποθέτουμε ότι στο εσωτερικό του στερεού υπάρχουν πηγές θερμότητας συνολικής ισχύος Q_g , ενώ συμβολίζουμε με Q_{out} την ροή θερμότητας που εξέρχεται από την επιφάνεια των δύο υλικών.

Σύμφωνα με το ισοζύγιο ενέργειας για το υλικό1 , η συνολική μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του στερεού ισούται με τη θερμική ισχύ που παράγεται από τις πηγές θερμότητας μέσα στο στερεό μείον τη ροή θερμότητας που διαδίδεται προς το εξωτερικό του στερεού προς το ρευστό :

$$\frac{dE_1}{dt} = Q_g - Q_{s, out} \quad (2.17)$$

Όπως και στο φαινόμενο της αγωγής (2.9), εάν $\dot{q}(W/m^3)$ η συνολική ισχύς των πηγών θερμότητας ανά μονάδα όγκου του στερεού , τότε :

$$Q_g = \int_V \dot{q} dV \quad (2.18)$$

Η θερμορροή εξόδου $Q_{s, out}$ από το στερεό στο ρευστό , υπολογίζεται με την χρήση του νόμου του Νεύτωνα για την ψύξη (2.15), θεωρώντας ότι η επιφάνεια επαφής βρίσκεται σε θερμοκρασία T_s και το ρευστό πλησίον της επιφάνειας επαφής σε θερμοκρασία $T_{\rho\epsilon\upsilon\sigma\tau\omicron\upsilon, \epsilon\pi\iota\phi\alpha\upsilon\epsilon\iota\alpha\varsigma}$, άρα :

$$Q_{s, out} = \int_S h \cdot [T(x, y, z, t)_s - T(x, y, z, t)_{\rho\epsilon\upsilon\sigma\tau\omicron\upsilon, \epsilon\pi\iota\phi\alpha\upsilon\epsilon\iota\alpha\varsigma}] dS \quad (2.19)$$

Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του στερεού μπορεί να εκφραστεί με τη βοήθεια της πυκνότητας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας του στερεού. Έτσι :

$$\frac{dE_1}{dt} = \int_V (\rho_1 \cdot c_{p1} \cdot dT(x, y, z, t)_s / dt) dV \quad (2.20)$$

Όπου

ρ_1 : η πυκνότητα του στερεού (kg/m^3)

c_{p1} : η ειδική θερμοχωρητικότητα του στερεού ($J/kg \cdot K$)

Επομένως, η εξίσωση της αρχής διατήρησης (2.17) της ενέργειας γράφεται ως :

$$\begin{aligned} \frac{dE_1}{dt} = Q_g - Q_{s, out} \Leftrightarrow \\ \int_V (\rho_1 \cdot c_{p1} \cdot dT(x, y, z, t)_s / dt) dV = \\ \int_V \dot{q} dV + \int_S h \cdot [T(x, y, z, t)_s - T(x, y, z, t)_{\rho\epsilon\upsilon\sigma\tau\omicron\upsilon, \epsilon\pi\iota\phi\alpha\upsilon\epsilon\iota\alpha\varsigma}] dS \end{aligned} \quad (2.21)$$

Αντίστοιχα με τον ίδιο τρόπο θα περιγράψουμε την μεταφορά θερμότητας και στο ρευστό υλικό2. Η συνολική μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του ρευστού ισοδυναμεί με την ποσότητα θερμορροής που μεταδίδεται από το στερεό στο ρευστό μέσω της επιφάνειας επαφής (Q_{in}) μείον τη ροή θερμότητας που μεταδίδεται από το ρευστό προς το περιβάλλον (Q_{out}) :

$$\frac{dE_2}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (2.22)$$

Για την Q_{in} έχουμε ότι :

$$Q_{in} = Q_{s, out} = \int_S h \cdot [T(x, y, z, t)_s - T(x, y, z, t)_{\rho\epsilon\upsilon\sigma\tau\omicron\upsilon, \epsilon\pi\iota\phi\alpha\upsilon\epsilon\iota\alpha}] dS \quad (2.23)$$

Όπως και στην περίπτωση του στερεού (2.20), η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του ρευστού ισούται:

$$\frac{dE_2}{dt} = \int_V (\rho_2 \cdot c_{p2} \cdot dT(x, y, z, t)_{\rho\epsilon\upsilon\sigma\tau\omicron\upsilon}/dt) dV \quad (2.24)$$

Όπου

ρ_2 : η πυκνότητα του ρευστού-υλικού2

c_{p2} : η ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού-υλικού2

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2.24) και (2.23) στη σχέση (2.22) προκύπτει η παρακάτω εξίσωση που εκφράζει το ενεργειακό ισοζύγιο του ρευστού :

$$\begin{aligned} \frac{dE_2}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \Leftrightarrow \\ \int_V (\rho_2 \cdot c_{p2} \cdot dT(x, y, z, t)_{\rho\epsilon\upsilon\sigma\tau\omicron\upsilon, \epsilon\pi\iota\phi\alpha\upsilon\epsilon\iota\alpha}/dt) dV = \\ \int_S h \cdot [T(x, y, z, t)_s - T(x, y, z, t)_{\rho\epsilon\upsilon\sigma\tau\omicron\upsilon}] dS - Q_{out} \end{aligned} \quad (2.25)$$

Με την παραπάνω σχέση (2.25) καθώς και την σχέση (2.21) μπορούμε να καθορίσουμε πλήρως την μεταβολή και μετάδοση θερμότητας ανάμεσα στα δύο συστήματα που θεωρήσαμε στην αρχή του τρισδιάστατου προβλήματος, μέσω του μηχανισμού της συναγωγής. Οι θερμοκρασίες των υλικών που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω εξισώσεις πρέπει να πολύ κοντά στην επιφάνεια επαφής όπου παρατηρείται το φαινόμενο της μετάδοσης της θερμότητας [17].

2.3.2 Συμμετρία στο τρισδιάστατο πρόβλημα

Θεωρώντας ότι το πρόβλημα έχει συμμετρία και υποθέτοντας ότι το στερεό αποτελεί τέλειο αγωγό θερμότητας με τον όγκο να είναι αρκετά μικρός, μπορεί να θεωρηθεί ότι η θερμοκρασία είναι συνάρτηση μόνο του χρόνου αμελώντας τον συσχετισμό με την θέση (x, y, z), θεωρώντας δηλαδή τη θερμοκρασία ενιαία σε όλο τον όγκο του υλικού. Επομένως, με τις παραπάνω απλοποιήσεις, η αρχή διατήρησης της ενέργειας (2.21) στο στερεό σώμα δίνει[17] :

$$\begin{aligned} \int_V \rho_1 \cdot c_{p1} \cdot dT(t)_s/dt dV = \int_V \dot{q} dV \\ - \int_S h \cdot [T(t)_s - T(t)_{\rho\epsilon\upsilon\sigma\tau\omicron\upsilon, \epsilon\pi\iota\phi\alpha\upsilon\epsilon\iota\alpha}] dS \Leftrightarrow \end{aligned}$$

$$\rho_1 \cdot c_{p1} \cdot dT(t)_s/dt \cdot V_s = Q_g - h \cdot [T(t)_s - T(t)_{\rho\epsilon\upsilon\sigma\tau\omicron\upsilon, \epsilon\pi\iota\phi\alpha\upsilon\epsilon\iota\alpha}] \cdot S \quad (2.26)$$

2.4 Ακτινοβολία

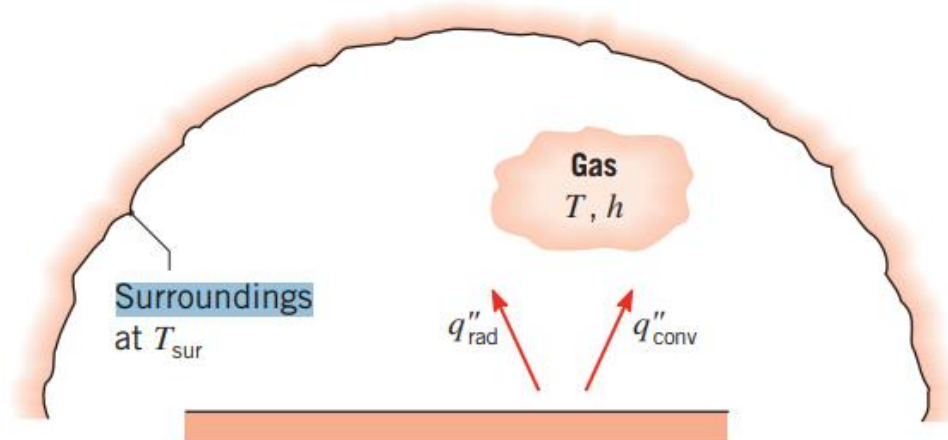
Η ακτινοβολία (radiation) είναι ο μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας από ένα σώμα σε ένα άλλο μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, σύμφωνα με την κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία, ή από φωτόνια, σύμφωνα με την κβαντομηχανική. Θερμική ακτινοβολία είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που παράγεται από την θερμική κίνηση των φορτισμένων σωματιδίων στην ύλη. Όλη η ύλη με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν εκπέμπει θερμική ακτινοβολία μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ο μηχανισμός αντιπροσωπεύει την μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρομαγνητική. Η θερμική ενέργεια είναι ουσιαστικά η κινητική ενέργεια των ατόμων και μορίων στην ύλη. Όλη η ύλη που έχει θερμοκρασία άνω των μηδέν βαθμών στην κλίμακα kelvin, εξ ορισμού αποτελείται από σωματίδια τα οποία έχουν κινητική ενέργεια και αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Αυτά τα άτομα και τα μόρια αποτελούνται από φορτισμένα σωματίδια, τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια, και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων ύλης έχουν ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση των φορτίων αυτών και της διπολικής ταλάντωσης τους. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί στην ηλεκτροδυναμική παραγωγή των ηλεκτροδυναμικά συζευγμένων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Με αυτό τον τρόπο έχουμε την εκπομπή φωτονίων, «ακτινοβολώντας» ενέργεια μακριά από το σώμα. Η θερμοκρασία του σώματος και το είδος της επιφάνειας, καθορίζουν την ένταση της ροής ενέργειας που εκπέμπεται. Η μετάδοση της ενέργειας μέσω ακτινοβολίας δεν απαιτεί την ύπαρξη μέσου και μπορεί να γίνει εν κενώ, αντίθετα με τους άλλους μηχανισμούς μετάδοσης. Η μέγιστη πυκνότητα θερμοροής q (W/m^2) που εκπέμπεται από ιδεατό σώμα, δίνεται από την νόμο Stefan-Boltzmann[18]:

$$q = \sigma \cdot T^4 \quad (2.27)$$

Με

σ : η σταθερά Stefan – Boltzmann, $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right)$

T : η απόλυτη θερμοκρασία του σώματος [K]



Σχήμα 2.7 Μεταφορά ακτινοβολίας μεταξύ επιφάνειας και περιβάλλοντος χώρου[18].

Η μέγιστη θερμική ισχύς που εκπέμπει ένα σώμα επιφάνειας S θα δίνεται από την σχέση που ακολουθεί :

$$q_m = \sigma \cdot S \cdot T^4 \quad (2.28)$$

Το σώμα που εκπέμπει τη μέγιστη θερμική ισχύ ονομάζεται μέλαν. Στην πραγματικότητα τα περισσότερα σώματα εκπέμπουν θερμική ισχύ που είναι μικρότερη από τη μέγιστη δυνατή και δίνεται από τον παρακάτω τύπο, [18] :

$$q = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad (2.29)$$

Όπου

ε : ο συντελεστής εκπομπής που λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0,1]$

Ο συντελεστής εκπομπής ε εκφράζει την ακτινοβολία που εκπέμπει το σώμα σαν ποσοστό της ακτινοβολίας που εκπέμπει το μέλαν σώμα $\left(\varepsilon = \frac{q}{q_m}\right)$.

Η ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα σώμα όμως δεν απορροφάται ολόκληρη . Ένα μέρος της ανακλάται και το υπόλοιπο απορροφάται από το σώμα σε μορφή θερμικής ενέργειας και περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$q_{απορ} = \alpha \cdot q_{in} \quad (2.30)$$

Με

α : α είναι ο συντελεστής απορρόφησης που λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0,1]$

q_{in} : η προσπίπτουσα θερμική ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας του σώματος.

Στην περίπτωση που έχουμε $\varepsilon = \alpha$ η καθαρή μεταφορά θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας που ακτινοβολεί και του περιβάλλοντος προέρχεται από τον τύπο:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_{περ}^4) \quad (2.31)$$

Η πυκνότητα της θερμότητας που προκύπτει από το φαινόμενο αυτό επηρεάζει το ποσό της μεταδιδόμενης θερμότητας μόνο σε περίπτωση που η θερμοκρασία τους σώματος είναι μεγάλη. Στην περίπτωση της μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία, μας ενδιαφέρει ο ρυθμός ανταλλαγής της θερμότητας, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της θερμικής ισχύος που εκπέμπει και που απορροφά ένα σώμα. Τέλος επειδή η θερμική ακτινοβολία δεν απορροφάται από τον αέρα λόγω του μικρού μήκους κύματος της και επειδή οι θερμοκρασίες που θα εξεταστούν στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν είναι μεγάλες, η ακτινοβολία θα θεωρηθεί προσεγγιστικά αμελητέα[17].

2.5 Μετάδοση θερμότητας στις ηλεκτρικές μηχανές

Οι τρεις μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας (αγωγή, συναγωγή, ακτινοβολία), που αναφέρθηκαν παραπάνω, αλληλοεπιδρούν κατά την λειτουργία μιας ηλεκτρικής μηχανής. Στα στερεά τμήματα της μηχανής έχουμε μετάδοση θερμότητας με αγωγή, ενώ στα τμήματα που έρχονται σε επαφή με τον αέρα, με συναγωγή[21]. Στα συστήματα ψύξης με συγκεκριμένα υγρά, που χρησιμοποιούν κάποιες

μηχανές, έχουμε επίσης μεταφορά θερμότητας με ελεύθερη ή και εξαναγκασμένη συναγωγή. Η γνώση της θερμικής συμπεριφοράς της εκάστοτε μηχανής αποτελεί βασική προϋπόθεση για την σωστή λειτουργία της.

2.5.1 Θερμική αντίσταση

Κατά την διαδικασία της θερμικής ανάλυσης πρέπει να γνωρίζουμε την θερμική αντίσταση κάθε μέρους της μηχανής. Η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα σε δύο μέρη θα προκαλέσει ροή θερμότητας όπως εξηγήσαμε παραπάνω και η θερμική αντίσταση θα εξαρτάται από την ροή αυτή. Ουσιαστικά η θερμική αντίσταση ορίζεται ως το πηλίκο της διαφοράς θερμοκρασίας προς τη θερμοροή. Ανάλογα με το μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας, η θερμική αντίσταση υπολογίζεται διαφορετικά :

Αγωγή :

$$R_{th,cond} = \frac{\Delta T}{q} = \frac{T_1 - T_2}{q} = \frac{L}{\lambda \cdot S} [K/W] \quad (2.32)$$

Όπου

L : το μήκος του υλικού

λ : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

S : η επιφάνεια κατά την οποία γίνεται η μετάδοση της θερμότητας

Συναγωγή :

$$R_{th,conv} = \frac{\Delta T}{q} = \frac{T_s - T_{περ}}{q} = \frac{1}{h \cdot S} [K/W] \quad (2.33)$$

Με

h : ο συντελεστής συναγωγής

S : η επιφάνεια κατά την οποία γίνεται η μετάδοση της θερμότητας

Ακτινοβολία :

$$R_{th,rad} = \frac{\Delta T}{q} = \frac{1}{a_r \cdot S} [K/W] \quad (2.34)$$

Όπου

a_r : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για το μηχανισμό της ακτινοβολίας

S : η επιφάνεια κατά την οποία γίνεται η μετάδοση της θερμότητας

2.5.2 Κατηγορίες απωλειών στις ηλεκτρικές μηχανές

Η θερμική ανάλυση μιας ηλεκτρικής μηχανής, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου, έχει στόχο να διερευνήσει την θερμική συμπεριφορά της και να προβλέψει τις θερμοκρασίες στα διάφορα μέρη της ώστε να αποφευχθούν προβλήματα λόγω υπερθέρμανσης. Οι απώλειες ενέργειας στα διάφορα μέρη της μηχανής λειτουργούν ως πηγές θερμότητας και αποτελούν τον κυριότερο παράγοντα αύξησης της θερμοκρασίας της . Οι κυριότερες κατηγορίες απωλειών είναι [15]:

- Απώλειες χαλκού
- Απώλειες πυρήνα
- Μηχανικές απώλειες
- Κατανεμημένες απώλειες

Απώλειες χαλκού

Οι απώλειες χαλκού οφείλονται στο ρεύμα που ρέει στα πηνία του στάτη και του δρομέα. Στη περίπτωση ηλεκτρικής μηχανής μόνιμων μαγνητών οι απώλειες χαλκού οφείλονται εξολοκλήρου στον χαλκό του στάτη αφού το μαγνητικό πεδίο δρομέα δημιουργείται από του μόνιμους μαγνήτες και όχι από πηνία. Σε μια ηλεκτρική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος m φάσεων οι απώλειες χαλκού του στάτη είναι:

$$P_{cu} = m \cdot I^2 \cdot R_{AC} \quad (2.35)$$

Όπου

R_{AC} : η AC αντίσταση της φάσης του τυλίγματος [Ω]

I : το ρεύμα φάσης του κυκλώματος του στάτη [A]

Απώλειες πυρήνα

Οι απώλειες πυρήνα αντιπροσωπεύουν την ενέργεια που απαιτείται για να μαγνητιστεί ο πυρήνας της μηχανής και διακρίνονται σε απώλειες που οφείλονται στο φαινόμενο της υστέρησης και στην επίδραση δινορευμάτων που εμφανίζονται σε αυτόν. Τα δινορεύματα ρέουν στα δυναμοελάσματα του πυρήνα και προκαλούν τη θέρμανση του. Οι απώλειες πυρήνα εξαρτώνται από τη μαγνητική ροή στο διάκενο ενώ είναι ανεξάρτητες από το φορτίο. Υπολογίζονται από τις σχέσεις :

$$P_{Fe} = \sum_n k_{Fe,n} \cdot P_{10} \cdot \left(\frac{B_n}{1T}\right)^2 \cdot m_{Fe,n} \quad (2.36)$$

$$P_{Fe} = \sum_n k_{Fe,n} \cdot P_{15} \cdot \left(\frac{B_n}{1.5T}\right)^2 \cdot m_{Fe,n} \quad (2.37)$$

Με

$k_{Fe,n}$: ο συντελεστής διόρθωσης

$m_{Fe,n}$: οι μάζες των σωμάτων στις διαφορετικές περιοχές

B_n : η πυκνότητα της μαγνητικής ροής

P_{10}, P_{15} : οι τιμές απωλειών, οι οποίες στα στρεφόμενα συστήματα ισχύουν μόνο για ημιτονοειδή μεταβολή της πυκνότητας ροής.

Μηχανικές απώλειες

Οι μηχανικές απώλειες διακρίνονται σε απώλειες τριβών εδράνων λόγω της περιστροφής του άξονα και σε απώλειες εξαερισμού λόγω της τριβής μεταξύ των κινούμενων μερών της μηχανής και του αέρα που υπάρχει στο διάκενο. Εξαρτώνται από την ταχύτητα του άξονα, από τον τύπο των ρουλεμάν και τις ιδιότητες του λιπαντικού που χρησιμοποιήθηκε.

Κατανεμημένες απώλειες

Οι κατανεμημένες απώλειες αυξάνονται με την αύξηση του φορτίου. Ο προσδιορισμός της τιμής τους είναι αρκετά πολύπλοκος και έτσι στις περισσότερες εφαρμογές θεωρούνται ίσες με το 1% της ισχύος πλήρους φορτίου.

2.5.3 Μέθοδοι ψύξης ηλεκτρικών μηχανών

Για την ομαλή λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών και την αποφυγή προβλημάτων υπερθέρμανσης, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι ψύξης. Η μέθοδος ψύξης για την απαγωγή της θερμότητας που αναπτύσσεται σε μια ηλεκτρική μηχανή εξαρτάται από την ονομαστική ισχύ της και από το μέγεθος της. Καθώς αυξάνεται το μέγεθος των μηχανών το πρόβλημα της θέρμανσης και ψύξης γίνεται πιο έντονο, καθώς το εμβαδό της επιφάνειας από την οποία πρέπει να απαχθεί η θερμότητα αυξάνεται, κατά προσέγγιση, με το τετράγωνο των διαστάσεων της μηχανής ενώ η θερμότητα που αναπτύσσεται από τις απώλειες αυξάνεται, κατά προσέγγιση, με τον κύβο των διαστάσεων [22].

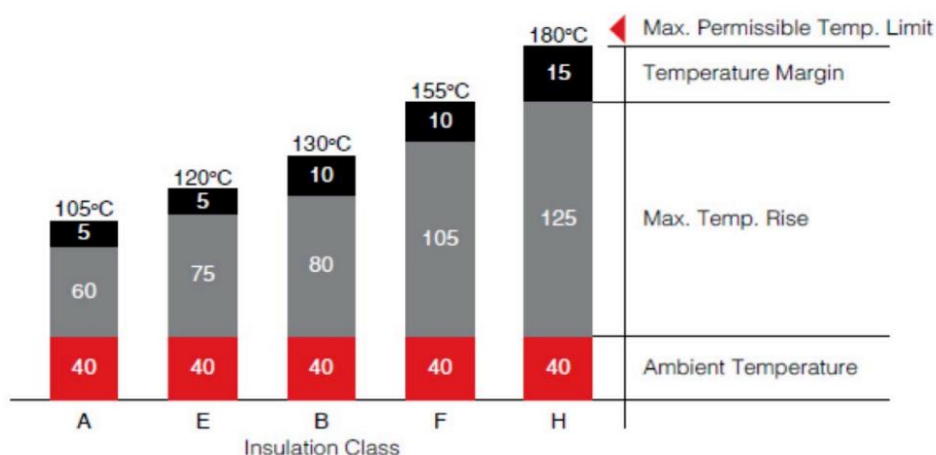
Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι ψύξης των σύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών είναι:

- (I) **Φυσική ψύξη** : Η ψύξη της μηχανής γίνεται με συναγωγή μεταξύ του αέρα περιβάλλοντος και του κελύφους χωρίς εξωτερική πηγή απαγωγής θερμότητας. Χρησιμοποιείται κυρίως στις μηχανές χαμηλής ισχύος, όπου οι πηγές θερμότητας (απώλειες ισχύος) δεν είναι έντονες.
- (II) **Εξαναγκασμένη ψύξη με ροή αέρα** : Οι ηλεκτρικές μηχανές αυτές ψύχονται μέσω πολύπλοκου συστήματος αγωγών, περσίδων και ανεμιστήρων που τοποθετούμε στο εσωτερικό τους. Στην περίπτωση που έχουμε μηχανές ανοιχτού τύπου, στο κέλυφος τους υπάρχουν περσίδες για να διευκολύνεται η ροή αέρα. Ο αέρας διοχετεύεται με ανεμιστήρες τοποθετημένους στον άξονα του δρομέα ή με φυσητήρα που κινείται ξεχωριστά σχεδόν σε όλα τα διαθέσιμα μέρη και μετά στο περιβάλλον μέσω των περσίδων. Στην περίπτωση που έχουμε μηχανές έγκλειστου τύπου, χρησιμοποιείται ειδικά διαμορφωμένο κέλυφος έτσι ώστε ο αέρας να οδηγείται στο περιβάλλον. Όπως και του ανοιχτού τύπου έχουν και αυτές ανεμιστήρες για την οδήγηση του αέρα.

- (III) **Υδρόψυξη** : Η υδρόψυξη χρησιμοποιείται σε μηχανές υψηλής ισχύος 1MW ως 100MW. Σε ηλεκτρικές μηχανές μεγάλης ισχύος δεν είναι δυνατή η ψύξη με αέρα γιατί σε αυτή την περίπτωση η ροή αέρα που απαιτείται είναι πολύ μεγάλη, προκαλώντας φαινόμενα στροβιλισμού και σπηλαιώσης που επηρεάζουν την ομαλή λειτουργία της μηχανής.
- (IV) **Ψύξη με υγρό υδρογόνο** : Η ψύξη με υγρό υδρογόνο χρησιμοποιείται σε μηχανές ισχύος μεγαλύτερες των 100 MW . Η μικρή πυκνότητα και η μεγάλη ειδική θερμοχωρητικότητα του υδρογόνου σε σχέση με τον αέρα το καθιστούν ιδανικό για την ψύξη μηχανών μεγάλης ισχύος, καθώς μειώνονται σε μεγάλο βαθμό οι καταπονήσεις των μονώσεων και αυξάνεται κατά συνέπεια σημαντικά η διάρκεια ζωής της μηχανής. Για την χρήση του υγρού υδρογόνου είναι απαραίτητη η στεγανοποίηση της μηχανής ενώ η πιθανότητα ανάφλεξης είναι εξαιρετικά μικρή.

2.5.4 Θερμοκρασιακοί περιορισμοί των ηλεκτρικών μηχανών

Οι θερμοκρασιακοί περιορισμοί κατά τη λειτουργία ενός σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών καθορίζονται από τις θερμοκρασίες τήξης των υλικών της μηχανής, την αντοχή της μόνωσης των τυλιγμάτων και τη θερμική αντοχή των μόνιμων μαγνητών. Στον υπό εξέταση κινητήρα ο δρομέας και το στήριγμα του στάτη κατασκευάζονται από PETG (πολυαιθυλένιο τερεφθαλικής γλυκόλης) με σημείο τήξης περίπου τους 260 °C . Ο πυρήνας του στάτη αποτελείται από magnetic iron PLA filament (μαγνητικό νήμα σιδήρου πολυμερούς γλυκολικού οξέως) με σημείο τήξης περίπου τους 155 °C . Το υλικό των τυλιγμάτων του στάτη είναι ο χαλκός που έχει σημείο τήξης τους 1083 °C . Η μόνωση των χάλκινων τυλιγμάτων του στάτη αποτελεί τον κρισιμότερο περιορισμό για την λειτουργία του κινητήρα. Στις περισσότερες περιπτώσεις μηχανών η μόνωση αποτελείται από βερνίκι, πολυεστέρα, πολυουρεθάνη ή πολυβινύλιο. Η μόνωση ανάλογα με την θερμοκρασία αντοχής της έχει ταξινομηθεί σε κλάσεις σύμφωνα με την Διεθνή Επιτροπή Ηλεκτροτεχνίας [23]. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται για κάθε μία από τις κλάσεις (A,B,F,E,H) η μέγιστη επιτρεπόμενη αύξηση θερμοκρασίας με σημείο αναφοράς την θερμοκρασία περιβάλλοντος 40°C, ένα μικρό περιθώριο αύξησης της θερμοκρασίας (hotspot τυλιγμάτων) και την οριακή θερμοκρασία του θερμότερου σημείου της μόνωσης.



Σχήμα 2.8 IEC 60034-1 ΚΛΑΣΕΙΣ ΜΟΝΩΣΗΣ ΜΗΧΑΝΩΝ [24]

Η λειτουργία της μηχανής σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τις μέγιστες επιτρεπτές μειώνει τη διάρκεια ζωής της μόνωσης. Γνωρίζοντας τη θερμοκρασιακή διαφορά των τυλιγμάτων με το περιβάλλον έχουμε τη δυνατότητα να επιλέξουμε τον κατάλληλο τύπο μόνωσης έτσι ώστε να αποφύγουμε την υπερθέρμανση του εσωτερικού της μηχανής. Τέλος, για τους κινητήρες μονίμων μαγνητών η θερμική αντοχή των μαγνητών τους αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα. Με την αύξηση της θερμοκρασίας, οι μαγνήτες μπορούν να οδηγηθούν σε απομαγνήτιση που συνεπάγεται την καταστροφή τους. Στις ηλεκτρικές μηχανές συνήθως χρησιμοποιούνται μαγνήτες νεοδυμίου NdFeB (νεοδυμίου-σιδήρου-βορίου) που έχουν θερμοκρασία απομαγνήτισης $310 - 340^{\circ}\text{C}$ και θερμοκρασία λειτουργίας 150°C . [Παράρτημα-1]

2.6 Θερμική ανάλυση για κυλινδρική διάταξη

Θα πραγματοποιήσουμε θερμική ανάλυση για ένα απλό κύλινδρο καθώς τα περισσότερα μέρη μιας ηλεκτρικής μηχανής έχουν κυλινδρική γεωμετρία. Η μελέτη αυτή θα μας βοηθήσει στην ανάλυση του κινητήρα που θα γίνει στα επόμενα κεφάλαια και θα βοηθήσει να αποδείξουμε πόσο αξιόπιστα είναι τα αποτελέσματα σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των αναλυτικών σχέσεων. Το παράδειγμα που θα αναλυθεί είναι ένας κύλινδρος από νήμα φερομαγνήτη σιδήρου (magnetic iron PLA filament) με ύψος 40 mm και διάμετρο 80 mm . Στην κατάσταση ηρεμίας ο κύλινδρος βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου (300°K). Θεωρούμε ότι ο κύλινδρος είναι πηγή θερμότητας ισχύος 0.4 W .

Ο όγκος του κυλίνδρου θεωρούμε ότι εκλύει θερμότητα ομοιογενώς, δηλαδή

$$V_{PLA} = \pi \cdot r^2 \cdot l = \pi \cdot 40^2 \cdot 10^{-6} \cdot 40 \cdot 10^{-3} = 6.4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Επομένως η ζητούμενη θερμοροή θα είναι :

$$q = \frac{0.4\text{ W}}{6.4\pi \cdot 10^{-5} \text{ m}^3} = 1989.44 \frac{\text{W}}{\text{m}^3}$$

Αρχικά η επίλυση του προβλήματος θα γίνει με την χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων FEMM. Στη συνέχεια θα προσεγγίσουμε το θερμικό πρόβλημα του κυλίνδρου μέσω των εξισώσεων που παραθέσαμε στην αρχή του κεφαλαίου. Τέλος, θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων.

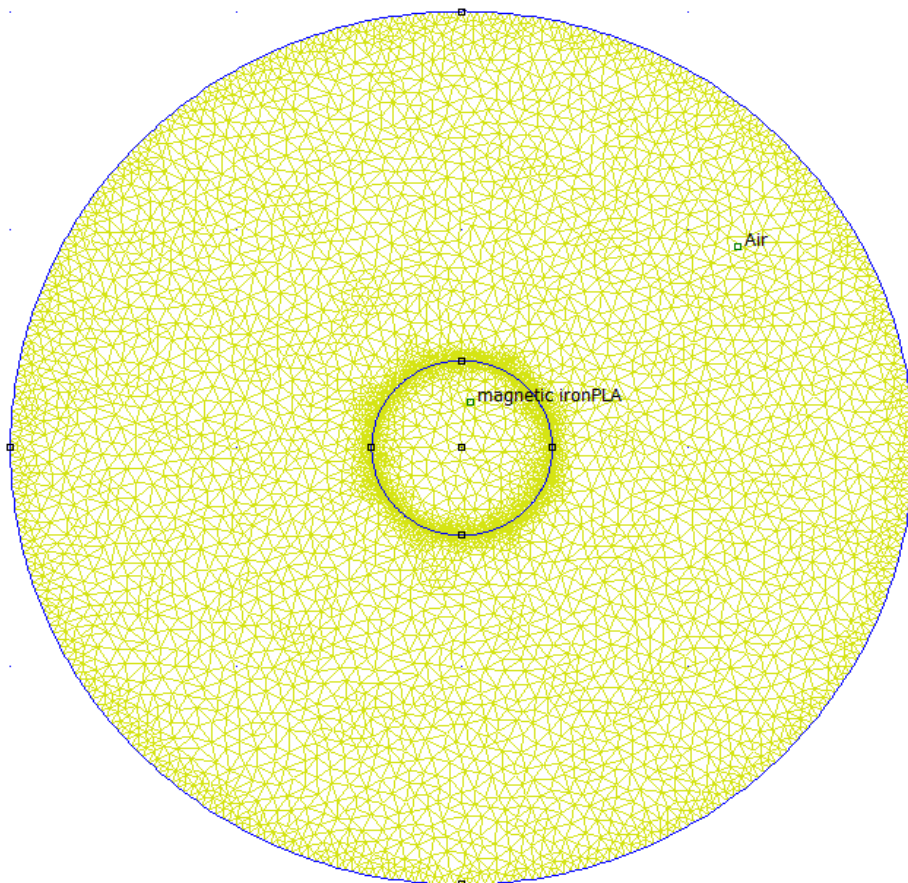
2.6.1 Προσομοίωση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Η προσομοίωση του προβλήματος έγινε σε δύο μοντέλα μέσω του διαδικτυακά διαθέσιμου λογισμικού FEMM (Finite Element Method Magnetics) [ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ-1]. Το πρώτο μοντέλο που

μελετήθηκε ήταν το planar μοντέλο (κάθετη τομή στον κύλινδρο), ενώ το δεύτερο μοντέλο ήταν το αξονοσυμμετρικό. Στα δύο μοντέλα θεωρήθηκε εξωτερικό όριο θερμοκρασίας στα 200 mm.

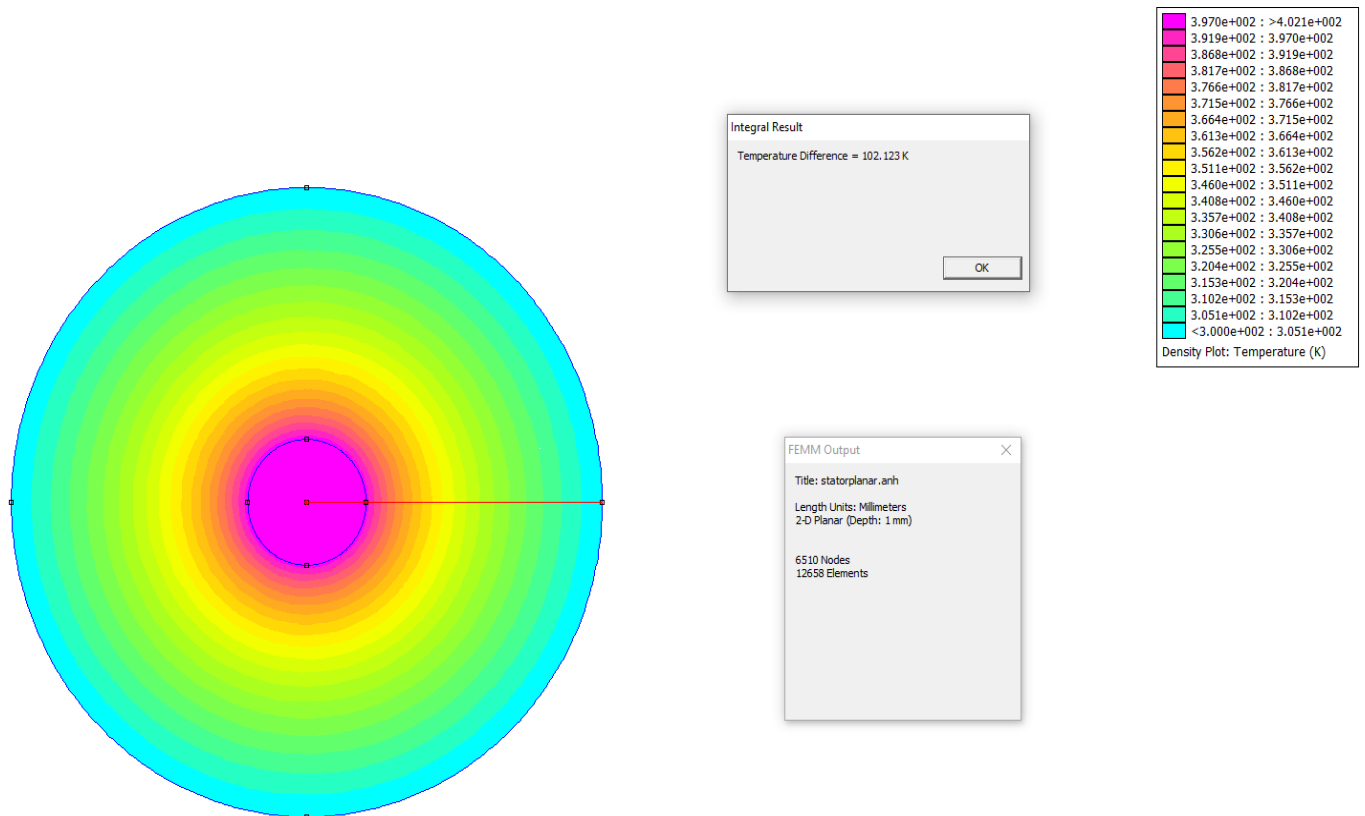
ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΘΕΤΗΣ ΤΟΜΗΣ:

Το μοντέλο καρτεσιανών συντεταγμένων που δημιουργήθηκε από το πρόβλημα αποτελείται από 6510 κόμβους και 12658 πεπερασμένα στοιχεία. Το πλέγμα που δημιουργήθηκε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 2.9. Πλέγμα του στοιχειώδους θερμικού προβλήματος για κάθετη τομή στον άξονα.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας, η διαφορά θερμοκρασίας από τον κύλινδρο-πηγή θερμότητας μέχρι το εξωτερικό όριο :



Σχήμα 2.10 Θερμοκρασιακό πεδίο σε κάθετη τομή του στοιχειώδους θερμικού προβλήματος, υπόμνημα και διαφορά θερμοκρασίας.

