



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

**Σχεδίαση και κατασκευή κινητήρα μονίμων μαγνητών για
πρότυπο ηλεκτρικό όχημα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Θ. Κρασόπουλος

Επιβλέπων : Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Σχεδίαση και κατασκευή κινητήρα μονίμων μαγνητών για
πρότυπο ηλεκτρικό όχημα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Θ. Κρασόπουλος

Επιβλέπων : Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 29^η Οκτωβρίου 2013.

.....
Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Στέφανος Μανιάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2013

.....
Χρήστος Θ. Κρασόπουλος

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

Copyright © Χρήστος Θ. Κρασόπουλος, 2013
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα εργασία επιχειρεί τη σχεδίαση ηλεκτρικού κινητήρα για εφαρμογή σε σύστημα ηλεκτρικής κίνησης οχήματος, χρησιμοποιώντας ως κύριο κριτήριο βελτιστοποίησης τη μείωση των απωλειών, του βάρους και του όγκου. Το όχημα για το οποίο σχεδιάζεται και κατασκευάζεται ο κινητήρας προορίζεται να συμμετάσχει σε ευρωπαϊκό διαγωνισμό πρότυπων μονοθέσιων οχημάτων οικονομικής μετακίνησης. Η εργασία σε ένα πρώτο βήμα προσδιορίζει τις προδιαγραφές των κύριων λειτουργικών χαρακτηριστικών του κινητήρα και σε ένα δεύτερο βήμα αναπτύσσει τη μελέτη σχεδίασης και διαμόρφωσης όλων των συνιστωσών του. Συγκεκριμένα, ο σύγχρονος κινητήρας μονίμων επιφανειακών μαγνητών χαρακτηρίζεται από χαμηλή ισχύ (~ 220 W), χαμηλή ταχύτητα περιστροφής (~ 300 Σαλ), και ταυτόχρονα πολύ υψηλή απόδοση (> 90%), με δυνατότητα παροχής υψηλής ροπής εκκινήσεως.

Αρχικά, πραγματοποιείται μία σύντομη παρουσίαση του ηλεκτροκίνητου οχήματος ως εφαρμογή και των διαφορετικών συστημάτων κίνησης που υπάρχουν. Κατόπιν αυτού θα διερευνηθούν οι προδιαγραφές που θα πρέπει να έχει ο κινητήρας που θα κατασκευαστεί. Αυτές οι προδιαγραφές ορίζονται βάσει του οχήματος στο οποίο θα τοποθετηθεί, τον τρόπο με τον οποίο θα κινεί το αυτοκίνητο και της μορφής των ταχυτήτων και των επιταχύνσεων στον αγώνα. Βάσει των αποτελεσμάτων της προηγούμενης διαδικασίας θα επιχειρηθεί μία προκαταρκτική σχεδίαση με την χρήση θεωρητικών σχέσεων για τον προσδιορισμό των βασικών διαστάσεων του κινητήρα. Αργότερα θα γίνει η επεξήγηση των μεταβλητών που επιλέχθηκαν για την παραμετροποιημένη σχεδίαση και του προγράμματος που δημιουργήθηκε προκειμένου να γίνονται οι επιθυμητές προσομοιώσεις των εκάστοτε σχεδιαζόμενων γεωμετριών και οι αναλύσεις ευαισθησίας αυτών.

Στην επόμενη παράγραφο, αφού οριστικοποιηθούν μέσω προσομοιώσεων οι βασικές διαστάσεις του κινητήρα, θα ξεκινήσει η διερεύνηση της βέλτιστης διαμόρφωσης ανάμεσα από πολλούς διαφορετικούς συνδυασμούς αυλακών/πόλων με συγκεντρωμένα τυλίγματα μονής και διπλής στρώσης συμπεριλαμβανομένης και της γεωμετρίας άνισων δοντιών, εξετάζοντας ένα σύνολο μεγεθών που περιλαμβάνουν την μέγιστη ροπή που αποδίδει ο κινητήρας, την κυμάτωση αυτής, την αρμονική παραμόρφωση της τάσης, την απόδοση, το βάρος και άλλα. Κατόπιν αυτών, θα επιλεγθούν οι ιδανικότερες διαμορφώσεις και αυτές θα εξερευνηθούν περαιτέρω χρησιμοποιώντας αναλύσεις ευαισθησίας, πάνω στα περισσότερα θεωρητικά μετρήσιμα μεγέθη που απαριθμήθηκαν και πρωτύτερα. Εκτός αυτού, θα επιχειρηθεί η ανάλυση ευαισθησίας σε δύο λειτουργικά σημεία και θα συνεκτιμηθεί η αναγκαιότητα της. Ιδιαίτερη προσοχή θα δοθεί και στην γεωμετρία στάτη με άνισα δόντια, στην οποία θα γίνει εκτενής ανάλυση. Συνεπώς θα γίνει μία σύγκριση σε όλα τα επίπεδα και συνυπολογίζοντας παράγοντες όπως η πολυπλοκότητα της κατασκευής, η αξιοπιστία κ.α., θα γίνει η τελική επιλογή της βέλτιστης γεωμετρίας.

Τέλος, θα γίνει μία παράθεση των σχεδίων και των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διαδικασία της συναρμολόγησης του κινητήρα καθώς και φωτογραφίες από το τελικό αποτέλεσμα.

Στις προσομοιώσεις που έγιναν χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων FEMM και αριθμητικής ολοκλήρωσης διαφορικών εξισώσεων MATLAB.

Λέξεις κλειδιά: << Ηλεκτρικό όχημα, σχεδίαση ηλεκτρικού κινητήρα, ανάλυση ευαισθησίας, επιφανειακοί μαγνήτες, κινητήρες μονίμων μαγνητών, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, παραμετροποιημένη σχεδίαση, συγκεντρωμένο τύλιγμα κλασματικού βήματος, συγκεντρωμένο τύλιγμα μονής και διπλής στρώσης, άνισα δόντια, αριθμός αυλακών και πόλων, συναρμολόγηση κινητήρα, βελτιστοποίηση γεωμετρίας, πολλαπλές καταστάσεις λειτουργίας, δρομέας τροχού.>>

Abstract

The present diploma thesis undertakes the design and optimization procedure of an electric motor, designed for application to an electric vehicle drive system, emphasizing on loss, weight and volume minimization. The electric motor is intended for a light electric vehicle application in the frame of participation in the European contest of prototype vehicles presenting low fuel consumption (Shell Eco Marathon). Initially, the main motor performance and efficiency specifications are prescribed. Subsequently, the design study is performed in order to enable all motor components to meet the specified technical standards. In particular, the synchronous surface mounted permanent magnet motor presents low nominal power (~ 220 W), low rotational speed (~ 300 rpm), a very high efficiency ($> 90\%$), and the capability of providing a high torque output during acceleration.

Initially, the application of electric vehicles is presented in short, as well as different electric drive systems. Then, the specifications that the motor is supposed to have will be investigated. These specifications are defined by the vehicle in which it will be placed, the type of transmission used, and also the form of speeds and accelerations during the race. Based on the results of the previous process, a preliminary design will be attempted with the use of theoretical equations for the determination of the basic dimensions of the engine. Later on, the variables used in the parametric design will be explained, as well as the program that was created, so that the desirable simulations and sensitivity analyses of the designed geometries take place.

In the next paragraph, after the basic dimensions of the engine are defined via simulations, the investigation of the most optimal configuration will take place among different slot/pole combinations with single and double layer concentrated windings, as well as unequal stator teeth geometry, examining motor characteristics such as the maximum torque ability, torque ripple, voltage harmonic distortion, efficiency, weight and others. Afterwards, the most ideal configurations will be selected and explored further, acquiring sensitivity analyses that will be carried out over the theoretically measurable attributes that were enumerated previously. Moreover, the sensitivity analysis will be attempted in two functional points and its necessity will be evaluated. Particular attention will also be given in the unequal stator teeth geometry, which will be extensively explored. Consequently, a comparison over all the measured attributes will take place, including factors such as the complexity of assembling and reliability, in order to conclude at the final choice of the optimal geometry. In the end, all the drawings and models that were used during the assembling process will be presented, as well as photographs from the assembled motor.

The software tools used for simulation were the finite elements software, FEMM and the numerical integration software of differential equations, MATLAB.

Keywords: << Electric vehicle, electric motor design, sensitivity analysis, surface mounted magnets, permanent magnet motors, finite element method, parametric design, concentrated fractional slot windings, single and double layer concentrated winding, unequal stator teeth, slot/pole combination, motor assembly, design optimization, multiple operating points, wheel rotor. >>

Ευχαριστίες

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

Ευχαριστώ θερμά, τον Καθηγητή μου κ. Αντώνιο Κλαδά, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την άκρως ενδιαφέρουσα παρούσα εργασία, για την καθοδήγησή του και την άψογη συνεργασία για την περάτωσή της. Ιδιαίτερος ευχαριστώ επίσης τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Μίνω Μπενιακάρ που πρόθυμα με στήριξε σε κάθε βήμα της σχεδίασης και της κατασκευής του κινητήρα.

Ευχαριστώ, επίσης, τον Τεχνικό του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος κ. Παναγιώτη Ζάννη καθώς και τους υπόλοιπους εθελοντές της ομάδας του Shell Eco Marathon, για την πολύτιμη βοήθεια τους κατά την συναρμολόγηση του κινητήρα.

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

Πίνακας περιεχομένων

| | |
|---|-----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 11 |
| 1.1 Σκοπός της εργασίας | 11 |
| 1.2 Δομή της εργασίας | 11 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ..... | 13 |
| 2.1 Παρουσίαση του ηλεκτρικού οχήματος | 13 |
| 2.2 Σύστημα κίνησης ηλεκτρικού οχήματος | 14 |
| 2.2.3 Ηλεκτρικό όχημα (EV)..... | 14 |
| 2.2.4 Υβριδικό όχημα..... | 16 |
| 2.2.5 Συγκριτική παρουσίαση κινητήρων για ηλεκτρικά οχήματα | 17 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΙΣΥΧΟΣ 220W..... | 21 |
| 3.1 Προδιαγραφές συστήματος κίνησης..... | 21 |
| 3.1.1 Απαιτήσεις αγώνα και πολιτική εξοικονόμησης καυσίμου..... | 21 |
| 3.1.2 Επιθυμητή επίδοση συστήματος κίνησης..... | 22 |
| 3.1.3 Σύστημα κίνησης..... | 26 |
| 3.2 Προκαταρκτική σχεδίαση..... | 27 |
| 3.2.1 Διαστασιολόγηση διακένου..... | 28 |
| 3.2.2 Μελέτη στάτη..... | 30 |
| 3.2.3 Μελέτη δρομέα..... | 33 |
| 3.2.4 Επιλογή τύπου τυλίγματος, αριθμού πόλων και αριθμού αυλακών | 35 |
| 3.3 Παραμετροποιημένη σχεδίαση..... | 38 |
| 3.3.1 Επιλογή Μεταβλητών..... | 38 |
| 3.3.2 Υλοποίηση μέσω προγράμματος σε Matlab..... | 40 |
| 3.4 Διερεύνηση της καταλληλότερης διαμόρφωσης | 62 |
| 3.4.1 Εύρεση βασικών διαστάσεων..... | 63 |
| 3.4.2 Διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων..... | 66 |
| 3.5 Διερεύνηση αριθμού στρώσεων και γεωμετρίας στάτη | 104 |
| 3.5.1 Ανάλυση ευαισθησίας διαμόρφωσης με διπλή στρώση | 105 |
| 3.5.2 Ανάλυση ευαισθησίας διαμόρφωσης με μονή στρώση..... | 130 |
| 3.5.3 Ανάλυση ευαισθησίας διαμόρφωσης με μονή στρώση και άνισα δόντια | 136 |
| 3.6 Επιλογή τελικής διαμόρφωσης..... | 146 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ | 151 |

| | |
|---|-----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 163 |
| 5.1 Κυριότερα συμπεράσματα..... | 163 |
| 5.2 Σημεία επιστημονικής συνεισφοράς..... | 165 |
| 5.3 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση | 166 |
| Βιβλιογραφία..... | 167 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η σχεδίαση και κατασκευή ενός ηλεκτρικού κινητήρα υψηλής απόδοσης και μικρού βάρους και όγκου για ηλεκτρικό όχημα, που πρόκειται να τροφοδοτηθεί μέσω αντιστροφέα από μπαταρία λιθίου. Ο κινητήρας αποτελεί της βασική συνιστώσα του συστήματος κίνησης ενός πειραματικού μονοθέσιου ηλεκτρικού οχήματος, το οποίο αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της συμμετοχής στον πανευρωπαϊκό διαγωνισμό οικονομίας καυσίμου Shell Eco Marathon. Η κατασκευή του νέου κινητήρα συνδυάζεται με την έκτη συμμετοχή της ομάδας «Προμηθέας» στο διαγωνισμό Shell Eco Marathon, που θα λάβει χώρα στο Rotterdam της Ολλανδίας, το Μάιο 2014.

Με βάση τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς που υπαγορεύονται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή, προέκυψαν οι προδιαγραφές του εν λόγω κινητήρα. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η σχεδίαση και κατασκευή ενός βελτιωμένου κινητήρα, με βάση και τις εμπειρίες που έχουν αποκτηθεί κατά την ανάπτυξη του προηγούμενου κινητήρα. Κατά τη διαδικασία αυτή επιχειρήθηκαν καινοτομίες, αναπτύχθηκαν νέες μέθοδοι σχεδίασης και εξήχθησαν συμπεράσματα που μπορούν να χρησιμεύσουν γενικότερα στη σχεδίαση και βελτιστοποίηση ενός ηλεκτρικού κινητήρα, και ιδιαίτερα ενός κινητήρα μονίμων επιφανειακών μαγνητών εξωτερικού δρομέα. Για την επίτευξη των παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν παραμετροποιημένες μέθοδοι σχεδίασης γεωμετρίας, αριθμητικές μέθοδοι πεδιακής ανάλυσης και μεθοδολογίες ανάλυσης ευαισθησίας με σκοπό τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων του κινητήρα.

1.2 Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία επιχειρεί την σχεδίαση και την ανάλυση ενός κινητήρα επιφανειακών μονίμων μαγνητών για ένα πρότυπο μονοθέσιο ελαφρύ ηλεκτρικό όχημα χρησιμοποιώντας μία μεθοδολογία διερεύνησης της βέλτιστης γεωμετρίας και κατασκευαστικής διαμόρφωσης.

Πιο συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα ηλεκτρικά οχήματα και τα γνωστότερα ηλεκτρικά συστήματα κίνησης που επιστρατεύουν οι κατασκευαστές αυτοκινήτων.

Στο Κεφάλαιο 3, λαμβάνει χώρα η διαδικασία της σχεδίασης και της ανάλυσης του ηλεκτρικού κινητήρα. Αρχικά ορίζονται οι προδιαγραφές που θα πρέπει να έχει ο τελικός

κινητήρα, γίνεται ένας υπολογισμός των βασικών διαστάσεων του κινητήρα μέσω της προκαταρκτικής σχεδίασης και διερευνείται σε βάθος η βέλτιστη γεωμετρία και η διαμόρφωση του κινητήρα. Στο τέλος του κεφαλαίου, αφού έχει πλέον γίνει εκτενής εξερεύνηση και σύγκριση των διαθέσιμων επιλογών, γίνεται και η τελική επιλογή της διαμόρφωσης του κινητήρα.

Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται όλα τα σχέδια και τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν στον υπολογιστή και χρησίμευσαν στην συναρμολόγηση του ηλεκτροκινητήρα. Επίσης, τοποθετούνται και φωτογραφίες από το τελικό αποτέλεσμα.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5, συγκεντρώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διαδικασία της σχεδίασης, της μελέτης, και της κατασκευής του κινητήρα, ενώ αναφέρονται και τα σημεία καινοτομίας της εργασίας. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με μια σειρά προτάσεων για περαιτέρω διερεύνηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

2.1 Παρουσίαση του ηλεκτρικού οχήματος

Περιβαλλοντικοί και οικονομικοί λόγοι αποτελούν κίνητρο για την ανάπτυξη και διάδοση ενός διαφορετικού τύπου αυτοκινήτου από τα ευρέως διαδεδομένα που χρησιμοποιούν κινητήρες εσωτερικής καύσης. Οι εκπομπές αέριων ρύπων από τα βενζινοκίνητα και πετρελαιοκίνητα οχήματα ευθύνονται κατά ένα μεγάλο μέρος για την ρύπανση της ατμόσφαιρας και το φαινόμενο του θερμοκηπίου που οδηγεί στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Ένα δεύτερο μειονέκτημα είναι η εξάρτηση από το πετρέλαιο η οποία έχει σημαντικές οικονομικές και πολιτικές συνέπειες, αυξανόμενες καθώς τα αποθέματα πετρελαίου εξαντλούνται.

Το ηλεκτρικό αυτοκίνητο προσφέρει έναν εναλλακτικό και περιβαλλοντικά φιλικό τρόπο μετακίνησης. Η υψηλή απόδοση του ηλεκτρικού συστήματος κίνησης, και η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προσφέρουν λύσεις στον περιβαλλοντικό και οικονομικό προβληματισμό του αναφέρθηκε.

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα κυκλοφόρησαν στο δρόμο ήδη από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα, ακόμα και πριν από την χρήση οχημάτων με κινητήρα εσωτερικής καύσης [3]. Εντούτοις, ορισμένοι περιορισμοί στη χρήση και δυσκολίες στην παραγωγή τους, σε συνδυασμό με τη ραγδαία τεχνολογική εξέλιξη των κινητήρων εσωτερικής καύσης οδήγησαν στην εξαφάνισή τους από το προσκήνιο στις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Το ενδιαφέρον για το ηλεκτρικό αυτοκίνητο επανεμφανίστηκε στη δεκαετία του '60, όταν διαπιστώθηκαν οι συνέπειες της ευρείας διάδοσης των αυτοκινήτων εσωτερικής καύσης. Αν και η ηλεκτρική κίνηση έχει χρησιμοποιηθεί έκτοτε εκτενώς στα μέσα μαζικής μεταφοράς, η εξέλιξη δεν ήταν η ίδια για τα οχήματα ιδιωτικής χρήσης.

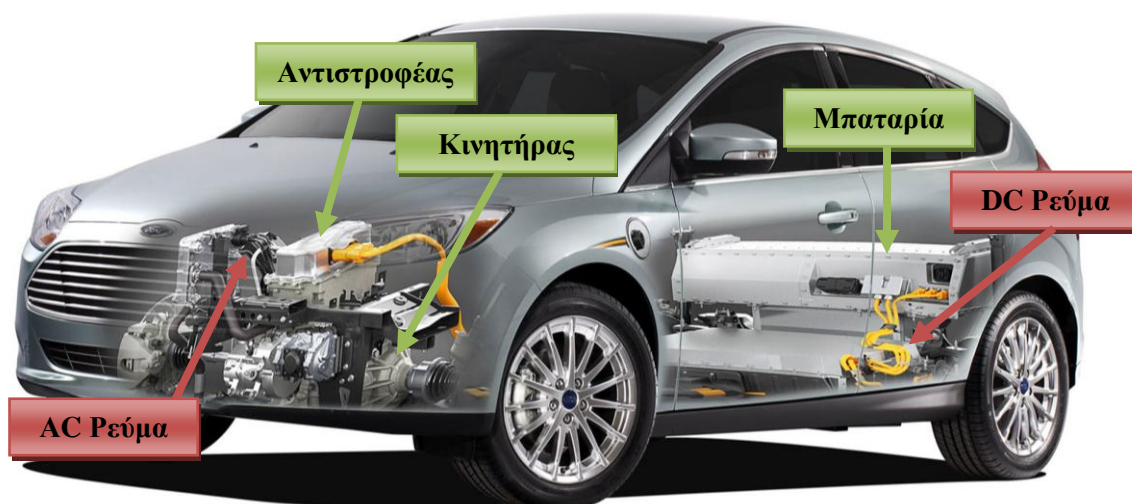
Ως βασικός τεχνολογικός παράγοντας που αποτελεί διαχρονικά εμπόδιο στη διάδοση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι η μικρή εμβέλεια κίνησης και η δυσκολία αποθήκευσης αρκετής ενέργειας σε συσσωρευτές αποδεκτού κόστους. Οι εξελίξεις των τελευταίων ετών στην τεχνολογία των συσσωρευτών είναι σημαντικές και η έρευνα συνεχίζεται ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα των μέσων αποθήκευσης ενέργειας, με ταυτόχρονη μείωση του βάρους και του κόστους τους. Συνεπώς, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αύξηση της παραγωγής και κυκλοφορίας ηλεκτρικών αυτοκινήτων. [1], [2]

2.2 Σύστημα κίνησης ηλεκτρικού οχήματος

Οι κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται τα ηλεκτρικά οχήματα είναι δύο: τα πλήρως ηλεκτρικά και τα υβριδικά οχήματα.

2.2.3 Ηλεκτρικό όχημα (EV)

Τα χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι ότι η πρόωση παρέχεται αποκλειστικά από έναν ή περισσότερους ηλεκτρικούς κινητήρες και ότι η πηγή ενέργειας είναι φορητή, χημικής ή ηλεκτρομηχανικής φύσης. [3]



Σχήμα 2.1: Σύστημα κίνησης ηλεκτρικού οχήματος

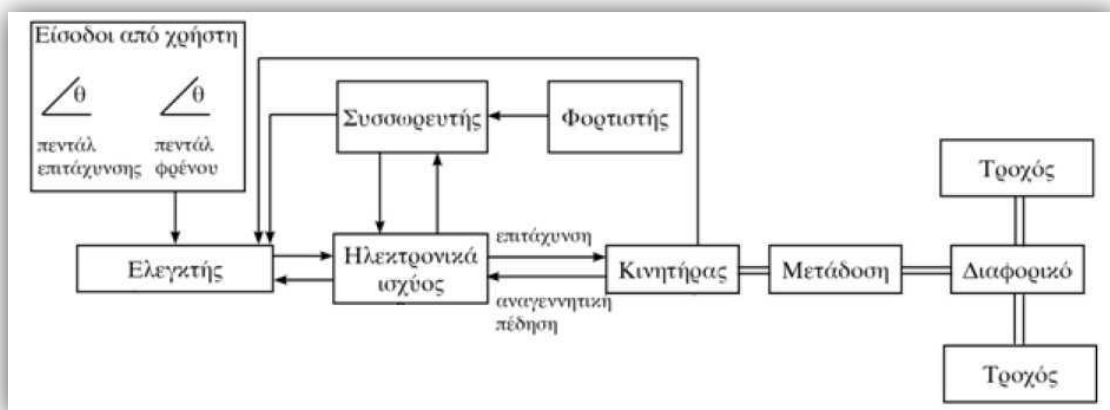
Το σχήμα 2.1 απεικονίζει το σύστημα κίνησης ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου το οποίο τροφοδοτείται από φορητή πηγή ενέργειας. Ο ηλεκτρικός και μηχανικός εξοπλισμός που μετατρέπει την ενέργεια της πηγής σε κινητική ενέργεια στον τροχό ονομάζεται σύστημα πρόωσης.

Τα υποσυστήματα του συστήματος κίνησης ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι ο κινητήρας, ο ελεγκτής και το σύστημα οδήγησης (μετατροπέας), η πηγή ενέργειας και η μετάδοση. Η αναλυτική δομή και η αλληλεπίδραση των συνιστωσών ενός τέτοιου συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 2.2.

Η παραδοσιακή πηγή ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων ήταν οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές, με βασικό τύπο αυτό των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος που προτιμήθηκε

λόγω του χαμηλού κόστους και της ανεπτυγμένης τεχνολογίας. Η ανάγκη για βελτιωμένα χαρακτηριστικά οδήγησε στην ανάπτυξη εναλλακτικών ειδών συσσωρευτών, με υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας και δυνατότητα παροχής μεγαλύτερης ισχύος, όπως επίσης με μεγαλύτερο αριθμό κύκλων φόρτισης - εκφόρτισης. Αναφέρονται ως παράδειγμα, οι συσσωρευτές νικελίου - καδμίου (NiCd), νικελίου μετάλλου - υδριδίου (NiMH), ιόντων λιθίου (LiON), λιθίου - ιόντων πολυμερών και οι εξελιγμένοι συσσωρευτές μολύβδου - οξέως.

Οι συσσωρευτές απαιτούν φόρτιση ώστε να ανακτήσουν το επίπεδο ενέργειας που είχαν πριν αυτή εξαντληθεί λόγω παροχής ισχύος στο φορτίο τους. Το γεγονός αυτό προσδίδει περιορισμένη αυτονομία κίνησης στο όχημα μεταξύ φορτίσεων, οι οποίες έχουν διάρκεια λίγων ωρών. Για να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα αναπτύσσονται εναλλακτικές πηγές ενέργειας όπως οι κυψέλες καυσίμου, οι οποίες είναι ένα ανοικτό θερμοδυναμικό σύστημα του οποίου τα αντιδρώντα εισάγονται εξωτερικά, σε αντίθεση με τους συσσωρευτές. Έχουν ήδη αναπτυχθεί και κατασκευαστεί οχήματα που τροφοδοτούνται από κυψέλη καυσίμου και αναμένεται να επεκταθεί η χρήση τους στο μέλλον. [2]



Σχήμα 2.2: Συστατικά μέρη συστήματος κίνησης

Ο κινητήρας του ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι σημαντικό υποσύστημα του συστήματος κίνησης και απαιτείται να πληροί προδιαγραφές μεγέθους, βάρους, κόστους, ακουστικού θορύβου, θερμοκρασιακής και μηχανικής αντοχής. Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται συνήθως σε ηλεκτρικά οχήματα είναι κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC), ασύγχρονοι κινητήρες και κινητήρες μονίμων μαγνητών. Σε κάθε περίπτωση η σχεδίαση είναι μια σύνθετη διαδικασία λόγω της αλληλεξάρτησης παραμέτρων οι οποίες καθορίζουν την επίδοση, την απόδοση και το κόστος του κινητήρα και κατά συνέπεια του οχήματος.

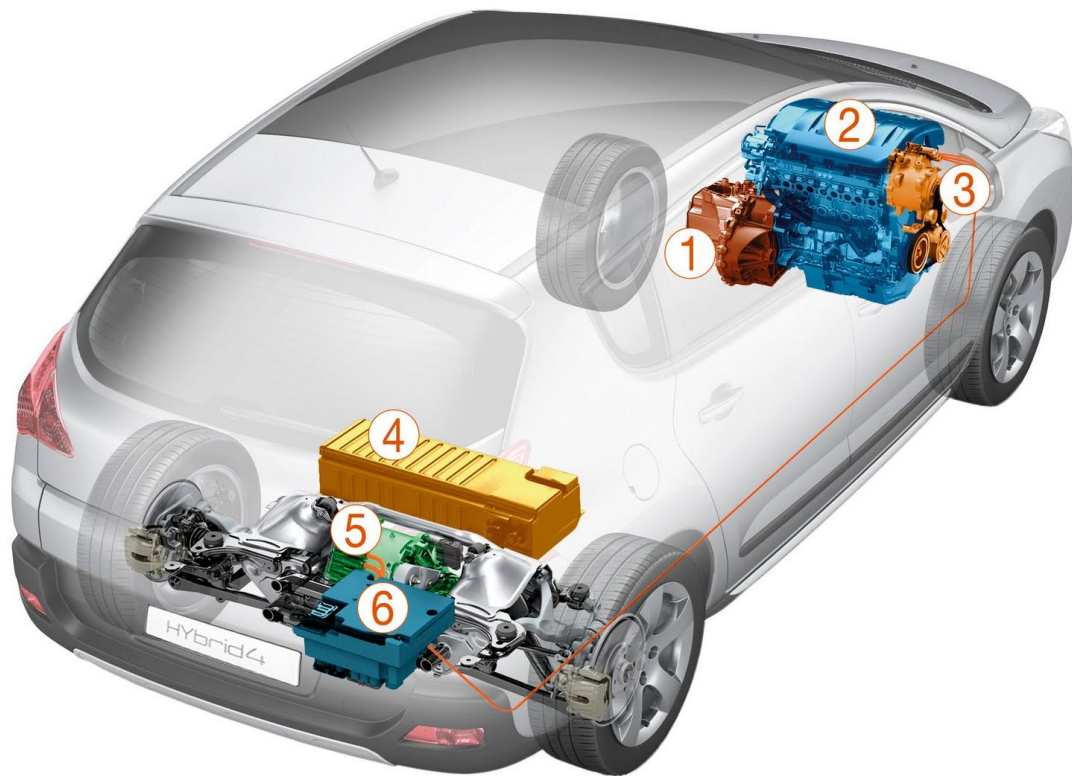
Ο ηλεκτρικός κινητήρας οδηγείται από μια μονάδα ηλεκτρονικών ισχύος ελεγχόμενων από μικροεπεξεργαστή ή ψηφιακό επεξεργαστή σήματος. Ο ρόλος αυτής της μονάδας είναι η

μετατροπή της συνεχούς τάσης της πηγής ενέργειας σε μεταβαλλόμενη τάση επιθυμητής συχνότητας αναλόγως του σημείου λειτουργίας του οχήματος. Η τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος είναι μια σημαντική παράμετρος στην εξέλιξη συστημάτων κίνησης υψηλής επίδοσης. Τα ηλεκτρονικά ισχύος και το κύκλωμα ελέγχου τείνουν να γίνονται ταχύτερα, αποδοτικότερα και μικρότερα σε μέγεθος. Η ψηφιακή επεξεργασία σήματος επιτρέπει την εφαρμογή σύνθετων αλγορίθμων ελέγχου με μεγάλη ακρίβεια και ταχύτητα.

2.2.4 Υβριδικό όχημα

Σε αντίθεση με το ηλεκτρικό αυτοκίνητο, το υβριδικό ηλεκτρικό διαθέτει τουλάχιστον μια πηγή ενέργειας και ένα μετατροπέα που μπορεί να μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια, όπως φαίνεται και στο *σχήμα 2.3*. Ανάλογα με τη λειτουργική κατάσταση, η πρόωση παρέχεται από δύο ή περισσότερα είδη πηγών ενέργειας. Το ηλεκτρικό υβριδικό αυτοκίνητο αποτελεί ουσιαστικά ένα συμβιβασμό ανάμεσα στα οφέλη του ηλεκτρικού αυτοκινήτου και στην αυξημένη εμβέλεια κίνησης που παρέχει το σύστημα κίνησης με κινητήρα εσωτερικής καύσης, ενώ θεωρείται ως βραχυχρόνια λύση μέχρι να λυθούν τα τεχνικοοικονομικά ζητήματα που δεν επιτρέπουν την μαζική παραγωγή και κυκλοφορία του ηλεκτρικού αυτοκινήτου.

Τα σύγχρονα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιούν τεχνολογίες που αυξάνουν την απόδοση, όπως είναι η αναγεννητική πέδηση, μέσω της οποίας η κινητική ενέργεια του οχήματος μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια για το συσσωρευτή. Μερικά υβριδικά οχήματα χρησιμοποιούν τον κινητήρα εσωτερικής καύσης που διαθέτουν ως γεννήτρια, με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρισμού είτε για την επαναφόρτιση των συσσωρευτών, είτε για την απευθείας τροφοδοσία του ηλεκτρικού κινητήρα. Επίσης, ανάλογα με το αν η σύνδεση των κινητηρίων υποσυστημάτων μεταξύ τους είναι σε σειρά, παράλληλα, ή συνδυασμό των δύο, τα υβριδικά οχήματα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες. Στη σύνδεση σε σειρά, ο κινητήρας εσωτερικής καύσης χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την κίνηση μιας ηλεκτρικής γεννήτριας και τη φόρτιση του συσσωρευτή. Ο ηλεκτρικός κινητήρας που τροφοδοτείται από το συσσωρευτή αυτό αποτελεί το μόνο κινητήρα που δίνει κίνηση στο σύστημα μετάδοσης. Στην παράλληλη σύνδεση υπάρχουν δύο είδη κινητήρων που παρέχουν πρόωση, ένας κινητήρας εσωτερικής καύσης και ένας ηλεκτρικός κινητήρας. Αυτή η σύνδεση παρουσιάζεται στο *Σχήμα 2.3*. Η ισχύς των δύο κινητήρων συνδυάζεται κατάλληλα ώστε να ικανοποιηθεί η απαίτηση ισχύος του οχήματος με μικρή κατανάλωση καυσίμου.



Σχήμα 2.3: Σύστημα κίνησης υβριδικού οχήματος (1. Κιβώτιο ταχυτήτων, 2. Μηχανή εσωτερικής καύσης, 3. Σύστημα απενεργοποίησης κινητήρα εσωτερικής καύσης, 4. Μπαταρίες, 5. Ηλεκτροκινητήρας, 6. Μονάδα διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας)

2.2.5 Συγκριτική παρουσίαση κινητήρων για ηλεκτρικά οχήματα

Οι γενικές προδιαγραφές που πρέπει να ικανοποιούνται από τους κινητήρες που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά οχήματα είναι υψηλή ροπή σε μικρές ταχύτητες, ευρεία περιοχή ταχυτήτων λειτουργίας υπό σταθερή ισχύ, υψηλή πυκνότητα ισχύος, υψηλή απόδοση, μικρό βάρος, χαμηλό κόστος, αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής με την ελάχιστη δυνατή ανάγκη για συντήρηση. Αφού πληρούνται αυτές οι προϋποθέσεις, επιλέγεται ο τύπος κινητήρα που είναι καταλληλότερος για την εκάστοτε εφαρμογή.

Ένας τύπος κινητήρα που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε ηλεκτροκίνητα οχήματα είναι ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος. Η τεχνολογική ωριμότητα και ο απλός έλεγχός τους υπερσχύουν σε κάποιες εφαρμογές έναντι της απαίτησης για συντήρηση και αντικατάσταση των ψηκτρών. Ωστόσο η αξιοπιστία των κινητήρων στα ηλεκτρικά οχήματα καθώς και η ανάγκη για εξάλειψη της ανάγκης για συντήρηση είναι πρωτεύουσας σημασίας. Τεχνολογικές εξελίξεις έχουν θέσει τους κινητήρες χωρίς σύστημα συλλέκτη και ψηκτρες στο προσκήνιο, επειδή έχουν μεγαλύτερη αξιοπιστία και χαμηλότερο λειτουργικό κόστος.

Ο κινητήρας επαγωγής είναι ένας τύπος κινητήρα με ευρεία εφαρμογή στα ηλεκτροκίνητα

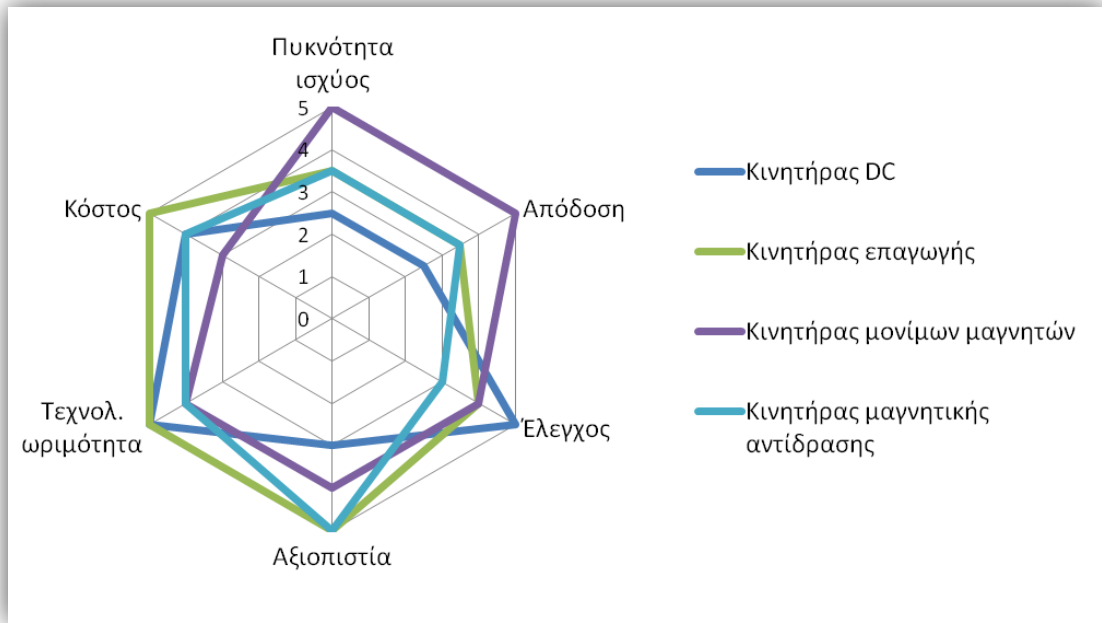
οχήματα, με κύριες αιτίες το μικρό κόστος, τον εύκολο έλεγχο και την υψηλή αξιοπιστία. Για την οδήγησή τους χρησιμοποιείται διάταξη αντιστροφέα με δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας για έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής.

Μια ακόμα εναλλακτική λύση που αναπτύσσεται όλο και περισσότερο είναι ο σύγχρονος κινητήρας με μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα. Με την αντικατάσταση του τυλίγματος πεδίου από μόνιμους μαγνήτες επιτυγχάνεται μείωση των απωλειών χαλκού και η έλλειψη ψηκτρών αυξάνει την αξιοπιστία. Οι κινητήρες αυτοί τροφοδοτούνται από ημιτονοειδή τάση, έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής, χαρακτηρίζονται από μεγάλη πυκνότητα ισχύος και υψηλή απόδοση.

Ένας άλλος τύπος μηχανής είναι οι σύγχρονοι κινητήρες μαγνητικής αντίδρασης οι οποίοι διαθέτουν ούτε τυλίγμα διέγερσης ούτε μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα, αλλά εκμεταλλεύονται αποκλειστικά τη ροπή εκτυπότητας. Αυτός ο τύπος μηχανής έχει το πλεονέκτημα της απλότητας κατασκευής και του μικρού κόστους, δεν έχει όμως την ικανότητα παροχής μεγάλης ισχύος εξόδου.

Επιπρόσθετα από τα παραπάνω είδη μηχανής, υπάρχει ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς συλλέκτη και ψήκτρες (Brushless DC). Οι κινητήρες αυτοί παρουσιάζουν επίσης υψηλό βαθμό απόδοσης και μεγάλη πυκνότητα ισχύος, ενώ δύνανται να παρέχουν υψηλές τιμές ροπής λόγω της ορθογώνιας μορφής της μαγνητικής ροής και του ρεύματος. Ένα μειονέκτημά τους είναι ότι απαιτείται ακριβής γνώση της θέσης του δρομέα για την οδήγησή τους, η οποία επιτυγχάνεται με αισθητήρες ή με τεχνικές υπολογισμού της θέσης του δρομέα από μετρήσεις των ηλεκτρικών μεγεθών. [2],[3]

Για την αξιολόγηση της καταλληλότητας των βασικών κατηγοριών κινητήρων που παρουσιάστηκαν παραπάνω χρησιμοποιείται ένα σύστημα βαθμολόγησης [2]. Αξιολογούνται έξι βασικά χαρακτηριστικά των κινητήρων και η κλίμακα εκτείνεται από το ένα ως το πέντε. Όπως φαίνεται στο *σχήμα 2.4*, οι κινητήρες επαγωγής προσφέρονται για χρήση σε τέτοιου είδους οχήματα. Οι κινητήρες μονίμων μαγνητών επίσης ενδείκνυνται για τέτοιες εφαρμογές, καθώς εμφανίζουν υψηλή απόδοση και αποκτούν μεγαλύτερη οικονομοτεχνική βιωσιμότητα καθώς το κόστος των μονίμων μαγνητών μειώνεται. Μια σημαντική ανακάλυψη που επέφερε τη μείωση του κόστους των μονίμων μαγνητών είναι αυτή του κράματος Νεοδημίου – Σιδήρου - Βορίου το 1982, η οποία έδωσε στην αγορά φθηνότερους μαγνήτες ενώ παράλληλα οι μαγνήτες Νεοδυμίου είναι μέχρι σήμερα οι πιο ισχυροί που κυκλοφορούν.



Σχήμα 2.4 Αξιολόγηση κινητήρων ηλεκτρικών οχημάτων

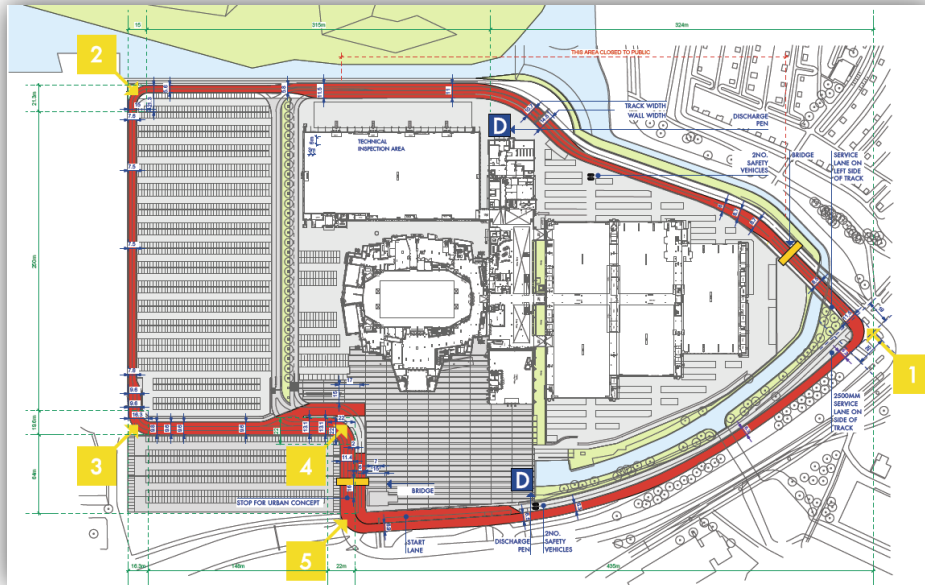
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΙΣΥΧΟΣ 220W

3.1 Προδιαγραφές συστήματος κίνησης

Ο κινητήρας που θα σχεδιαστεί πρόκειται να ενσωματωθεί στο ερευνητικό όχημα "Πυρφόρος" που θα συμμετάσχει στον διαγωνισμό εξοικονόμησης καυσίμου Shell Eco Marathon. Βάσει της συγκεκριμένης εφαρμογής θα προσδιοριστούν και οι προδιαγραφές του κινητήρα. Απαραίτητα χαρακτηριστικά του τελευταίου πρέπει σε γενικές γραμμές να είναι το χαμηλό βάρος και η υψηλή απόδοση, χωρίς να μας ενδιαφέρουν παράγοντες όπως η υψηλή επίδοση ή η λειτουργία σε υψηλές στροφές.

3.1.1 Απαιτήσεις αγώνα και πολιτική εξοικονόμησης καυσίμου

Πιο συγκεκριμένα, ο "Πυρφόρος" θα καλεστεί να διανύσει στην πίστα του "Ahoj" (σχήμα 3.1) στο Ρότερνταμ 16,3 km σε λιγότερα από 39 λεπτά. Δεν υπάρχουν περιορισμοί ως προς τις επιταχύνσεις ή την ταχύτητα που πρέπει να διατηρήσει, παρά μόνο ως προς την απόσταση και τον χρόνο. Η κλίση του δρόμου είναι μηδενική και η μορφολογία της πίστας έχει στροφές κάθετες αλλά με μεγάλο πλάτος δρόμου. Η εμπειρία οδήγησης στην πίστα κατά τα προηγούμενα έτη έχει δείξει ότι δεν χρειάζεται να μειώνει ταχύτητα ο "Πυρφόρος" για να διέλθει από τις στροφές.

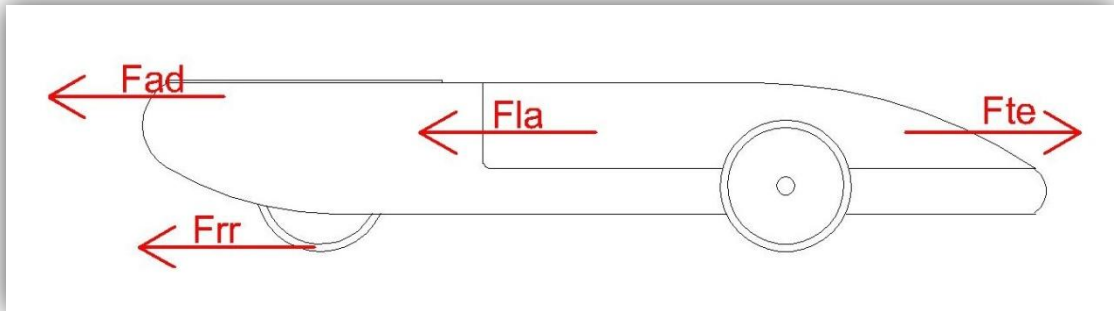


Σχήμα 3.1: Ahoy circuit στο Rotterdam της Ολλανδίας

Το όχημα στην κίνηση του θα αντιμετωπίσει δύο ειδών απώλειες λόγω ταχύτητας. Πρώτον, θα συναντήσει την αντίσταση του αέρα, η οποία είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας. Δεύτερον, θα εμφανιστούν τριβές ολίσθησης στα ελαστικά και στους άξονες του συστήματος κίνησης. Για να ελαχιστοποιηθούν αυτές οι απώλειες θα πρέπει το όχημα να διατηρήσει την ελάχιστη ταχύτητα που θα του επιτρέψει να καλύψει την δεδομένη απόσταση στον επιτρεπτό χρόνο. Συνεπώς, το όχημα θα διατηρήσει μία μέση ταχύτητα περίπου 25km/h. Η χρονική διάρκεια της επιτάχυνσης κατά την εκκίνηση θα πρέπει να είναι μεγάλη προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα μεταβατικά φαινόμενα στον κινητήρα αλλά και οι καταπονήσεις στους άξονες των τροχών που με την σειρά τους θα επιφέρουν απώλειες. Με δεδομένη αυτήν την πολιτική εξοικονόμησης καυσίμου, θα γίνει και ο σχεδιασμός του βέλτιστου κινητήρα, προκειμένου να επιτύχουμε το ελάχιστο δυνατό βάρος αυτού.

3.1.2 Επιθυμητή επίδοση συστήματος κίνησης

Για έναν ακριβή υπολογισμό των δυνάμεων που θα πρέπει να υπερνικήσει ο κινητήρας, οφείλουμε να καταστρώσουμε μία εξίσωση που να περιγράφει τις δυνάμεις πρόωσης και τριβών όπως φαίνονται στο σχήμα 3.2:



Σχήμα 3.2: Κατανομή δυνάμεων που ασκούνται στο όχημα

Η συνολική δύναμη πρόωσης υπολογίζεται από το άθροισμα όλων των συνιστωσών που φαίνονται στην παραπάνω εικόνα, δηλαδή θα είναι:

$$F_{te} = F_{la} + F_{rr} + F_{ad} \quad (3.1)$$

Όπου: F_{la} η δύναμη ευθύγραμμης επιτάχυνσης (με την φορά αδράνειας εδώ),

F_{rr} η αντίσταση κύλισης και

F_{ad} η οπισθέλκουσα δύναμη από αεροδυναμικές τριβές. [6]

Αν εξετάσουμε κάθε όρο ξεχωριστά θα μπορέσουμε να εξάγουμε κάποιες ενδεικτικές τιμές για κάθε δύναμη.

Η δύναμη ευθύγραμμης επιτάχυνσης δίνεται από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα:

$$F_{la} = m \cdot a \quad (3.2)$$

Το βάρος του φετινού βελτιωμένου οχήματος υπολογίζεται να οριστικοποιηθεί, μετά και τις τελευταίες βελτιώσεις, περίπου στα 30 κιλά. Μαζί με το βάρος της οδηγού, ο κινητήρας θα έχει συνολικό φορτίο περίπου 80 κιλά. Η επιτάχυνση μπορεί να οριστεί βάσει της πολιτικής που θα ακολουθηθεί στον αγώνα. Επειδή δεν μας ενδιαφέρει ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας να είναι γρήγορος, θα επιλέξουμε έναν αργό, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η επιθυμητή επίδοση του κινητήρα και κατ' επέκταση το βάρος του. Θέτουμε λοιπόν σαν προδιαγραφή να είναι σε θέση να λάβει την ονομαστική του ταχύτητα το όχημα μέσα σε 30 δευτερόλεπτα. Άρα:

$$\alpha = \frac{25 \frac{km}{h} - 0 \frac{km}{h}}{30 s} = \frac{6,94 \frac{m}{s}}{30 s} = 0,23 \frac{m}{s^2} \quad (3.3)$$

Συνεπώς η δύναμη ευθύγραμμης επιταχύνσεως θα είναι:

$$F_{la} = m \cdot a = 80kg \cdot 0,23 \frac{m}{s^2} = 18,4 N \quad (3.4)$$

Η αντίσταση κύλισης αποδίδεται κυρίως στην αντίσταση των ελαστικών κατά την κύλιση. Η τριβή στα έδρανα ολίσθησης των τροχών παίζει επίσης το ρόλο της. Η αντίσταση κύλισης, η οποία είναι πρακτικά σταθερή και ανεξάρτητη της ταχύτητας του οχήματος, είναι ανάλογη του βάρους. Η εξίσωση της είναι η εξής:

$$F_{rr} = \mu_{rr} \cdot m \cdot g \quad (3.5)$$

Όπου μ_{rr} είναι ο συντελεστής αντίστασης κύλισης. Κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν το συντελεστή μ_{rr} είναι ο τύπος και η πίεση του ελαστικού. Η αντίσταση κύλισης μειώνεται δραστικά με την αύξηση της πίεσης των ελαστικών, ωστόσο μειώνεται σημαντικά η ποιότητα κύλισης του οχήματος λόγω της αύξησης των κραδασμών. Τυπικές τιμές του μ_{rr} είναι μεταξύ 0,015 για συμβατικά ελαστικά και 0,005 για λάστιχα ειδικού τύπου κατασκευασμένα για ηλεκτρικά οχήματα. Ο "Πυρφόρος" φέρει ειδικά ελαστικά χαμηλής αντίστασης κύλισης της Michelin που κατασκευάζονται για τις ανάγκες του αγώνα και λειτουργούν υπό υψηλή πίεση αέρα, οπότε επιλέγοντας ως τιμή του συντελεστή το 0,005, η αντίσταση κύλισης θα είναι ίση με:

$$F_{rr} = 0,005 \cdot 80kg \cdot 9,78 \frac{m}{s^2} = 3,9 N \quad (3.6)$$

Η τελευταία συνιστώσα της δύναμης πρόωσης είναι η αεροδυναμική αντίσταση. Η αεροδυναμική αντίσταση οφείλεται στην τριβή του οχήματος με τον αέρα, καθώς κινείται με ταχύτητα. Σε αυτή την συνάρτηση, η μετωπική επιφάνεια καθώς και οι προεξοχές, όπως καθρέπτες, αεραγωγοί, αεροτομές και άλλοι παρόμοιοι παράγοντες επηρεάζουν σημαντικά την τιμή της. Έχουμε λοιπόν:

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^2 \quad (3.7)$$

Όπου, ρ είναι η πυκνότητα του αέρα,

A η μετωπική επιφάνεια,

C_d ο συντελεστής οπισθέλκουσας δύναμης,

v η ταχύτητα του οχήματος.

Μία τυπική τιμή πυκνότητας αέρα στους $20^\circ C$ είναι $1,2 \frac{kg}{m^3}$. Η μετωπική επιφάνεια του "Πυρφόρου" είναι περίπου $580000 mm^2$ ή $0,58 m^2$. Όσον αφορά τον συντελεστή οπισθέλκουσας δύναμης, αυτός είναι δύσκολο να υπολογιστεί, γιατί πρέπει είτε να επιλυθεί μέσω κάποιου μοντέλου για την ακριβή γεωμετρία του οχήματος ή αυτό να τοποθετηθεί σε αεροδυναμική σήραγγα και να βρεθεί πειραματικά η τιμή του. Κανένας από τους δύο τρόπους δεν είναι διαθέσιμος οπότε μπορούμε να κάνουμε μία λογική εκτίμηση. Ο συντελεστής αυτός εμφανίζει τιμές γύρω από το 0,3 για ένα μέσο οικογενειακό αυτοκίνητο. Δεδομένου ότι ο πυρφόρος έχει αεροδυναμικότερο σχήμα από ένα τυπικό αυτοκίνητο, μπορούμε να εκλάβουμε ως μέγιστη τιμή του συντελεστή την τιμή 0,3. Αυτή η εκτίμηση δεν βλάπτει την ακρίβεια των υπολογισμών μας, καθώς στην προκειμένη περίπτωση θέλουμε να εξασφαλίσουμε απλώς την ελάχιστη επίδοση που θα πρέπει να έχει ο ηλεκτροκινητήρας, οπότε μία τιμή δύναμης μεγαλύτερη από την πραγματική, μας δίνει περισσότερη ασφάλεια. Συνεπώς έχουμε:

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,58 m^2 \cdot 0,3 \cdot 6,94 \frac{m}{s} = 0,7 N \quad (3.8)$$

Τελικώς, η συνολική δύναμη πρόωσης που θα πρέπει να εξασφαλίζει ο κινητήρας είναι:

$$F_{te} = F_{la} + F_{rr} + F_{ad} = 18,4N + 3,9N + 0,7N = 23 N \quad (3.9)$$

Πρέπει τέλος να σημειώσουμε ότι οι δυνάμεις αυτές δεν μπορούν σε καμία περίπτωση να αποτελέσουν ακριβή υπολογισμό, αλλά μπορούν κάλλιστα να αποτελέσουν μία ένδειξη για την επίδοση που θα πρέπει να έχει ο κινητήρας που θα κατασκευαστεί. Επίσης, οι δυνάμεις

αυτές δεν εμφανίζονται ταυτόχρονα στην κίνηση του οχήματος. Η δύναμη F_{la} εμφανίζεται μόνο κατά την διαδικασία της επιτάχυνσης, η F_{rr} εμφανίζεται πάντοτε και η F_{ad} μόνο κατά την μέγιστη και μόνιμη ταχύτητα αγώνα του οχήματος. Ειδικά η F_{ad} είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας. Βέβαια, όταν το όχημα θα πλησιάζει την ονομαστική του ταχύτητα στη φάση της επιτάχυνσης, θα απαιτηθούν οριακά τα 23 N.

Πριν προχωρήσουμε στην προκαταρκτική σχεδίαση του κινητήρα καλό θα ήταν να γίνει μία σημαντική παρατήρηση που θα βοηθήσει στην κατανόηση της εργασίας σε μεταγενέστερο επίπεδο. Βλέπουμε ότι η μέγιστη δύναμη που απαιτείται κατά την εκκίνηση θα είναι 23N, η οποία θα διαρκέσει για μισό λεπτό. Τα υπόλοιπα 38,5 λεπτά του αγώνα ο "Πυρφόρος" θα κινηθεί έχοντας να υπερνικήσει 4,6N τριβών. Δηλαδή στο 98,7% του χρόνου θα απαιτηθεί δύναμη πρόωσης που θα είναι το 20% της μέγιστης. Βάσει αυτής της παρατήρησης θα γίνει ειδική μέριμνα μετέπειτα στην βελτιστοποίηση του κινητήρα.

3.1.3 Σύστημα κίνησης

Το σύστημα κίνησης του πυρφόρου, όπως προαναφέρθηκε, θα αποτελείται από έναν κινητήρα τροχό. Πιο συγκεκριμένα, ο στάτης του κινητήρα θα είναι αναρτημένος στο αμάξωμα και ο δρομέας θα είναι ένα σώμα με τον πίσω τροχό κίνησης. Η ακτίνα του πίσω τροχού μαζί με το ελαστικό είναι 239 mm. Γνωρίζοντας ότι η δύναμη πρόωσης των 23N θα πρέπει να ασκηθεί στην άκρη του ελαστικού μπορούμε να εξάγουμε την επιθυμητή ροπή που θα πρέπει να έχει ο κινητήρας:

$$T_{max} = F_{te} \cdot r_{wheel} = 23N \cdot 0,239m = 5,5 Nm \quad (3.10)$$

Αυτή η ροπή είναι η μέγιστη που θα απαιτηθεί, θεωρητικά, από τον κινητήρα κατά την φάση της επιτάχυνσης στην αρχή του αγώνα. Στην μόνιμη κατάσταση κατά την οποία θα κινείται με σταθερή ταχύτητα το όχημα, η απαίτηση ροπής από τον κινητήρα θα είναι:

$$T_{mean} = 4,6 N \cdot 0,239 m = 1,1 Nm \quad (3.11)$$

Συνεπώς, ο κινητήρας θα πρέπει να διαστασιολογηθεί για απόδοση ροπής τουλάχιστον 5,5 Nm. Ωστόσο, είναι πολύ πιθανό να υπάρξουν αστάθμητοι παράγοντες, όπως για παράδειγμα ενδεχόμενες τριβές στο σύστημα κίνησης που δεν μπορούν να υπολογιστούν, ή

κάποια αποτυχημένη ζυγοστάθμιση που θα οδηγήσει σε συνεχή ολίσθηση μέρος των ελαστικών ή κάποια κατασκευαστική αστοχία στον κινητήρα που θα μειώσει την απόδοση του. Γι' αυτόν τον λόγο θα προσθέσουμε στην επιθυμητή επίδοση ακόμα $2 Nm$ ροπής (δηλαδή το διπλάσιο της αντίδρασης ροπής που προκαλούν οι τριβές), εξασφαλίζοντας έτσι ότι θα λειτουργήσει ο κινητήρας ακόμα και υπό απρόβλεπτες συνθήκες.

3.2 Προκαταρκτική σχεδίαση

Στην προηγούμενη ενότητα έγινε εκτενής ανάλυση της δύναμης πρόωσης που θα πρέπει να ασκείται στο όχημα και την κατανομή αυτής στο χρόνο. Αυτή η δύναμη πρόωσης πρέπει να μεταφραστεί τώρα σε ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη προκειμένου να γίνει η προκαταρκτική σχεδίαση του ηλεκτρικού κινητήρα. Συνοψίζοντας λοιπόν τα συμπεράσματα της προηγούμενης ενότητας έχουμε:

- Η μέση ταχύτητα του οχήματος είναι $v_{mean} = 25 \frac{km}{h} = 6,95 \frac{m}{s}$
- Η ακτίνα του κινητήριου τροχού είναι $r = 0,239 m$

Άρα η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα-τροχού θα είναι:

$$\omega_m = \frac{v_{mean}}{r} = \frac{6,95 \frac{m}{s}}{0,239 m} = 29,1 \frac{rad}{s} \quad (3.12)$$

Και οι ονομαστικές στροφές:

$$n = \frac{\omega_m \cdot 60}{2 \cdot \pi} = \frac{29,1 \cdot 60}{2 \cdot \pi} rpm = 278 rpm \quad (3.13)$$

Η ονομαστική ισχύς του κινητήρα αποτελεί το γινόμενο της επιθυμητής επίδοσης ροπής επί την γωνιακή ταχύτητα με την οποία θα στρέφεται ο δρομέας της μηχανής:

$$P_{el} = T_{el} \cdot \omega_m = 7,5 Nm \cdot 29,1 \frac{rad}{s} = 218,25 W \cong 220 W \quad (3.14)$$

3.2.1 Διαστασιολόγηση διακένου

Η ροπή διακένου T_e μπορεί να υπολογισθεί με βάση τη μέση εφαπτομενική πίεση των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο και την επιφάνεια του διακένου A . Συνεπώς έχουμε:

$$F_t = P_t \cdot A \quad (3.15)$$

$$T_e = \frac{1}{2} \cdot D \cdot F_t \quad (3.16)$$

Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω εξισώσεις παίρνουμε:

$$T_e = \frac{\pi}{2} \cdot D^2 \cdot L \cdot P_t \quad (3.17)$$

όπου, D είναι η διάμετρος του διακένου και

L το ενεργό μήκος της μηχανής.

Η μέση μαγνητική δύναμη στο διάκενο υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$F_t = L \cdot \oint_C B_n H_t dl = \frac{L}{\mu_0} \cdot \oint_C B_n B_t dl \quad (3.18)$$

Εφόσον η επιφάνεια διακένου είναι $A = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right) \cdot L = \pi \cdot D \cdot L$, η μέση πίεση των εφαπτομενικών δυνάμεων στο διάκενο εκφράζεται ως εξής:

$$P_t = \frac{1}{\pi \cdot D \cdot \mu_0} \cdot \oint_C B_n H_t dl \quad (3.19)$$

Η μέση μαγνητική φόρτιση λαμβάνεται στο διάκενο $\bar{B} = 0,5 T$, εφόσον πρόκειται για εφαρμογή υψηλής απόδοσης. Θεωρώντας γωνία μεταξύ της ακτινικής συνιστώσας και της εφαπτομενικής, τις 45° , έχουμε:

$$B_n = B_t = B \cdot \sin\theta = 0,5 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cong 0,354 \quad (3.20)$$

Αντικαθιστώντας, μπορούμε να βρούμε και την τιμή της εφαπτομενικής πίεσης:

$$P_t = \frac{B_n \cdot B_t \cdot \pi \cdot D}{\pi \cdot D \cdot \mu_0} = \frac{B_n \cdot B_t}{\mu_0} = \frac{0,354^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cong 100 \frac{kN}{m^2} \quad (3.21)$$

Από την σχέση (3.17) έχουμε:

$$D^2 \cdot L = \frac{2 \cdot T_e}{\pi \cdot P_t} = \frac{2 \cdot 7,5}{\pi \cdot 100.000} m^3 \cong 47750 mm^3 \quad (3.22)$$

Συνεπώς μπορούμε να επιλέξουμε οποιαδήποτε τιμή D και L που να ικανοποιεί αυτή την συνθήκη. Η τελική διαστασιολόγηση του διακένου προκύπτει από τη διενέργεια της πεδιακής μελέτης και λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς που θέτει η κατασκευή του κινητήρα. Γνωρίζοντας τις διαστάσεις και του υφιστάμενου κινητήρα, ο οποίος είχε κατασκευαστεί για την ίδια εφαρμογή, είναι λογικό να κινηθούν οι διαστάσεις του νέου κινητήρα σε ανάλογα πλαίσια. Ξεκινώντας λοιπόν από τις υφιστάμενες διαστάσεις, τις μικραίνουμε σταδιακά ώσπου να φτάσουμε σε έναν κινητήρα που να αποδίδει την απαιτούμενη ροπή. Ύστερα από δοκιμές καταλήγουμε στις εξής διαστάσεις:

$$L = 37 mm \quad (3.23)$$

$$D = 110 mm \quad (3.24)$$

Όσον αφορά το πλάτος του διακένου, θα πρέπει να έχει την ελάχιστη δυνατή τιμή προκειμένου να επιτευχθεί η υψηλότερη δυνατή απόδοση. Εκτιμάται ότι το ελάχιστο διάκενο που μπορεί να επιτευχθεί κατά την κατασκευή και ταυτόχρονα να εξασφαλίζει την αξιοπιστία του κινητήρα είναι:

$$g = 0,7 mm \quad (3.25)$$

3.2.2 Μελέτη στάτη

Η επιλογή ονομαστικής συχνότητας λειτουργίας και αριθμού πόλων σχετίζεται με την μηχανική ταχύτητα περιστροφής στη μόνιμη κατάσταση:

$$\omega_m = \frac{4 \cdot \pi \cdot f_{el}}{P} \quad (3.26)$$

όπου, P ο αριθμός πόλων του κινητήρα και

f_{el} η συχνότητα λειτουργίας.