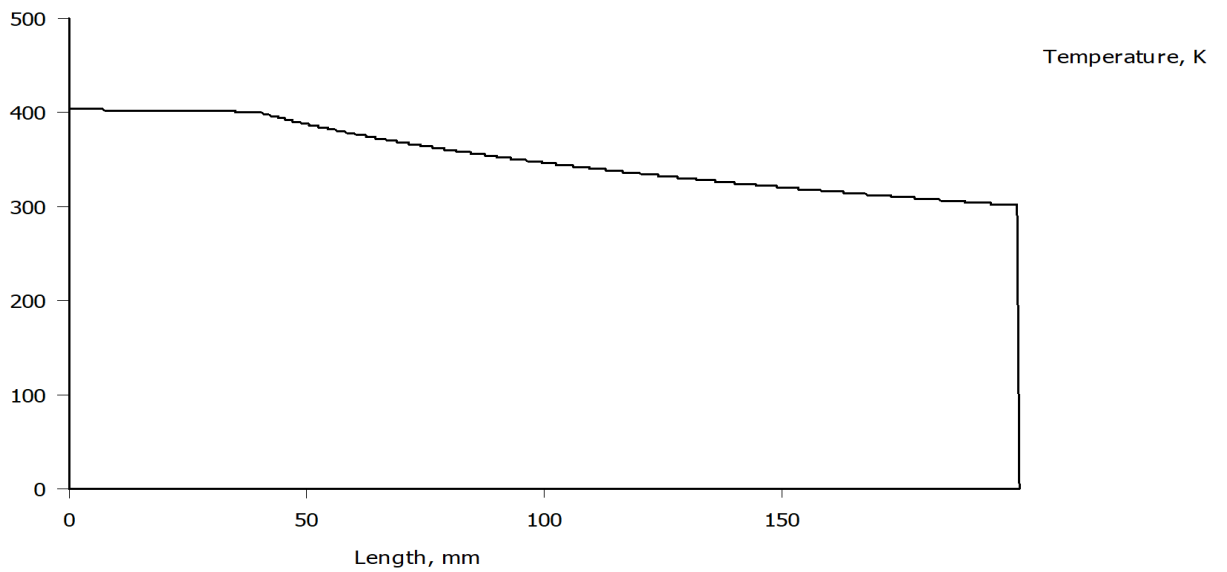
Οι τιμές της θερμοκρασίας των υλικών που προκύπτουν από την προσομοίωση είναι οι εξής :

$$T_{PLA} = 401.196^{\circ}K$$

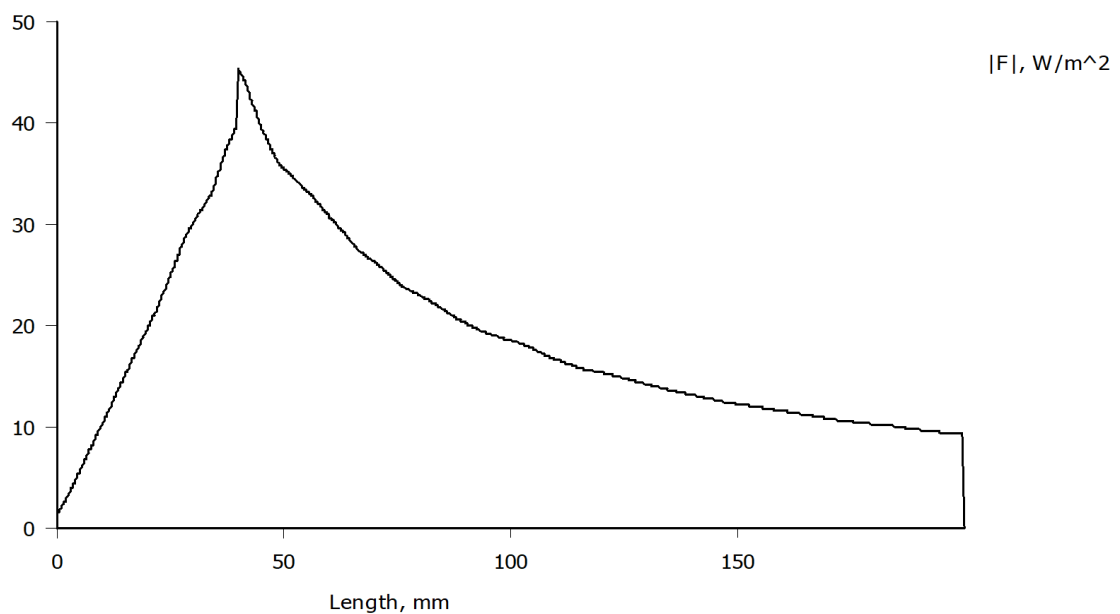
$$T(40mm)_{AIR} = 398.033^{\circ}K$$

$$T(200mm)_{AIR} = 300^{\circ}K$$

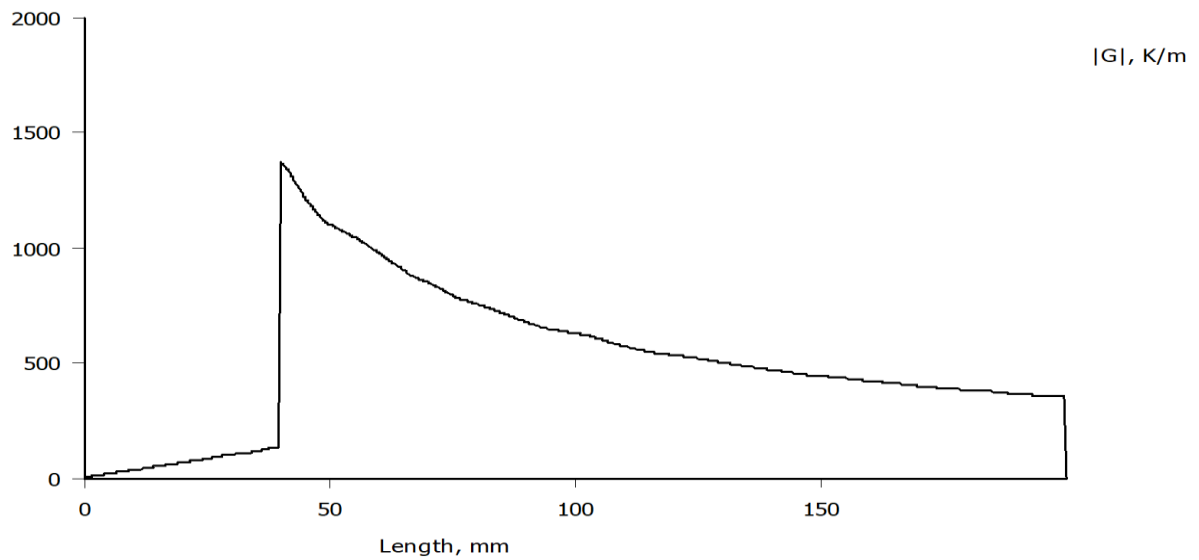
Μέσα από την προσομοίωση μπορούμε να παράγουμε τα διαγράμματα θερμοκρασίας, πυκνότητας θερμορροής και θερμοκρασιακής μεταβολής σε σχέση με την απόσταση :



Σχήμα 2.11 Διάγραμμα θερμοκρασίας συναρτήσει απόστασης



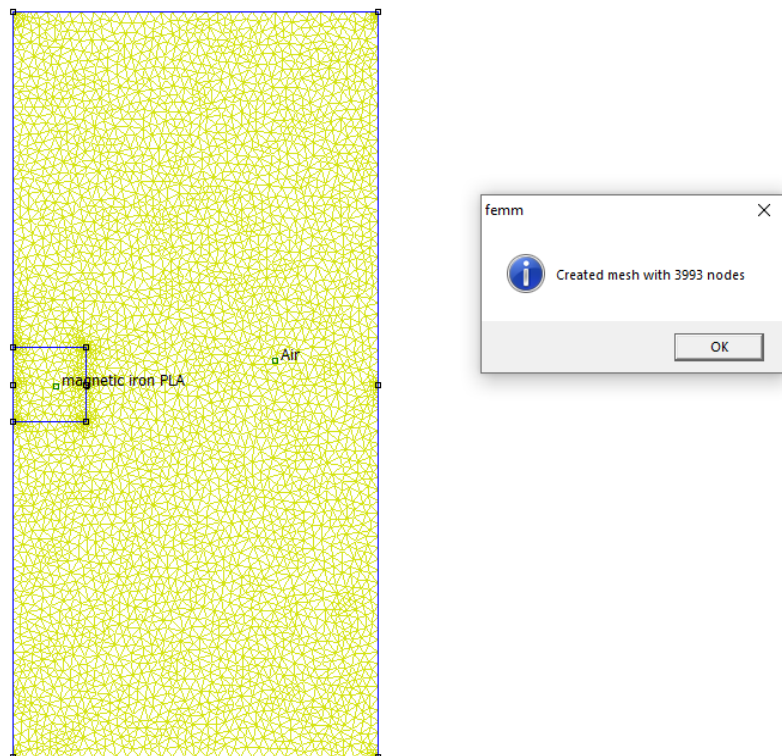
Σχήμα 2.12 Διάγραμμα πυκνότητας θερμορροής συναρτήσει της απόστασης



Σχήμα 2.13 Διάγραμμα θερμοκρασιακής μεταβολής σε σχέση με την απόσταση

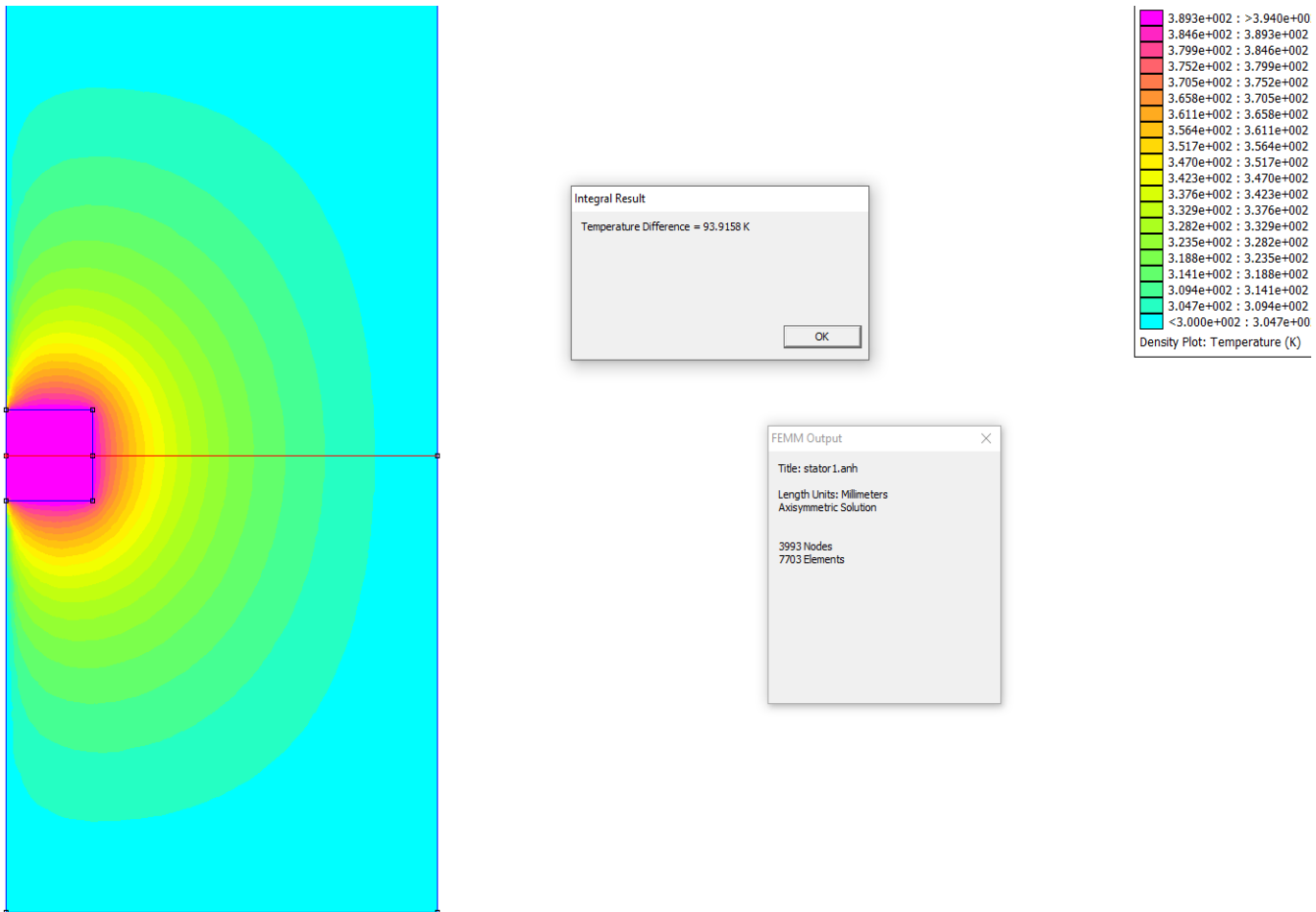
ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ :

Το αξονοσυμμετρικό μοντέλο που δημιουργήθηκε από το πρόβλημα αποτελείται από 3393 κόμβους και 7703 πεπερασμένα στοιχεία. Το πλέγμα που δημιουργήθηκε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 2.14 Πλέγμα του στοιχειώδους θερμικού προβλήματος για αξονοσυμμετρική τομή

Στην συνέχεια παραθέτουμε την κατανομή της θερμοκρασίας στον χώρο και την διαφορά της θερμοκρασίας από το μέσων του κυλίνδρου μέχρι το εξωτερικό όριο :



Σχήμα 2.15 Θερμοκρασιακό πεδίο σε αξονοσυμμετρική τομή του στοιχειώδους θερμικού προβλήματος, υπόμνημα και διαφορά θερμοκρασίας.

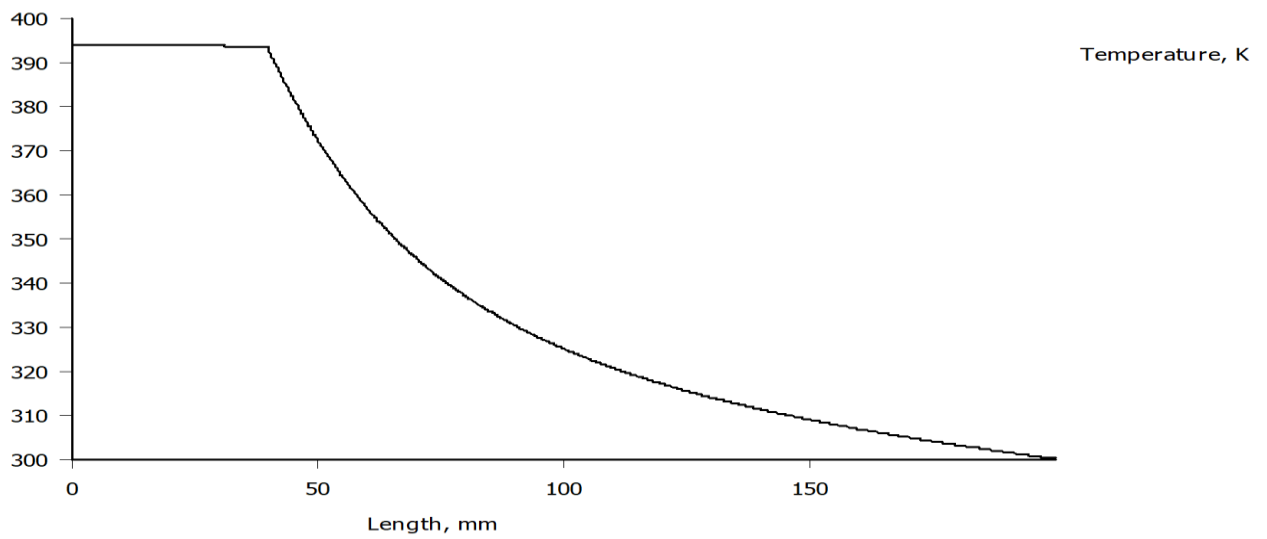
Οι τιμές της θερμοκρασίας των υλικών που προκύπτουν από την προσομοίωση είναι οι εξής :

$$T_{PLA} = 393.937 \text{ } ^\circ K$$

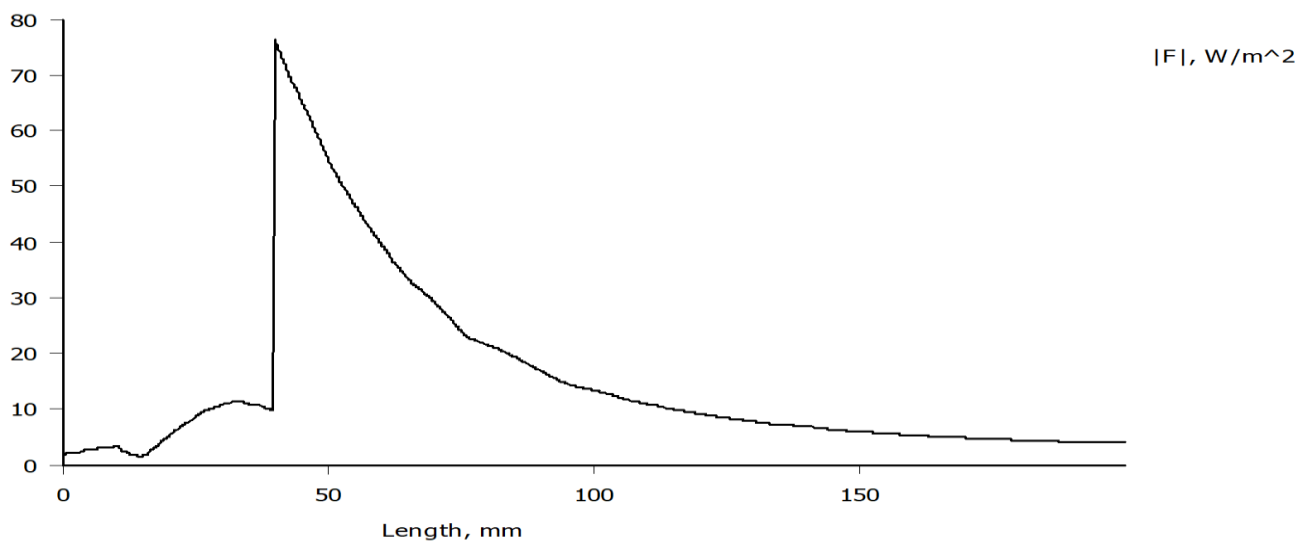
$$T_{(40mm)AIR} = 390.96 \text{ } ^\circ K$$

$$T_{(200mm)AIR} = 300 \text{ } ^\circ K$$

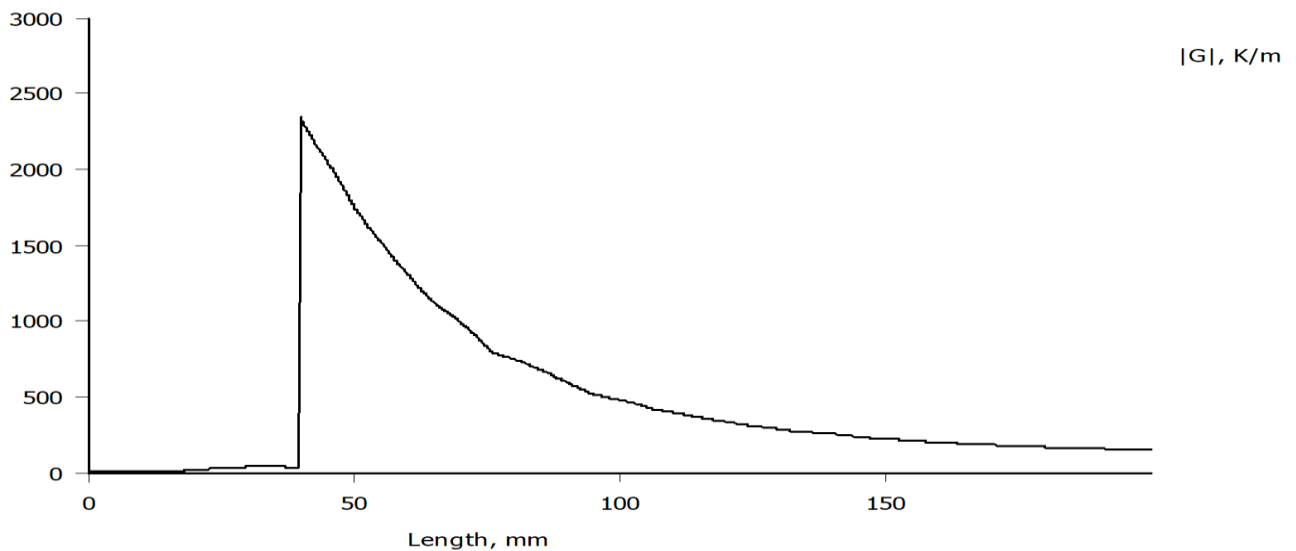
Τα διαγράμματα θερμοκρασίας, πυκνότητας θερμότητας και θερμοκρασιακής μεταβολής σε σχέση με την απόσταση :



Σχήμα 2.16 Διάγραμμα θερμοκρασίας συναρτήσει απόστασης



Σχήμα 2.17 Διάγραμμα πυκνότητας θερμότητας συναρτήσει της απόστασης



Σχήμα 2.18 Διάγραμμα θερμοκρασιακής μεταβολής σε σχέση με την απόσταση

Με την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων εντοπίζουμε μικρές διαφορές στις θερμοκρασίες του κάθε κυλίνδρου στα δύο μοντέλα . Επιπλέον εμφανείς διαφορές παρουσιάζονται στα δύο διαγράμματα πυκνότητας θερμότητας. Αυτές οι μικρές διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα οφείλονται στις διαφορετικές γεωμετρίες των δύο μοντέλων και θεωρούνται αποδεκτές . Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου, όπου θα γίνει σύγκριση των δύο μεθόδων θα έχουμε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για την εγκυρότητα των προσομοιώσεων.

2.6.2 Αριθμητική επίλυση του προβλήματος

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα λυθεί το θερμικό πρόβλημα και θα βρεθούν οι θερμοκρασίες στην μόνιμη κατάσταση , με την χρήση των εξισώσεων που παραθέσαμε παραπάνω.

Για την επίλυση του προβλήματος θα θεωρήσουμε ότι η θερμοκρασία μέσα στον κύλινδρο είναι ανεξάρτητη της θέσης του. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί και από το αντίστοιχο διάγραμμα που προέκυψε από το πρόγραμμα πεπερασμένων παραμέτρων. Επιπλέον η μετάδοση της θερμότητας γίνεται μόνο ακτινικά ,ενώ το πρόβλημα παρουσιάζει κυλινδρική συμμετρία πράγμα που σημαίνει ότι η θερμοκρασία πάνω στα σημεία επαφής του αέρα με τον κύλινδρο είναι ανεξάρτητη από την θέση της . Τέλος , στο όριο των 200 mm έχουμε θέσει οριακή συνθήκη θερμοκρασίας $T(200)= 300 \text{ }^\circ\text{K}$.

Γνωρίζουμε ότι :

$$V_{PLA} = 6.4 \cdot 10^{-5} m^3$$

$$q = 1989.44 \text{ W}/m^3$$

Παραγόμενη θερμική ισχύς : $Q_g = 0.4 \text{ W}$

Ο όγκος του αέρα θα είναι :

$$V_{AIR} = (200^2 \cdot 40 - 40^2 \cdot 40) \cdot \pi \cdot 10^{-9} = 1,536 \cdot \pi \cdot 10^{-3} m^3$$

Η επιφάνεια μέσω της οποίας διαδίδεται η θερμότητα :

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l = 2 \cdot \pi \cdot 40^2 \cdot 10^{-6} = 3,2\pi \cdot 10^{-3} m^2$$

Εφόσον έχουμε κυλινδρική συμμετρία από αρχή διατήρησης της ενέργειας (2.26) στο στερεό για τον μηχανισμό συναγωγής θα έχουμε:

$$\rho_1 \cdot c_{p1} \cdot dT(t)_{\sigmaτερεού}/dt \cdot V_s = Q_g - S \cdot h \cdot [T(t)_s - T(t)_{\rhoευστού,επιφανείας}]$$

Από (2.16) ο συντελεστής συναγωγής h για κυλινδρική συμμετρία θα είναι:

$$h \cong 1.32 \left[\frac{T(t)_s - T(t)_{\rhoευστού,επιφανείας}}{D} \right]^{0.25}$$

Με $D = 80 \text{ mm}$

Αν θεωρήσουμε το PLA filament και τον αέρα ομογενή υλικά τότε θα έχουμε τις παρακάτω θερμοχωρητικότητες και πυκνότητες υλικών:

$$c_{AIR} = 1.05 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$c_{PLA} \cong 2.05 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$\rho_{AIR} = \frac{1.1 kg}{m^3}$$

$$\rho_{PLA} = \frac{1850 kg}{m^3}$$

Επομένως :

$$\rho_{PLA} \cdot c_{PLA} \cdot dT(t)_{\sigmaτερεού}/dt \cdot V_s = Q_g - S \cdot h \cdot [T(t)_{PLA} - T(t)_{AIR,επιφανεία}] \Leftrightarrow$$

$$1850 \cdot 2.05 \cdot dT(t)_{\sigmaτερεού}/dt \cdot 6.4\pi \cdot 10^{-5}$$

$$0.4 - 3.2\pi \cdot 10^{-3} \cdot [T(t)_{PLA} - T(t)_{AIR,επιφανεία}]^{1.25} / (80 \cdot 10^{-3})^{0.25}$$

$$\Leftrightarrow 0.8185 dT(t)_{pla}/dt = 0.4 - 0.02495 \cdot [T(t)_{PLA} - T(t)_{AIR,επιφανεία}]^{1.25} \quad (2.38)$$

Για το ρευστό με το φαινόμενο της συναγωγής από(2.25) θα έχουμε:

$$\frac{dE_2}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \Leftrightarrow$$

$$\int_V \left(\rho_{\text{ρευστού}} \cdot c_{\text{ρευστού}} \cdot \frac{dT_{\text{ρευστού}}(x,y,z,t)}{dt} \right) \cdot dV = \int_S h \cdot [T(x,y,z,t)_{\text{στερεού}} - T(x,y,z,t)_{\text{ρευστού}}] dS - Q_{out}$$

Εφόσον είπαμε ότι οι θερμοκρασίες είναι ανεξάρτητες της θέσης τους, λόγω των παραδοχών που προαναφέραμε ο παραπάνω τύπος γίνεται:

$$\int_V (\rho_{AIR} \cdot c_{AIR} \cdot dT(r,t)_{AIR}/dt) \cdot dV = \int_S h \cdot [T(t)_{PLA} - T(t)_{AIR}] dS - Q_{out} \Leftrightarrow$$

$$\int_{40 \cdot 10^{-3}}^{200 \cdot 10^{-3}} (1.1 \cdot 1.05 \cdot dT(r,t)_{AIR}/dt) \cdot 2\pi \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot r dr =$$

$$\int_{40 \cdot 10^{-3}}^{200 \cdot 10^{-3}} 1.32 \cdot [T(t)_{PLA} - T(40mm,t)_{AIR}]^{1.25} / (0.08)^{0.25} \cdot 2\pi \cdot 40 \cdot 10^{-3} dr - Q_{out} \Leftrightarrow$$

$$Q_{out} = \int_{40 \cdot 10^{-3}}^{200 \cdot 10^{-3}} 0.6238 \cdot [T(t)_{PLA} - T(40mm,t)_{AIR}]^{1.25} dr - \int_{40 \cdot 10^{-3}}^{200 \cdot 10^{-3}} 0.2903 \cdot dT(r,t)_{AIR}/dt \cdot r dr \quad (2.39)$$

Όπου για Q_{out} έχουμε :

$$Q_{out} = 2\pi \cdot 200 \cdot 40 \cdot 10^{-6} \cdot 1.32 \cdot [T(200mm,t)_{AIR} - 300]^{1.25} / (400 \cdot 10^{-3})^{0.25}$$

Η παραπάνω σχέση περιγράφει ένα σύστημα το οποίο η ισχύς που εξέρχεται με μορφή θερμότητας μεταφέρεται σε άγνωστο υλικό σταθερής θερμοκρασίας $300 \text{ }^\circ K$.

Για $r \geq 200mm$ ισχύει :

$$T(r,t) = 300 \text{ }^\circ K$$

$$\frac{dT(r,t)_{AIR}}{dt} = 0$$

Από την σχέση (2.39) μπορεί να προκύψει η έκφραση του $T(t)_{PLA}$ συναρτήσει του $T(40mm,t)_{AIR}$. Στη συνέχεια αν αντικαταστήσουμε την έκφραση στην σχέση (2.38) και την λύσουμε με μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης θα καταλήξουμε σε μια γραφική αναπαράσταση της $T(t)_{PLA}$. Ωστόσο, η επίλυση των παραπάνω εξισώσεων στην μεταβατική κατάσταση είναι δύσκολη με αριθμητικό τρόπο και κρίνεται απαραίτητη η χρήση κάποιου ισοδύναμου μοντέλου . Γι' αυτό το λόγο , θα γίνει επίλυση στην μόνιμη κατάσταση όπως άλλωστε κάνει και το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Επομένως θα είμαστε σε θέση να αξιολογήσουμε τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων.

Για την μόνιμη κατάσταση θα έχουμε :

$$t \rightarrow \infty$$

$$\frac{dT(r, t)_{AIR}}{dt} = 0$$

$$\frac{dT(t)_{PLA}}{dt} = 0$$

Το ισοζύγιο ενέργειας στον αέρα είναι από (2.25):

$$Q_{περ} = \frac{dE_2}{dt} = Q_{in} - Q_{out}$$

Όπου

$$Q_{περ} = \int_V (\rho_{AIR} \cdot c_{AIR} \cdot dT(r, t)/dt) dV$$

$$Q_{in} = Q_{PLA, out} = \int_S h \cdot [T(r, t)_{PLA} - T(r, t)_{AIR, επιφανειας}] dS$$

$$Q_{out} = \int_{S \text{ για } r=200mm} h \cdot [T(200mm, t)_{AIR} - 300] dS$$

Όμως στην σταθερή-μόνιμη κατάσταση , επειδή ο αέρας δεν μπορεί να απορροφήσει και άλλη θερμότητα, έχει ως αποτέλεσμα την μετάδοση όλης της θερμότητας που παράγεται από την πηγή θερμότητας στον κύλινδρο. Επομένως από την αρχή διατήρησης της ενέργειας στην μόνιμη κατάσταση για τον κύλινδρο θα έχουμε $Q_{περ} = 0 \Leftrightarrow Q_{in} = Q_{out}$ και αφού όλη η ενέργεια που παράγεται από τον κύλινδρο απορροφάται από τον αέρα :

$$Q_{in} = Q_{out} = 0.4 W$$

Ο συντελεστής συναγωγής h για κυλινδρική συμμετρία θα είναι:

$$h \cong 1.32 \left[\frac{T(t)_s - T(t)_{\rhoευστού, επιφανειας}}{D} \right]^{0.25}$$

Επομένως

$$Q_{in} = \int_{S \text{ για } r=40mm} 1.32 \cdot [T(r, t)_{PLA} - T(r, t)_{AIR, επιφανειας}]^{1.25} / (80 \cdot 10^{-3}) dS$$

$$\Leftrightarrow 0.4 = 2\pi \cdot 0.04^2 \cdot 1.32 \cdot [T(\infty)_{PLA} - T(40mm, \infty)_{AIR, επιφανειας}]^{1.25} / (0.08)^{0.25} \quad (2.40)$$

Και

$$Q_{out} = \int_{S \text{ για } r=200mm} 1.32 \cdot [T(200mm, t)_{AIR} - 300]^{1.25} / (0.4)^{0.25} dS$$

$$\Leftrightarrow 0.4 = 2\pi \cdot 0.04 \cdot 0.2 \cdot 1.32 \cdot [T(200, \infty)_{AIR} - 300]^{1.25} / (0.4)^{0.25}$$

$$\Leftrightarrow T(200, \infty)_{AIR} = 301.8^\circ K$$

Απομένουν να υπολογιστούν οι θερμοκρασίες $T(40mm, \infty)_{AIR}$ και $T(\infty)_{PLA}$. Από το φαινόμενο της αγωγής του αέρα στην μόνιμη κατάσταση προκύπτει ότι :

$$dE_{\rho\epsilon\nu\sigma\tau\omicron\upsilon}/dt = 0 \Leftrightarrow Q_{AIR,in} = Q_{AIR,out} = Q_{AIR,\mu\epsilon\tau\alpha\delta\iota\delta\omicron\mu\epsilon\nu\eta} = Q_g = 0.4W$$

$$\text{Από(2.5): } Q_{AIR,\mu\epsilon\tau\alpha\delta\iota\delta\omicron\mu\epsilon\nu\eta} = S_{AIR,\epsilon\pi\iota\varphi} \cdot \left[-\lambda_{AIR} \cdot \frac{dT(r)_{AIR}}{dr} \right]_r$$

$$\Leftrightarrow 0.4 = 2\pi \cdot l \cdot r \cdot \left[-\lambda_{AIR} \cdot \frac{dT(r)_{AIR}}{dr} \right]_r$$

Με $\lambda_{AIR} = 0.025 \frac{W}{m \cdot K}$ και $l = 40mm$, τότε προκύπτει :

$$0.4 = 2\pi \cdot 0.04 \cdot r \cdot \left[-0.025 \cdot \frac{dT(r)_{AIR}}{dr} \right]_r$$

$$\Leftrightarrow \frac{dT(r)_{AIR}}{dr} = -63.66/r$$

$$\Leftrightarrow T(r)_{AIR} = -63.66 \cdot \ln r + c$$

Και με την τιμή που υπολογίστηκε για την το εξωτερικό όριο θα έχουμε:

$$T(200mm)_{AIR} = 301.8^\circ K$$

Επομένως, $c = 301.8 - 104.46 = 199.34$. Άρα :

$$T(40mm)_{AIR} = -63.66 \cdot \ln(0.04) + 199.34$$

Για $r = 40mm$:

$$T(40mm)_{AIR} = -63.66 \cdot \ln(0.04) + 199.34 = 404.25^\circ K$$

Έτσι από την σχέση (2.40) θα προκύψει :

$$(3) \Leftrightarrow 0.4 = 2\pi \cdot 0.04^2 \cdot 1.32 \cdot [T(\infty)_{PLA} - 404.25]^{1.25} / (0.08)^{0.25}$$

$$\Leftrightarrow T(\infty)_{PLA} = 408.78 \text{ }^{\circ}K$$

Άρα για την μόνιμη κατάσταση $t \rightarrow \infty$:

$$T(\infty)_{PLA} = 408.78^{\circ}K$$

$$T(40mm)_{AIR} = 404.25^{\circ}K$$

$$T(200mm)_{AIR} = 301.8^{\circ}K$$

2.6.3 Σύγκριση των αποτελεσμάτων

Με την ολοκλήρωση τις αριθμητικής ανάλυσης και την εκτέλεση των προσομοιώσεων του κώδικα πεπερασμένων παραμέτρων βρισκόμαστε σε θέση να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα τους.

| | Αριθμητική ανάλυση | Κάθετη τομή | Αξονοσυμμετρική τομή |
|-------------------|--------------------|-------------|----------------------|
| Magnetic iron PLA | 408.78 | 401.196 | 393.937 |
| Αέρας στα 40mm | 404.25 | 398.033 | 390.96 |
| Αέρας στα 200mm | 301.8 | 300 | 300 |

Αναλυτικότερα οι αποκλίσεις τω δύο μεθόδων σε ποσοστά είναι :

| | Κάθετη τομή (%) | Αξονοσυμμετρική τομή (%) |
|-------------------|-----------------|--------------------------|
| Magnetic iron PLA | 1.8903 | 3.7679 |
| Αέρας στα 40mm | 1.5619 | 3.3993 |
| Αέρας στα 200mm | 0.6 | 0.6 |

Συμπεραίνουμε ότι υπάρχουν μικρές αποκλίσεις ανάμεσα στην μαθηματική ανάλυση των σχέσεων του θερμικού προβλήματος και της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων , οι οποίες οφείλονται στις απλοποιήσεις που έγιναν ώστε να είναι δυνατή η επίλυση των εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν . Τέλος, στο παραπάνω πρόβλημα δεν λάβαμε υπόψη μας το φαινόμενο της μετάδοσης θερμότητας μέσω ακτινοβολίας . Επειδή , οι θερμοκρασίες των υλικών παραμένουν κάτω των $500^{\circ}K$, θεωρούμε ότι η ακτινοβολία δεν επιδρά σημαντικά στις τιμές των θερμοκρασιών .

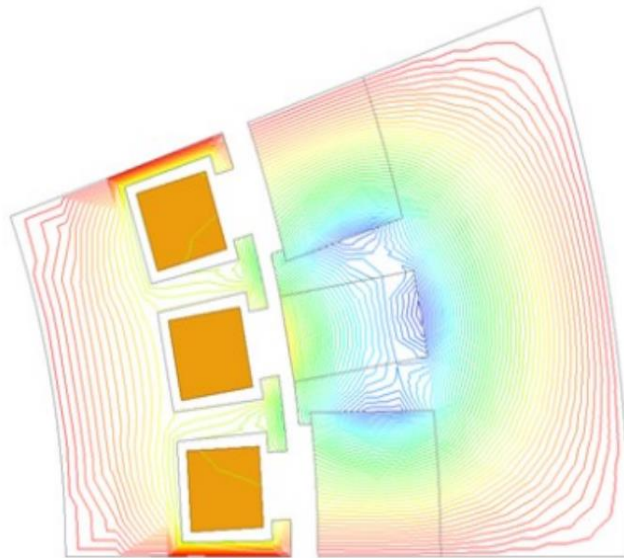
2.7 Υπολογιστικές μέθοδοι θερμικής ανάλυσης

Η μοντελοποίηση της λειτουργίας ηλεκτρικών μηχανών είναι αρκετά πολύπλοκη διαδικασία, διότι χρειάζεται να συνδυάσουμε γνώσεις μετάδοσης θερμότητας και μηχανικής ρευστών. Για τον προσδιορισμό του θερμοκρασιακού πεδίου του ΣΚΜΜ μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι εξής μέθοδοι[25]:

- (I) Με αναλυτική επίλυση των εξισώσεων αγωγής και συναγωγής, όπως αυτές που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Η αξιοπιστία των λύσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις οριακές συνθήκες του θερμικού προβλήματος.
- (II) Με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) για 2D/3D προσομοίωση της θερμοκρασιακής κατανομής στο εσωτερικό της ηλεκτρικής μηχανής. Οι οριακές συνθήκες κατέχουν και εδώ σημαντικό ρόλο στην εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Η μέθοδος δίνει αποτελέσματα τόσο για την μόνιμη όσο και για την μεταβατική θερμική συμπεριφορά.
- (III) Με την μέθοδο των συγκεντρωμένων παραμέτρων. Δημιουργείται ένα μοντέλο που μας δίνει αποτελέσματα όχι μόνο για την τελική μόνιμη κατάσταση αλλά και για την μεταβατικής κατάσταση του θερμικού προβλήματος.
- (IV) Με την υπολογιστική μέθοδο προσομοίωσης προβλημάτων μηχανικής ρευστών (CFD). Συνήθως η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τη μελέτη της μόνιμης κατάστασης καθώς το υπολογιστικό κόστος είναι πολύ μεγάλο.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει η θερμική ανάλυση του στάτη του κινητήρα μονίμων μαγνητών με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων σε δύο και σε τρεις διαστάσεις .

Κεφάλαιο 3



Θερμική ανάλυση με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

Στο παρόν κεφάλαιο επιχειρείται η θερμική ανάλυση του 18πολικού σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) . Η μέθοδος αυτή μας παρέχει πληροφορίες για την θερμοκρασιακή κατανομή και την πυκνότητα θερμορροής στο εσωτερικό του κινητήρα αλλά και του περιβάλλοντα χώρου. Για την δισδιάστατη προσέγγιση του προβλήματος , θα χρησιμοποιηθεί το διαδικτυακά διαθέσιμο λογισμικό FEMM (Finite Element Method Magnetics) [ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ-1], το οποίο παράγει αποτελέσματα με αρκετά μεγάλη ακρίβεια . Το μόνο μειονέκτημα του λογισμικού FEMM είναι ότι δεν μας δίνει καμία πληροφορία για τη μεταβατική θερμική συμπεριφορά του κινητήρα. Επομένως, θα γίνει και μία δεύτερη ανάλυση σε τρεις διαστάσεις με την βοήθεια του λογισμικού ANSYS WORKBENCH [ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ-2]. Η μέθοδος αυτή, είναι πιο ακριβής όσο αφορά τη μελέτη και τα αποτελέσματα, αλλά είναι πιο χρονοβόρα και απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Επειδή στην ανάλυση μας ενδιαφέρει η θερμική συμπεριφορά του υλικού του στάτη , θα θεωρήσουμε ότι έχουμε ακίνητο δρομέα. Έτσι, τα μοντέλα που θα χρησιμοποιηθούν στην δισδιάστατη και στην τρισδιάστατη προσέγγιση θα περιέχουν μόνο τα τυλίγματα και τον πυρήνα του στάτη.