Λύνοντας ως προς το λόγο P/f , προκύπτει η σχέση των πόλων με την συχνότητα λειτουργίας:

$$\frac{P}{f_{el}} = 0,432 \quad (3.27)$$

Μπορούμε σε αυτό το σημείο να κατασκευάσουμε έναν πίνακα που βάσει του αριθμού των πόλων να μας δίνει την αντίστοιχη τιμή της συχνότητας στην ονομαστική κατάσταση.

| P | f_{el} (Hz) |
|-----|---------------|
| 8 | 18,5 |
| 10 | 23,1 |
| 12 | 27,8 |
| 14 | 32,4 |
| 16 | 37,0 |
| 18 | 41,7 |
| 20 | 46,3 |
| 22 | 50,9 |

Πίνακας 3.1: Σχέση μεταξύ συχνότητας λειτουργίας και πολικού αριθμού

Ο λόγος που ξεκινήσαμε από το νούμερο 8 όσον αφορά το πλήθος των πόλων και σταματήσαμε στο νούμερο 22 δεν είναι τυχαίος. Δεν μας συμφέρει να έχουμε συχνότητα χαμηλότερη από 20Hz για λόγους αξιοποίησης υλικού ή μεγαλύτερη από 50Hz εφόσον χρησιμοποιούμε λαμαρίνα χαμηλών απωλειών ίσης ονομαστικής συχνότητας. Σε πρώτη φάση δεν μπορούμε να αποφανθούμε για τον κατάλληλο αριθμό πόλων της εφαρμογής, καθώς αυτός θα προκύψει αργότερα μέσω προσομοιώσεων συνυπολογίζοντας και τον αριθμό των αυλακών του στάτη. Προς το παρόν, όμως, για να συνεχίσουμε την προκαταρκτική σχεδίαση θα υποθέσουμε έναν αριθμό πόλων με τον οποίο θα ολοκληρώσουμε την προκαταρκτική μας σχεδίαση και θα ξεκινήσουμε τις προσομοιώσεις. Έστω ο αριθμός 16 που βρίσκεται περίπου στην μέση του πίνακα και αντιστοιχεί στα 37Hz.

Η μέση ροή ανά πόλο υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\Phi = \frac{B_{av} \cdot \pi \cdot L \cdot D}{P} = \frac{0,5 \cdot \pi \cdot 37mm \cdot 110mm}{16} = 0,399 mWb \quad (3.28)$$

Οι σπείρες των πηνίων κάθε φάσης δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$N_i = \frac{V_{rms}}{4,44 \cdot f \cdot \frac{P}{2} \cdot \Phi} \quad (3.29)$$

Όπου, V_{rms} είναι η rms τάση της τροφοδοσίας.

Συνεπώς,

$$N_i = \frac{11V}{4,44 \cdot 37Hz \cdot 8 \cdot 0,399mWb} \cong 21 \quad (3.30)$$

Η ενεργός τιμή του ρεύματος δίνεται από τη σχέση:

$$I_{rms} = \frac{Pel}{3 \cdot V_{rms} \cdot \cos\varphi} = \frac{220W}{3 \cdot 11V \cdot 0,8} = 8,33A \quad (3.31)$$

, όπου έγινε η υπόθεση πως ο κινητήρας λειτουργεί με συντελεστή ισχύος 0,8 επαγωγικό.

Η μαγνητεγερτική δύναμη δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$ME\Delta = I_{rms} \cdot N_i = 8,33A \cdot 21 \cong 175 A - \varepsilon \quad (3.32)$$

Η αναγκαία διατομή αύλακος που θα δημιουργήσει την παραπάνω ΜΕΔ υπολογίζεται με κριτήριο τη μέγιστη πυκνότητα ρεύματος χωρίς εξαναγκασμένη ψύξη, η οποία ισούται με $J = 4 \frac{A}{mm^2}$. Συνεπώς, η ελάχιστη ενεργή διατομή αύλακος υπολογίζεται ως εξής:

$$A_{cu} = \frac{ME\Delta}{J} = \frac{175 A - \varepsilon}{4 \frac{A}{mm^2}} = 43,75 mm^2 \quad (3.33)$$

Θεωρώντας συντελεστή αξιοποίησης της αύλακος ίσο με 0,5, η συνολική διατομή κάθε αύλακος θα πρέπει να είναι τουλάχιστον:

$$A_{slot} = \frac{A_{cu}}{0,5} = 87,5 mm^2 \quad (3.34)$$

Υπολογισμός ειδικών φορτίσεων

Όσον αφορά την ειδική μαγνητική φόρτιση, αυτή έχει καθοριστεί να είναι

$$B_{av} = 0,5T \quad (3.35)$$

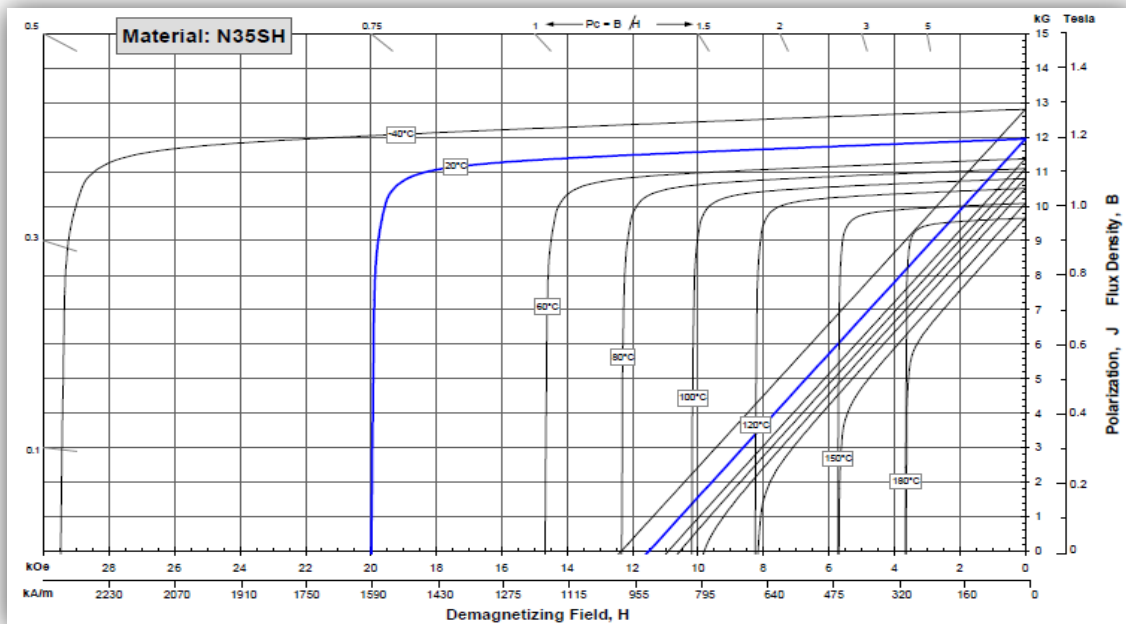
Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση υπολογίζεται ως εξής:

$$a_c = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_i \cdot \frac{P}{2} \cdot I_{rms}}{\pi \cdot D} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 21 \cdot 8 \cdot 8,33A}{3,14 \cdot 110mm} = 24.310 \frac{A - \varepsilon}{m} \quad (3.36)$$

3.2.3 Μελέτη δρομέα

Η γεωμετρική διαμόρφωση του δρομέα καθορίζεται από την ανάγκη για χαμηλές απώλειες πυρήνα και δινορρευσμάτων. Επιλέγεται δρομέας επιφανειακών μαγνητών γιατί παρουσιάζει αμελητέες απώλειες πυρήνα, καθώς ο επιφανειακός μαγνήτης επιβάλλει σχεδόν σταθερή μαγνητική επαγωγή στο σώμα του σιδήρου. Οι μαγνήτες κράματος Νεοδυμίου - Σιδήρου - Βορίου (NdFeB) επιλέγονται ως υλικό, γιατί έχουν τη μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας από τις υπόλοιπες εναλλακτικές του εμπορίου. Παρουσιάζουν μέτρια θερμοκρασιακή συμπεριφορά, αλλά στη συγκεκριμένη εφαρμογή υψηλής απόδοσης δεν αναμένονται υψηλές θερμοκρασίες.

Οι διαστάσεις που θα πρέπει να έχουν οι μαγνήτες και τα κριτήρια με τα οποία θα γίνει επιλογή, περιγράφονται σε επόμενη ενότητα. Στο σημείο αυτό αναφέρεται ότι η καλή αξιοποίηση του μαγνήτη έγκειται στη λειτουργία του σε περιοχή κοντά στο σημείο μέγιστης ενέργειας στην καμπύλη απομαγνήτισης. Η καμπύλη απομαγνήτισης των μαγνητών αυτών είναι σχεδόν ευθεία γραμμή, διευκολύνοντας τον υπολογισμό του σημείου που αποδίδουν τη μέγιστη ενέργεια, αρκεί να είναι γνωστά η παραμένουσα μαγνήτιση B_r , και το μαγνητικό πεδίο επαναφοράς H_c . Ο μαγνήτης δίνει τη μέγιστη ενέργεια όταν $B_d = 0.64 T$ και $H_d = 497 kA/m$, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αυτή θα πρέπει να είναι η πυκνότητα μαγνητικής ροής στην επιφάνεια του μαγνήτη κατά την ονομαστική λειτουργία του κινητήρα. Άρα, στο κενό φορτίο, η μαγνητική επαγωγή θα πρέπει να είναι λίγο αυξημένη, έστω $B_{nl} = 0,7 T$.



Σχήμα 3.3 Καμπύλη απομαγνήτισης μαγνητών N40

Για επαλήθευση, λογαριάζεται μέσω της ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης και της καμπύλης απομαγνήτισης ποια θα είναι η επιρροή του πεδίου του στάτη στη μαγνητική επαγωγή του μαγνήτη. Συγκεκριμένα, η ειδική ηλεκτρική φόρτιση είναι:

$$ac = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_i \cdot \frac{P}{2} \cdot I_{rms}}{\pi \cdot D} = 24.310 \frac{A \cdot \varepsilon}{m} \quad (3.37)$$

Θεωρώντας την καμπύλη απομαγνήτισης ως ευθεία γραμμή, έχουμε την εξής εξίσωση περιγραφής της:

$$H(B) = \frac{929,3}{1,28} \cdot B - 929,3 = 726 \cdot B - 929,3 \quad (3.38)$$

όπου H σε kA/m και B σε Tesla.

Με χρήση της παραπάνω εξίσωσης συσχετισμού μαγνητεγερτικής δύναμης και πυκνότητας μαγνητικής ροής, συμπεραίνεται ότι στην ονομαστική φόρτιση η πυκνότητα μαγνητικής ροής στην επιφάνεια του μαγνήτη μειώνεται κατά:

$$\Delta B = \frac{ac}{726} = 0,034 \quad (3.39)$$

Επομένως, σε κάθε περίπτωση, ο μαγνήτης θα χρησιμοποιείται κοντά στο σημείο μέγιστης ενέργειας, με περιθώριο μικρής αύξησης της ενέργειάς του ακόμα και σε περίπτωση υπερφόρτισης.

3.2.4 Επιλογή τύπου τυλίγματος, αριθμού πόλων και αριθμού αυλακών

Οι κινητήρες μονίμων μαγνητών με συγκεντρωμένα μη επικαλυπτόμενα τυλίγματα κλασματικού βήματος παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους κινητήρες κατανεμημένου τυλίγματος πλήρους βήματος. Τέτοια πλεονεκτήματα είναι οι μειωμένες απώλειες χαλκού, τα κοντά άκρα τυλίγματος, η χαμηλή ροπή ευθυγράμμισης, η ημιτονοειδής ηλεκτρεγερτική δύναμη, η επίτευξη μεγαλύτερου συντελεστή πληρότητας και η κατασκευαστική ευκολία. Έτσι, λοιπόν, επιλέχθηκε η υλοποίηση του κινητήρα με συγκεντρωμένο τύλιγμα κλασματικού βήματος διότι με αυτόν τον τρόπο μπορεί να αποφευχθεί και η τοπολογία πεπλατυσμένων δοντιών του στάτη.

Στη συνέχεια, γίνεται η επιλογή του αριθμού στρώσεων του τυλίγματος. Υπάρχουν τα τυλίγματα μονής στρώσης, στα οποία τα πηνία τυλίγονται γύρω από εναλλασσόμενα δόντια, καθώς και διπλής στρώσης, όπου τα πηνία τυλίγονται γύρω από κάθε δόντι. Στον παρακάτω πίνακα (3.2) παρουσιάζεται μία απλή σύγκριση του τυλίγματος μονής στρώσης με το τύλιγμα διπλής στρώσης. [5]

| | Τύλιγμα μονής στρώσης | Τύλιγμα διπλής στρώσης |
|--|------------------------------|-------------------------------|
| Θεμελιώδης συντελεστής τυλίγματος | υψηλότερος | χαμηλότερος |
| Άκρα τυλίγματος | μακρύτερα | κοντύτερα |
| Συντελεστής πληρότητας αύλακας | υψηλότερος | χαμηλότερος |
| Αυτεπαγωγές | υψηλότερες | χαμηλότερες |
| Αμοιβαίες Επαγωγές | χαμηλότερες | υψηλότερες |
| EMF | πιο τραπεζοειδής | πιο ημιτονοειδής |
| Αρμονικό περιεχόμενο MMF | υψηλότερο | χαμηλότερο |
| Απώλειες δινορρευμάτων μόνιμου μαγνήτη | υψηλότερες | χαμηλότερες |
| Δυνατότητα παροχής ροπής σε υπερφόρτιση | υψηλότερη | χαμηλότερη |

Πίνακας 3.2: Σύγκριση χαρακτηριστικών τυλίγματος απλής και διπλής στρώσης

Οι μηχανές με κλασματικό βήμα μονής στρώσης τείνουν να έχουν υψηλές αρμονικές χώρου στην κατανομή της ΜΕΔ λόγω του μικρού αριθμού αυλακών ανά πόλο ανά φάση. Αυτές οι αρμονικές προκαλούν επιπλέον απώλειες, λόγω των δινορρευμάτων στον πυρήνα. Τοποθετώντας πολλαπλές στρώσεις τυλίγματος επιτυγχάνεται η μείωση, ακόμη και εξάλειψη, των αρμονικών χώρου της αντίδρασης τυμπάνου, διότι ισοδυναμεί με αύξηση των αυλακών. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή πρωταρχικός σκοπός είναι η επίτευξη υψηλού βαθμού απόδοσης, άρα οι μειωμένες απώλειες. Επιπλέον, επιθυμητή είναι η ημιτονοειδής μορφή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης, ενώ δεν προβλέπονται υπερφορτίσεις και δεν απαιτείται λειτουργία σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων. Επομένως, σε αυτήν την περίπτωση προτιμάται θεωρητικά το τύλιγμα διπλής στρώσης. Ωστόσο, παρότι θα ξεκινήσουν οι προσομοιώσεις με τύλιγμα διπλής στρώσης, ύστερα θα εξεταστεί και το τύλιγμα μονής στρώσης.

Έπειτα, πρέπει να γίνει η τελική επιλογή του αριθμού πόλων και αυλακών της μηχανής. Ένα σημαντικό συμπέρασμα που έχει εξαχθεί σχετικά με τα χαρακτηριστικά των κινητήρων μόνιμων μαγνητών συγκεντρωμένου τυλίγματος είναι ότι υπάρχουν συνδυασμοί αριθμού αυλακών και πόλων που επιτρέπουν υψηλό συντελεστή τυλίγματος και συμμετρική τριφασική έξοδο. [4] Πέραν αυτού, αρχικά, η ταχύτητα θα καθορίσει τον πιθανό αριθμό των

πόλων. Για την επίτευξη σύγχρονης ταχύτητας 300 ΣΑΛ, ο αριθμός των πόλων μπορεί να κυμανθεί ανάμεσα στους αριθμούς 8 και 22. Στη συνέχεια, αυτός θα πρέπει να επιλεγεί συνδυαστικά με τον αριθμό των αυλακών, λαμβάνοντας υπόψη κυρίως το συντελεστή τυλίγματος. Ο πίνακας ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για το σκοπό αυτό φαίνεται παρακάτω (πίνακας 3.3). Για αριθμό πόλων από 8 έως 22, και για αριθμό αυλακών από 6 έως 36, φαίνονται οι αντίστοιχοι συντελεστές τυλίγματος. Σε πρώτη φάση επιλέξαμε συνδυασμούς όπως ο 9/8, 9/10, 15/14, 15/16 κτλ. που παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλό συντελεστή και αφήσαμε τις προσομοιώσεις να μας αποδείξουν στην πράξη τα οφέλη και τα προβλήματα του καθενός. Με βάση αυτές, θα καταλήξουμε με βέβαιο τρόπο στην καλύτερη επιλογή αξιολογώντας τον κάθε συνδυασμό ως προς την ποιότητα λειτουργίας που χαρίζει στον κινητήρα. Συνεπώς, δεν μπορούμε προς το παρόν να καταλήξουμε σε κάποιον από αυτούς δεδομένου ότι έχουμε ελλιπή στοιχεία.

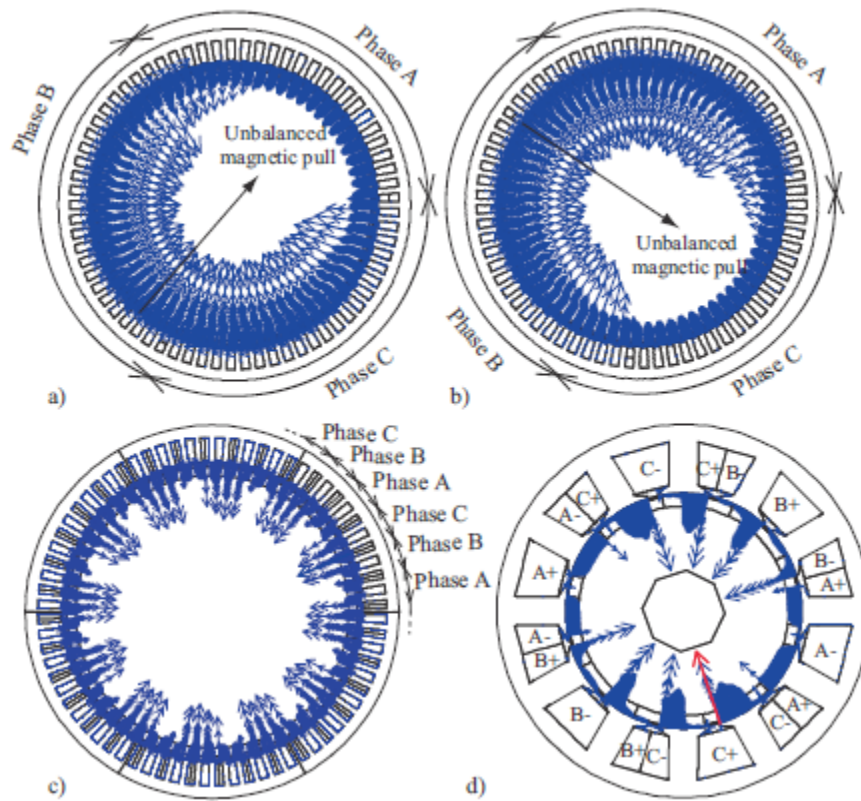
| Qs\p | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 6 | 0.866 | 0.5 | | 0.5 | 0.866 | | 0.866 | 0.5 |
| 9 | 0.945 | 0.945 | 0.866 | 0.617 | 0.328 | | 0.328 | 0.617 |
| 12 | 0.866 | 0.933 | | 0.933 | 0.866 | | | |
| 15 | 0.621 | 0.866 | | 0.951 | 0.951 | | 0.866 | 0.621 |
| 18 | | 0.647 | 0.866 | 0.902 | 0.945 | | 0.945 | 0.902 |
| 21 | | | | 0.866 | 0.89 | | 0.953 | 0.953 |
| 24 | q=1 | | | 0.76 | 0.866 | | 0.933 | 0.95 |
| 27 | | | | | | 0.866 | 0.877 | 0.915 |
| 30 | | q=1 | | | | | 0.866 | 0.874 |
| 33 | | | | | | | | 0.866 |
| 36 | | | q=1 | | | | | |

Πίνακας 3.3: Επιλογή συνδυασμού αριθμού πόλων και δοντιών για μέγιστο συντελεστή τυλίγματος

Ένας παράγοντας που θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη στο σημείο αυτό είναι η ασύμμετρη μαγνητική έλξη. Αυτό συμβαίνει όταν οι μαγνητικές δυνάμεις δεν είναι συμμετρικά κατανομημένες στο διάκενο, με αποτέλεσμα το άθροισμά τους να οδηγεί σε δύναμη η οποία περιστρέφεται και παράγει θόρυβο και δόνηση στη μηχανή. Έτσι θα πρέπει ο συνδυασμός που θα επιλεγεί να μην υποφέρει από αυτό το πρόβλημα.

Για παράδειγμα, στη μηχανή του σχήματος 3.4 (a) και (b) η οποία αποτελείται από 68 πόλους και 69 αύλακες, παρατηρείται ασύμμετρη μαγνητική δύναμη, λόγω της απουσίας συμμετρίας στα τυλίγματα. Στο (c) υπάρχει συμμετρία στα τυλίγματα και άρα δεν υπάρχει δύναμη λόγω

των ακτινικών μαγνητικών δυνάμεων. Τέλος, στο (d) φαίνεται μια μηχανή με 10 πόλους και 12 άυλακες, στην οποία και πάλι δεν υπάρχει ασύμμετρη δύναμη διότι η διάταξη των φάσεων είναι συμμετρική. [5]



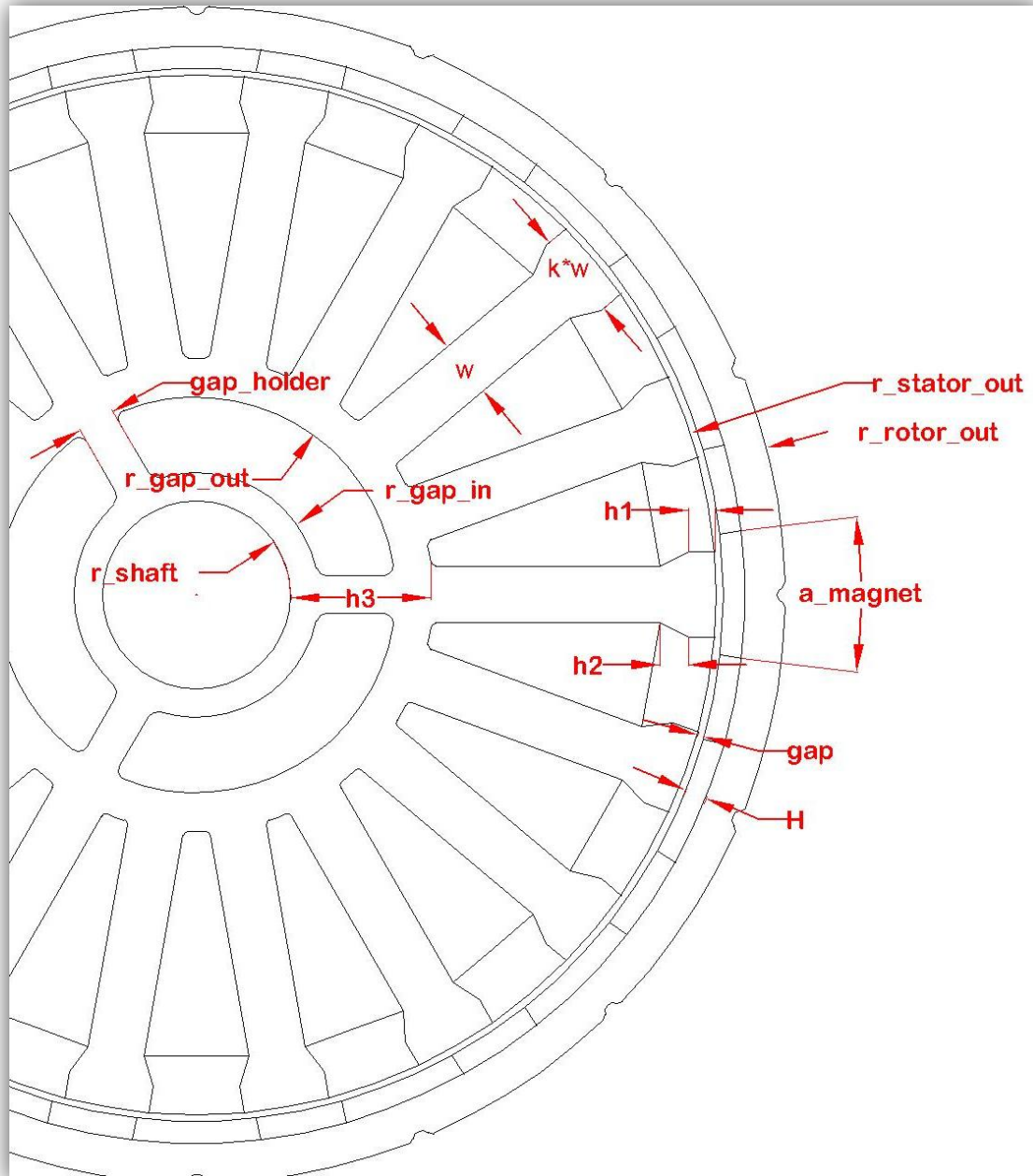
Σχήμα 3.4: Μαγνητικές δυνάμεις στον στάτη σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών με (α) και (β) 68 πόλους και 69 άυλακες, για διαφορετικές χρονικές στιγμές (c) 60 πόλους, 72 άυλακες (d) 10 πόλους, 12 άυλακες

3.3 Παραμετροποιημένη σχεδίαση

3.3.1 Επιλογή Μεταβλητών

Αν και η προκαταρκτική σχεδίαση μας δίνει μία πρώτη εικόνα των μεγεθών του κινητήρα που θα σχεδιαστεί, δεν μπορεί να αποτελέσει σε καμία περίπτωση αξιόπιστη μέθοδο για την εξαγωγή της τελικής σχεδίασης. Αυτή θα προκύψει μετά από μία σειρά προσομοιώσεων που

σκοπό θα έχουν την εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας για την εφαρμογή. Για να γίνουν αυτές πρέπει αρχικά να επιλεγούν παράμετροι που να έχουν την δυνατότητα να περιγράψουν πλήρως τον κινητήρα προς διερεύνηση. Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν στην παρούσα εργασία φαίνονται παρακάτω (σχήμα 3.5):

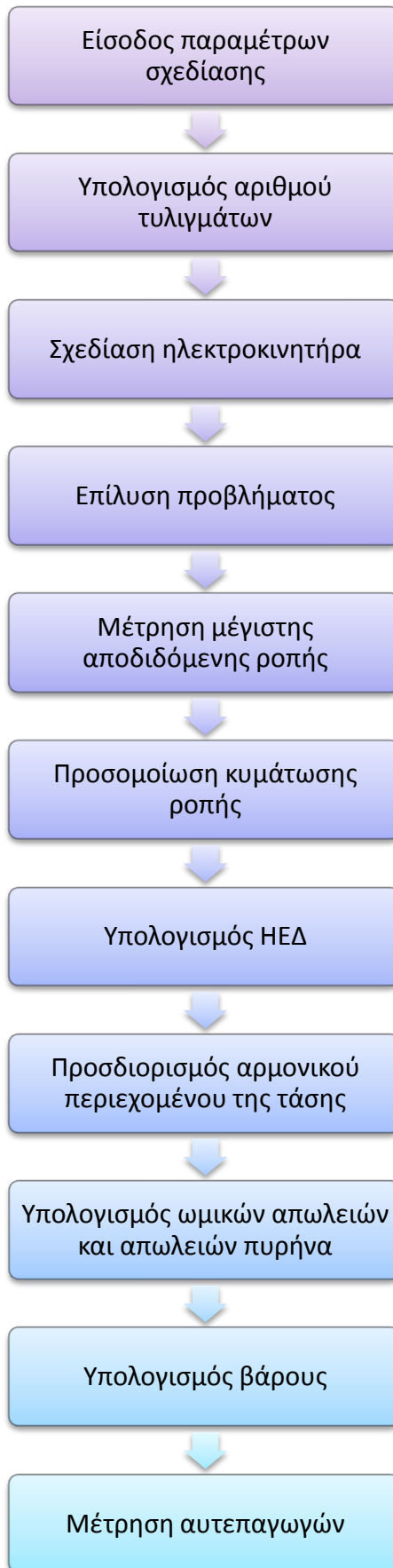


Σχήμα 3.5: Παράμετροι παραμετροποιημένης σχεδίασης

3.3.2 Υλοποίηση μέσω προγράμματος σε Matlab

Μετά την επιλογή των παραμέτρων που μπορούν να περιγράψουν το σύνολο ενός ηλεκτροκινητήρα στο πρόγραμμα επίλυσης μαγνητοστατικού προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία, ακολουθεί η υλοποίηση του κώδικα που θα έχει την δυνατότητα να σχεδιάζει σε κάθε εκτέλεση τον ζητούμενο κινητήρα βάσει των παραμέτρων που θα του δίδονται. Επιπροσθέτως θα έχει την δυνατότητα να υπολογίζει διάφορα ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη σε θεωρητικό επίπεδο.

Σε αυτό το στάδιο της εργασίας γράφηκε κώδικας που εκτελεί τις διεργασίες που απεικονίζονται στο σχήμα 3.6:



Σχήμα 3.6: Διεργασίες προγράμματος

Μπορούμε όμως σε αυτό το στάδιο να ρίξουμε μία πιο προσεκτική ματιά στον τρόπο με τον οποίο υλοποιήθηκαν οι διεργασίες που αναφέρθηκαν προηγουμένως και να διασαφηνίσουμε ορισμένες πτυχές του κώδικα. Ας πάρουμε με την σειρά τις διεργασίες αυτές:

Είσοδος παραμέτρων σχεδίασης

Σε αυτό το στάδιο γίνεται καθορισμός των επιθυμητών παραμέτρων του κινητήρα και του τρόπου με τον οποίο θα σχεδιαστεί. Εδώ προσδιορίζονται τα μεγέθη που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα όσον αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, διάφορα άλλα μεγέθη που συμβάλλουν στην πλήρη περιγραφή του κινητήρα και τέλος γίνεται επιλογή για την εκτέλεση ή μη, διαφόρων υποπρογραμμάτων. Τα μεγέθη που προσδιορίζονται και τα υποπρογράμματα που χρησιμοποιούνται είναι:

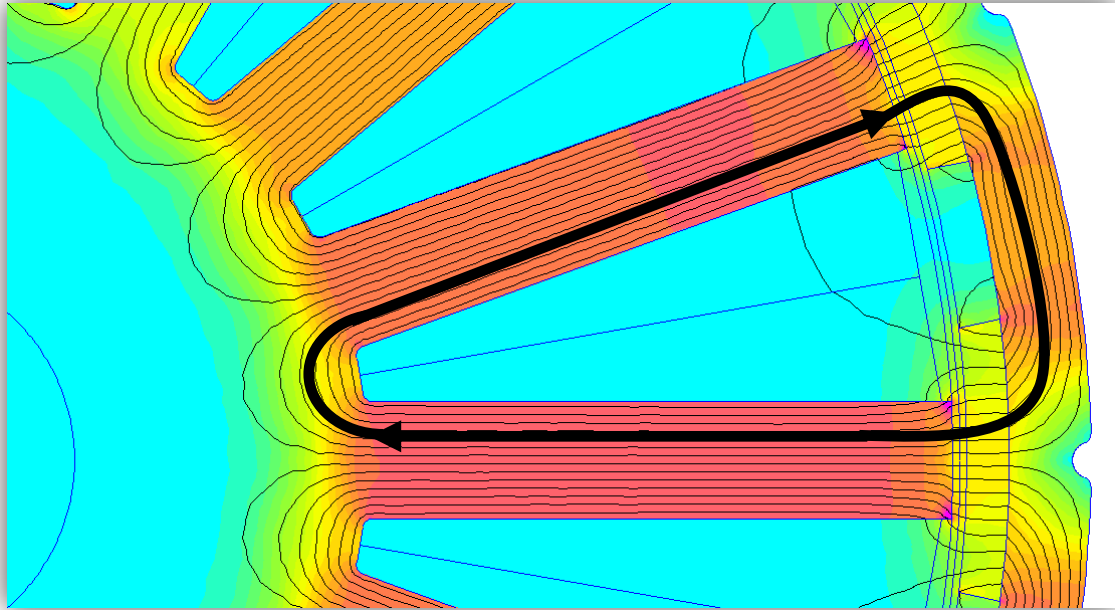
| Μεγέθη | Υποπρογράμματα |
|---------------------------------|----------------------------------|
| αριθμός αυλακών | δημιουργία κενού αέρος |
| αριθμός πόλων | δημιουργία ανοιχτού δοντιού |
| αριθμός φάσεων | βελτιστοποίηση χώρου στην αύλακα |
| ενεργό μήκος κινητήρα | δημιουργία μαγνήτη βάσει εμβαδού |
| τύπος τυλίγματος | δημιουργία μαργαρίτας |
| πυκνότητα πλέγματος υπολογισμού | |
| χωρικό ρεύμα αύλακας | |
| στροφές κινητήρα | |
| αριθμός ελιγμάτων | |
| ακτίνα καλωδίου | |
| πάχος μόνωσης αύλακας | |
| πάχος μόνωσης καλωδίου | |
| βήμα γωνίας υπολογισμών | |
| γεωμετρικά μεγέθη | |

Πίνακας 3.4: Μεγέθη και υποπρογράμματα που ορίζονται στο πρόγραμμα

Δημιουργία κενού αέρος

Ξεκινώντας από τα υποπρογράμματα, το πρώτο που συναντάμε είναι η δημιουργία κενού αέρος. Αυτή είναι μία πολύ χρήσιμη λειτουργία στην σχεδίαση ενός κινητήρα, καθώς μπορούμε να μειώσουμε το βάρος του, αφαιρώντας περιττό υλικό από τον στάτη. Συνήθως έχει περισσότερο νόημα σε μηχανές εσωτερικού στάτη και εξωτερικού δρομέα καθώς λόγω της οριοθέτησης των αυλακών απομένει συνήθως αρκετός χώρος ανάμεσα σε αυτές και τον άξονα της μηχανής που δεν εξυπηρετεί κάποιον σκοπό.

Για να κατανοήσουμε τον λόγο που ένα τέτοιο κενό είναι χρήσιμο, βλέπουμε στο *σχήμα 3.7* την μαγνητική ροή σε ένα τμήμα κινητήρα. Το τόξο που διακρίνεται στα αριστερά είναι ο άξονας της μηχανής, στο κέντρο βλέπουμε με μπλε χρώμα τις αύλακες από τις οποίες διέρχονται τα τυλίγματα του στάτη και στα δεξιά βλέπουμε τον δρομέα με τους μαγνήτες. Οι λεπτές μαύρες γραμμές δείχνουν τους δρόμους που ακολουθεί η μαγνητική ροή και το χρώμα φανερώνει την πυκνότητα της ροής. Στα σημεία που η μαγνητική ροή γίνεται πυκνότερη, το χρώμα της αναπαράστασης βρίσκεται στις αποχρώσεις του κόκκινου και σε αντίθετη περίπτωση είναι γαλάζιο. Παρατηρούμε ότι η ροή διέρχεται γύρω από την αύλακα, μέσα από τους δύο μαγνήτες και τον δρομέα για να κλείσει έναν πλήρη κύκλο. Με μία πιο προσεκτική ματιά θα παρατηρήσουμε κάτι πολύ ενδιαφέρον. Αυτό που επιδιώκει η μαγνητική ροή είναι να ακολουθήσει τον πιο γρήγορο και ταυτόχρονα τον πιο εύκολο δρόμο. Έτσι, όταν φτάνει στο αριστερότερο σημείο της τροχιάς της, τείνει να ακολουθήσει μία μεγάλη ημικυκλική τροχιά προκειμένου να αποφύγει την μεγάλη πυκνότητα, αλλά επειδή ταυτόχρονα θέλει να ακολουθήσει και τον συντομότερο δρόμο παραμένει κοντά στην αύλακα, αφήνοντας έναν μεγάλο αχρησιμοποίητο χώρο ανάμεσα στην αύλακα και τον άξονα στον οποίο υπάρχει σίδηρος που δεν αξιοποιείται. Σε αυτό ακριβώς το κομμάτι μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα κενό αέρος για να εξοικονομήσουμε βάρος.

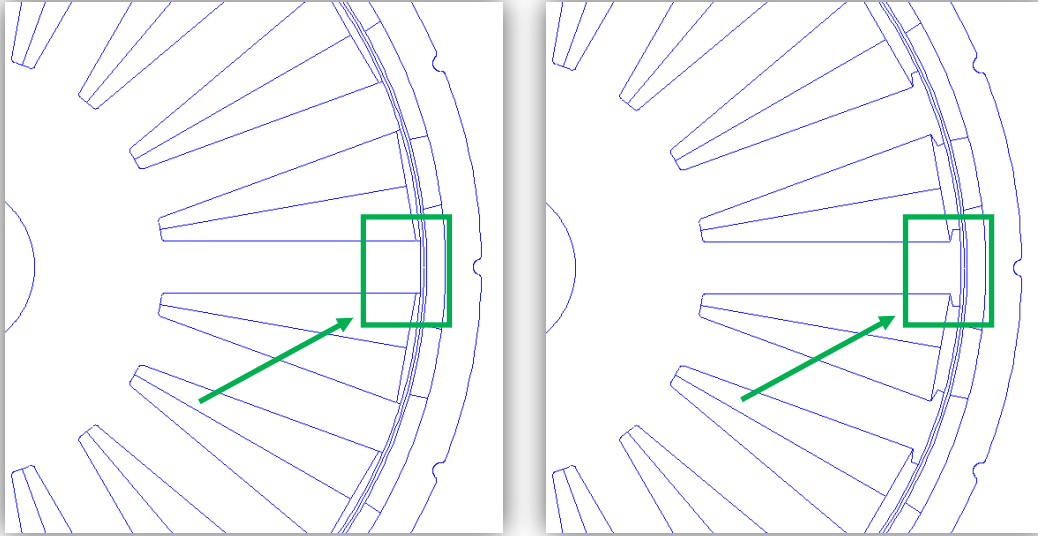


Σχήμα 3.7: Μονοπάτι μαγνητικής ροής στον κινητήρα

Να σημειωθεί ότι το κενό αέρος συμφέρει μόνο σε εφαρμογές που απαίτηση είναι το χαμηλό βάρος, διότι δεν γίνεται κάποια εξοικονόμηση στο υλικό αλλά αντίθετα οδηγεί σε ακριβότερη κατασκευή. Αυτό συμβαίνει γιατί το laser CNC πρέπει να κάνει περισσότερες κοπές και αυτό αυξάνει τον χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση της παραγωγικής διαδικασίας, άρα και το κόστος.

Δημιουργία ανοιχτού δοντιού

Μία πολύ χρήσιμη δυνατότητα του κώδικα είναι να δημιουργεί ανοιχτό δόντι στον στάτη. Για να γίνει ευκολότερα αντιληπτό τι είναι το ανοιχτό δόντι, βλέπουμε στο *σχήμα 3.8* αριστερά μία διαμόρφωση με ανοιχτό δόντι και δεξιά μία διαμόρφωση με προεξοχές. Δόντι αποκαλούμε χάριν ευκολίας το κομμάτι του στάτη που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο αύλακες. Προσθέτοντας στο δόντι προεξοχές, δίνουμε ένα πολύ βολικό μονοπάτι στην μαγνητική ροή μειώνοντας έτσι τις αρμονικές συνιστώσες της τάσης, αλλά δυσκολεύουμε την κατασκευή του κινητήρα. Προκειμένου να προσδιοριστεί στην εφαρμογή μας με ακρίβεια εάν υπάρχει η ανάγκη ανοιχτού δοντιού ή όχι, δόθηκε στον κώδικα η δυνατότητα να σχεδιάζει και αυτούς τους δύο τύπους. Διαπιστώθηκε ότι σε σχεδιάσεις κινητήρων με έντονες αρμονικές της τάσης, επιδρούσε κατασταλτικά, με αντίκτυπο όμως την αυξημένη δυσκολία συναρμολόγησης του κινητήρα.



Σχήμα 3.8: Γεωμετρία κινητήρα με ανοιχτό δόντι (αριστερά) και με δόντι με προεξοχές (δεξιά)

Βελτιστοποίηση χώρου στην αύλακα

Αποτελεί ένα πολύ σημαντικό κομμάτι του κώδικα, το οποίο δημιουργήθηκε ύστερα από την απαίτηση να υπάρχει άμεση σύνδεση της θεωρητικής σχεδίασης με την πρακτική υλοποίηση του κινητήρα. Το πρόβλημα που έπρεπε να επιλυθεί είχε ως εξής: Κατά την φάση του προσδιορισμού των παραμέτρων, δινόταν το επιθυμητό χωρικό ρεύμα στην αύλακα βάσει ενός συντελεστή πληρότητας. Με τον όρο συντελεστή πληρότητας, εννοείται το ποσοστό της αύλακας που μπορεί να καλυφθεί από χαλκό, δεδομένου ότι εισάγονται κυλινδρικά καλώδια στην αύλακα που αφήνουν κενά μεταξύ τους. Επομένως, για λόγους απλούστευσης, μπορούσε να θεωρηθεί ότι ένα ποσοστό της αύλακας πληρούται από χαλκό και βάσει αυτής της διαπίστωσης να ορίσουμε το κατάλληλο ρεύμα. Αυτή, όμως, η προσέγγιση έχει πολλές ασάφειες που γίνονται αντιληπτές στην φάση της κατασκευής. Αυτές είναι οι εξής:

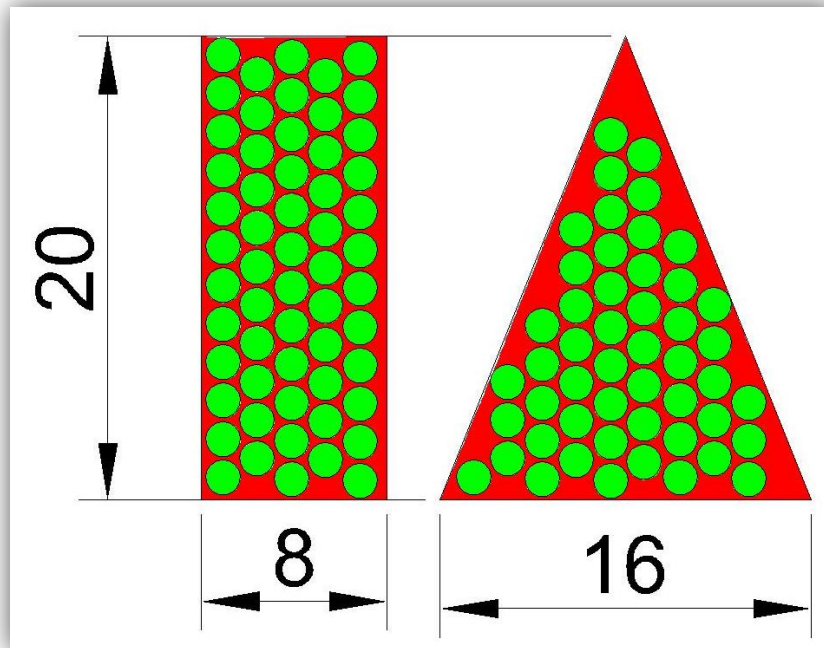
- 1) Δεν υπάρχει τρόπος να γνωρίζει κανείς την ακριβή τιμή του συντελεστή πληρότητας της αύλακας, ακόμα και με απλούς μαθηματικούς υπολογισμούς, γιατί πρόκειται για ένα γεωμετρικό πρόβλημα.

- 2) Τα καλώδια που πωλούνται στο εμπόριο έχουν συγκεκριμένες τυποποιημένες διαμέτρους και δεν μπορεί κάποιος να υποθέσει ότι όταν φτάσει στην φάση της κατασκευής θα βρει την κατάλληλη διάσταση. Αν δεν καταφέρει να βρει την κατάλληλη, ο κινητήρας δεν θα κατασκευαστεί όπως σχεδιάστηκε. Θα αναγκαστεί να βάλει είτε μικρότερη διάμετρο που θα μειώσει την επίδοση του κινητήρα, είτε μεγαλύτερη, που θα επηρεάσει τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του.
- 3) Μία ακόμα πιο σοβαρή ασάφεια, που αποδεικνύει ότι αποτελεί γεωμετρικό πρόβλημα ο συντελεστής πληρότητας, έγινε καθαρά αντιληπτή μετά την εκτέλεση του κώδικα που περιγράφεται σε αυτή την παράγραφο και είναι η εξής: Μία αύλακα με έντονα τριγωνικό σχήμα δεν μπορεί να επιτύχει τον ίδιο βαθμό πληρότητας με μία αύλακα που είναι σχετικά τετραγωνισμένη. Επιδρά, δηλαδή, η γεωμετρία της μηχανής σε σημαντικό βαθμό στον συντελεστή πληρότητας. Όπως βλέπουμε και στο παρακάτω παράδειγμα, το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο έχει το ίδιο εμβαδό με το ισοσκελές τρίγωνο. Στο ορθογώνιο μπαίνουν 58 αγωγοί αλλά στο τρίγωνο μόνο 50. Τα καλώδια στην αναπαράσταση έχουν διάμετρο 1,5mm. Συνεπώς ο συντελεστής πληρότητας της αριστερής αύλακας είναι

$$ff_1 = \frac{58 * \pi * 0,75^2}{20 * 8} = \frac{102,4}{160} = 0,64 \quad (3.40)$$

Και της δεξιάς αύλακας:

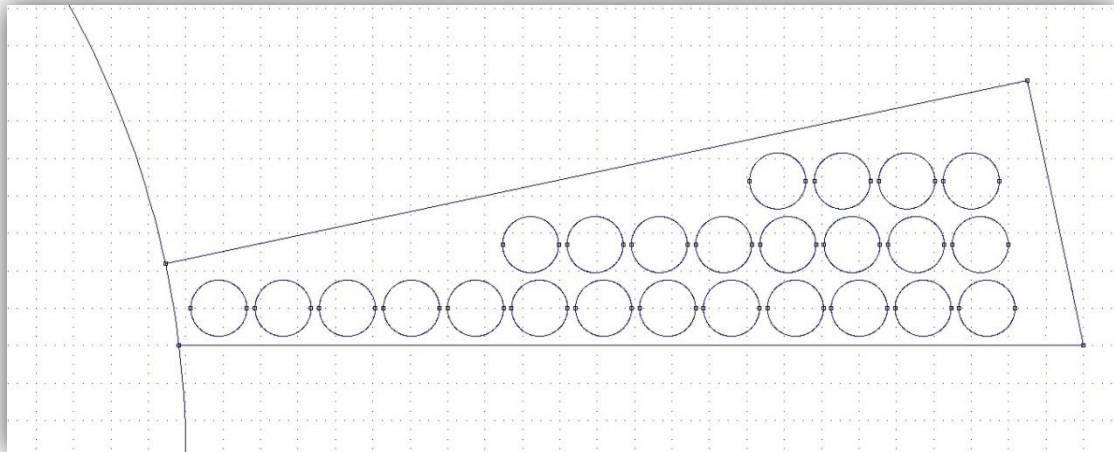
$$ff_2 = \frac{50 * \pi * 0,75^2}{\left(\frac{20 * 16}{2}\right)} = \frac{88,3}{160} = 0,55 \quad (3.41)$$



Σχήμα 3.9: Μεταβολή μέγιστου αριθμού αγωγών βάσει του σχήματος της αύλακος

Παρατηρούμε δηλαδή ότι υπάρχει μία διαφορά της τάξεως του 10% στον συντελεστή πληρότητας ανάμεσα στα δύο γεωμετρικά σχήματα. Αυτή η διαφορά οξύνεται ακόμα περισσότερο όταν η αύλακα σε μία σχεδίαση παίρνει πιο έντονα τριγωνικό σχήμα, δηλαδή η βάση του τριγώνου μειώνεται σε μήκος. Αντίστοιχα πιο έντονο γίνεται το φαινόμενο όταν μεγαλώνει η διάμετρος του αγωγού.

Λόγω αυτών των προβλημάτων και κυρίως λόγω της ανάγκης για ελαχιστοποίηση του βάρους, γράφηκε κώδικας ο οποίος εκτελώντας μαθηματικούς υπολογισμούς μπορεί να υπολογίσει ακριβώς τον αριθμό των αγωγών που μπορούν θεωρητικά να χωρέσουν σε μία αύλακα. Ύστερα μπορεί να κάνει και γραφική αναπαράσταση των καλωδίων που χώρεσαν για καλύτερη οπτική αντίληψη. Ένα στιγμιότυπο εκτέλεσης του κώδικα φαίνεται στο σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10: Στιγμιότυπο από την εκτέλεση του υποπρογράμματος εύρεσης του ακριβούς συντελεστή πληρότητας

Ας δώσουμε όμως μία λεπτομερή περιγραφή της λειτουργίας του αλγορίθμου. Ξεκινώντας, τοποθετούμε τον πρώτο αγωγό στο αριστερότερο και κατώτερο μέρος της αύλακας, αφού αφήσουμε συγκεκριμένη απόσταση για να μπει η απαιτούμενη μόνωση. Ύστερα, μετακινούμαστε ακτινικά προς τα πάνω και προσθέτουμε αγωγούς έναν προς έναν, υπολογίζοντας κάθε φορά εάν μπορεί να προστεθεί ο επόμενος. Εάν δεν μπορεί, μεταπηδούμε στην επόμενη στοίβα από αγωγούς και προσθέτουμε ξανά ακτινικά αγωγούς όσο αυτοί χωράνε. Όταν φτάσουμε σε σημείο να μην μπορεί να επεκταθεί άλλο προς τα δεξιά η συστοιχία των αγωγών, σταματάει η εκτέλεση του κώδικα και αθροίζεται το πλήθος των αγωγών. Ωστόσο, όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, στην συγκεκριμένη εκτέλεση παρέμεινε ένα κενό στα δεξιά της αύλακας. Εδώ ακριβώς περνάμε στο επόμενο βήμα που αφορά την βελτιστοποίηση της αύλακας. Το δεύτερο τμήμα της λειτουργίας αυξάνει με μικρά βήματα την εσωτερική ακτίνα της αύλακας «σπρώχνοντας» τους αγωγούς προς τα δεξιά και όταν διαπιστώσει ότι δεν μπορούν να μετακινηθούν άλλο αποθηκεύει την νέα τιμή της εσωτερικής ακτίνας της αύλακας. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε ύστερα να αυξήσουμε το κενό αέρος στα αριστερά της αύλακας και να επιτύχουμε μείωση του βάρους.

Η όλη διαδικασία αποτελεί στην ουσία έναν τρόπο ελαχιστοποίησης του βάρους του κινητήρα. Εκτός αυτού χρησιμεύει και στον ακριβή προσδιορισμό του πλήθους των αγωγών που μπορούν να μπουκ σε κάθε αύλακα, όπως ειπώθηκε προηγουμένως. Βέβαια, η μοντελοποίηση αυτή δεν μπορεί να προβλέψει τις ενδεχόμενες κατασκευαστικές δυσχέρειες που θα προκύψουν. Προκειμένου να αντισταθμιστούν οι όποιοι απρόβλεπτοι παράγοντες

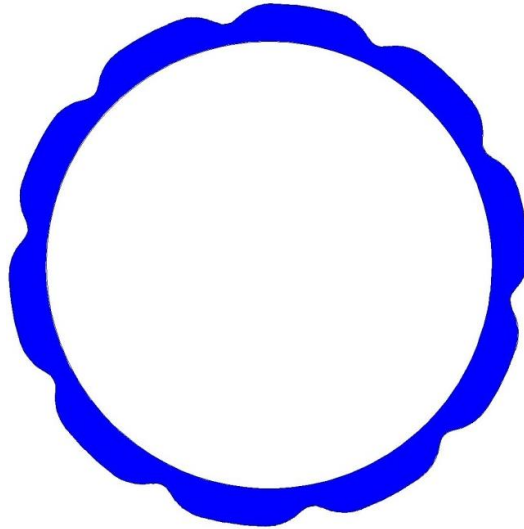
δόθηκε ιδιαίτερη μέριμνα ώστε ο τρόπος με τον οποίο συμπληρώνονται οι αγωγοί να μην είναι ο βέλτιστος και ιδανικός, αλλά ο πιο ρεαλιστικός. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η διάταξη με την οποία συμπληρώνονται οι αγωγοί δεν είναι η πιο πυκνή που μπορεί να επιτευχθεί.

Δημιουργία μαγνήτη βάσει εμβαδού

Βάσει της παραμετροποίησης του κώδικα ο μαγνήτης μπορεί να καθοριστεί με δύο παραμέτρους, το ποσοστό της γωνίας του ως προς την γωνία του πολικού βήματος και το πάχος. Κατά την ανάλυση ευαισθησίας έγινε γρήγορα αντιληπτό ότι η μεταβολή των δύο αυτών παραμέτρων έδινε μεγάλες διακυμάνσεις στην αποδιδόμενη ροπή δεδομένου ότι το εμβαδό του μαγνήτη και συνεπώς ο όγκος του, άλλαζαν δραματικά στα διαδοχικά «τρεξίματα» του κώδικα ανάλυσης ευαισθησίας. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα το πεδίο του δρομέα να διογκώνεται και να μειώνεται με γρήγορους ρυθμούς που δεν ευνοούσαν την λεπτομερή ανάλυση της μηχανής. Λόγω αυτού του προβλήματος δημιουργήθηκε ένα υποπρόγραμμα που μπορεί να διατηρήσει σταθερό το εμβαδόν του μαγνήτη και να μεταβάλλει αυτόματα το πάχος του καθώς ο χρήστης δίνει την απαίτηση του για την γωνία.

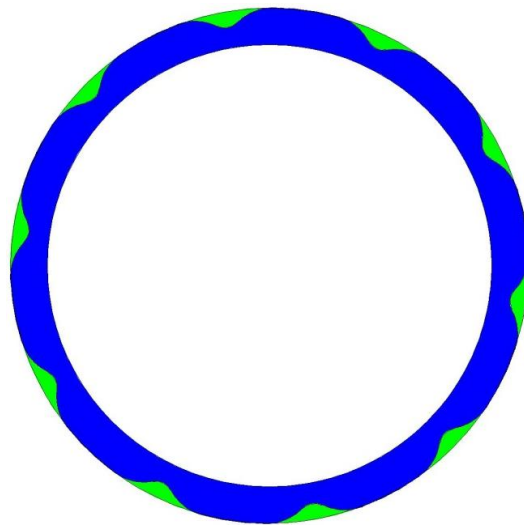
Δημιουργία μαργαρίτας

Η «μαργαρίτα» αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία σχεδίασης στην εφαρμογή μας. Προτού προβούμε στην ανάλυση των πλεονεκτημάτων της, ας δούμε στο σχήμα περί τίνος πρόκειται. Χρωματισμένο με μπλε χρώμα βλέπουμε σε κλίμακα τον δρομέα (μόνο σίδηρο) της προηγούμενης μηχανής που είναι ενσωματωμένη στον Πυρφόρο. Μαργαρίτα αποκαλούμε αυτές τις εσοχές που έχουν δημιουργηθεί στην εξωτερική περιφέρεια του δρομέα. Αυτές οι εσοχές εξοικονομούν βάρος από τον σίδηρο που χρησιμοποιείται, αλλά κυρίως μειώνουν την ροπή αδράνειας του τροχού. Έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να δούμε πόσο βάρος εξοικονομήθηκε στον συγκεκριμένο κινητήρα.



Σχήμα 3.11: Δρομέας προηγούμενου κινητήρα

Στο επόμενο σχήμα (3.12) βλέπουμε με πράσινο χρώμα ποιο είναι το κομμάτι του σιδήρου που εξοικονομήθηκε κατά την δημιουργία της μαργαρίτας.



Σχήμα 3.12: Δρομέας προηγούμενου κινητήρα με εμφανή τον χώρο που εξοικονομήθηκε

Το συνολικό εμβαδόν του κυκλικού τομέα είναι 9189 mm^2 και το εμβαδόν μετά την αφαίρεση των πράσινων τμημάτων είναι 8182 mm^2 . Αυτό σημαίνει ότι προκύπτει συνολικά ένας δρομέας που είναι κατά 11% ελαφρύτερος. Κατόπιν αυτών των παρατηρήσεων, διαπιστώθηκε η αναγκαιότητα της σχεδίασης μαργαρίτας στον δρομέα της μηχανής και δόθηκε η δυνατότητα στο πρόγραμμα να την υλοποιεί με διαστάσεις που καθορίζονται από παραμέτρους. Ο λόγος που μπορεί να γίνει αυτή η εξοικονόμηση υλικού χωρίς να

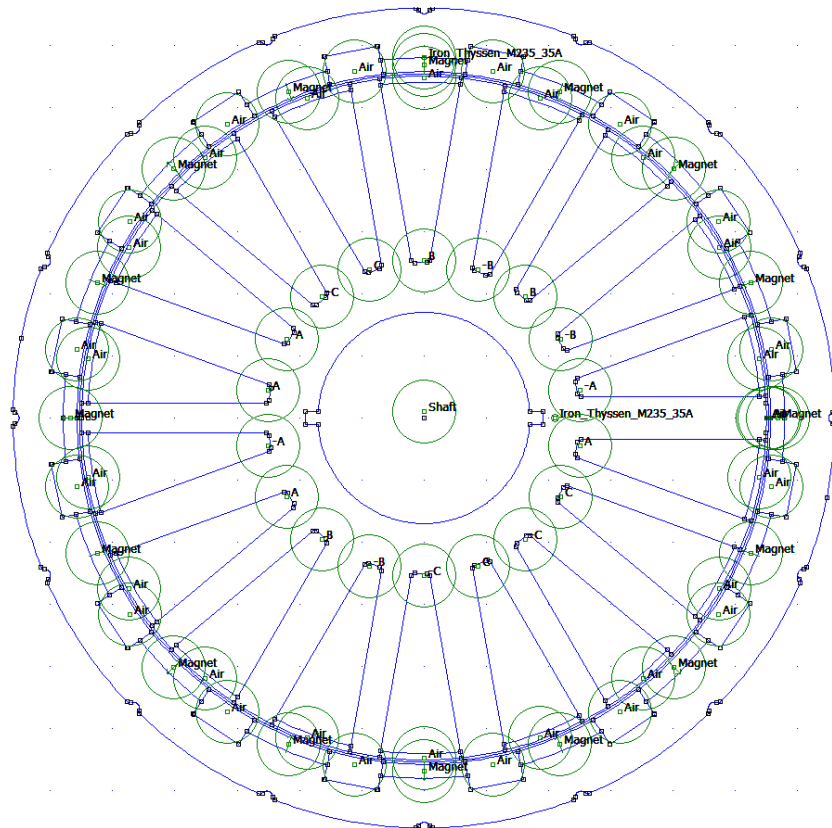
επηρεαστούν τα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά του κινητήρα εξηγήθηκε εκτενώς κατά την επεξήγηση της λειτουργίας του κενού αέρος.

Υπολογισμός αριθμού τυλιγμάτων

Σε αυτή την φάση εκτέλεσης του κώδικα γίνεται η καταμέτρηση των αγωγών που μπορούν να χωρέσουν στην αύλακα. Αποτελεί ουσιαστικά το υποπρόγραμμα που περιγράφηκε προηγουμένως.

Σχεδίαση ηλεκτροκινητήρα

Εδώ υλοποιείται πρακτικά η γεωμετρία του κινητήρα ώστε αυτή ύστερα να επιλυθεί σε πρόγραμμα με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, βάσει εντολών που γράφονται σε script στο Matlab, γίνεται επικοινωνία μέσω Luascript με το Femm και δημιουργείται με αυτοματοποιημένο τρόπο η γεωμετρία στον προεπεξεργαστή του προγράμματος. Μπορούμε να δούμε ένα παράδειγμα σχεδίασης που δημιουργήθηκε μετά από την εκτέλεση του αντίστοιχου υποπρογράμματος στο Matlab:



Σχήμα 3.13: Παράδειγμα αυτοματοποιημένης σχεδίασης μέσω Matlab

Επίλυση προβλήματος

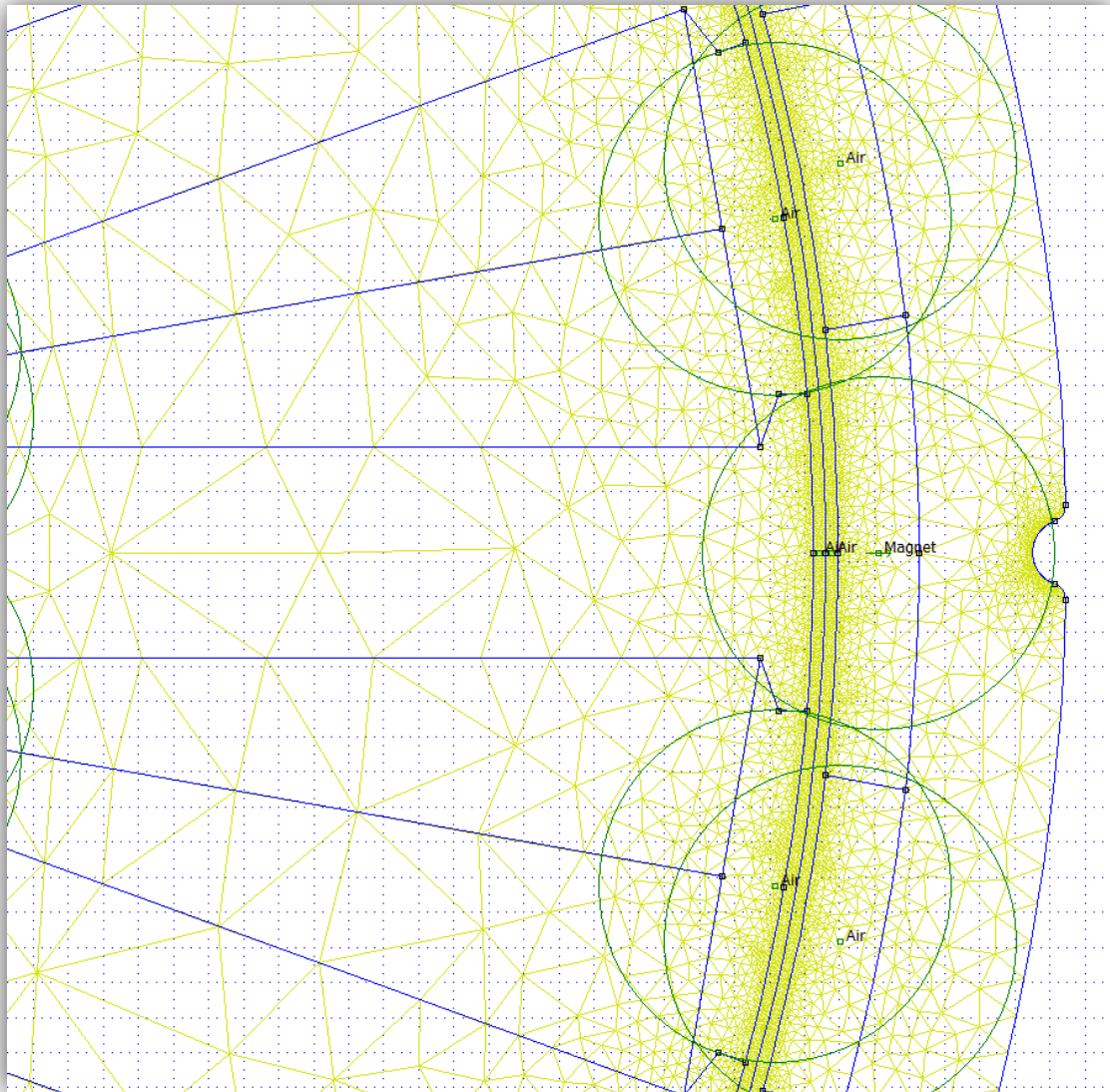
Η επίλυση του προβλήματος είναι μία σχετικά απλή υπόθεση εφόσον έχει γίνει ένας σωστός και πλήρης καθορισμός όλων των παραμέτρων στα προηγούμενα στάδια. Ωστόσο, υπάρχει μία σημαντική λεπτομέρεια που χρήζει ιδιαίτερης σημασίας: η ακρίβεια του πλέγματος. Το Femm έχει την δυνατότητα να σπάει αυτόματα το πρόβλημα σε πολλά μικρά επιμέρους προβλήματα και να λύνει αυτά.

Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα Femm, διακριτοποιεί την περιοχή του προβλήματος χρησιμοποιώντας τριγωνικά στοιχεία. Σε κάθε στοιχείο, η λύση προσεγγίζεται με γραμμική παρεμβολή των τιμών του δυναμικού στις κορυφές του τριγώνου. Το πρόβλημα της γραμμικής άλγεβρας σχηματίζεται με ελαχιστοποίηση του μέτρου του σφάλματος ανάμεσα στην πραγματική διαφορική εξίσωση και την προσεγγιστική διαφορική εξίσωση.

Εύκολα, λοιπόν, συμπεραίνεται ότι ο καθορισμός των τριγωνικών στοιχείων για την επίλυση του προβλήματος παίζει σημαντικό ρόλο στο σφάλμα ή στην απόκλιση. Είναι αναγκαίο να ορισθεί με τέτοιο τρόπο στα διάφορα σημεία της μηχανής ώστε να υπάρχει η απαιτούμενη

ακρίβεια. Για παράδειγμα, στο διάκενο το οποίο έχει μήκος 0.7mm ο αριθμός και η πυκνότητα των τριγωνικών στοιχείων θα πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα στο σώμα του στάτη ή του δρομέα.

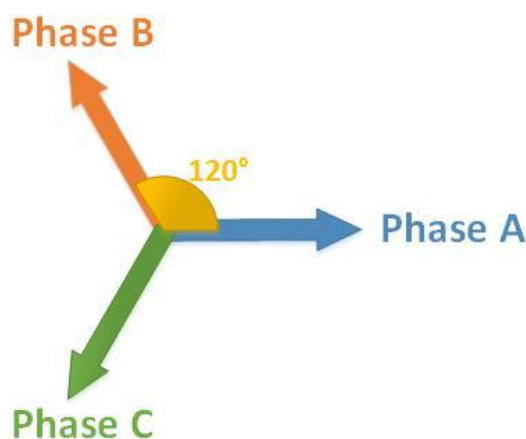
Στο *σχήμα 3.14* που ακολουθεί φαίνεται η αύξηση του αριθμού των κόμβων στην περιοχή του διακένου.



Σχήμα 3.14: Το πλέγμα που χρησιμοποιείται κατά την επίλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Μέτρηση μέγιστης αποδιδόμενης ροπής

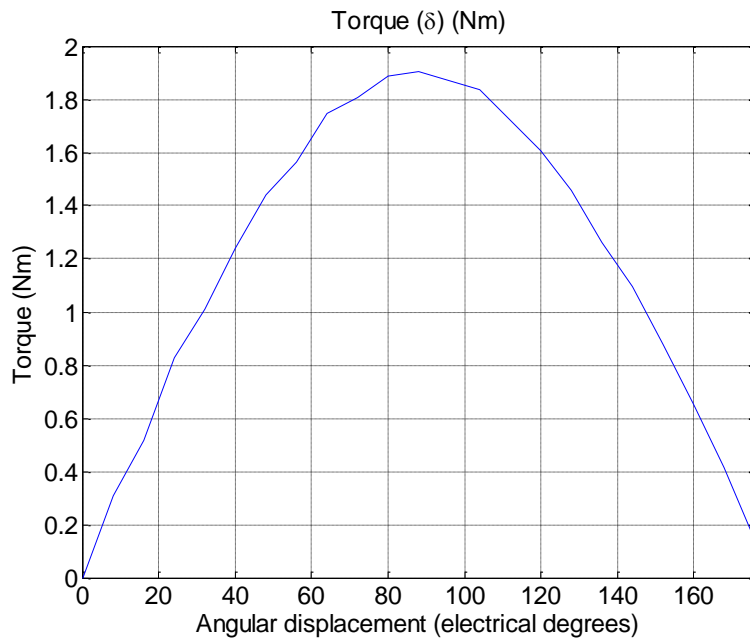
Προκειμένου να μετρηθεί η μέγιστη αποδιδόμενη ροπή του εκάστοτε εξεταζόμενου κινητήρα ακολουθείται συγκεκριμένη διαδικασία. Οι τιμές των ρευμάτων ορίζονται την χρονική στιγμή μεγίστου της φάσης A (σχήμα 3.14) και ο δρομέας μετακινείται με μικρά βήματα.



Σχήμα 3.14: Διαδοχή των φάσεων του τριφασικού ρεύματος που εισέρχεται στον κινητήρα

Κατά την μετακίνηση του δρομέα μετράται συνεχώς η ροπή στο διάκενο. Στο τέλος παράγεται μία κυματομορφή που απεικονίζει το μέτρο της αποδιδόμενης ροπής συναρτήσει της μετατόπισης του δρομέα, η οποία έχει ημιτονοειδή μορφή. Συνεπώς, για μία συγκεκριμένη γωνία μετατόπισης του δρομέα παρουσιάζεται και η μέγιστη ροπή στο διάκενο. Αυτή είναι και η γωνία μέγιστης ροπής. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται ένα παράδειγμα εκτέλεσης. Στον οριζόντιο άξονα παρατηρείται ότι υπάρχουν ηλεκτρικές μοίρες. Εδώ έχει γίνει μία απλή μετατροπή των μηχανικών μοιρών σε ηλεκτρικές βάσει της σχέσης:

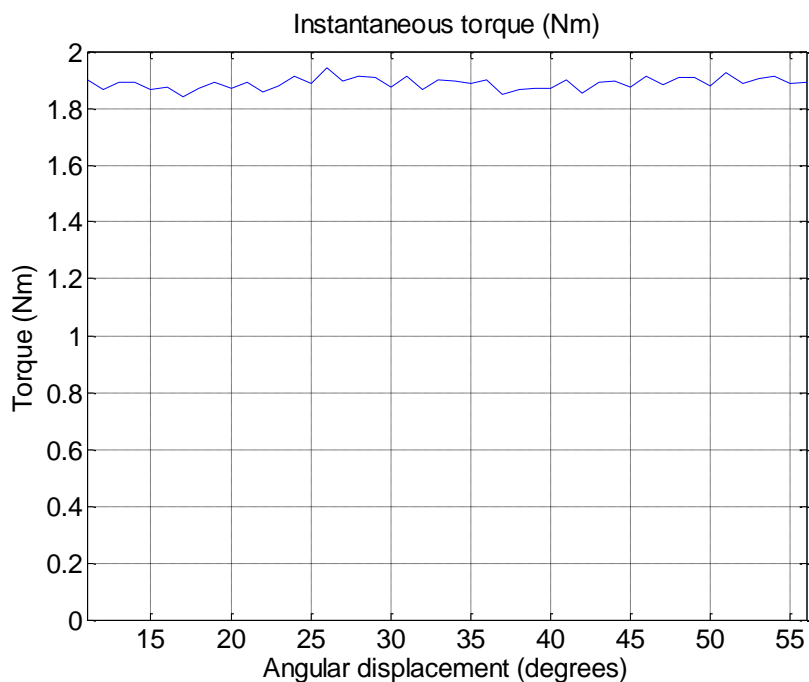
$$\theta_e = \frac{P}{2} \cdot \theta_m \quad (3.42)$$



Σχήμα 3.15: Παράδειγμα κυματομορφής μέγιστης ροπής

Προσομοίωση κυμάτωσης ροπής

Ένα ακόμη πολύ σημαντικό αποτέλεσμα που εξάγεται από την προσομοίωση είναι η κυμάτωση ροπής. Εδώ μετατοπίζουμε τον δρομέα στην θέση μέγιστης ροπής, θέτουμε τα ρεύματα σε μέγιστο στην φάση A και ύστερα ξεκινάμε να τον περιστρέφουμε σύγχρονα, παράλληλα με κατάλληλη μεταβολή των ρευμάτων. Ένα παράδειγμα εκτέλεσης φαίνεται στην επόμενη εικόνα:

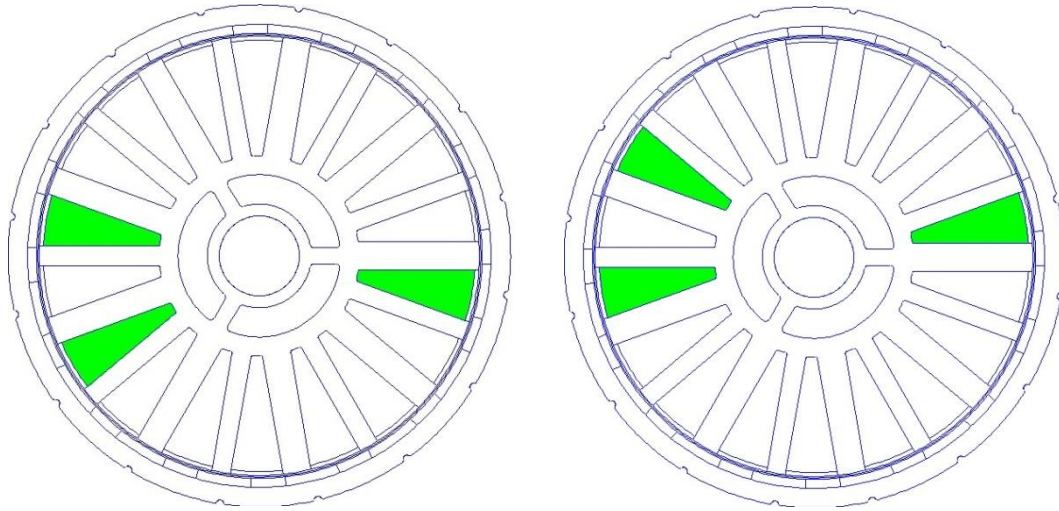


Σχήμα 3.15: Παράδειγμα κυματομορφής κυματώσεως ροπής

Με αυτόν τον τρόπο βλέπουμε πόσο ποιοτική θα είναι η απόδοση ροπής στην πράξη. Αν και το μεγαλύτερο μέρος αυτών των ηλεκτρομαγνητικών ταλαντώσεων αποσβεννύονται από τον άξονα, είναι πάντοτε χρήσιμο να έχουμε μία εποπτική αντίληψη του μεγέθους της κυμάτωσης καθώς αυτή οδηγεί και σε αυξημένες απώλειες.

Υπολογισμός HEΔ και του αρμονικού περιεχομένου αυτής

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι το πηλίκο του έργου ανά μονάδα ηλεκτρικού φορτίου κατά μήκος μιας κλειστής ηλεκτρικής διαδρομής, το οποίο χρειάζεται να αποδοθεί στη μονάδα του φορτίου ώστε αυτό να διατρέξει έναν πλήρη κύκλο στη διαδρομή αυτή. Η HEΔ μετράται σε μονάδες: ενέργεια προς φορτίο, δηλαδή σε βολτ, στο διεθνές σύστημα μονάδων. [5] Πρακτικά είναι η τάση που αποδίδει μία ηλεκτρική μηχανή κατά την λειτουργία γεννήτριας. Κατά την λειτουργία κινητήρα εμφανίζεται το δυαδικό ανάλογο αυτού του μεγέθους, η αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη. Για να υπολογιστεί αυτή η τάση, ακολουθείται η εξής διαδικασία. Αρχικά επιλέγονται μέσω του Femm οι αύλακες που φέρουν την φάση A (παρακάτω σχήμα) και μετράται το διανυσματικό δυναμικό στο εσωτερικό τους. Το ίδιο επαναλαμβάνεται για την φάση -A.



Σχήμα 3.16: Στιγμιότυπο κατά το οποίο έχουν επιλεγεί οι αύλακες που φέρουν την φάση A προκειμένου να υπολογιστεί η αντί-ΗΕΔ.

Από την κάτωθι σχέση μπορεί να υπολογιστεί η συνολική ροή που εμπλέκεται από την φάση A.

$$\Phi_{phA} = \frac{(A_{phA} - A_{ph-A}) \cdot n}{S_{slot}} \quad (3.43)$$

όπου, A_{phA} είναι το διανυσματικό δυναμικό της φάσης A,

n είναι ο αριθμός των σπειρών,

S_{slot} είναι η επιφάνεια μία αύλακας.

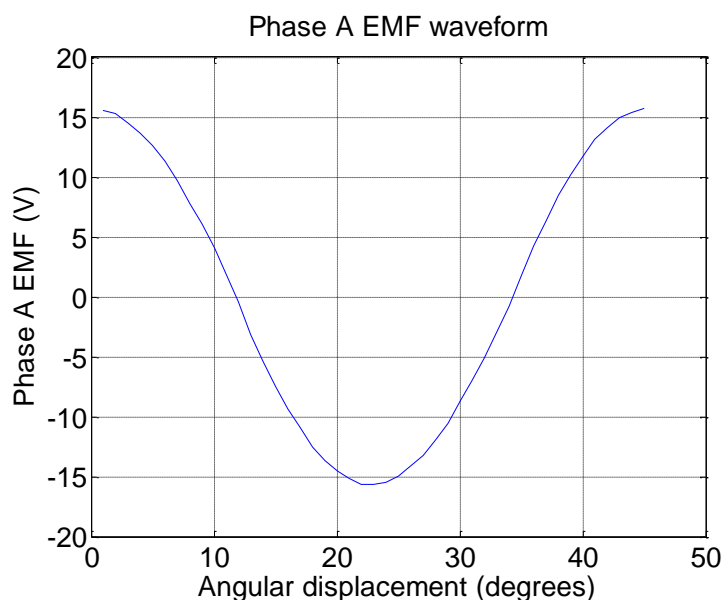
Διαδοχικές τιμές αποθηκεύονται σε έναν πίνακα κατά την σύγχρονη μεταβολή θέσεως δρομέα και ρευμάτων. Τελικά, η αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη υπολογίζεται από τον τύπο:

$$CEMF (V) = \frac{2\pi \cdot n}{60} \cdot \frac{\Phi_{phA}(t+1) - \Phi_{phA}(t)}{d\theta} \quad (3.44)$$

όπου, n είναι ο αριθμός των σπειρών,

$d\theta$ είναι η μεταβολή της γωνίας σε rad.

Όπως γίνεται αντιληπτό, δια μέσου της μεταβολής της ροής μπορούμε να υπολογίσουμε στιγμιαίες τιμές της τάσης. Αν αυτές οι τιμές αναπαρασταθούν γραφικά θα λάβουμε την ημιτονοειδή μορφή της τάσης.

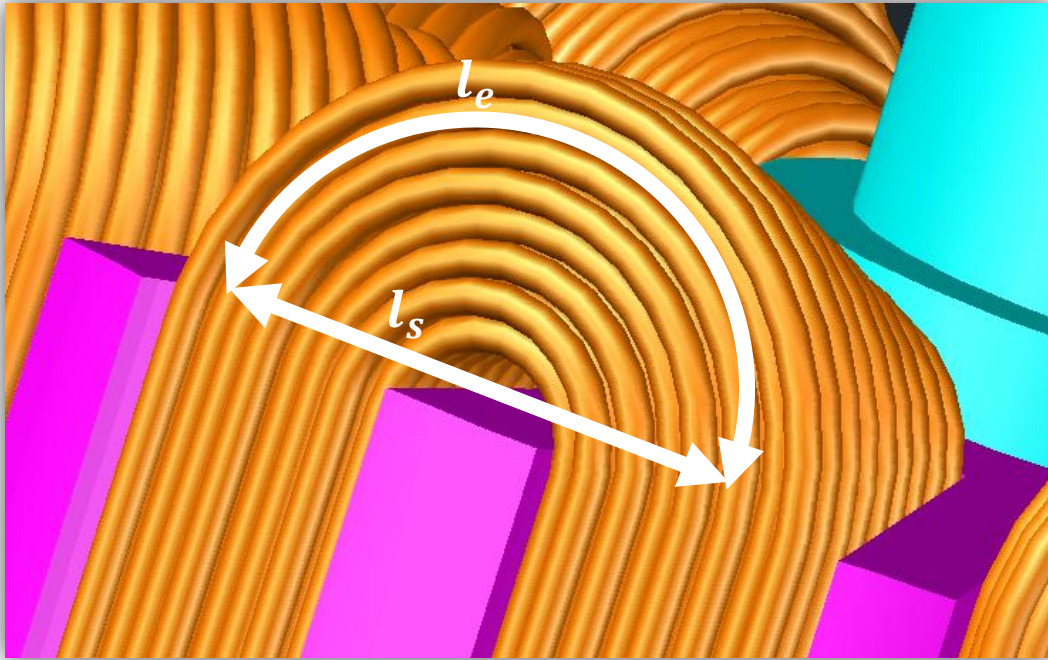


Σχήμα 3.17: Παράδειγμα κυματομορφής της αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης

Δεν πρέπει ωστόσο να θεωρηθεί πως από τις τιμές του πίνακα της ΗΕΔ μπορούμε να εξάγουμε και την ενεργό τιμή της. Όσο μεγαλύτερο είναι το αρμονικό περιεχόμενο στην ΗΕΔ τόσο πιο ανακριβής θα είναι η μέτρηση. Για τον προσδιορισμό των αρμονικών συνιστωσών υλοποιήθηκε συνάρτηση που κάνει μετασχηματισμό Fourier. Με χρήση αυτής της συνάρτησης είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τόσο την θεμελιώδη, όσο και τις υπόλοιπες συνιστώσες της τάσης.

Υπολογισμός ωμικών απωλειών

Για τον υπολογισμό των ωμικών απωλειών έπρεπε αρχικά να βρεθεί η αντίσταση των πηνίων. Για την εύρεση της αντίστασης χρειάζεται σε πρώτη φάση να εκτιμηθεί το μήκος της κάθε σπείρας.



Σχήμα 3.18: Μπορούμε απλουστευτικά να θεωρήσουμε ότι $l_e = 1,2 \cdot l_s$

Το συνολικό μήκος κάθε σπείρας θα δίνεται από τον παρακάτω τύπο αν θεωρήσουμε ότι L είναι το ενεργό μήκος της μηχανής και l_e η διάσταση που φαίνεται στο σχήμα 3.18 και αντιστοιχεί στο «γύρισμα» του καλωδίου.

$$l_{coil} = 2 \cdot L + 2 \cdot l_e \quad (3.45)$$

Απλουστευτικά μπορούμε να θεωρήσουμε ότι $l_e = 1,2 \cdot l_s$. Συνεπώς, η αντίσταση ενός πηνίου θα είναι:

$$R = p_{copper} \cdot \frac{(2 \cdot L + 2 \cdot l_s) \cdot n}{s_{wire}} \quad (3.46)$$

Όπου, p_{copper} είναι η ειδική αντίσταση του χαλκού

και s_{wire} είναι η διατομή του καλωδίου.

Όσον αφορά την ειδική αντίσταση, αυτή μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$\rho_{copper} = \rho_{0copper} \cdot (1 + \alpha_{copper} \cdot (T_{no} - T_0)) \quad (3.47)$$

Όπου, $\rho_{0copper} = 1,72 \cdot 10^{-5} \Omega mm$,

$$\alpha_{copper} = 3,9 \cdot 10^{-3},$$

$$T_0 = 20^\circ,$$

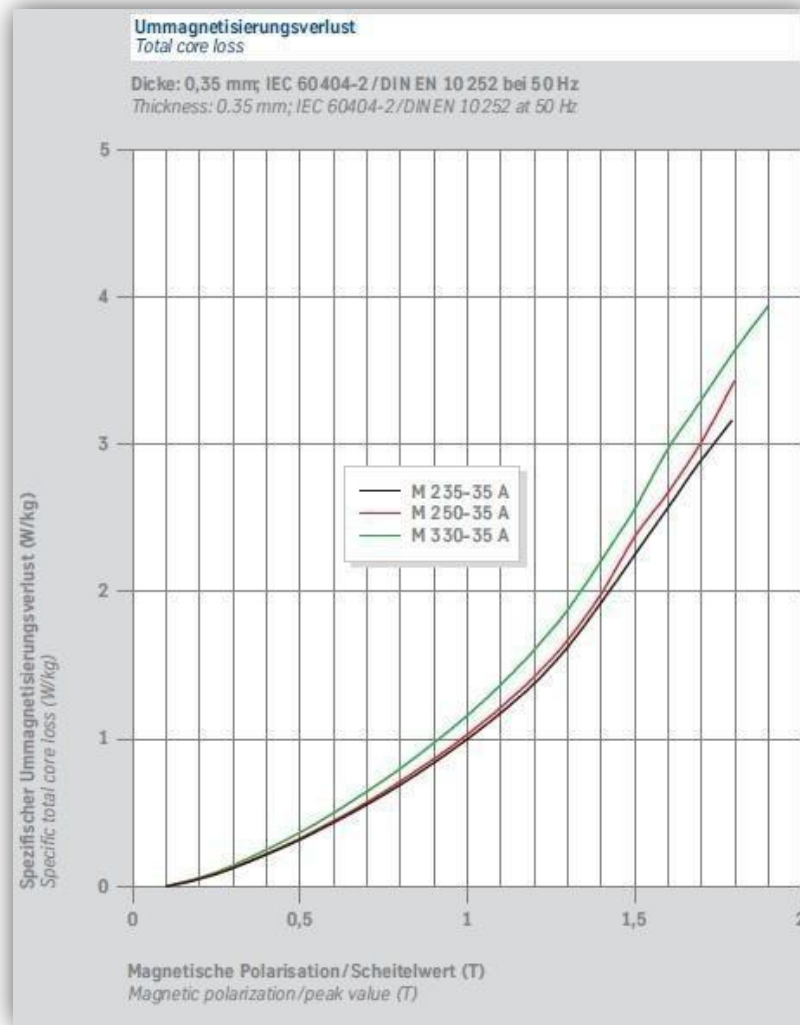
και $T_{no} = 70^\circ$.

Τελικά, οι συνολικές απώλειες χαλκού μπορούν να υπολογιστούν από τον τύπο:

$$R_{losses} = 3 \cdot I^2 \cdot \left(\frac{Q}{3} \cdot R\right) \quad (3.48)$$

Υπολογισμός απωλειών πυρήνα

Για την εύρεση των απωλειών πυρήνα ακολουθήθηκε μία σχετικά απλή μέθοδος που όμως προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αρχικά βρέθηκε η καμπύλη απωλειών του σιδήρου που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του κινητήρα από την ιστοσελίδα του κατασκευαστή και η οποία φαίνεται στο *σχήμα 3.19*. Συγκεκριμένα είναι το M235-35A.



Σχήμα 3.19: Καμπύλη απωλειών του σιδήρου M235

Εφόσον υπάρχει άμεση σύνδεση της έντασης του πεδίου με τις απώλειες, μπορούμε να αξιοποιήσουμε το γεγονός ότι το Femm σπάει σε πολύ μικρά τρίγωνα την γεωμετρία του προβλήματος και να αντλήσουμε σε πίνακα όλα τα εμβαδά και τις εντάσεις του πεδίου των επιμέρους τριγώνων. Ύστερα με άθροιση τους για το σύνολο του προβλήματος μπορούμε να υπολογίσουμε το σύνολο των απωλειών πυρήνα.

Υπολογισμός βάρους

Για τον υπολογισμό του βάρους χρησιμοποιήθηκε η δυνατότητα που δίνει το Femm να ευρεθεί το ακριβές εμβαδόν μίας επιφάνειας. Πολλαπλασιαζόμενο αυτό το εμβαδόν με το

ενεργό μήκος του κινητήρα και το ειδικό βάρος του εκάστοτε υλικού μας δίνει το συνολικό βάρος του κινητήρα.

3.4 Διερεύνηση της καταλληλότερης διαμόρφωσης

Έχοντας πλέον εξασφαλίσει μία παραμετροποιημένη σχεδίαση, που μέσω ενός προγράμματος σχεδιάζει αυτόματα γεωμετρικές βάσει συγκεκριμένων παραμέτρων, μπορούμε να περάσουμε στην διερεύνηση της καταλληλότερης για την εφαρμογή.

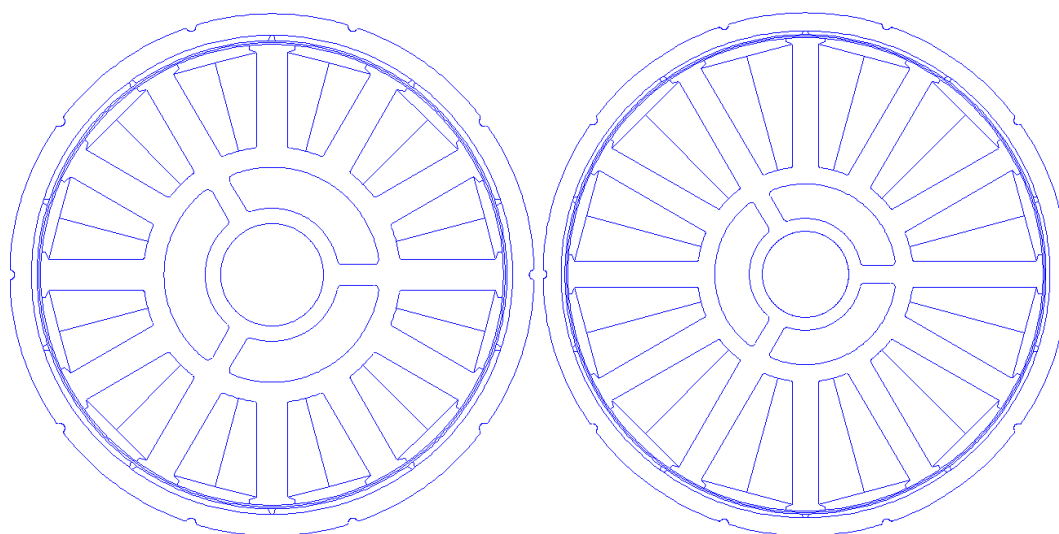
Σε αυτό το στάδιο της εργασίας έγινε μία αναζήτηση του ολικού βέλτιστου χρησιμοποιώντας συνοπτικά την εξής τακτική :

- 1) Αρχικά έγινε μία προσπάθεια εύρεσης των βασικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κινητήρα. Πριν προχωρήσει ένας σχεδιαστής σε οποιαδήποτε διερεύνηση πρέπει να ορίσει βάσει δοκιμών κάποιες βασικές διαστάσεις του κινητήρα, οι οποίες θα ευθύνονται για ικανή απόδοση ροπής και σχετικά ποιοτική κυματομορφή τάσης. Σε αυτό το βήμα δόθηκε επίσης ειδική προσοχή για την επιλογή διαστάσεων που θα προσφέρουν υψηλή απόδοση στο σύστημα.
- 2) Ύστερα έγιναν προσομοιώσεις γεωμετριών με διάφορους συνδυασμούς αυλακών/πόλων και τύπων τυλιγμάτων διατηρώντας γενικά σταθερό τον όγκο του κινητήρα. Σε αυτό το στάδιο δόθηκε ιδιαίτερη μέριμνα ώστε να ευρεθούν αυτοί οι συνδυασμοί που ενώ αποδίδουν την απαιτούμενη ροπή, ταυτόχρονα εξασφαλίζουν και ελάχιστη κυμάτωση ροπής και αρμονική παραμόρφωση της τάσης.
- 3) Στους υπό εξέταση συνδυασμούς προστέθηκε και η γεωμετρία άνισων δοντιών προκειμένου να διευρυνθεί η γκάμα πιθανών επιλογών.
- 4) Επιλέχθηκαν οι καλύτεροι από τους συνδυασμούς και αυτοί προκρίθηκαν στην τελευταία φάση, κατά την οποία έγιναν εκτενείς αναλύσεις ευαισθησίας, προκειμένου να ευρεθεί η συνολικά πιο συμφέρουσα γεωμετρία για τον κάθε έναν, εξετάζοντας παράλληλα την χρησιμότητα βελτιστοποίησης σε δύο σημεία λειτουργίας.
- 5) Τέλος, έγινε επιλογή του πιο συμφέροντα συνδυασμού σταθμίζοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε γεωμετρίας.

3.4.1 Εύρεση βασικών διαστάσεων

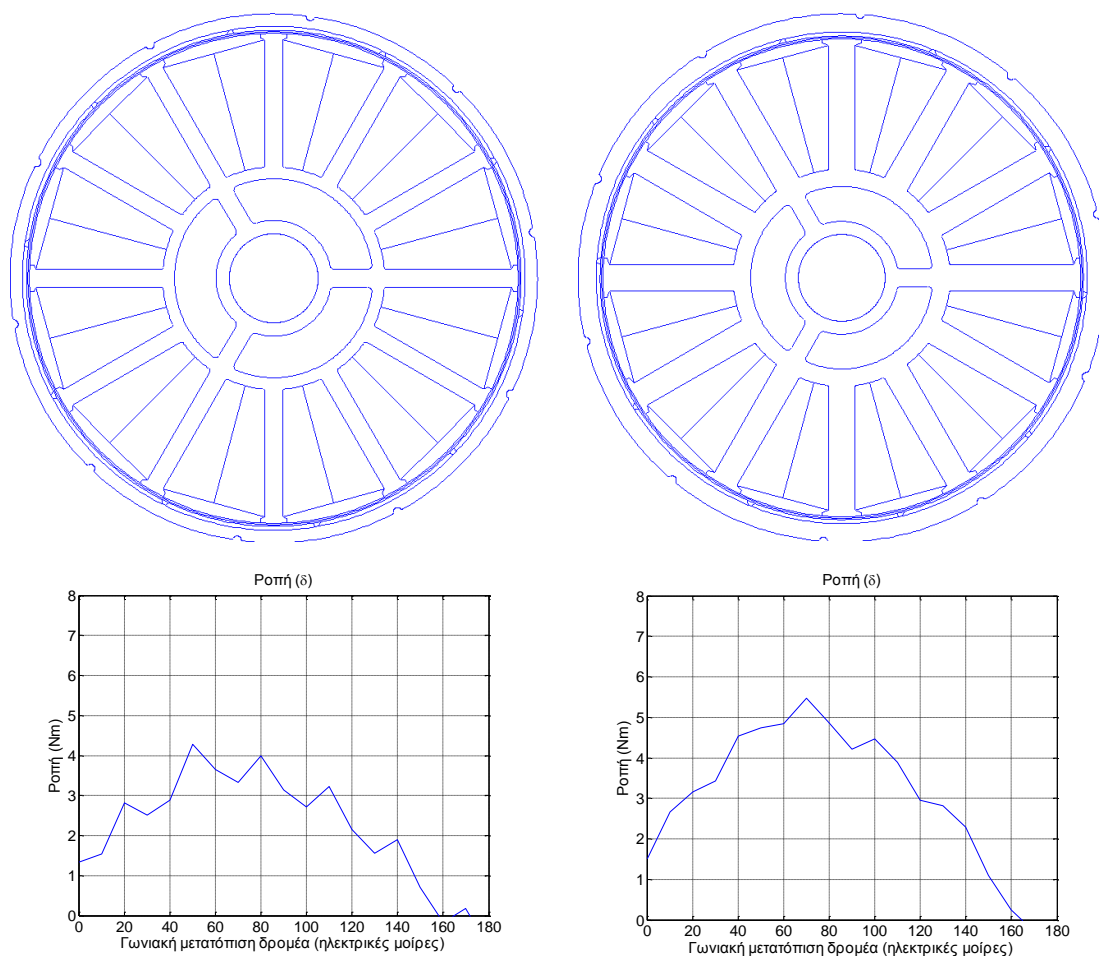
Η προκαταρκτική σχεδίαση δεν είναι ικανή να δώσει ακριβείς τιμές των διαστάσεων του κινητήρα. Επίσης, δεν μπορεί να ορίσει όλες τις διαστάσεις, αλλά μόνο τις πιο βασικές. Για αυτούς τους λόγους πρέπει να γίνει μία οριστικοποίηση αυτών, μέσω προσομοιώσεων. Επίσης, στην παρούσα φάση δόθηκε ειδική μέριμνα στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η οποιαδήποτε μεταβολή στην γεωμετρία ενός μικρού κινητήρα μονίμων μαγνητών επηρεάζει τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του. Το αποτέλεσμα της κάθε μεταβολής στις διαστάσεις γίνεται εύκολα αντιληπτό παρατηρώντας τις κυματομορφές τάσης, μέγιστης ροπής και κυμάτωσης ροπής που εξάγονται από την προσομοίωση. Τα πιο ουσιαστικά συμπεράσματα, που είναι και γενικεύσιμα, εκθέτονται παρακάτω.

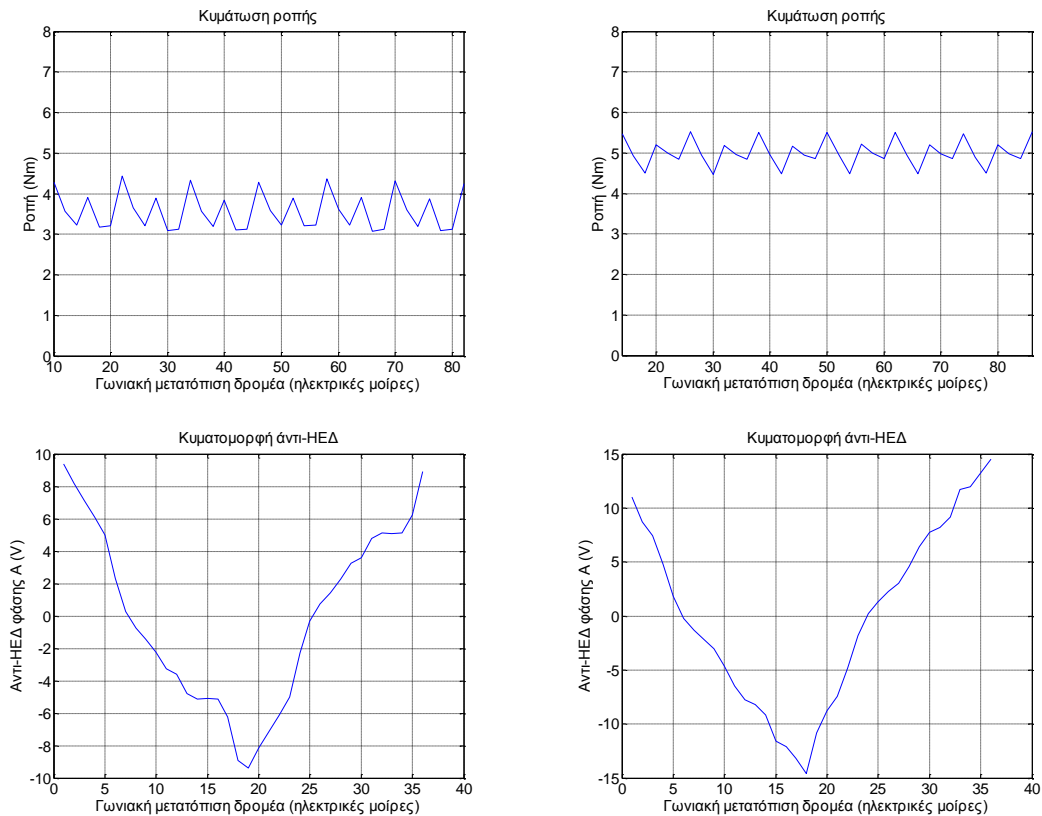
Αρχικά, λοιπόν, έγιναν δοκιμές με τις εξωτερικές διαστάσεις του κινητήρα προκειμένου να ευρεθεί ποια τιμή πρέπει να έχουν ώστε να αποδίδει ο κινητήρας την επιθυμητή ροπή. Για παράδειγμα, βλέπουμε στο *σχήμα 3.20* στα αριστερά μία εκτέλεση με εξωτερική ακτίνα στάτη $45mm$ και στα δεξιά με $55mm$. Ο αριθμός αυλακών είναι 12 και ο αριθμός των πόλων 10. Η ροπή που αποδίδεται στα αριστερά είναι $3 Nm$ και στα δεξιά $5,5 Nm$. Συνεπώς, μία μείωση κατά 18% στην διάμετρο του στάτη επιφέρει μία μείωση κατά 45% στην ροπή. Είναι φανερό ότι και η παραμικρή μεταβολή στην διάσταση αυτή επιφέρει μεγάλες αλλαγές στην επίδοση του κινητήρα.



Σχήμα 3.20: Γεωμετρίες κινητήρων με αριθμό αυλακών/πόλων 12/10 με διάμετρο στάτη $90mm$ στα αριστερά και $110mm$ στα δεξιά.

Βασική παράμετρο αποτελεί και η απόσταση μεταξύ των αυλακών ή διαφορετικά, το πάχος του δοντιού. Είναι πρακτικά ο «δρόμος» της μαγνητικής ροής στον κινητήρα, συνεπώς ένα υπερβολικό άνοιγμα αυτού του δρόμου επιβαρύνει το βάρος χωρίς σημαντικό όφελος, ενώ κάποιο στένεμα «στραγγαλίζει» την ροή οδηγώντας σε αυξημένες απώλειες, υψηλές θερμοκρασίες και απώλεια ισχύος. Ένα παράδειγμα δύο προσομοιώσεων θα δούμε στο *σχήμα 3.20*, όπου στα αριστερά έχει δημιουργηθεί γεωμετρία με δόντι πάχους $4mm$ και στα δεξιά με δόντι πάχους $6mm$. Επισημαίνεται ότι μία μεταβολή στο πάχος του δοντιού επιφέρει μεταβολή στην επιφάνεια της αύλακας και συνεπώς στο χωρικό ρεύμα που μπορεί να διέλθει από μέσα. Ωστόσο, στο παρόν παράδειγμα και στις δύο περιπτώσεις το ρεύμα έχει τεθεί το ίδιο. Παρατηρούμε ότι στην πρώτη περίπτωση η ροπή είναι $3,5 Nm$, η κυμάτωση ροπής $37,9\%$ και η αρμονική παραμόρφωση της τάσης $23,4\%$. Οι αντίστοιχες τιμές στην δεύτερη είναι $5,5 Nm$, 21% κυμάτωση και $18,6\%$ παραμόρφωση. Είναι συνεπώς άμεσο συμπέρασμα ότι η μείωση του πάχους του δοντιού πρωτίστως επηρεάζει την αποδιδόμενη ροπή και την κυμάτωση αυτής, αλλά και δευτερευόντως εισάγει αρμονικές συνιστώσες.





Σχήμα 3.20: Γεωμετρίες κινητήρων με αριθμό αυλακών/πόλων 12/10 και πάχος δοντιού 4mm στα αριστερά και 6mm στα δεξιά. Ακολουθούν οι καμπύλες μέγιστης ροπής, κυμάτωσης ροπής και αντί-HEΔ.

Ενδιαφέρον έχει και η περίπτωση μεταβολής του ενεργού μήκους της μηχανής χωρίς καμία άλλη μεταβολή στην γεωμετρία. Έτσι λοιπόν διατηρώντας την προηγούμενη γεωμετρία με πάχος δοντιού 6mm, η οποία έχει ενεργό μήκος 35mm και προσομοιώνοντας μία ίδια με διπλάσιο ενεργό μήκος, δηλαδή 70mm θα έχουμε τα εξής ενδιαφέροντα αποτελέσματα, τα οποία τοποθετήθηκαν στον πίνακα 3.5 για καλύτερη κατανόηση. Παρατηρείται διπλασιασμός της ροπής, της τάσης και των απωλειών σιδήρου καθώς αυτά είναι μεγέθη εντελώς ανάλογα του μήκους της μηχανής. Αξιοσημείωτο συμπέρασμα είναι η μη μεταβολή της κυμάτωσης ροπής και της αρμονικής παραμόρφωσης παρά το γεγονός ότι τόσο η τάση όσο και η ροπή έχουν διπλασιαστεί. Οι απώλειες χαλκού και το συνολικό βάρος της μηχανής αυξήθηκαν μεν αλλά δεν διπλασιάστηκαν. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι και τα δύο αυτά μεγέθη εξαρτώνται από τα τυλίγματα του στάτη, το μήκος των οποίων στα άκρα τους είναι σταθερό και ανεξάρτητο από το ενεργό μήκος της μηχανής.

| Ενεργό μήκος (mm) | 35 | 70 |
|--------------------------|-----------|-----------|
| Ροπή (Nm) | 5,0 | 10,0 |
| Κυμάτωση ροπής (%) | 21,1 | 21,1 |
| Αρμονική παραμόρφωση (%) | 18,6 | 18,6 |
| Τάση (V_{rms}) | 8,3 | 16,5 |
| Απώλειες χαλκού (W) | 41,1 | 67,2 |
| Ρεύμα γραμμής (A) | 7,1 | 7,1 |
| Απώλειες σιδήρου (W) | 1,3 | 2,6 |
| Συνολικές απώλειες (W) | 42,4 | 69,9 |
| Βάρος κινητήρα (kg) | 2,4 | 4,5 |
| Απόδοση (%) | 80,2 | 83,1 |

Πίνακας 3.5: Χαρακτηριστικά μηχανών ενεργού μήκους 35mm και 70mm.

Ανάλογη διαδικασία ακολουθήθηκε και στις υπόλοιπες παραμέτρους του κινητήρα. Ωστόσο δεν υπάρχει λόγος να εκτεθεί η κάθε μία από αυτές και η συνεισφορά της στην ποιότητα λειτουργίας του κινητήρα, καθώς αφορούν κυρίως την συγκεκριμένη γεωμετρία και δεν μπορούν να γενικευτούν σε όλες τις περιπτώσεις.

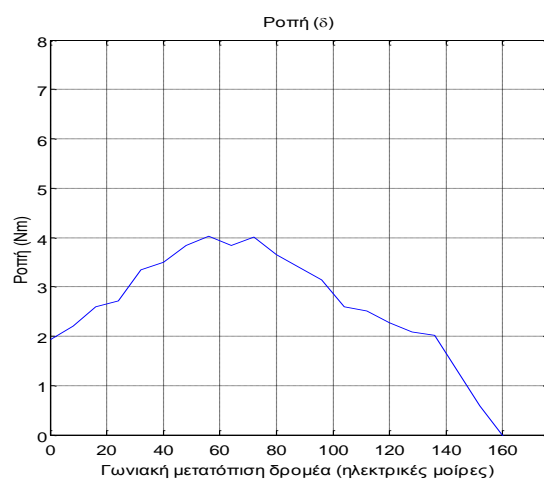
3.4.2 Διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων

Έχοντας πλέον μία γεωμετρία η οποία είναι αποδεκτή ως προς τις διαστάσεις της, είναι δυνατή η διερεύνηση διαφόρων τύπων τυλιγμάτων, αριθμού πόλων/αυλακών και κατανομής δοντιών. Σύμφωνα με τον πίνακα 3.3 παρατηρούμε ότι συγκεκριμένοι συνδυασμοί αριθμού αυλακών/πόλων εμφανίζουν μεγαλύτερο συντελεστή τυλίγματος από άλλους. Λόγω αυτής της διαπίστωσης επιλέχθηκαν συγκεκριμένοι συνδυασμοί με τον μεγαλύτερο συντελεστή τυλίγματος, οι οποίοι και προσομοιώθηκαν. Οι συνδυασμοί που επιλέχθηκαν φαίνονται στον πίνακα 3.6. Ύστερα δοκιμάστηκαν όλοι αυτοί βάσει του προγράμματος προσομοίωσης και τα αποτελέσματα φαίνονται στην συνέχεια. Συνδυασμοί με αριθμό πόλων από 20 και πάνω δεν εξετάστηκαν καθόλου. Αυτή η απόφαση πάρθηκε σε συνεργασία με την ομάδα ηλεκτρονικών ισχύος, καθώς δεν θα ήταν εύκολος ο έλεγχος της πολυπολικής μηχανής με την υπάρχουσα τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στα σχήματα 3.21-3.28. Η περιγραφή των συμπερασμάτων ακολουθεί στην επόμενη σελίδα.

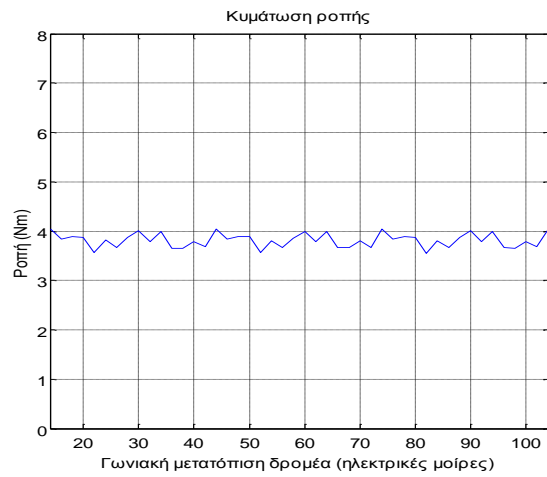
| Qs/p | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 |
|------|-------|-------|----|-------|-------|----|-------|----|
| 6 | | | | | | | | |
| 9 | 0.945 | 0.945 | | | | | | |
| 12 | | 0.933 | | 0.933 | | | | |
| 15 | | | | 0.951 | 0.951 | | | |
| 18 | | | | | 0.945 | | 0.945 | |
| 21 | | | | | | | | |
| 24 | | | | | | | | |
| 27 | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | |
| 33 | | | | | | | | |
| 36 | | | | | | | | |

Πίνακας 3.6 Επιλεγμένοι συνδυασμοί αριθμού αυλακών/πόλων

Αρχικά προσομοιώθηκε η 8-πολική διαμόρφωση με συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης 9 αυλακών. Οι κυματομορφές ροπής και τάσης φαίνονται στα παρακάτω σχήματα. Παρατηρούμε ότι η κυμάτωση ροπής είναι αποδεκτή αλλά η αρμονική παραμόρφωση της τάσης ισχυρή.



(α)



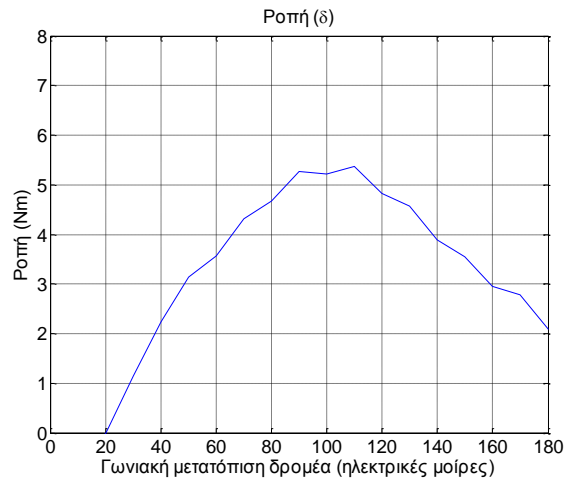
(β)



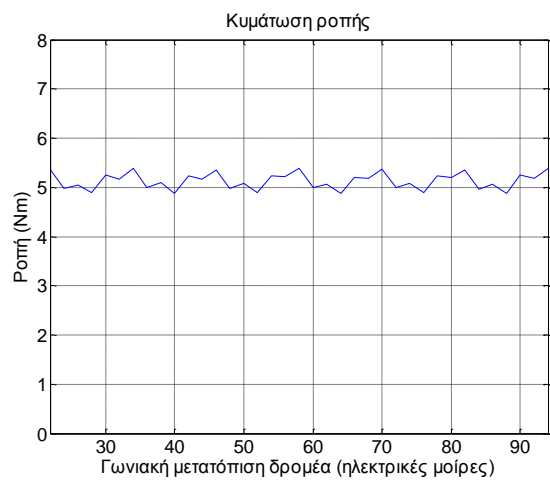
(γ)

Σχήμα 3.21: Κυματομορφές ροπής (α, β) και τάσης (γ) για μία διαμόρφωση 9/8 διπλής στρώσης

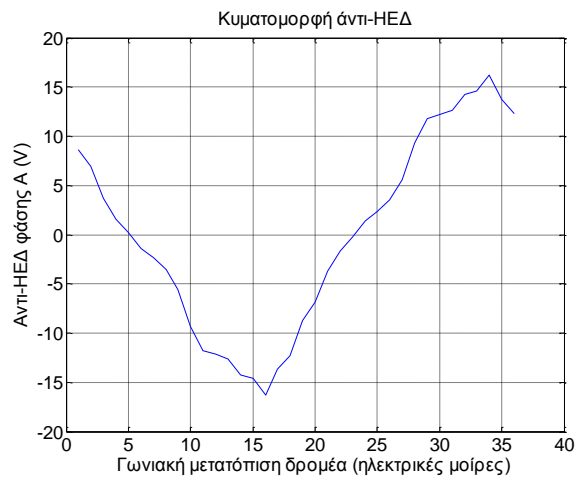
Επόμενη είναι η 10-πολική γεωμετρία με 9 αύλακες συγκεντρωμένου τυλίγματος διπλής στρώσης, η οποία εμφανίζει μικρότερες αρμονικές συνιστώσες της τάσης σε σχέση με την 9/8. Η κυμάτωση ροπής είναι σχετικά περιορισμένη και εδώ.



(α)



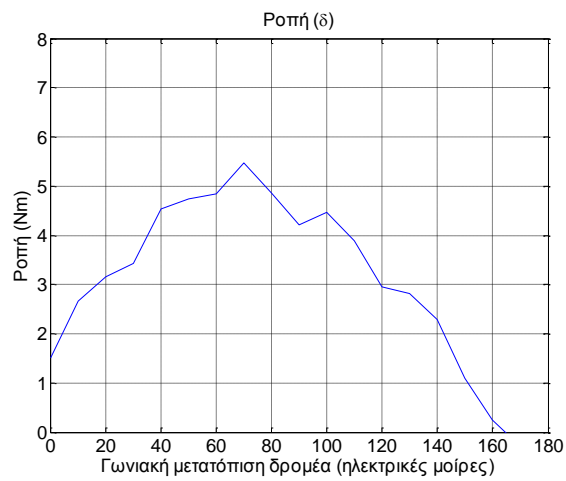
(β)



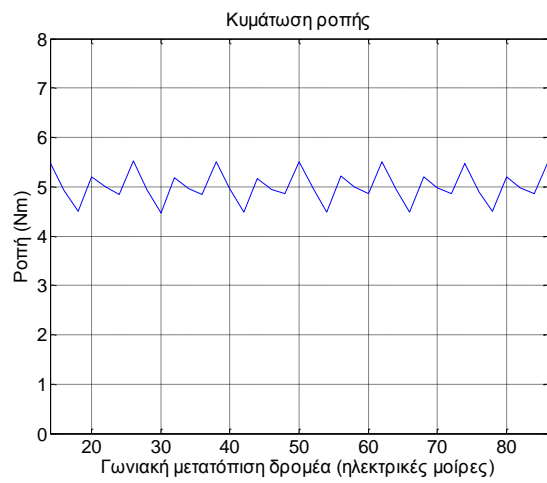
(γ)

Σχήμα 3.22: Κυματομορφές ροπής (α, β) και τάσης (γ) για μία διαμόρφωση 9/10 διπλής στρώσης

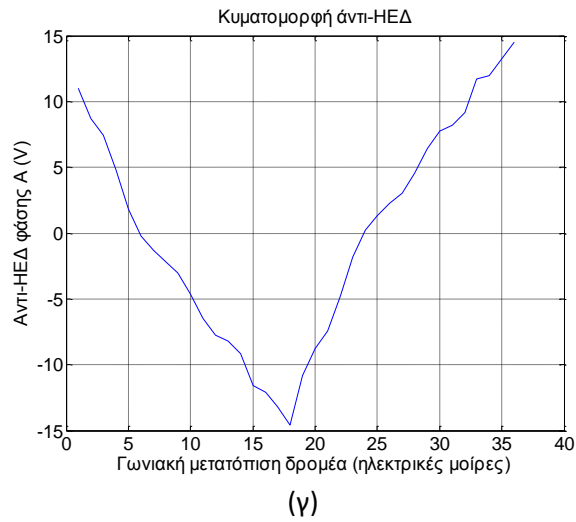
Εξίσου καλή με την 9/10 είναι και η 12/10, η οποία δεν εμφανίζει βελτιωμένα χαρακτηριστικά σε σχέση με την προηγούμενη.



(α)

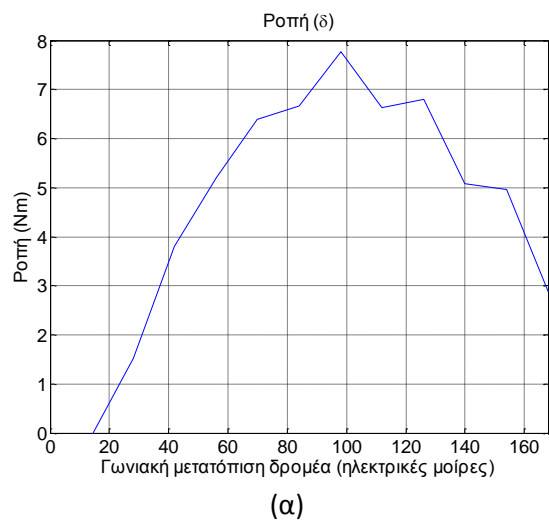


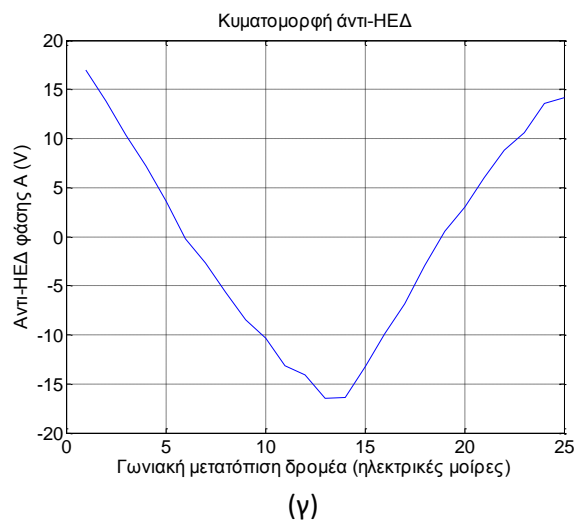
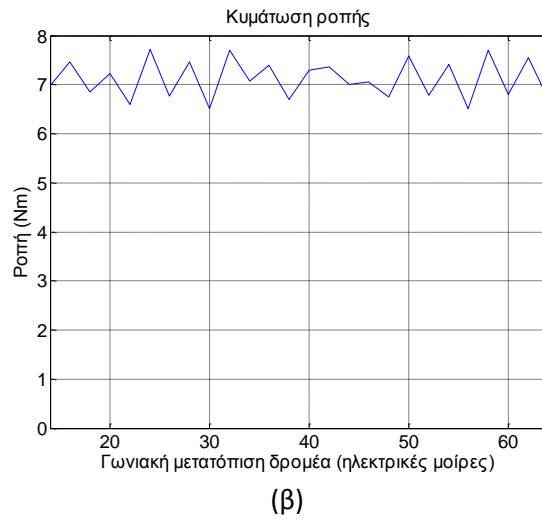
(β)



Σχήμα 3.23: Κυματομορφές ροπής (α , β) και τάσης (γ) για μία διαμόρφωση 12/10 διπλής στρώσης

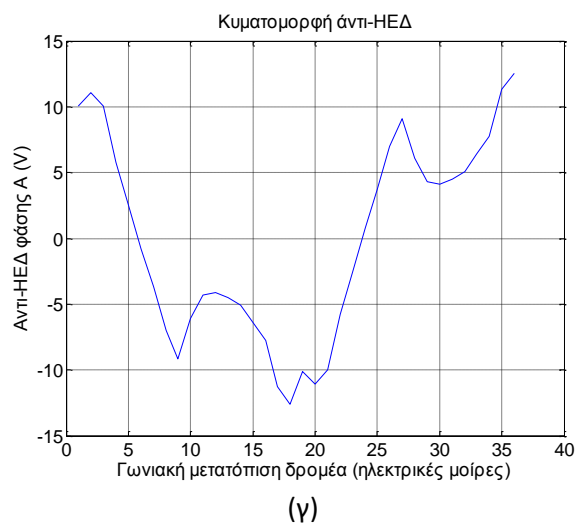
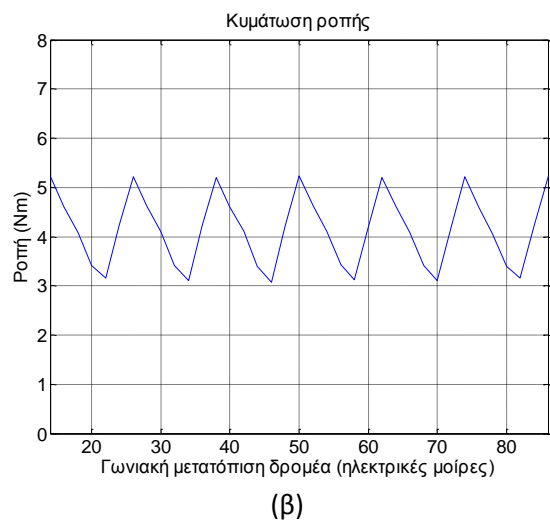
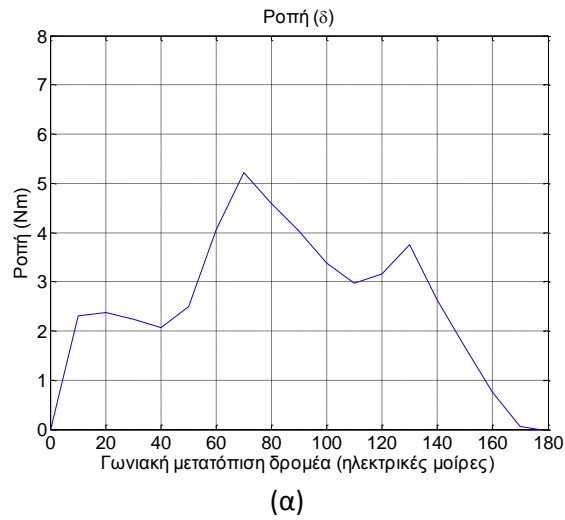
Ακολουθεί η γεωμετρία 12/14 με συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης. Αποτελεί γεγονός ότι υπερέχει έναντι της 12/10 στην τάση αλλά όχι όμως και στην κυμάτωση ροπής, όπως βλέπουμε και παρακάτω.





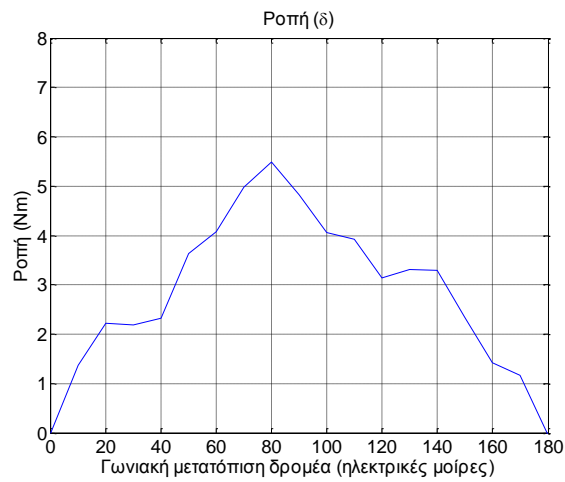
Σχήμα 3.24: Κυματομορφές ροπής και τάσης για μία διαμόρφωση 12/14 διπλής στρώσης

Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαμόρφωσης 15/14, η οποία δείχνει να έχει σοβαρά προβλήματα αρμονικών τάσης και κυματώσεως ροπής.