3.1 Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων δίνει αποτελέσματα για την κατανομή των θερμοκρασιακών μεγεθών του κινητήρα στη μόνιμη/μεταβατική κατάσταση. Αυτό επιτυγχάνεται, με την χρήση των εξισώσεων μετάδοσης της θερμότητας όπως παρουσιάστηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα λάβουμε υπόψη μόνο τα φαινόμενα της αγωγής και της συναγωγής για την μετάδοση θερμότητας διότι οι τιμές των θερμοκρασιών του κινητήρα δεν θα ξεπεράσουν τους 500°K , πράγμα που σημαίνει ότι η επίδραση του μηχανισμού της ακτινοβολίας είναι τόσο μικρή που θεωρείται αμελητέα. Για την μοντελοποίηση της μεθόδου, αρχικά γίνεται η σχεδίαση του κινητήρα και των χαρακτηριστικών του και στην συνέχεια εισάγονται κάποιοι παράμετροι. Τα προγράμματα με κώδικα πεπερασμένων στοιχείων δέχονται σαν παραμέτρους εισόδου:

- Τα υλικά από τα οποία αποτελείται η μηχανή με τις αντίστοιχες ιδιότητες τους.
- Τις πηγές θερμότητας που υπάρχουν στις περιοχές του κινητήρα όπου υπάρχουν απώλειες ενέργειας.
- Τους συντελεστές συναγωγής που καθορίζουν την μετάδοση θερμότητας μεταξύ στερεών και ρευστών.
- Γνωστές θερμοκρασίες αν υπάρχουν για κάποιο μέρος του κινητήρα ή του περιβάλλοντος (σταθερές).
- Τις οριακές συνθήκες του προβλήματος.

Μετά την σχεδίαση της μηχανής και τον καθορισμό των παραμέτρων εισόδου, το λογισμικό αναλύει το σχέδιο του κινητήρα σε χιλιάδες πεπερασμένα στοιχεία εφαρμόζοντας σε κάθε ένα από αυτά τις μαθηματικές σχέσεις αγωγής και συναγωγής. Η σύγκλιση των θερμοκρασιών γειτονικών πεπερασμένων στοιχείων επιτυγχάνεται μέσω της μεθόδου Newton – Raphson. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων είναι η απεικόνιση του θερμοκρασιακού πεδίου, της κατανομής πυκνότητας θερμορροής και της θερμοκρασίας σε κάθε σημείο του κινητήρα. Στην επόμενη ενότητα θα γίνει μια σύντομη παρουσίαση των μαθηματικών σχέσεων και των οριακών συνθηκών που χρησιμοποιούνται από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να επιτευχθεί μια προσέγγιση της θερμικής συμπεριφοράς του σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών.

3.2 Θερμικά φαινόμενα στον κινητήρα

Στο κεφάλαιο των θερμικών φαινομένων, αναφέραμε ότι η θερμοκρασιακή διαφορά δύο σημείων οδηγεί στην μεταφορά θερμότητας από το ένα σημείο στο άλλο. Στο εσωτερικό της ηλεκτρικής μηχανής, η μετάδοση της θερμότητας πραγματοποιείται με τους μηχανισμούς αγωγής για μεταφορά θερμότητας από την επαφή υλικών σωμάτων και συναγωγής για μεταφορά θερμότητας μέσω της επιφάνειας επαφής με τον αέρα σε γειτονικά υλικά, ενώ πηγές θερμότητας θεωρούνται οι απώλειες που εμφανίζει η μηχανή. Στη συγκεκριμένη ενότητα θα γίνει μια παρουσίαση των μηχανισμών αυτών, των τύπων που τους χαρακτηρίζουν αλλά και των οριακών συνθηκών που χρησιμοποιούνται από την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την αξιόπιστη προσέγγιση της θερμικής συμπεριφοράς του κινητήρα.

3.2.1 Αγωγή στον κινητήρα

Ο γενικός τύπος για την αγωγή σε τρισδιάστατο πρόβλημα προκύπτει από την αρχή διατήρησης της ενέργειας(2.13):

$$\rho \cdot c_p \cdot dT/dt = \dot{q} + \nabla(\lambda \cdot \nabla T) \quad (3.1)$$

Θεωρώντας το υλικό ομογενές, δηλαδή ότι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ είναι ανεξάρτητος από την περιοχή του υλικού που εξετάζεται ,τότε από (2.14) θα γίνει :

$$\begin{aligned} \rho \cdot c_p \cdot dT/dt &= \dot{q} + \lambda \cdot \nabla^2 T \\ \Leftrightarrow \frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{d^2 T}{dz^2} + \frac{\dot{q}}{\lambda} &= \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{dT}{dt} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Όπου

$$\alpha = \lambda/\rho \cdot c_p \text{ ο συντελεστής θερμικής διάχυσης του υλικού [m}^2/\text{s]}$$

Σε περίπτωση που η θερμική ανάλυση αφορά τη μόνιμη κατάσταση ($dT/dt=0$) η (3.2) λαμβάνει την ακόλουθη μορφή (εξίσωση Poisson):

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{\lambda} = 0 \quad (3.3)$$

Σε κατάσταση όπου δεν υπάρχουν πηγές θερμότητας στο σύστημα ($\dot{q} = 0$), η εξίσωση αγωγής (3.2) γίνεται (εξίσωση Fourier):

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (3.4)$$

Όταν δεν υπάρχουν πηγές θερμότητας στο σύστημα ($\dot{q} = 0$) και η θερμική ανάλυση αφορά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, τότε η εξίσωση αγωγής (3.2) γράφεται ως (εξίσωση Laplace):

$$\nabla^2 T = 0 \quad (3.5)$$

3.2.2 Συναγωγή στον κινητήρα

Η μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής παρουσιάζεται μεταξύ ρευστών όπως αναφέραμε και στο δεύτερο κεφάλαιο. Ο μηχανισμός αυτός περιγράφεται από τον μαθηματικό τύπο του Newton (2.15) για την ψύξη των σωμάτων:

$$q = h \cdot (T_s - T_{\rho\epsilon\upsilon\sigma\tau\omicron\upsilon}) \quad (3.6)$$

Αν θεωρήσουμε ότι η μετάδοση της θερμότητας γίνεται μόνο σε μία διάσταση, κάθετη στην επιφάνεια του ρευστού τότε θα έχουμε τον τύπο:

$$-\lambda \cdot \frac{dT}{dx} = h \cdot (T_s - T_{\rho\epsilon\upsilon\sigma\tau\omicron\upsilon}) \quad (3.7)$$

Με

λ : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού της επιφάνειας αυτής. [$W/m \cdot K$]

3.3 Οριακές συνθήκες

Σε κάθε πρόγραμμα που πραγματοποιείται η θερμική ανάλυση κάποιας μηχανής , οι οριακές συνθήκες αποτελούν αναγκαίες παραμέτρους εισόδου. Οι οριακές συνθήκες ορίζονται στις επιφάνειες επαφής διαφορετικών υλικών και είναι απαραίτητες για τον ακριβή υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας στα υλικά αυτά. Οι συνθήκες αυτές ,για μονοδιάστατο πρόβλημα και επιφάνεια επαφής στον θέση $x = 0$, είναι οι εξής :

Συνθήκη Dirichlet- Σταθερή θερμοκρασία επιφάνειας:

$$T(0, t) = T_s \quad (3.8)$$

Συνθήκη Neumann-Σταθερή πυκνότητα θερμορροής επιφάνειας:

$$\left[-\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \right]_{x=0} = q_x \quad (3.9)$$

λ : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού.

Συνθήκη συναγωγής:

$$\left[-\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \right]_{x=0} = h \cdot (T(t, 0) - T_{env}) \quad (3.10)$$

h : συντελεστής συναγωγής

T_{env} : θερμοκρασία περιβάλλοντος

Ακτινοβολία στο περιβάλλον :

$$\left[-\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \right]_{x=0} = \sigma \cdot \epsilon \cdot (T(t, 0)^4 - T_{env}^4) \quad (3.11)$$

σ : σταθερά Stephan-Boltzmann

ϵ : συντελεστής ακτινοβολίας

3.4 Χαρακτηριστικά στάτη και ορισμός οριακών συνθηκών

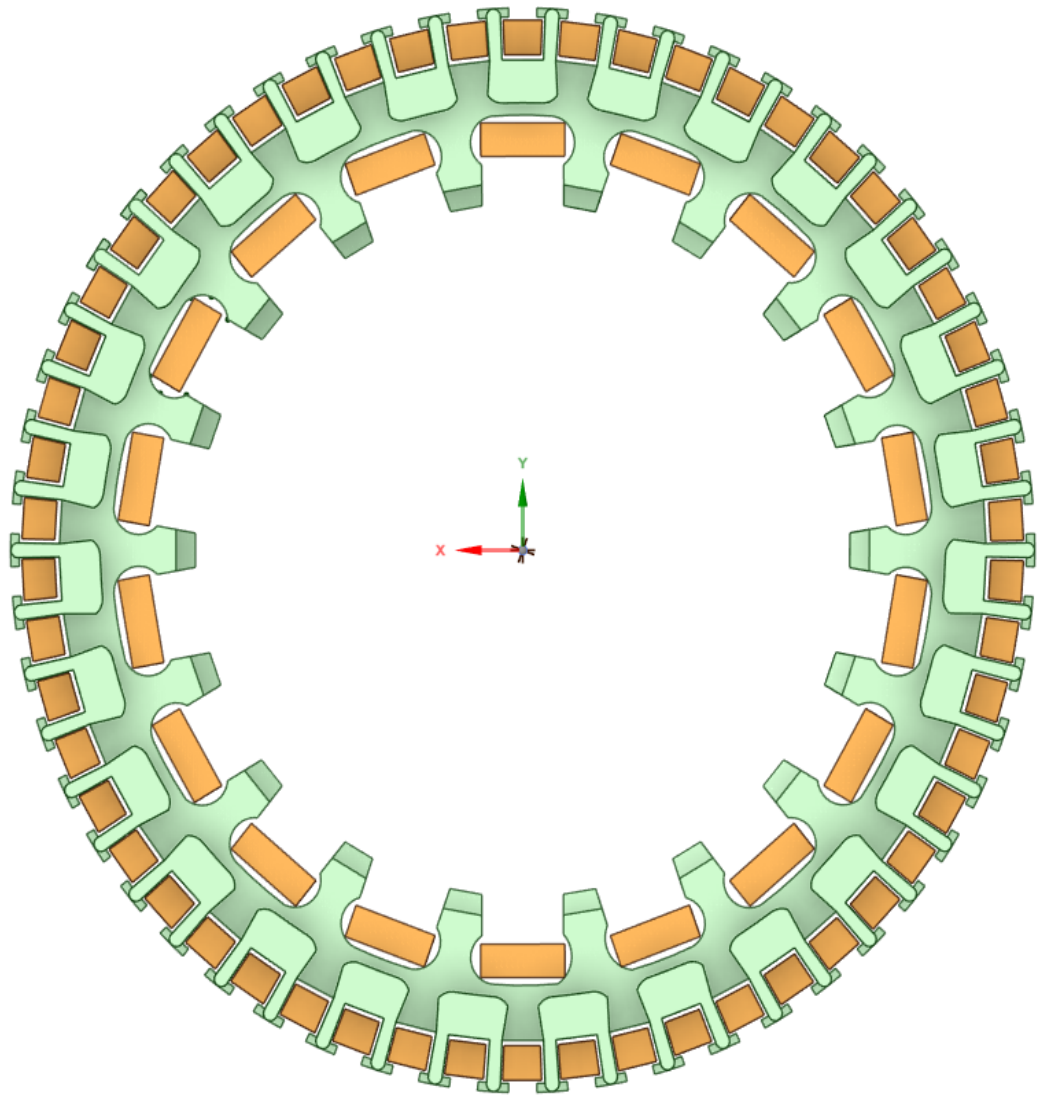
Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιάσουμε τις απαραίτητες παραμέτρους εισόδου για την θερμική ανάλυση του 18πολικού σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών. Πιο συγκεκριμένα θα οριστούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τυλιγμάτων και του πυρήνα του στάτη, οι θερμικές ιδιότητες των υλικών τους, οι συντελεστές συναγωγής στα διάφορα μέρη του στάτη, οι οριακές συνθήκες και οι τιμές των απωλειών οι οποίες θα λειτουργήσουν ως πηγές θερμότητας στην ανάλυση μας.

3.4.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλου

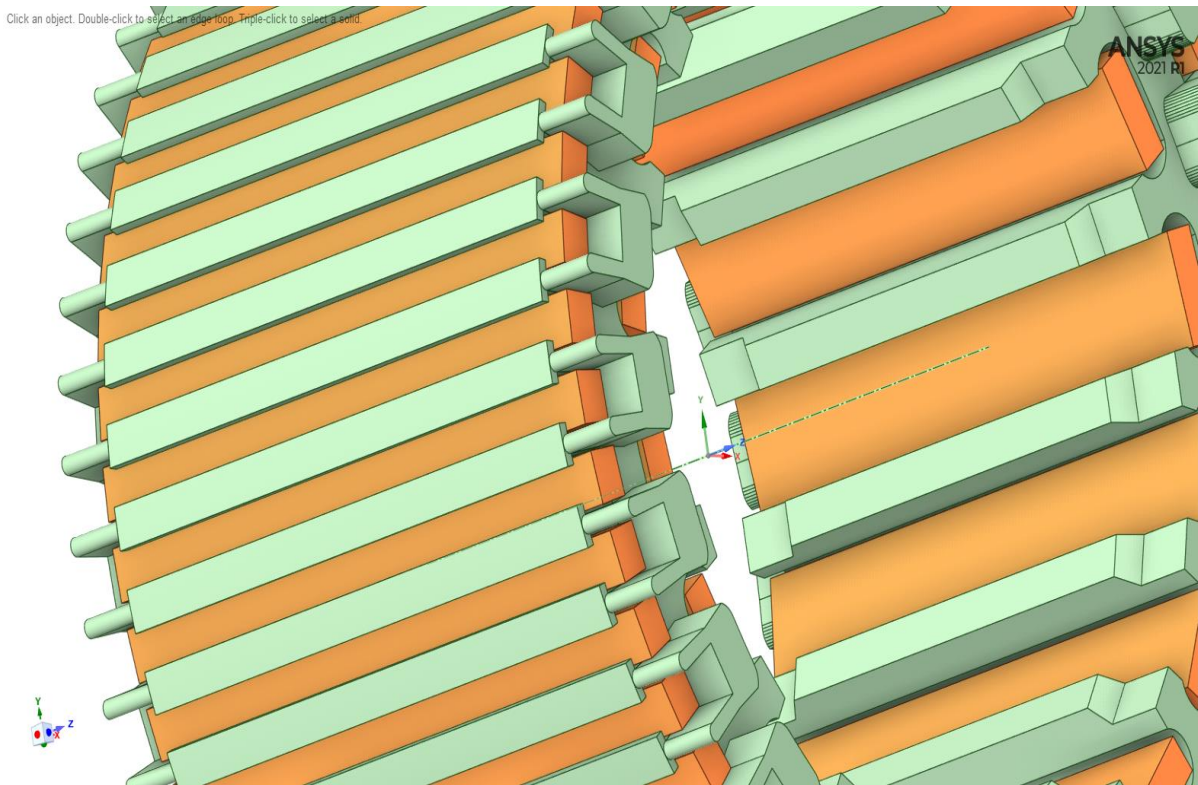
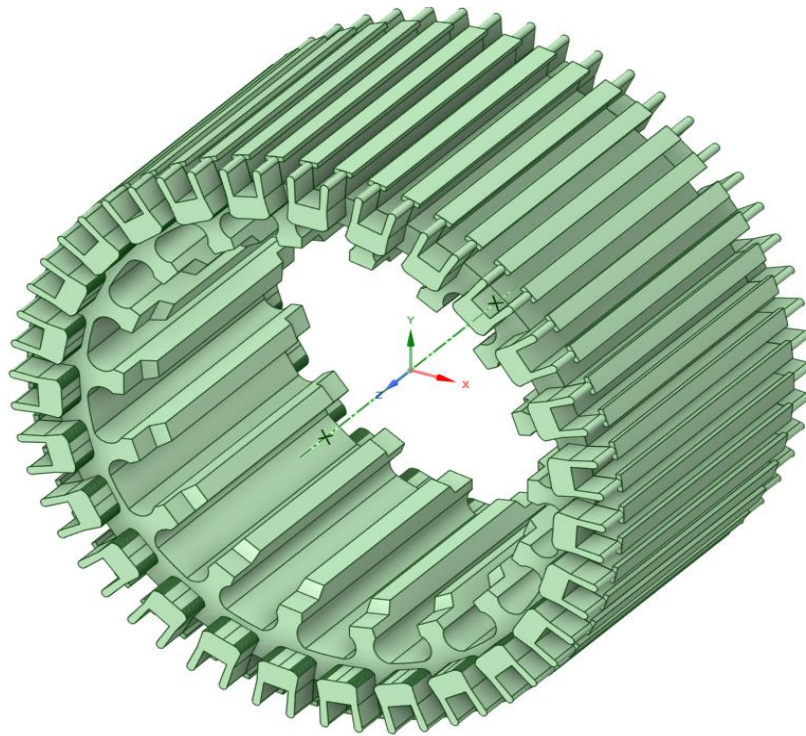
Στον παρακάτω πίνακα 3.1 φαίνονται τα κυριότερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μηχανής με τα μεγέθη και τα αντίστοιχα σύμβολα, ενώ παράλληλα στα σχήματα 3.1 και 3.2 παρουσιάζεται η κάτοψη και η γεωμετρία του μοντέλου:

| Γεωμετρικά χαρακτηριστικά στάτη | | |
|---|---|---------------|
| Αριθμός πόλων κινητήρα | p | 18 |
| Αριθμός εξωτερικών αυλάκων κινητήρα | N_{out} | 54 |
| Αριθμός εσωτερικών αυλάκων κινητήρα | N_{in} | 18 |
| Αξονικό ενεργό μήκος στάτη (mm) | L | 48.6 |
| Εσωτερική διάμετρος στάτη (mm) | D_s | 65 |
| Εξωτερική διάμετρος στάτη (mm) | D_{Sout} | 81 |
| Ύψος εξωτερικών αυλακώσεων στάτη/ Άνοιγμα αυλακώσεων (mm) | H_s/H_{TIP} | 3.2/0.68 |
| Πλάτος εξωτερικών αυλακώσεων στο άνοιγμα/ στο μέσο/στο τέλος (mm) | $W_{OP} / W_M / W_{end}$ | 2.23/3.55/3.3 |
| Ύψος εσωτερικών αυλακώσεων στάτη/ Άνοιγμα αυλακώσεων/Εξόγκωμα αυλακώσεων (mm) | $H_{in_s} / H_{in_{TIP}} / H_{in}$ | 3.99/1.5/1.97 |
| Πλάτος εσωτερικών αυλακώσεων στο άνοιγμα/ στο μέσο/στο τέλος (mm) | $W_{in_{OP}} / W_{in_M} / W_{in_{end}}$ | 5.58/8.27/6.5 |

Πίνακας 3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του στάτη.



Σχήμα 3.1 Η κάτοψη του στάτη.

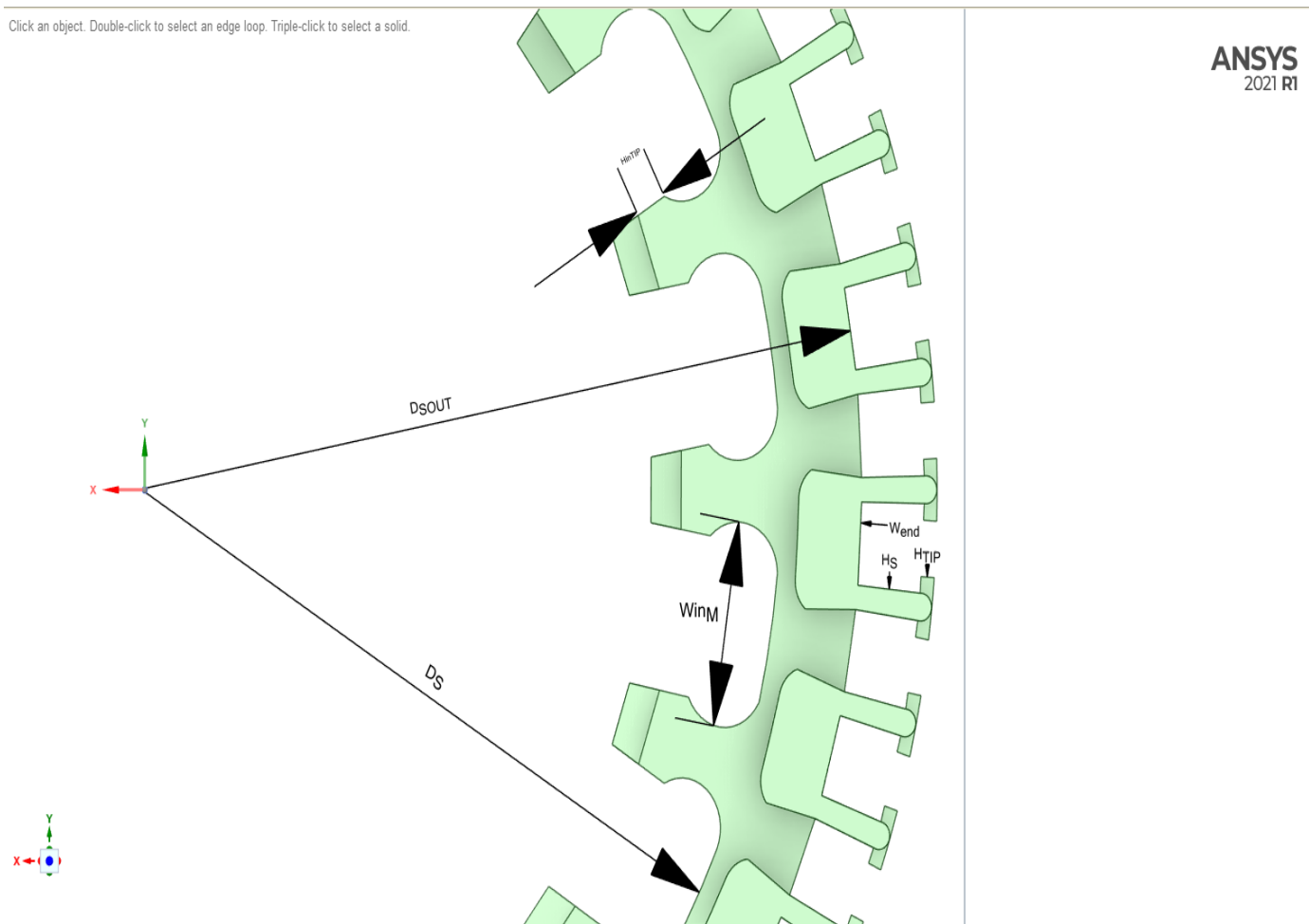


Σχήμα 3.2 Ο πυρήνας του σάτη (χωρίς και με τυλίγματα).

Παρακάτω υπάρχει μια πιο λεπτομερής απεικόνιση της κάθετης τομής του σάτη όπου φαίνονται καλύτερα τα εσωτερικά και εξωτερικά αυλάκια του πυρήνα αλλά και οι διαστάσεις τους :

Click an object. Double-click to select an edge loop. Triple-click to select a solid.

ANSYS
2021 R1



Σχήμα 3.3 Λεπτομέρεια κάθετης τομής.

3.4.2 Ιδιότητες υλικών

Στη συνέχεια, σημαντικό ρόλο στη μεταφορά θερμότητας στο εσωτερικό του κινητήρα έχουν οι θερμικές ιδιότητες των υλικών από τις οποίες είναι κατασκευασμένος ο κινητήρας. Η θερμική αγωγιμότητα λ ($W/m \cdot K$), η ειδική θερμοχωρητικότητα c_p ($J/kg \cdot K$) και η πυκνότητα ρ (kg/m^3) του κάθε υλικού ορίζουν την τιμή της θερμοκρασίας αλλά και την διάχυση της θερμότητας στο εσωτερικό του υλικού. Τα υλικά από τα οποία αποτελούνται τα μέρη του κινητήρα έχουν ήδη παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 1. Στον παρακάτω πίνακα 3.2 παρουσιάζονται τα υλικά του στάτη μαζί με τις θερμικές ιδιότητες τους:

| Όνομασία Υλικού | Πυκνότητα $\rho(kg/m^3)$ | Θερμική αγωγιμότητα $\lambda(W/m \cdot K)$ | ειδική θερμοχωρητικότητα $c_p(J/kg \cdot K)$ |
|-------------------|-----------------------------|---|--|
| Magnetic iron PLA | 1850 | 0.2943 | 2050 |
| Χαλκός | 8940 | 401 | 384.6 |
| Αέρας | 1.161 | 0.0285 | 1050 |

Πίνακας 3.2 Θερμικές ιδιότητες υλικών του στάτη.

Για την εκτέλεση των προσομοιώσεων χρησιμοποιήσαμε πληροφορίες για την θερμική αγωγιμότητα του magnetic iron pla από τον πίνακα στο Παράρτημα 1 [14]. Η θερμική αγωγιμότητα του φερομαγνήτη εξαρτάται από το ποσοστό σιδήρου που διαθέτει. Επομένως, ο κάθε κατασκευαστής θα πρέπει να παρέχει αυτή την πληροφορία καθώς η τιμή της αγωγιμότητας διαφέρει από προϊόν σε προϊόν. Στην παρούσα διπλωματική η ακριβής τιμή της θερμικής αγωγιμότητας του υλικού του στάτη δεν είναι γνωστή. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε μια σχετικά χαμηλή τιμή, η οποία βρίσκεται μέσα στα επιτρεπτά όρια.

3.4.3 Ορισμός οριακών συνθηκών και συντελεστών συναγωγής

Η θερμική ανάλυση για να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα θέλει να έχει καλώς ορισμένες οριακές συνθήκες. Οι οριακές συνθήκες ορίζονται σε επιφάνειες επαφής διαφορετικών περιοχών του κινητήρα ρυθμίζοντας την μετάδοση θερμότητας. Στην ανάλυση μας οι οριακές συνθήκες αφορούν περιοχές με σταθερή θερμοκρασία και τον συντελεστή συναγωγής μεταξύ των επιφανειών του στάτη και του αέρα.

Σε ακτίνα πενταπλάσια από αυτή του κινητήρα, θα ορίσουμε μια επιφάνεια σταθερής θερμοκρασίας. Το θερμοκρασιακό όριο θα είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος στους $25^{\circ}C$ ($T = 298^{\circ}K$). Συνεπώς σε ακτίνα μεγαλύτερη των 26.25 εκατοστών από τον άξονα την μηχανής, η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της λειτουργίας του κινητήρα είναι μηδενική.

Όπως έχουμε αναφέρει, υφίσταται απαγωγή θερμότητας μέσω συναγωγής μεταξύ επιφανειών της μηχανής και του αέρα. Ο συντελεστής συναγωγής του αέρα κυμαίνεται από 2 έως 25 για ελεύθερη ροή και από 25 έως 200 για εξαναγκασμένη ροή. Στην περίπτωση μας, έχουμε φυσική ψύξη επομένως και ο συντελεστής συναγωγής θα κυμαίνεται στα συγκεκριμένα όρια. Ο μηχανισμός της συναγωγής περιγράφεται από την εξίσωση (3.10). Οι οριακές συνθήκες στις επιφάνειες για την ανάλυση του συγκεκριμένου κινητήρα είναι οι ακόλουθες:

Στάτης-Διάκενο: στη συγκεκριμένη επιφάνεια ορίζουμε συντελεστή συναγωγής $h = 5 (W/m^2 \cdot K)$ που ρυθμίζει τη μετάδοση θερμότητας από τον πυρήνα του στάτη προς το διάκενο.

Τυλίγματα στάτη-Διάκενο: ορίζουμε συντελεστή συναγωγής $h = 2 (W/m^2 \cdot K)$, που ρυθμίζει την μετάδοση θερμότητας από τον αέρα στο εσωτερικό του κινητήρα προς τα χάλκινα τυλίγματα του στάτη.

Οι τιμές των συντελεστών συναγωγής επιλέχθηκαν μετά από ένα μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων και δοκιμών, ώστε οι τιμές των αποτελεσμάτων των μοντέλων να συγκλίνουν όσο το δυνατόν περισσότερο στις πραγματικές.

3.4.4 Απώλειες και χαρακτηριστικά λειτουργίας

Οι πηγές θερμότητας στο εσωτερικό του κινητήρα προκύπτουν από τις απώλειες ενέργειας. Στο μοντέλο που αναλύουμε μας απασχολούν μόνο οι απώλειες χαλκού στα τυλίγματα του στάτη, επομένως οι υπόλοιπες απώλειες θεωρούνται αμελητέες. Πιο συγκεκριμένα από πειραματικές μετρήσεις, για ρεύμα εισόδου 4,934 A, οι απώλειες χαλκού μετρήθηκαν $P_{cu} = 15,801 W$. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1, το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση διαθέτει τυλίγματα και στα εσωτερικά αυλάκια. Η σχεδίαση αυτή έγινε σκόπιμα ώστε να μπορέσουμε να υπολογίσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια την θερμότητα που παράγεται από τα καλώδια που βρίσκονται μέσα στο σώμα του πυρήνα. Ο πυρήνας του στάτη αποτελείται από δύο πανομοιότυπα μέρη και στο εσωτερικό τους περνάνε χάλκινα καλώδια που ανήκουν στα τυλίγματα του στάτη. Συνεπώς πρέπει να γίνει ένας διαμοιρασμός του συνολικού ρεύματος που ρέει στα καλώδια του στάτη (άρα και των απωλειών) στα εσωτερικά και εξωτερικά αυλάκια. Οι απώλειες για εσωτερικά αυλάκια ορίζονται $P_{in_{cu}}$ και $P_{out_{cu}}$ για τα εξωτερικά.

Η πηγή θερμότητας των τυλιγμάτων στα εξωτερικά αυλάκια υπολογίζεται από την σχέση :

$$Q_{out} = P_{out_{cu}}/N_{out} \cdot V_S = P_{out_{cu}}/54 \cdot V_S \cong 887000 W/m^3 \quad (3.12)$$

Η πηγή θερμότητας των τυλιγμάτων στα εσωτερικά αυλάκια υπολογίζεται από την σχέση :

$$Q_{in} = P_{in_{cu}}/N_{in} \cdot V_{Sin} = P_{in_{cu}}/18 \cdot V_{Sin} \cong 240000 W/m^3 \quad (3.13)$$

Όπου :

V_S : Ο όγκος του εξωτερικού αυλακιού [m^3]

V_{Sin} : Ο όγκος του εσωτερικού αυλακιού [m^3]

N_{out} : Αριθμός των εξωτερικών αυλακιών.

N_{in} : Αριθμός των εσωτερικών αυλακιών.

3.5 Δισδιάστατη θερμική ανάλυση

Στη συγκεκριμένη παράγραφο θα εφαρμόσουμε την μέθοδο πεπερασμένων παραμέτρων σε δύο διαστάσεις. Όπως αναφέραμε και στην αρχή του κεφαλαίου, για την ανάλυση θα χρησιμοποιήσουμε το πρόγραμμα FEMM. Αρχικά θα δείξουμε πως έγινε η εισαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα FEMM και στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της δισδιάστατης ανάλυσης.

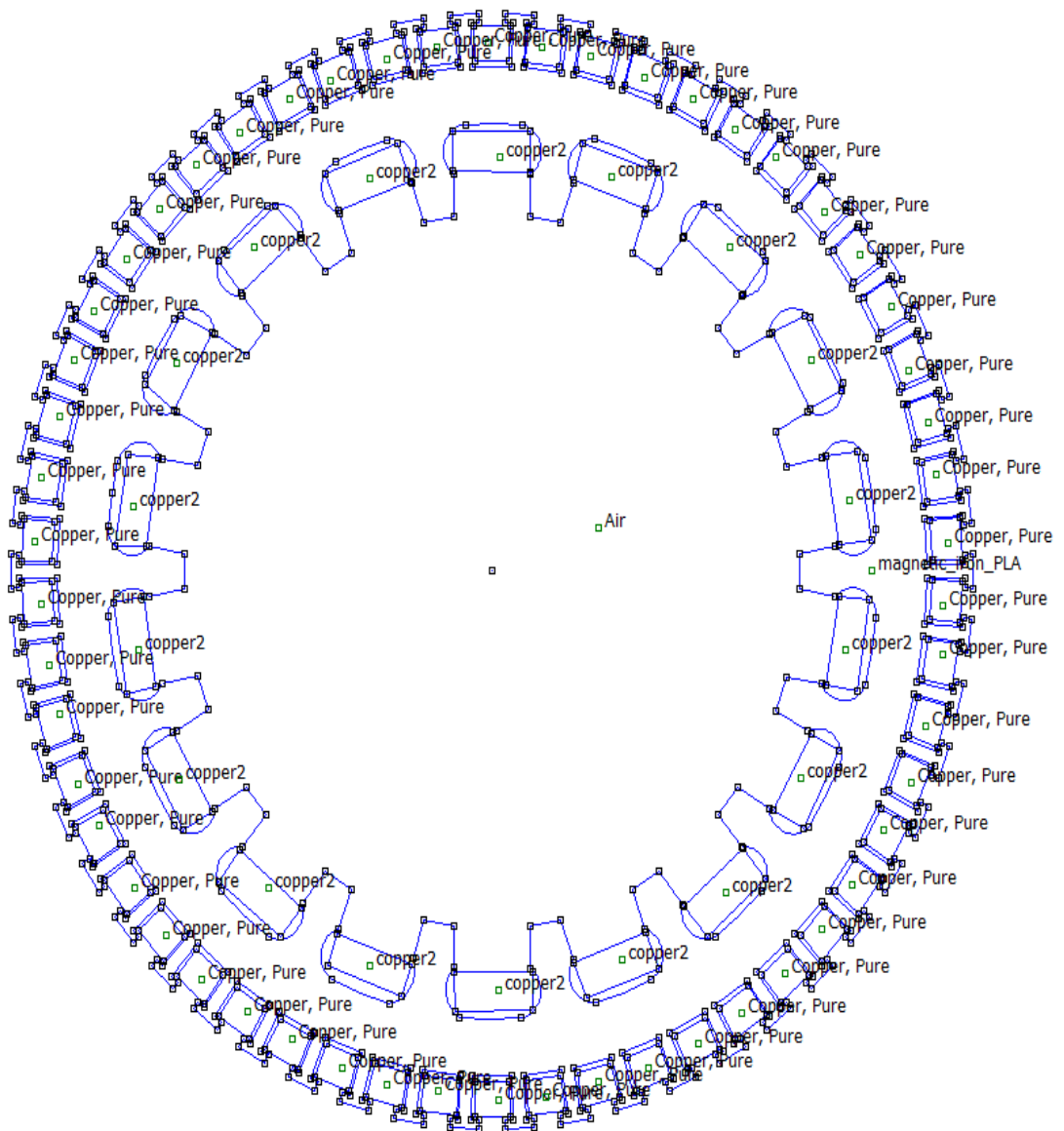
3.5.1 Παρουσίαση FEMM

Το λογισμικό FEMM χρησιμοποιεί τις μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν τους δύο μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας (αγωγή και συναγωγή) και τις προαναφερθείσες οριακές συνθήκες έτσι ώστε να επιτευχθεί η προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς του στάτη του σύγχρονου κινητήρα. Στο πρόγραμμα έχει σχεδιαστεί ο στάτης σε δισδιάστατη μορφή, ενώ η τρίτη διάσταση έχει οριστεί αρχικά και υπάρχει ως έννοια του βάθους έχοντας μια σταθερή τιμή. Η θερμική ανάλυση θα γίνει για τομή κάθετη στον άξονα του κινητήρα (planar). Το αποτέλεσμα της ανάλυσης από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων είναι η απεικόνιση της θερμοκρασιακής κατανομής και της πυκνότητας θερμορροής σε κάθε σημείο του στάτη. Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η αδυναμία

παραγωγής αποτελεσμάτων στην μεταβατική κατάσταση της θερμικής συμπεριφοράς του κινητήρα. Επιπλέον, η απουσία της τρίτης διάστασης στο μοντέλο προσομοίωσης συντελεί στην ύπαρξη αξιολογημένου σφάλματος στα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης.