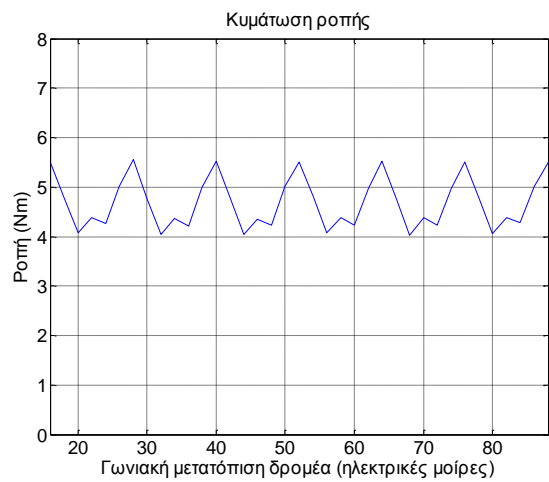


Σχήμα 3.25: Κυματομορφές ροπής (α, β) και τάσης (γ) για μία διαμόρφωση 15/14 διπλής στρώσης

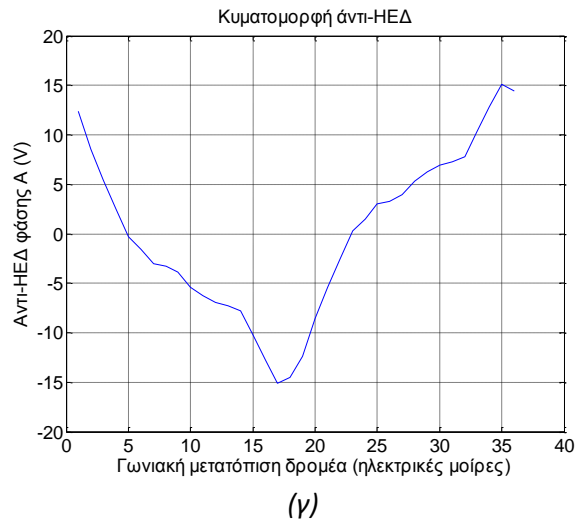
Η διαμόρφωση 15/16 που παρουσιάζεται στο *σχήμα 3.26* εμφανίζεται συνολικά καλύτερη από την προηγούμενη. Ωστόσο οι αρμονικές της τάσης είναι και εδώ ιδιαίτερα αυξημένες.



(α)

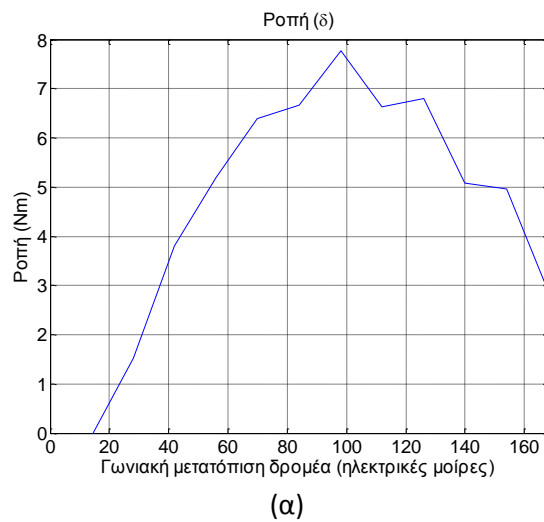


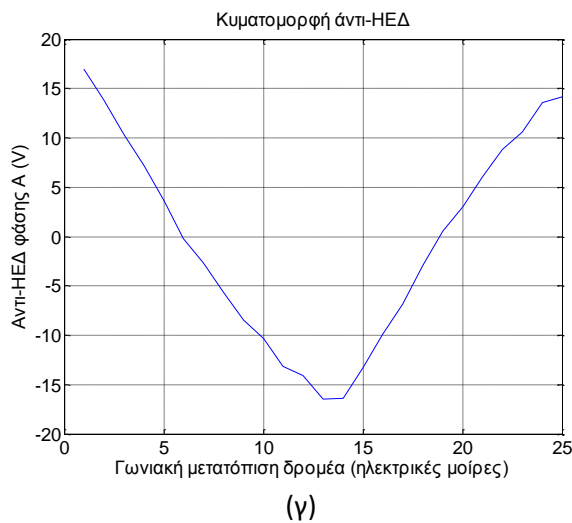
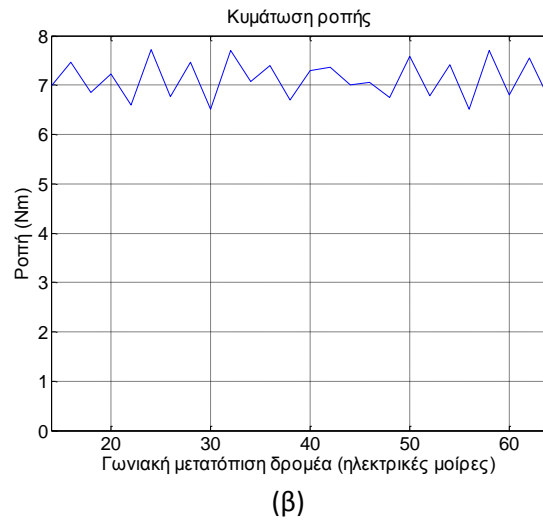
(β)



Σχήμα 3.26: Κυματομορφές ροπής (α , β) και τάσης (γ) για μία διαμόρφωση 15/16 διπλής στρώσης

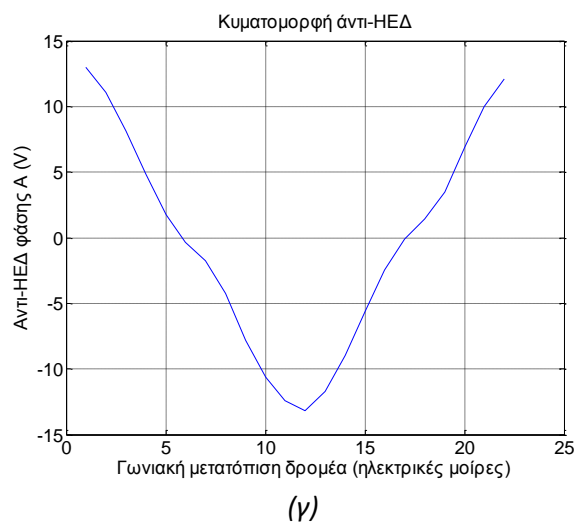
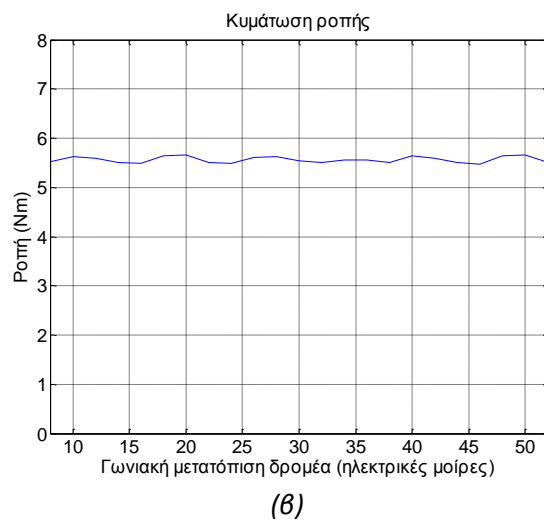
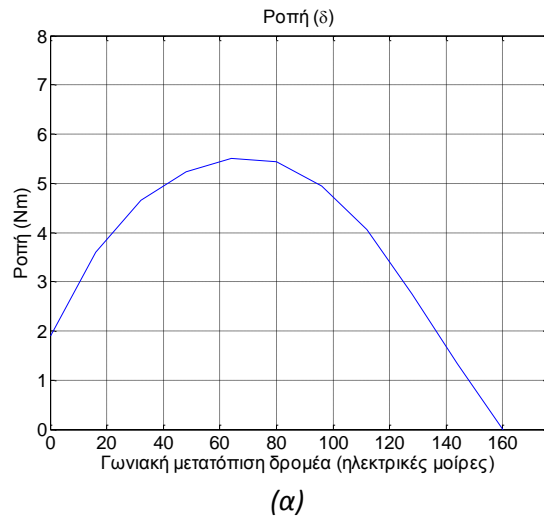
Ακόμα καλύτερα χαρακτηριστικά λειτουργίας παρουσιάζει η 18/16 που αποτελεί την καλύτερη γεωμετρία μέχρι στιγμής. Η κυμάτωση ροπής είναι ελάχιστη και η τάση είναι αρκετά ημιτονοειδής.





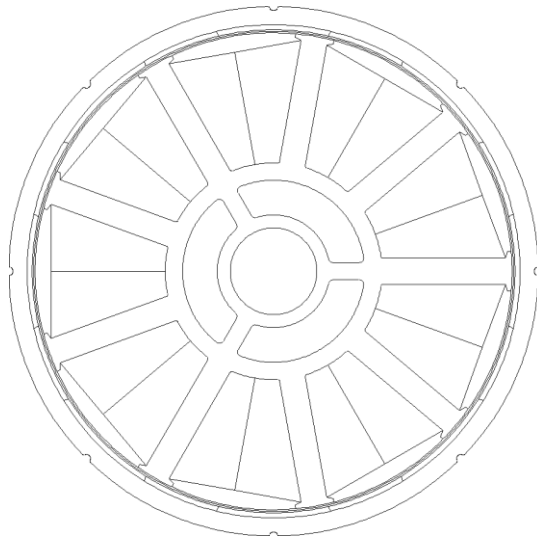
Σχήμα 3.27: Κυματομορφές ροπής (α, β) και τάσης (γ) για μία διαμόρφωση 18/16 διπλής στρώσης

Κορυφαία μεταξύ όλων των διαμορφώσεων εμφανίζεται η 18/20. Εμφανίζει άριστα χαρακτηριστικά λειτουργίας, χωρίς καν να είναι βελτιστοποιημένη. Η καμπύλη μέγιστης ροπής είναι ομαλή χωρίς ταλαντώσεις, η κυμάτωση ροπής είναι μηδαμινή και η κυματομορφή της τάσης έχει ελάχιστες αρμονικές. Ωστόσο, παρότι εξετάστηκε για λόγους πληρότητας, δεν μπορεί να επιλεγεί στην περίπτωση μας για τον λόγο που ειπώθηκε προωύτερα και αφορά τα ηλεκτρονικά ισχύος.

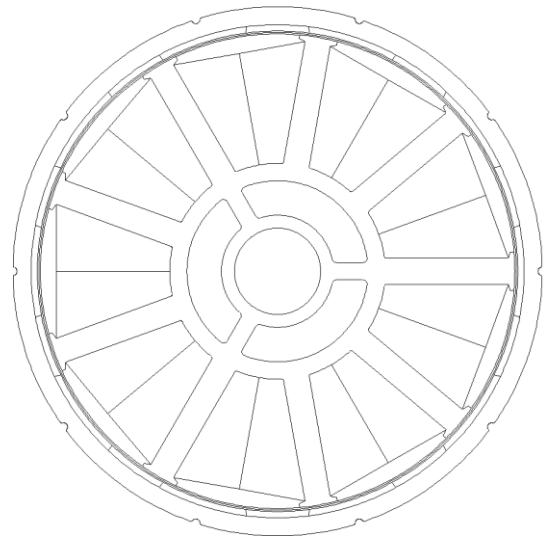


Σχήμα 3.28: Κυματομορφές ροπής (α , β) και τάσης (γ) για μία διαμόρφωση 18/20 διπλής στρώσης

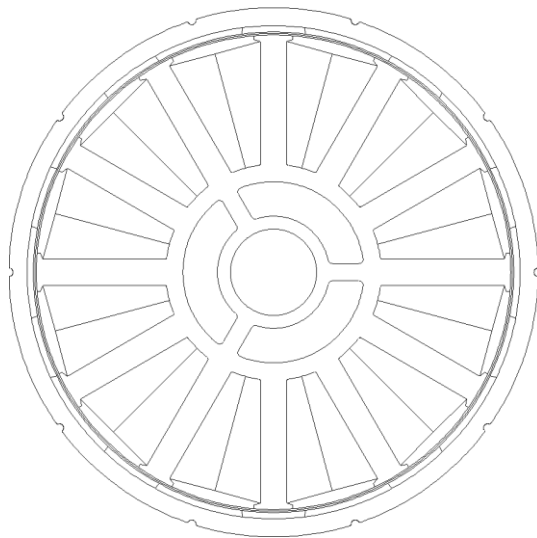
Οι γεωμετρίες των κινητήρων που χρησιμοποιήθηκαν για τις προηγούμενες προσομοιώσεις φαίνονται παρακάτω:



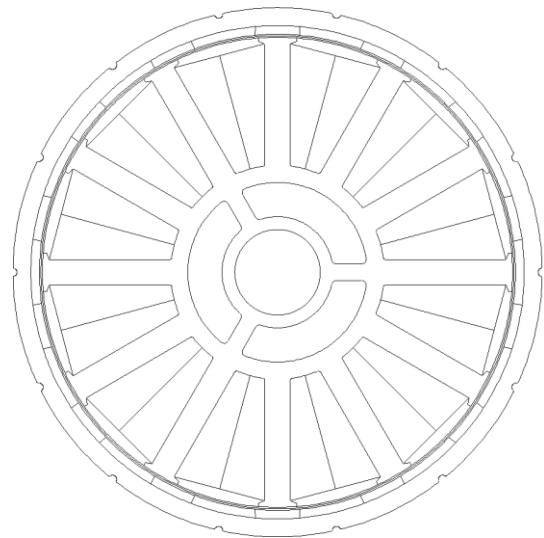
(α)



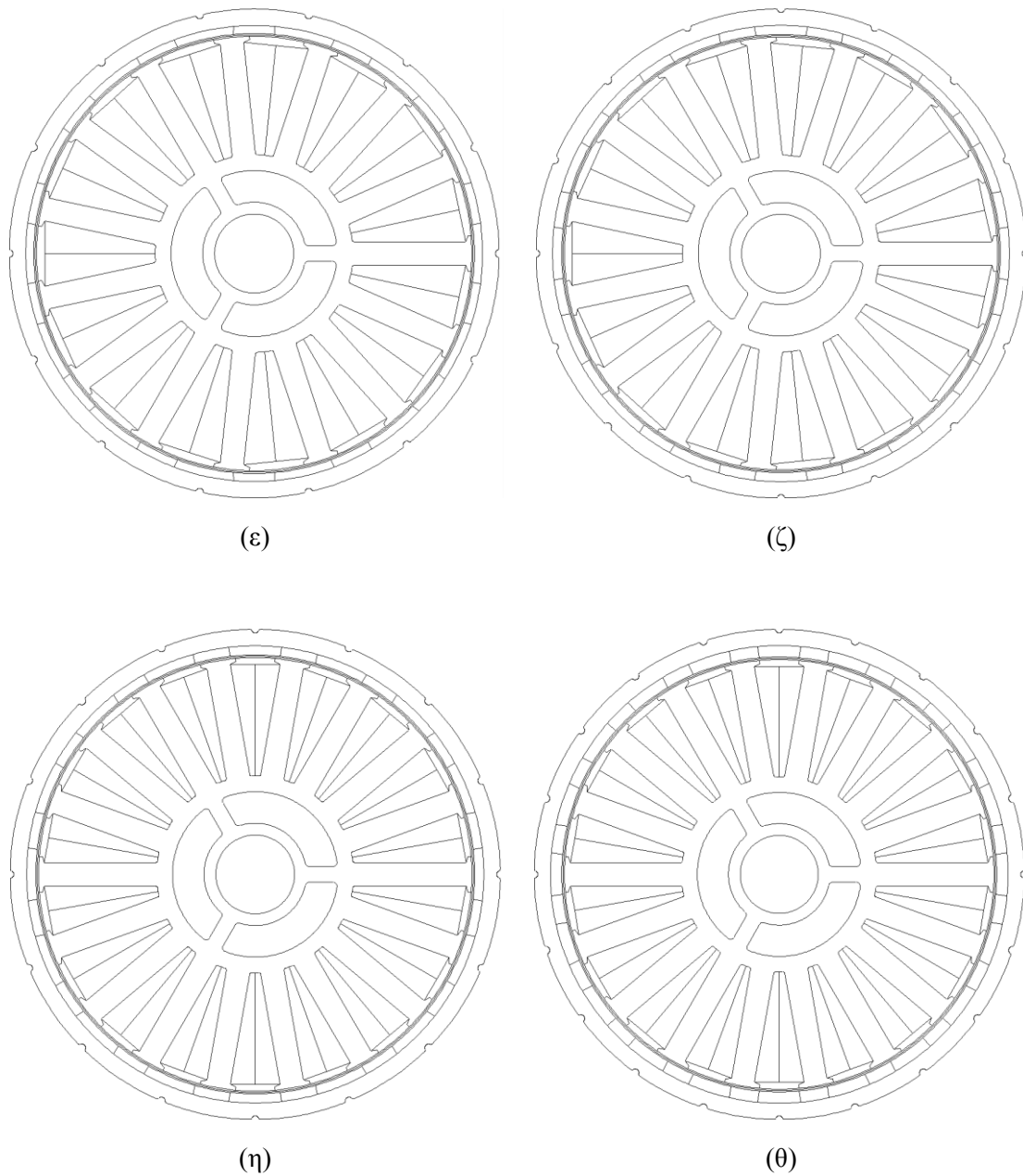
(β)



(γ)

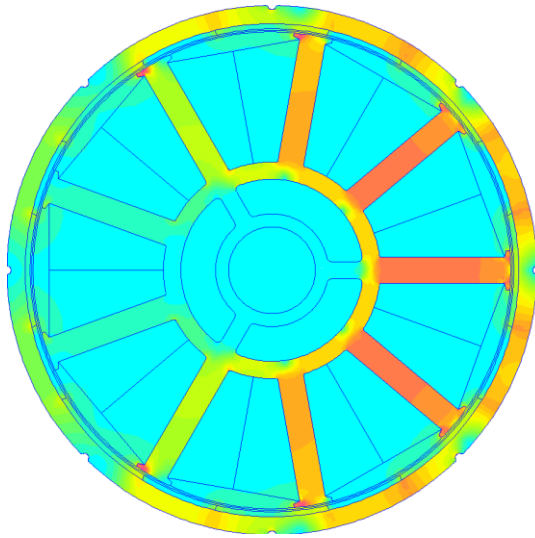


(δ)

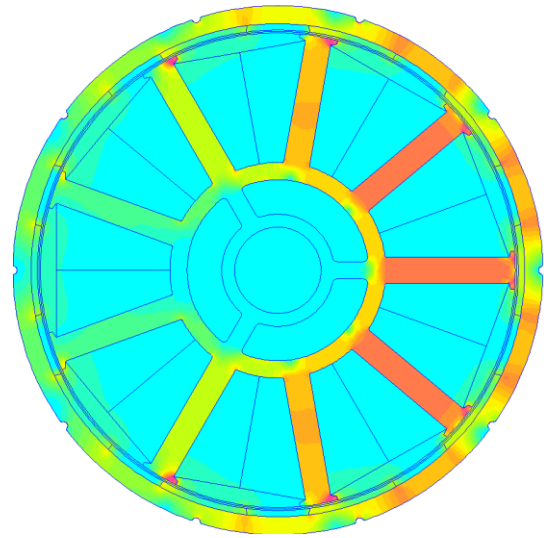


Σχήμα 3.29: Γεωμετρίες εξεταζόμενων διαμορφώσεων με συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης και αριθμό αυλάκων/πόλων: (α) 9/8, (β) 9/10, (γ) 12/10, (δ) 12/14, (ε) 15/14, (ζ) 15/16, (η) 18/16, (θ) 18/20

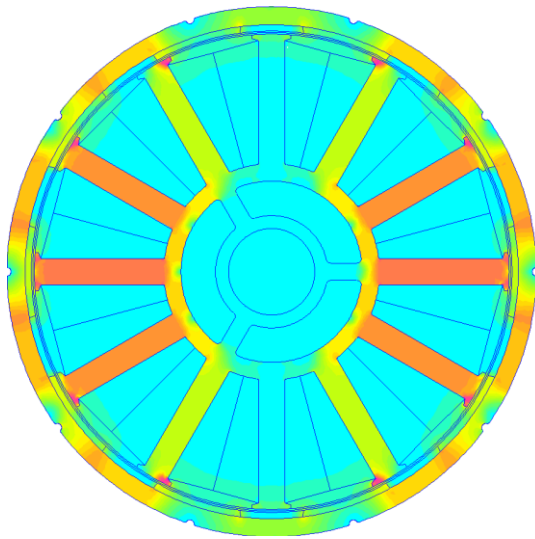
Οι αντίστοιχες κατανομές των μαγνητικών πεδίων φαίνονται κάτωθι. Η χρωματική κλίμακα κυμαίνεται ανάμεσα στα 0 με 2 *Tesla*. Το μωβ αντιστοιχεί σε πεδίο έντασης 2 *Tesla*.



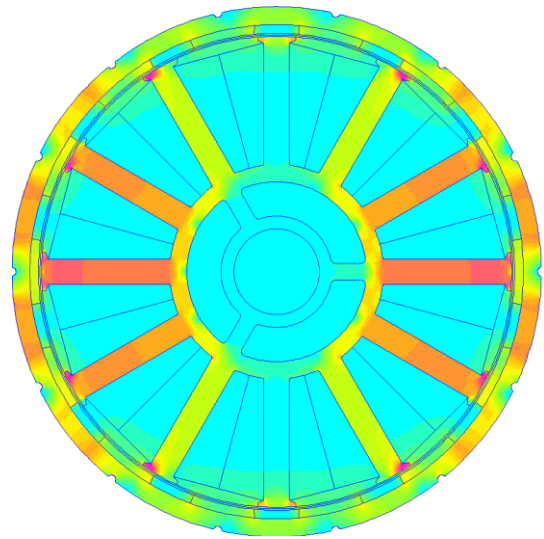
(α)



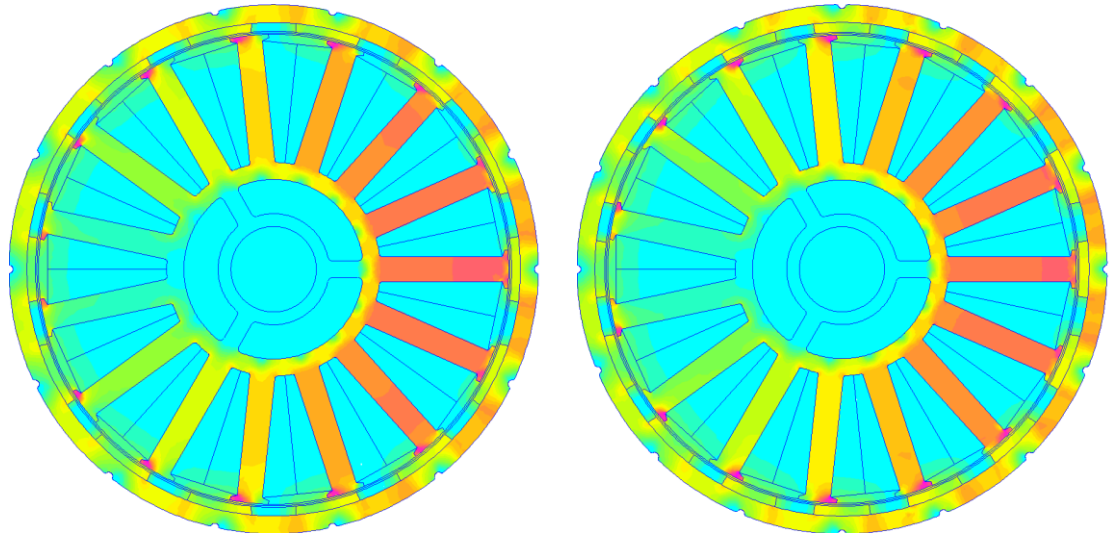
(β)



(γ)

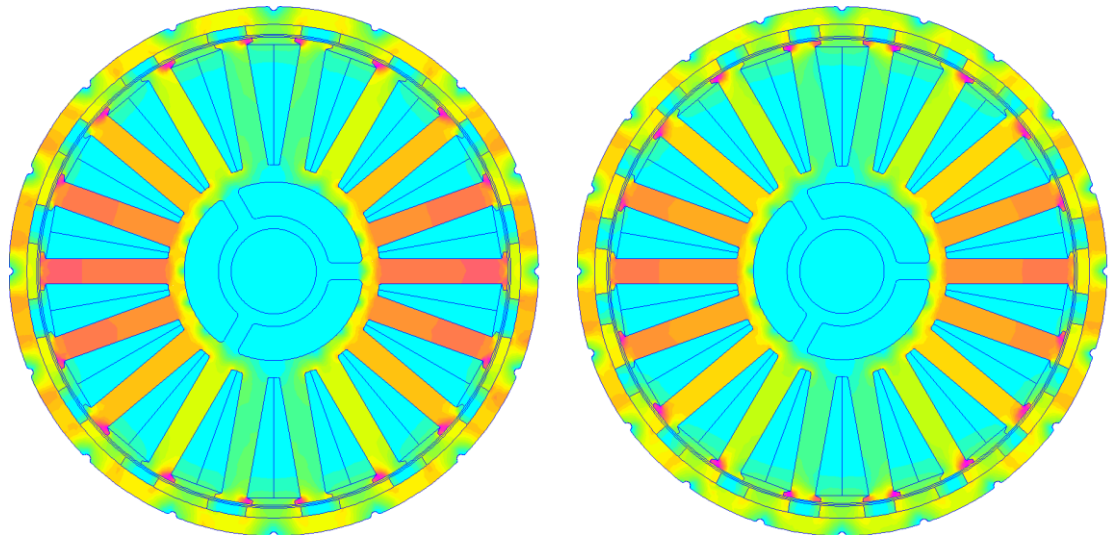


(δ)



(ε)

(ζ)



(η)

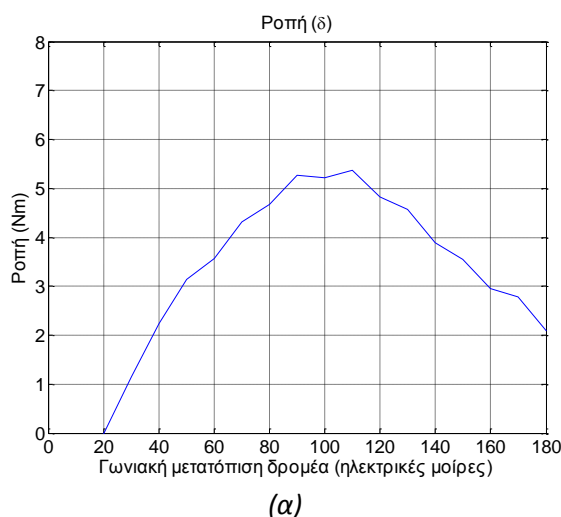
(θ)

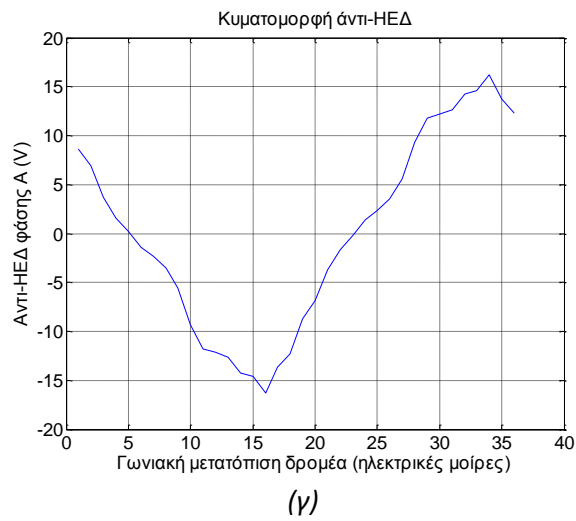
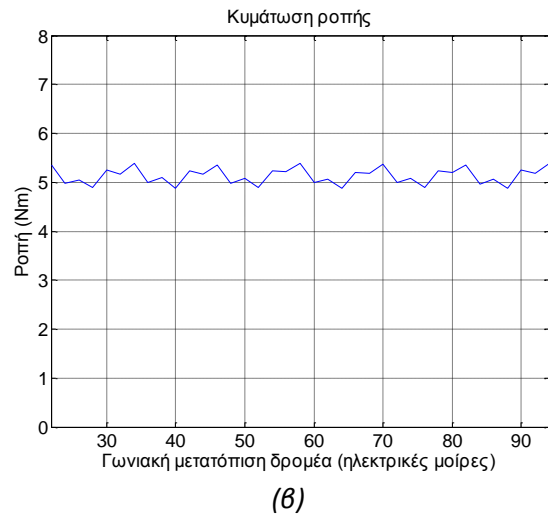
Σχήμα 3.30: Κατανομή μαγνητικού πεδίου εξεταζόμενων διαμορφώσεων με συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης και αριθμό αυλάκων/πόλων: (α) 9/8, (β) 9/10, (γ) 12/10, (δ) 12/14, (ε) 15/14, (ζ) 15/16, (η) 18/16, (θ) 18/20

Παρατηρούμε ότι στις διαμορφώσεις με αριθμό αυλακών 9 και 15 το πεδίο γίνεται εντονότερο στην μία πλευρά του κινητήρα, δηλαδή παρατηρείται ασύμμετρη μαγνητική δύναμη. Αυτό είναι ένα φαινόμενο που πρέπει να αποφευχθεί, καθώς είναι ένδειξη της δημιουργίας έντονης κυματώσεως ροπής που θα έχει σαν αποτέλεσμα μηχανικές καταπονήσεις και αυξημένες απώλειες. Από αυτό το πρόβλημα δείχνουν να είναι απαλλαγμένες οι διαμορφώσεις με αριθμό αυλακών 12 και 18.

Συνεπώς μπορούμε να περιορίσουμε τις επιλογές μας στις διαμορφώσεις 12/10, 12/14 και 16/18, καθώς η 18/20 είναι 20-πολική και δεν είναι επιτρεπτή επιλογή. Για αυτές τις τρεις διαμορφώσεις θα συνεχίσουμε τις δοκιμές περαιτέρω. Θα τις προσομοιώσουμε και με συγκεντρωμένο τύλιγμα μονής στρώσης, με γεωμετρία στάτη ίσων και άνισων δοντιών. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω στα *σχήματα 3.31 με 3.36*.

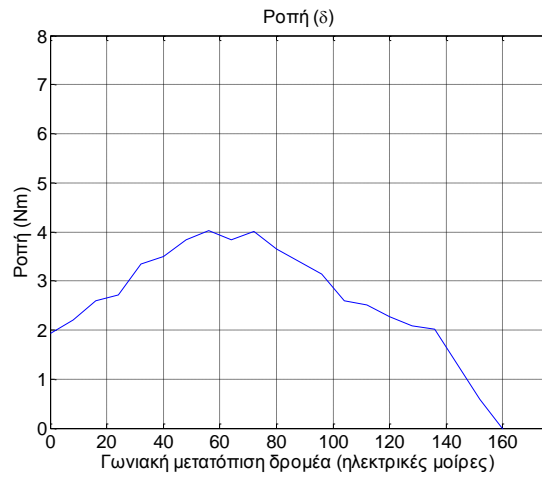
Μπορεί να δει κάποιος ότι οι διαμορφώσεις 12/10 και 12/14 δεν δείχνουν να παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα με τύλιγμα μονής στρώσης από ότι οι αντίστοιχες διπλής στρώσης. Η δυνατότητα των διαμορφώσεων αυτών να εμφανίζουν εφάμιλλα χαρακτηριστικά λειτουργίας με τις αντίστοιχες διπλής στρώσης είναι ένα πλεονέκτημα.



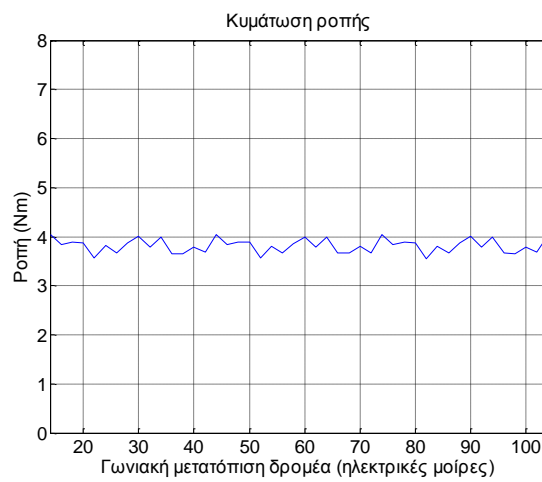


Σχήμα 3.31: Κυματομορφές ροπής (α, β) και τάσης (γ) για μία διαμόρφωση 12/10 μονής στρώσης

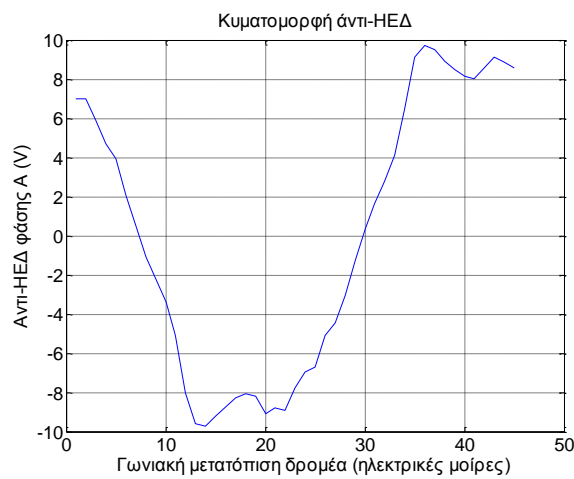
Η ανισότητα των δοντιών μειώνει την δυνατότητα απόδοσης μέγιστης ροπής και εισάγει μεγαλύτερες αρμονικές της τάσης σε αυτόν τον συνδυασμό αυλακών/πόλων, όπως θα δούμε στο σχήμα 3.32



(α)

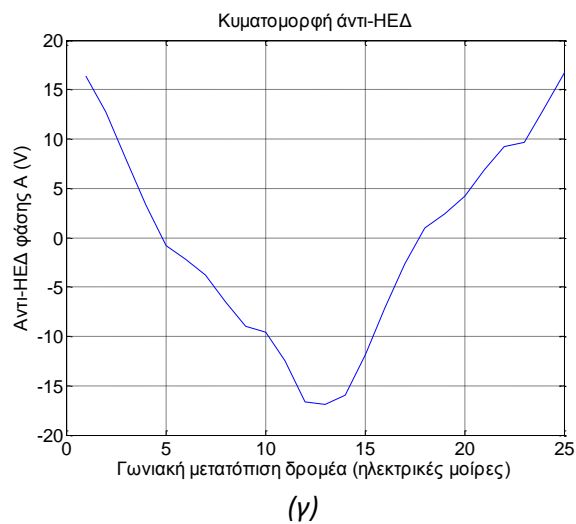
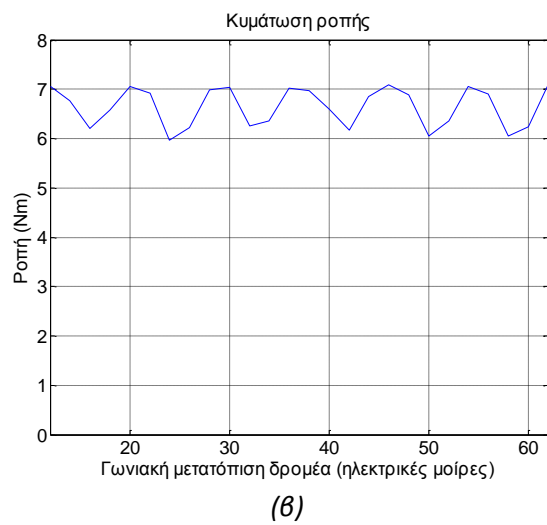
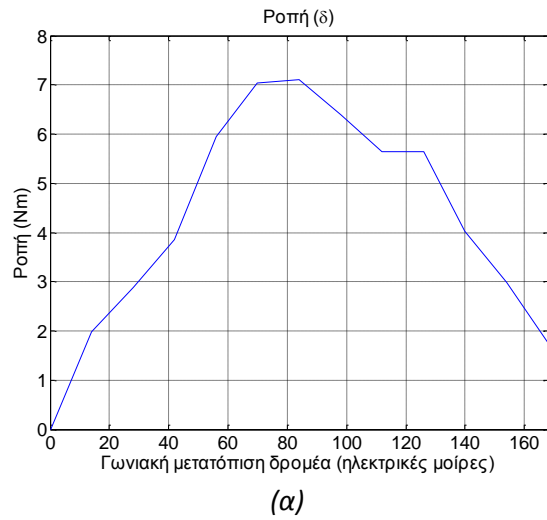


(β)



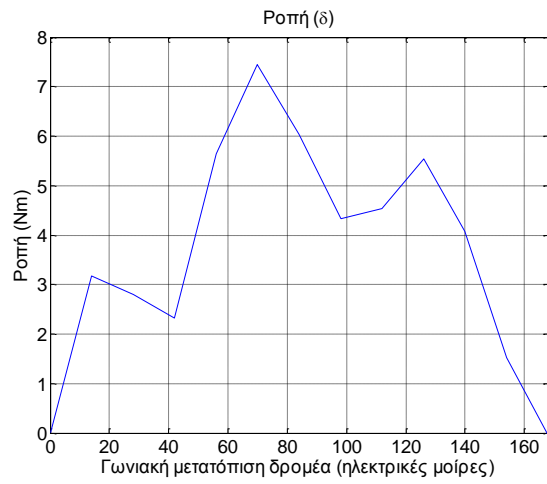
(γ)

Σχήμα 3.32: Κυματομορφές ροπής (α, β) και τάσης (γ) για μία διαμόρφωση 12/10 μονής στρώσης με άνισα δόντια

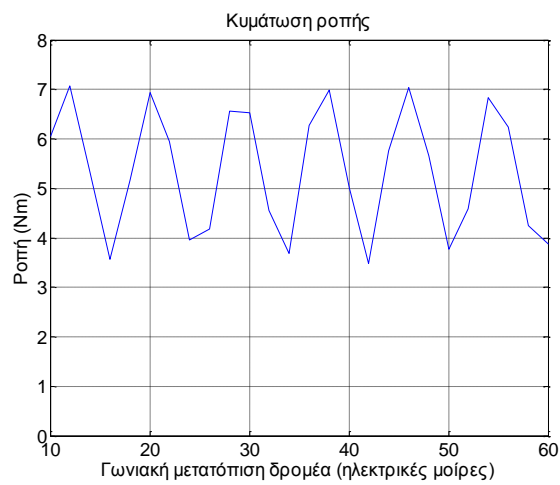


Σχήμα 3.33: Κυματομορφές ροπής (α, β) και τάσης (γ) για μία διαμόρφωση 12/14 μονής στρώσης

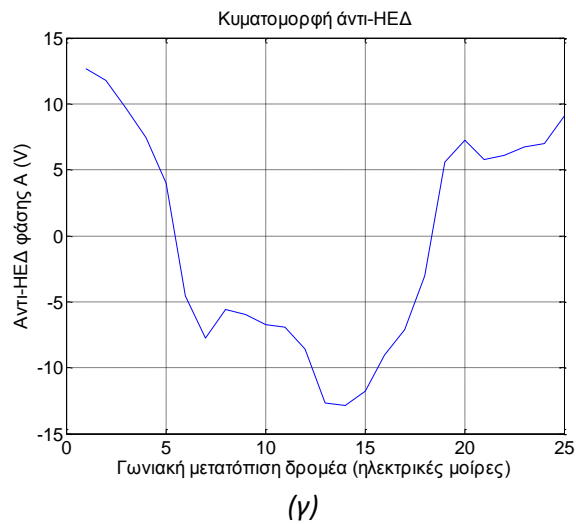
Αντίστοιχη συμπεριφορά βλέπουμε και στην 12/14. Στα *σχήματα 3.33 και 3.34* βλέπουμε ότι η ανισότητα των δοντιών εισάγει αρμονικές στην τάση και αυξάνει κατακόρυφα την κυμάτωση ροπής.



(α)

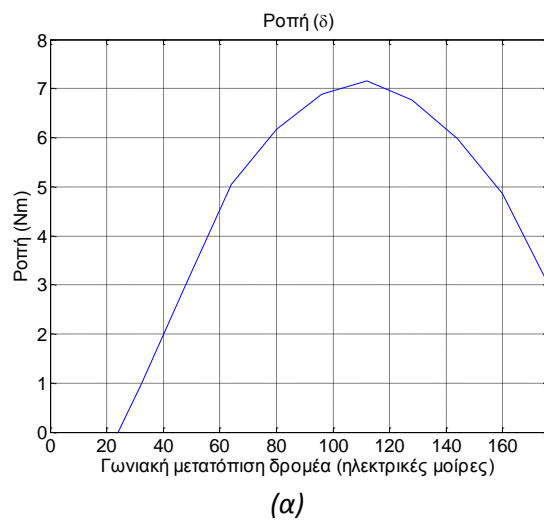


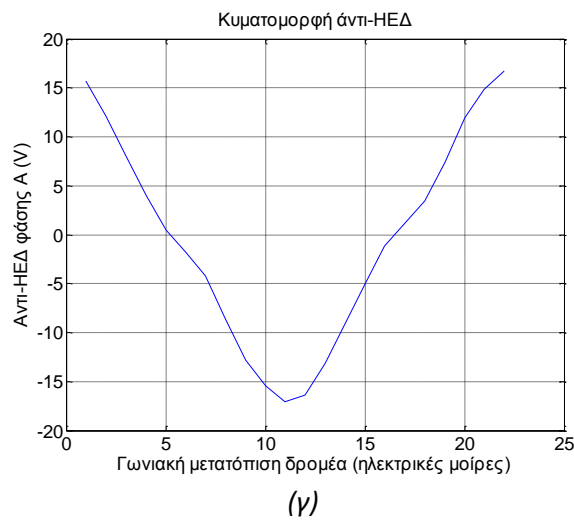
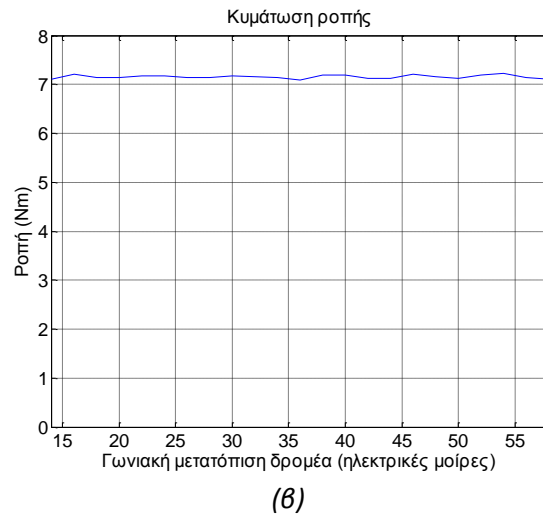
(β)



Σχήμα 3.34: Κυματομορφές ροπής (α , β) και τάσης (γ) για μία διαμόρφωση 12/14 μονής στρώσης με άνισα δόντια

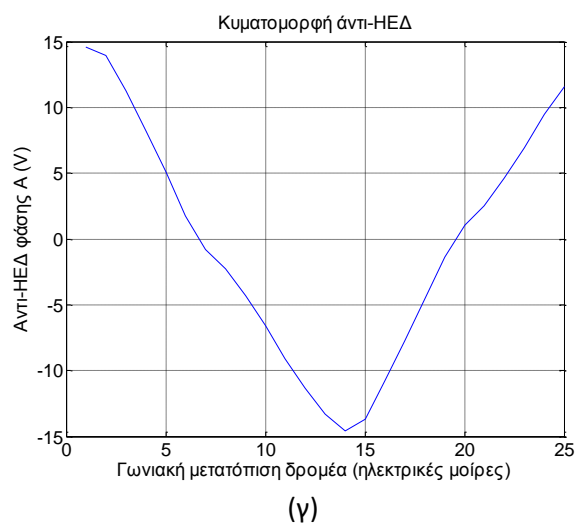
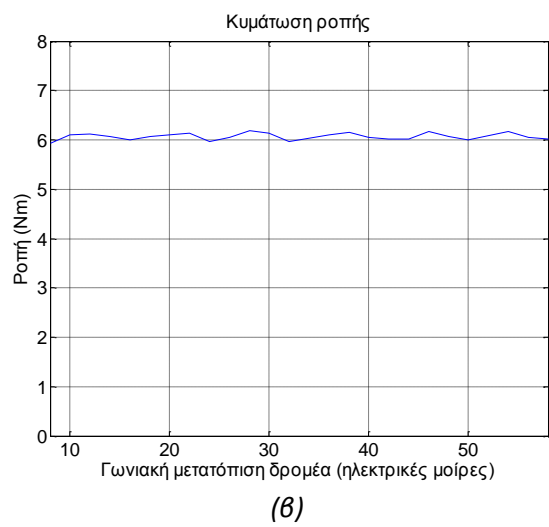
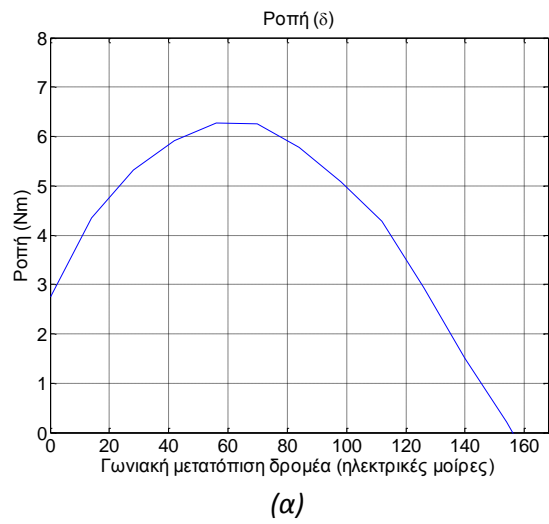
Αντίθετα, η 18/16 εμφανίζει εξαιρετικές κυματομορφές τάσης και ροπής εφάμιλλες και ίσως καλύτερες από τις αντίστοιχες με τύλιγμα διπλής στρώσης.





Σχήμα 3.35: Κυματομορφές ροπής (α, β) και τάσης (γ) για μία διαμόρφωση 18/16 μονής στρώσης

Η ανισότητα των δοντιών χαρίζει ακόμα καλύτερα χαρακτηριστικά λειτουργίας στην 18/16 όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.36.



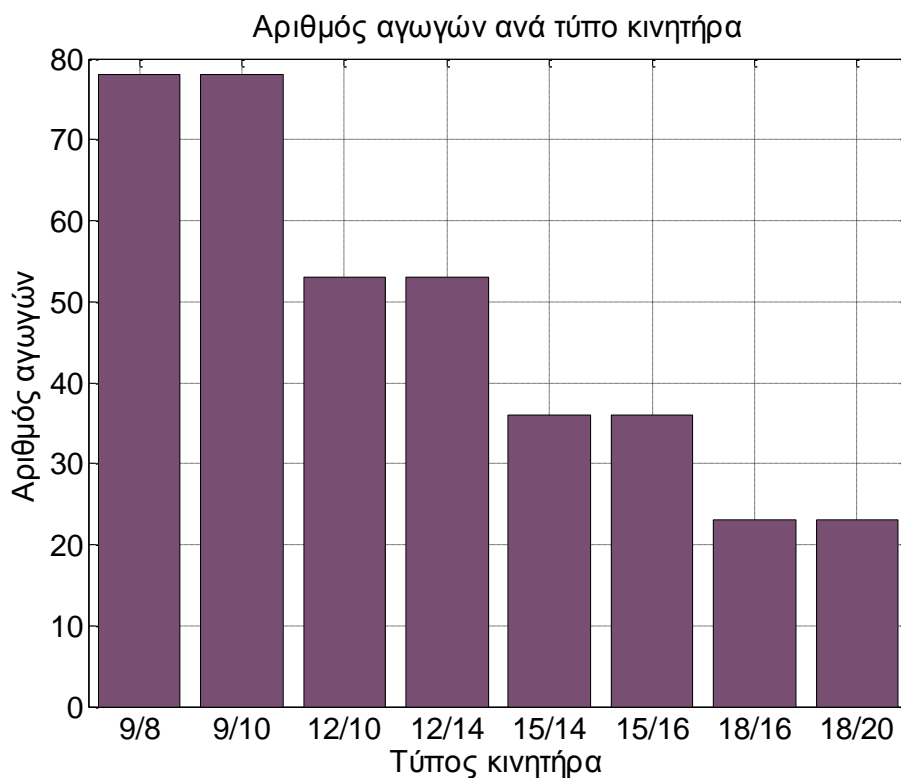
Σχήμα 3.36: Κυματομορφές ροπής (α, β) και τάσης (γ) για μία διαμόρφωση 18/16 μονής στρώσης με άνισα δόντια

Τα ανωτέρω σχήματα μπορούν να συγκεντρωθούν σε έναν πίνακα για καλύτερη επόπτευση. Επίσης, στις επόμενες σελίδες μπορούμε να δούμε ενδιαφέροντα γραφήματα που εξάγονται από τον πίνακα.

| Τύπος μηχανής | Αριθμός αγωγών | Συντελεστής πληρότητας αύλακας | Ροπή (Nm) | Κομάτωση ροπής (%) | Αντί-ΗΕΔ (V) | Αρμονική παραμόρφωση (%) | Απόδοση (%) | Βάρος κινητήρα (kg) |
|---------------|----------------|--------------------------------|-----------|--------------------|--------------|--------------------------|-------------|---------------------|
| 9/8 DL | 78 | 0,49 | 3,8 | 12,8 | 7,0 | 14,6 | 71,1% | 2,50 |
| 9/10 DL | 78 | 0,49 | 5,1 | 10,2 | 9,8 | 14,7 | 76,6% | 2,52 |
| 12/10 DL | 53 | 0,47 | 5,0 | 21,1 | 8,3 | 18,6 | 80,2% | 2,43 |
| 12/14 DL | 53 | 0,47 | 7,1 | 17,1 | 10,4 | 10,5 | 85,3% | 2,46 |
| 15/14 DL | 36 | 0,44 | 6,1 | 4,1 | 8,9 | 14,8 | 85,3% | 2,39 |
| 15/16 DL | 36 | 0,44 | 7,2 | 1,9 | 10,7 | 13,5 | 86,8% | 2,41 |
| 18/16 DL | 23 | 0,37 | 5,6 | 3,4 | 8,2 | 14,6 | 87,1% | 2,32 |
| 18/20 DL | 23 | 0,37 | 6,5 | 4,6 | 9,7 | 5,2 | 89,0% | 2,35 |
| 12/10 SL | 102 | 0,42 | 4,7 | 32,7 | 8,3 | 30,4 | 77,6% | 2,61 |
| 12/10 SLU | 102 | 0,38 | 4,1 | 52,0 | 7,5 | 47,8 | 76,2% | 2,50 |
| 12/14 SL | 102 | 0,42 | 6,6 | 17,1 | 10,2 | 20,8 | 82,0% | 2,51 |
| 12/14 SLU | 102 | 0,38 | 5,4 | 66,9 | 8,3 | 34,8 | 82,1% | 2,53 |
| 18/16 SL | 56 | 0,44 | 6,5 | 5,4 | 10,2 | 17,5 | 85,5% | 2,57 |
| 18/16 SLU | 72 | 0,47 | 7,0 | 2,9 | 10,5 | 22,7 | 82,7% | 2,65 |

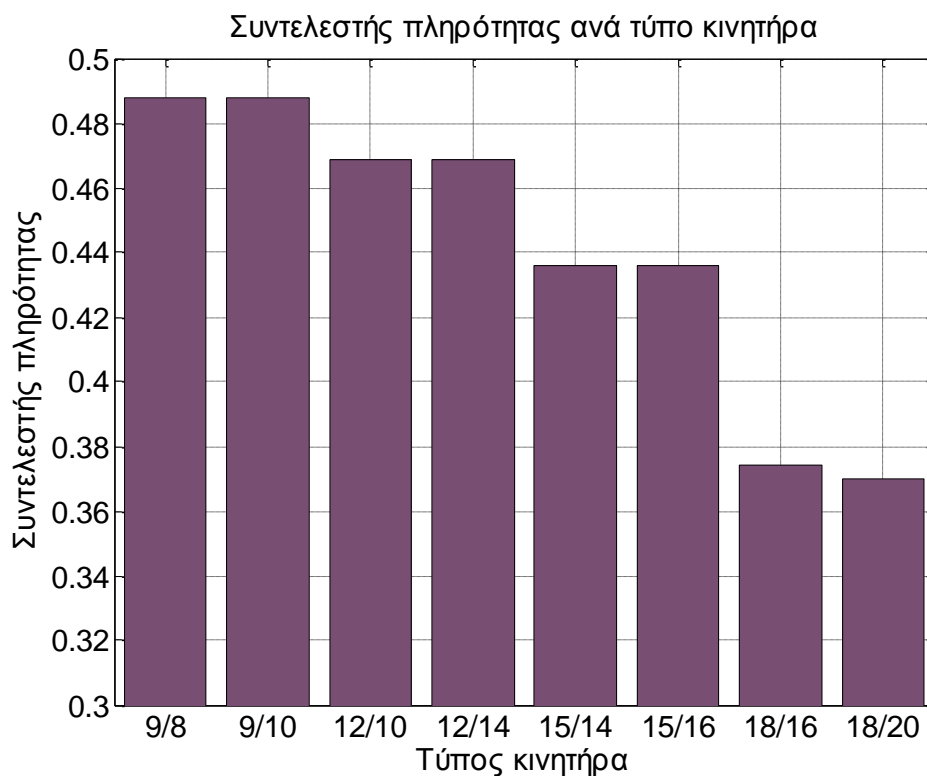
Πίνακας 3.7: Τεχνικά χαρακτηριστικά όλων των υπό εξέταση διαμορφώσεων και γεωμετριών (DL: Με συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης
SL: Με συγκεντρωμένο τύλιγμα μονής στρώσης
SLU: Με συγκεντρωμένο τύλιγμα μονής στρώσης με άνισα δόντια)

Αρχικά θα δούμε στα γραφήματα μία σύγκριση σε όλα τα επίπεδα ανάμεσα στους διάφορους συνδυασμούς αυλακών/πόλων με συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης.



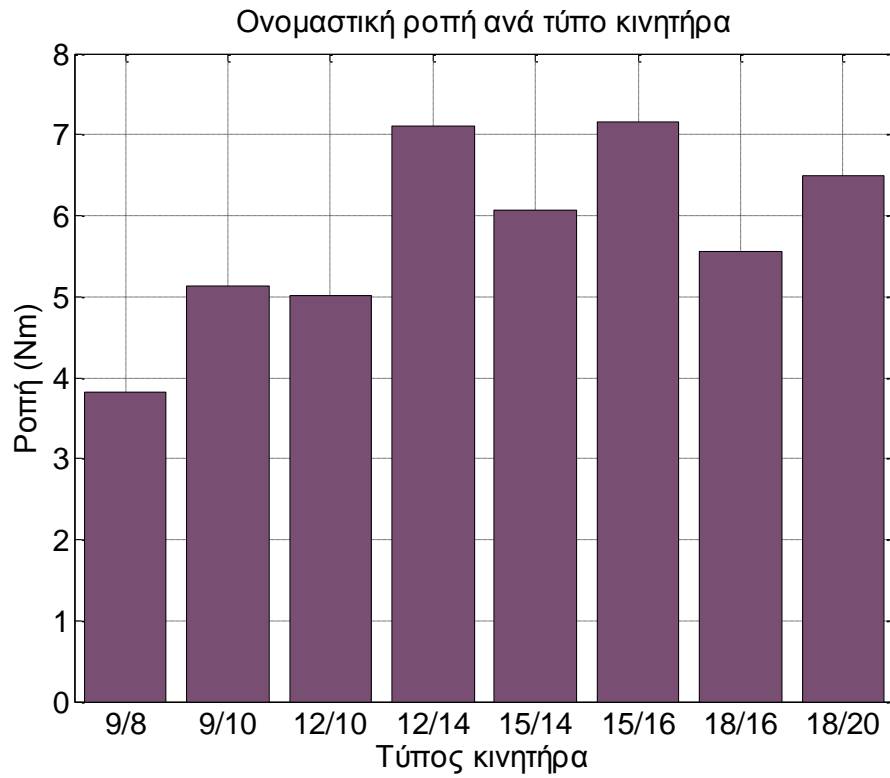
Σχήμα 3.37

Παρατηρούμε στο *σχήμα 3.37* ότι ο αριθμός των αγωγών που μπορεί να χωρέσει σε μία αύλακα μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των αυλακών, όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο. Αντίστοιχα μειώνεται και ο συντελεστής πληρότητας της αύλακας όπως βλέπουμε στο *σχήμα 3.38*. Με βάση αυτά που ειπώθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο για τον συντελεστή πληρότητας, δηλαδή ότι μειώνεται όσο περισσότερο τριγωνικό γίνεται το σχήμα της αύλακας, το φαινόμενο αυτό ήταν φυσικό επακόλουθο.



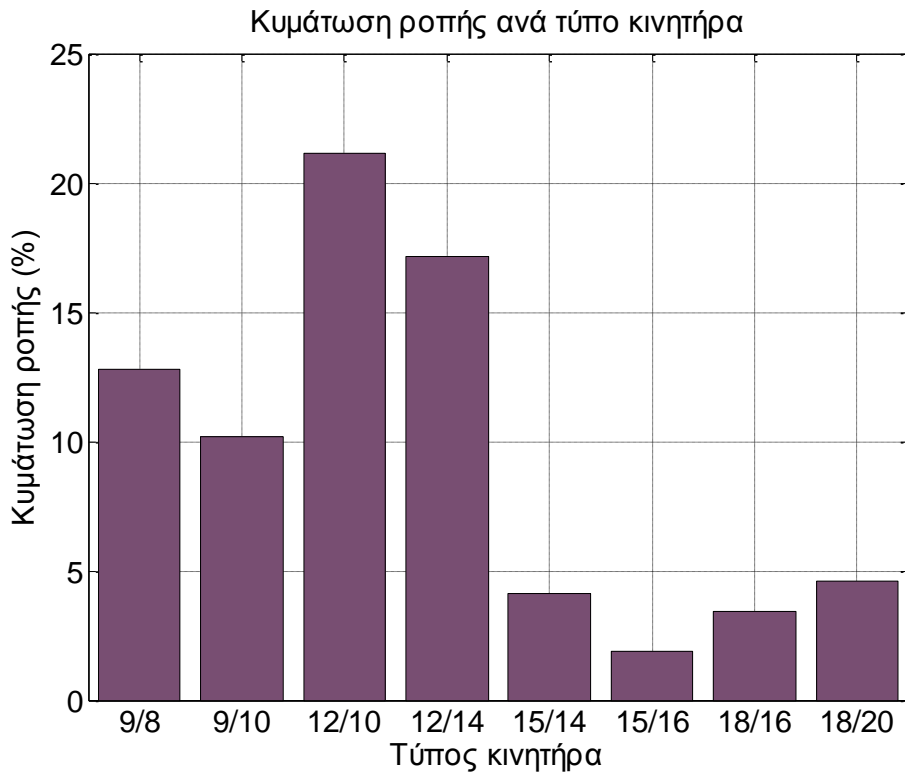
Σχήμα 3.38

Το σχήμα 3.39 που έχει να κάνει με την ονομαστική ροπή των διάφορων διαμορφώσεων έχει να μας διδάξει τα εξής σημαντικά. Μεταξύ δύο συνδυασμών με ίδιο αριθμό αυλακών, αυτός με το μεγαλύτερο αριθμό πόλων εμφανίζει και την μεγαλύτερη ροπή. Η μεγαλύτερη ροπή είναι επακόλουθο του ότι αυξάνεται συνολικά το βάρος των μαγνητών στον κινητήρα, άρα και το ένα από τα δύο πεδία γίνεται ισχυρότερο συμπαρασύροντας ολόκληρη την μηχανή σε απόδοση μεγαλύτερης ισχύος. Το δεύτερο είναι ότι μεταξύ δύο συνδυασμών με ίδιο αριθμό πόλων, ο συνδυασμός με τον μικρότερο αριθμό αυλακών εμφανίζει μεγαλύτερη δυνατότητα απόδοσης ροπής.