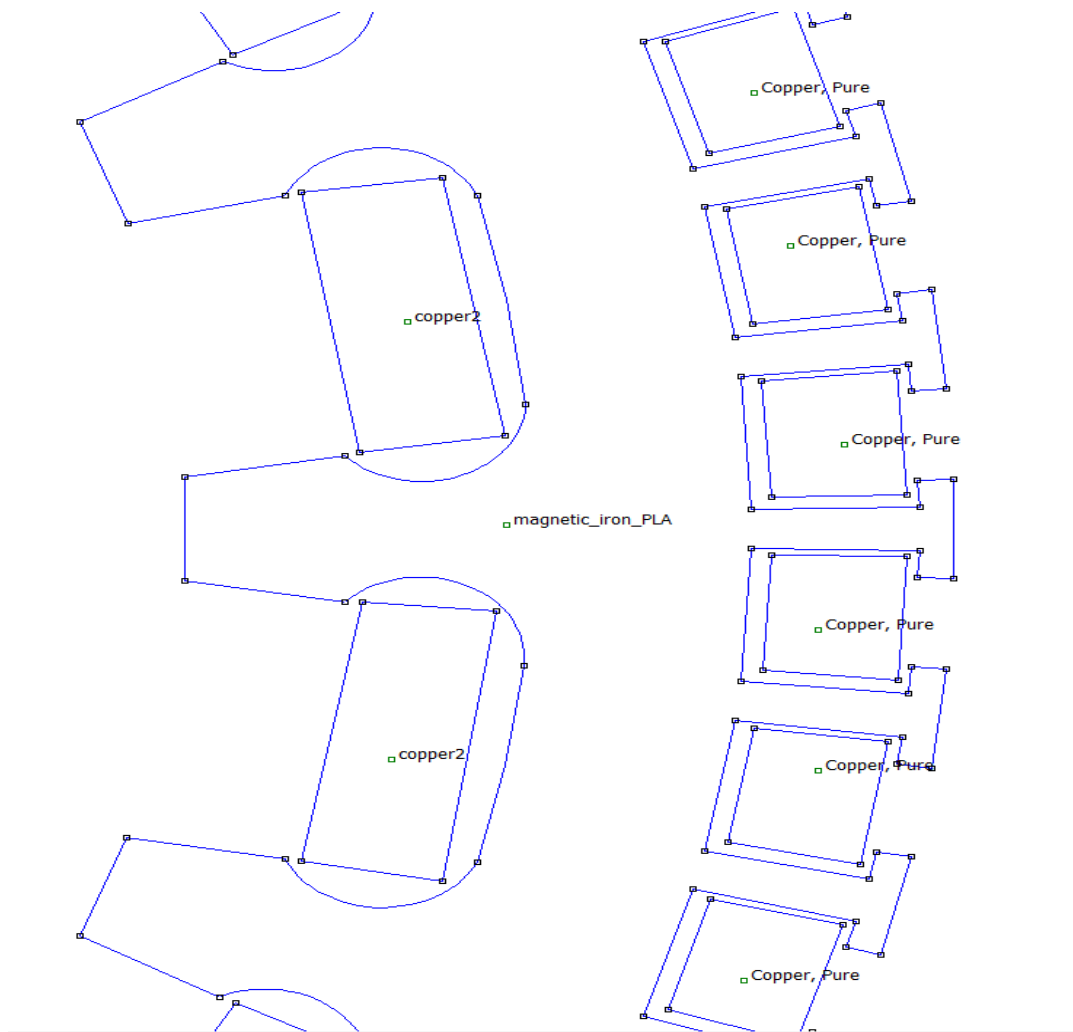
3.5.2 Σχεδιασμός στάτη και εισαγωγή δεδομένων

Το σχέδιο της κάθετης τομής στον άξονα του στάτη του κινητήρα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



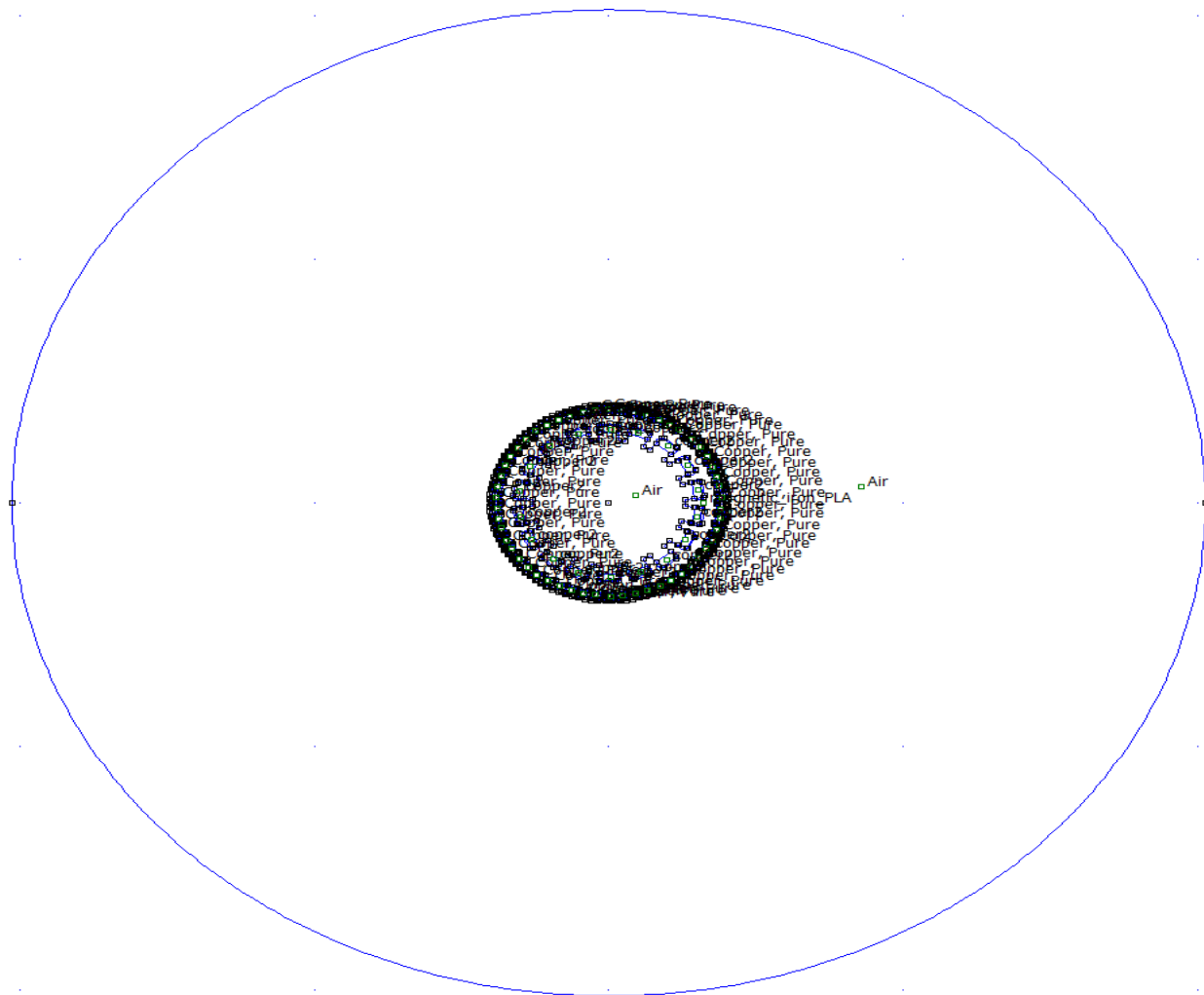
Σχήμα 3.4 Κάθετη τομή στάτη.

Παρακάτω υπάρχει μια πιο λεπτομερής απεικόνιση της κάθετης τομής του στάτη όπου φαίνονται με μεγαλύτερη ακρίβεια τα εσωτερικά και εξωτερικά αυλάκια του.



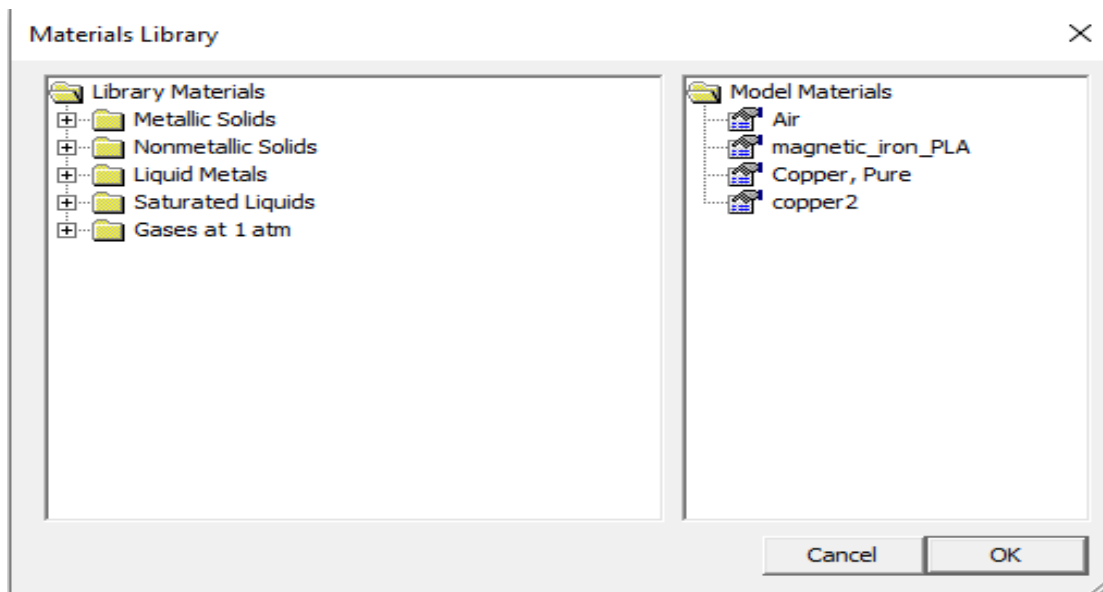
Σχήμα 3.5 Λεπτομέρεια κάθετης τομής.

Εκτός από τον σάτη θα πρέπει να σχεδιαστεί και ένας κύκλος με ακτίνα πέντε φορές μεγαλύτερη του σάτη. Η απουσία του κύκλου τις περισσότερες φορές οδηγεί στο να μην βγαίνουν λύσεις καθώς το πρόγραμμα δεν έχει σημείο αναφοράς. Ο κύκλος αυτός θα έχει ως οριακή συνθήκη την επιλογή της σταθερής θερμοκρασίας και ως νούμερο την θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T = 298 \text{ }^\circ\text{K}$). Ουσιαστικά ο κύκλος προσομοιάζει τον περιβάλλοντα χώρο του σάτη. Το σχέδιο του κύκλου αναφοράς φαίνεται στην παρακάτω εικόνα :

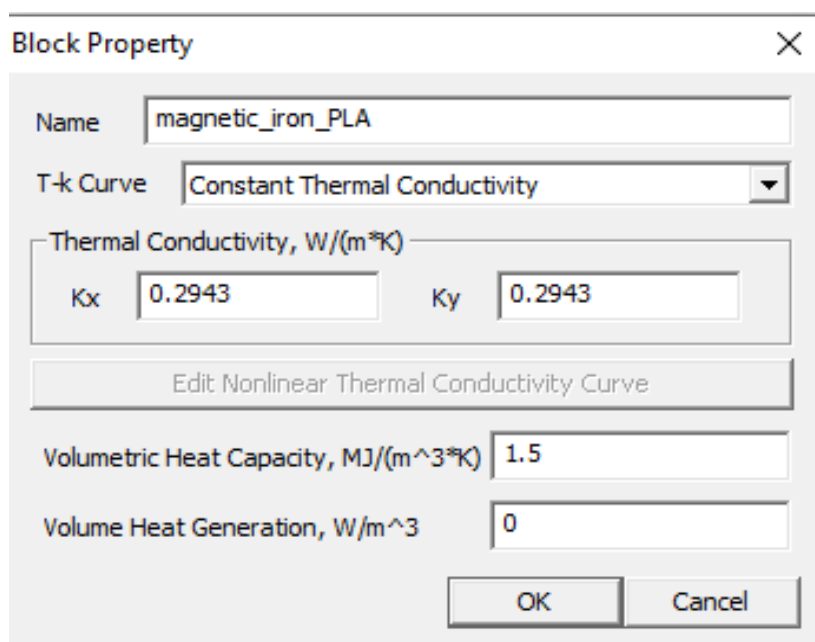


Σχήμα 3.6 Ολοκληρωμένο σχέδιο.

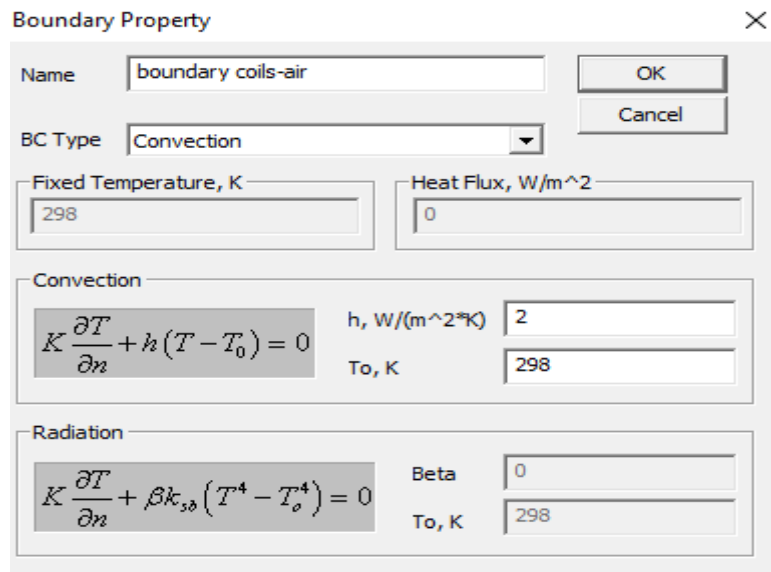
Μετά τον σχεδιασμό του στάτη, εισάγουμε τα υλικά από τα οποία αποτελείται, τις οριακές συνθήκες στις επιφάνειες επαφής των διαφορετικών υλικών και τις πηγές θερμότητας [26]. Ο ορισμός των παραπάνω στοιχείων εισόδου θα γίνει σύμφωνα με τις υποπαραγράφους 3.4.2, 3.4.3 και 3.4.4. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε την εισαγωγή κάποιων παραμέτρων της δισδιάστατης ανάλυσης :



Σχήμα 3.7 Λίστα υλικών του μοντέλου.

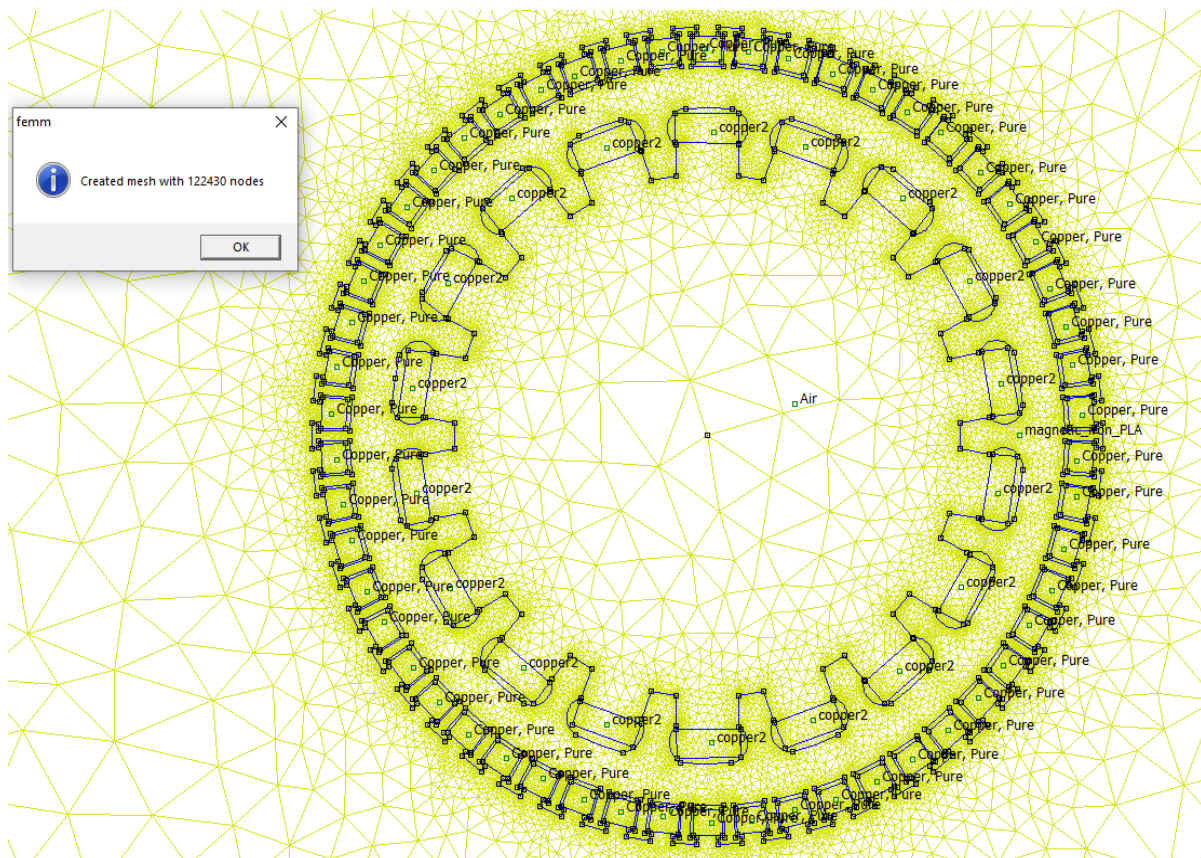


Σχήμα 3.8 Εισαγωγή ιδιοτήτων υλικού.

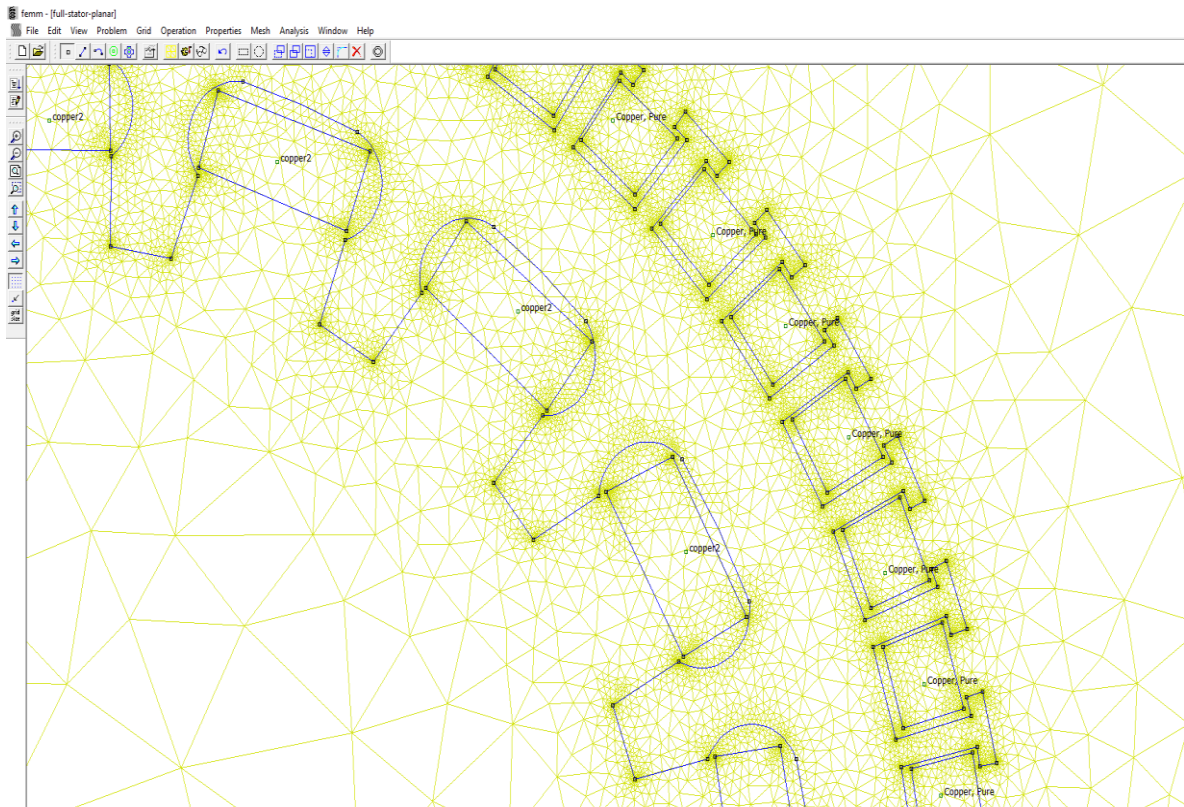


Σχήμα 3.9 Εισαγωγή συντελεστή συναγωγής μεταξύ χάλκινων τυλιγμάτων και αέρα.

Αφού γίνει ο ορισμός των δεδομένων το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων αναλύει το σχέδιο του σάτη σε πεπερασμένα στοιχεία, δημιουργώντας ένα πλέγμα . Για την σωστή επίλυση του προβλήματος είναι απαραίτητο να υπάρχουν τουλάχιστον δύο τριγωνικές επιφάνειες υπολογισμού μέσα στις κρίσιμες επαφές του σχεδίου . Στα σχήματα 3.10 και 3.11 διακρίνεται το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί με κίτρινο χρώμα :



Σχήμα 3.10 Πλέγμα σχεδίου.



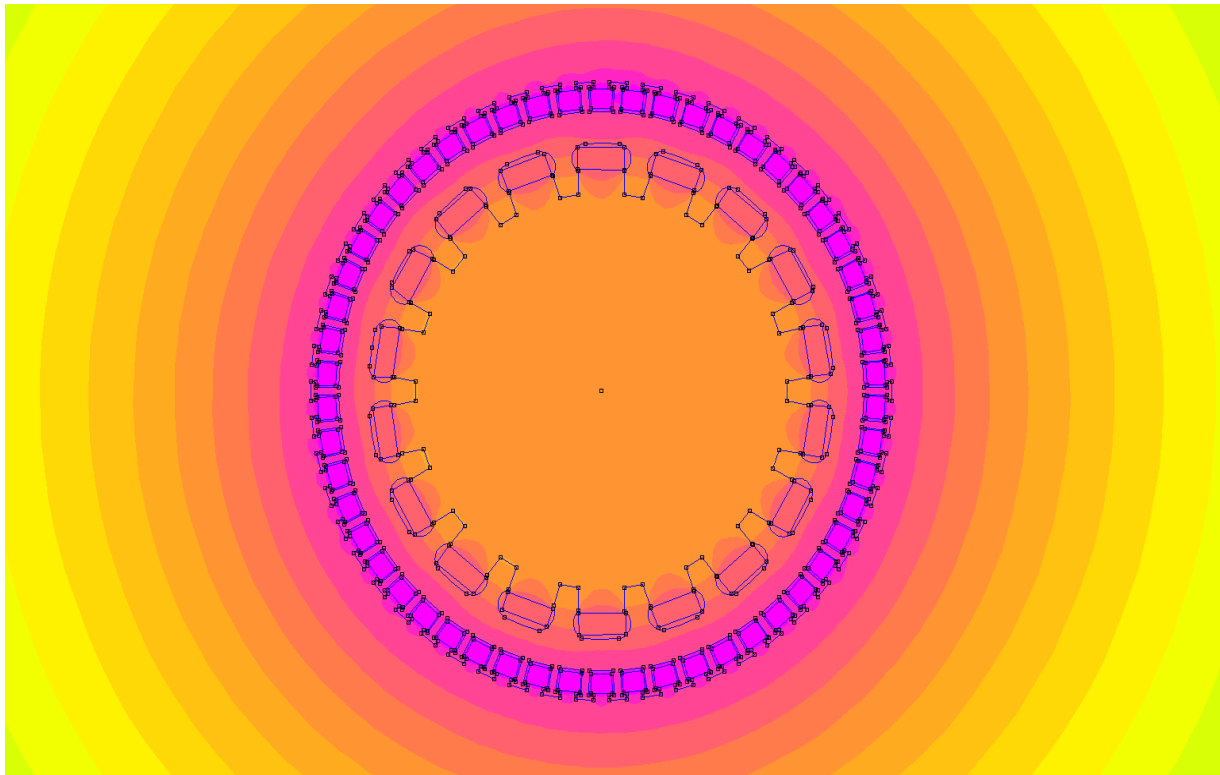
Σχήμα 3.11 Λεπτομέρεια πλέγματος στο στάτη.

Το πλέγμα του σχεδίου του κινητήρα αναλύεται σε 123100 κόμβους και σε 245838 τριγωνικές περιοχές στις οποίες εφαρμόζονται οι εξισώσεις αγωγής και συναγωγής προκειμένου να προσδιοριστεί η θερμοκρασία κάθε σημείου του στάτη.

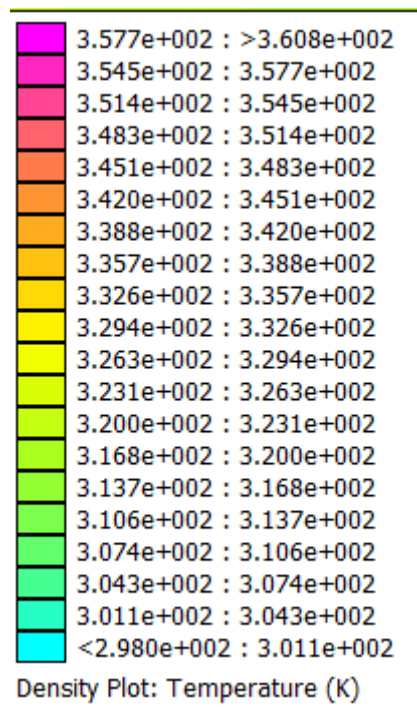
3.5.3 Αποτελέσματα δισδιάστατης προσομοίωσης

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης του στάτη με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για την κάθετη τομή του, χρησιμοποιώντας τα πιο πάνω στοιχεία. Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης λαμβάνουμε πληροφορίες για την κατανομή της θερμοκρασίας σε ολόκληρο το περιβάλλον αλλά και στα διάφορα μέρη του στάτη, για την θερμορροή και την παράγωγο της θερμοκρασίας.

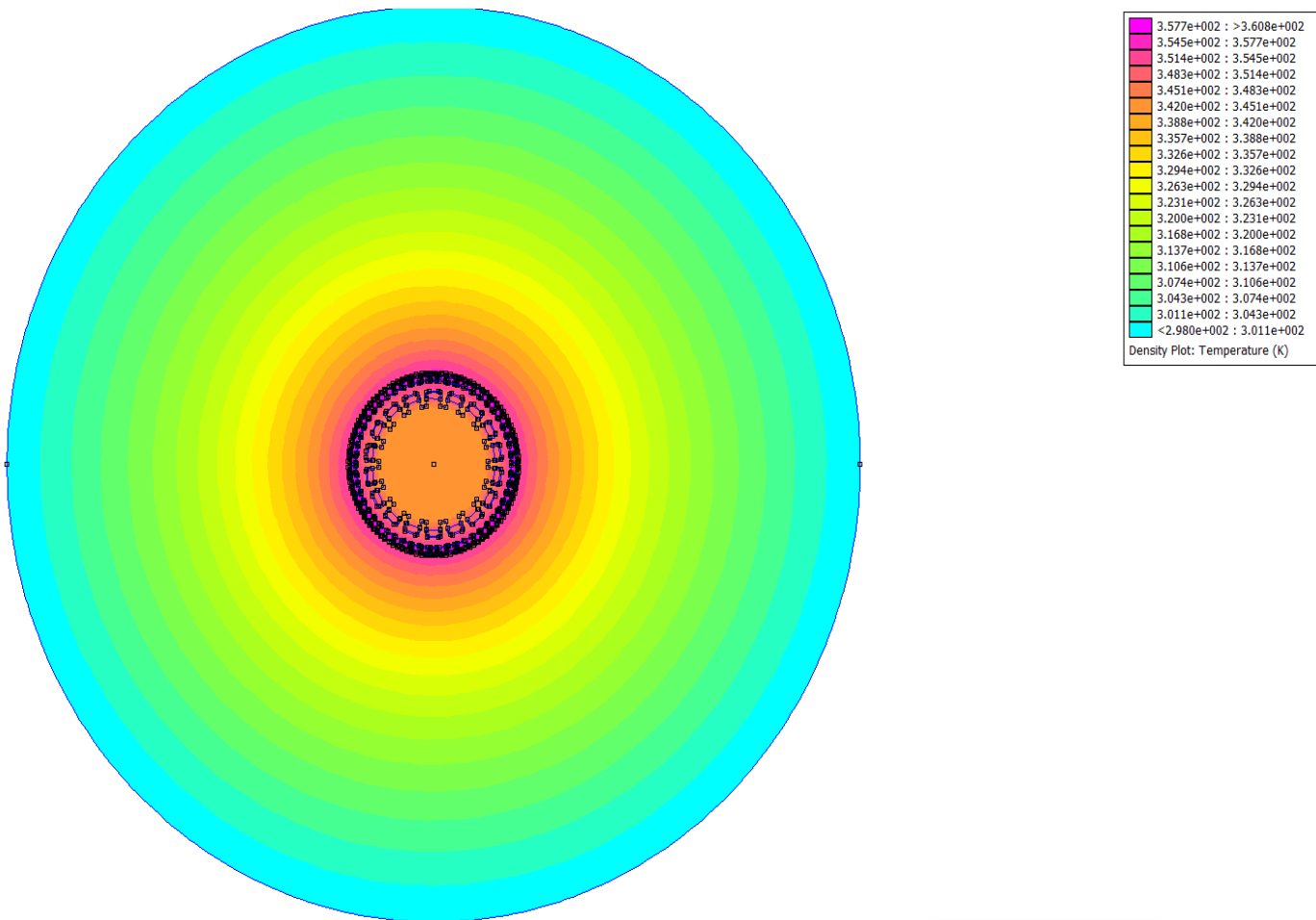
Οι τιμές θερμοκρασίας που λαμβάνουν τα μέρη του στάτη και ο περιβάλλοντας χώρος αποτελούν το πιο σημαντικό κομμάτι της διερεύνησης μας. Το κύριο ζήτημα που μας απασχολεί, είναι οι τιμές θερμοκρασίας των υλικών στην μόνιμη κατάσταση να μην ξεπερνούν τα σημεία λειτουργίας τους. Στα επόμενα σχήματα απεικονίζεται η θερμοκρασία του στάτη στην μόνιμη κατάσταση:



Σχήμα 3.12 Κατανομή θερμοκρασίας στον σάτη.



Σχήμα 3.13 Υπόμνημα θερμοκρασίας.



Σχήμα 3.14 Θερμοκρασία στο χώρο.

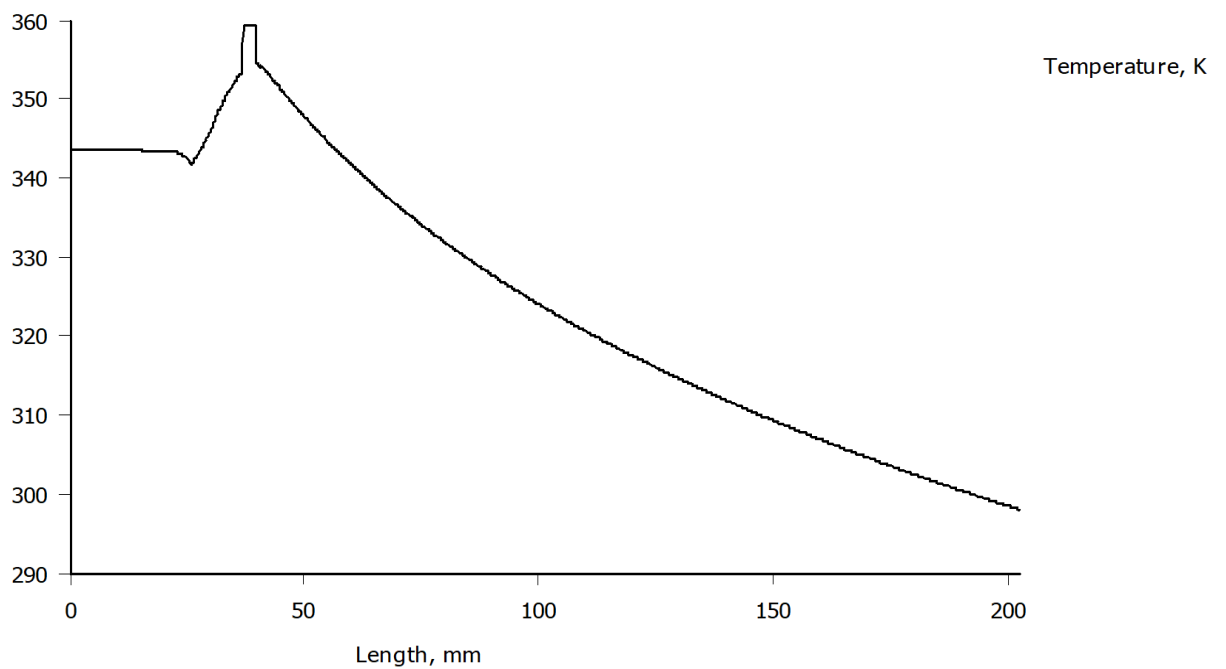
Στο πίνακα 3.3 καταγράφονται οι θερμοκρασίες συγκεκριμένων περιοχών του στάτη στην μόνιμη κατάσταση :

| Περιοχή στάτη | Τιμή θερμοκρασίας (°C) |
|--------------------------|--------------------------|
| Εξωτερικό τύλιγμα στάτη | 86.448 |
| Εσωτερικό τύλιγμα στάτη | 77.283 |
| Εξωτερικό τοίχωμα πυρήνα | 82.131 |
| Εσωτερικό τοίχωμα πυρήνα | 78.205 |

Πίνακας 3.3 Θερμοκρασία στα επιμέρους τμήματα του στάτη.

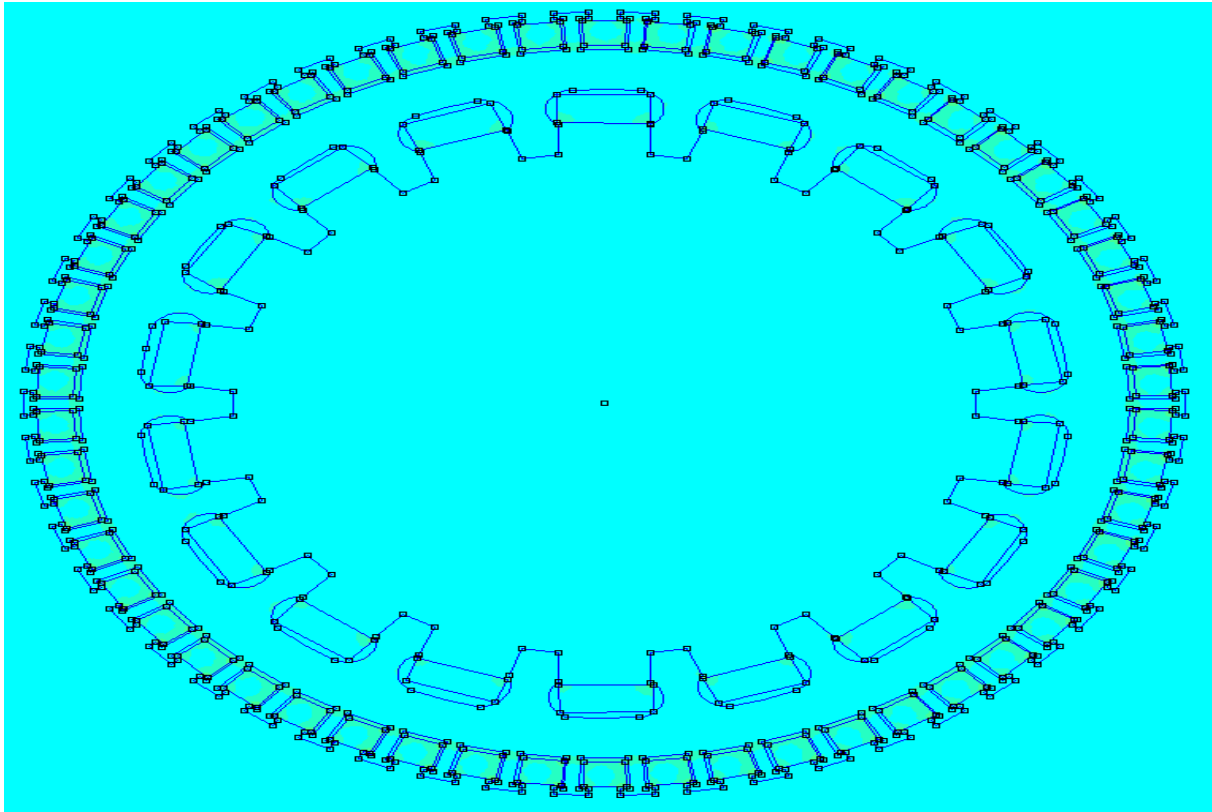
Από το σχέδιο της θερμοκρασιακής κατανομής και τον πίνακα 3.3 παρατηρούμε ότι το θερμότερο μέρος του στάτη αποτελούν τα εξωτερικά τυλίγματα του. Αυτό οφείλεται στην υψηλή παραγωγή θερμότητας των εξωτερικών χάλκινων τυλιγμάτων λόγω του διαχωρισμού των απωλειών χαλκού . Η επόμενη θερμότερη περιοχή εντοπίζεται στα εξωτερικά τοιχώματα του πυρήνα του στάτη λόγω της άμεσης επαφής τους με τα χάλκινα τυλίγματα. Όσο απομακρυνόμαστε από τα εξωτερικά τυλίγματα, είτε προς το εσωτερικό του πυρήνα είτε προς το περιβάλλοντα χώρο παρατηρούμε μείωση της

θερμοκρασίας. Η μεταβολή όμως αυτή γίνεται με διαφορετικούς ρυθμούς ανάλογα την κατεύθυνση. Όσο κινούμαστε μακριά από το σώμα του στάτη η θερμοκρασία μειώνεται με σταδιακό ρυθμό έως τα 202 mm όπου λαμβάνει θερμοκρασία περιβάλλοντος 25 °C . Το πιο πάνω ισχύει λόγω της οριακής συνθήκης που τέθηκε αρχικά ως είσοδο στο λογισμικό. Εάν κινηθούμε προς το εσωτερικό του στάτη η θερμοκρασία μειώνεται με μικρότερο ρυθμό , κάτι που οφείλεται στην θερμική αγωγιμότητα του πλαστικού του πυρήνα και στην μικρή παραγωγή θερμότητας των εσωτερικών τυλιγμάτων του στάτη. Στο κέντρο του μοντέλου η θερμοκρασία φτάνει τους 70.54°C . Τα παραπάνω επαληθεύονται από την γραφική παράσταση της θερμοκρασίας συναρτήσει της απόστασης :

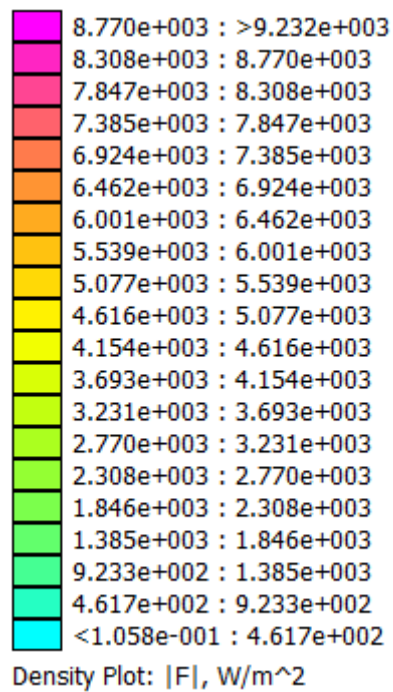


Σχήμα 3.15 Μεταβολή θερμοκρασίας σε σχέση την απόσταση.