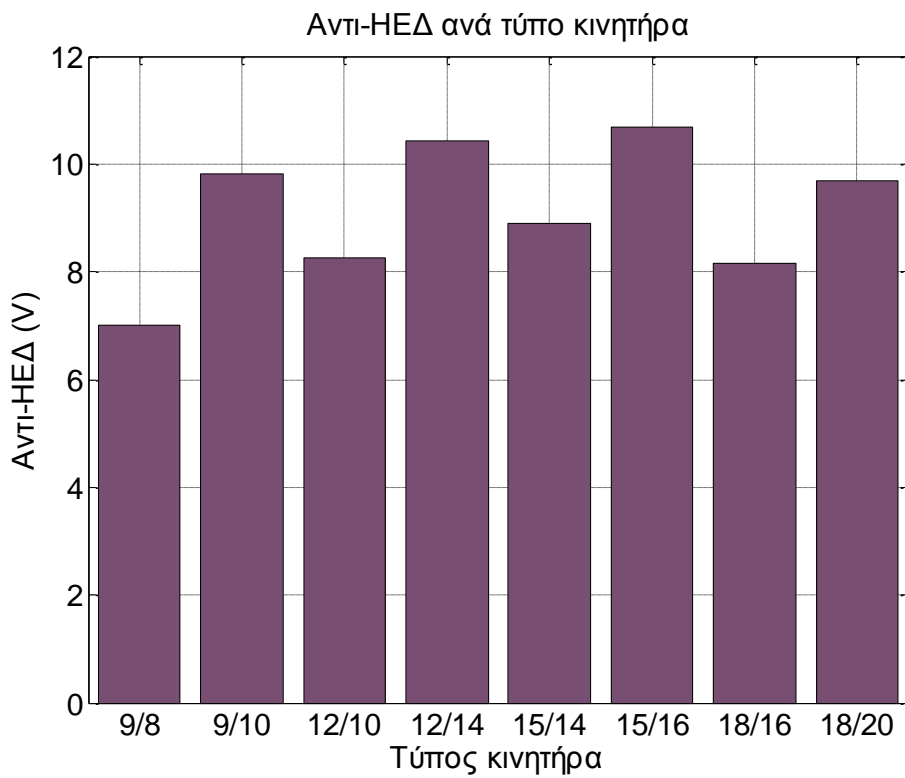


Σχήμα 3.39

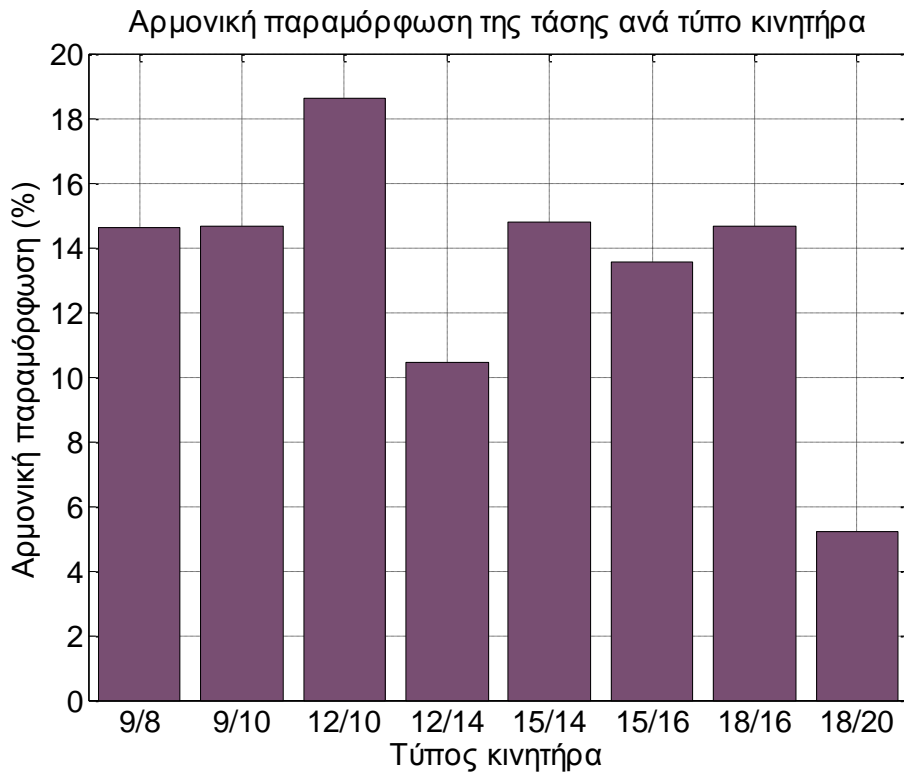
Η κυμάτωση ροπής (σχήμα 3.40), το μέτρο της τάσης (σχήμα 3.41) και η αρμονική παραμόρφωση της τάσης (σχήμα 3.42) δεν ακολουθούν κάποιο μοτίβο, συνεπώς έχουν πιθανώς να έχουν να κάνουν με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε σχεδιαζόμενου κινητήρα.



Σχήμα 3.40

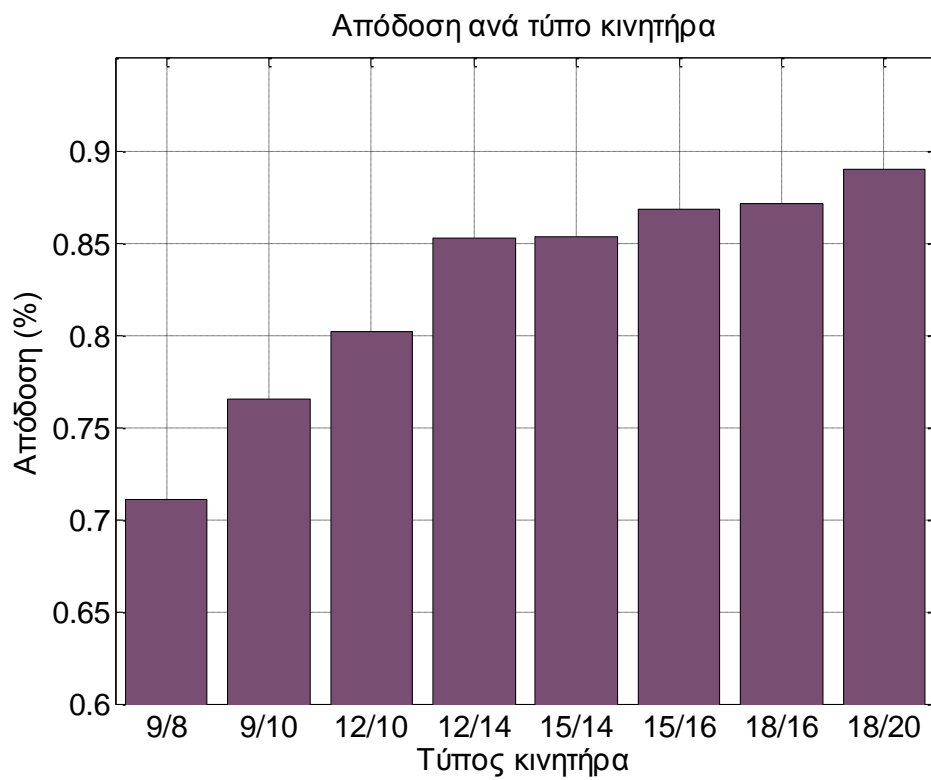


Σχήμα 3.41

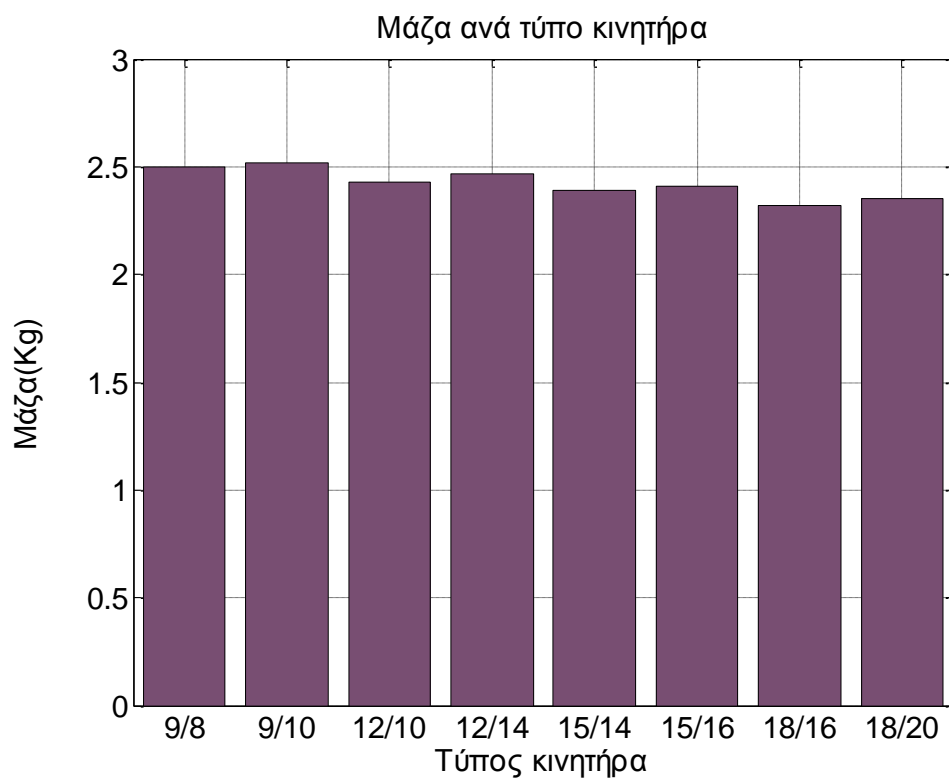


Σχήμα 3.42

Αντίθετα, η απόδοση αυξάνει θεαματικά με την αύξηση του αριθμού των αυλακών και των πόλων (σχήμα 3.43). Ταυτόχρονα με την αύξηση της απόδοσης μειώνεται με μικρά βήματα και το βάρος του κινητήρα (σχήμα 3.44).



Σχήμα 3.43



Σχήμα 3.44

Μέχρι τώρα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι όσο κινούμαστε σε μεγαλύτερους αριθμούς αυλακών και πόλων τόσο είναι ευκολότερο να κατακτήσουμε ελαφρύτερο και αποδοτικότερο κινητήρα. Ωστόσο, αυτά τα γραφήματα αφορούν εξ' ολοκλήρου διαμορφώσεις με τύλιγμα διπλής στρώσης. Προτού καταλήξουμε στην καλύτερη επιλογή οφείλουμε να εξετάσουμε τις καλύτερες από αυτές τις διαμορφώσεις και με τύλιγμα μονής στρώσης.

Στην συνέχεια θα δούμε, λοιπόν, μία σύγκριση ανάμεσα στις τρεις κυρίαρχες διαμορφώσεις με τυλίγματα μονής και διπλής στρώσης, καθώς και με γεωμετρία άνισων δοντιών. Αυτές θα είναι οι γεωμετρίες 12/10, 12/14 και 18/16. Πρώτα πρέπει όμως να αποσαφηνιστούν οι κωδικοί που θα συναντήσει ο αναγνώστης στον οριζόντιο άξονα των γραφημάτων:

10D = Διαμόρφωση 12/10 με τύλιγμα διπλής στρώσης

10S = Διαμόρφωση 12/10 με τύλιγμα μονής στρώσης

10SU = Διαμόρφωση 12/10 με τύλιγμα μονής στρώσης με άνισα δόντια

14D = Διαμόρφωση 12/14 με τύλιγμα διπλής στρώσης

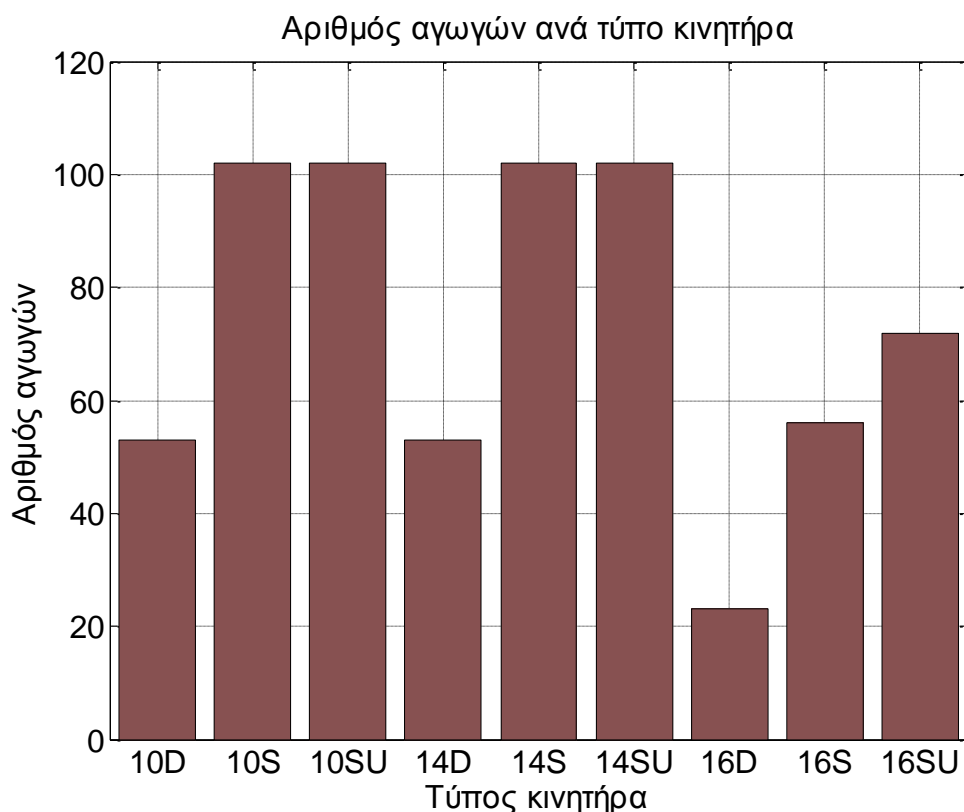
14S = Διαμόρφωση 12/14 με τύλιγμα μονής στρώσης

14SU = Διαμόρφωση 12/14 με τύλιγμα μονής στρώσης με άνισα δόντια

16D = Διαμόρφωση 18/16 με τύλιγμα διπλής στρώσης

16S = Διαμόρφωση 18/16 με τύλιγμα μονής στρώσης

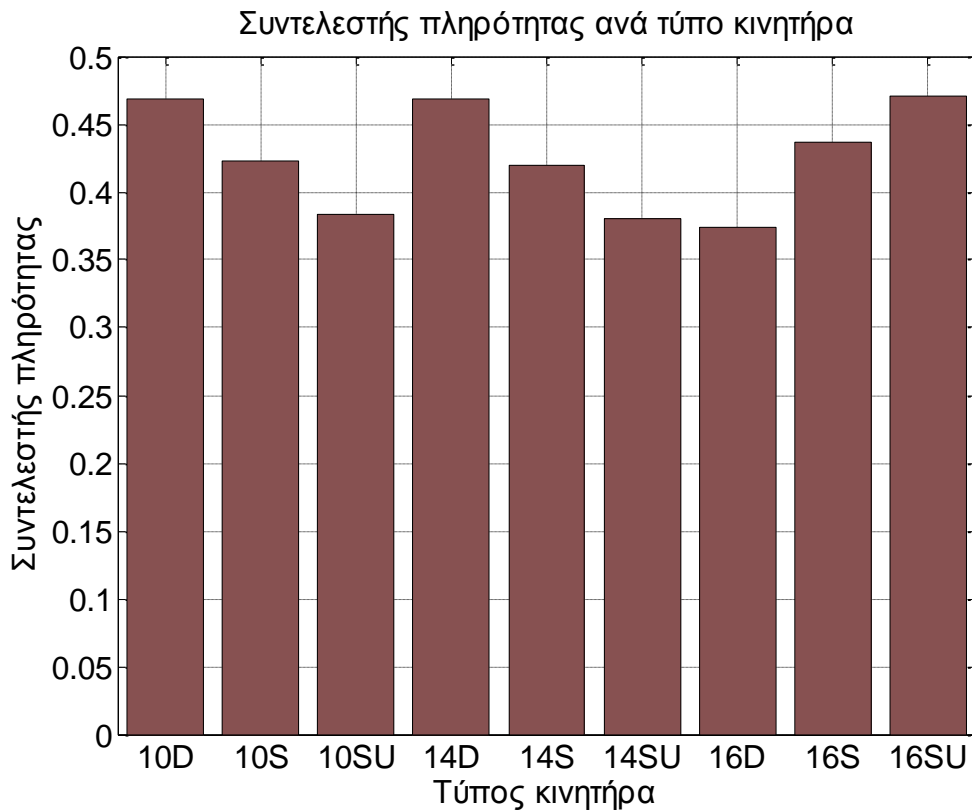
16SU = Διαμόρφωση 18/16 με τύλιγμα μονής στρώσης με άνισα δόντια



Σχήμα 3.45

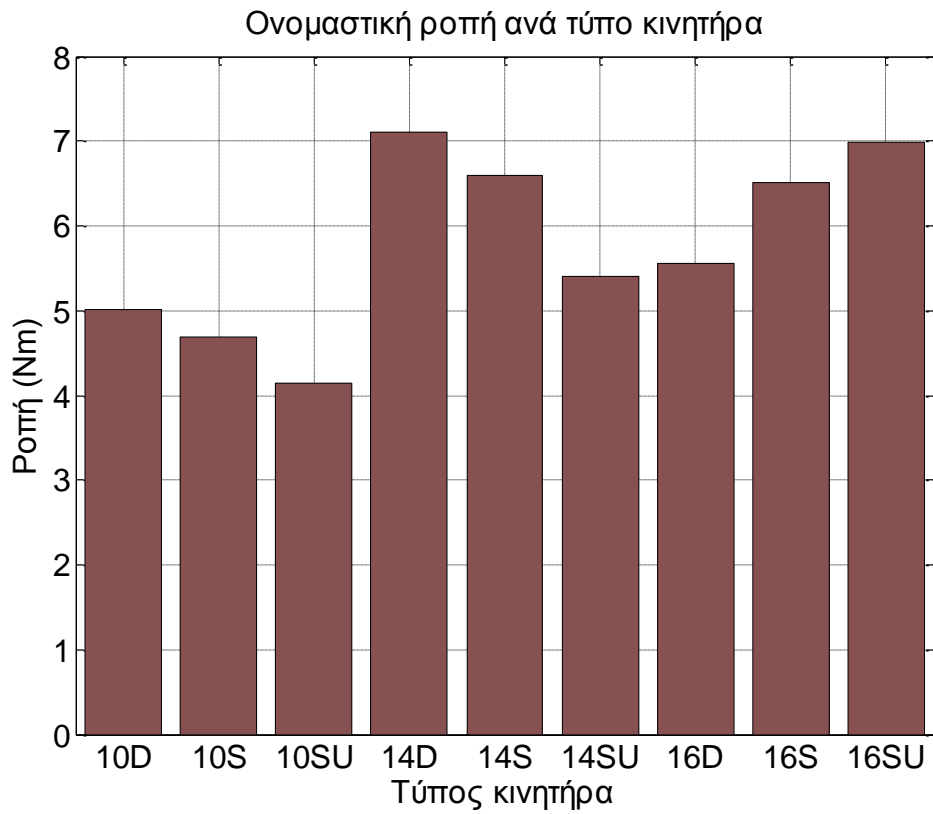
Με το «πέρασμα» σε τύλιγμα μονής στρώσης βλέπουμε ότι οι αγωγοί διπλασιάζονται (σχήμα 3.45). Φυσικά οι αγωγοί σε μία αύλακα είναι σταθεροί είτε με τύλιγμα μονής στρώσης, είτε με διπλής. Απλώς, στην περίπτωση της διπλής στρώσης, και λόγω της φύσεως αυτής, γινόταν λόγος για τον αριθμό των αγωγών που αφορούσαν το μισό της αύλακας, καθώς ήταν ξεχωριστό πηνίο από το διπλανό του. Εδώ παρατηρούμε την ύπαρξη ενός σφάλματος στον κώδικα που δεν επιτρέπει στον αριθμό των αγωγών να υπερβεί τους 102. Αυτό δεν μας ενοχλεί τόσο, καθώς μπορούμε να δούμε το όφελος της υιοθέτησης της γεωμετρίας άνισων δοντιών από την γεωμετρία με τις 18 αύλακες. Ο αριθμός των αγωγών που χωράει σε μία εκ των 18 αυλακών είναι 56. Ωστόσο, με την υιοθέτηση των άνισων δοντιών, ο αριθμός αυτός σκαρφαλώνει στο 72. Βλέπει, λοιπόν, κανείς ότι συντελείται μία αύξηση περίπου 30% στον αριθμό των αγωγών που μπορούν να χωρέσουν.

Μία ακόμα σημαντική παρατήρηση είναι η εξής. Η υιοθέτηση της μονής στρώσης, χωρίς τα άνισα δόντια, έδωσε από μόνη της μία ώθηση στον αριθμό των αγωγών που μπορεί να επιτευχθεί. Ενώ στο τύλιγμα διπλής στρώσης έμπαιναν μόλις 46, ύστερα χώρεσαν 52. Η αλλαγή σε τύλιγμα μονής στρώσης δρα τελικά θετικά στην εγκαθίδρυση του πεδίου του στάτη.



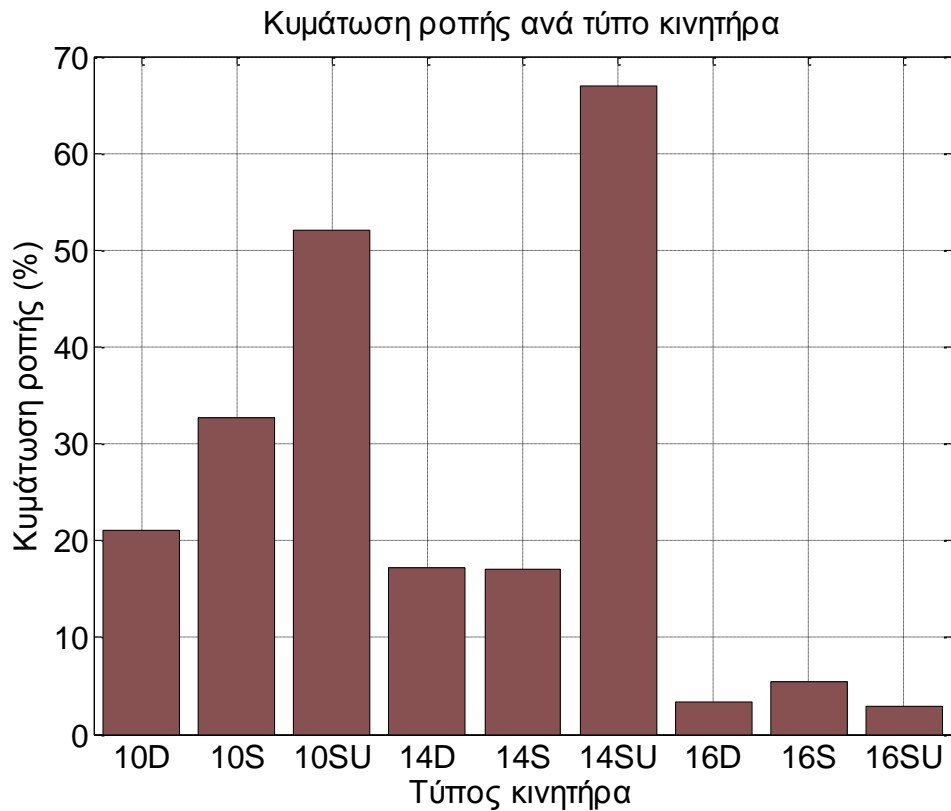
Σχήμα 3.46

Ο συντελεστής πληρότητας της αύλακας (σχήμα 3.46) υπολογίζεται βάσει του αριθμού των αγωγών. Συνεπώς, η 10-πολική και η 14-πολική διαμόρφωση δεν μπορεί να βοηθήσει στην εξαγωγή κάποιου συμπεράσματος όπως και στην προηγούμενη σελίδα. Αντίθετα, η 16-πολική μας δείχνει ότι καθώς περνάμε σε τύλιγμα μονής στρώσης και φτάνοντας στην γεωμετρία άνισων δοντιών, ο συντελεστής πληρότητας συνεχώς αυξάνεται. Όχι μόνο, δηλαδή, έχουμε αύξηση του αριθμού των αγωγών που χωρούν στην αύλακα αλλά κατακτούμε και καλύτερη αξιοποίηση υλικού.



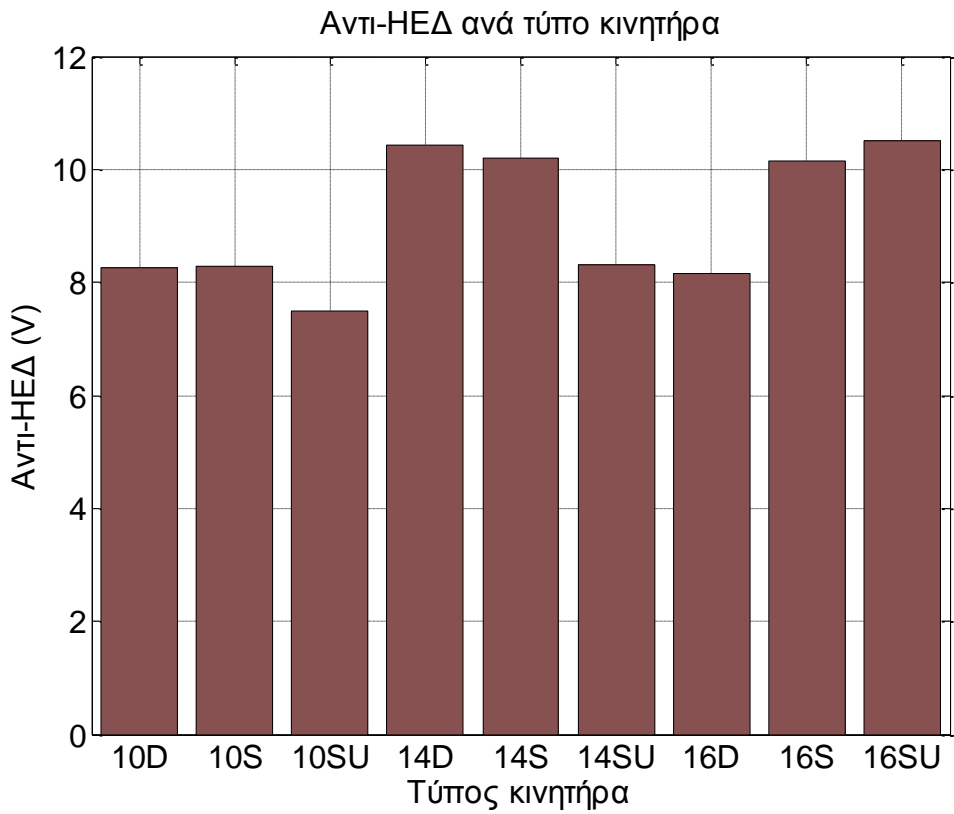
Σχήμα 3.47

Θετικά νέα έχουμε και από το *σχήμα 3.47* που απεικονίζει την ονομαστική ροπή που μπορεί να αναπτύξει ο κινητήρας. Αυτή αυξάνεται περίπου 25% στην γεωμετρία με άνισα δόντια. Επιπρόσθετα, όσον αφορά την κυμάτωση ροπής (*σχήμα 3.48*), ο 16-πολικός κινητήρας εμφανίζει πολύ μεγάλη διαφορά από τους υπόλοιπους.

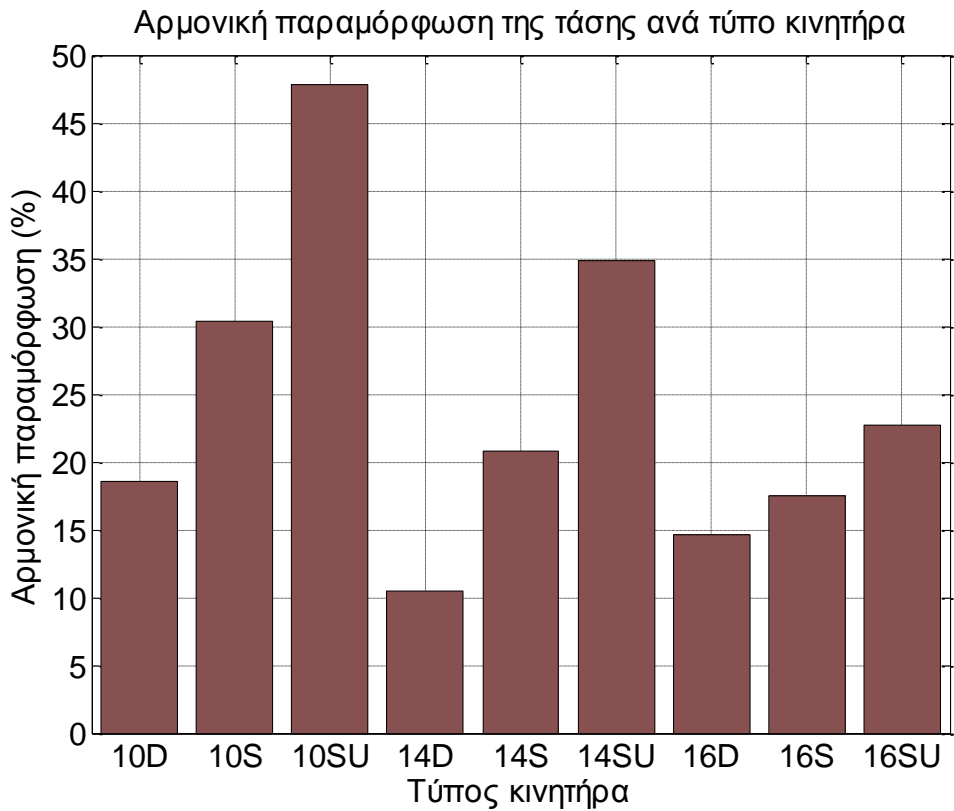


Σχήμα 3.48

Το μέτρο της αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης είναι και αυτό υψηλότερο στην γεωμετρία άνισων δοντιών όπως βλέπουμε στο *σχήμα 3.49*. Αποτελεί και αυτό ένα σοβαρό προτέρημα της συγκεκριμένης σχεδίασης, επειδή έχουμε δεδομένο μέτρο αντί-HEΔ που θέλουμε να επιτύχουμε. Όταν λοιπόν μία διαμόρφωση επιτυγχάνει μεγαλύτερο μέτρο τάσης, σημαίνει ότι είναι εφικτό με μικρότερες διαστάσεις κινητήρα και συνεπώς βάρος, να επιτύχουμε την απαίτηση που έχουμε θέσει.

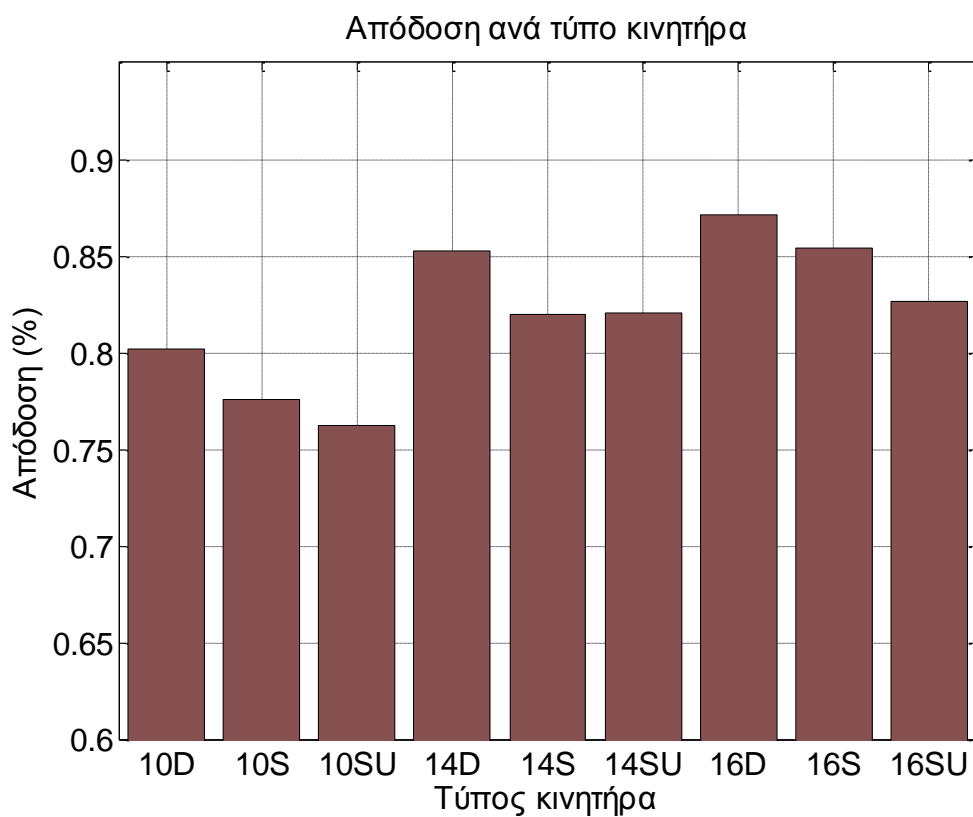


Σχήμα 3.49

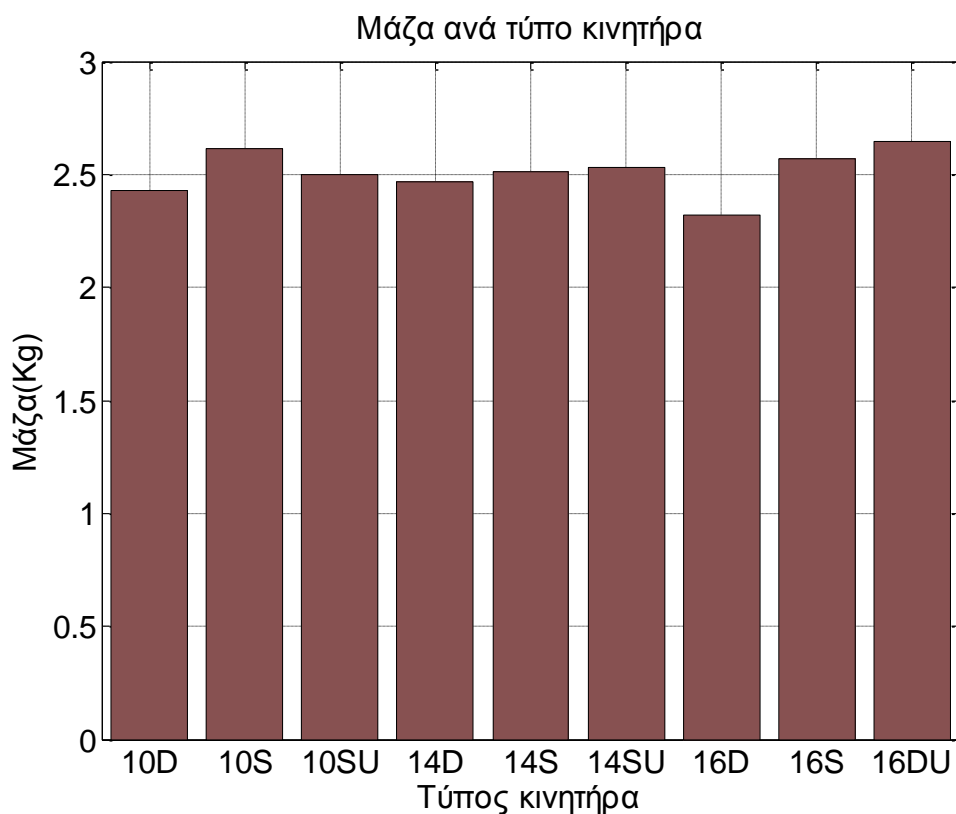


Σχήμα 3.50

Αποτελεί, ωστόσο, φυσικό νόμο ότι δεν μπορεί να υπερτερεί σε όλους τους τομείς μία επιλογή συνιστωσών. Έτσι, στην αρμονική παραμόρφωση της τάσης (σχήμα 3.50), η γεωμετρία άνισων δοντιών έδειξε ότι δεν τα καταφέρνει καλύτερα, αλλά χειρότερα. Βέβαια, η διαφορά δεν είναι τόσο μεγάλη ώστε να θεωρηθεί απαγορευτική η χρήση της συγκεκριμένης επιλογής. Σε παρόμοιο μοτίβο κινήθηκε και η απόδοση (σχήμα 3.51), η οποία υπολογίστηκε λίγο χαμηλότερη σε σύγκριση με αυτή που προσφέρει το τύλιγμα διπλής στρώσης. Τέλος, στο σχήμα 3.52, βλέπουμε ότι ούτε το βάρος ευνοήθηκε ιδιαίτερα στην περίπτωση μας.



Σχήμα 3.51



Σχήμα 3.52

Ωστόσο, αυτές οι διαπιστώσεις δεν μπορούν να αποτελέσουν το υλικό για μία τελική σύγκριση ανάμεσα στην διπλή και την μονή στρώση. Για να γίνει αυτό, θα προχωρήσουμε στην επόμενη παράγραφο στην βελτιστοποίηση της διαμόρφωσης 18/16 και στους τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς της, ώστε να δούμε στην πράξη εάν προκύπτει κάποιο σημαντικό όφελος σε μία από τις τρεις.

3.5 Διερεύνηση αριθμού στρώσεων και γεωμετρίας στάτη

Έχοντας επιλέξει την 18/16 ως την ιδανικότερη διαμόρφωση μέχρι στιγμής, το επόμενο βήμα είναι να αποφασιστεί αν το τύλιγμα θα είναι συγκεντρωμένο απλής ή διπλής στρώσης και αν θα χρησιμοποιηθεί τελικά η γεωμετρία των άνισων δοντιών. Το συγκεντρωμένο τύλιγμα μονής στρώσης έχει ένα σοβαρό πλεονέκτημα έναντι του άλλου στην πολυπλοκότητα της κατασκευής. Ωστόσο το τύλιγμα διπλής στρώσης προσδίδει ποιοτικότερα χαρακτηριστικά λειτουργίας στον κινητήρα. Για να προσδιοριστεί με σιγουριά η καλύτερη επιλογή, έγιναν και στις τρεις διαμορφώσεις εκτενείς αναλύσεις ευαισθησίας

προκειμένου να προκύψουν οι καλύτερες δυνατές γεωμετρίες και να επιλεγεί η πιο συμφέρουσα. Δηλαδή έγινε διερεύνηση πάνω στις εξής διαμορφώσεις:

- 1) Διπλής στρώσης
- 2) Μονής στρώσης
- 3) Μονής στρώσης με άνισα δόντια

Η βελτιστοποίηση μίας γεωμετρίας δεν είναι μία ντετερμινιστική μέθοδος που οδηγεί στο βέλτιστο μετά από συγκεκριμένα βήματα. Υπάρχουν διάφορες αντικρουόμενες παράμετροι, ανάμεσα στις οποίες πρέπει να ευρεθεί η χρυσή τομή, προκειμένου να πληροί η μηχανή ορισμένες προδιαγραφές. Στην περίπτωση μας όμως, δεν τέθηκαν απλώς προδιαγραφές, αλλά βάλουμε σαν στόχο να ελαχιστοποιήσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο τέσσερις παραμέτρους του κινητήρα:

- 1) Βάρος
- 2) Απώλειες
- 3) Αρμονική παραμόρφωση της τάσης
- 4) Κυμάτωση ροπής

Η βασικότερη από αυτές είναι το βάρος, καθώς αυτή έχει το μεγαλύτερο αντίκτυπο στην απόδοση του αυτοκινήτου. Μικρότερο βάρος σημαίνει ευκολότερη κύλιση, με συνέπεια να αντλεί ο κινητήρας λιγότερο ρεύμα, επιτυγχάνοντας μείωση της απαιτούμενης ισχύος. Οι απώλειες, αν και κατέχουν δεύτερη θέση, εξακολουθούν να έχουν εξαιρετική σημασία. Η αρμονική παραμόρφωση της τάσης και η κυμάτωση ροπής έχουν επίσης άμεση σχέση με τις απώλειες του κινητήρα, ωστόσο εξετάζονται ξεχωριστά. Ελαχιστοποίηση των δύο αυτών παραμέτρων επιφέρει και μείωση των απωλειών συνολικά.

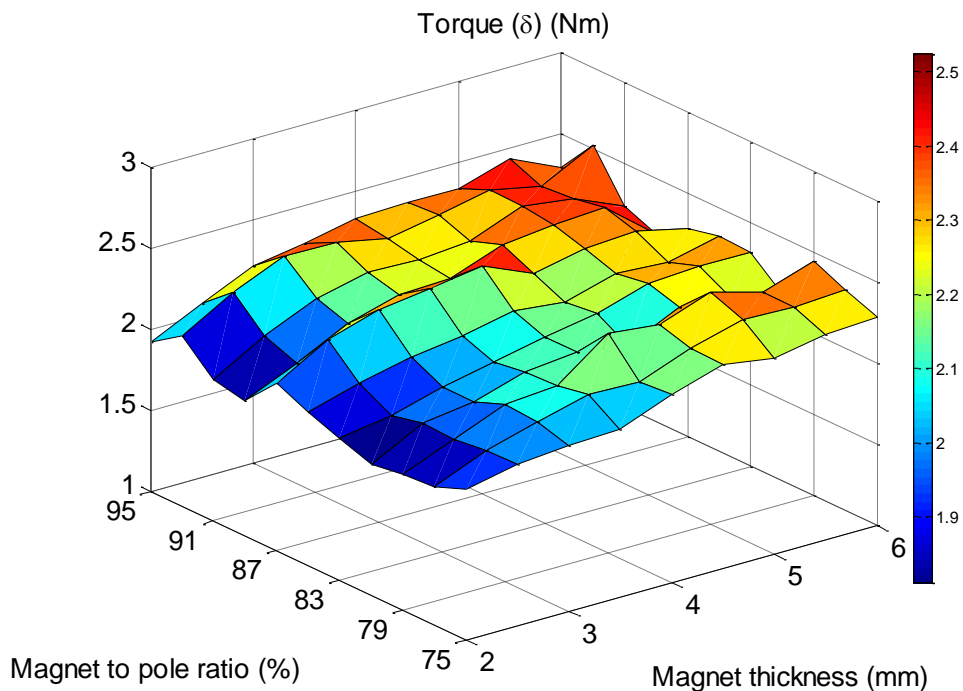
3.5.1 Ανάλυση ευαισθησίας διαμόρφωσης με διπλή στρώση

Για την εύρεση του βέλτιστου στην διαμόρφωση διπλής στρώσης, τρεις ήταν οι κύριοι άξονες εργασίας:

- 1) Βελτιστοποίηση δρομέα,

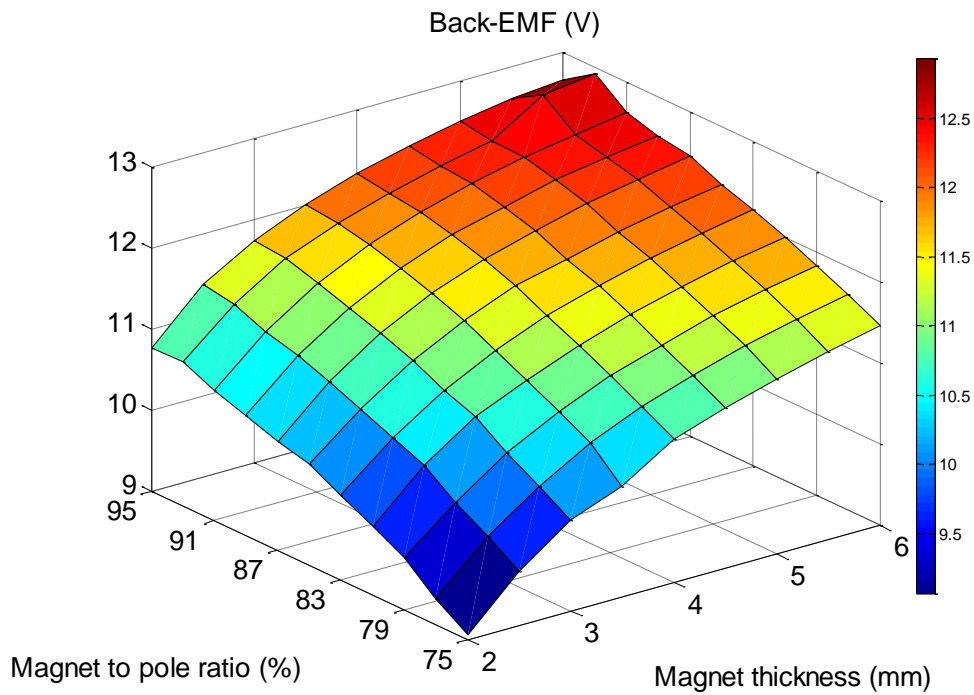
- 2) Βελτιστοποίηση στάτη,
- 3) Βελτιστοποίηση για δύο σημεία λειτουργίας

Οι αναλύσεις ευαισθησίας που έγιναν φαίνονται στις επόμενες σελίδες. Η πρώτη ανάλυση ευαισθησίας έγινε με βάση τον δρομέα και με ρεύμα $0,8 \text{ A/mm}^2$. Σκοπός αυτής της ανάλυσης είναι να συγκριθούν τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν με αυτά της εκτέλεσης με 4 A/mm^2 , προκειμένου να καταλήξουμε σε κάποια ασφαλή συμπεράσματα ως προς την μεθοδολογία που θα πρέπει να ακολουθήσουμε όσον αφορά τα δύο λειτουργικά σημεία. Σε αυτή τη φάση μεταβάλλουμε το ποσοστό της γωνίας του μαγνήτη ως προς την γωνία του πολικού βήματος συναρτήσει του πάχους του μαγνήτη. Εύλογα εύρη για αυτές τις δύο μεταβλητές κρίθηκαν τα: 75% – 95% της γωνίας του πολικού βήματος και $2 \text{ mm} - 6 \text{ mm}$ όσον αφορά το πάχος του μαγνήτη. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 3.53-3.59 που ακολουθούν παρακάτω.



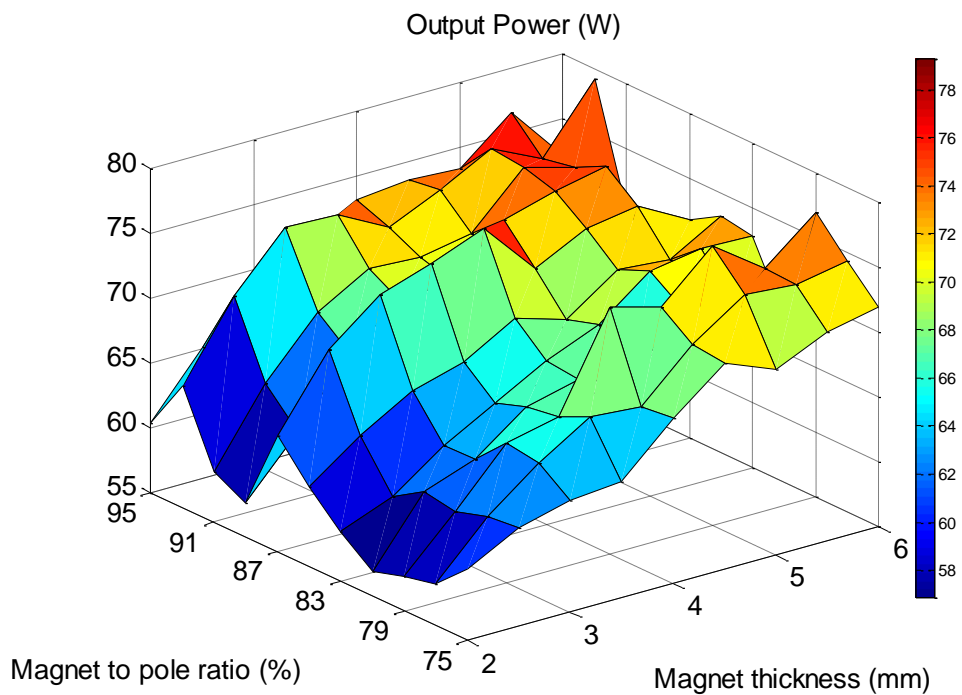
Σχήμα 3.53: Ανάλυση ευαισθησίας στην μέγιστη ροπή που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας.

Η μέγιστη αποδιδόμενη ροπή του κινητήρα δεν δείχνει να επηρεάζεται πολύ από την μεταβολή των υπό εξέταση συνιστωσών. Αυτό μας δίνει μία ελευθερία να κινηθούμε σε όλο το διαθέσιμο εύρος διαστάσεων των μαγνητών, χωρίς να έχουμε σημαντική επίπτωση στην αποδιδόμενη ροπή που είναι και το πρωταρχικό ζητούμενο για έναν κινητήρα.



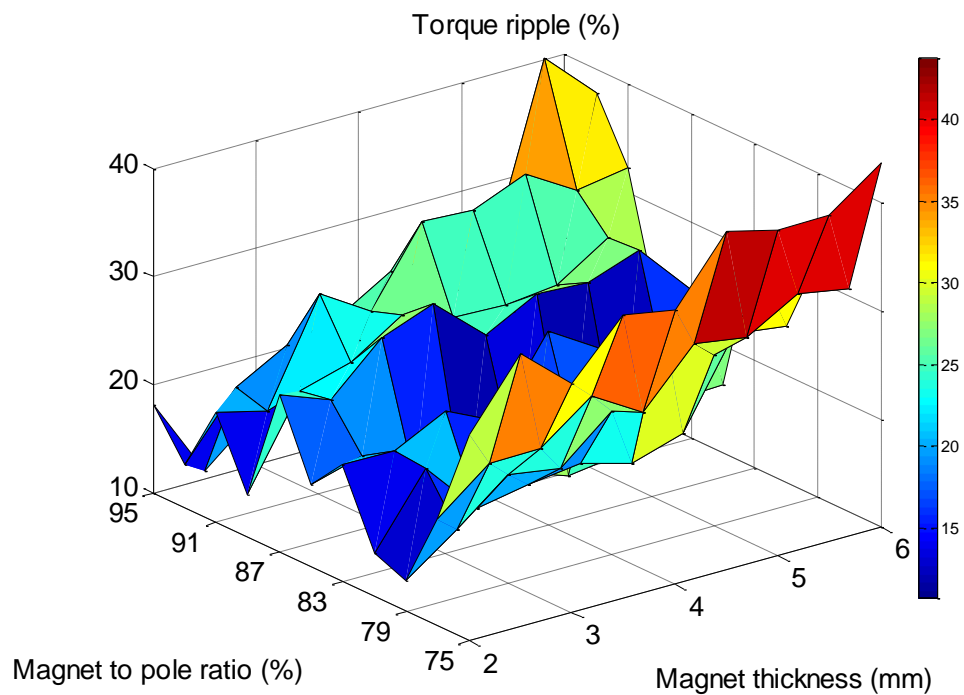
Σχήμα 3.54: Ανάλυση ευαισθησίας στο μέτρο της αντί-ΗΕΔ.

Περιοριστικά δρα, ωστόσο, η τάση, καθώς επειδή επιθυμούμε να κινηθεί γύρω στα 11V, πρέπει να παραμείνουμε στις πράσινες περιοχές της επιφάνειας.



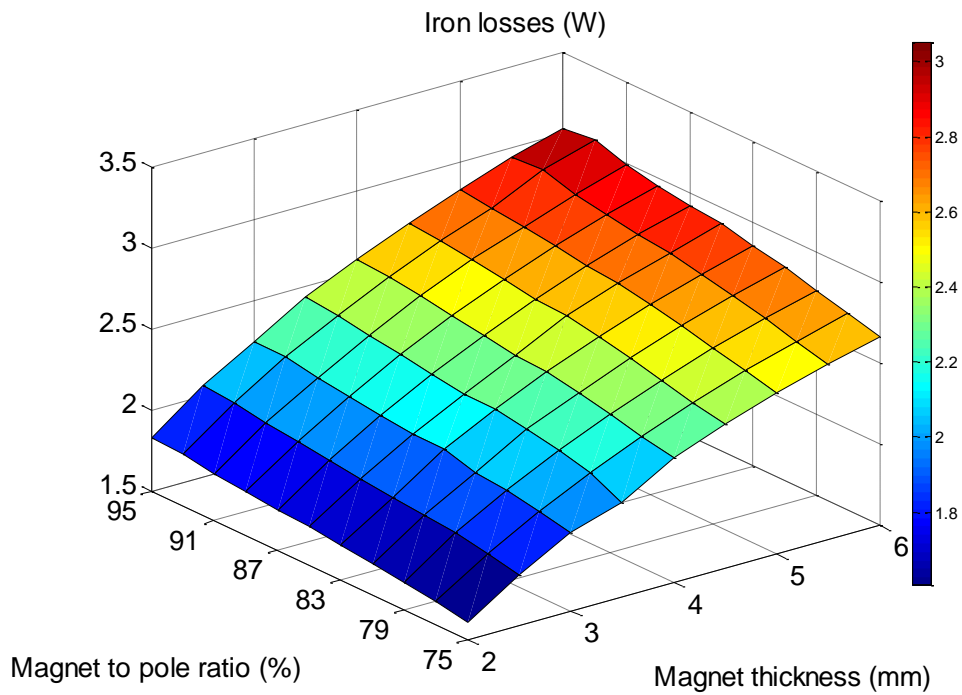
Σχήμα 3.55: Ανάλυση ευαισθησίας στην ισχύ που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας σε W.

Η ισχύς παρουσιάζει μία σταθερή αύξηση ανάλογη της αυξήσεως του πάχους των μαγνητών αλλά και απροσδιόριστες μεταβολές καθώς αλλάζει η γωνία των μαγνητών.



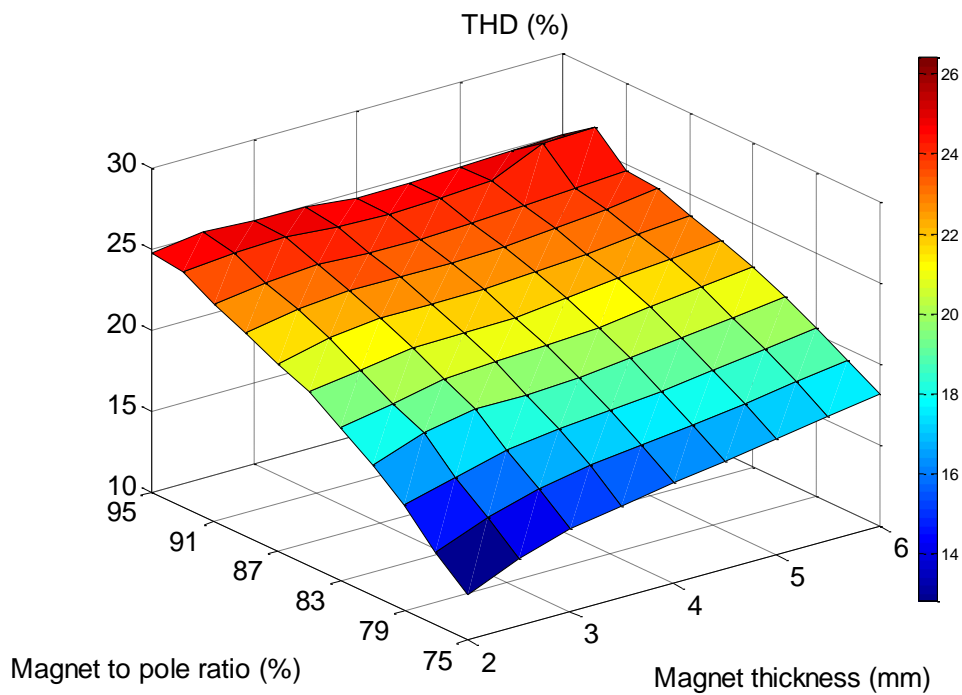
Σχήμα 3.56: Ανάλυση ευαισθησίας στην κυμάτωση ροπής του κινητήρα.

Η κυμάτωση ροπής είναι ένας παράγοντας αρκετά αστάθμητος, καθώς επηρεάζεται πολύ έντονα από τις παραμικρές αλλαγές στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα και δεν μπορεί να περιοριστεί ακολουθώντας κάποια συγκεκριμένη στρατηγική. Προς το παρόν, λοιπόν, δεν θα δοθεί καθόλου σημασία σε αυτήν την παράμετρο του κινητήρα.



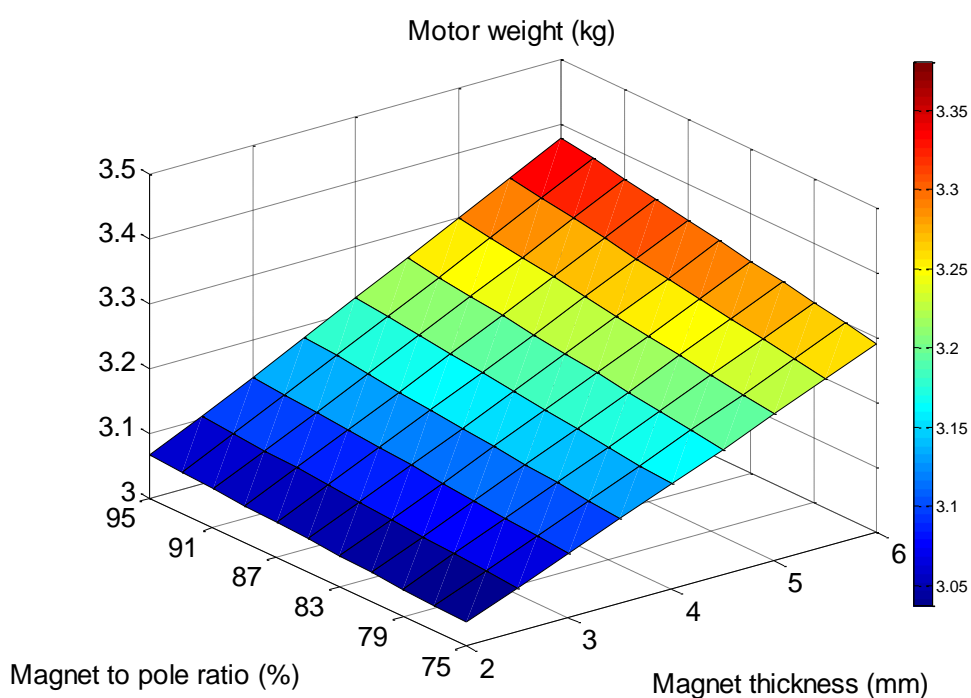
Σχήμα 3.57: Ανάλυση ευαισθησίας στις απώλειες πυρήνα του κινητήρα.

Οι απώλειες πυρήνα αυξάνονται απότομα με την αύξηση του πάχους των μαγνητών. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι γιατί καθώς μεγαλώνει ο όγκος των μαγνητών αυξάνεται η μαγνήτιση που επιβάλλεται στον σίδηρο και τον οδηγεί στον κορεσμό.



Σχήμα 3.58: Ανάλυση ευαισθησίας στην αρμονική παραμόρφωση της τάσης του κινητήρα.

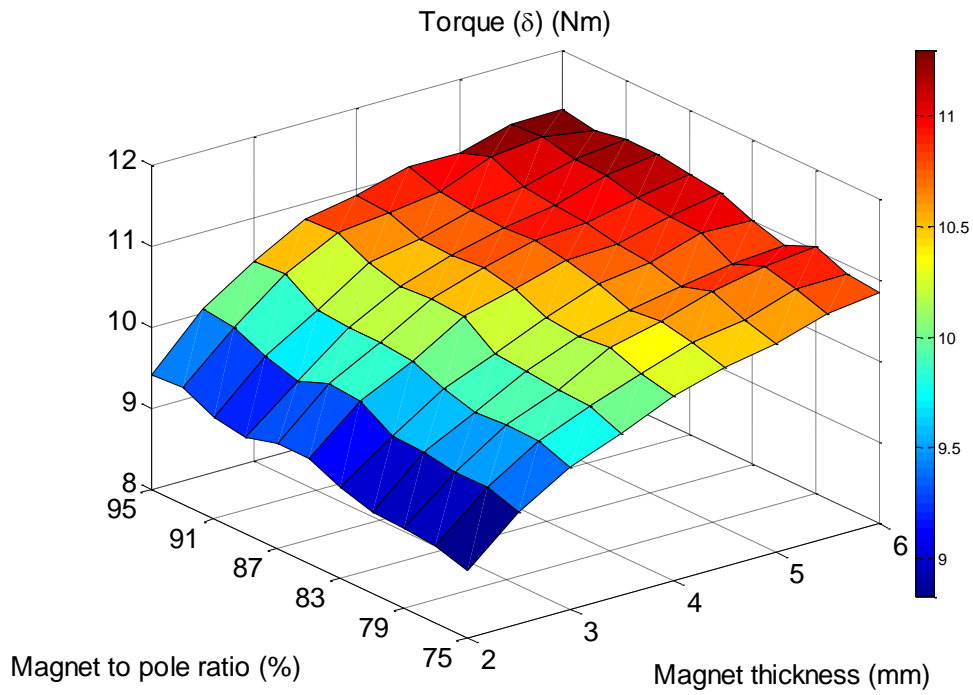
Παρατηρούμε ότι η αρμονική παραμόρφωση της τάσης επηρεάζεται πολύ έντονα και από τις δύο μεταβλητές. Όσο μειώνονται είτε η μία είτε η άλλη, οδηγείται σε μείωση και η αρμονική παραμόρφωση της τάσης. Αυτό συμβαίνει ενδεχομένως για τον ίδιο λόγο που μειώνονται και οι απώλειες πυρήνα. Μικρότεροι μαγνήτες δημιουργούν μικρότερα πεδία που μπορεί να διαχειριστεί ευκολότερα ο σίδηρος.



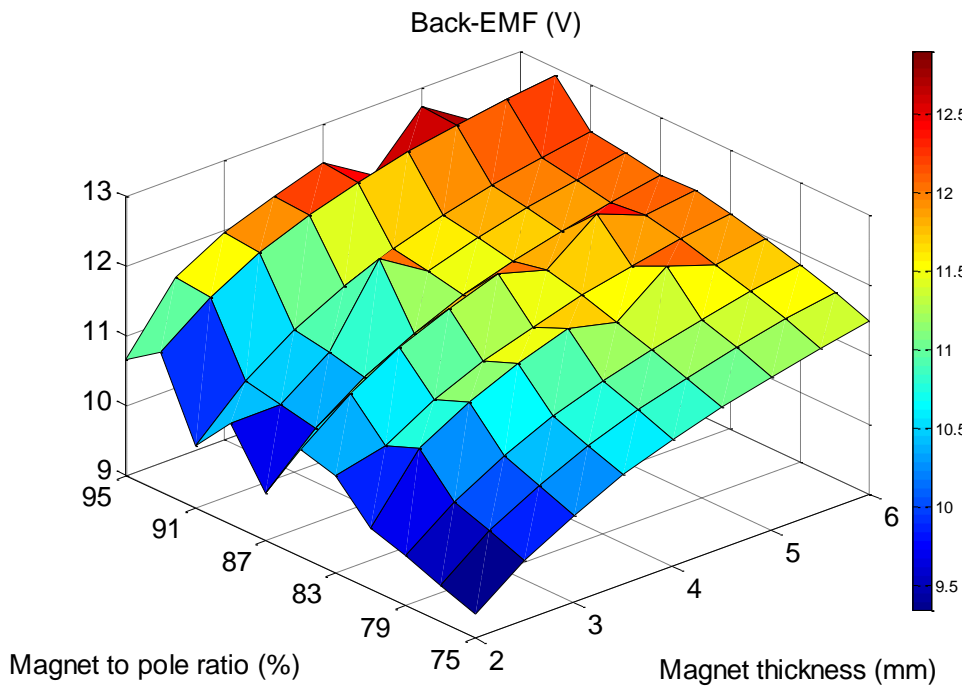
Σχήμα 3.59: Ανάλυση ευαισθησίας στο συνολικό βάρος του κινητήρα.

Το βάρος εμφανίζει επίσης μία σημαντική μεταβολή με την μείωση του πάχους των μαγνητών. Αυτό δεν οφείλεται μόνο στο βάρος που εξοικονομείται από τους μαγνήτες, αλλά και στον σίδηρο που εξοικονομείται στον δρομέα όταν μειώνεται η εξωτερική διάμετρος του κατ' επέκταση της εσωτερικής λόγω των μαγνητών.

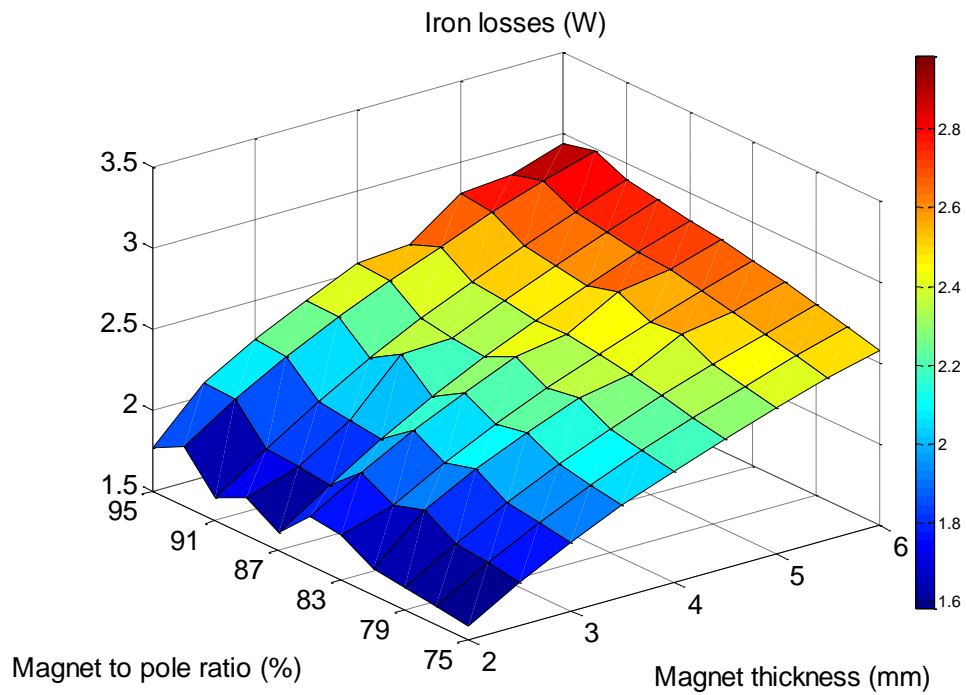
Μετά ακολουθεί η εκτέλεση της ανάλυσης ευαισθησίας με χωρικό ρεύμα $4 A/mm^2$. Εδώ θα επιχειρήσουμε να δούμε την επίπτωση του αυξημένου ρεύματος στις επιφάνειες ευαισθησίας. Θα αποφύγουμε να σχολιάσουμε σε κάθε μία ξεχωριστά το αποτέλεσμα, αλλά θα τις δούμε όλες μαζί σαν μία γενική εικόνα καθώς αυτό επιτάσσει η σύγκριση που θέλουμε να κάνουμε. Στο τέλος της παράθεσης των αποτελεσμάτων ακολουθεί και ο σχολιασμός.



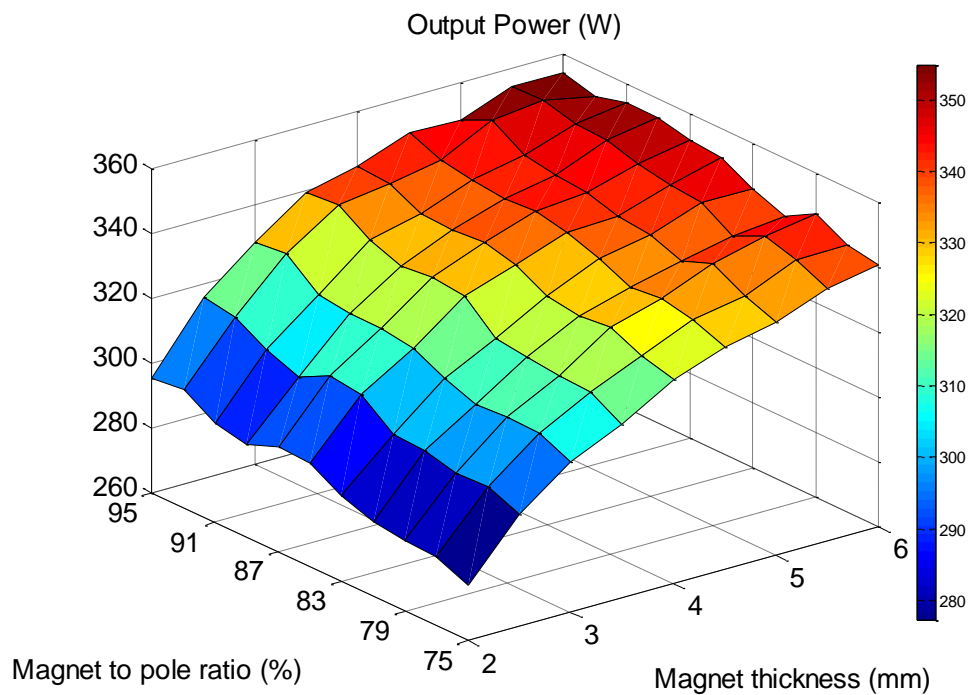
Σχήμα 3.60: Ανάλυση ευαισθησίας στην μέγιστη ροπή που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας.



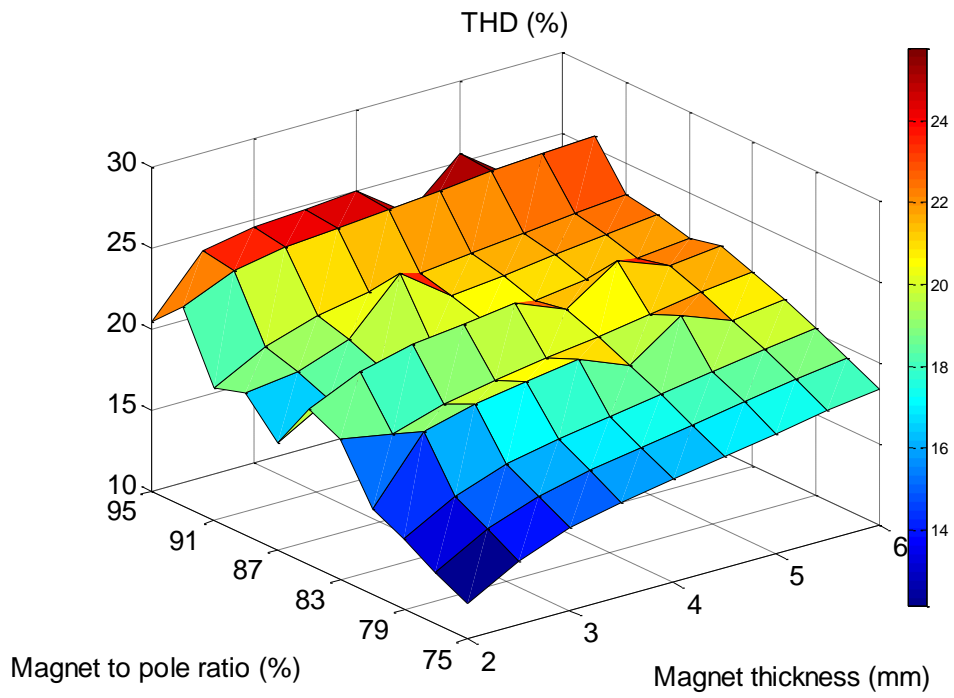
Σχήμα 3.61: Ανάλυση ευαισθησίας στο μέτρο της αντί-ΗΕΔ.



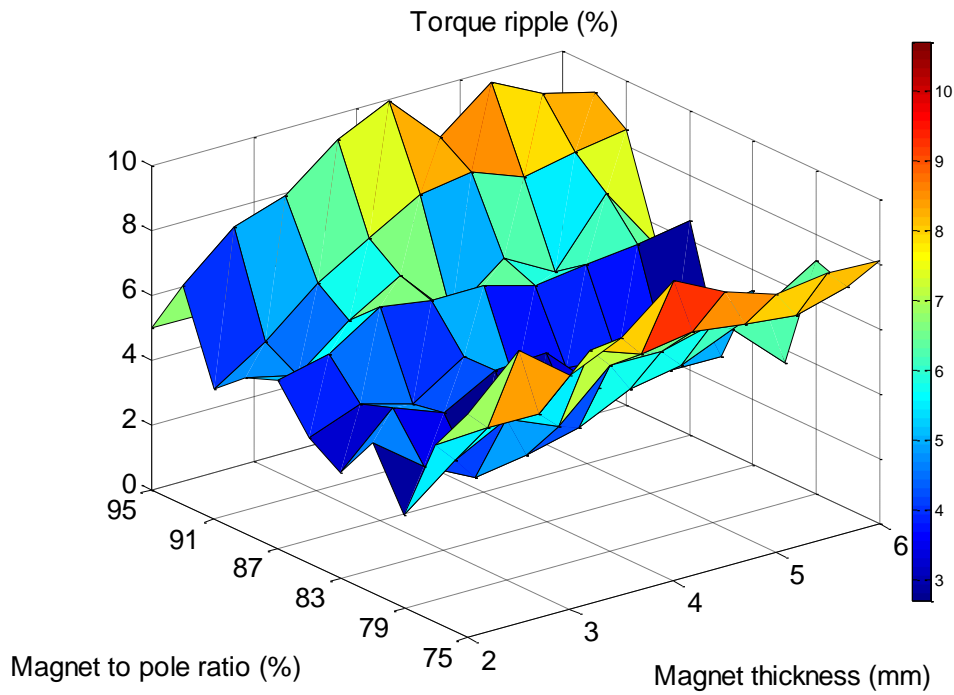
Σχήμα 3.62: Ανάλυση ευαισθησίας στις απώλειες πυρήνα του κινητήρα.



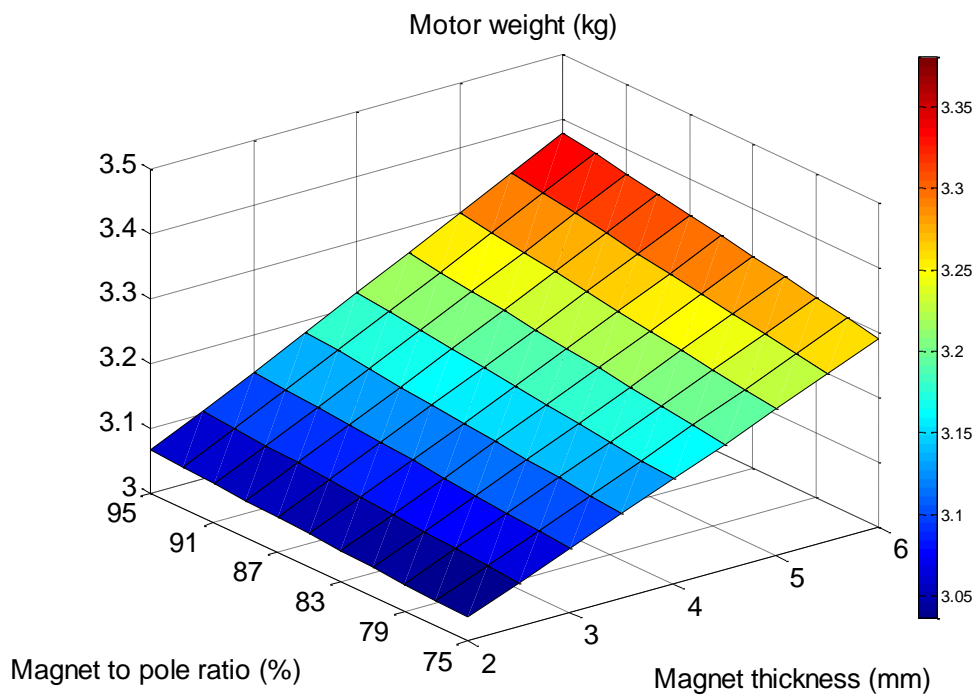
Σχήμα 3.63: Ανάλυση ευαισθησίας στην ισχύ που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας σε W.



Σχήμα 3.64: Ανάλυση ευαισθησίας στην αρμονική παραμόρφωση της τάσης του κινητήρα.



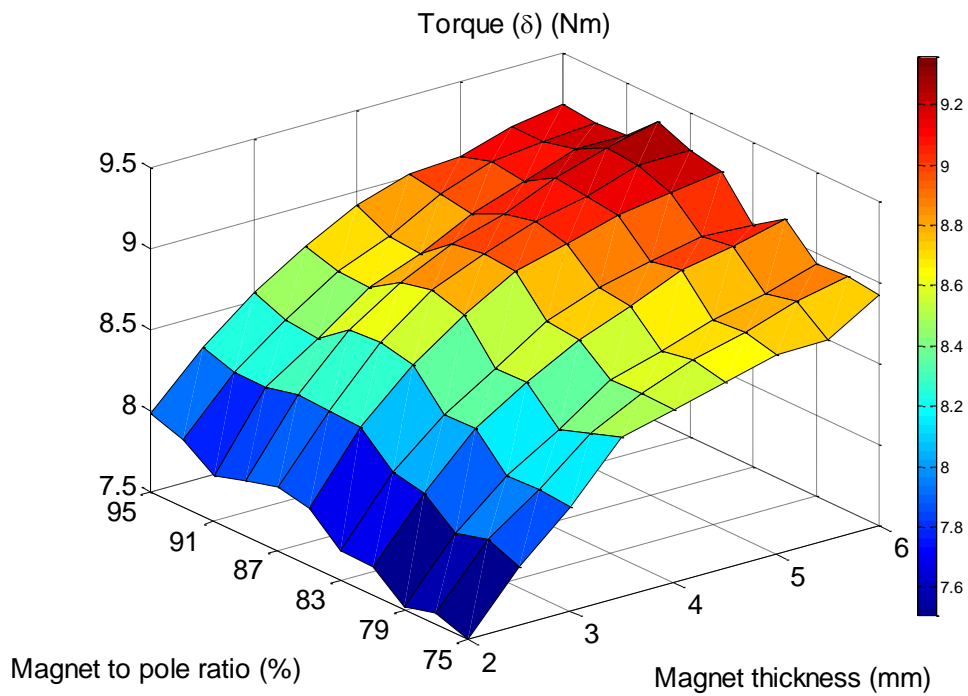
Σχήμα 3.65: Ανάλυση ευαισθησίας στην κυμάτωση ροπής του κινητήρα.



Σχήμα 3.66: Ανάλυση ευαισθησίας στο συνολικό βάρος του κινητήρα.

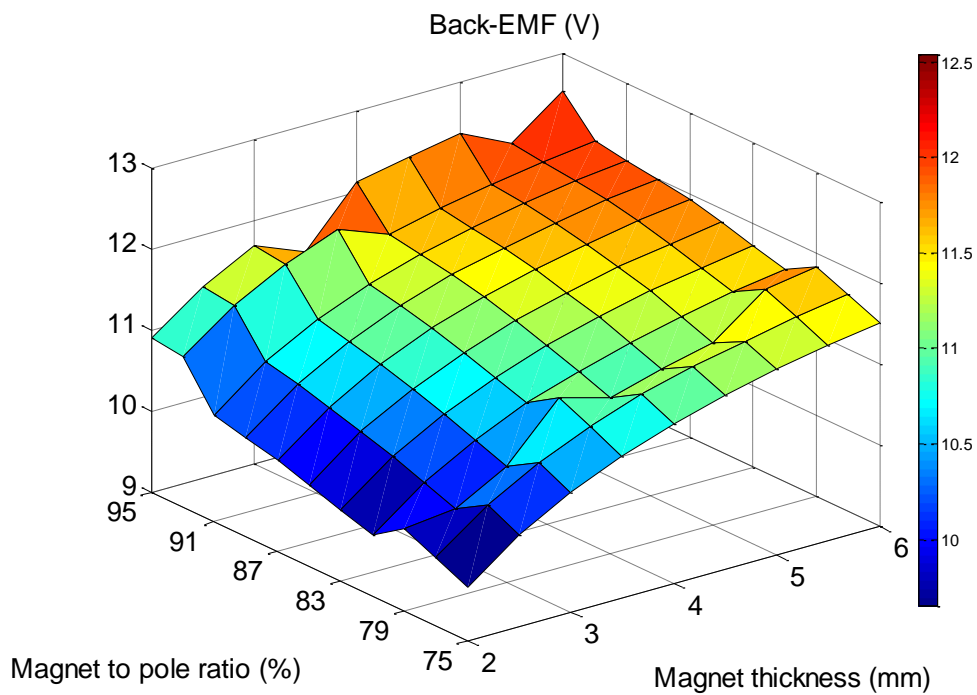
Παρατηρούμε ότι στις τωρινές επιφάνειες δεν έχει αλλάξει η γενική μορφή σε σχέση με τις προηγούμενες. Εκτός ίσως από την κυμάτωση ροπής, η οποία όμως ήταν αναμενόμενο να αλλάξει λόγω της ευαισθησίας της ακόμα και στις μικρότερες μεταβολές των συνθηκών στον κινητήρα. Συνεπώς, από αυτό το στάδιο εξάγουμε το συμπέρασμα ότι μπορούμε με άνεση να σχεδιάσουμε στην μόνιμη κατάσταση χωρίς να ανησυχούμε για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που θα προκύψουν στην κατάσταση εκκίνησης. Ισχύει φυσικά και το αντίστροφο. Στην τελική σχεδίαση θα γίνει βέβαια επαλήθευση και στις δύο καταστάσεις λειτουργίας, αλλά αυτό δεν είναι κάτι που θα πρέπει να γίνεται σε κάθε βήμα της διερεύνησης.

Μέχρι τώρα έγιναν δύο αναλύσεις ευαισθησίας προκειμένου να αποσαφηνιστεί ως ένα βαθμό ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά μίας μηχανής μόνιμων μαγνητών, μικρής ισχύος από την μεταβολή των διαστάσεων των μαγνητών. Με τις γνώσεις αυτές μπορούμε πλέον να πλησιάσουμε πιο κοντά στα τελικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα και να επαναλάβουμε τις αναλύσεις ευαισθησίας στον δρομέα και τον στάτη. Ξεκινώντας από τον δρομέα, θέτουμε το ρεύμα της προσομοίωσης στα $4A/mm^2$ και μεταβάλλουμε τα ίδια μεγέθη με προηγουμένως, κοιτώντας πιο προσεκτικά τις επιφάνειες που προκύπτουν.



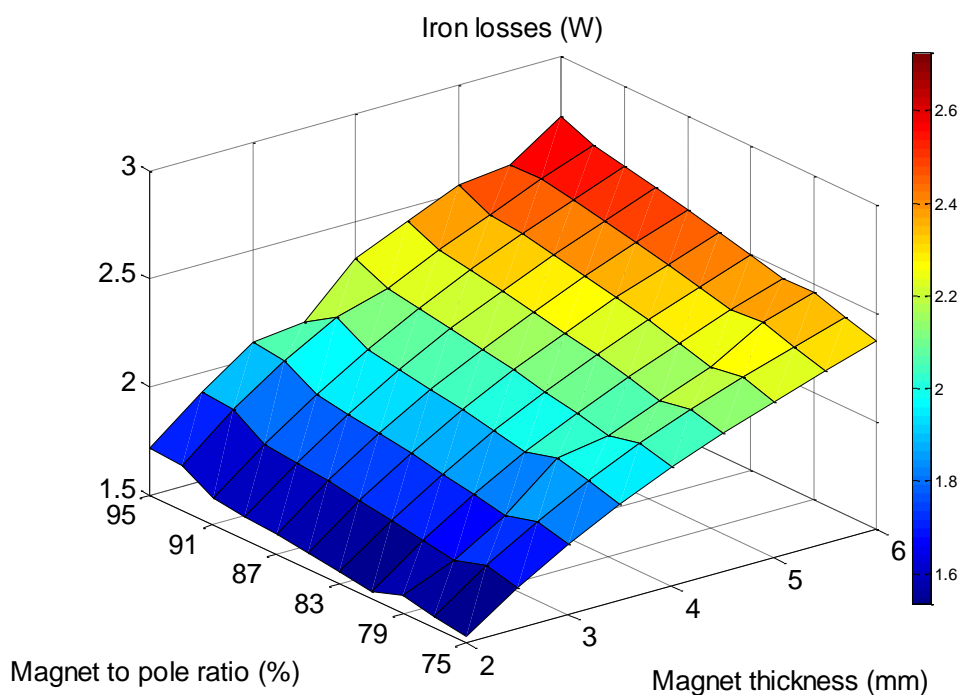
Σχήμα 3.67: Ανάλυση ευαισθησίας στην μέγιστη ροπή που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας.

Η μέγιστη ροπή παρουσιάζει και πάλι μία σημαντική αύξηση με την μεταβολή του πάχους των μαγνητών ενώ σε αυτή την ανάλυση δεν δείχνει να επηρεάζεται ιδιαίτερα από την γωνία των μαγνητών.



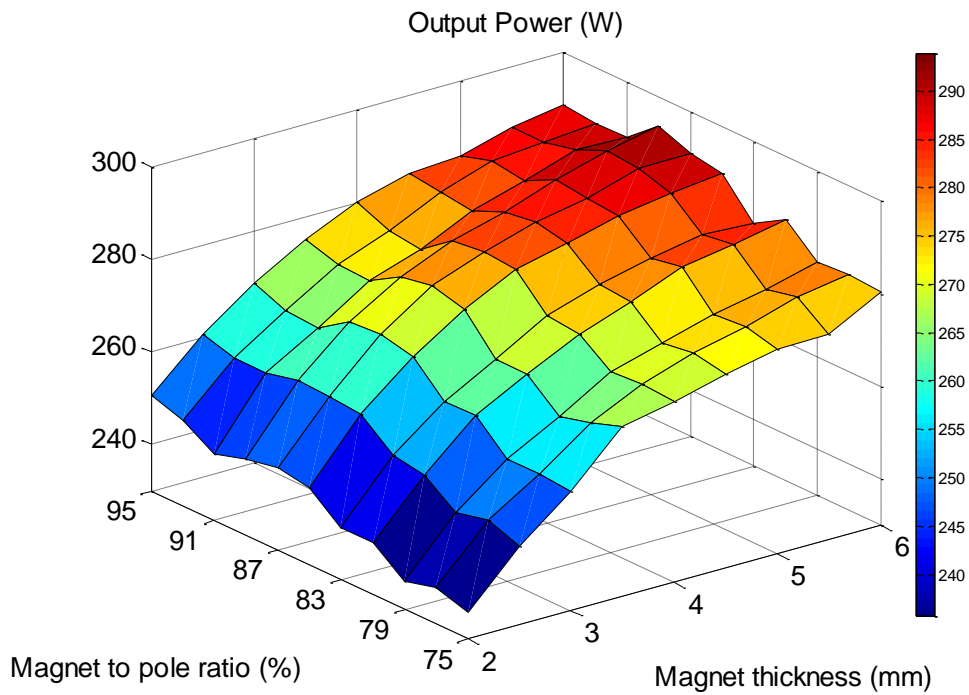
Σχήμα 3.68: Ανάλυση ευαισθησίας στο μέτρο της αντί-ΗΕΔ.

Η τάση στο *σχήμα 3.68* σχηματίζει μία ομαλή επιφάνεια και είναι στην διάθεση μας για να επιλέξουμε τις συνιστώσες μας από την πράσινη περιοχή των 11V.



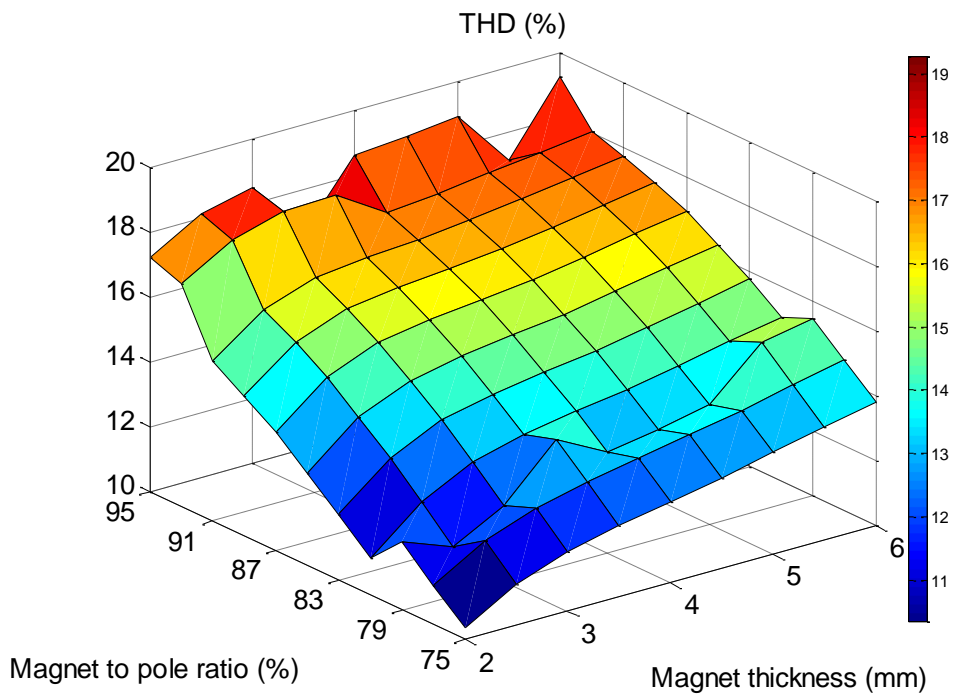
Σχήμα 3.69: Ανάλυση ευαισθησίας στις απώλειες πυρήνα του κινητήρα.

Οι απώλειες σιδήρου επηρεάζονται και αυτές κατά κύριο λόγο από το πάχος των μαγνητών και όχι τόσο από την γωνία, όπως είναι και λογικό άλλωστε. Το πάχος μεταβάλλει κατά πολύ τον όγκο των μαγνητών και η γωνία ελάχιστα.



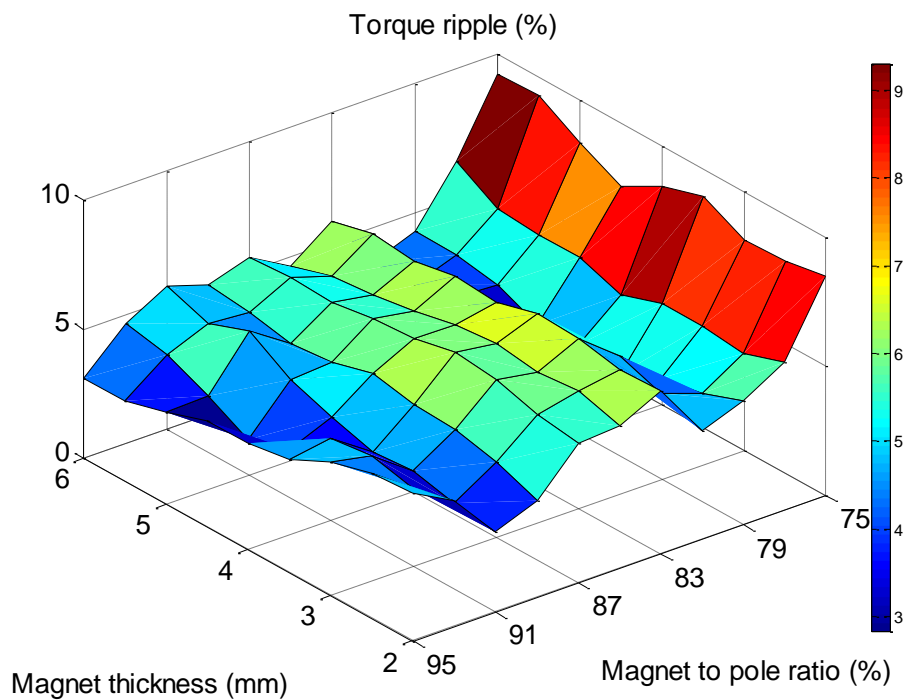
Σχήμα 3.70: Ανάλυση ευαισθησίας στην ισχύ που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας σε W.

Η ισχύς ακολουθεί και αυτή την αύξηση κυρίως του πάχους των μαγνητών και κατ' επέκταση του όγκου τους.



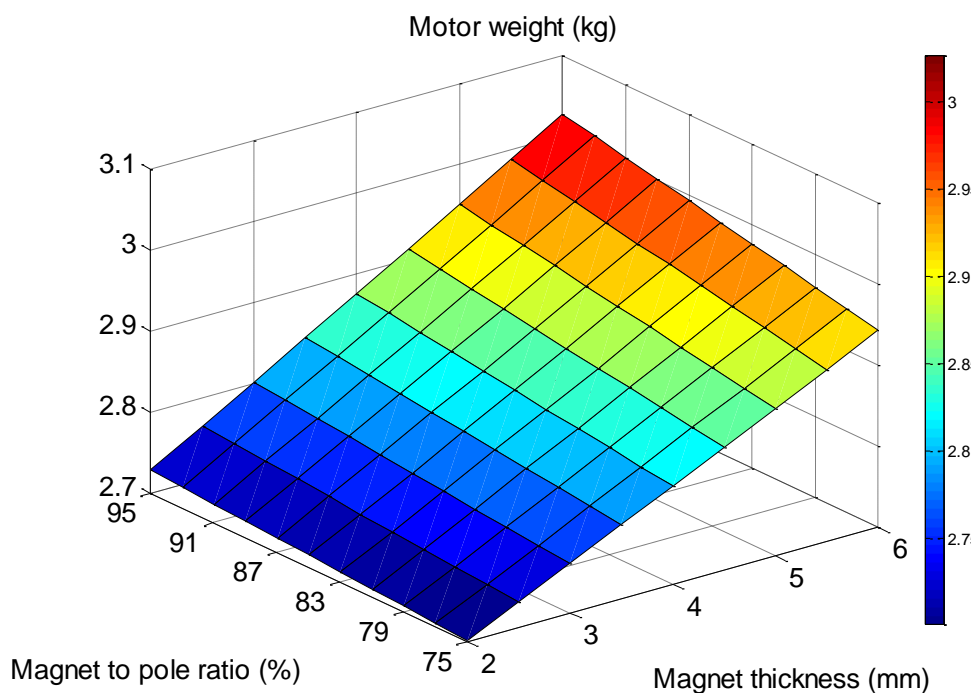
Σχήμα 3.71: Ανάλυση ευαισθησίας στην αρμονική παραμόρφωση της τάσης του κινητήρα.

Η αρμονική παραμόρφωση της τάσης βλέπουμε ότι επηρεάζεται έντονα από την γωνία του μαγνήτη σε αντίθεση με τα προηγούμενα μεγέθη. Εκτός αυτού, επηρεάζεται με έναν γραμμικό τρόπο που μας δείχνει ότι πρέπει να ερευνησουμε και γωνίες μικρότερες του 75% του πολικού βήματος για να δούμε και χαμηλότερες τιμές των αρμονικών συνιστωσών.



Σχήμα 3.72: Ανάλυση ευαισθησίας στην κυμάτωση ροπής του κινητήρα.

Η κυμάτωση ροπής παραμένει ένας αστάθμητος παράγοντας αλλά εδώ βλέπουμε ότι δεν επηρεάζεται αισθητά από το πάχος του μαγνήτη στις περισσότερες περιοχές της επιφάνειας.

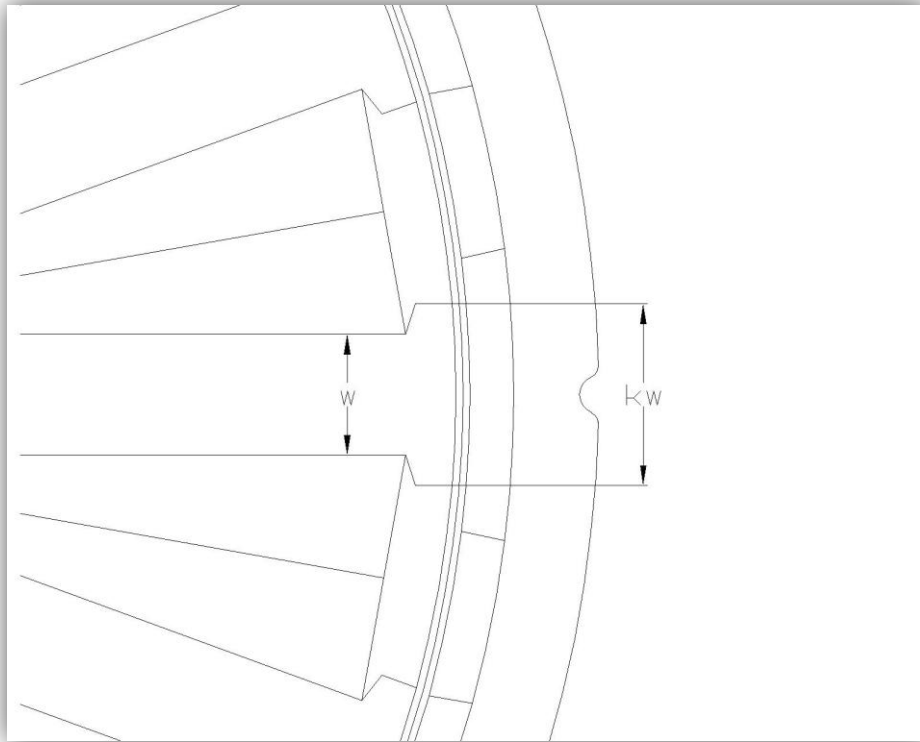


Σχήμα 3.73: Ανάλυση ευαισθησίας στο συνολικό βάρος του κινητήρα.

Το βάρος είναι ανάλογο φυσικά του όγκου των μαγνητών και μειώνεται με υψηλό ρυθμό με την μείωση του πάχους των μαγνητών και με χαμηλό ρυθμό με την μείωση της γωνίας των μαγνητών.

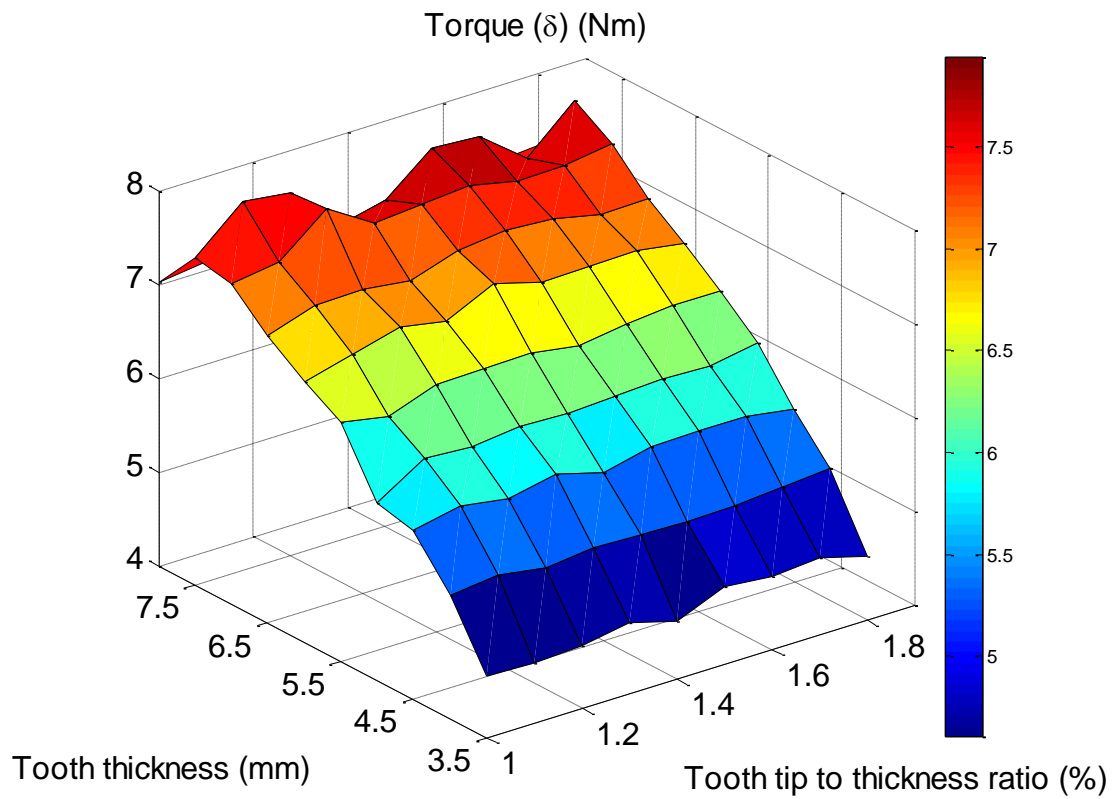
Σε αυτό το σημείο πρέπει να επιλέξουμε το επιθυμητό πάχος και ποσοστό μαγνήτη πριν προχωρήσουμε στην βελτιστοποίηση του δρομέα. Από πλευράς αποδιδόμενης ροπής είμαστε ικανοποιημένοι και αυτή δεν μας θέτει περιορισμούς, καθώς έχουμε θέσει σαν ελάχιστη απαίτηση τα $7,5Nm$. Η τάση όμως μας υποχρεώνει να κινηθούμε διαγωνίως στην επιφάνεια (πράσινη περιοχή) και να επιλέξουμε κάποιο σημείο από αυτά που είναι στα $11V$. Βλέπουμε ότι στα αριστερότερα σημεία ελαχιστοποιείται το βάρος και οι απώλειες πυρήνα. Ωστόσο, στο ίδιο σημείο μεγιστοποιούνται και οι αρμονικές της τάσης. Οι τελευταίες είναι εξαιρετικά ανεπιθύμητο φαινόμενο στους κινητήρες οπότε δεν είναι συμφέρον να επιλέξουμε την αριστερότερη τιμή. Μία μέση τιμή θα είναι η ιδανική επιλογή προς το παρόν.

Έχοντας καταλήξει σε ποσοστό μαγνήτη επί πολικού βήματος 85% και πάχος $4mm$ μπορούμε να περάσουμε στην ανάλυση ευαισθησίας του στάτη. Εδώ θα μεταβάλλουμε ταυτόχρονα το πάχος του δοντιού και το πάχος της άκρης του δοντιού. Δηλαδή, όπως βλέπουμε και στο κάτωθι σχήμα, θα αλλάζουμε τις τιμές των μεταβλητών w και k ώσπου να πάρουμε όλους τους πιθανούς συνδυασμούς για ένα εύρος τιμών τους.

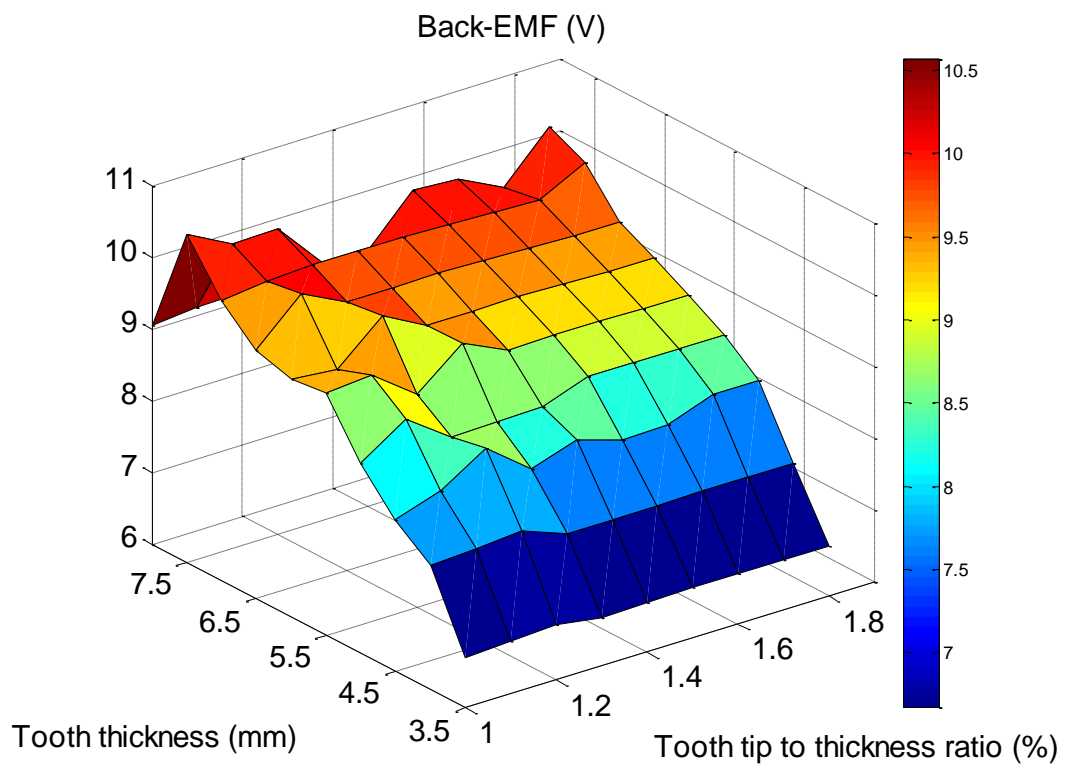


Σχήμα 3.74: Μεταβλητές που θα αλλάζουν τιμές κατά την διαδικασία ανάλυσης ευαισθησίας του στάτη.

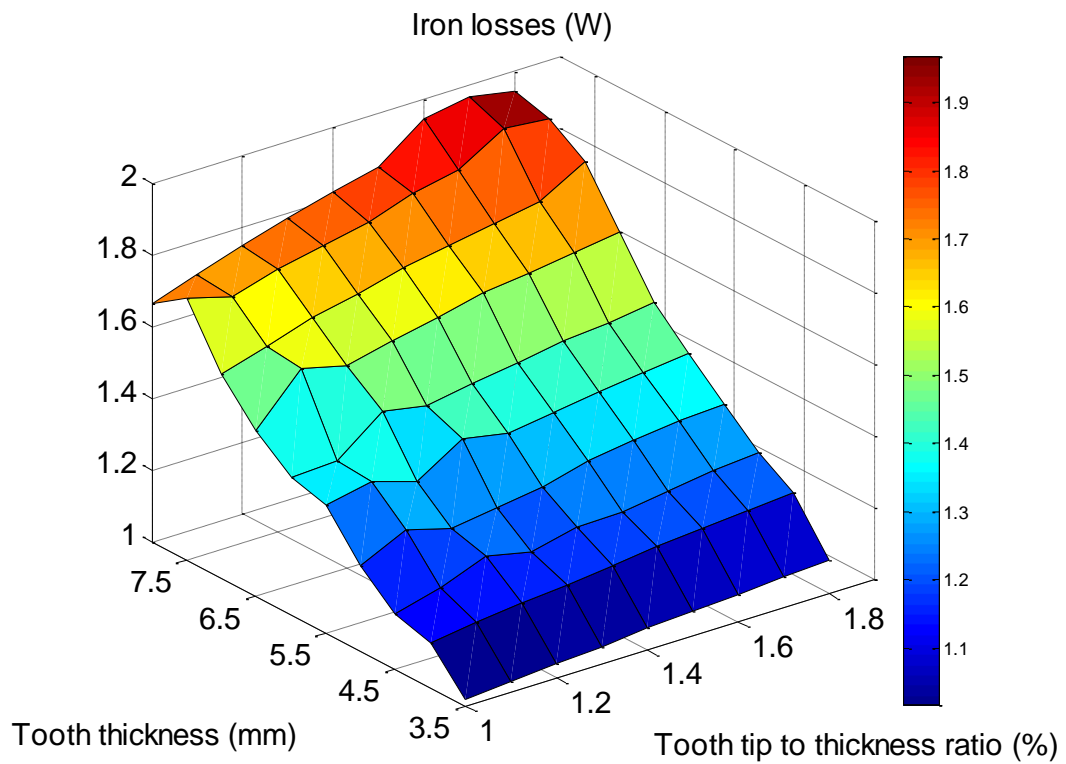
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας του στάτη φαίνονται στα κάτωθι σχήματα:



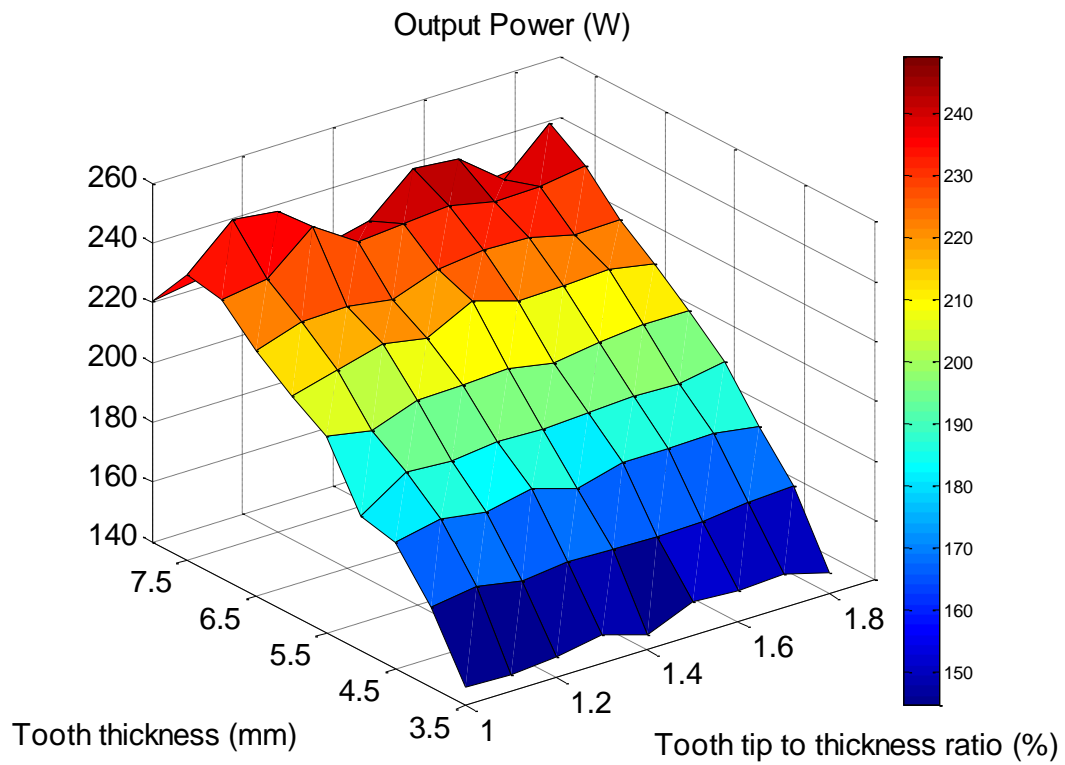
Σχήμα 3.75: Ανάλυση ευαισθησίας στην μέγιστη ροπή που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας.



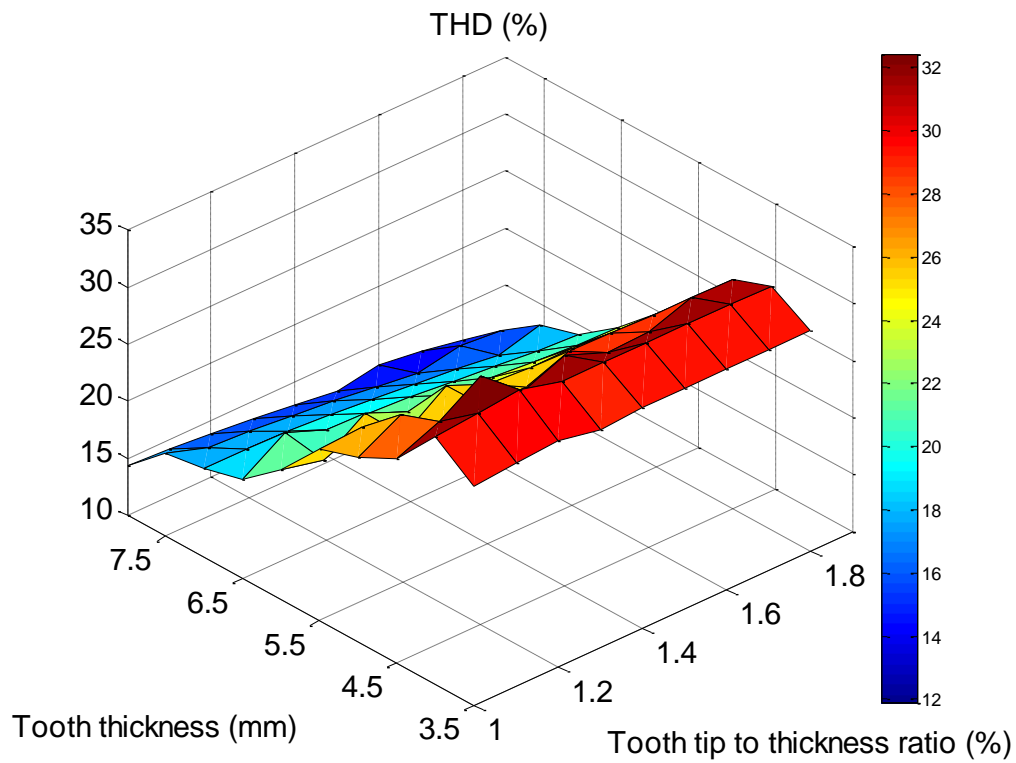
Σχήμα 3.76: Ανάλυση ευαισθησίας στο μέτρο της αντί-ΗΕΔ.



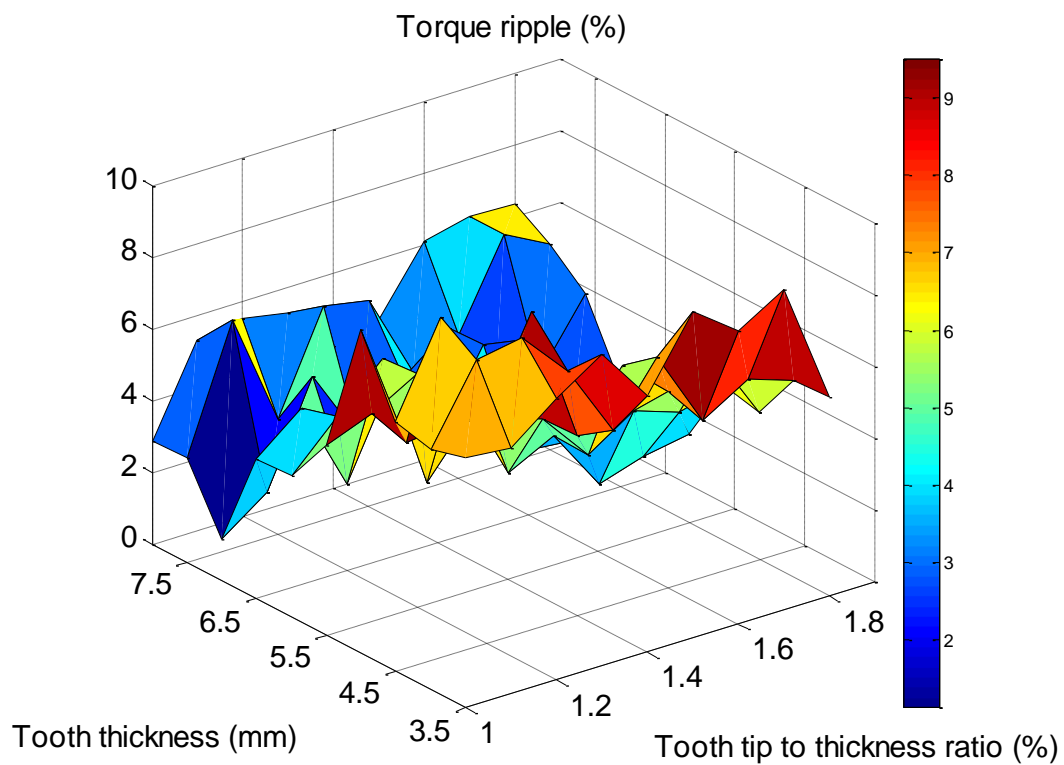
Σχήμα 3.77: Ανάλυση ευαισθησίας στις απώλειες πυρήνα του κινητήρα.



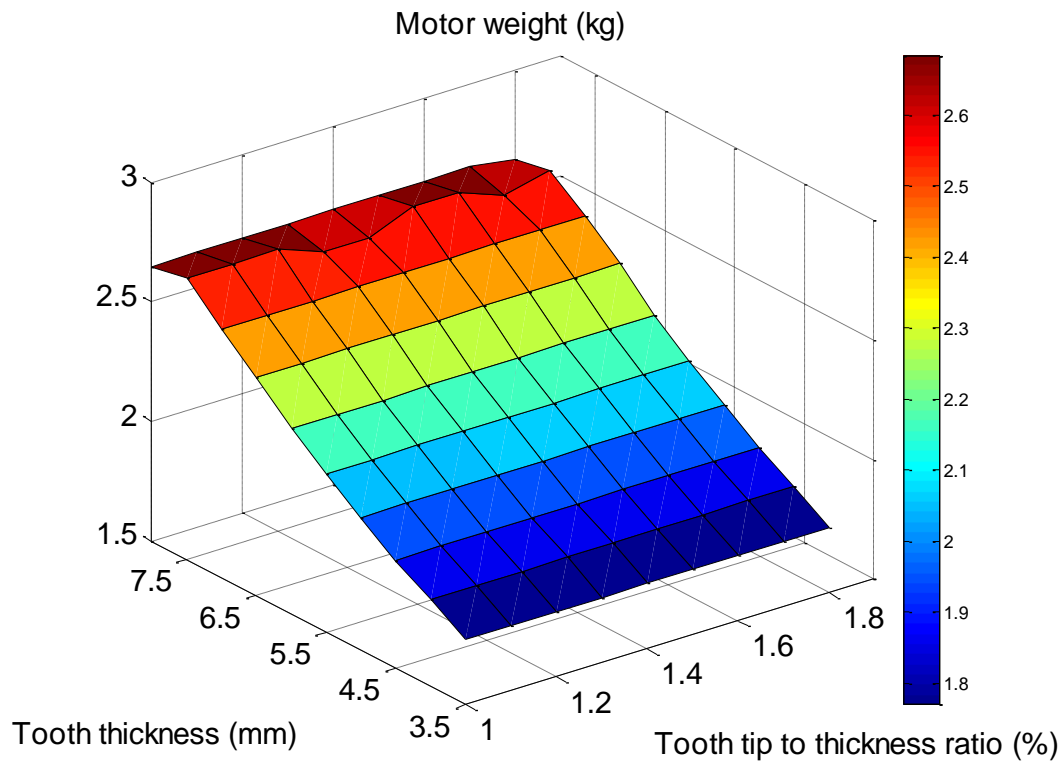
Σχήμα 3.78: Ανάλυση ευαισθησίας στην ισχύ που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας σε W.



Σχήμα 3.79: Ανάλυση ευαισθησίας στην αρμονική παραμόρφωση της τάσης του κινητήρα.



Σχήμα 3.80: Ανάλυση ευαισθησίας στην κυμάτωση ροπής του κινητήρα.



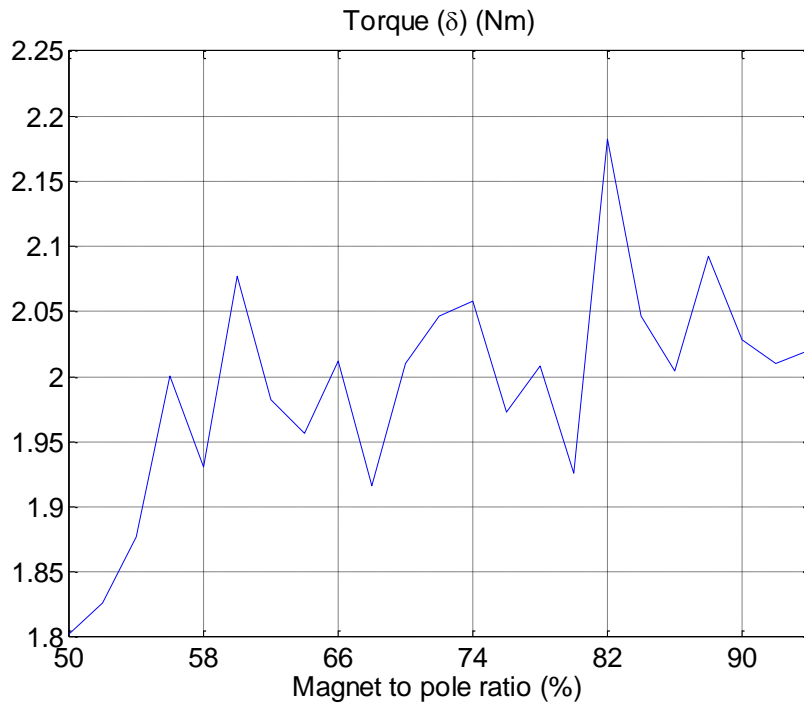
Σχήμα 3.81: Ανάλυση ευαισθησίας στο συνολικό βάρος του κινητήρα.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι μείωση του πάχους του δοντιού οδηγεί σε όλες τις περιπτώσεις σε χειρότερα χαρακτηριστικά λειτουργίας. Η μέγιστη ροπή και η τάση του κινητήρα μειώνεται, η αρμονική παραμόρφωση της τάσης και η κυμάτωση ροπής αυξάνονται. Παρατηρείται βέβαια μείωση του βάρους του κινητήρα, αλλά αυτό συμβαίνει γιατί χρησιμοποιείται λιγότερο σιδηρομαγνητικό υλικό. Επίσης, βλέπουμε ότι μειώνονται και οι απώλειες σιδήρου. Αυτό πιθανώς πρόκειται για σφάλμα που δημιουργείται λόγω της μεθόδου που χρησιμοποιήσαμε για την εύρεση των απωλειών πυρήνα. Επειδή η μέθοδος υπολογίζει απώλειες βάσει του όγκου της λαμαρίνας και της μαγνήτισης, όσο και αν αυξάνεται η μαγνήτιση λόγω της μείωσης του πλάτους του δοντιού, πολύ περισσότερο μειώνεται ο όγκος του σιδήρου. Συνεπώς οδηγείται σε μία εκτίμηση μειωμένων απωλειών. Πρόκειται ενδεχομένως για μία λάθος εκτίμηση, ωστόσο δεν υπάρχει λόγος να διερευνηθεί περισσότερο, καθώς ούτως ή άλλως οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι δεν πρέπει να χρησιμοποιήσουμε κάτι διαφορετικό από το μέγιστο πλάτος δοντιού, δηλαδή $8mm$. Επίσης, παρατηρήσαμε ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση, η μεταβολή του μήκους της άκρης του δοντιού δεν έχει κάποια αξιοσημείωτη επίδραση στα αποτελέσματα.

Έχοντας κερδίσει πλέον εμπειρία πάνω στον τρόπο με τον οποίο επηρεάζονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του κινητήρα με μεταβολή βασικών παραμέτρων, μπορούμε να περάσουμε στην τελική φάση βελτιστοποίησης. Συνοψίζουμε αυτά που μάθαμε:

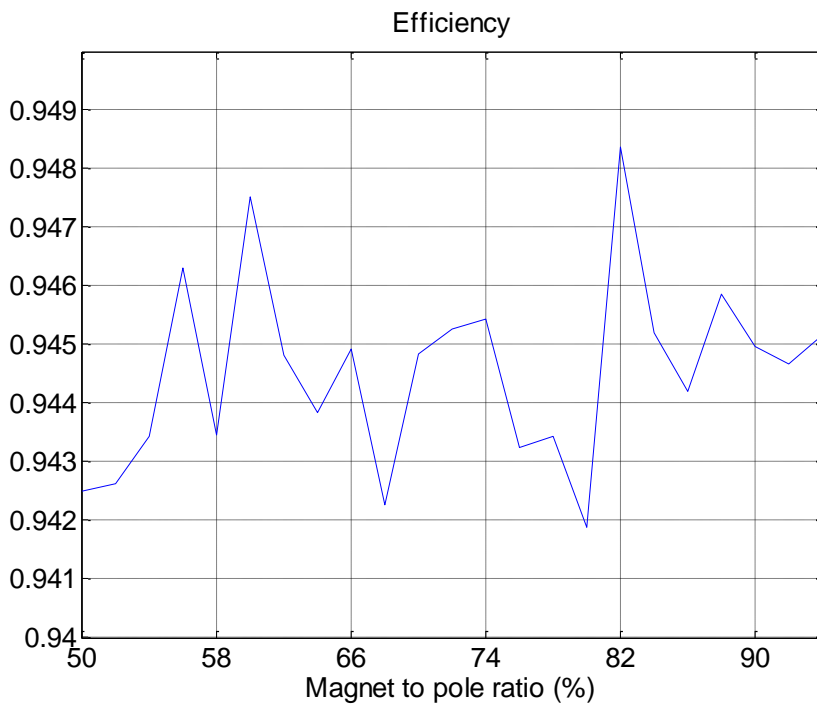
- 1) Το πάχος και το ποσοστό του μαγνήτη του δρομέα επηρεάζουν αισθητά τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του κινητήρα.
- 2) Η βελτιστοποίηση μπορεί να γίνει σε οποιοδήποτε σημείο λειτουργίας εφόσον έχουμε την δυνατότητα να προβλέψουμε τι θα συμβεί και στα υπόλοιπα.
- 3) Πάχος δοντιού στάτη πάνω από $8mm$ δεν είναι εφικτό λόγω διαθέσιμου χώρου.
- 4) Πάχος δοντιού στάτη μικρότερο από $8mm$ δεν μπορεί να προτιμηθεί γιατί χειροτερεύει τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του κινητήρα αισθητά.
- 5) Το πάχος της άκρης του δοντιού του στάτη δεν έχει αξιοσημείωτη επίδραση στα αποτελέσματα.