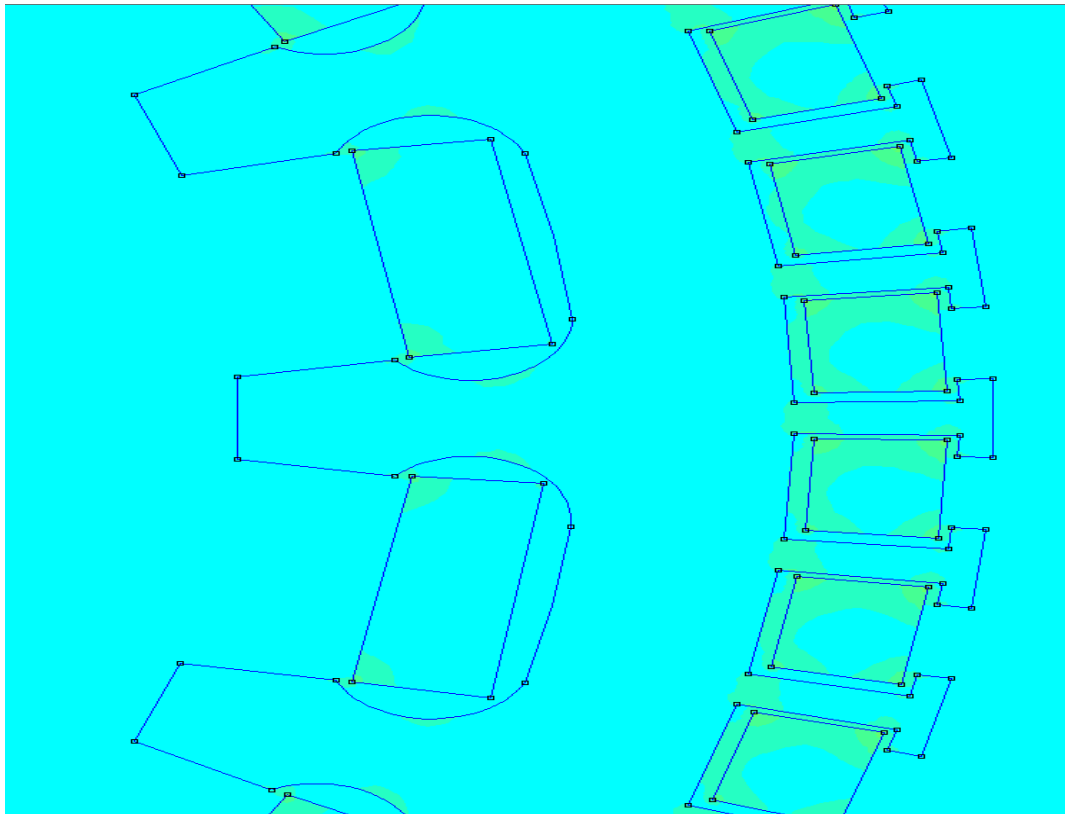
Έπειτα θα εξετάσουμε την θερμορροή στο μοντέλο . Η πυκνότητα ροής θερμότητας είναι ο ρυθμός θέρμανσης ανά μονάδα επιφάνειας, στην οποία γίνεται μετάδοση θερμότητας από ένα σώμα μεγαλύτερης θερμοκρασίας προς ένα άλλο μικρότερης. Στα σχήματα 3.16 και 3.18 φαίνεται η κατανομή της θερμορροής στο περιβάλλον, ενώ στο σχήμα 3.19 παρουσιάζεται η γραφική της παράσταση συναρτήσει της απόστασης :



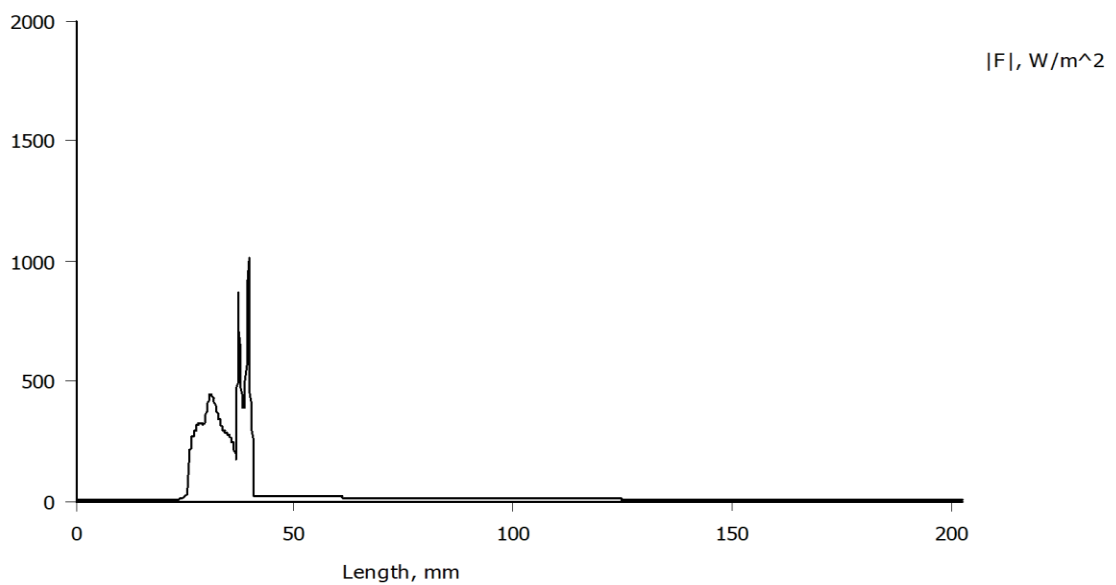
Σχήμα 3.16 Γράφημα πυκνότητας θερμορροής.



Σχήμα 3.17 Υπόμνημα πυκνότητας θερμορροής.



Σχήμα 3.18 Λεπτομέρεια πυκνότητας θερμορροής.

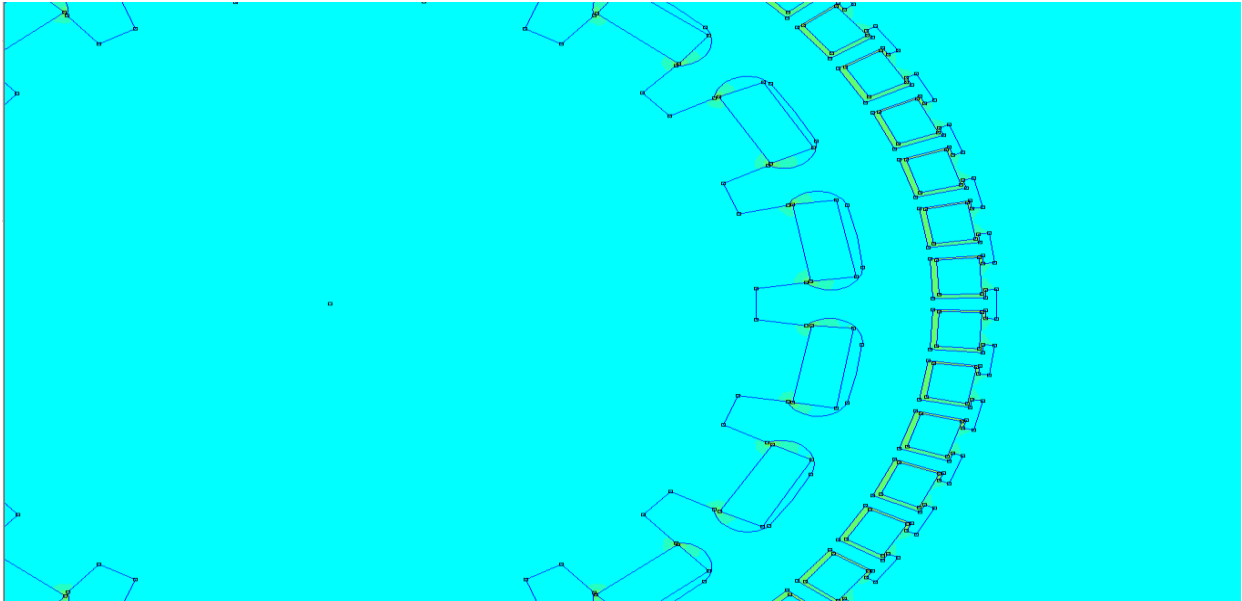


Σχήμα 3.19 Γραφική παράσταση της πυκνότητας θερμορροής συναρτήσει της απόστασης.

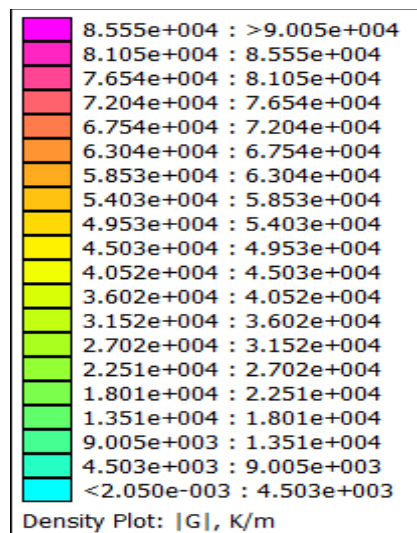
Από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι η πυκνότητα θερμορροής παρουσιάζει υψηλές τιμές στις περιοχές γύρω των χάλκινων τυλιγμάτων. Ειδικότερα στα εξωτερικά τυλίγματα του στάτη φαίνεται να φτάνει την μέγιστη τιμή της. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα τυλίγματα έχουν υψηλότερη

Θερμοκρασία από το στάτη και το περιβάλλον με αποτέλεσμα να έχουμε ροή θερμότητας προς αυτά. Στο υπόλοιπο σώμα παρατηρούμε μικρή ροή θερμότητας, που έχει ως συνέπεια την μικρή μεταβολή θερμοκρασίας στο εσωτερικό του στάτη. Ο κυριότερος παράγοντας για το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι οι θερμικές ιδιότητες του υλικού του στάτη όπως αναφέραμε και πιο πάνω.

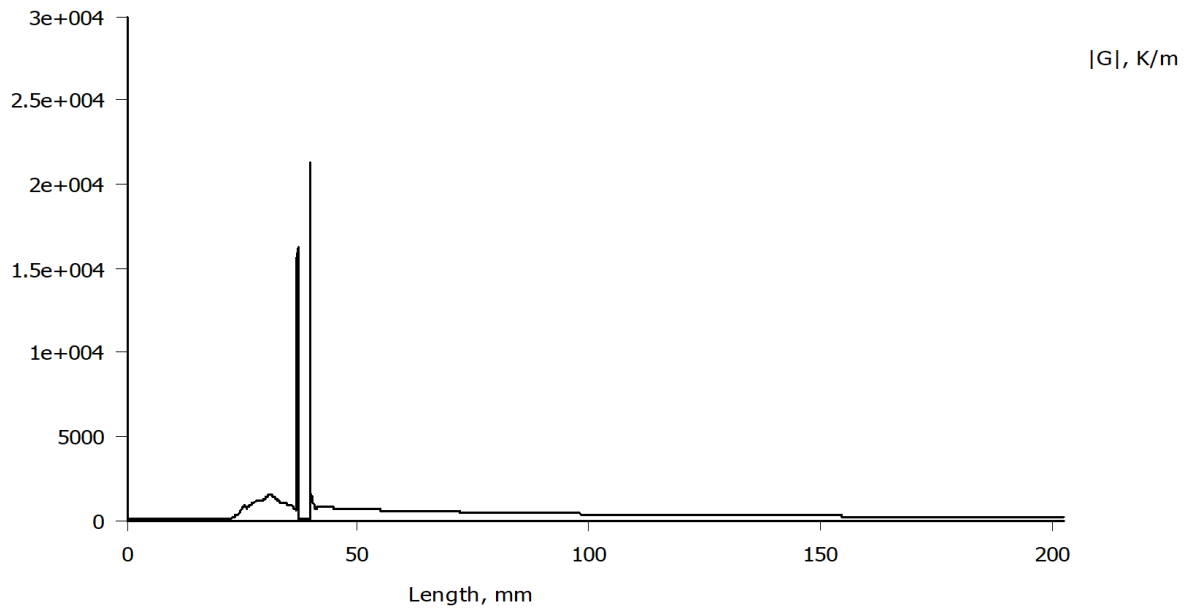
Τέλος, παρουσιάζεται η παράγωγος θερμοκρασίας. Η παράγωγος της θερμοκρασίας είναι μια φυσική ποσότητα που περιγράφει σε ποια κατεύθυνση και με ποιο ρυθμό η θερμοκρασία μεταβάλλεται ταχύτερα γύρω από μια συγκεκριμένη θέση. Ακολούθως παρουσιάζονται οι κατανομές παραγώγου της θερμότητας, δηλαδή το πόσο γρήγορα μεταβάλλεται η θερμοκρασία στο εσωτερικό της μηχανής:



Σχήμα 3.20 Κατανομή της μεταβολή της θερμοκρασίας στην κάθετη τομή.



Σχήμα 3.21 Υπόμνημα μεταβολής της θερμοκρασίας.



Σχήμα 3.22 Γραφική παράσταση μεταβολής της θερμοκρασίας με βάση την απόσταση.

Από το πιο πάνω σχήμα και το διάγραμμα είναι εμφανές ότι ιδιαίτερη μεταβολή της θερμοκρασίας υπάρχει μόνο στις περιοχές του στάτη όπου υπάρχει αέρας και συγκεκριμένα στο διάκενο και στον αέρα που περιβάλλει τα πηνία του στάτη. Αυτό συμβαίνει λόγω της μονωτικής ικανότητας του αέρα και του έντονου θερμικού πεδίου στα χάλκινα τυλίγματα του στάτη.

3.6 Τρισδιάστατη θερμική ανάλυση

Στην παρούσα παράγραφο θα ασχοληθούμε με την μεταβατική θερμική ανάλυση του στάτη σε τρεις διαστάσεις με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Με την μεταβατική θερμική ανάλυση, θα υπολογιστούν οι θερμοκρασίες και άλλες θερμικές ποσότητες που ποικίλουν με την πάροδο του χρόνου, με αποτέλεσμα να έχουμε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για την θερμική συμπεριφορά του στάτη, σε αντίθεση με την δισδιάστατη ανάλυση όπου υπολογίστηκαν μόνο οι τελικές τιμές τους. Για την τρισδιάστατη προσομοίωση θα χρησιμοποιηθεί το εμπορικό λογισμικό ANSYS WORKBENCH.

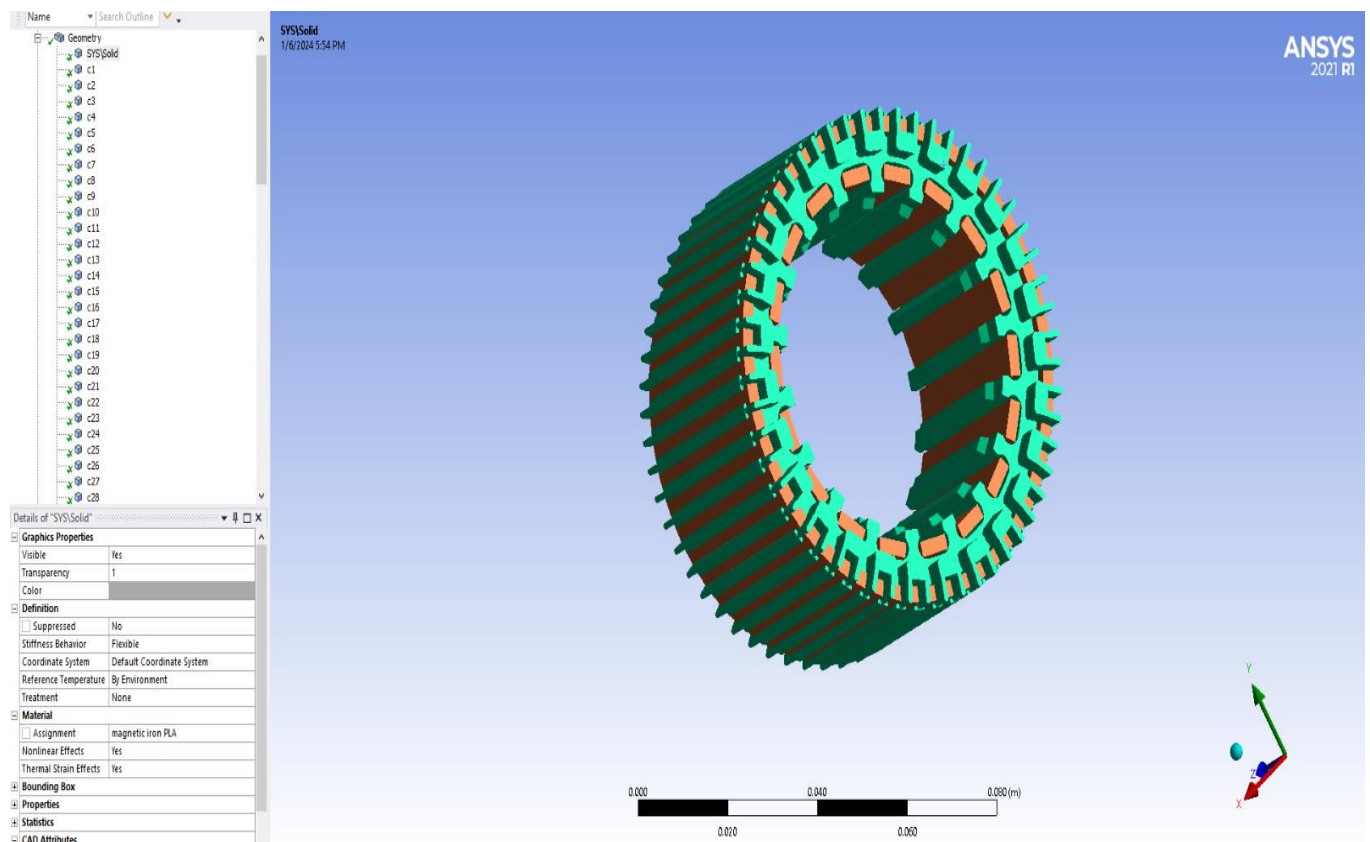
3.6.1 Παρουσίαση του λογισμικού ANSYS WORKBENCH

Η τρισδιάστατη ανάλυση πραγματοποιήθηκε με την χρήση του εργαλείου TRANSIENT THERMAL, το οποίο παρέχεται από την βιβλιοθήκη του λογισμικού ANSYS WORKBENCH. Η θερμική ανάλυση σε τρισδιάστατη μοντελοποίηση, είναι η πιο ακριβής μέθοδος για υπολογισμό της θερμοκρασιακής κατανομής μιας ηλεκτρικής μηχανής. Προβλήματα όπως η έλλειψη της έννοιας του βάθους που προκύπταν στην ανάλυση δύο διαστάσεων, πλέον αντιμετωπίζονται. Επομένως, έχουμε την δυνατότητα να ορίσουμε καλύτερα τα δεδομένα του προβλήματος μας και να συλλέξουμε περισσότερα αποτελέσματα για την θερμική συμπεριφορά του μοντέλου μας. Επιπροσθέτως, το συγκεκριμένο λογισμικό μας δίνει την δυνατότητα να μετρήσουμε την θερμοκρασία σε οποιοδήποτε σημείο του στάτη επιλέξουμε.

Όπως και στη δισδιάστατη ανάλυση αρχικά θα παρουσιάσουμε το σχέδιο του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση και στην συνέχεια τα δεδομένα εισόδου (υλικά στάτη, οριακές συνθήκες, θερμοκρασία περιβάλλοντος και πηγές θερμότητας). Ο ορισμός των παραπάνω στοιχείων εισόδου θα γίνει σύμφωνα με τις υποπαραγράφους 3.4.2 , 3.4.3 και 3.4.4 . Τέλος, θα δείξουμε το πλέγμα του στάτη που προέκυψε από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.[27]

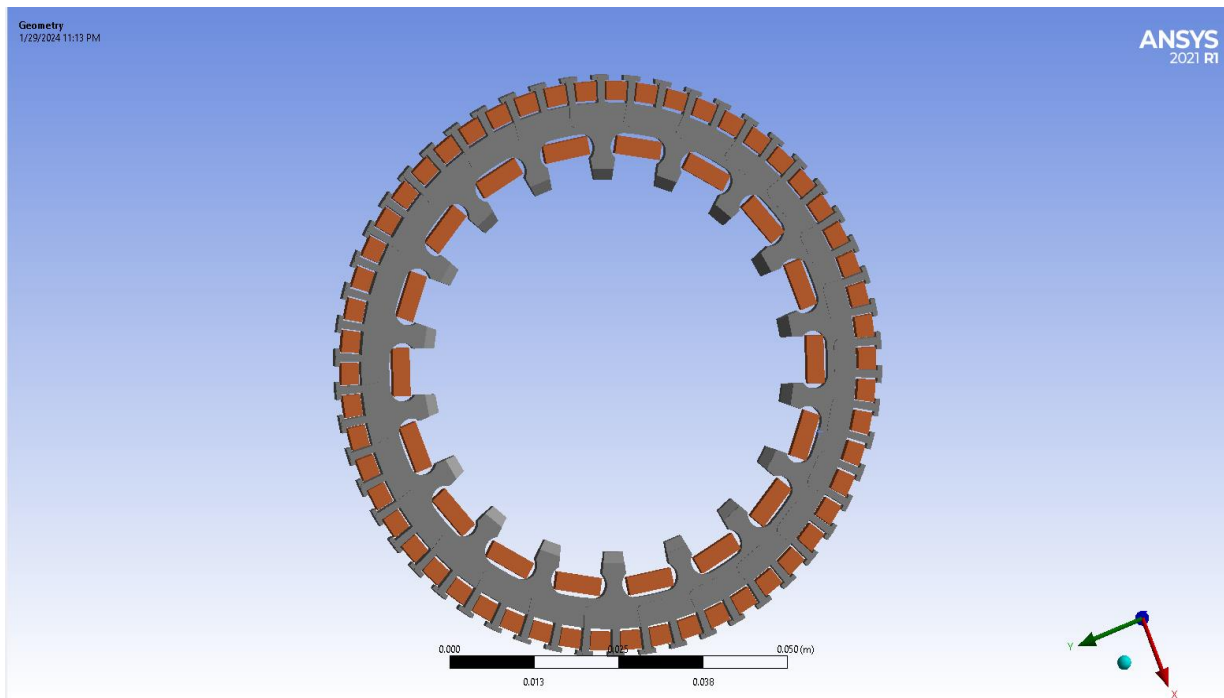
3.6.2 Εισαγωγή στοιχείων στην τρισδιάστατη προσομοίωση

Η γεωμετρία του μοντέλου που εισάχθηκε στο εργαλείο TRANSIENT THERMAL φαίνεται στα επόμενα σχήματα :



Σχήμα 3.23 Η γεωμετρία του μοντέλου στο ANSYS Workbench.

Στην παρακάτω εικόνα , όπου παρουσιάζεται η κάτοψη του μοντέλου, τα χάλκινα τυλίγματα του στάτη διακρίνονται με πορτοκαλί χρώμα και ο πυρήνας του στάτη είναι γκρι [28]:



Σχήμα 3.24 Η κάτοψη του σάτη.

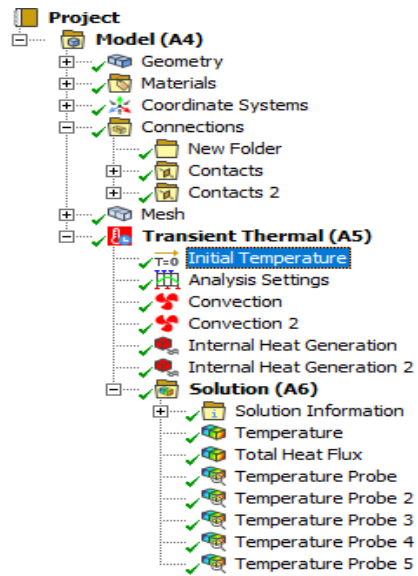
Τα υλικά του μοντέλου του σάτη μαζί με τις θερμικές ιδιότητες τους :

| | A | B | C | D | E |
|---|----------------------------------|---|---|---------|-------------|
| 1 | Contents of Engineering Data | | | Source | Description |
| 2 | Material | | | | |
| 3 | Air | | | Fluid | |
| 4 | Copper | | | Thermal | |
| 5 | magnetic iron PLA | | | C:V | |
| * | Click here to add a new material | | | | |

| Properties of Outline Row 5: magnetic iron PLA | | | | | |
|--|---|--------|------------------------------------|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | Property | Value | Unit | | |
| 2 | Material Field Variables | Table | | | |
| 3 | Density | 1850 | kg m ⁻³ | | |
| 4 | Melting Temperature | 155 | C | | |
| 5 | Isotropic Thermal Conductivity | 0.2943 | W m ⁻¹ K ⁻¹ | | |
| 6 | Specific Heat Constant Pressure, C _p | 2050 | J kg ⁻¹ K ⁻¹ | | |

Σχήμα 3.25 Εισαγωγή των υλικών.

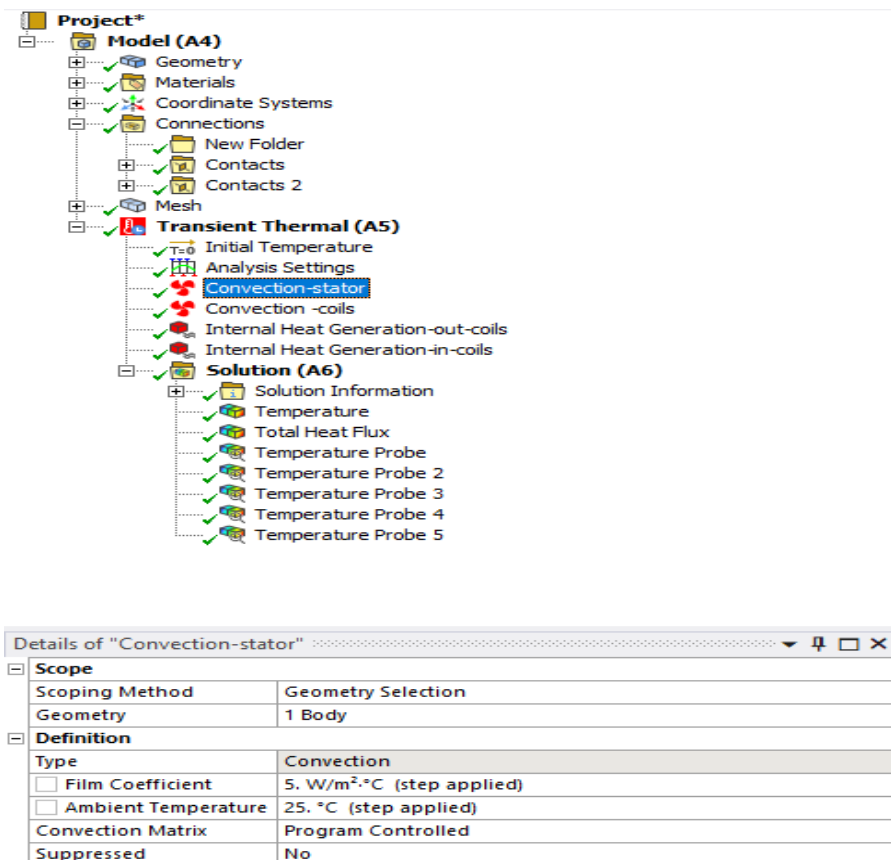
Η οριακές συνθήκες και τα φαινόμενα της συναγωγής του μοντέλου ορίστηκαν στην συνέχεια :



Details of "Initial Temperature"

| Definition | |
|---------------------------|---------------------|
| Initial Temperature | Uniform Temperature |
| Initial Temperature Value | 25. °C |

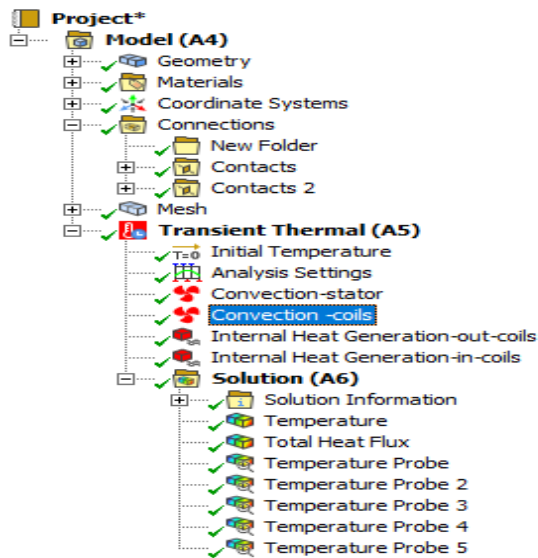
Σχήμα 3.26 Αρχική θερμοκρασία



Details of "Convection-stator"

| Scope | |
|--|--|
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | 1 Body |
| Definition | |
| Type | Convection |
| <input type="checkbox"/> Film Coefficient | 5. W/m ² .°C (step applied) |
| <input type="checkbox"/> Ambient Temperature | 25. °C (step applied) |
| Convection Matrix | Program Controlled |
| Suppressed | No |

Σχήμα 3.27 Εισαγωγή συναγωγής μεταξύ στάτη και αέρα.

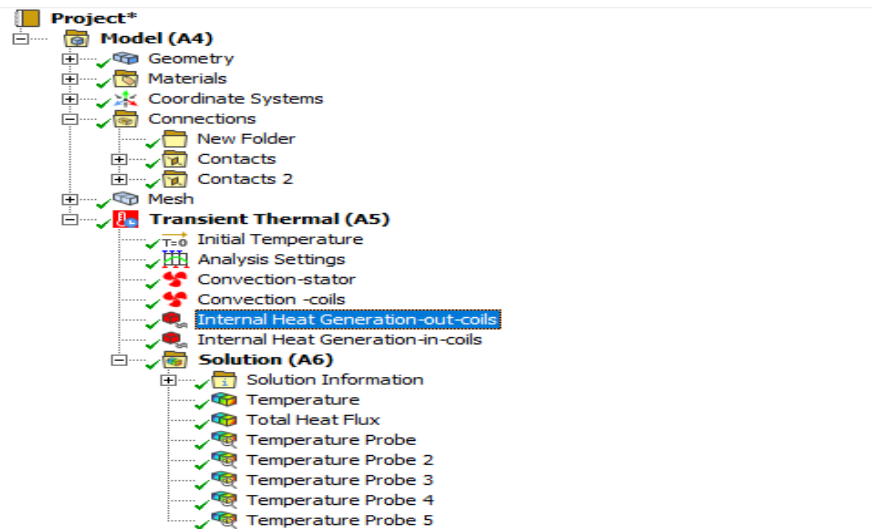


Details of "Convection -coils"

| | |
|--|--|
| Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | 72 Bodies |
| Definition | |
| Type | Convection |
| <input type="checkbox"/> Film Coefficient | 2. W/m ² .°C (step applied) |
| <input type="checkbox"/> Ambient Temperature | 25. °C (step applied) |
| Convection Matrix | Program Controlled |
| Suppressed | No |

Σχήμα 3.28 Εισαγωγή συναγωγής μεταξύ τυλιγμάτων και αέρα.

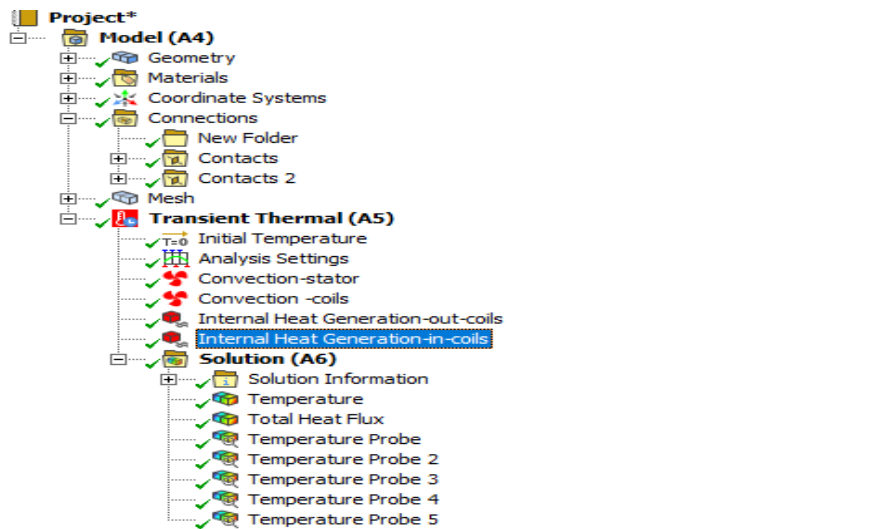
Οι πηγές θερμότητας αποτελούν το τελευταίο δεδομένο που πρέπει να εισάγουμε. Στην παράγραφο 3.4.4 αναφέραμε ότι οι απώλειες χαλκού θα διαχωριστούν στα εσωτερικά και εξωτερικά τυλίγματα του στάτη. Έτσι, στο τρισδιάστατο μοντέλο θα υπάρχουν δύο πηγές θερμότητας. Η πρώτη θα αντιστοιχεί στα εξωτερικά τυλίγματα του στάτη, ενώ η δεύτερη στα εσωτερικά. Η εισαγωγή των πηγών θερμότητας φαίνεται παρακάτω :



Details of "Internal Heat Generation-out-coils"

| | |
|------------------------------------|---|
| Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | 54 Bodies |
| Definition | |
| Type | Internal Heat Generation |
| <input type="checkbox"/> Magnitude | 8.87e+005 W/m ³ (step applied) |
| Suppressed | No |

Σχήμα 3.29 Η παραγόμενη θερμότητα στα εξωτερικά τυλίγματα του σάτη.

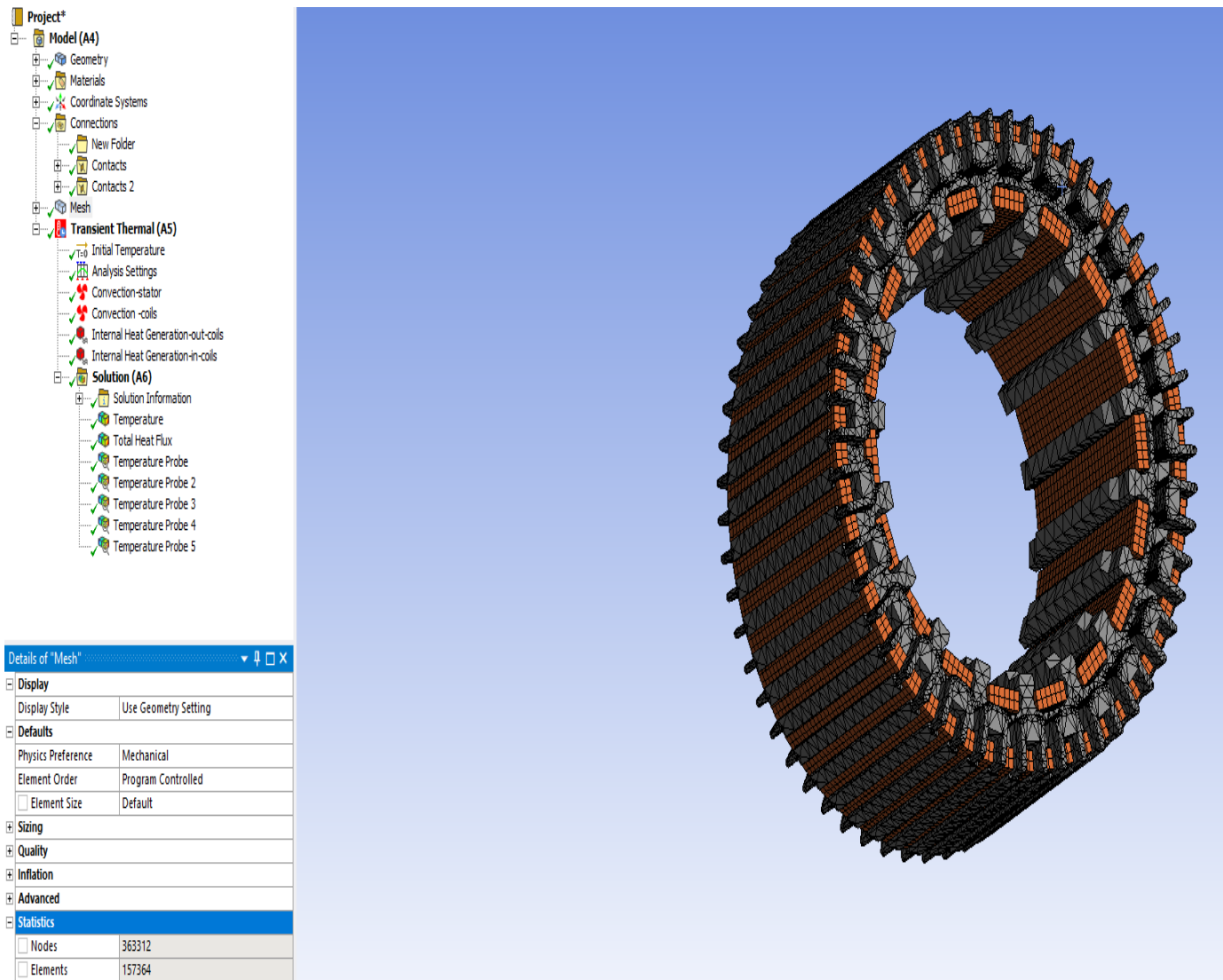


Details of "Internal Heat Generation-in-coils"

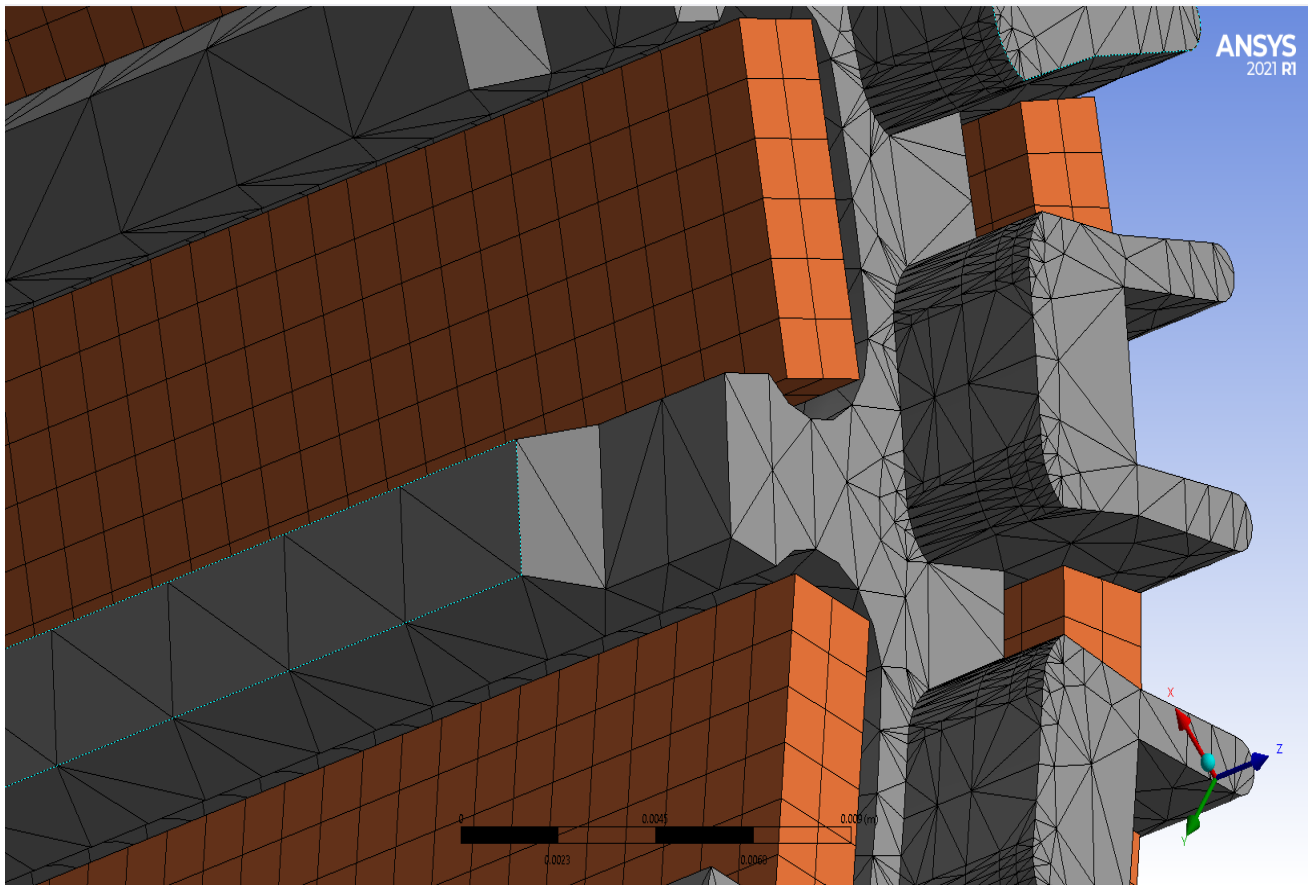
| | |
|------------------------------------|--|
| Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | 18 Bodies |
| Definition | |
| Type | Internal Heat Generation |
| <input type="checkbox"/> Magnitude | 2.4e+005 W/m ³ (step applied) |
| Suppressed | No |

Σχήμα 3.30 Η παραγόμενη θερμότητα στα εσωτερικά τυλίγματα του σάτη.