Από όλα αυτά βλέπουμε ότι μπορούμε να επιλέξουμε τις διαστάσεις της γεωμετρίας του στάτη και να βελτιστοποιήσουμε μόνο την γεωμετρία του δρομέα. Θέτουμε λοιπόν πάχος δοντιού $8mm$. Επίσης, επιλέγουμε $k = 1$ ώστε να έχουμε εντελώς ανοιχτά δόντια που θα μας προσφέρουν κατασκευαστική ευκολία. Για την επιτάχυνση της διαδικασίας και προκειμένου να μην καταφύγουμε πάλι σε τρισδιάστατες επιφάνειες που είναι δύσκολες στην κατανόηση, θα ορίσουμε αυτή τη φορά ένα σταθερό εμβαδόν μαγνήτη που θα μας εξασφαλίζει την απαιτούμενη μέγιστη ροπή και θα μεταβάλλουμε το ποσοστό επί πολικού βήματος του μαγνήτη. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα να λάβουμε δισδιάστατα διαγράμματα με οριζόντιο άξονα το ποσοστό του μαγνήτη και κάθετο άξονα το εκάστοτε εξεταζόμενο μέγεθος. Επίσης θα εξετάσουμε μεγαλύτερο εύρος ποσοστού μαγνήτη για πιο έγκυρα αποτελέσματα. Αυτά φαίνονται παρακάτω:

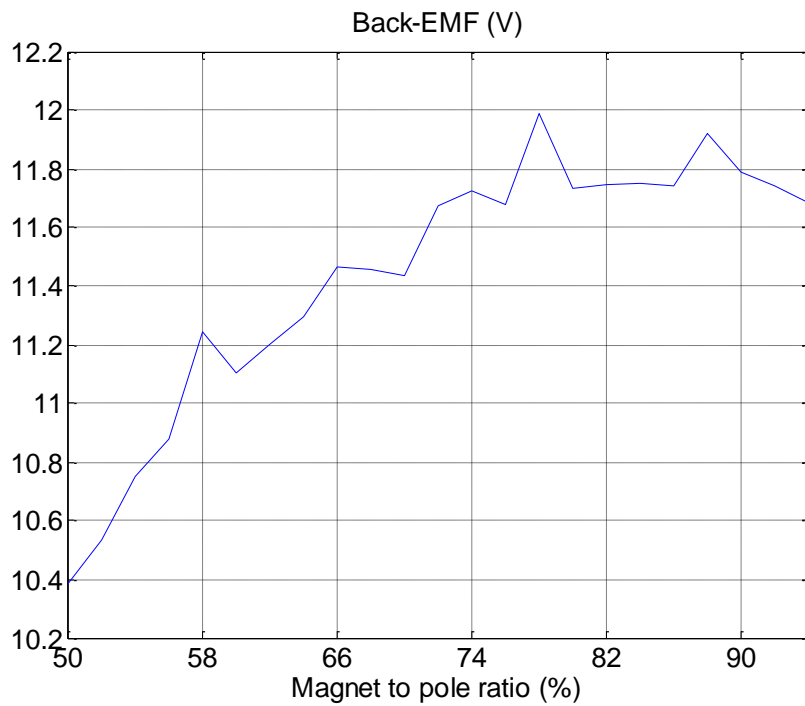


Σχήμα 3.82: Ανάλυση ευαισθησίας στην μέγιστη ροπή που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας.

Στο σχήμα 3.82 βλέπουμε ότι παρά την κυμάτωση στην μέγιστη ροπή που προκαλείται κατά την διερεύνηση της γωνίας, αυτή αυξάνει με σταθερό ρυθμό με την αύξηση της γωνίας. Η απόδοση επίσης παρουσιάζει πολύ μικρές μεταβολές, πρακτικά ανεπαίσθητες.

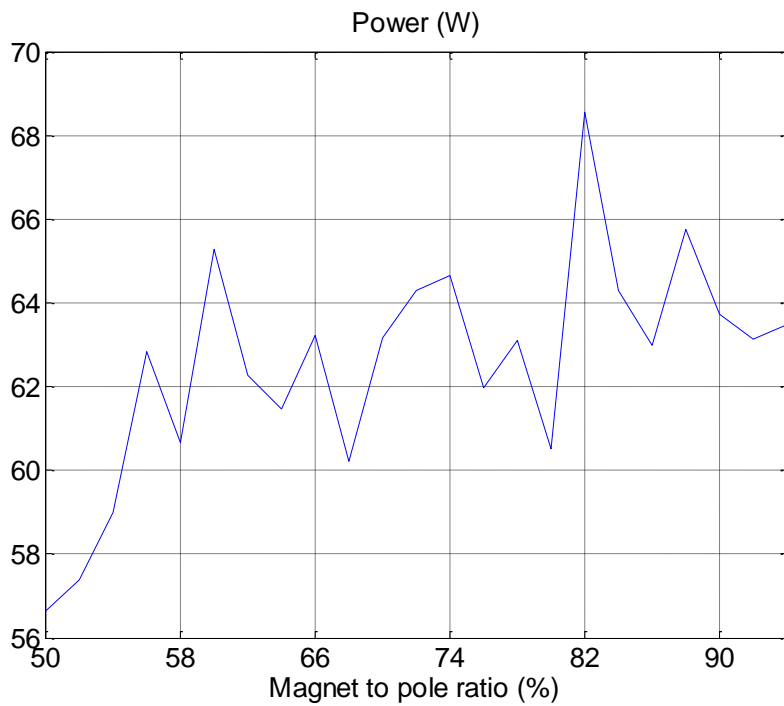


Σχήμα 3.83: Ανάλυση ευαισθησίας στην απόδοση που μπορεί να επιτύχει ο κινητήρας.

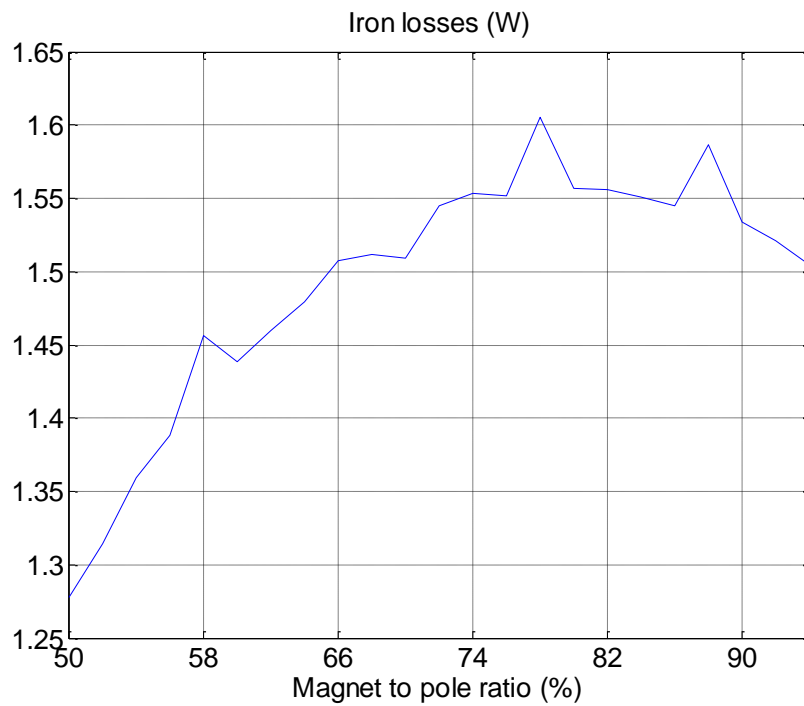


Σχήμα 3.84: Ανάλυση ευαισθησίας στο μέτρο της αντί-ΗΕΔ.

Το μέτρο της τάσης αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας (σχήμα 3.84), το ίδιο και η ισχύς στο σχήμα 3.85.

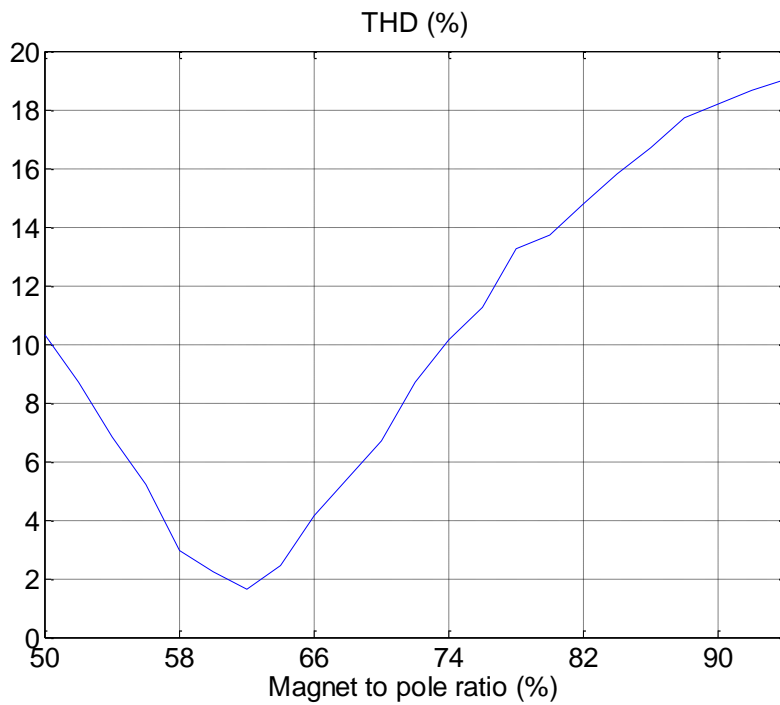


Σχήμα 3.85: Ανάλυση ευαισθησίας στην ισχύ που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας σε W.

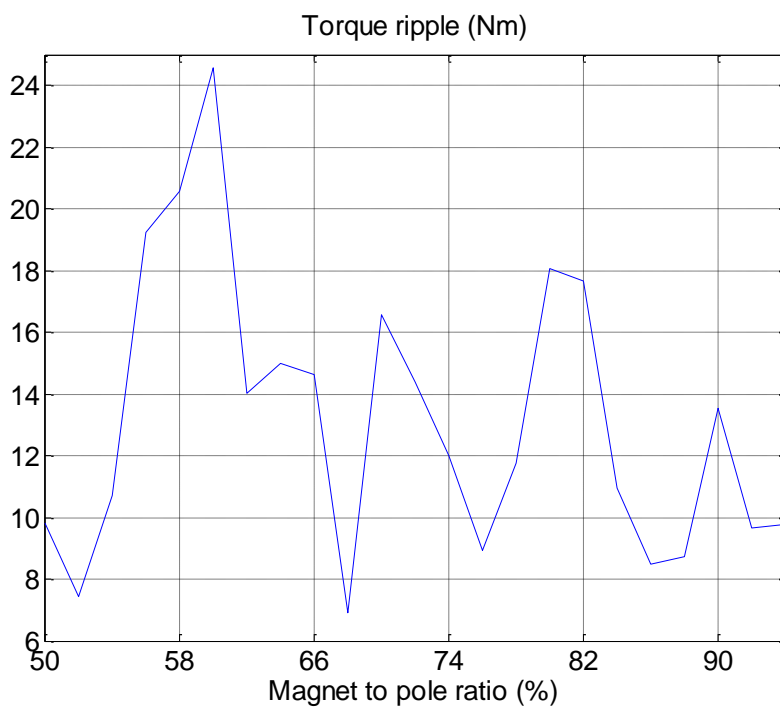


Σχήμα 3.86: Ανάλυση ευαισθησίας στις απώλειες πυρήνα του κινητήρα.

Οι απώλειες σιδήρου μεταβάλλονται ελάχιστα με την αύξηση της γωνίας του μαγνήτη στο σχήμα 3.86. Η αρμονική παραμόρφωση της τάσης (σχήμα 3.87) παρουσιάζει μία αξιοπρόσεκτη ημιτονοειδή πορεία κατά την μεταβολή της γωνίας του μαγνήτη και παρουσιάζει ελάχιστο που βρίσκεται κάτω από την τιμή 2%!

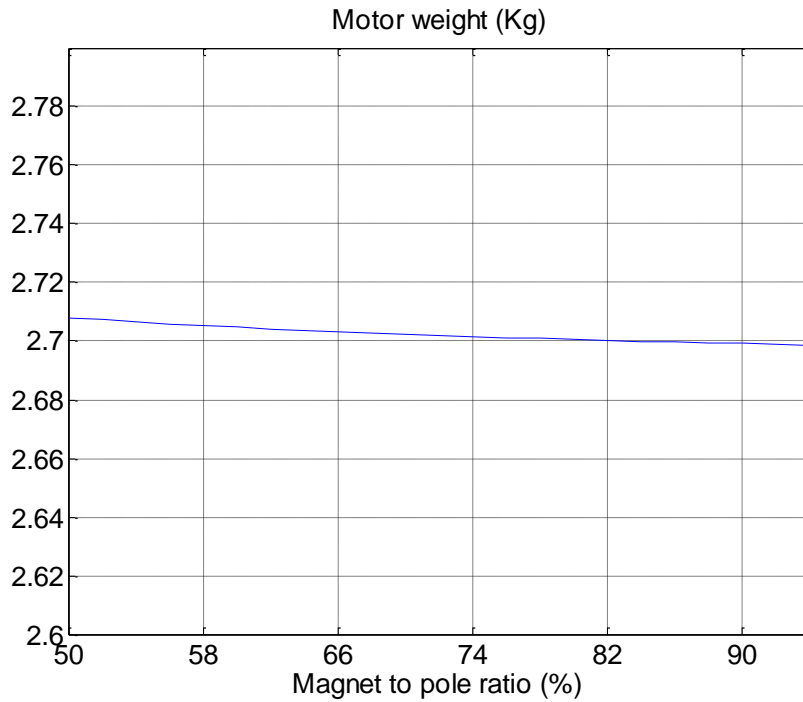


Σχήμα 3.87: Ανάλυση ευαισθησίας στην αρμονική παραμόρφωση της τάσης του κινητήρα.



Σχήμα 3.88: Ανάλυση ευαισθησίας στην κυμάτωση ροπής του κινητήρα.

Η κυμάτωση ροπής (σχήμα 3.88) παραμένει επηρεαζόμενη από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα χωρίς να ακολουθεί κάποια αναμενόμενη πορεία.

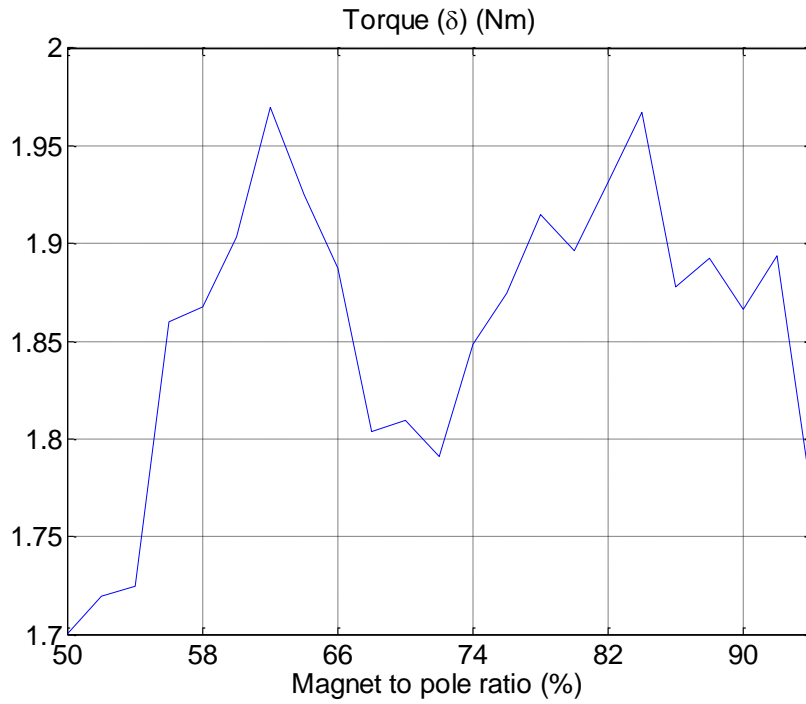


Σχήμα 3.89: Ανάλυση ευαισθησίας στο συνολικό βάρος του κινητήρα.

Παρατηρούμε ότι με σταθερό όγκο μαγνήτη η αποδιδόμενη ροπή μένει σχετικά σταθερή. Το ίδιο συμβαίνει και με την προσδοκώμενη απόδοση. Η τελική διαμόρφωση της μηχανής πρέπει να έχει αντί-HEΔ περίπου 11V και εφόσον για ποσοστό μαγνήτη 62% ελαχιστοποιούνται οι αρμονικές της τάσης κρίνεται συμφέρον να επιλεγεί αυτή η τιμή σαν τελική. Όσον αφορά την κυμάτωση ροπής και τις απώλειες πυρήνα, αυτές βρίσκονται σε ανεκτά επίπεδα, συνεπώς πρόκειται για την καλύτερη επιλογή που μπορεί να γίνει. Εξάλλου, μία μηχανή που, έστω θεωρητικά, έχει μόνο 2% αρμονική παραμόρφωση, έχει και πρακτικά πλήρως ημιτονοειδή αντί-HEΔ.

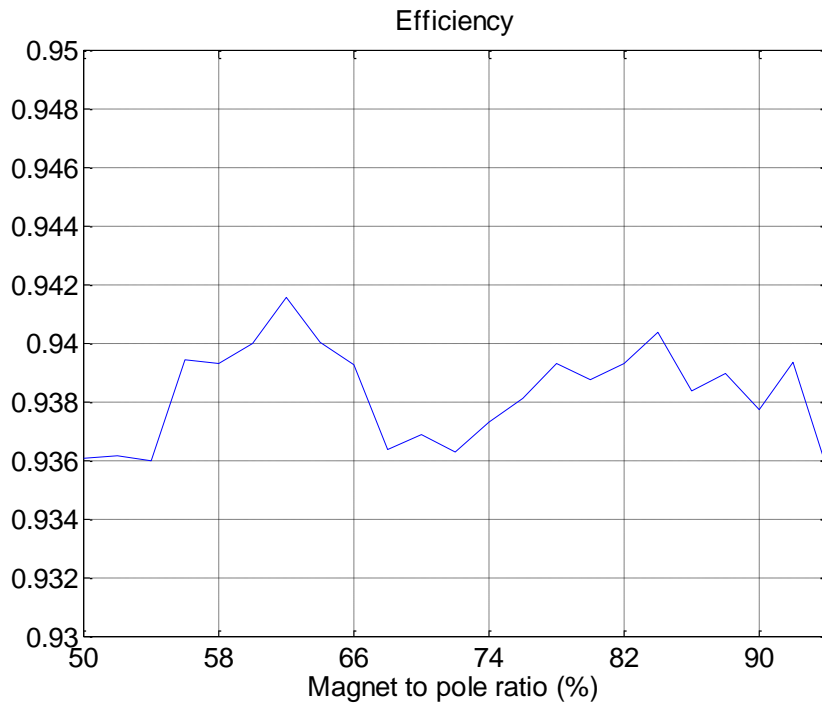
3.5.2 Ανάλυση ευαισθησίας διαμόρφωσης με μονή στρώση

Με παρόμοιο τρόπο μπορούμε να κάνουμε μία ανάλυση ευαισθησίας στην διαμόρφωση με συγκεντρωμένο τύλιγμα μονής στρώσης. Εφόσον γνωρίζουμε την βέλτιστη γεωμετρία στάτη, αυτή δεν θα μεταβληθεί με τον αριθμό των στρώσεων.

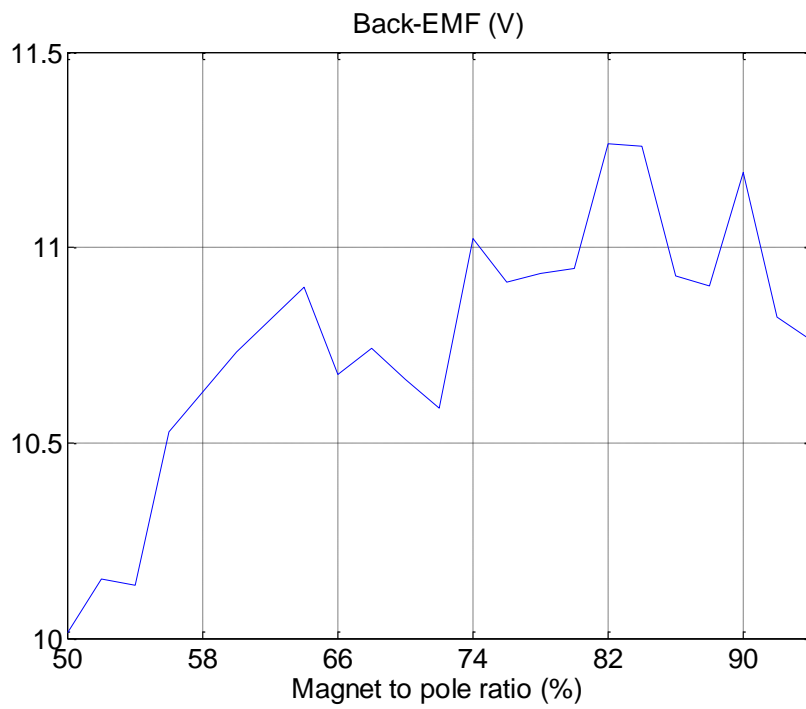


Σχήμα 3.90: Ανάλυση ευαισθησίας στην μέγιστη ροπή που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας.

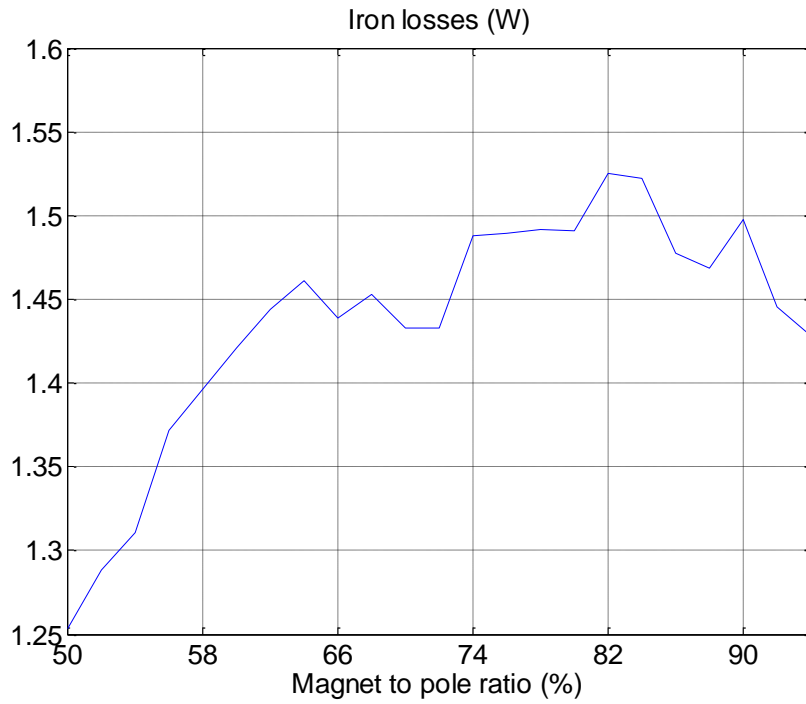
Ξεκινώντας από την κυματομορφή μέγιστης ροπής (σχήμα 3.90), βλέπουμε ότι παρουσιάζει μεγάλες και γρήγορες εναλλαγές. Αυτό είναι ένα δυσάρεστο γεγονός, καθώς βλέπουμε ότι με μία μικρή κατασκευαστική αστοχία θα αλλάξει αρκετά η ικανότητα μέγιστης ροπής της μηχανής.



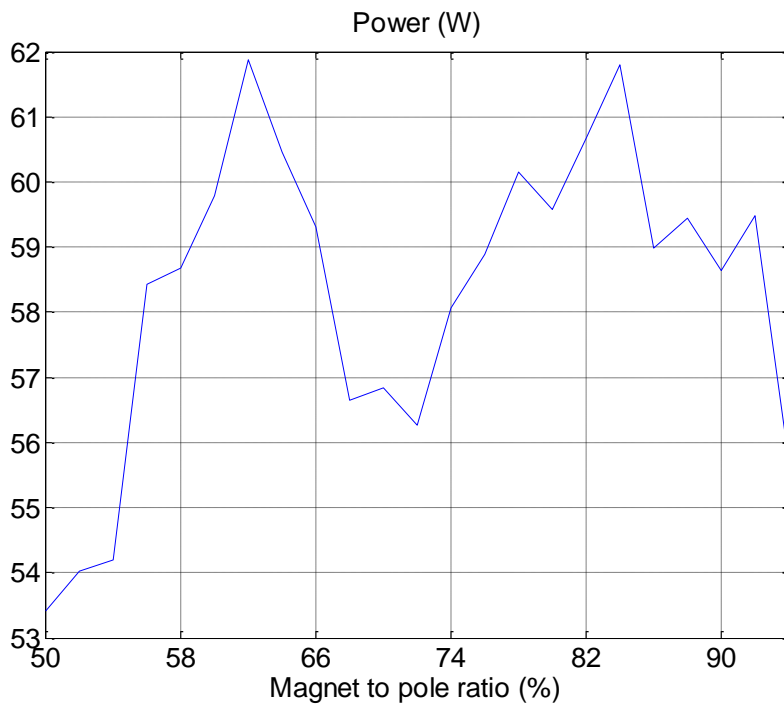
Σχήμα 3.91: Ανάλυση ευαισθησίας στην απόδοση που μπορεί να επιτύχει ο κινητήρας.



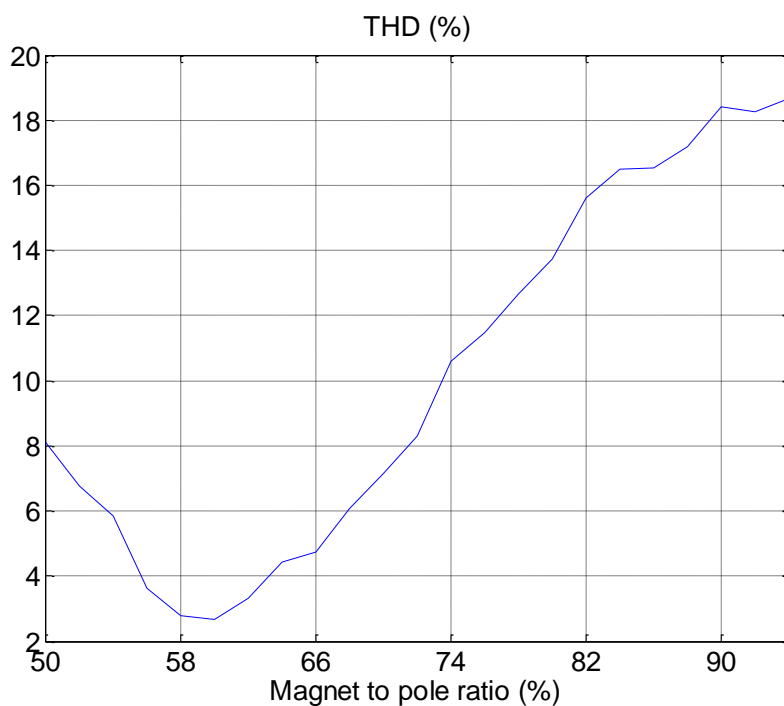
Σχήμα 3.92: Ανάλυση ευαισθησίας στο μέτρο της αντί-ΗΕΔ.



Σχήμα 3.93: Ανάλυση ευαισθησίας στις απώλειες πυρήνα του κινητήρα.

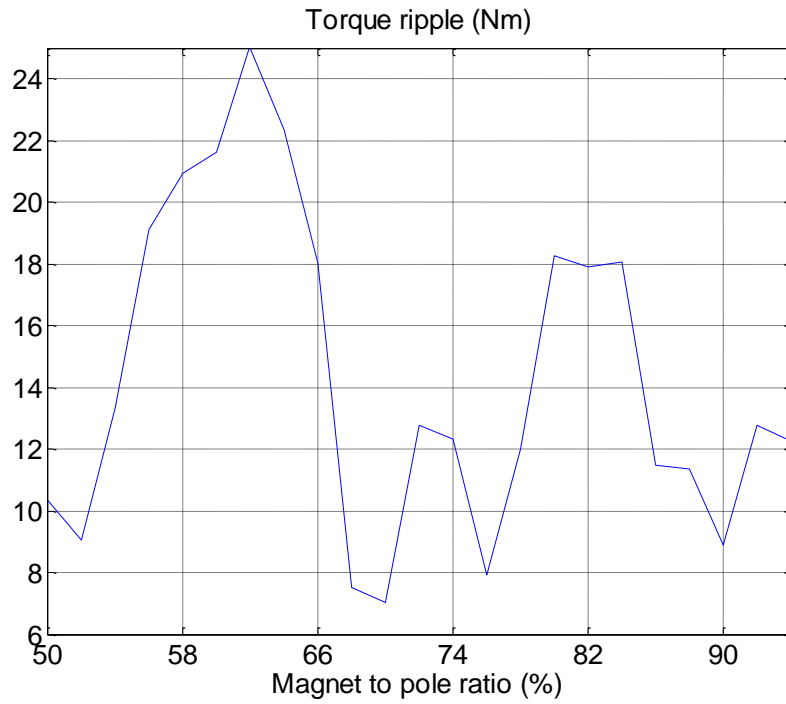


Σχήμα 3.94: Ανάλυση ευαισθησίας στην ισχύ που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας σε W.

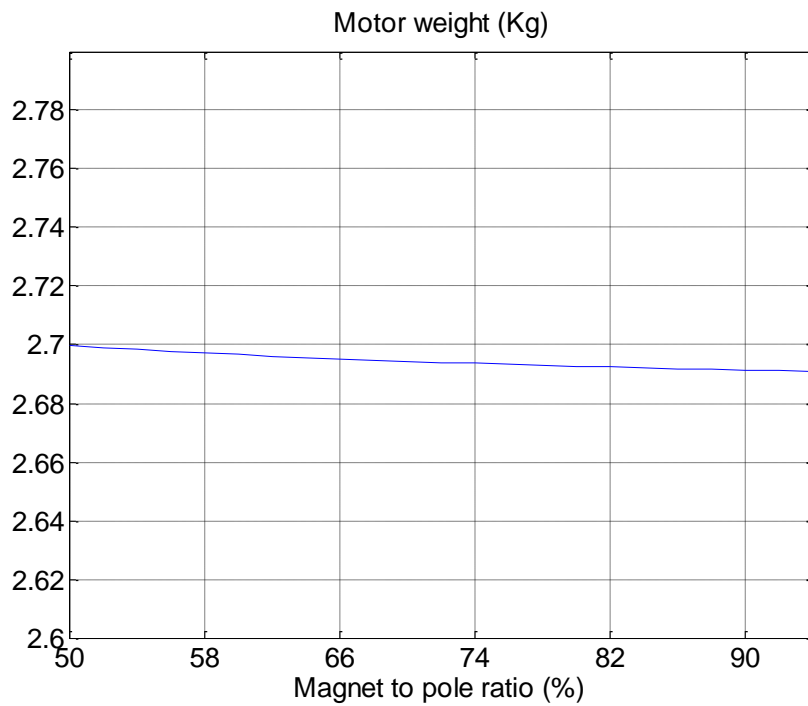


Σχήμα 3.95: Ανάλυση ευαισθησίας στην αρμονική παραμόρφωση της τάσης του κινητήρα.

Βλέπουμε στο σχήμα 3.95 δεν έχει την ικανότητα αυτή η διαμόρφωση να φτάσει σε τόσο χαμηλά επίπεδα αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης, όσο η προηγούμενη. Για ποσοστό μαγνήτη 60% εμφανίζεται και η χαμηλότερη τιμή της, που είναι 3%. Η διαφορά βέβαια δεν είναι και τόσο σημαντική, όμως η αντίστοιχη τιμή της κυμάτωσης ροπής (σχήμα 3.96) σε αυτό το ποσοστό, είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με την προηγούμενη διαμόρφωση.



Σχήμα 3.96: Ανάλυση ευαισθησίας στην κυμάτωση ροπής του κινητήρα.

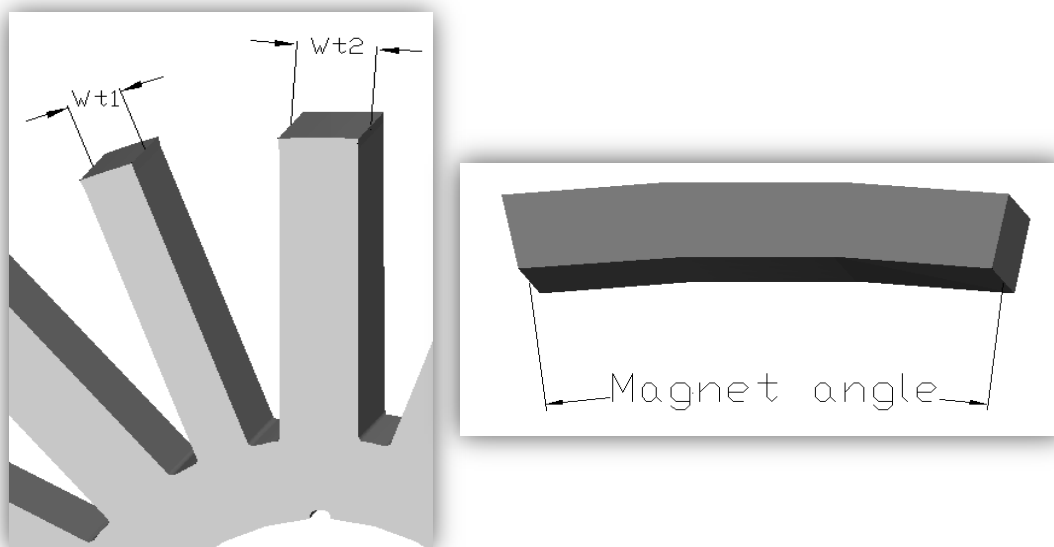


Σχήμα 3.97: Ανάλυση ευαισθησίας στο συνολικό βάρος του κινητήρα.

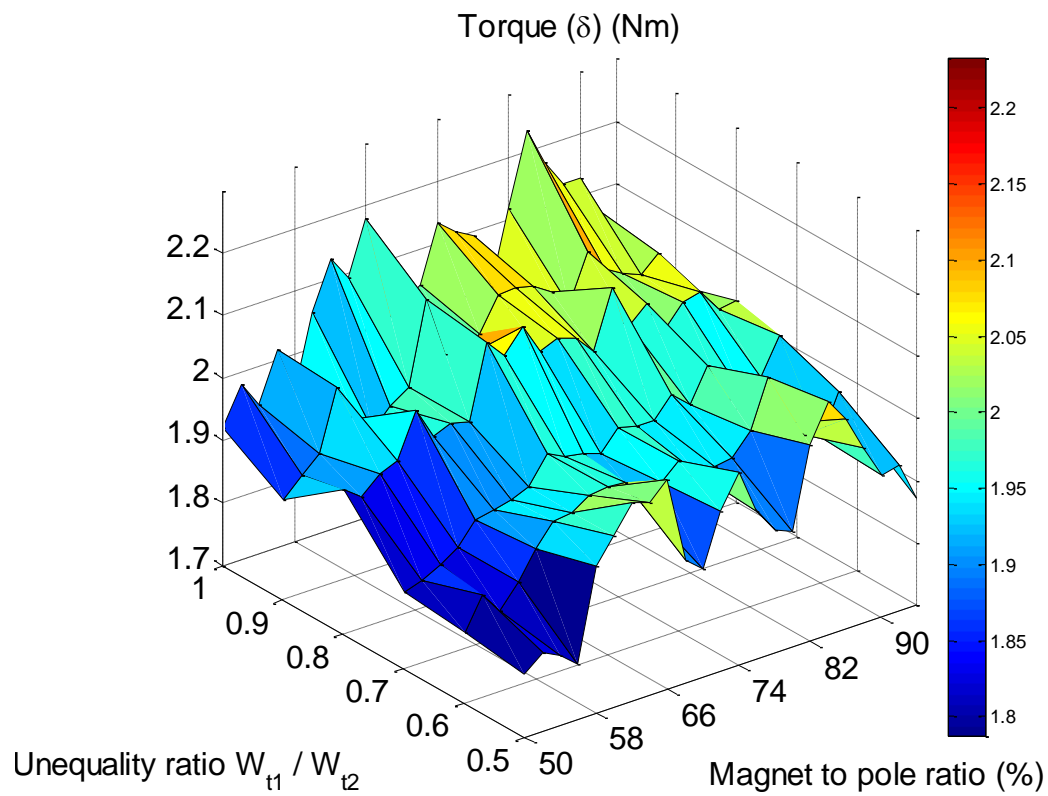
Βλέπουμε δηλαδή, ότι εκ πρώτης όψεως έχουμε χειρότερα χαρακτηριστικά λειτουργίας εδώ, κάτι που ήταν αναμενόμενο. Αφού εξετασθεί και η γεωμετρία με άνισα δόντια θα γίνει και η τελική σύγκριση των τριών εναλλακτικών.

3.5.3 Ανάλυση ευαισθησίας διαμόρφωσης με μονή στρώση και άνισα δόντια

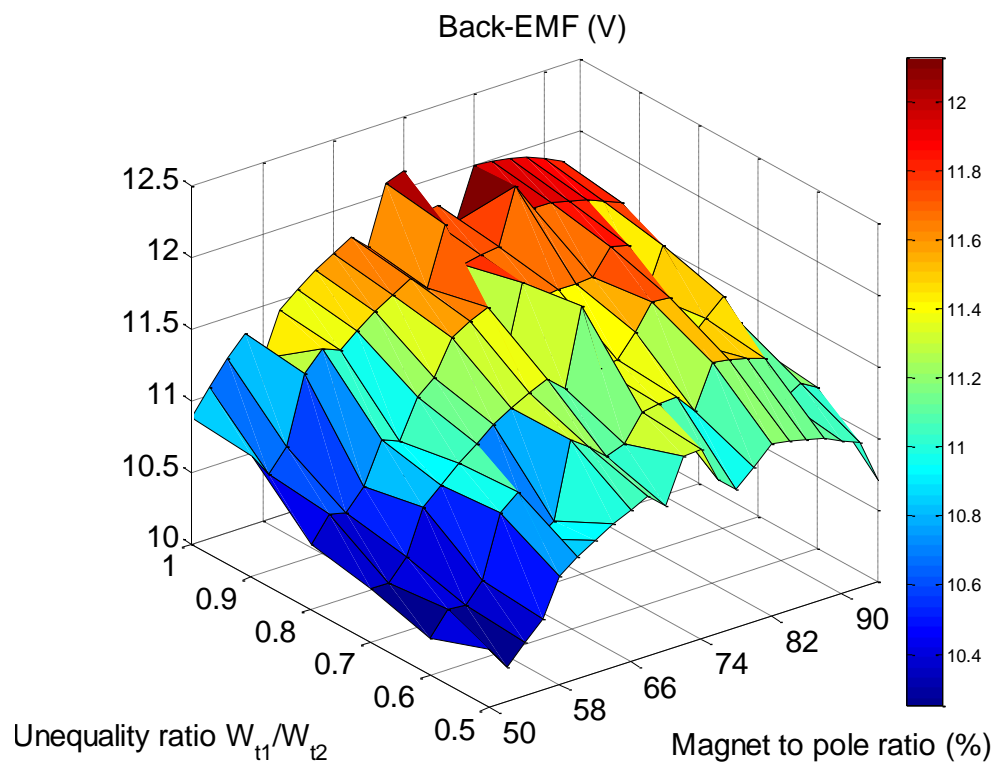
Αντικείμενο διερεύνησης στην συγκεκριμένη περίπτωση θα αποτελέσει τόσο ο στάτης όσο και ο δρομέας. Ελάχιστα από όσα διαπιστώσαμε προωτέρα θα συνεχίσουν να ισχύουν. Κατά την διερεύνηση αυτής της γεωμετρίας θα αναρωτηθούμε αρχικά πόση ανισότητα χρειάζεται να έχουν τα δόντια προκειμένου να επιτύχουμε καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις προηγούμενες. Ύστερα όμως θα πρέπει να βρούμε και το ποσοστό του μαγνήτη που θα ταιριάζει ιδανικά με τη σχεδίαση του στάτη. Για να λάβουμε μία πλήρη εικόνα της επίδρασης αυτών των δύο χαρακτηριστικών σχεδίασης, θα εκτελέσουμε μία ανάλυση ευαισθησίας κατά την οποία θα μεταβάλλουμε και τις δύο (σχήμα 3.98). Πιο συγκεκριμένα, η μία παράμετρος θα είναι ο λόγος ανισότητας W_{t1}/W_{t2} και η άλλη θα είναι η γωνία του μαγνήτη εκφρασμένη σαν ποσοστό επί της γωνίας του πολικού βήματος. Φυσικά, ο όγκος του μαγνήτη θα παραμένει σταθερός και ανεξάρτητος της γωνίας. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης.



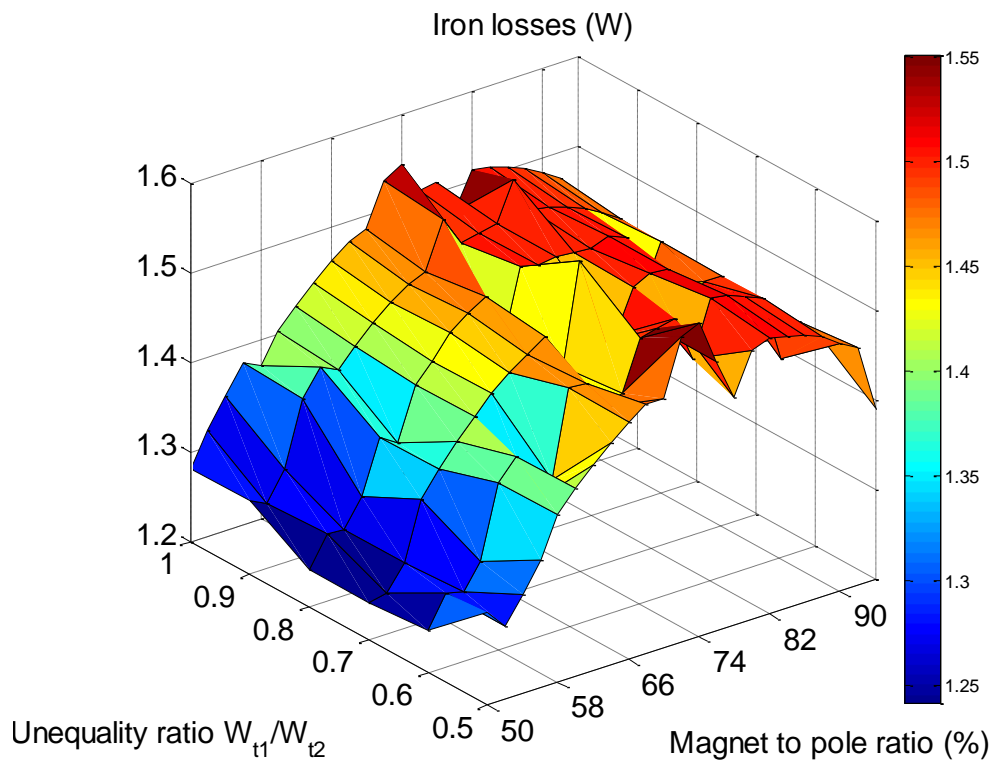
Σχήμα 3.98: Μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση ευαισθησίας της γεωμετρίας με άνισα δόντια.



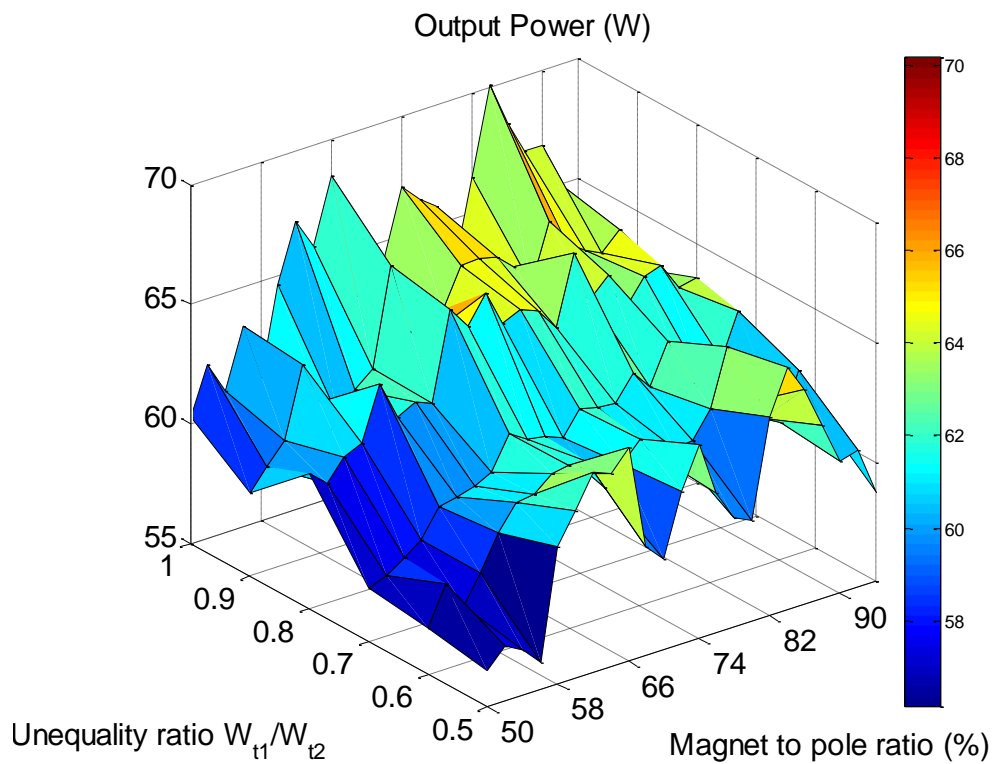
Σχήμα 3.99: Ανάλυση ευαισθησίας στην μέγιστη ροπή που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας.



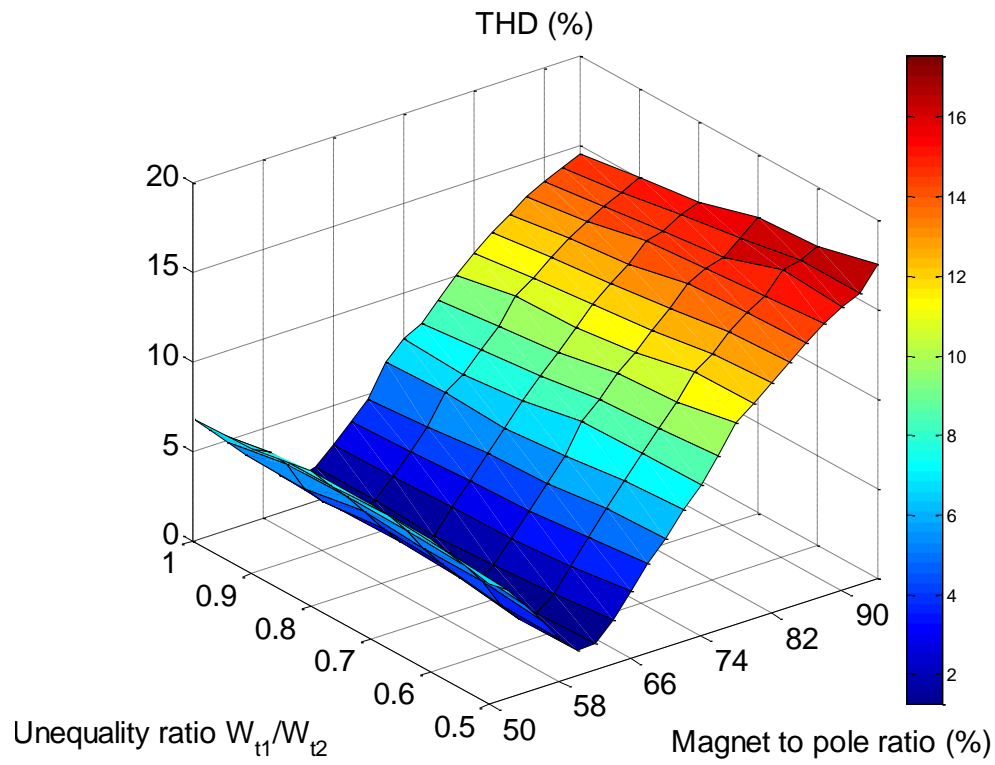
Σχήμα 3.100: Ανάλυση ευαισθησίας στο μέτρο της αντί-ΗΕΔ.



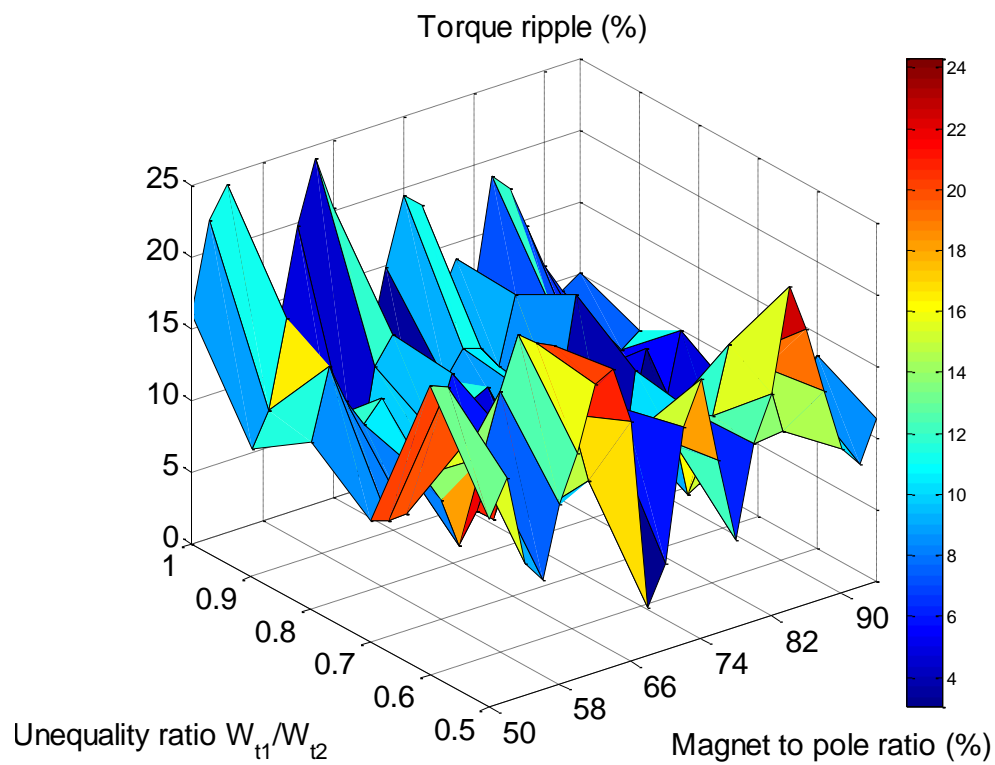
Σχήμα 3.101: Ανάλυση ευαισθησίας στις απώλειες πυρήνα του κινητήρα.



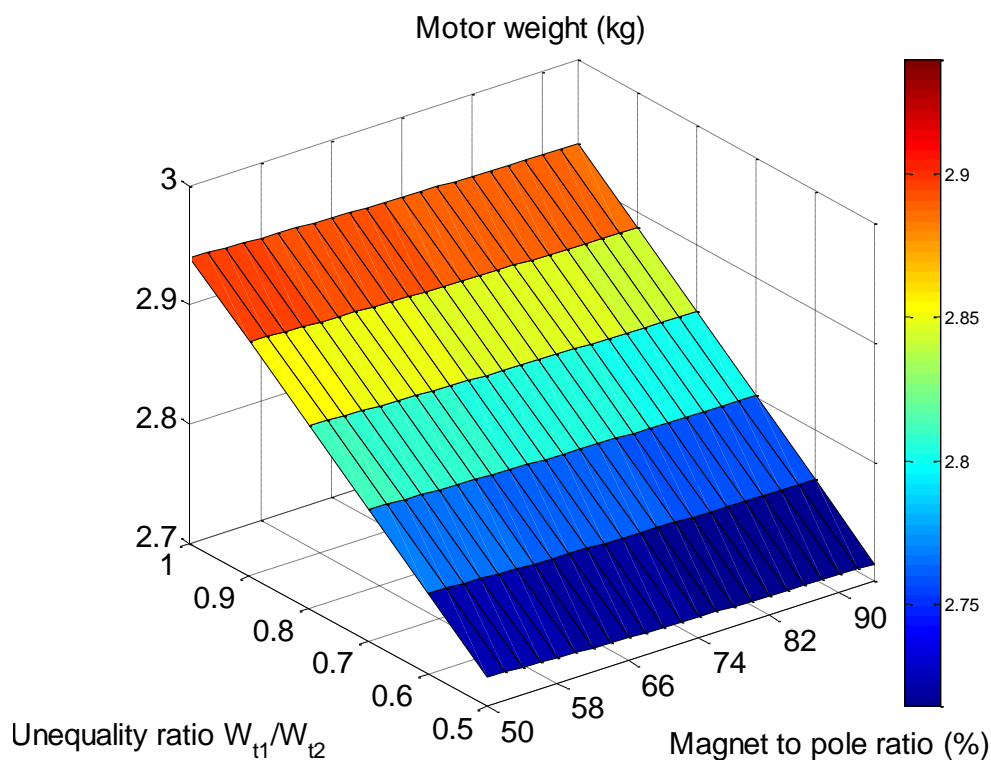
Σχήμα 3.102: Ανάλυση ευαισθησίας στην ισχύ που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας σε W.



Σχήμα 3.103: Ανάλυση ευαισθησίας στην αρμονική παραμόρφωση της τάσης του κινητήρα.



Σχήμα 3.104: Ανάλυση ευαισθησίας στην κυμάτωση ροπής του κινητήρα.

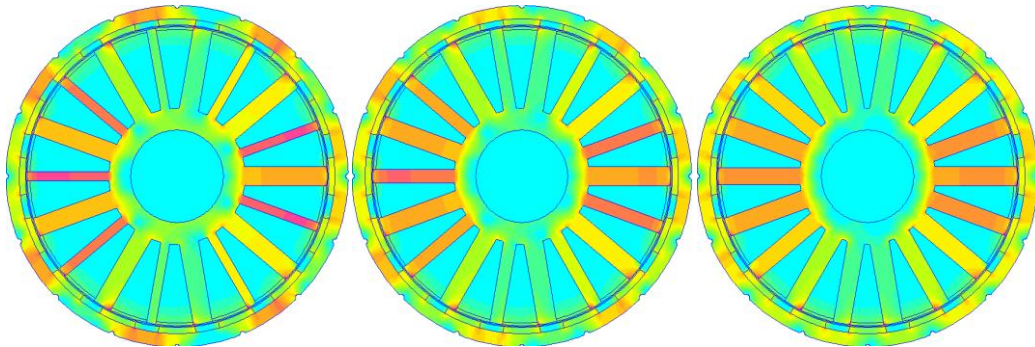


Σχήμα 3.105: Ανάλυση ευαισθησίας στο συνολικό βάρος του κινητήρα.

Τα αποτελέσματα αυτά μας οδηγούν σε μία εξαιρετική διαπίστωση. Το ποσοστό ανισότητας των δοντιών δεν δείχνει να επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του κινητήρα. Η μέγιστη ροπή, η τάση, η αρμονική παραμόρφωση αυτής και οι απώλειες πυρήνα αυξομειώνονται κυρίως λόγω της γωνίας του μαγνήτη. Ωστόσο, το βάρος του κινητήρα μειώνεται σημαντικά κατά την αύξηση της ανισότητας. Συγκεκριμένα, μπορούμε να έχουμε ένα όφελος 10% στο συνολικό βάρος του κινητήρα χωρίς καμία έκπτωση στα χαρακτηριστικά του. Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό επίτευγμα της διαμόρφωσης με άνισα δόντια, καθώς δίνει την δυνατότητα στον σχεδιαστή να μειώσει το βάρος του κινητήρα αλλά και να χωρέσει περισσότερους αγωγούς στην αύλακα σε σχέση με τις άλλες δύο διαμορφώσεις, αυξάνοντας την επίδοση του κινητήρα για δεδομένο όγκο.

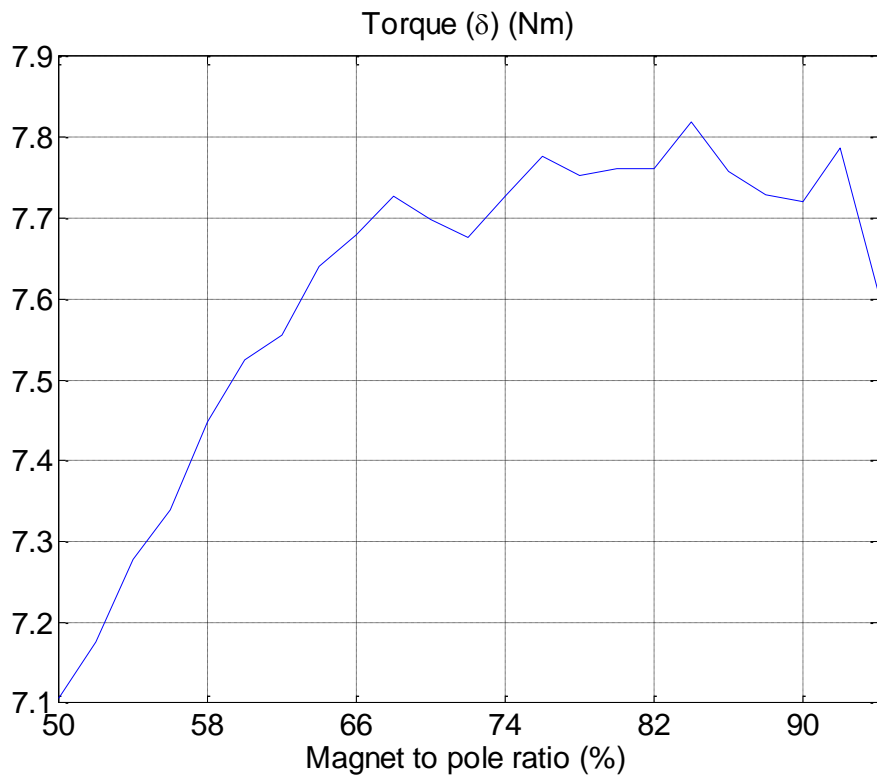
Τα τρισδιάστατα διαγράμματα όμως δεν μπορούν να μας δώσουν πληροφορία ως προς τα ακριβή γεωμετρικά χαρακτηριστικά που μας συμφέρει να επιλέξουμε. Για να ευρεθεί η τελική γεωμετρία θα ακολουθήσουμε την μέθοδο που ακολουθήσαμε και προηγουμένως. Αρχικά θα καταλήξουμε στην γεωμετρία του στάτη και ύστερα θα κάνουμε ανάλυση ευαισθησίας στο ποσοστό του μαγνήτη διατηρώντας σταθερό τον όγκο του. Παρακάτω βλέπουμε την κατανομή του πεδίου για 3 διαφορετικές περιπτώσεις (σχήμα 3.106). Η πρώτη είναι για ανισότητα δοντιών 0.5, η δεύτερη για 0.7 και η Τρίτη για 0.9. Παρατηρούμε ότι στην

πρώτη περίπτωση έχουμε έντονο κορεσμό του πεδίου στα μικρότερα δόντια. Στην δεύτερη περίπτωση έχουμε μειωμένο κορεσμό και στην τρίτη περίπτωση δεν παρατηρείται καθόλου. Καθώς τα σημεία με κορεσμό είναι επίφοβα για την ανάπτυξη υψηλής θερμοκρασίας, δεν θα επιλέξουμε το λόγο ανισότητας 0,5 αλλά τον 0,7 που μας δίνει μεγαλύτερη σιγουριά.

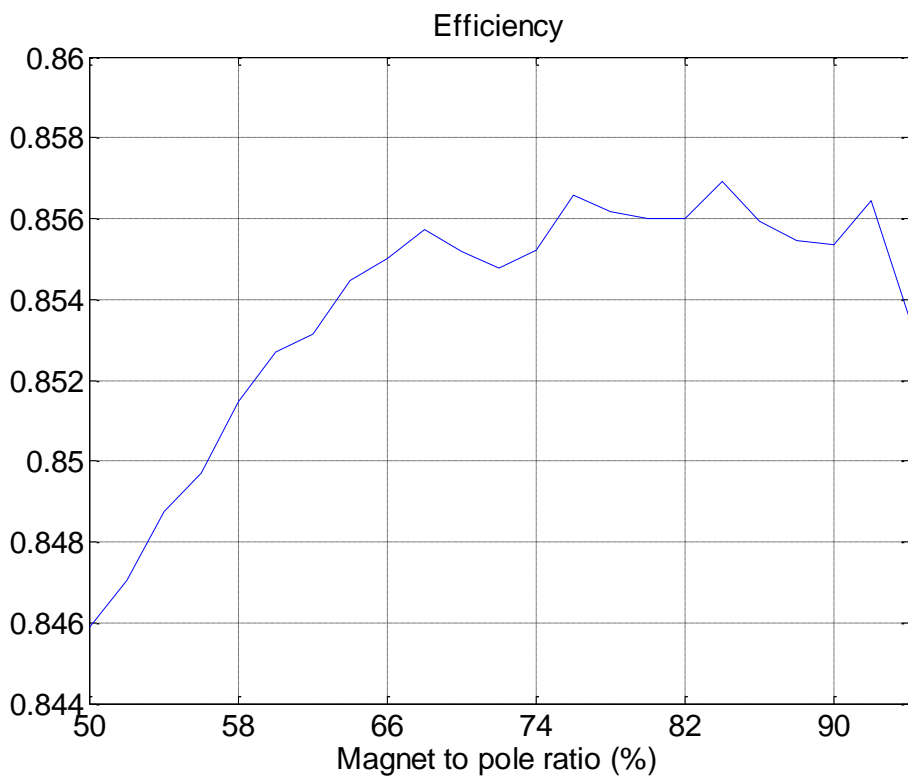


Σχήμα 3.106: Κατανομή μαγνητικού πεδίου για γεωμετρίες με ανισότητα δοντιού 0.5, 0.7 και 0.9.

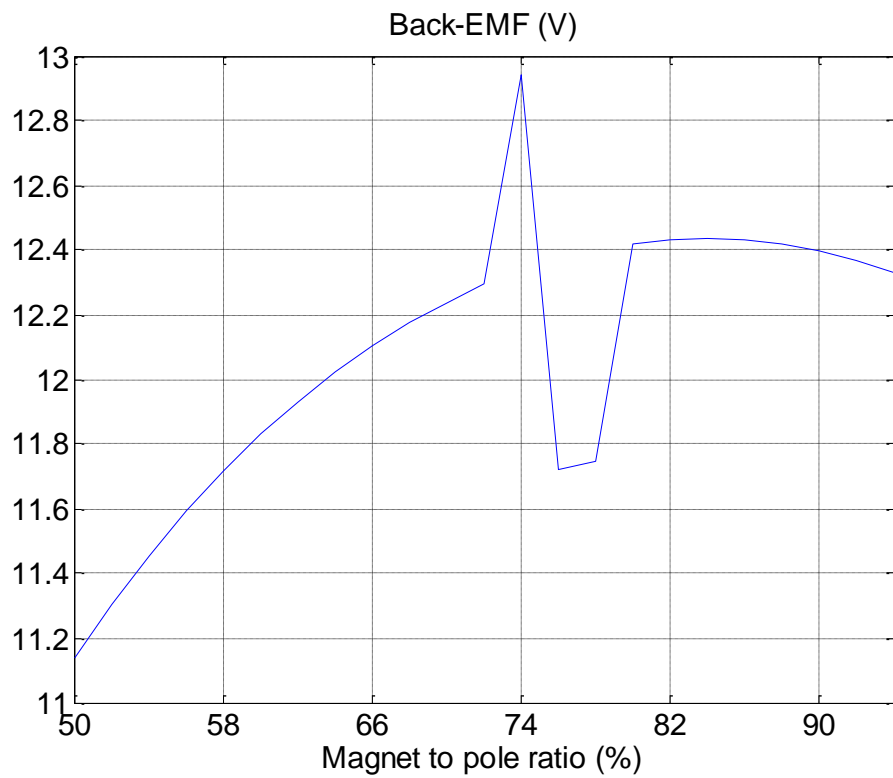
Έχοντας καταλήξει στον λόγο ανισότητας, θα τρέξουμε την ανάλυση ευαισθησίας στον μαγνήτη με ρεύμα $4 A/mm^2$, δηλαδή σε κατάσταση εκκινήσεως για να δούμε πως συμπεριφέρεται και σε αυτήν την περιοχή η διαμόρφωση μας.