Αφού καθορίστηκαν τα υλικά και οι ιδιότητες τους, το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων αναλύει το τρισδιάστατο σχέδιο του μοντέλου σε πεπερασμένα στοιχεία. Το πλέγμα που δημιουργήθηκε περιέχει 363312 κόμβους και 157364 στοιχεία. Από σχήμα 3.31 βλέπουμε ότι το πλέγμα είναι αρκετά πυκνό ώστε να διασφαλίσει ακριβή και αποτελεσματική λύση της θερμικής ανάλυσης του στάτη. Επιπλέον, το πλέγμα περιέχει πολύ μεγαλύτερο αριθμό κόμβων και στοιχείων από αυτό της δισδιάστατης ανάλυσης, γεγονός που σημαίνει ότι θα υπάρχει πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων.[28]



Σχήμα 3.31 Δημιουργία πλέγματος του μοντέλου.

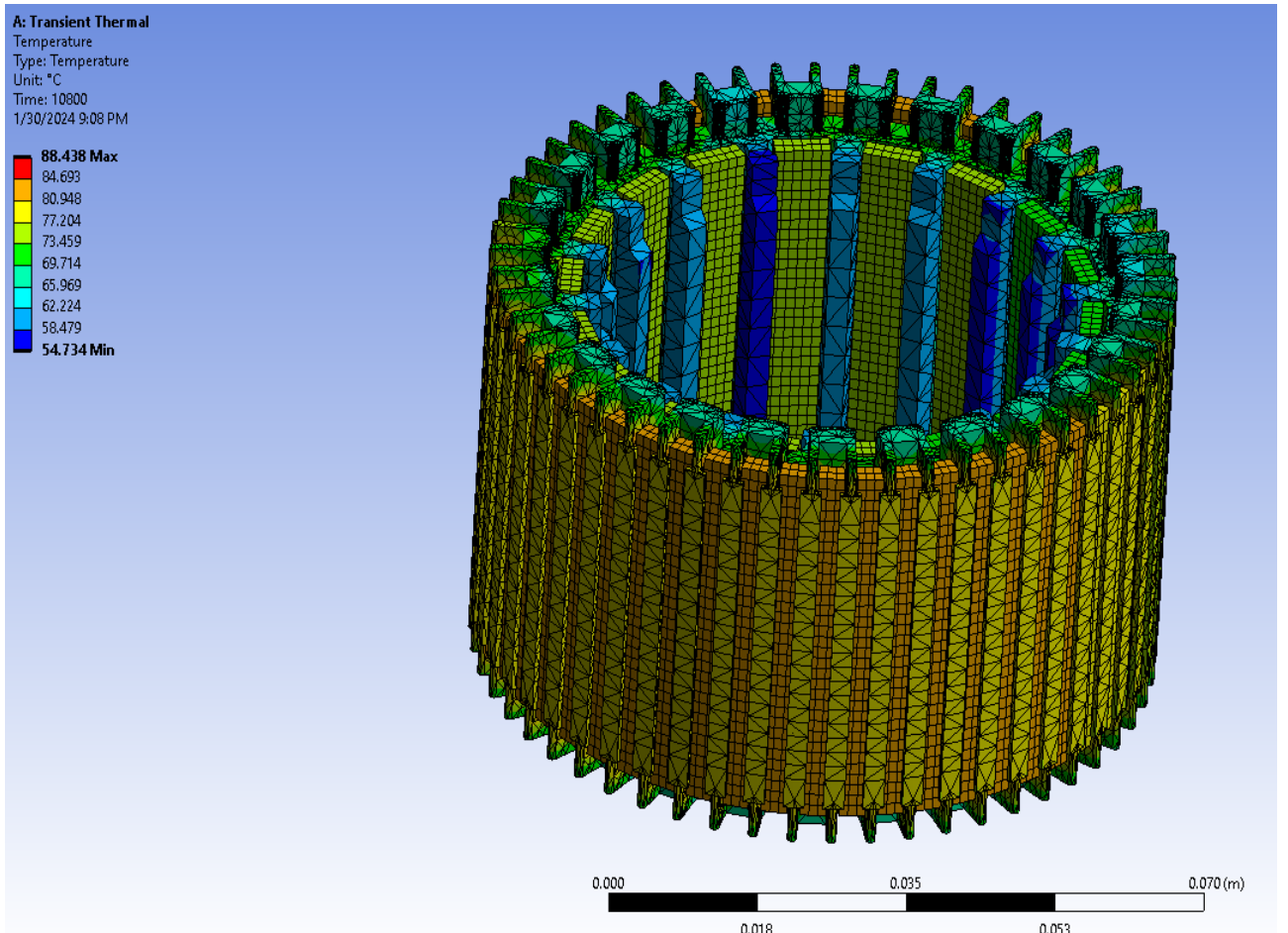


Σχήμα 3.32 Λεπτομέρεια πλέγματος σάτη.

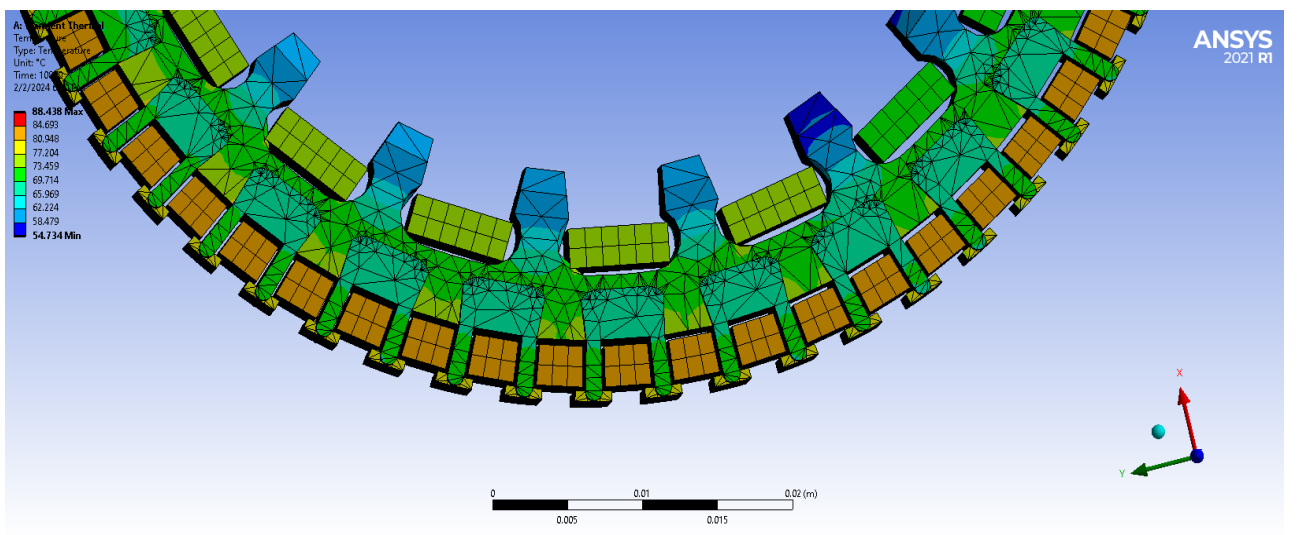
3.6.3 Αποτελέσματα τρισδιάστατης προσομοίωσης

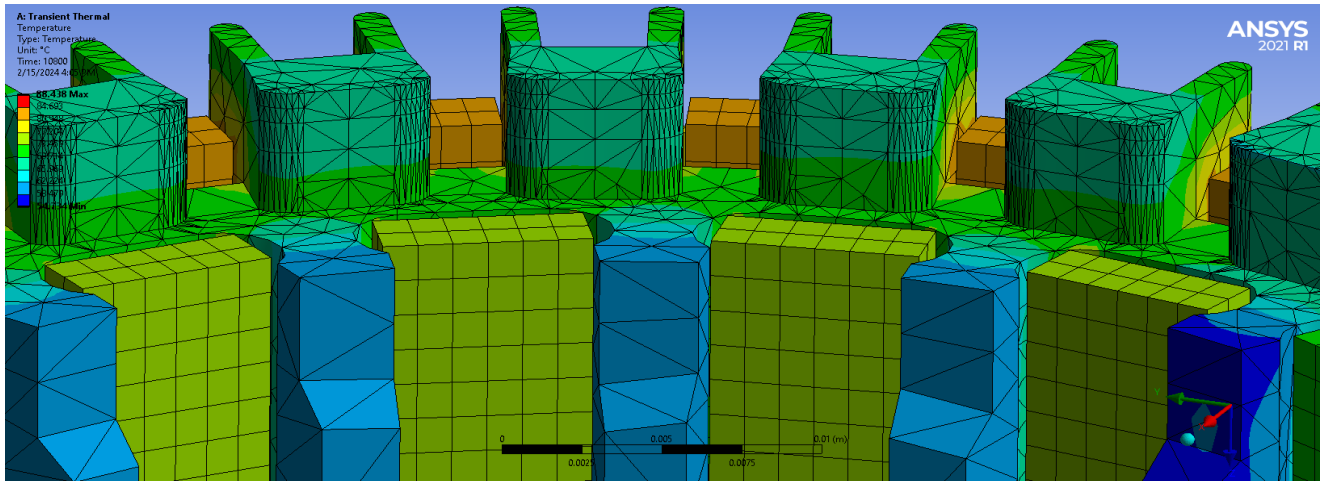
Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης ως προς τον χρόνο σε τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του σάτη του σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών που μελετάμε. Η θερμική προσομοίωση του σάτη έγινε για χρόνο 3 ωρών ($t = 10800 \text{ s}$), ενώ θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της μεταβατικής κατάστασης σε όλα τα μέρη του σε αυτό τον χρόνο.

Κατά την θερμική ανάλυση του σάτη συλλέξαμε πληροφορίες για την θερμική συμπεριφορά του υλικού του και των τυλιγμάτων του. Θα εστιάσουμε στην κατανομή και στην ροή της θερμότητας στο σώμα του σάτη. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας στο σώμα του σάτη μετά το πέρας των τριών ωρών :



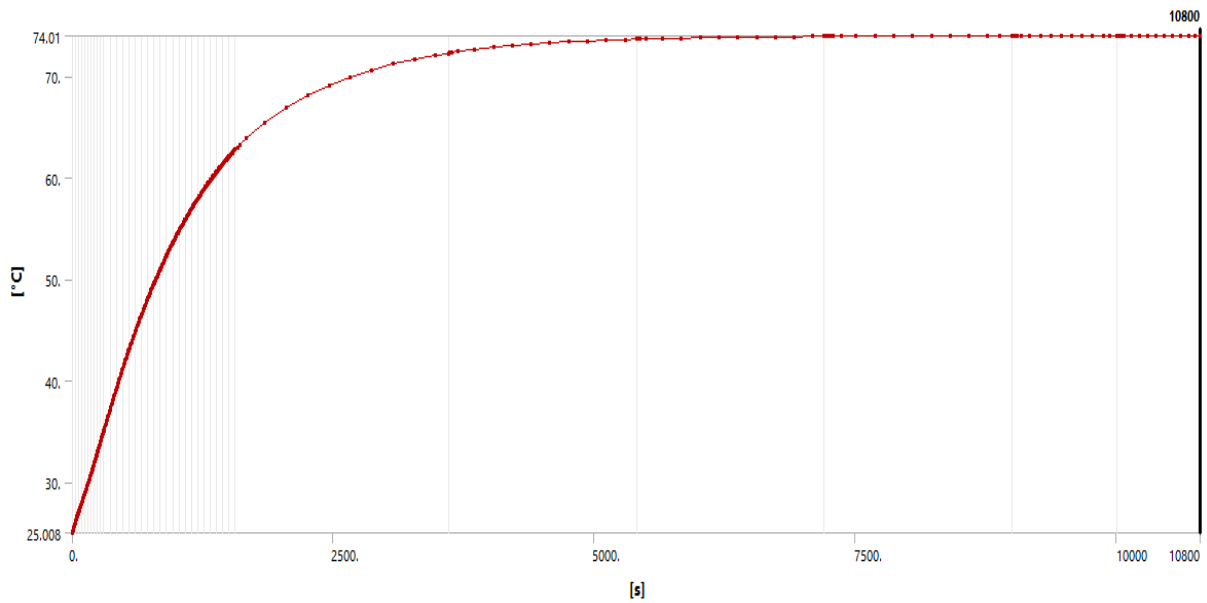
Σχήμα 3.33 Κατανομή θερμοκρασίας στον σάτη.



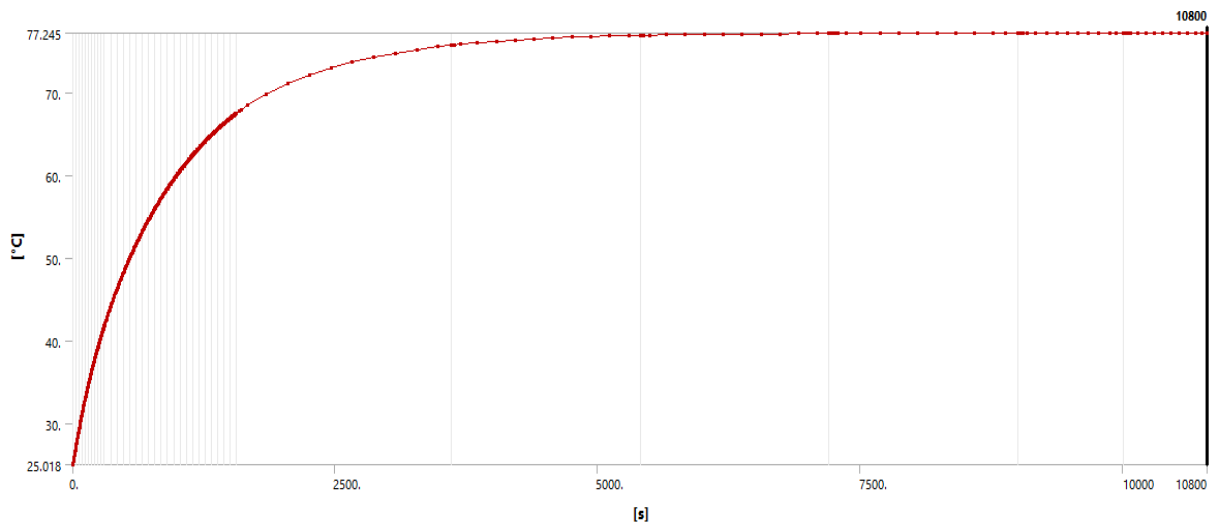


Σχήμα 3.34 Λεπτομέρεια κάτοψης και εσωτερικού του σάτη.

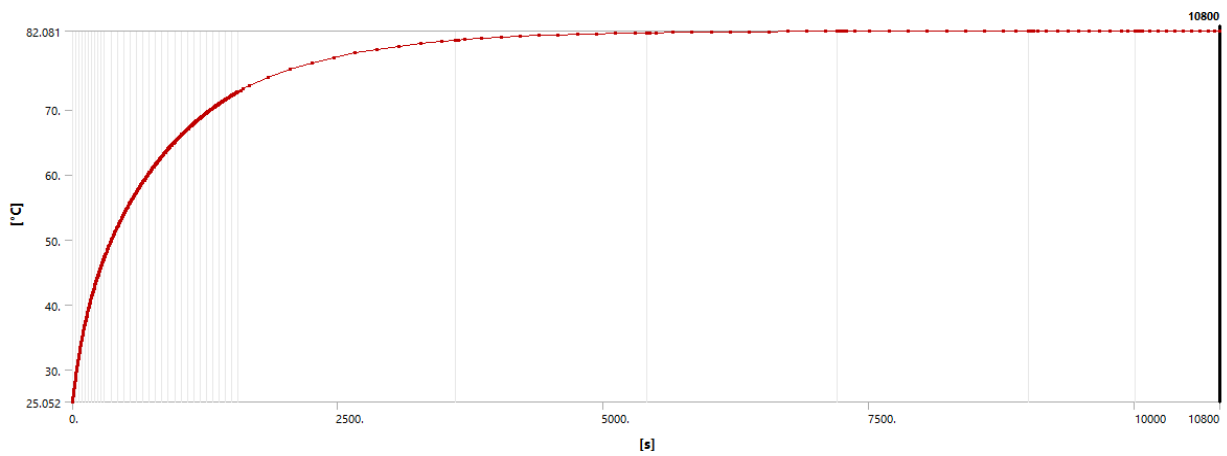
Οι τιμές θερμοκρασίας που λαμβάνουν τα διάφορα μέρη του σάτη την χρονική στιγμή $t = 10800$ s, φαίνονται στο υπόμνημα του παραπάνω σχήματος. Για να αποκτήσουμε μια πιο καθαρή εικόνα για θερμική συμπεριφορά του μοντέλου, θα παραθέσουμε γραφικές παραστάσεις με την μεταβατική θερμική κατάσταση πέντε διαφορετικών σημείων του σάτη :



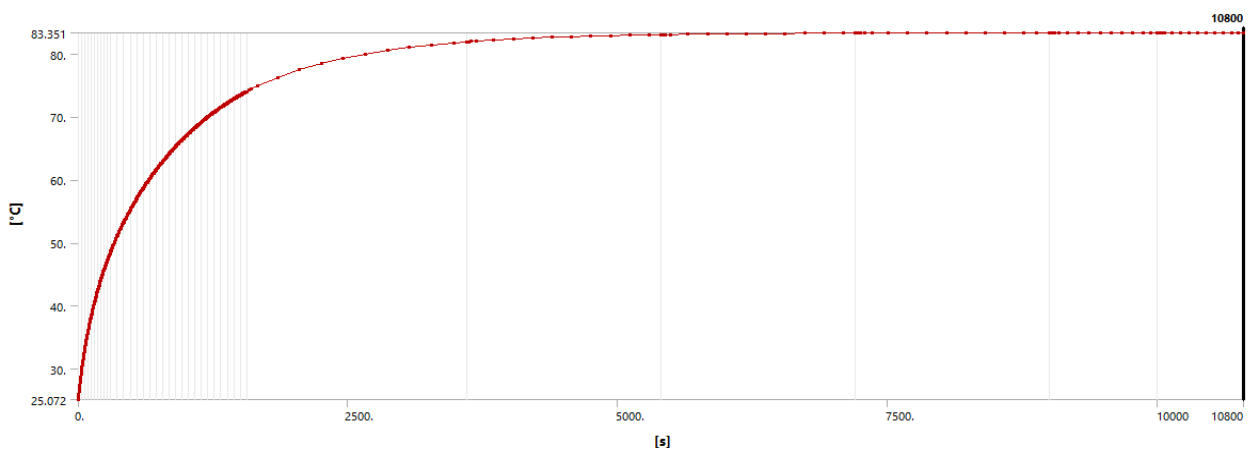
Σχήμα 3.35 Θερμοκρασία εσωτερικών τοιχωμάτων σάτη.



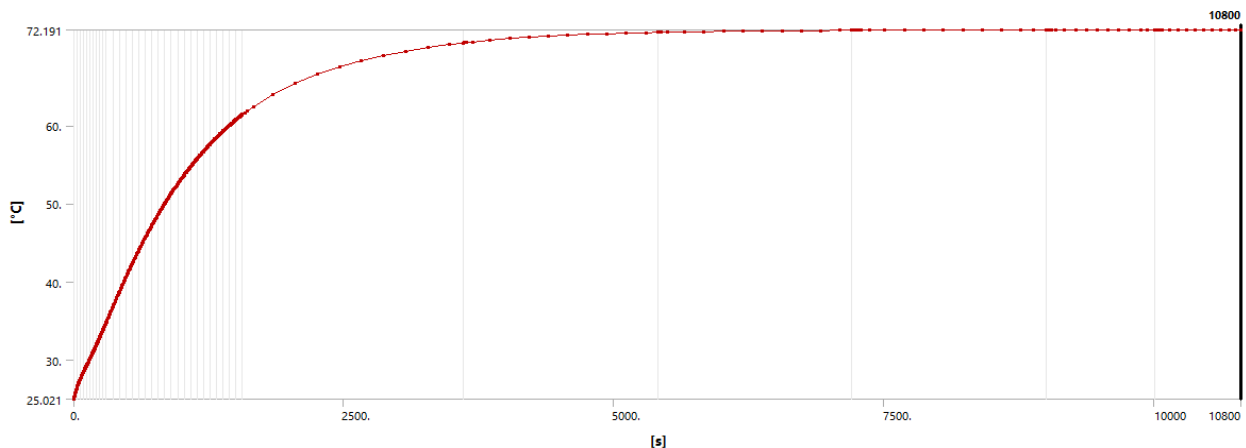
Σχήμα 3.36 Θερμοκρασία εξωτερικών τοιχωμάτων σάτη.



Σχήμα 3.37 Θερμοκρασία κεφαλής σάτη (48.6 mm).



Σχήμα 3.38 Θερμοκρασία εξωτερικών τυλιγμάτων του σάτη.



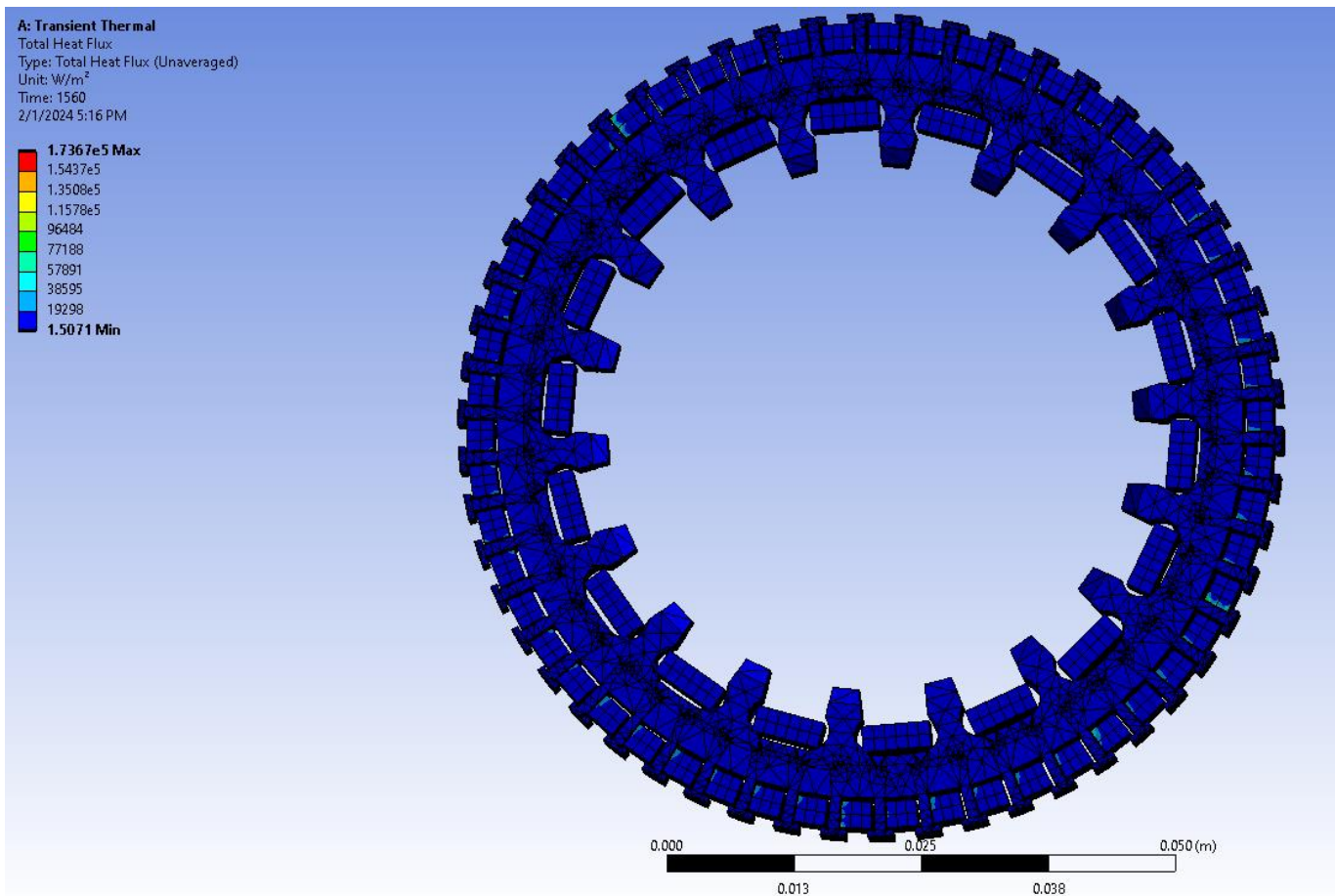
Σχήμα 3.39 Θερμοκρασία εσωτερικών τυλιγμάτων του στάτη.

Έτσι, από τα σχήματα 3.34, 3.33 και τις γραφικές παραστάσεις μπορούμε να καταλήξουμε σε πιο ολοκληρωμένα συμπεράσματα. Αρχικά παρατηρούμε, ότι σε χρόνο τριών ωρών η θερμοκρασία στα μέρη του στάτη έχει σχεδόν σταθεροποιηθεί. Μέχρι την χρονική στιγμή $t = 1500 \text{ s}$, ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας είναι υψηλός, γεγονός που οφείλεται στους μικρούς συντελεστές συναγωγής. Μετά το συγκεκριμένο χρονικό σημείο ο ρυθμός πέφτει και η θερμοκρασία αρχίζει και ομαλοποιείται. Όπως και στη δισδιάστατη προσομοίωση τα εξωτερικά χάλκινα τυλίγματα αποτελούν το πιο θερμό μέρος του στάτη, με τελική θερμοκρασία τους $83.351 \text{ }^\circ\text{C}$. Ο πυρήνας του στάτη λαμβάνει μέγιστη τιμή στην κεφαλή του, στους $82.081 \text{ }^\circ\text{C}$, διότι βρίσκεται σε άμεση επαφή με τα εξωτερικά τυλίγματα του. Καθώς απομακρυνόμαστε από τα τυλίγματα η θερμοκρασία του στάτη μειώνεται. Τα εξωτερικά τοιχώματα του λαμβάνουν θερμοκρασία έως τους $77.245 \text{ }^\circ\text{C}$, ενώ τα μέσω τοιχώματα των εσωτερικών αυλακιών έως τους $74.01 \text{ }^\circ\text{C}$. Η ελάχιστη τιμή θερμοκρασίας του στάτη είναι $59.597 \text{ }^\circ\text{C}$ και παρουσιάζεται στις άκρες των εσωτερικών αυλακιών του.

Άξιο σημείο αναφοράς, αποτελεί η σημαντική διαφορά στην θερμοκρασία που παρουσιάζουν τα άκρα του σώματος του πυρήνα του στάτη. Από το θερμότερο μέρος (την κεφαλή του στάτη) ως το πιο ψυχρό (οι άκρες των εσωτερικών αυλακώσεων) σημειώνεται διαφορά της τάξης των $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Σε πραγματικές συνθήκες μπορεί να υπάρξει πρόβλημα στην λειτουργία του κινητήρα. Οι περιοχές που είναι κοντά ή σε επαφή με τα εξωτερικά τυλίγματα έχουν πολύ υψηλότερες τιμές σε σχέση με τον υπόλοιπο στάτη. Προφανώς το πρόβλημα προκύπτει λόγω τις χαμηλής ροής θερμότητας στο υλικό του στάτη. Αν το magnetic iron pla εμφάνιζε μεγαλύτερο συντελεστή αγωγιμότητας, η θερμότητα από τις απώλειες χαλκού θα διαμοιραζόταν πιο ομοιόμορφα στο εσωτερικό του στάτη.

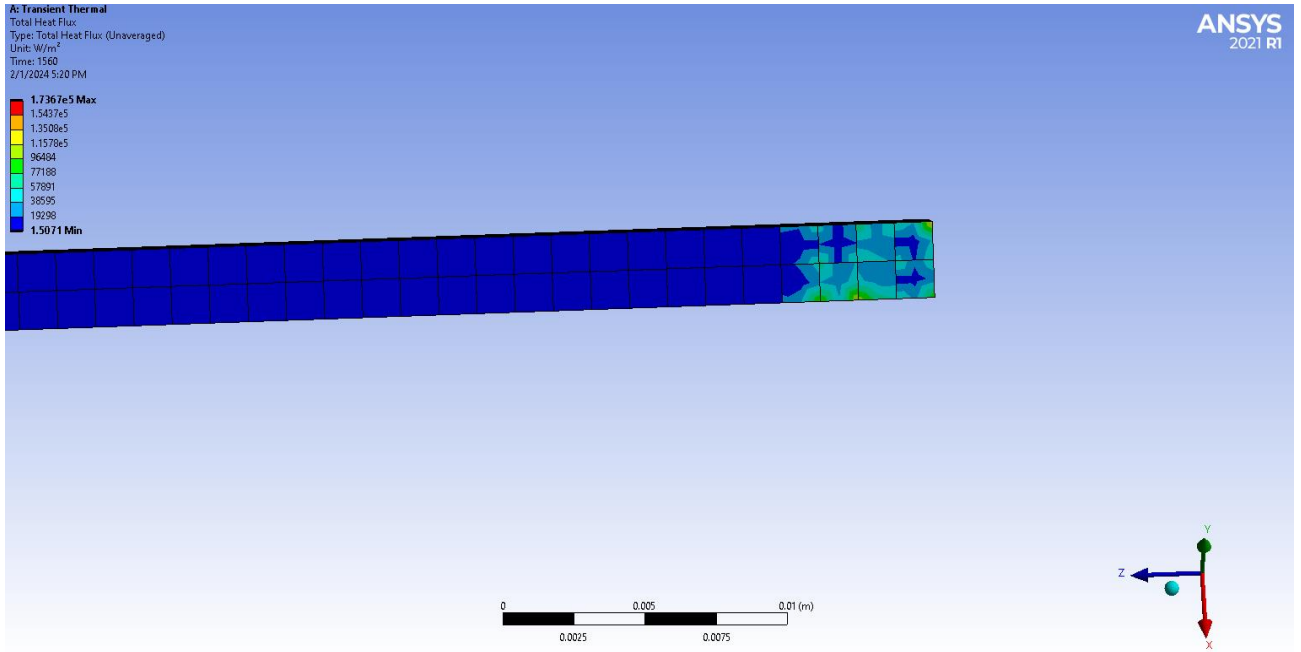
Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι ο στάτης λειτουργεί με θερμοκρασία αρκετά κάτω των $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Τα τυλίγματα του στάτη αποτελούνται από χαλκό κλάσης H, ο οποίος έχει όριο λειτουργίας τους $180 \text{ }^\circ\text{C}$. Το magnetic iron pla, από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο στάτης διαθέτει σημείο τήξης στους $155 \text{ }^\circ\text{C}$. Ως εκ τούτου η λειτουργία της μηχανής είναι ασφαλής ως προς τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες στο εσωτερικό της.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η πυκνότητα θερμορροής του μοντέλου :

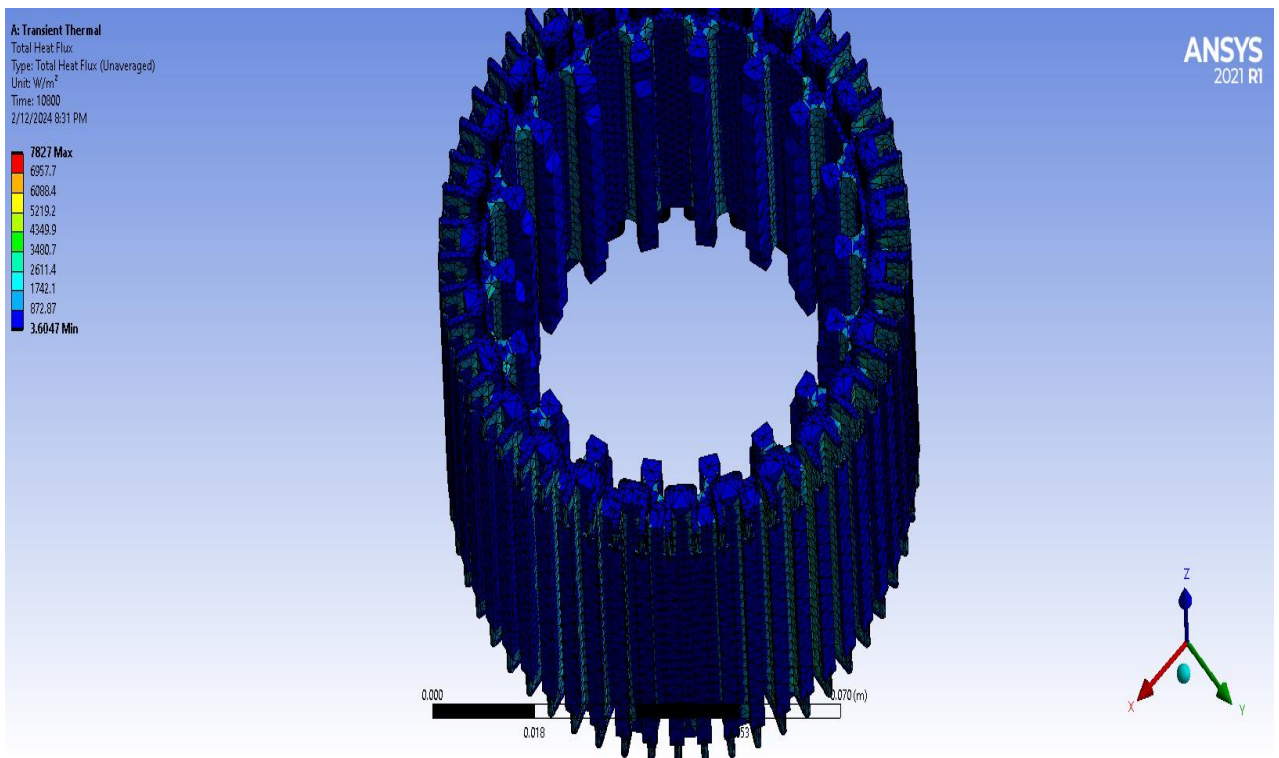


Σχήμα 3.40 Πυκνότητα θερμορροής στον σάτη.

Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης παρατηρούμε ότι η πυκνότητα θερμορροής στο μεγαλύτερο κομμάτι του σάτη διατηρείται σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Παρόλα αυτά, εντοπίζεται τεράστια αύξηση της τιμής της στις γωνίες των εξωτερικών τυλιγμάτων του σάτη, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.41. Τα χάλκινα καλώδια αποτελούν πολύ μεγάλη πηγή θερμότητας, αυξάνοντας απότομα και σε μεγάλο βαθμό την θερμοκρασία στις γύρω περιοχές του σάτη. Το υπόλοιπο σώμα διατηρεί αρκετά χαμηλές τιμές θερμορροής, λόγω του μικρού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που εμφανίζει το υλικό του σάτη. Επομένως, εντοπίζεται σημαντική διαφορά στις θερμοκρασίες των σημείων του σάτη, ανάλογα από την απόσταση τους με τα εξωτερικά τυλίγματα. Στο σχήμα 3.42 βλέπουμε την ροή θερμότητας μόνο στον πυρήνα του σάτη. Οι περιοχές κοντά στα τυλίγματα υψηλότερες τιμές θερμορροής σε σχέση με το υπόλοιπο σώμα. Οι απώλειες χαλκού παράγουν μεγάλα ποσά θερμότητας με αποτέλεσμα να δημιουργείται μεγάλο κανάλι ροής σε εκείνες τις περιοχές.



Σχήμα 3.41 Λεπτομέρεια πυκνότητας θερμορροής στα τυλίγματα του στάτη.



Σχήμα 3.42 Πυκνότητα θερμορροής στο πυρήνα του στάτη.

3.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων δισδιάστατης και τρισδιάστατης προσομοίωσης

Με την ολοκλήρωση των δύο αναλύσεων , έχουμε συλλέξει αρκετές πληροφορίες για την θερμική συμπεριφορά του στάτη του σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών. Στον πιο κάτω πίνακα βλέπουμε την σύνοψη των αποτελεσμάτων της θερμικής ανάλυσης στην μόνιμη κατάσταση της σύγχρονης μηχανής που μελετιέται με χρήση των προγραμμάτων FEMM και ANSYS Workbench.

| Περιοχή στάτη | Τιμή θερμοκρασίας 2D (°C) | Τιμή θερμοκρασίας 3D (°C) |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Εξωτερικό τύλιγμα στάτη | 86.448 | 83.351 |
| Εσωτερικό τύλιγμα στάτη | 77.283 | 72.191 |
| Εξωτερικό τοίχωμα πυρήνα | 82.131 | 77.245 |
| Εσωτερικό τοίχωμα πυρήνα | 78.205 | 74.01 |

Πίνακας 3.4 Σύγκριση τελικής θερμοκρασίας των δύο αναλύσεων.

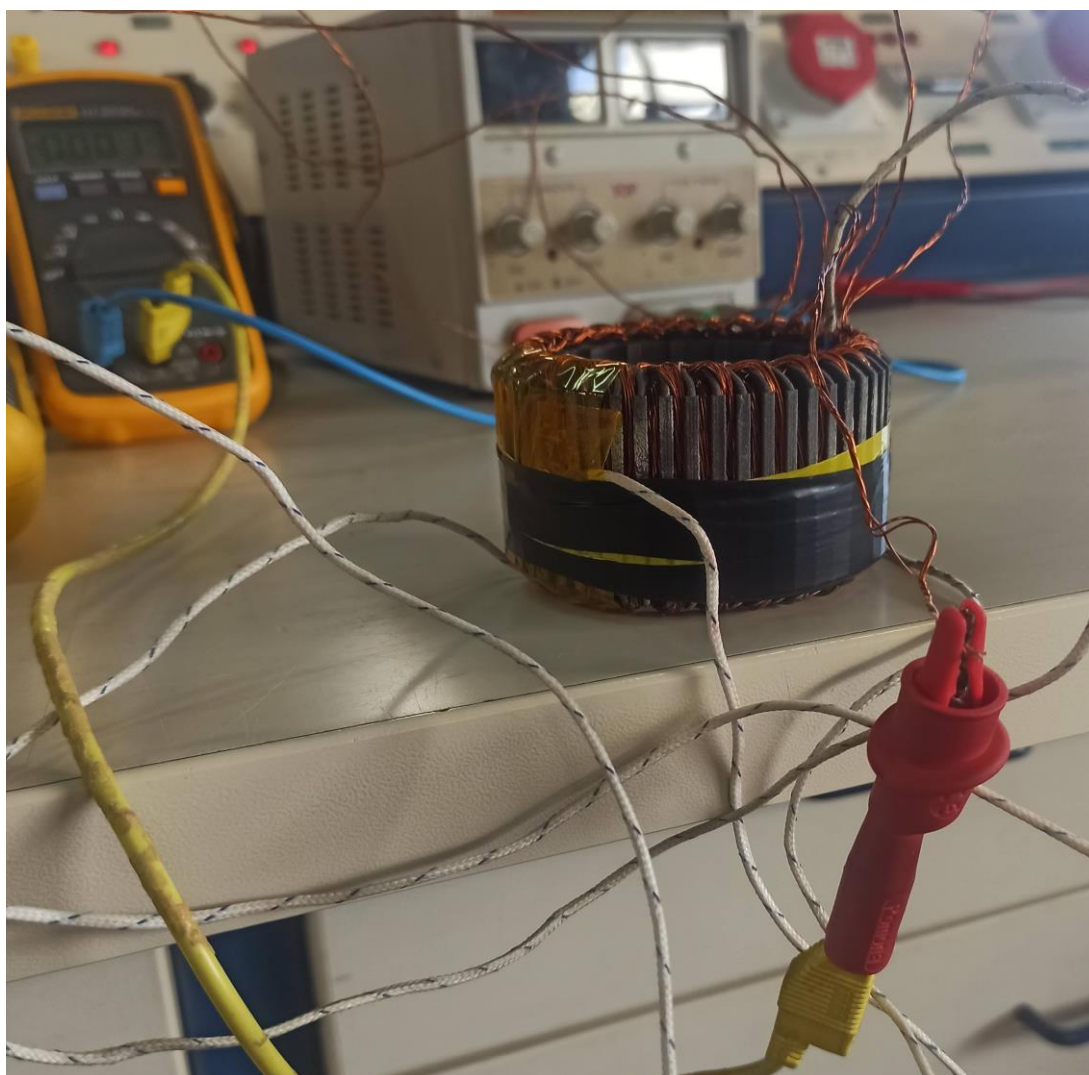
| Περιοχή στάτη | Ποσοστό απόκλισης θερμοκρασίας 2D-3D |
|--------------------------|--------------------------------------|
| Εξωτερικό τύλιγμα στάτη | 3.58 % |
| Εσωτερικό τύλιγμα στάτη | 6.89% |
| Εξωτερικό τοίχωμα πυρήνα | 5.95% |
| Εσωτερικό τοίχωμα πυρήνα | 5.36% |

Πίνακας 3.5 Ποσοστό απόκλισης θερμοκρασιών των δύο αναλύσεων

Το πρώτο συμπέρασμα που αξίζει να σχολιάσουμε είναι ότι για τις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα, μέσω της θερμικής ανάλυσης που έγινε με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, ότι δεν υπάρχει πρόβλημα ως προς την θερμοκρασία για όλα τα στοιχεία του στάτη. Οι θερμοκρασίες και στις δύο αναλύσεις σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της μηχανής, απέχουν αρκετά από το όριο των 100 °C . Το δεύτερο συμπέρασμα από την εξέταση του πίνακα 3.4, είναι η σχετικά μικρή απόκλιση των θερμοκρασιών των δύο προσομοιώσεων. Στα δύο μοντέλα η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στα εξωτερικά και εσωτερικά τοιχώματα κυμαίνεται μέχρι τους 4°C . Η δισδιάστατη ανάλυση παρουσιάζει λίγο μεγαλύτερες τιμές θερμοκρασίας σε κάθε σώμα του στάτη από την τρισδιάστατη. Η μέγιστη διαφορά εντοπίζεται στα εσωτερικά τυλίγματα του στάτη ($\Delta T = 5.092 \text{ } ^\circ\text{C}$). Οι μικρές αποκλίσεις αυτές οφείλονται στις προφανείς διαφορές στις γεωμετρίες των δύο μοντέλων καθώς και στις παραμέτρους που παραλείπονται στην δισδιάστατη ανάλυση. Οι παραπάνω παρατηρήσεις επαληθεύονται και από τον Πίνακα 3.5 , όπου αποτυπώνονται οι θερμοκρασιακές αποκλίσεις των δύο προσομοιώσεων . Επομένως, η μέθοδος πεπερασμένων παραμέτρων και στις δύο περιπτώσεις μας προσφέρει αξιόπιστα αποτελέσματα , ενώ μπορεί να δημιουργήσει μια πολύ καλή προσομοίωση για τον υπό μελέτη κινητήρα.

Το συμπέρασμα αυτό θα επαληθευτεί στο επόμενο κεφάλαιο, με την σύγκριση των αποτελεσμάτων της τρισδιάστατης προσομοίωσης με των πειραματικών μετρήσεων.

Κεφάλαιο 4



Πειραματική επιβεβαίωση - Ακρίβεια αποτελεσμάτων

Με την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων είναι σκόπιμο να ελέγξουμε την ορθότητα των αποτελεσμάτων τους. Γι' αυτό το λόγο, στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις, που πραγματοποιήθηκαν στο χώρο του εργαστηρίου, για την λειτουργία του στάτη του 18πολικού κινητήρα μονίμων μαγνητών σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου πραγματοποιείται σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων, με τα θερμικά αποτελέσματα που εξάχθηκαν από την τρισδιάστατη προσομοίωση του στάτη με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.

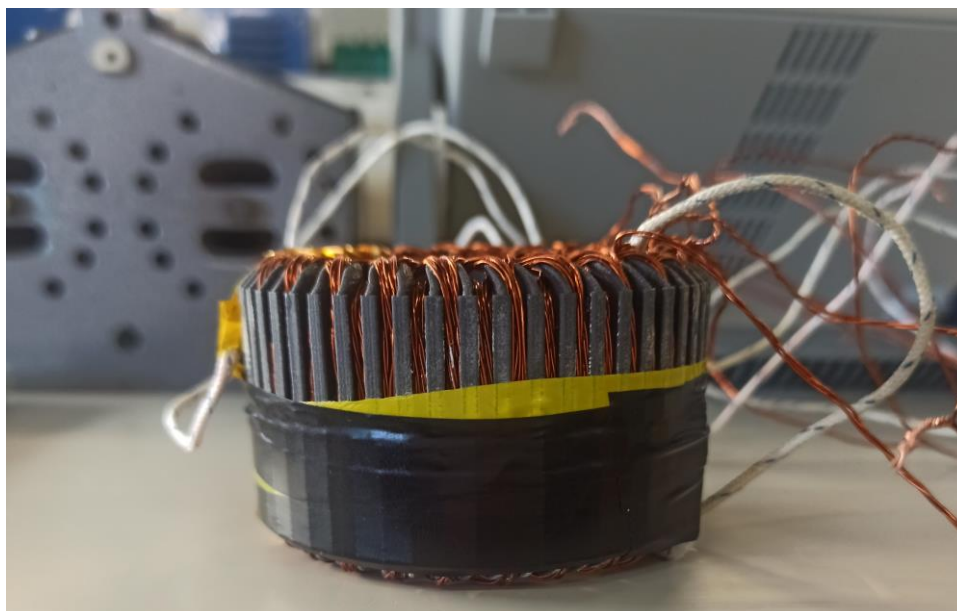
4.1 Πειραματική διάταξη

Η εκτέλεση του πειράματος έλαβε χώρο στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος. Για την πειραματική επιβεβαίωση της θερμικής ανάλυσης του σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών, χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες θερμοκρασίας για λήψη θερμοκρασιών σε τέσσερα σημεία του στάτη. Τα τυλίγματα του στάτη συνδέθηκαν σε σειρά και τροφοδοτήθηκαν με σταθερό ρεύμα. Οι μετρήσεις πάρθηκαν με τη βοήθεια ψηφιακών πολυμέτρων με είσοδο PTC. Τα θερμίστορ PTC (Positive Temperature Coefficient, θετικού συντελεστή θερμοκρασίας) χαρακτηρίζονται από τον υψηλό θετικό συντελεστή θερμοκρασίας δηλαδή από την αύξηση της τιμής της αντίστασης τους με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό βέβαια γίνεται μόνο για ορισμένες περιοχές θερμοκρασίας αφού για άλλες περιοχές ο συντελεστής είναι ή μηδέν ή αρνητικός.[16]

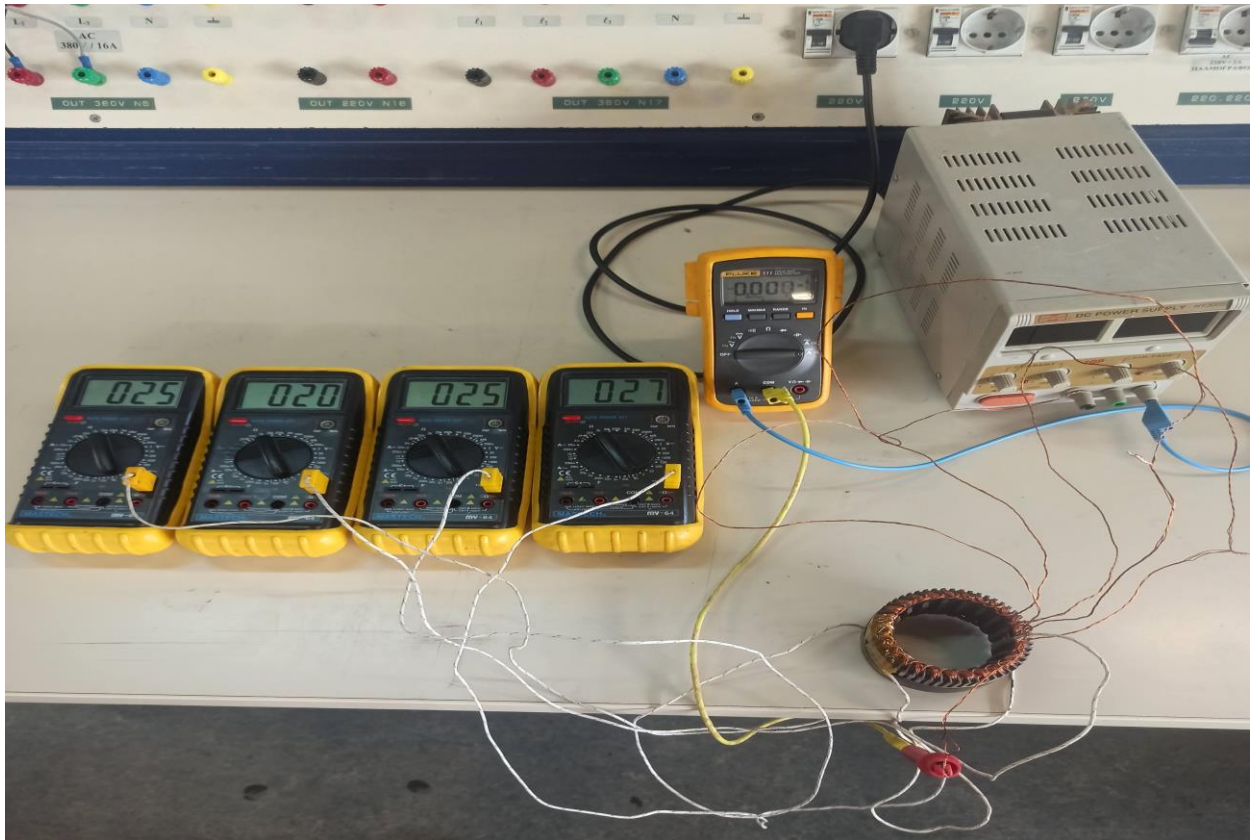
Το ρεύμα που διαρρέει το κάθε τύλιγμα του στάτη ρυθμίστηκε μέσω του τροφοδοτικού και με βοήθεια ρυθμιζόμενων αντιστάσεων ορίστηκε στα 4.934 A. Η τιμή του ρεύματος μετρήθηκε από ένα πέμπτο πολύμετρο. Τα τέσσερα σημεία του στάτη που τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες είναι :

- Εσωτερικό τοίχωμα του πυρήνα του στάτη
- Εξωτερικό τοίχωμα του πυρήνα του στάτη
- Κεφαλή του πυρήνα του στάτη (48.6 mm)
- Κέντρο του εξωτερικού τυλίγματος του στάτη

Η τοποθέτηση των αισθητήρων και η διατήρηση της θέσης τους αποτέλεσε ένα δύσκολο έργο. Η περίπλοκη γεωμετρία του στάτη και η θέρμανση του υλικού του στάτηκαν εμπόδιο στην σωστή εφαρμογή των αισθητήρων για μεγάλο χρονικό διάστημα . Το πείραμα διήρκεσε 26 λεπτά εξαιτίας των παραπάνω επιπλοκών . Επιπλέον, η επαφή του αισθητήρα που είχε τοποθετηθεί στο εξωτερικό τοίχωμα ,χάθηκε στα 15 λεπτά. . Παρακάτω παρατίθενται οι εικόνες για την πειραματική διάταξη.



Σχήμα 4.1 Τοποθέτηση αισθητήρων θερμότητας.



Σχήμα 4.2 Πειραματική διάταξη.



Σχήμα 4.3 Λεπτομέρεια κάτοψης του στάτη.

4.2 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων

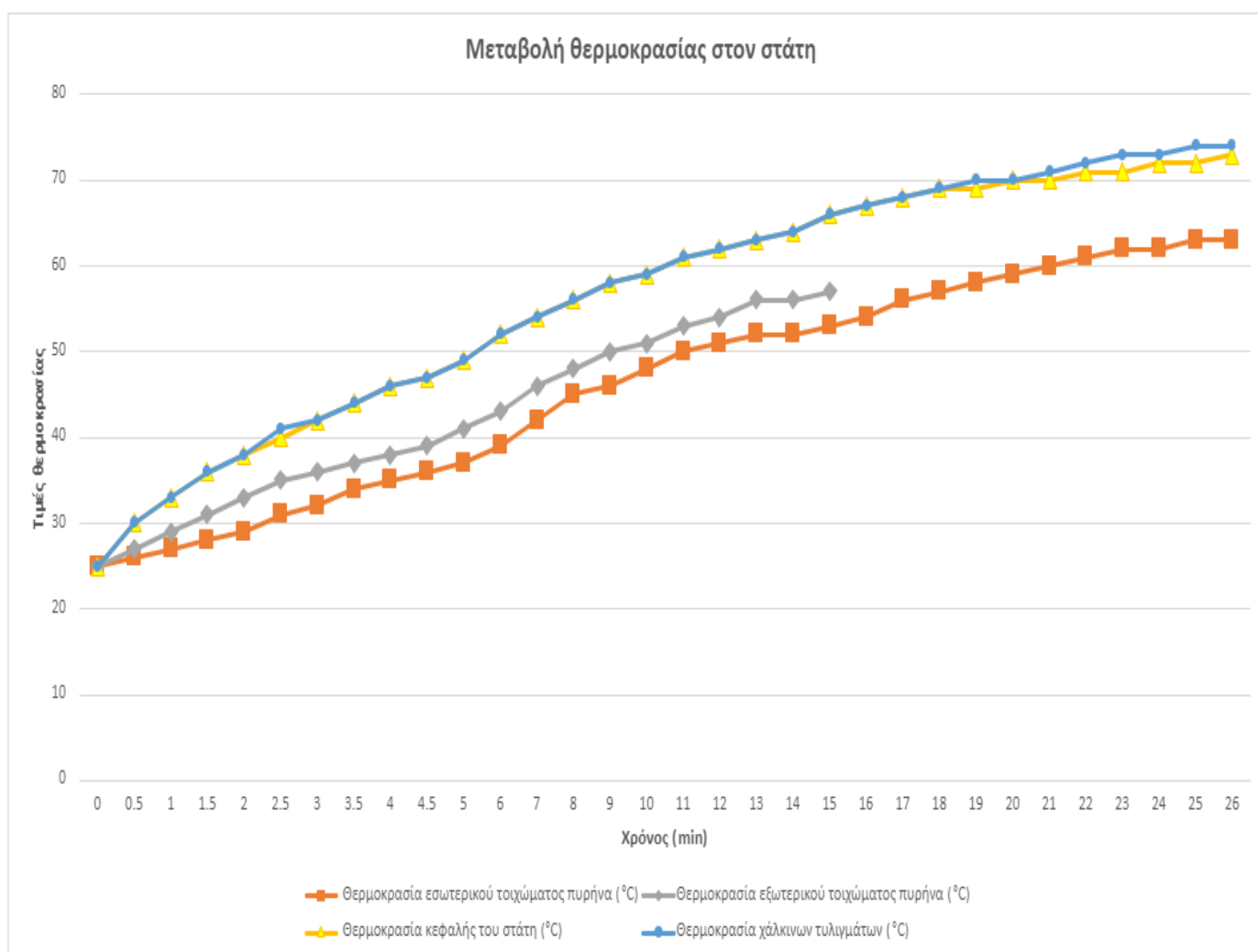
Οι μετρήσεις λήφθηκαν για χρόνο $t=26$ min. Τα πρώτα 5 min οι μετρήσεις γινόντουσαν ανά 30 s , ενώ το υπόλοιπο χρονικό διάστημα καταγράφονταν ανά 1min. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων στα τέσσερα σημεία του σάτη όπως αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα :

| Χρόνος (min) | Θερμοκρασία | | Θερμοκρασία κεφαλής του σάτη (°C) | Θερμοκρασία χάλκινων τυλιγμάτων (°C) |
|--------------|---|---|-----------------------------------|--------------------------------------|
| | Θερμοκρασία εσωτερικού τοιχώματος πυρήνα (°C) | Θερμοκρασία εξωτερικού τοιχώματος πυρήνα (°C) | | |
| 0 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| 0.5 | 26 | 27 | 30 | 30 |
| 1 | 27 | 29 | 33 | 33 |
| 1.5 | 28 | 31 | 36 | 36 |
| 2 | 29 | 33 | 38 | 38 |
| 2.5 | 31 | 35 | 40 | 41 |
| 3 | 32 | 36 | 42 | 42 |
| 3.5 | 34 | 37 | 44 | 44 |
| 4 | 35 | 38 | 46 | 46 |
| 4.5 | 36 | 39 | 47 | 47 |
| 5 | 37 | 41 | 49 | 49 |
| 6 | 39 | 43 | 52 | 52 |
| 7 | 42 | 46 | 54 | 54 |
| 8 | 45 | 48 | 56 | 56 |
| 9 | 46 | 50 | 58 | 58 |
| 10 | 48 | 51 | 59 | 59 |
| 11 | 50 | 53 | 61 | 61 |
| 12 | 51 | 54 | 62 | 62 |
| 13 | 52 | 56 | 63 | 63 |
| 14 | 52 | 56 | 64 | 64 |
| 15 | 53 | 57 | 66 | 66 |
| 16 | 54 | - | 67 | 67 |
| 17 | 56 | - | 68 | 68 |
| 18 | 57 | - | 69 | 69 |
| 19 | 58 | - | 69 | 70 |
| 20 | 59 | - | 70 | 70 |
| 21 | 60 | - | 70 | 71 |
| 22 | 61 | - | 71 | 72 |
| 23 | 62 | - | 71 | 73 |
| 24 | 62 | - | 72 | 73 |

| | | | | |
|----|----|---|----|----|
| 25 | 63 | - | 72 | 74 |
| 26 | 63 | - | 73 | 74 |

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα πειρατικών μετρήσεων.

Από κάτω παρατίθεται η γραφική παράσταση των θερμοκρασιών που μετρήθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος :



Σχήμα 4.4 Σύγκριση θερμοκρασιών τεσσάρων περιοχών του στάτη.

Από το διάγραμμα 4.4 και τον πίνακα 4.1, μπορούμε να συλλέξουμε αρκετές πληροφορίες για την θερμική συμπεριφορά του στάτη. Αρχικά παρατηρούμε ότι τα χάλκινα τυλίγματα αποτελούν το πιο θερμό σημείο του στάτη με τελική θερμοκρασία τους 74°C . Αμέσως θερμότερη περιοχή διαπιστώνουμε πως είναι η κεφαλή του στάτη με τελική θερμοκρασία τους 73°C . Τα δύο αυτά μέρη του στάτη, όπως φαίνεται και στις γραφικές τους παραστάσεις, έχουν σχεδόν πανομοιότυπη συμπεριφορά. Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας στα πρώτα 20 min είναι σχεδόν ίδιος. Η κύρια

διαφορά τους παρατηρείται στα τελευταία 6 min του πειράματος , όπου και πάλι είναι ελάχιστη (περίπου $1^{\circ}C$). Έπειτα η θερμοκρασία των εσωτερικών τοιχωμάτων του πυρήνα του στάτη φτάνει έως τους $63^{\circ}C$ ενώ, η τελική θερμοκρασία των εξωτερικών τοιχωμάτων του πυρήνα ,η οποία μετρήθηκε έως το δεκατοπέμπτο λεπτό του πειράματος , ήταν $57^{\circ}C$.

Οι παραπάνω μετρήσεις θεωρούνται αποδεκτές . Περιμέναμε τα τυλίγματα του στάτη να είναι η πιο θερμή περιοχή γιατί, οι απώλειες χαλκού του στάτη αποτελούν την κύρια πηγή θερμότητας ολόκληρης της μηχανής και επομένως θα έχουν την υψηλότερη θερμοκρασία. Στη συνέχεια , ο αισθητήρας της κεφαλής του στάτη είχε τοποθετηθεί σε πολύ μικρή απόσταση από τα χάλκινα καλώδια. Επομένως είναι λογικό το υλικό του στάτη να παρουσιάζει τόσο υψηλές τιμές σε εκείνο το σημείο. Καθώς , απομακρυνόμαστε από τα χάλκινα καλώδια παρατηρούμε ότι οι τιμές της θερμοκρασίας μειώνονται . Η αγωγή θερμότητας στο εσωτερικό του στάτη είναι μικρή λόγω των θερμικών ιδιοτήτων του υλικού του .Το magnetic iron pla παρότι χρήσιμο, διαθέτει υποδεέστερες θερμικές ιδιότητες από τα υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους εφαρμογές (όπως ο σίδηρος). Έτσι όπως φαίνεται και από τον πίνακα μετρήσεων , τα εσωτερικά τοιχώματα του στάτη αποτελούν το πιο ψυχρό μέρος του . Το παραπάνω επαληθεύεται και από το ρυθμό με τον οποίο αυξάνεται η θερμοκρασία στον στάτη. Ήδη την χρονική στιγμή $t = 210 \text{ sec}$, η κεφαλή του στάτη είναι $10^{\circ}C$ θερμότερη από τα εσωτερικά του τοιχώματα . Γενικότερα τα τυλίγματα και η κεφαλή του στάτη εμφανίζουν αρκετά απότομη αύξηση θερμοκρασίας σε σχέση με τα τοιχώματα του. Τέλος ,αξιζει να αναφέρουμε ότι μετά το εικοστό λεπτό της λειτουργίας του στάτη ,η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται αισθητά και οι τιμές της αρχίζουν να σταθεροποιούνται.

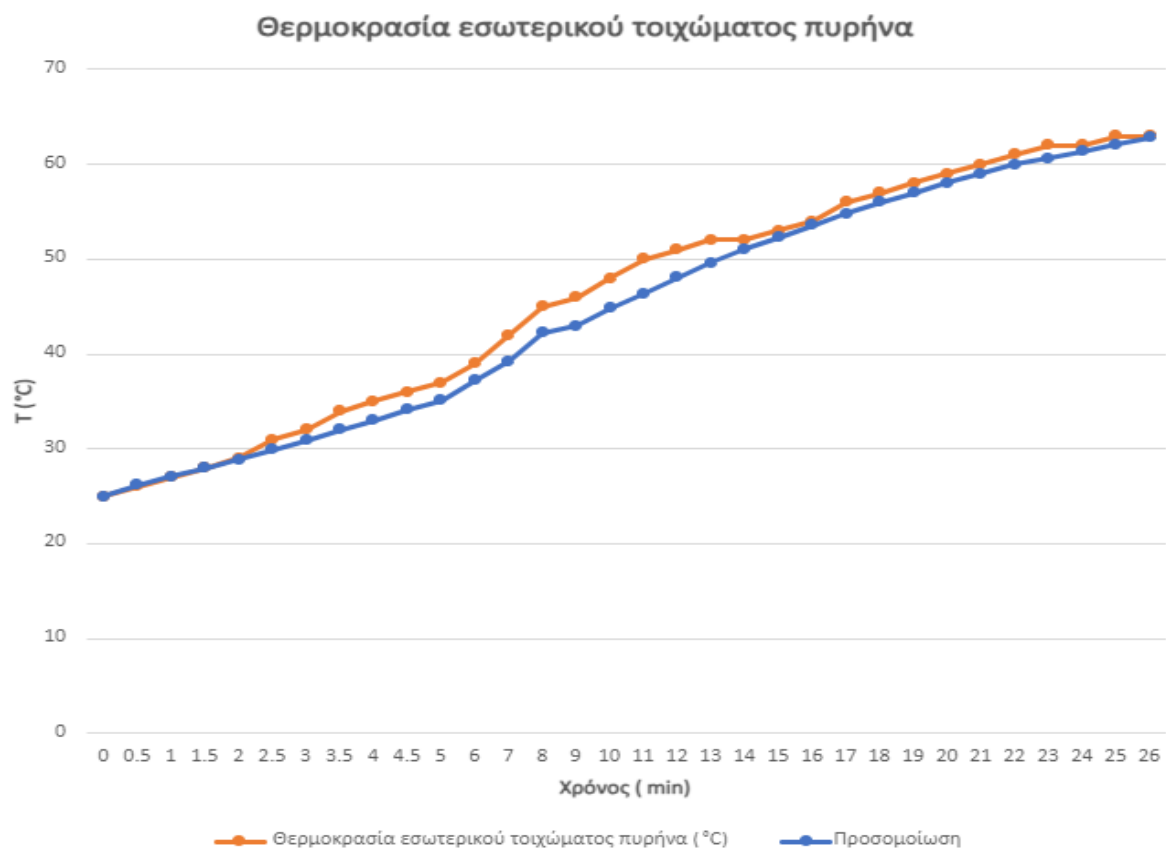
4.3 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και τρισδιάστατης προσομοίωσης

Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει η σύγκριση των θερμικών πειραματικών μετρήσεων που λήφθηκαν στον εργαστήριο, με τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης θερμικής ανάλυσης για το ίδιο χρονικό διάστημα (1560 sec). Παρακάτω παρουσιάζονται οι πίνακες συγκρίσεων και τα διαγράμματα μεταβολής της θερμοκρασίας ,μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των προσομοιώσεων του Ansys Workbench :

| Χρόνος (min) | Θερμοκρασία εσωτερικού τοιχώματος πυρήνα ($^{\circ}C$) | 3D Προσομοίωση |
|--------------|--|----------------|
| 0 | 25 | 25 |
| 0.5 | 26 | 26,2 |
| 1 | 27 | 27,1 |
| 1.5 | 28 | 28 |
| 2 | 29 | 28,9 |
| 2.5 | 31 | 29,9 |
| 3 | 32 | 30,9 |

| | | |
|-----|----|------|
| 3.5 | 34 | 32 |
| 4 | 35 | 33 |
| 4.5 | 36 | 34,1 |
| 5 | 37 | 35,1 |
| 6 | 39 | 37,2 |
| 7 | 42 | 39,2 |
| 8 | 45 | 42,2 |
| 9 | 46 | 43 |
| 10 | 48 | 44,8 |
| 11 | 50 | 46,4 |
| 12 | 51 | 48,1 |
| 13 | 52 | 49,6 |
| 14 | 52 | 51,1 |
| 15 | 53 | 52,3 |
| 16 | 54 | 53,6 |
| 17 | 56 | 54,8 |
| 18 | 57 | 56 |
| 19 | 58 | 57 |
| 20 | 59 | 58 |
| 21 | 60 | 59 |
| 22 | 61 | 60 |
| 23 | 62 | 60,6 |
| 24 | 62 | 61,4 |
| 25 | 63 | 62,1 |
| 26 | 63 | 62,8 |

Πίνακας 4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων εσωτερικού τοιχώματος σάτη.

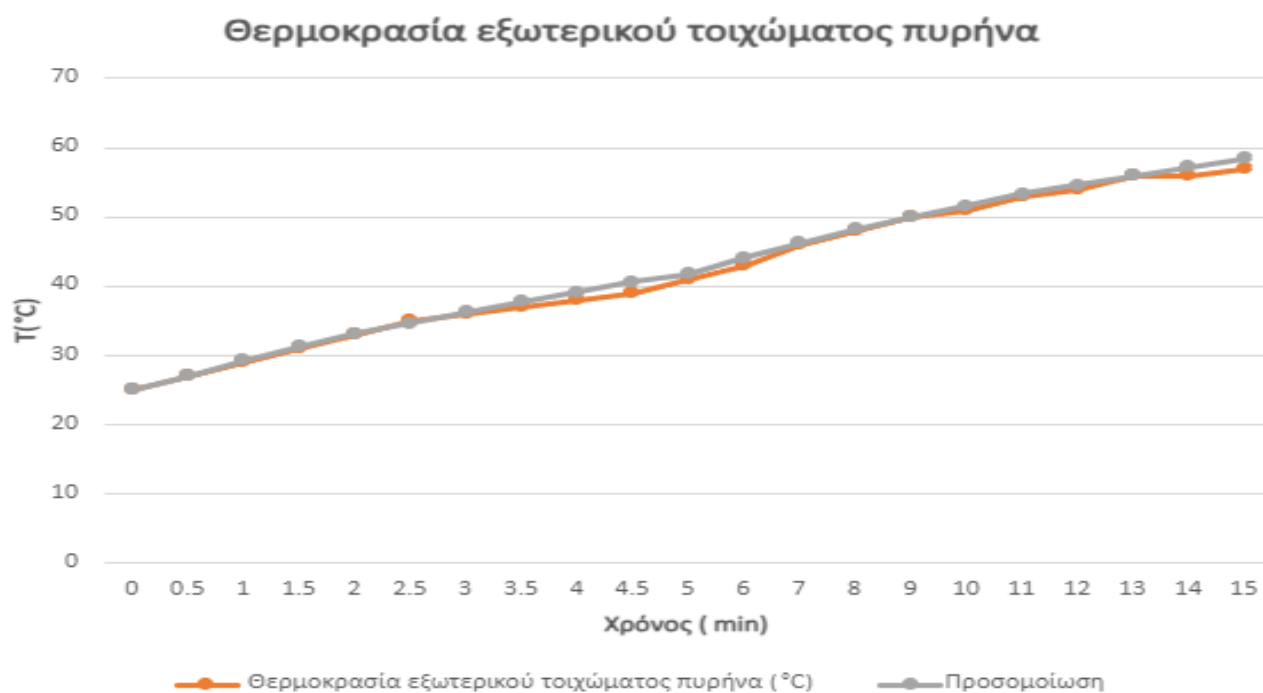


Σχήμα 4.5 Γραφική παράσταση μετρήσεων του εσωτερικού τοιχώματος του στάτη.

| Χρόνος (min) | Θερμοκρασία εξωτερικού τοιχώματος πυρήνα (°C) | 3D Προσομοίωση |
|--------------|---|----------------|
| 0 | 25 | 25 |
| 0.5 | 27 | 27,1 |
| 1 | 29 | 29,3 |
| 1.5 | 31 | 31,3 |
| 2 | 33 | 33,1 |
| 2.5 | 35 | 34,7 |
| 3 | 36 | 36,3 |
| 3.5 | 37 | 37,8 |
| 4 | 38 | 39,2 |
| 4.5 | 39 | 40,6 |
| 5 | 41 | 41,8 |

| | | |
|----|----|------|
| 6 | 43 | 44,1 |
| 7 | 46 | 46,2 |
| 8 | 48 | 48,2 |
| 9 | 50 | 50 |
| 10 | 51 | 51,6 |
| 11 | 53 | 53,3 |
| 12 | 54 | 54,6 |
| 13 | 56 | 56 |
| 14 | 56 | 57,2 |
| 15 | 57 | 58,4 |

Πίνακας 4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων εξωτερικού τοιχώματος στάτη.

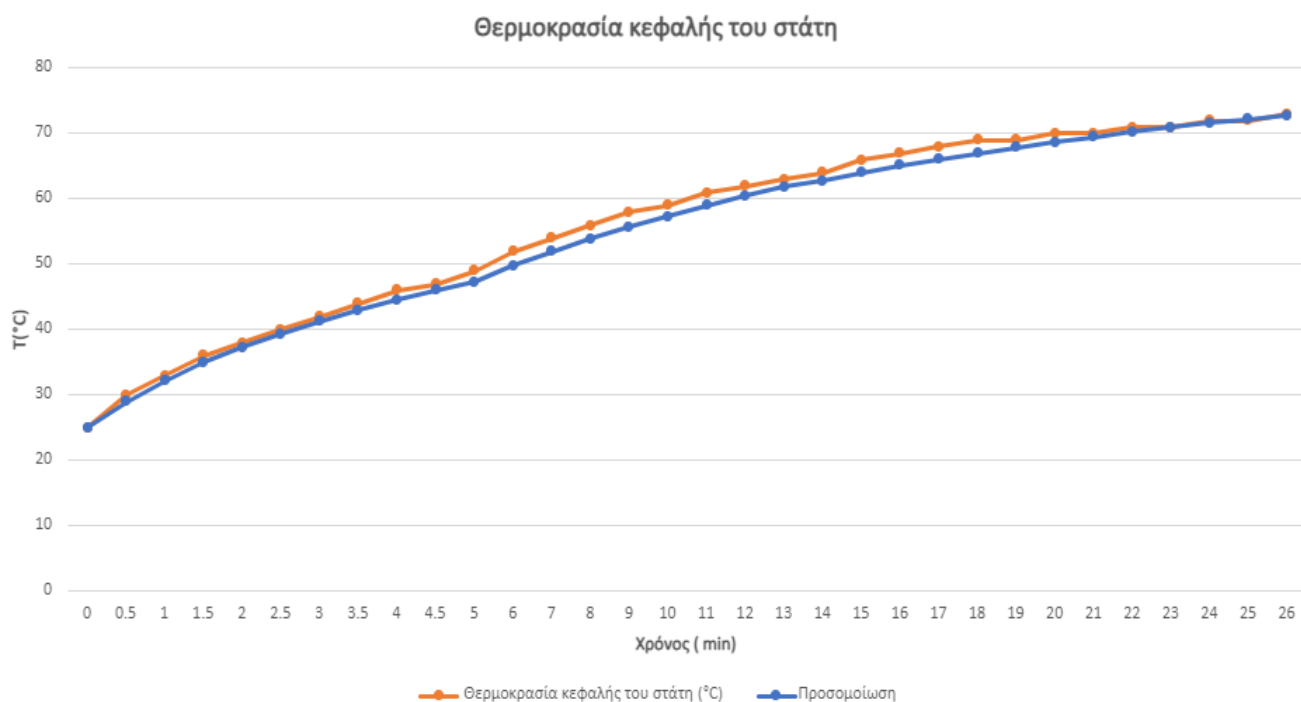


Σχήμα 4.6 Γραφική παράσταση μετρήσεων του εξωτερικού τοιχώματος του στάτη.

| Χρόνος (min) | Θερμοκρασία κεφαλής του στάτη (°C) | 3D Προσομοίωση |
|--------------|------------------------------------|----------------|
| 0 | 25 | 25 |
| 0.5 | 30 | 29 |

| | | |
|-----|----|------|
| 1 | 33 | 32,2 |
| 1.5 | 36 | 35 |
| 2 | 38 | 37,3 |
| 2.5 | 40 | 39,4 |
| 3 | 42 | 41,3 |
| 3.5 | 44 | 43 |
| 4 | 46 | 44,6 |
| 4.5 | 47 | 46,1 |
| 5 | 49 | 47,3 |
| 6 | 52 | 49,8 |
| 7 | 54 | 52 |
| 8 | 56 | 53,9 |
| 9 | 58 | 55,7 |
| 10 | 59 | 57,3 |
| 11 | 61 | 59 |
| 12 | 62 | 60,5 |
| 13 | 63 | 61,8 |
| 14 | 64 | 62,8 |
| 15 | 66 | 64 |
| 16 | 67 | 65,1 |
| 17 | 68 | 66,1 |
| 18 | 69 | 67 |
| 19 | 69 | 67,9 |
| 20 | 70 | 68,7 |
| 21 | 70 | 69,5 |
| 22 | 71 | 70,3 |
| 23 | 71 | 70,9 |
| 24 | 72 | 71,6 |
| 25 | 72 | 72,2 |
| 26 | 73 | 72,8 |

Πίνακας 4.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων κεφαλής του σάτη.

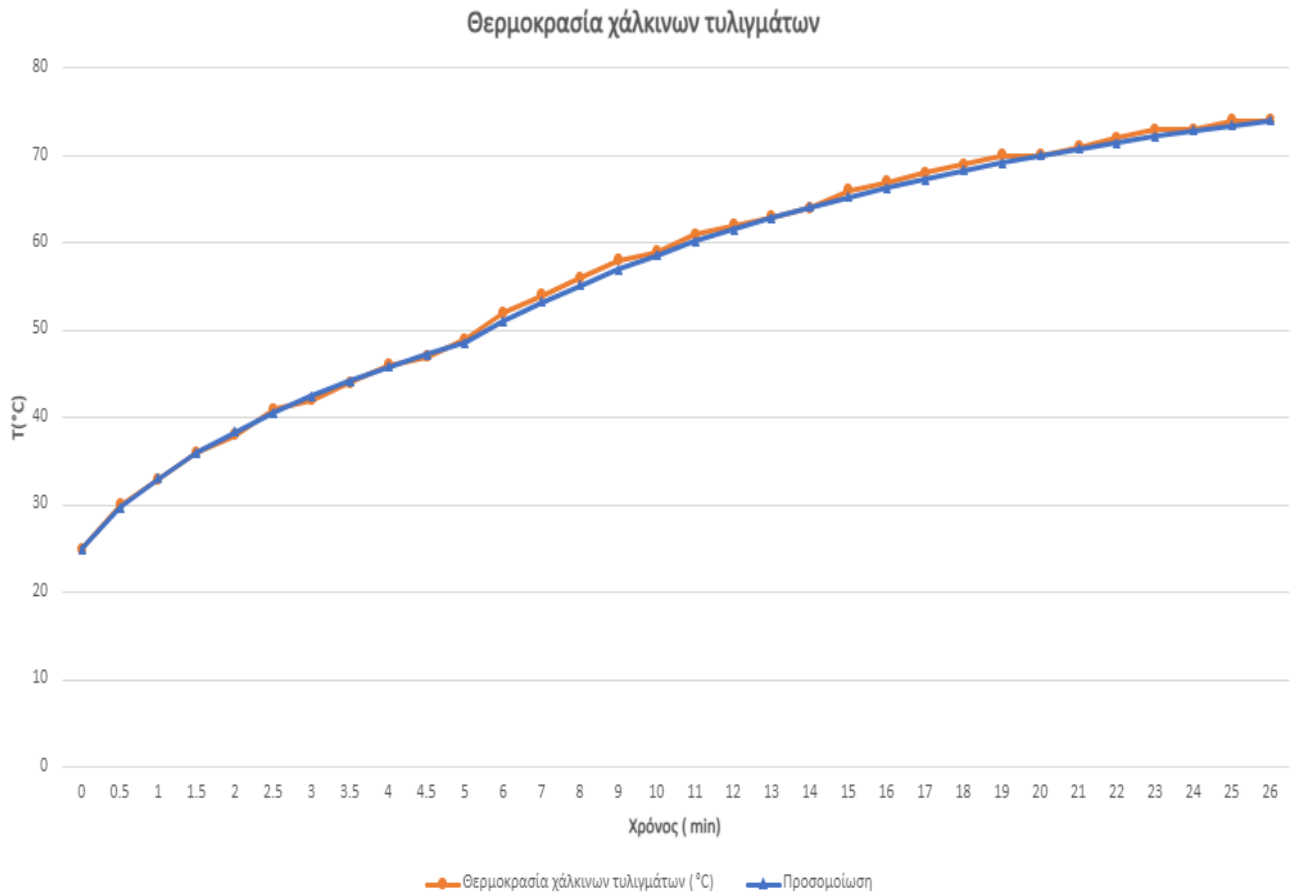


Σχήμα 4.7 Γραφική παράσταση μετρήσεων της κεφαλής του σάτη.

| Χρόνος (min) | Θερμοκρασία χάλκινων τυλιγμάτων (°C) | 3D Προσομοίωση |
|--------------|--------------------------------------|----------------|
| 0 | 25 | 25 |
| 0.5 | 30 | 29,7 |
| 1 | 33 | 33,1 |
| 1.5 | 36 | 36 |
| 2 | 38 | 38,4 |
| 2.5 | 41 | 40,6 |
| 3 | 42 | 42,5 |
| 3.5 | 44 | 44,2 |
| 4 | 46 | 45,8 |
| 4.5 | 47 | 47,3 |
| 5 | 49 | 48,6 |
| 6 | 52 | 51,1 |
| 7 | 54 | 53,3 |

| | | |
|----|----|------|
| 8 | 56 | 55,2 |
| 9 | 58 | 57 |
| 10 | 59 | 58,6 |
| 11 | 61 | 60,2 |
| 12 | 62 | 61,6 |
| 13 | 63 | 62,9 |
| 14 | 64 | 64,1 |
| 15 | 66 | 65,3 |
| 16 | 67 | 66,3 |
| 17 | 68 | 67,3 |
| 18 | 69 | 68,3 |
| 19 | 70 | 69,2 |
| 20 | 70 | 70 |
| 21 | 71 | 70,8 |
| 22 | 72 | 71,5 |
| 23 | 73 | 72,2 |
| 24 | 73 | 72,9 |
| 25 | 74 | 73,5 |
| 26 | 74 | 74,1 |

Πίνακας 4.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων χάλκινων τυλιγμάτων του στάτη.



Σχήμα 4.8 Γραφική παράσταση μετρήσεων των χάλκινων τυλιγμάτων του στάτη.

Τέλος, στον πίνακα 4.6 καταγράφονται σε ποιες χρονικές στιγμές εντοπίστηκαν οι μέγιστες αποκλίσεις μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και των προσομοιώσεων :

| Τμήμα στάτη | Χρονική στιγμή t (min) | Μέγιστη απόκλιση θερμοκρασίας (%) |
|-------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| Εσωτερικό τοίχωμα στάτη | 11 | 7,20% |
| Εξωτερικό τοίχωμα στάτη | 4,5 | 4,10% |
| Κεφαλή στάτη | 9 | 3,60% |
| Χάλκινα τυλίγματα στάτη | 9 | 1,70% |

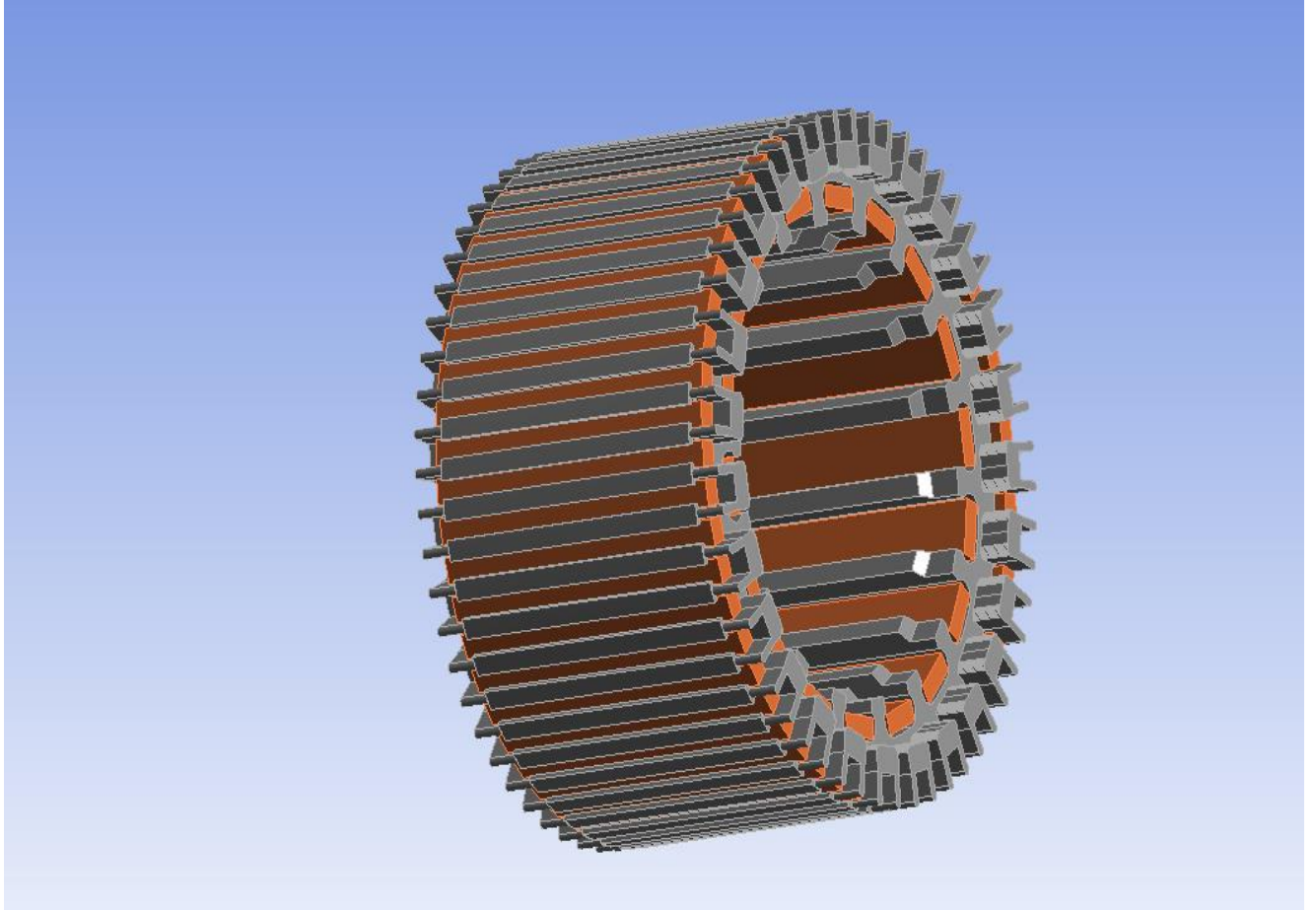
Πίνακας 4.6 Μέγιστες αποκλίσεις θερμοκρασίας μεταξύ πειραματικών μετρήσεων και προσομοίωσης.

Παρατηρούμε ότι οι πειραματικές μετρήσεις των θερμοκρασιών του στάτη, βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με τις αντίστοιχες προσομοιωμένες. Η καμπύλη της θερμοκρασίας από τη τρισδιάστατη ανάλυση ακολουθεί αυτή του πειράματος και στα 4 τμήματα του στάτη. Σημαντικό ρόλο παίζει πως το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με τρισδιάστατη ανάλυση μας δίνει τη δυνατότητα να μετρήσουμε τη θερμοκρασία στο πλαστικό του στάτη στο σημείο που τοποθετήθηκε

ο αισθητήρας κατά την εκτέλεση του πειράματος. Οι αποκλίσεις είναι ελάχιστες και μέσα σε αποδεκτά πλαίσια. Η μεγαλύτερη τιμή απόκλισης εντοπίστηκε την χρονική στιγμή $t = 11 \text{ min}$ στο εσωτερικό τοίχωμα του σάτη και ήταν 7.2%. Η διαφορά αυτή οφείλεται ότι στο μοντέλο της προσομοίωσης τα εσωτερικά τυλίγματα τοποθετήθηκαν έξω από τον πυρήνα του σάτη.

Το πιο πάνω δείχνει ότι το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της τρισδιάστατης ανάλυσης που χρησιμοποιήσαμε είναι αρκετά ακριβές. Οι μικρές διαφορές στις τιμές της θερμοκρασίας οφείλονται στην ακρίβεια μέτρησης των αισθητήρων, στην διαφορετική γεωμετρία του τρισδιάστατου μοντέλου που χρησιμοποιήσαμε και τις παραδοχές που λάβαμε στην εισαγωγή των δεδομένων. Επομένως, μέσα από την τρισδιάστατη προσομοίωση μπορούμε να υπολογίσουμε με μικρές αποκλίσεις τα θερμικά όρια του σάτη για μεγάλη διάρκεια λειτουργίας.

Κεφάλαιο 5



Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιχειρήθηκε η θερμική ανάλυση ενός σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών υψηλής ταχύτητας με πυρήνα στάτη κατασκευασμένο από τρισδιάστατα εκτυπωμένα μέρη χρησιμοποιώντας μεθοδολογίες προσομοίωσης βασισμένες στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε γεωμετρίες δύο και τριών διαστάσεων. Τα ευρήματα των προσομοιώσεων επιβεβαιώθηκαν πειραματικά και τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιήθηκαν για τη πρόβλεψη των αποδεκτών θερμικών ορίων στο στάτη σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα.

5.1 Κύρια συμπεράσματα της εργασίας

Τα κυριότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παρούσα διπλωματική εργασία είναι:

- Οι ηλεκτρικές μηχανές μονίμων μαγνητών και υψηλών ταχυτήτων αποτελούν ένα σύγχρονο πεδίο έρευνας στο οποίο γίνονται πολλές μελέτες, με εκτενώς μεγαλύτερο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια λόγω της εμφάνισης νέων απαιτήσεων με στόχο την αύξηση της αποδοτικότητας και της αξιοπιστίας αλλά και τον περιορισμό του όγκου και της μάζας της μηχανής. Οι **μηχανές μονίμων μαγνητών** φαίνεται να κυριαρχούν στο πεδίο των **εφαρμογών υψηλών ταχυτήτων**, δεδομένου ότι επιτυγχάνουν υψηλή απόδοση, πυκνότητα ισχύος, μικρό μέγεθος και χαμηλό ακουστικό θόρυβο.
- Η προσπάθεια για την βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας των μηχανών μονίμων μαγνητών με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του κόστους έχει οδηγήσει τους ερευνητές στην μελέτη νέων τεχνολογιών και μεθόδων κατασκευής τους. Η παραγωγή μηχανικών **εξαρτημάτων μέσω τρισδιάστατης προσθετικής εκτύπωσης** αποτελεί μια υποσχόμενη μέθοδο, η οποία μπορεί να μειώσει τον χρόνο, τον όγκο και το κόστος παραγωγής των μηχανών.
- Η **μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων** επιτρέπει την λεπτομερή αναπαράσταση των θερμοκρασιών μέσα στον κινητήρα και τον υπολογισμό των κυριότερων θερμικών μεγεθών σε οποιοδήποτε σημείο του. Ωστόσο, απαιτεί σημαντική υπολογιστική ισχύ και ιδιαίτερα σε **γεωμετρίες τριών διαστάσεων**, γεγονός που καθιστά δυσχερή τη σύζευξη του θερμικού με το ηλεκτρικό μέρος της ανάλυσης μιας μηχανής.
- Το μοντέλο του στάτη που κατασκευάστηκε παρείχε ικανοποιητικά αποτελέσματα, παρότι η γεωμετρία του στάτη ήταν αρκετά περίπλοκη. Οι παραδοχές που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό του στάτη οδήγησαν σε **προσομοίωση επαρκούς ακρίβειας** της λειτουργίας του.
- Με χρήση του **μοντέλου δύο διαστάσεων** υπολογίσθηκαν θερμοκρασίες λίγο μεγαλύτερες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μετρήσεις στο εργαστήριο. Παρόλα αυτά, θεωρείται ότι το δυσδιάστατο μοντέλο αποτελεί μία εύκολη υπολογιστικά λύση **προσεγγιστικής πρόβλεψης των θερμικών φαινομένων**.
- Το **μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων τρισδιάστατης ανάλυσης κρίνεται επαρκούς ακρίβειας**, καθώς οι τιμές των θερμοκρασιών στη μεταβατική κατάσταση εμφανίζουν πολύ καλή ακρίβεια με βάση τις αντίστοιχες θερμοκρασίες που λήφθηκαν μέσω πειραματικών μετρήσεων. Το πλεονέκτημα του είναι πως μπορούμε να γνωρίζουμε τη θερμοκρασία οποιοδήποτε σημείου της μηχανής, πράγμα αρκετά σημαντικό στα κρίσιμα σημεία αυτής. Από την άλλη πλευρά απαιτείται σημαντικός χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος για την εξασφάλιση της ακρίβειας του μοντέλου και αρκετή υπολογιστική ισχύς. Από τις πειραματικές μετρήσεις για ρεύμα στάτη 4.93 A και διάρκεια 26 λεπτών ($t = 1560\text{ sec}$) η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας εμφανίστηκε στα τυλίγματα του στάτη και ήταν 74°C , με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συμφωνούν με αυτά του πειράματος εμφανίζοντας μέγιστη απόκλιση 1°C . Η κεφαλή του στάτη ήταν το επόμενο θερμότερο μέρος με την θερμοκρασία να φτάνει τους 73°C και την προσομοίωση να εμφανίζει μέγιστη απόκλιση 2.3°C . Όσον αφορά το εσωτερικό τοίχωμα του στάτη, η τελική θερμοκρασία είναι 63°C , ενώ η μέγιστη απόκλιση της πειραματικής τιμής με αυτή των πεπερασμένων στοιχείων είναι 3.6°C . Τέλος, η μέτρηση του εξωτερικού τοιχώματος έγινε μέχρι την $t = 900\text{ sec}$, αφού έπειτα αποκολλήθηκε ο αισθητήρας. Η τελευταία τιμή που λήφθηκε ήταν στους 57°C με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συμφωνούν με αυτά του πειράματος εμφανίζοντας μέγιστη απόκλιση 1.6°C .

- Η καλή συμφωνία των πειραματικών μετρήσεων με τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης ανάλυσης προσφέρει επαρκή ακρίβεια για την **μελέτη των μέγιστων θερμοκρασιών** που εμφανίζονται σε μόνιμη κατάσταση. Η θερμική ανάλυση έγινε για χρόνο 3 ωρών ($t = 10800 \text{ sec}$). Ομοίως, με την μεταβατική κατάσταση, τα τυλίγματα του στάτη ήταν πιο θερμό μέρος του μοντέλου στους 83.351°C . Η κεφαλή του στάτη έφτασε τους 82.081°C , τα εξωτερικά τοιχώματα τους 77.245°C και τα εσωτερικά τοιχώματα τους 74.01°C . Το λιγότερο θερμό κομμάτι του πυρήνα εμφανίζεται στις άκρες των εσωτερικών εγκοπών του στάτη με θερμοκρασία 59.597°C . Η διαφορά θερμοκρασίας στο εσωτερικό του πυρήνα εξαρτάται από το υλικό του στάτη.
- Και στα δύο μοντέλα που αναπτύχθηκαν σημαντικό ρόλο παίζουν οι ιδιότητες των υλικών του στάτη. Το **υλικό** που χρησιμοποιήθηκε στην **τρειςδιάστατη εκτύπωση** (magnetic iron pla) διαθέτει **μικρή θερμική αγωγιμότητα** σε σχέση με τα κράματα σιδήρου που χρησιμοποιούνται συνήθως για την κατασκευή πυρήνων. Για τον λόγο αυτό, στις προσομοιώσεις ο στάτης παρουσιάζει τόσο μεγάλη διαφορά στην θερμοκρασία των αντισυμμετρικών άκρων του. Ένας τρόπος για να μεγαλώσει η θερμική αγωγιμότητα του φερομαγνήτη είναι να αυξήσουμε το ποσοστό σιδήρου που περιέχει.
- Ένα επιπλέον ζήτημα που μας απασχολεί, είναι το αν το υλικό του στάτη θα αντέξει τις υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλο χρονικό διάστημα λειτουργίας. Το υλικό του στάτη έχει σημείο τήξης τους 155°C . Το θερμοκρασιακό όριο των 100°C που τίθεται συνήθως για την αξιοπιστία του στάτη, τηρείται καθώς τα τυλίγματα που αποτελούν κρίσιμο σημείο ως προς την θερμική συμπεριφορά του και το υλικό του πυρήνα αναπτύσσουν θερμοκρασίες στην μόνιμη κατάσταση αρκετά χαμηλότερες από τους 100°C . Εν τούτοις, το συγκεκριμένο υλικό, επειδή χρησιμοποιείται από τρισδιάστατους εκτυπωτές, εμφανίζει σχετικά χαμηλή "θερμοκρασία μαλακώματος" (softening temperature). Σε αυτές τις θερμοκρασίες η μοριακή δομή του υλικού μαλακώνει, ώστε να μπορεί να μορφοποιηθεί από τον εκτυπωτή. Επομένως, πρέπει να ερευνηθεί σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας αν η δομή του στάτη παραμένει συμπαγής.

5.2 Σημεία επιστημονικής συνεισφοράς

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αποτυπώνονται τα παρακάτω σημεία επιστημονικής συνεισφοράς:

- Η θερμική ανάλυση του **συγκεκριμένου 18πολικού σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών** σε γεωμετρικές δύο και τριών διαστάσεων χρησιμοποιώντας εναλλακτικούς κώδικες λογισμικού βασισμένους στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.
- Η διερεύνηση της **θερμικής συμπεριφοράς** και των θερμικών ορίων του υλικού του στάτη **κατασκευασμένου μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης** (magnetic iron pla) σε μεταβατική και μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.
- Η σύγκριση των μοντέλων προσομοίωσης με πειραματικές μετρήσεις και η **επιβεβαίωση της ακρίβειας των μοντέλων**. Τα αποτελέσματα της μελέτης καταδεικνύουν σαφώς τις δυνατότητες μοντελοποίησης των μαγνητικών υλικών προσθετικής κατασκευής με τρισδιάστατη εκτύπωση στις ηλεκτρικές μηχανές.

5.3 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής, αναδείχθηκαν τα παρακάτω θέματα που χρήζουν περαιτέρω μελέτης :

- Εκτεταμένη πειραματική επιβεβαίωση της λειτουργικής συμπεριφοράς σε πολλαπλούς θερμικούς κύκλους φόρτισης και σε περισσότερες συνθήκες λειτουργίας ώστε να υπολογιστεί **η βιωσιμότητα του υλικού** του στάτη λόγω ενδεχόμενης γήρανσης.
- Η ανάπτυξη **συζευγμένης ηλεκτρομαγνητικής θερμικής ανάλυσης** για συνεκτίμηση ενδεχόμενης μεταβολής των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών του υλικού κατά την παρατεταμένη θέρμανσή του.

Παράρτημα 1:



N35

Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets

These are also referred to as "Neo" or NdFeB magnets. They offer a combination of high magnetic output at moderate cost. Please contact Arnold for additional grade information and recommendations for protective coating. Assemblies using these magnets can also be provided.

| Magnetic Properties | Characteristic | Units | min. | nominal | max. |
|--|--------------------------------|-------------------|--------|---------|--------|
| | Br , Residual Induction | | Gauss | 11,700 | 12,100 |
| | | mT | 1170 | 1210 | 1250 |
| H_{CB} , Coercivity | | Oersteds | 10,800 | 11,400 | 12,000 |
| | | kA/m | 860 | 907 | 955 |
| H_{CJ} , Intrinsic Coercivity | | Oersteds | 12,000 | | |
| | | kA/m | 955 | | |
| BH_{max} , Maximum Energy Product | | MGOe | 33 | 36 | 38 |
| | | kJ/m ³ | 263 | 283 | 302 |

| Thermal Properties | Characteristic | Units | C // | C ⊥ |
|---|--|------------------------------|--------------|--------|
| | Reversible Temperature Coefficients ⁽¹⁾ | of Induction, α(Br) | %/°C | |
| of Coercivity, α(H _{CJ}) | | %/°C | | -0.62 |
| Coefficient of Thermal Expansion ⁽²⁾ | | ΔL/L per °Cx10 ⁻⁶ | 7 | -1 |
| Other Properties | Thermal Conductivity | kcal/mhr°C | 5.3 | 5.8 |
| | Specific Heat ⁽³⁾ | cal/g°C | | 0.11 |
| Other Properties | Curie Temperature, T _c | °C | | 310 |
| | Flexural Strength | psi | | 41,300 |
| | | MPa | | 285 |
| | Density | g/cm ³ | | 7.6 |
| | Hardness, Vickers | Hv | | 620 |
| Electrical Resistivity, ρ | μΩ • cm | | 150 // 130 ⊥ | |

Notes: (1) Coefficients measured between 20 and 80 °C
 (2) Between 20 and 200 °C. Values are typical and can vary.
 (3) Between 20 and 140 °C

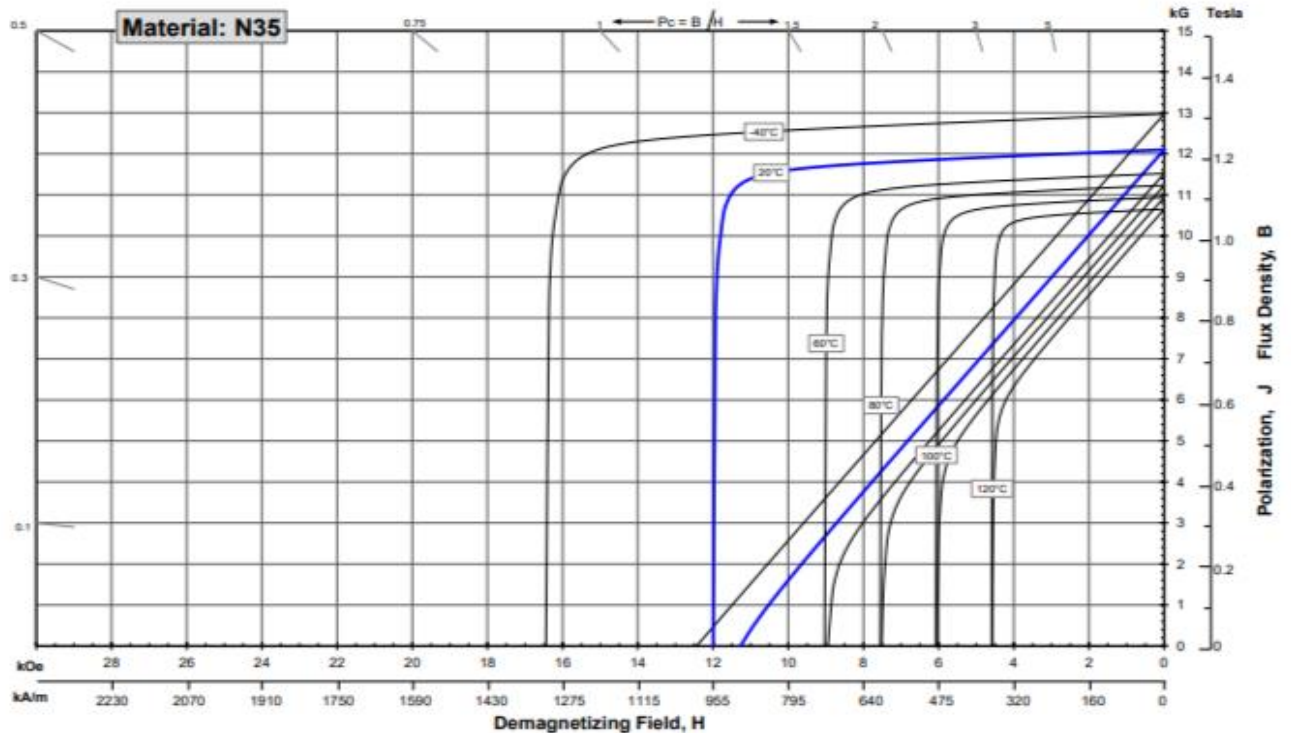


Table 7 Smith air void correction vs. Landauer air void correction

| Sample material | Average holometrix TCA 300 λ_s (W/m K) (Table 6) | Smith air void correction [Eq. (5)] λ_{Smith} (W/m K) | Landauer air void correction [Eq. (8)] $\lambda_{Landauer}$ (W/m K) | Percent variance Smith method [Eq. (5)] vs. Landauer method [Eq. (8)] |
|---------------------|--|---|---|---|
| CopperFill | 0.4381 | 3.6657 | 3.6565 | (-)0.25 |
| BronzeFill | 0.5460 | 1.4957 | 1.4945 | (-)0.08 |
| Magnetic iron PLA | 0.2943 | 0.4114 | 0.4112 | (-)0.05 |
| Stainless steel PLA | 0.3907 | 0.4074 | 0.3976 | (-)2.43 |

Table 8 Lichtenecker through plane air layer thermal conductivity determination

| Filament | Lichtenecker prediction [Eq. (3)] $\lambda_{Lichtenecker}$ (W/m K) | Air void volume fraction % | Lichtenecker through plane air layer thermal conductivity λ_{LAYER} (W/m K) |
|---------------------|--|----------------------------|---|
| CopperFill | 3.9904 | 5.63 | 3.02 |
| BronzeFill | 1.5677 | 3.19 | 1.37 |
| Magnetic iron PLA | 0.4271 | 2.75 | 0.39 |
| Stainless steel PLA | 0.4106 | 2.34 | 0.38 |

Table 6 Measured thermal conductivity of copperFill, bronzeFill, magnetic iron PLA and stainless steel PLA compared to Lichtenecker model, Smith air void correction and base PLA

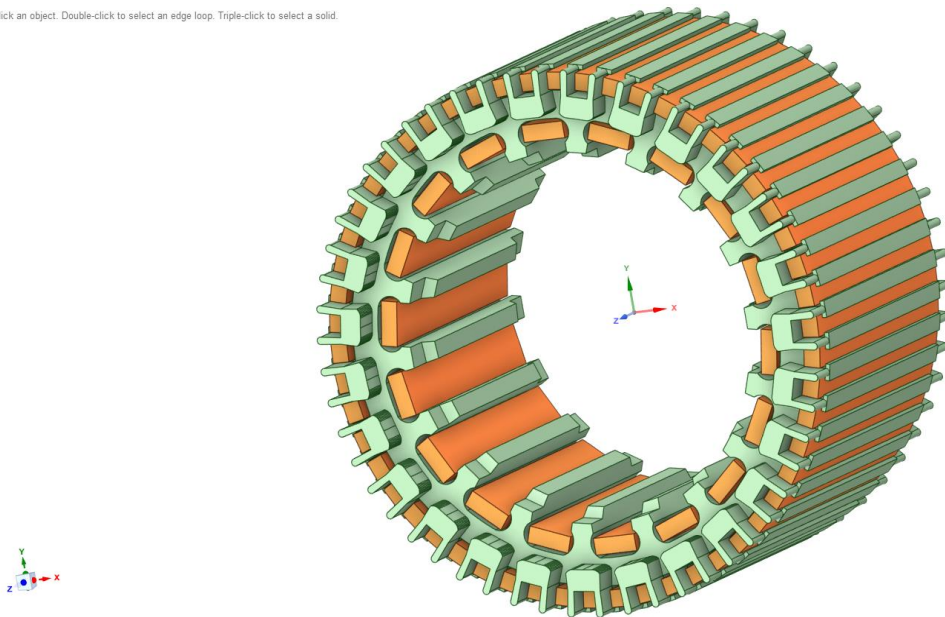
| Sample material | Average Holometrix TCA 300 λ_s (W/m K) | Lichtenecker prediction [Eq. (4)] $\lambda_{Lichtenecker}$ (W/m K) | Lichtenecker deviation % from measured λ_s | Smith air void correction [Eq. (5)] λ_{Smith} (W/m K) | Smith deviation % from measured λ_s | Base λ_{PLA} deviation % from measured λ_s |
|--|--|--|--|---|---|--|
| CopperFill * $\lambda_{Copper} = 380$ (W/m K) | 0.4381 | 3.9904 | (+)160.42 | 3.6657 | (+)157.29 | (+)81.28 |
| BronzeFill * $\lambda_{Bronze} = 50$ (W/m K) | 0.5460 | 1.5677 | (+)96.67 | 1.4957 | (+)93.03 | (+)98.81 |
| Magnetic iron PLA * $\lambda_{Magnetic Iron} = 79.5$ (W/m K) | 0.2943 | 0.4271 | (+)36.82 | 0.4114 | (+)33.18 | (+)45.66 |
| Stainless steel PLA * $\lambda_{Stainless Steel} = 18$ (W/m K) | 0.3907 | 0.4106 | (+)4.98 | 0.4074 | (+)4.17 | (+)71.51 |
| Base PLA | 0.1849 | - | - | - | - | - |

*means reference values

Παράρτημα 2 :

Click an object. Double-click to select an edge loop. Triple-click to select a solid.

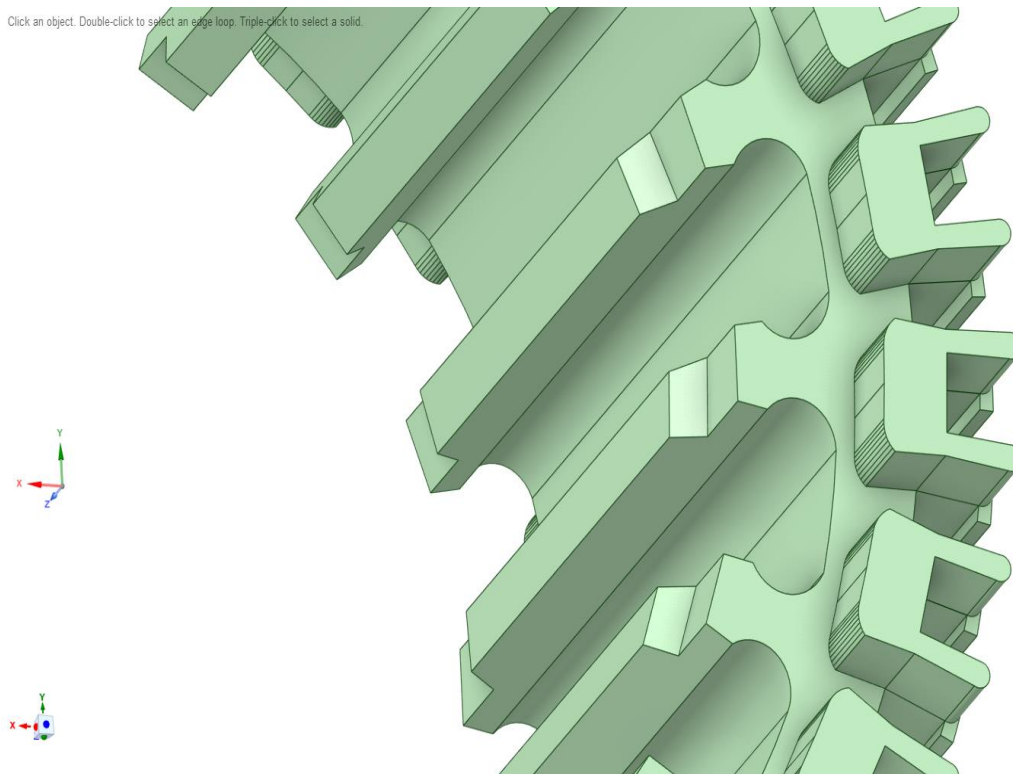
ANSYS
2021 R1



Γεωμετρία στάτη.

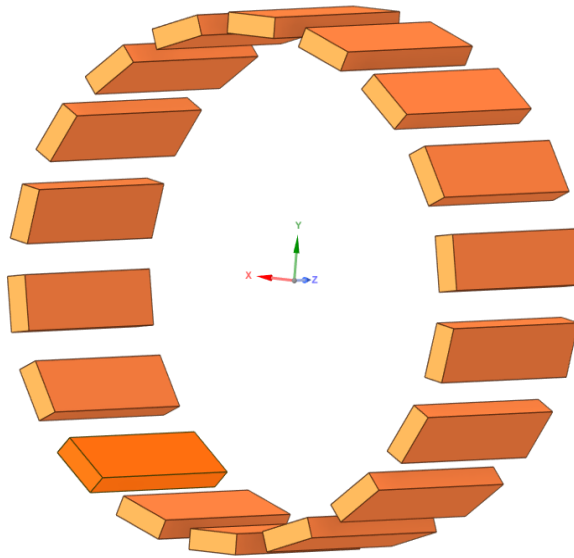
Click an object. Double-click to select an edge loop. Triple-click to select a solid.

ANSYS
2021 R1



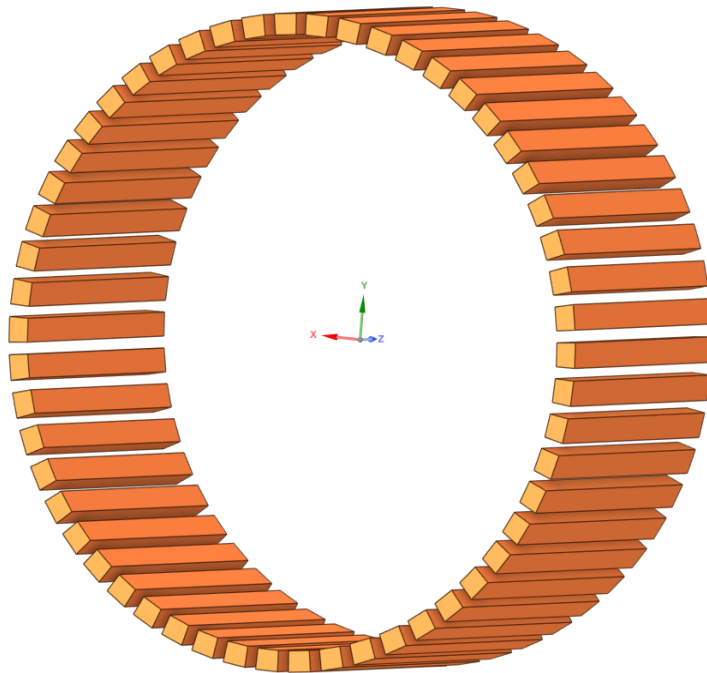
Λεπτομέρεια εσωτερικών αυλακώσεων.

Click an object. Double-click to select an edge loop. Triple-click to select a solid.



Γεωμετρία εσωτερικών τυλιγμάτων.

Click an object. Double-click to select an edge loop. Triple-click to select a solid.



Γεωμετρία εξωτερικών τυλιγμάτων.

Βιβλιογραφία

- [1] Thomas A. Lipo, "Introduction to AC Machine Design", WILEY , IEEE PRESS, 2017
- [2] Pragasen Pillay and Ramu Krishnam, "Application Characteristics of PM Synchronous and Brushless dc Motors for Servo Drives", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 27, No. 5, September/October 1991.
- [3] <https://about-motors.com/motorcontrol/pmsm/>
- [4] Liu, X.; Lin, Q.; Fu, W. Optimal Design of Permanent Magnet Arrangement in Synchronous Motors. *Energies* **2017**, *10*
- [5] Κορωνίδης Αντώνης "Θερμική και Μηχανική Ανάλυση Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών Υψηλής Ταχύτητας", Διπλωματική Εργασία, Ιούλιος 2017
- [6] Μαδεμλής Χ., "ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ", 2016 Εκδόσεις Τζιόλα
- [7] Enrique L. Carrillo Arroyo, «Modeling and simulation of permanent magnet synchronous motor drive system», Thesis, Puerto Rico, 2006
- [8] Stephen J. Chapman ELECTRIC MACHINERY FUDAMENTALS Forth edition , 2013 Εκδόσεις Τζιόλα
- [9] S. Lammers *et al.*, "Additive Manufacturing of a lightweight rotor for a permanent magnet synchronous machine," *2016 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, Nuremberg, Germany, 2016,
- [10] . Srinivasan, M. Meignanamoorthy, M. Ravichandran, V. Mohanavel, S. V. Alagarsamy, C. Chanakyan, S. Sakthivelu, Alagar Karthick, T. Ram Prabhu, S. Rajkumar, "3D Printing Manufacturing Techniques, Materials, and Applications: An Overview", *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2021, Article ID 5756563, 10 pages, 2021
- [11] . Waterman, A. Clucas, T. B. Costa, Y. Zhang and J. Zhang, "Numerical modeling of 3D printed electric machines," *2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Coeur d'Alene, ID, USA, 2015
- [12] M. S. Pechlivanidou and A. Kladas, "Low cost high speed permanent magnet motor modeling implementing a particular 3D-printed magnetic iron material", in Proc. of 23 rd Conf. on the Computation of electromagnetic Fields (COMPUMAG), Cancun, Mexico, Jan. 16-20,2022.
- [13] M. S. Pechlivanidou and A. Kladas, " Investigation of Different Magnetic Core Materials in High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor Applications"
- [14] Laureto, J., Tomasi, J., King, J.A. *et al.* Thermal properties of 3-D printed polylactic acid-metal composites. *Prog Addit Manuf* **2**, 57–71 (2017)
- [15] Juha Pyrhonen, Topani Jokinen, Valeria Hrabovcova , "Design of Rotating Electrical Machines", John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- [16]Θερμίστορ:
<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%98%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%AF%CF%83%CF%84%CE%BF%CF%81>
- [17] Διονύσης Κ. Ασημακόπουλος, Βασιλική Ι. Λυγερού, Γεώργιος Α. Αραμπατζής, «Μεταφορά Θερμότητας», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2009.

- [18] Frank P. Incropera, De Witt, Bergman, Lavine, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, 6th Edition, 2006.
- [19] Χατζηαθανασίου Βασίλειος, Καδή Στυλιανή. «ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ. Αγωγή». Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2015
- [20] Heat Transfer, Tenth Edition, J. P. Holman, Department of Mechanical Engineering Southern Methodist University.2010
- [21] Chekimidou Anastasia, THERMAL ANALYSIS OF A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ,ΙΟΥΝΙΟΣ 2022
- [22] Ι. Α. Τεγόπουλος, “Ηλεκτρικές Μηχανές”, Μέρος Β΄, Εκδόσεις Συμμετρία, 1991
- [23] International Electrotechnical Commission: “Thermal evaluation and classification of electrical insulation”, 1984
- [24] [What does motor insulation class specify and why is it important? \(motioncontroltips.com\)](https://www.motioncontroltips.com/what-does-motor-insulation-class-specify-and-why-is-it-important/)
- [25] Y. K. Chin, E. Nordlund, and D. A. Staton, “Thermal analysis - lumped circuit model and finite element analysis,” in 6th International Power Engineering Conference IPEC’03, pp. 952-957, Nov. 2003.
- [26] ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Λ. ΠΕΠΟΝΑΚΗΣ , Θερμική Ανάλυση Ηλεκτρικών Μηχανών με χρήση Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων, Διπλωματική Εργασία , Ξάνθη, Μάρτιος 2018
- [27] <https://www.thermalds.com/thermal-analysis-thermal-modeling/>
- [28] <https://courses.ansys.com/index.php/courses/radiation-between-surfaces/lessons/physics-setup-lesson-5-16/topic/setup-transient-thermal-analysis/>

Κώδικες Λογισμικού

[1] Διαδικτυακά διαθέσιμος κώδικας πεπερασμένων στοιχείων / υπολογιστικό πρόγραμμα:

<http://www.femm.info/wiki/HomePage%20/%20Έκδοση%20Νοεμβρίου%202010>

<http://www.femm.info/wiki/HomePage>

[manual.pdf](#)

[2] Πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS Workbench 2021

<http://www.ansys.com/>

[3] Πρόγραμμα υπολογιστικών φύλλων: Office – Excel (Microsoft)

<https://products.office.com/en-us/excel>

[4] Πρόγραμμα σχεδίασης: Inventor Fusion 2013 (Autodesk)

<http://labs.autodesk.com/technologies/fusion>.