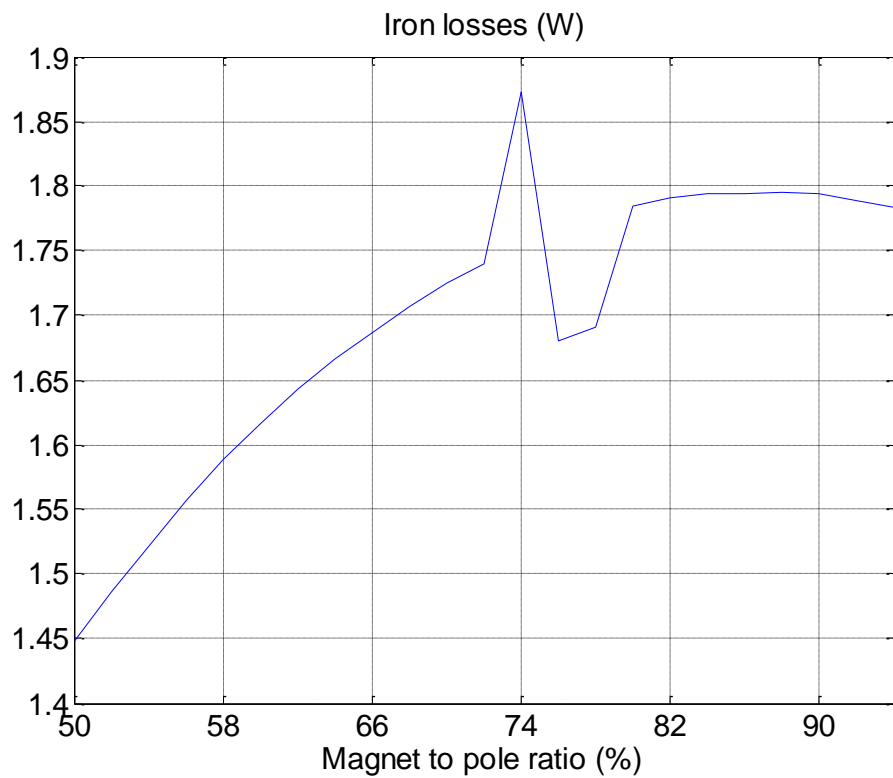
Σχήμα 3.107: Ανάλυση ευαισθησίας στην μέγιστη ροπή που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας.



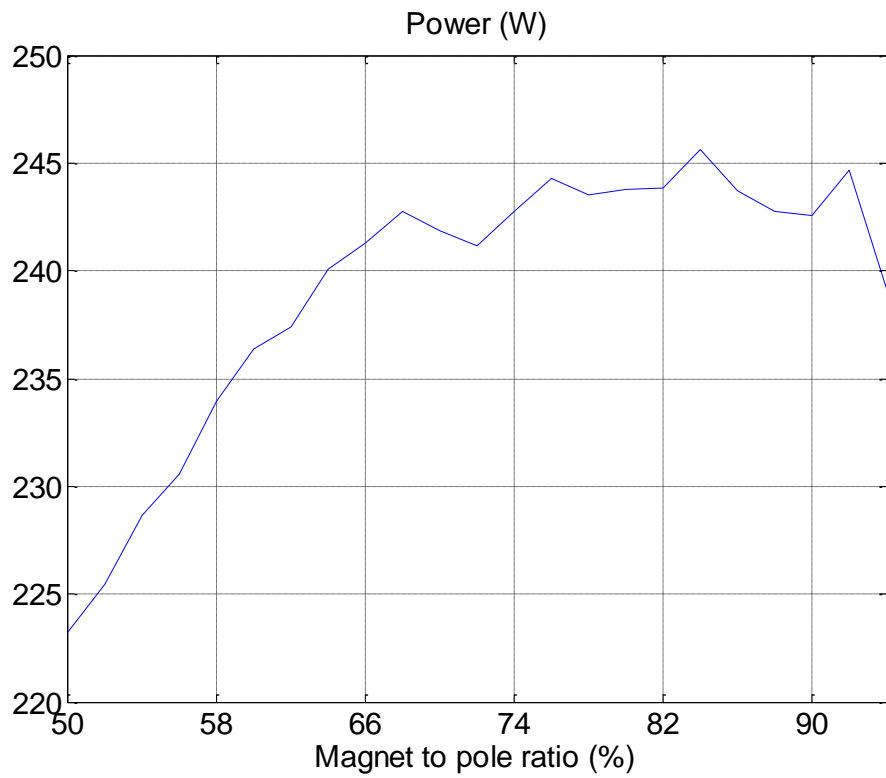
Σχήμα 3.108: Ανάλυση ευαισθησίας στην απόδοση που εμφανίζει ο κινητήρας.



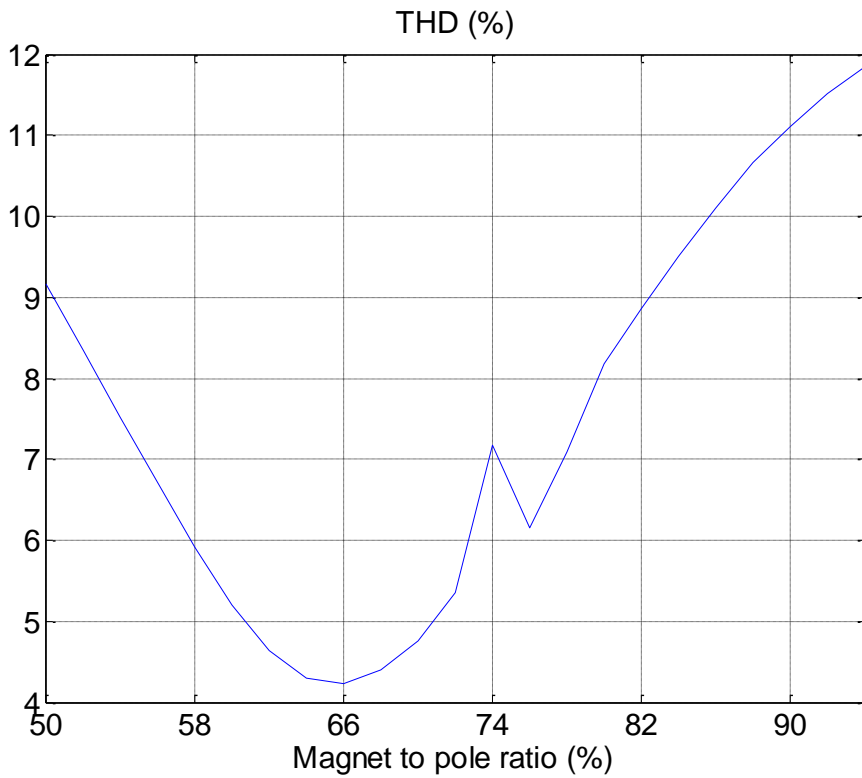
Σχήμα 3.109: Ανάλυση ευαισθησίας στο μέτρο της αντί-ΗΕΔ.



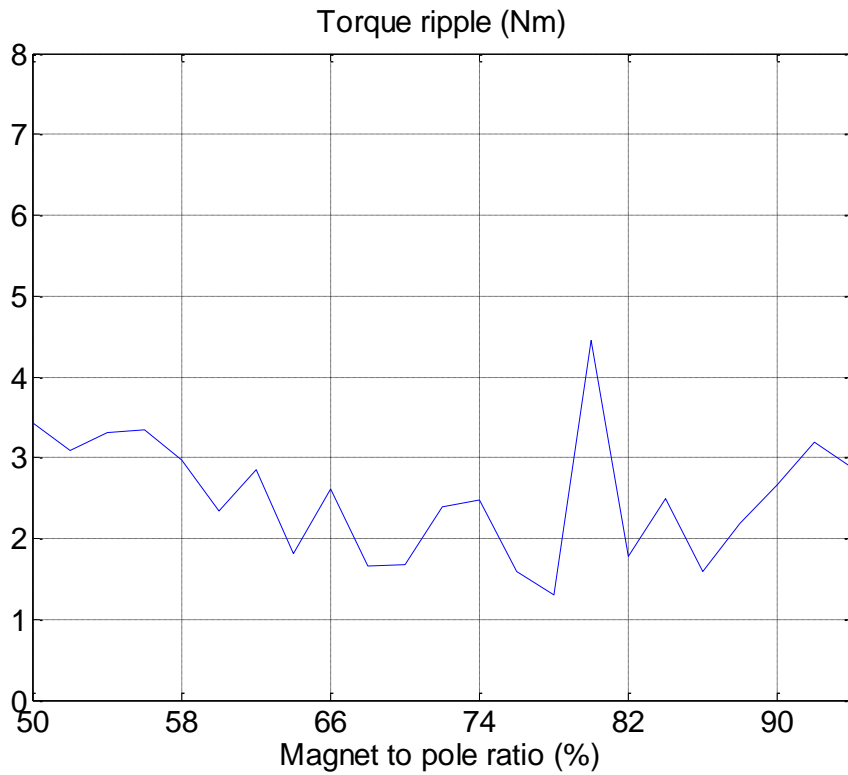
Σχήμα 3.110: Ανάλυση ευαισθησίας στις απώλειες πυρήνα του κινητήρα.



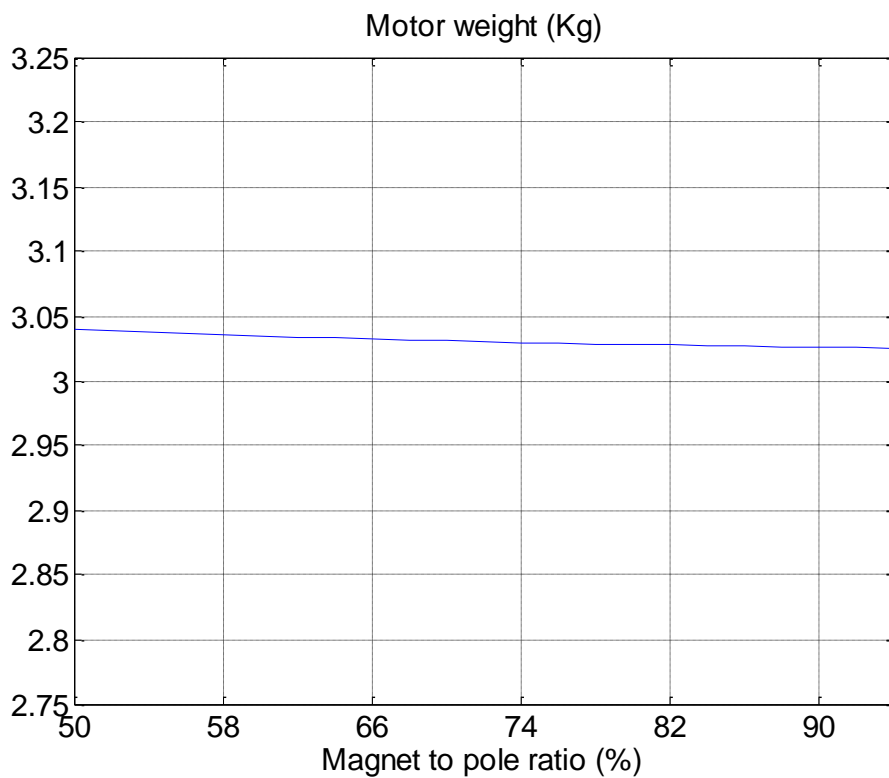
Σχήμα 3.111: Ανάλυση ευαισθησίας στην ισχύ που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας σε W .



Σχήμα 3.112: Ανάλυση ευαισθησίας στην αρμονική παραμόρφωση της τάσης του κινητήρα.



Σχήμα 3.113: Ανάλυση ευαισθησίας στην κυμάτωση ροπής του κινητήρα.

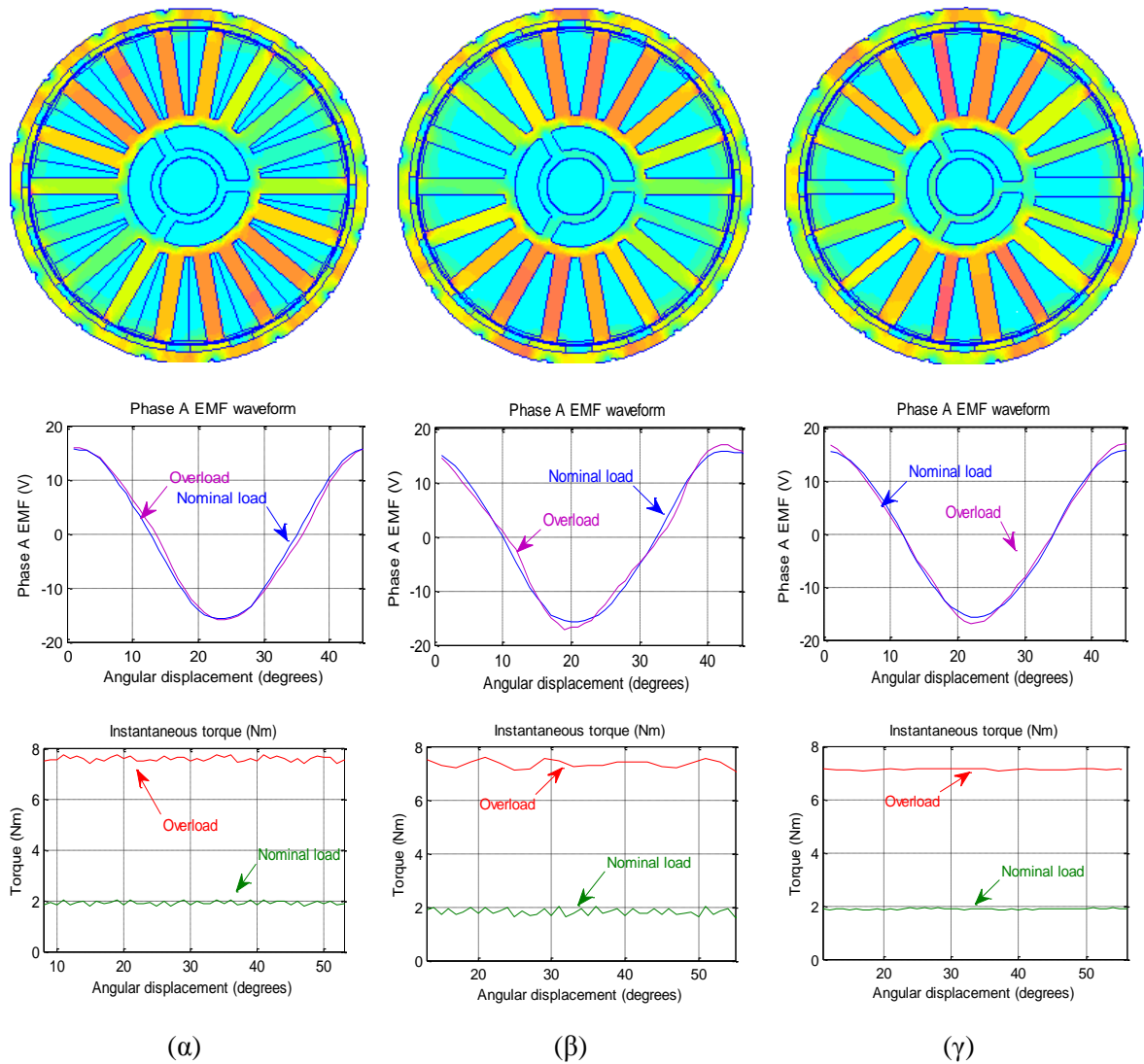


Σχήμα 3.114: Ανάλυση ευαισθησίας στο συνολικό βάρος του κινητήρα.

Σε κατάσταση εκκινήσεως, λοιπόν, βλέπουμε ότι η γεωμετρία άνισων δοντιών εμφανίζει πολύ χαμηλή αρμονική παραμόρφωση της τάσης και κυμάτωση ροπής. Θα επιλέξουμε για άλλη μία φορά το ποσοστό μαγνήτη που επιφέρει τις μικρότερες αρμονικές τάσης, δηλαδή 66%.

3.6 Επιλογή τελικής διαμόρφωσης

Μετά από την επιλογή όλων των οριστικών παραμέτρων των τριών σχεδιάσεων μπορούμε να περάσουμε και στην τελική τους σύγκριση. Στο *σχήμα 3.115*, στα αριστερά μπορούμε να δούμε την διαμόρφωση συγκεντρωμένου τυλίγματος διπλής στρώσης, στο κέντρο την διαμόρφωση συγκεντρωμένου τυλίγματος μονής στρώσης και στα δεξιά αυτή με την μονή στρώση και τα άνισα δόντια. Αρχικά παρουσιάζεται η κατανομή του πεδίου, ύστερα η κυματομορφή της αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης και τέλος η κυμάτωση ροπής. Οι κυματομορφές είναι υπολογισμένες τόσο για κατάσταση εκκινήσεως όσο και για την μόνιμη κατάσταση.



Σχήμα 3.115: Κατανομή του μαγνητικού πεδίου στην μόνιμη κατάσταση, κυματομορφές Αντί-ΗΕΔ για μόνιμη κατάσταση και κατάσταση εκκινήσεως, κυματομορφές κυμάτωσης ροπής για μόνιμη κατάσταση και κατάσταση εκκινήσεως για (α) μηχανή με συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης, (β) μηχανή με συγκεντρωμένο τύλιγμα μονής στρώσης, (γ) μηχανή με συγκεντρωμένο τύλιγμα μονής στρώσης και άνισα δόντια.

Παρατηρούμε ότι η γεωμετρία με άνισα δόντια είναι πολύ καλύτερη από τις άλλες δύο, τόσο σε επίπεδο αρμονικής παραμόρφωσης, όσο και σε επίπεδο κυμάτωσης ροπής. Παρακάτω μπορούμε να δούμε τον πίνακα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά και των τριών διαμορφώσεων προκειμένου να φανεί και με νούμερα η υπεροχή της τρίτης διαμόρφωσης.

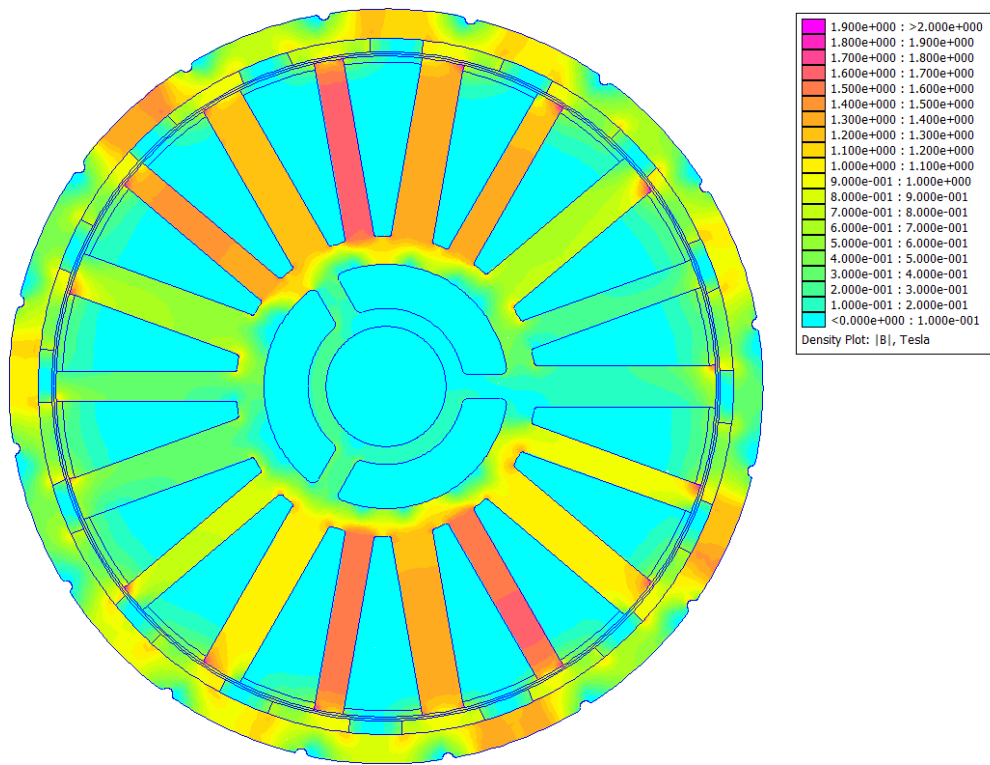
| Τύπος τυλίγματος | Μέγιστη ροπή (Nm) | Κυμάτωση ροπής (%) | Αντί-ΗΕΔ (V) | Αρμονική παρ/ση (%) | Απώλειες χαλκού (W) | Ρεύμα γραμμής (A) | Συνολικές απώλειες (W) | Συνολικό βάρος (kg) | Απόδοση (%) |
|-----------------------|-------------------|--------------------|--------------|---------------------|---------------------|-------------------|------------------------|---------------------|-------------|
| Διπλής στρώσης | 2.0 | 14.0 | 11.2 | 1.7 | 2.2 | 1.78 | 3.64 | 2.7 | 94.5 |
| | 7.6 | 4.3 | 11.2 | 4.0 | 34.8 | 28.55 | 36.3 | 2.7 | 86.8 |
| Μονής στρώσης | 2.0 | 21.0 | 11.3 | 2.8 | 2.5 | 1.76 | 3.96 | 2.8 | 94.0 |
| | 7.5 | 6.6 | 11.3 | 10.8 | 39.7 | 28.31 | 41.22 | 2.8 | 85.1 |
| Μ. Σ. με άνισα δόντια | 1.9 | 4.3 | 11.1 | 1.8 | 2.5 | 1.77 | 3.84 | 2.8 | 94.0 |
| | 7.2 | 1.3 | 10.9 | 5.6 | 38.6 | 28.50 | 40.01 | 2.8 | 84.9 |

Πίνακας 3.8: Τεχνικά χαρακτηριστικά ανά διαμόρφωση και σημείο λειτουργίας

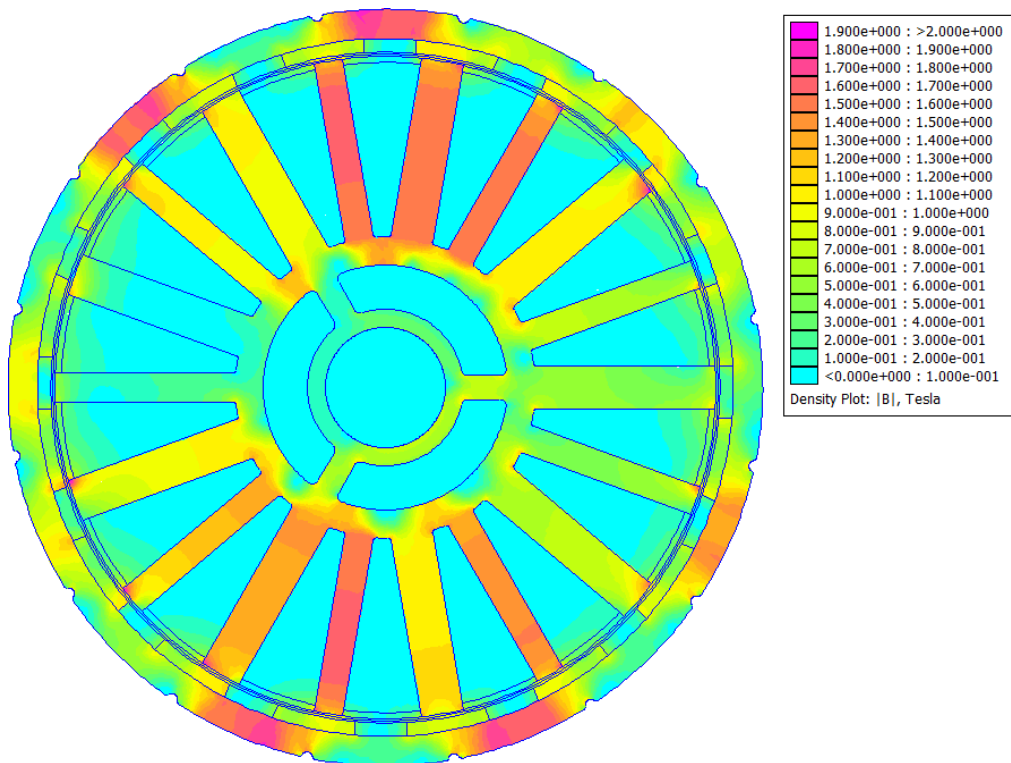
Σύμφωνα λοιπόν με τα δεδομένα αυτά, καταλήγουμε με σιγουριά στο συμπέρασμα ότι η ανισότητα στα δόντια διατηρεί ορισμένα από τα πλεονεκτήματα της μηχανής με διπλή στρώση και σε άλλα σημεία είναι καλύτερη από αυτήν. Όλα αυτά έχουν ιδιαίτερως σημασία κατά την φάση της κατασκευής, καθώς είναι αρκετά πιο δύσκολο να κατασκευαστεί η μηχανή διπλής στρώσης. Στο επόμενο κεφάλαιο θα δούμε την διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή και θα γίνει περισσότερο κατανοητό το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διαμόρφωσης στην κατασκευή. Πριν όμως περάσουμε στο επόμενο κεφάλαιο, ας δούμε τις ακριβείς διαστάσεις και όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανής που θα κατασκευαστεί στον πίνακα 3.9, καθώς και την κατανομή του μαγνητικού πεδίου στα σχήματα που ακολουθούν.

| Τεχνικά χαρακτηριστικά κινητήρα | | |
|--|------------------------------------|-----------------------|
| Αριθμός αυλακών | 18 | |
| Αριθμός πόλων | 16 | |
| Ενεργό μήκος | 35 mm | |
| Διάμετρος διακένου | 110 mm | |
| Πάχος μαγνήτη | 2,24 mm | |
| Ποσοστό γωνίας μαγνήτη επί πολικού βήματος | 60 % | |
| Γωνία μαγνήτη | 13,5° | |
| Πάχος διακένου | 0,7 mm | |
| Πλάτος κύριου δοντιού (τυλιγμένου) | 7 mm | |
| Πλάτος ενδιάμεσου δοντιού (μη τυλιγμένου) | 4,8 mm | |
| Αριθμός ελιγμάτων | 64 | |
| Διάμετρος καλωδίου | 1,4 mm | |
| Συντελεστής πληρότητας τυλίγματος | 0,43 | |
| Βάρος μηχανής | 2,8 kg | |
| | Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας | Εκκίνηση |
| Πυκνότητα ρεύματος | 1 A/mm ² | 4 A/mm ² |
| Μέγιστη ροπή | 1,90 Nm | 7,4 Nm |
| Κυμάτωση ροπής | 4,3 % | 1,3 % |
| Αρμονική Παραμόρφωση | 1,8 % | 5,6 % |
| Αντί-ΗΕΔ | 11,1 V _{rms} | 11,3 V _{rms} |
| Ρεύμα γραμμής | 1,77 A | 7,1 A |
| Απώλειες χαλκού | 2,45 A | 39,2 A |
| Απώλειες σιδήρου | 1,39 A | 1,5 A |

Πίνακας 3.9: Τεχνικά χαρακτηριστικά



Σχήμα 3.116: Κατανομή του πεδίου για τροφοδοσία με 1 A/mm^2

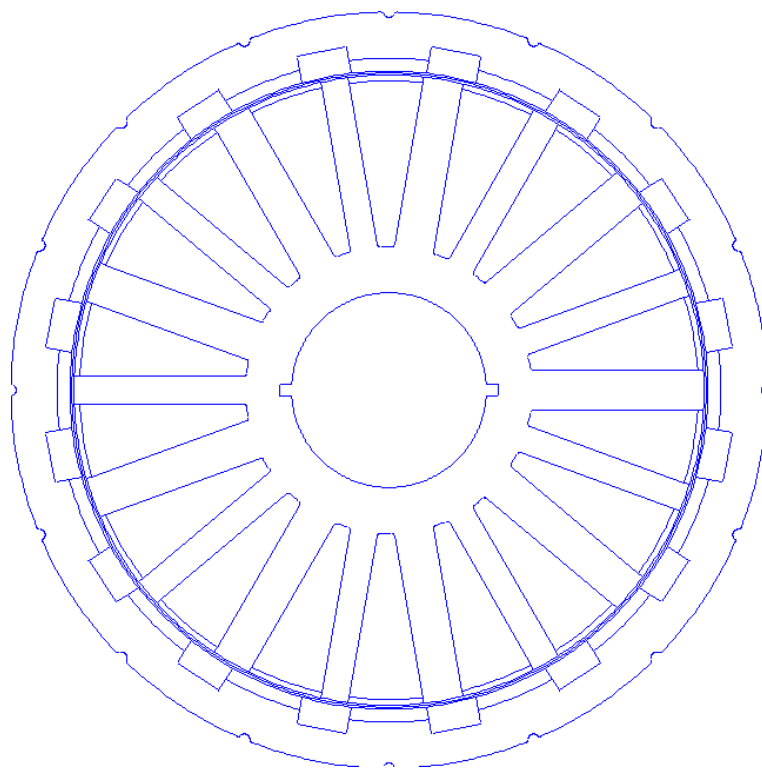


Σχήμα 3.117: Κατανομή του πεδίου για τροφοδοσία με 4 A/mm^2

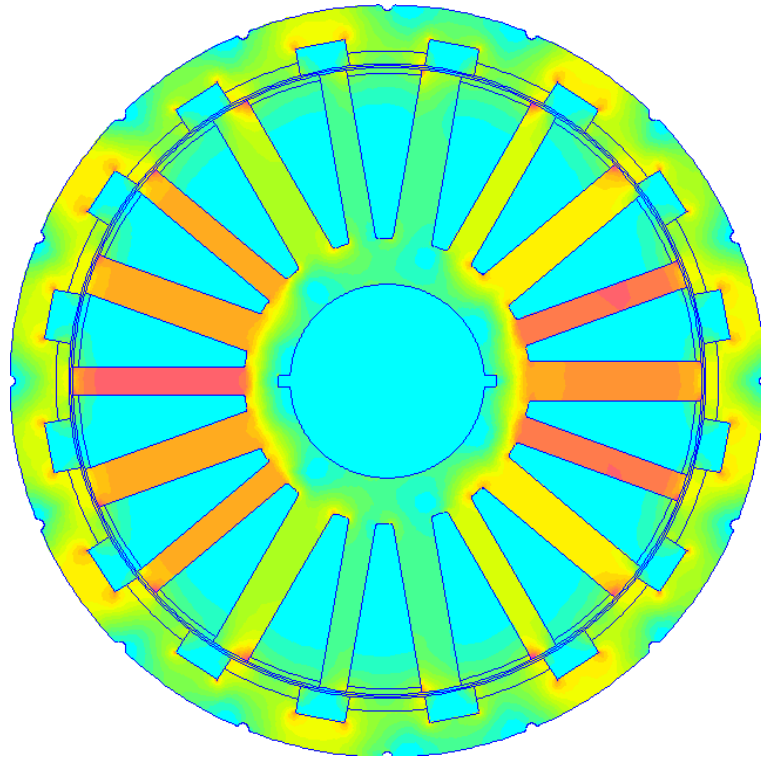
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Η συναρμολόγηση του κινητήρα έγινε εξ' ολοκλήρου στο εργαστήριο ηλεκτρικών μηχανών και ηλεκτρονικών ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αν και δεν έχει σημασία να γίνει αναφορά σε όλες τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες, θα γίνει μία παράθεση των σχεδίων που χρησιμοποιήθηκαν για την περάτωση της συναρμολόγησης.

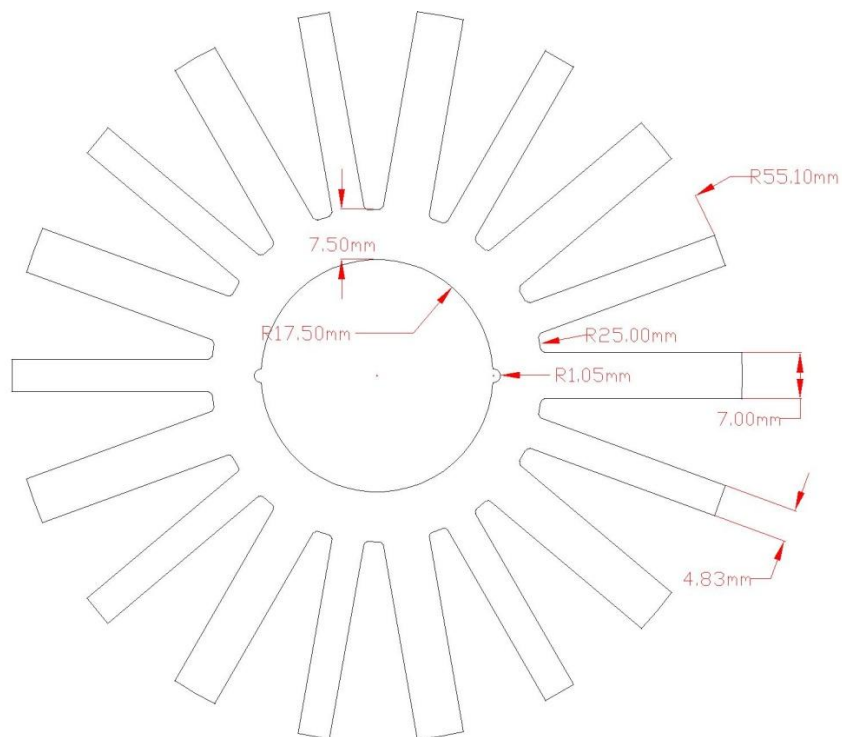
Αρχικά, λοιπόν, βλέπουμε στο *σχήμα 4.1* το τελικό σχέδιο του κινητήρα, μετά και τις επιπρόσθετες τροποποιήσεις για ευκολότερη κατασκευή, όπως αυτό εμφανίζεται στο Femm. Στο *σχήμα 4.2* ακολουθεί η κατανομή του μαγνητικού πεδίου και στην συνέχεια παρατίθενται τα κατασκευαστικά σχέδια που χρησιμοποιήθηκαν, ρεαλιστικές μοντελοποιήσεις των σχεδίων σε τρεις διαστάσεις καθώς και φωτογραφίες από τον ολοκληρωμένο κινητήρα.



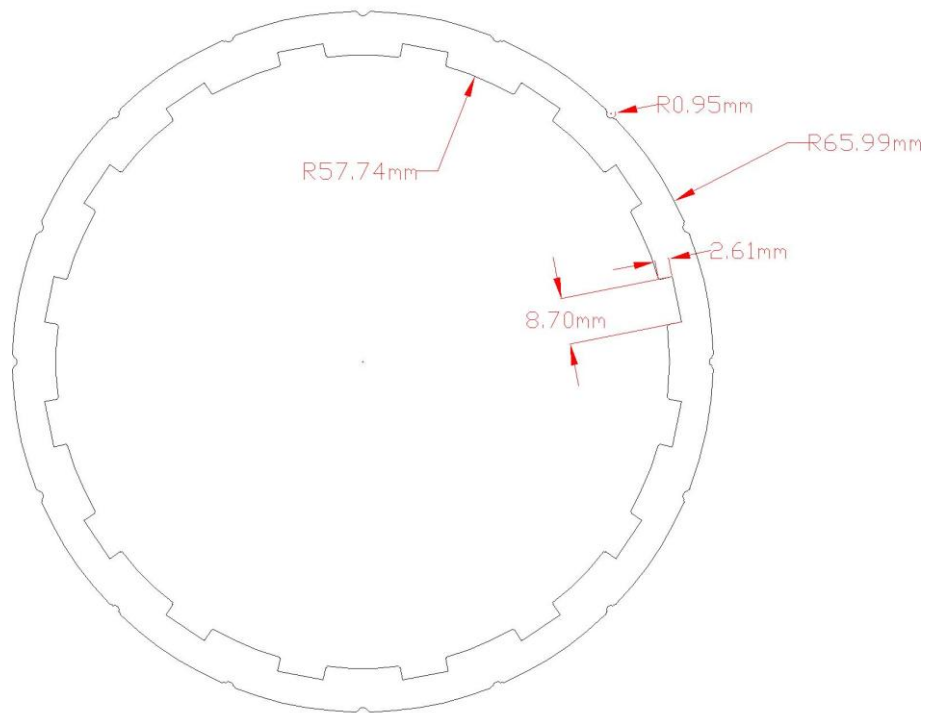
Σχήμα 4.1: Τελικό σχέδιο του κινητήρα που ενσωματώνει και τροποποιήσεις για την ευκολότερη συναρμολόγηση του κινητήρα.



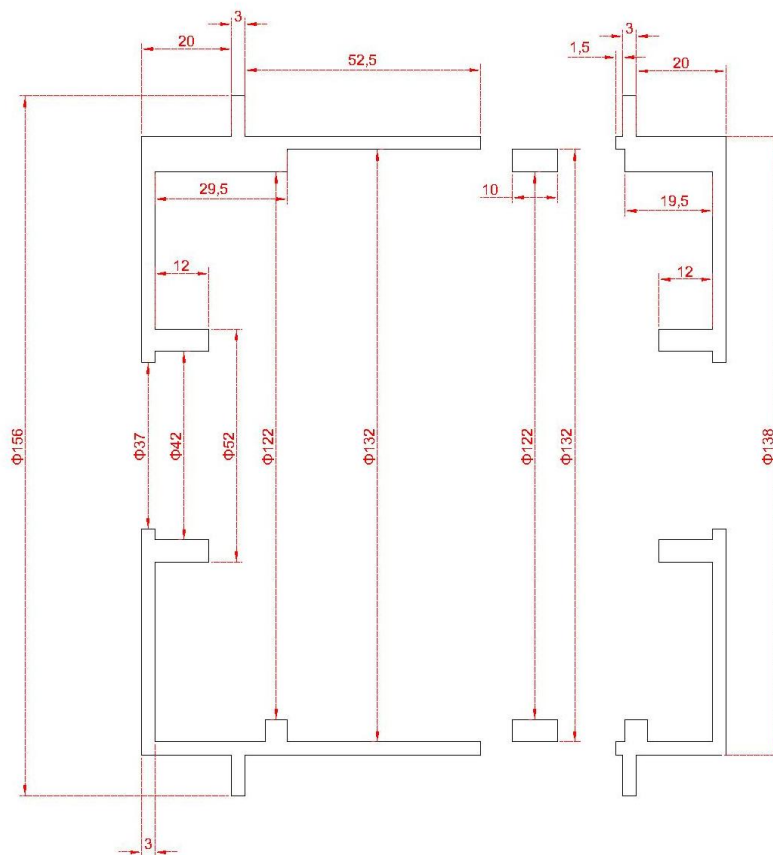
Σχήμα 4.2: Κατανομή των μαγνητικών πεδίων στο τελικό σχέδιο.



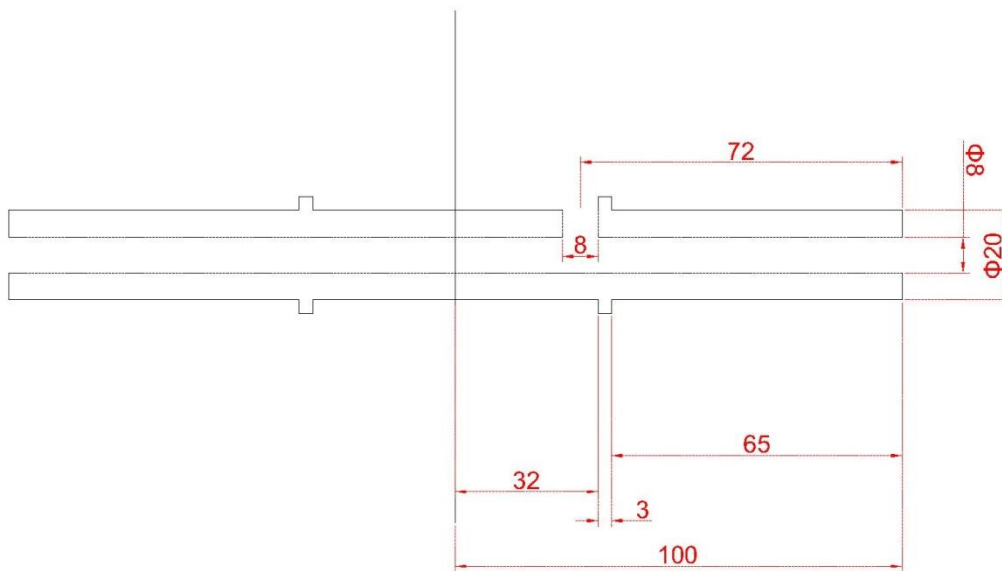
Σχήμα 4.3: Λεπτομερές σχέδιο με διαστάσεις για τις λαμαρίνες του στάτη.



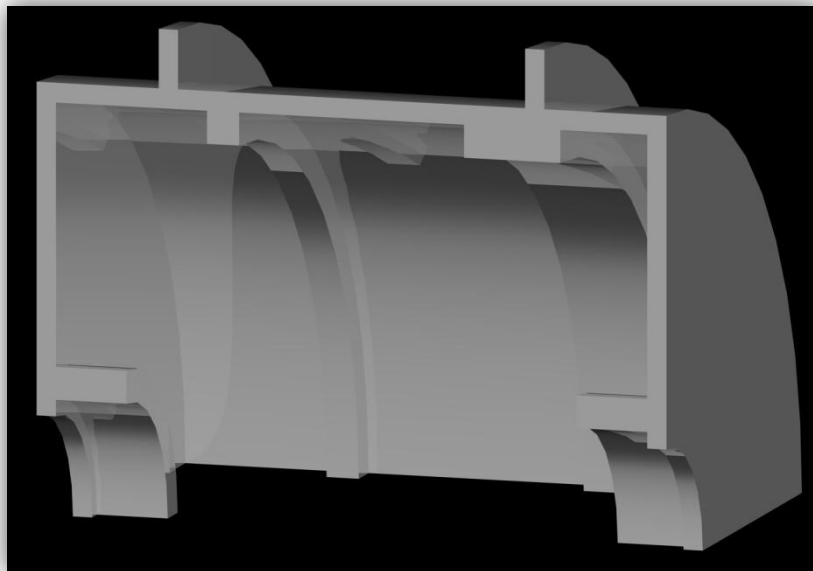
Σχήμα 4.4: Λεπτομερές σχέδιο με διαστάσεις για τις λαμαρίνες του δρομέα.



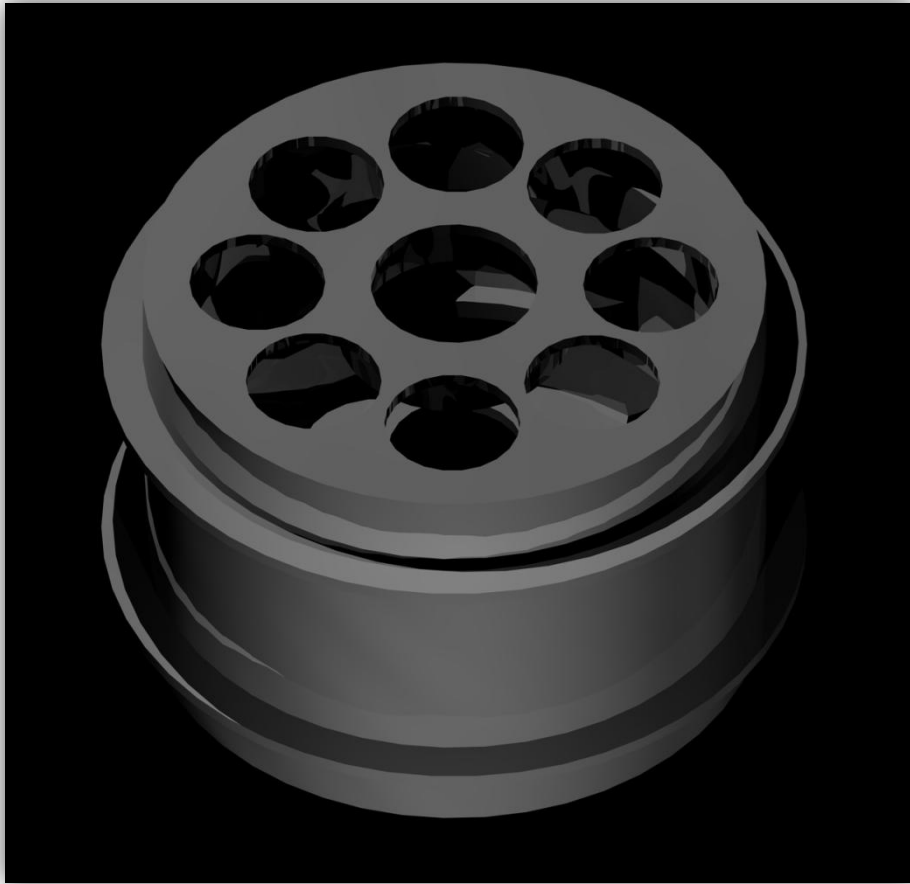
Σχήμα 4.5: Λεπτομερές σχέδιο με διαστάσεις για το κέλυφος.



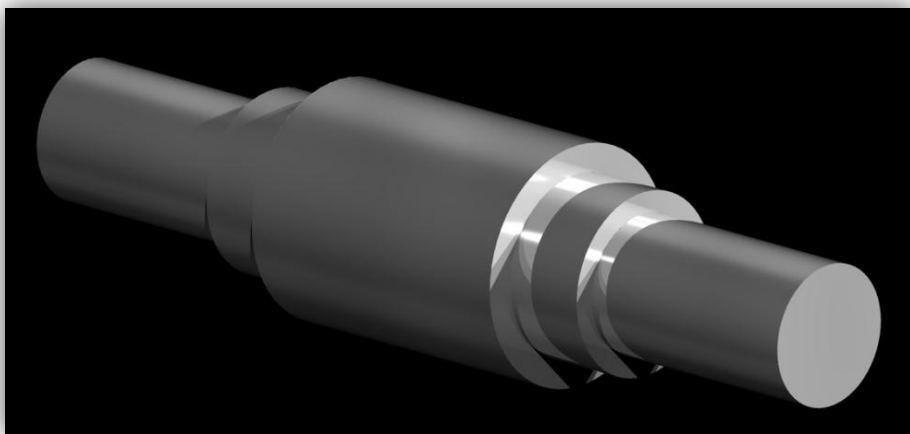
Σχήμα 4.6: Λεπτομερές σχέδιο με διαστάσεις για τον άξονα.



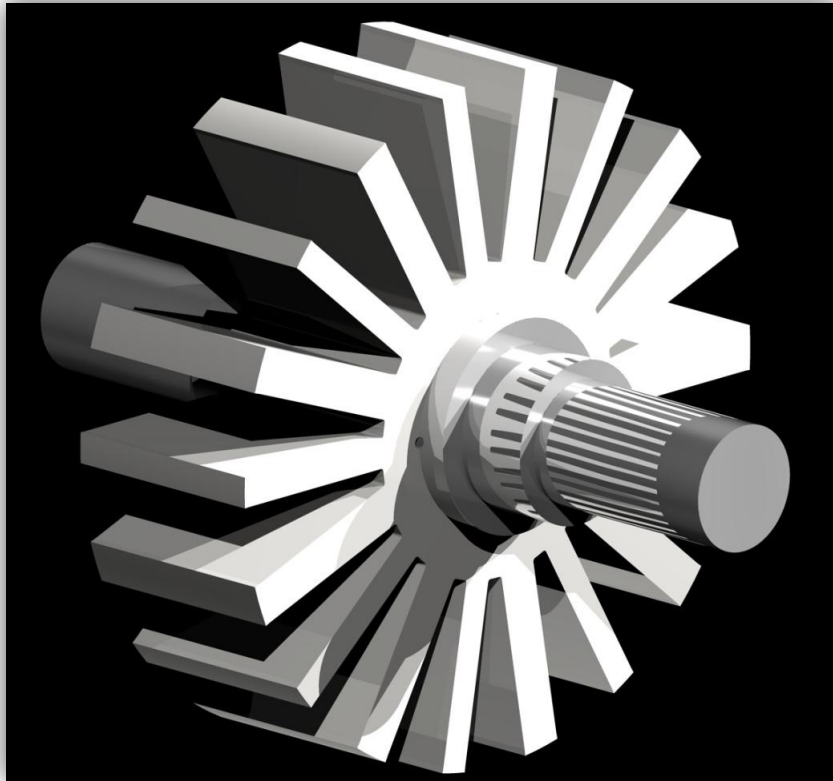
Σχήμα 4.7: Τομή τρισδιάστατου μοντέλου αλουμινένιου κελύφους.



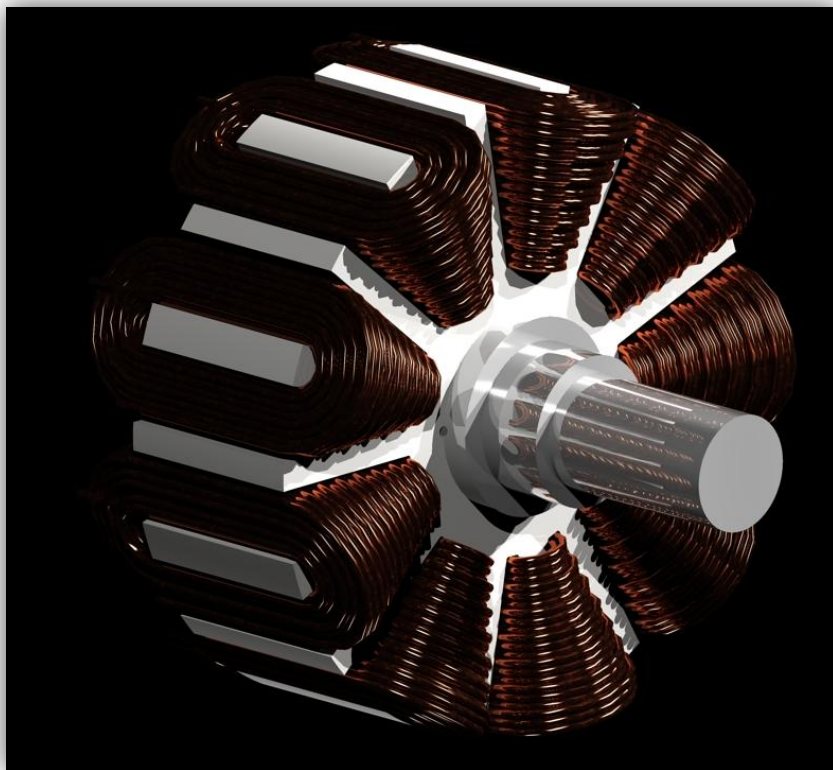
Σχήμα 4.8: Τρισδιάστατο μοντέλο αλουμινένιου κελύφους.



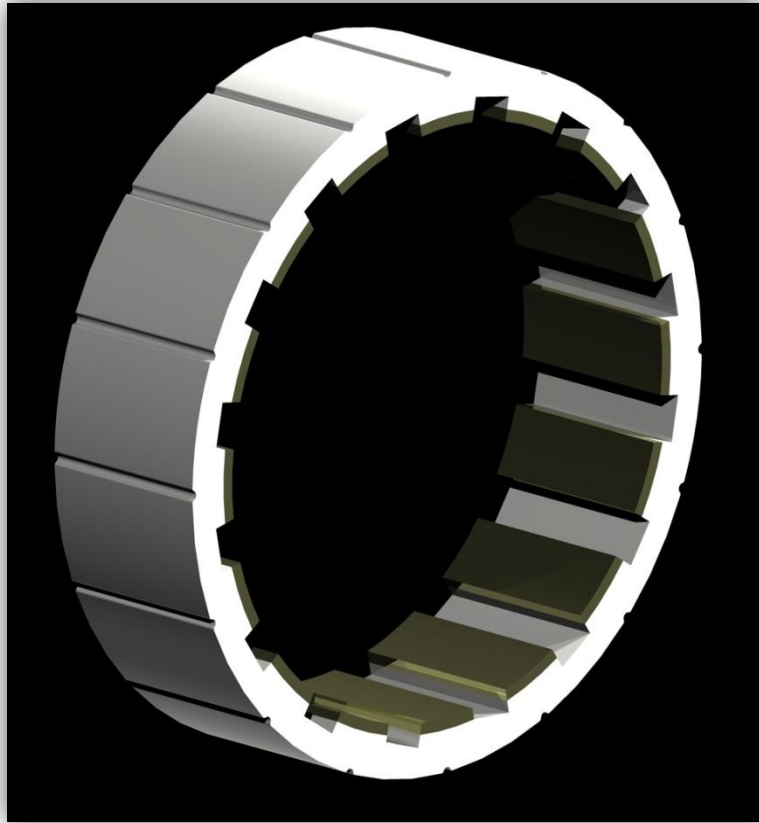
Σχήμα 4.9: Τρισδιάστατο μοντέλο αλουμινένιου άξονα.



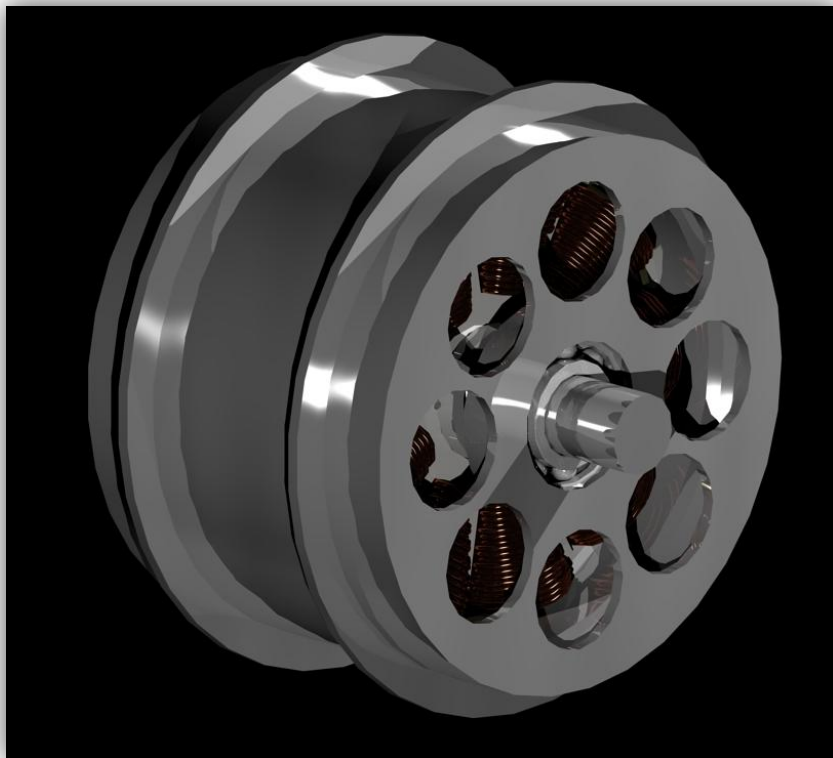
Σχήμα 4.10: Τρισδιάστατο μοντέλο λαμαρινών στάτη προσαρτημένων στον άξονα.



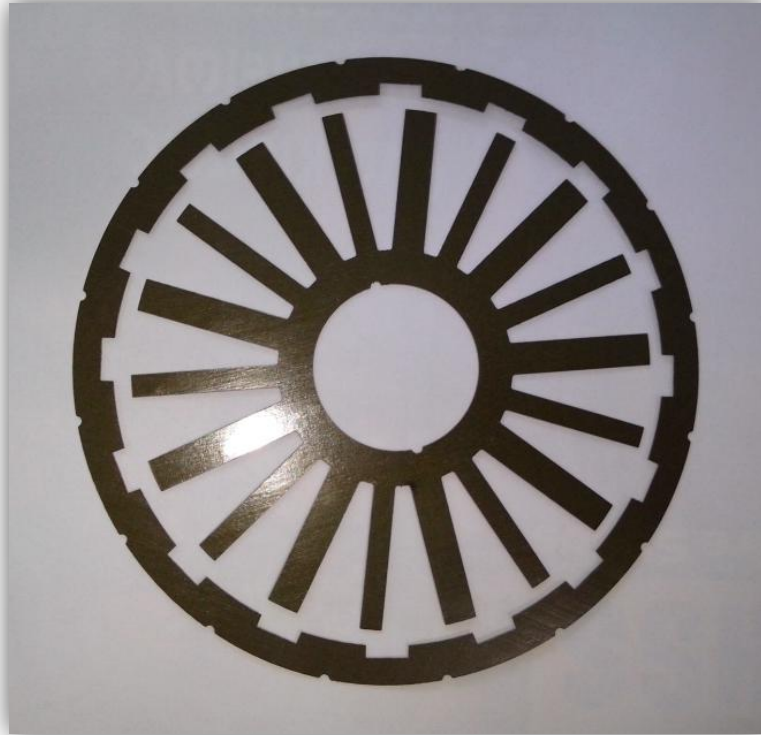
Σχήμα 4.11: Τρισδιάστατο μοντέλο στάτη.



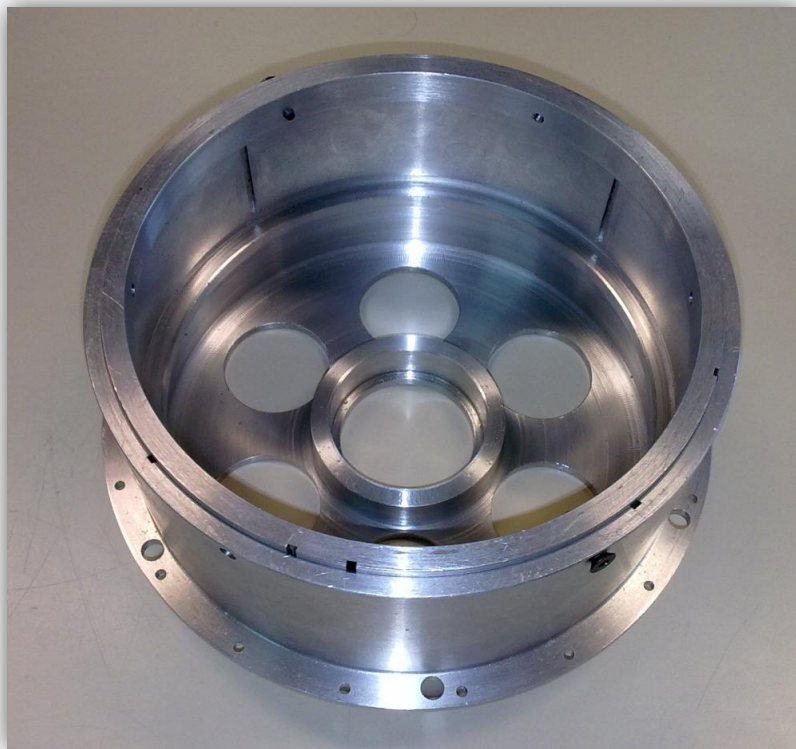
Σχήμα 4.12: Τρισδιάστατο μοντέλο λαμαρινών δρομέα μαζί με τους μαγνήτες.



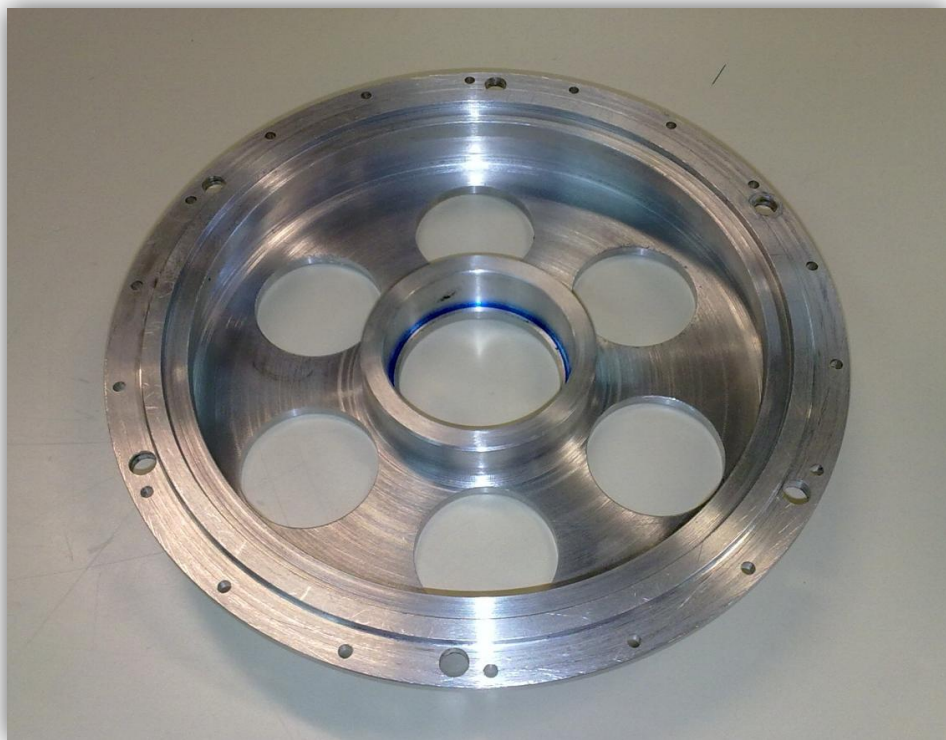
Σχήμα 4.13: Τρισδιάστατο μοντέλο κινητήρα.



Σχήμα 4.14: Λαμαρίνες στάτη και δρομέα όπως αυτές προέκυψαν μετά την κοπή από laser CNC.



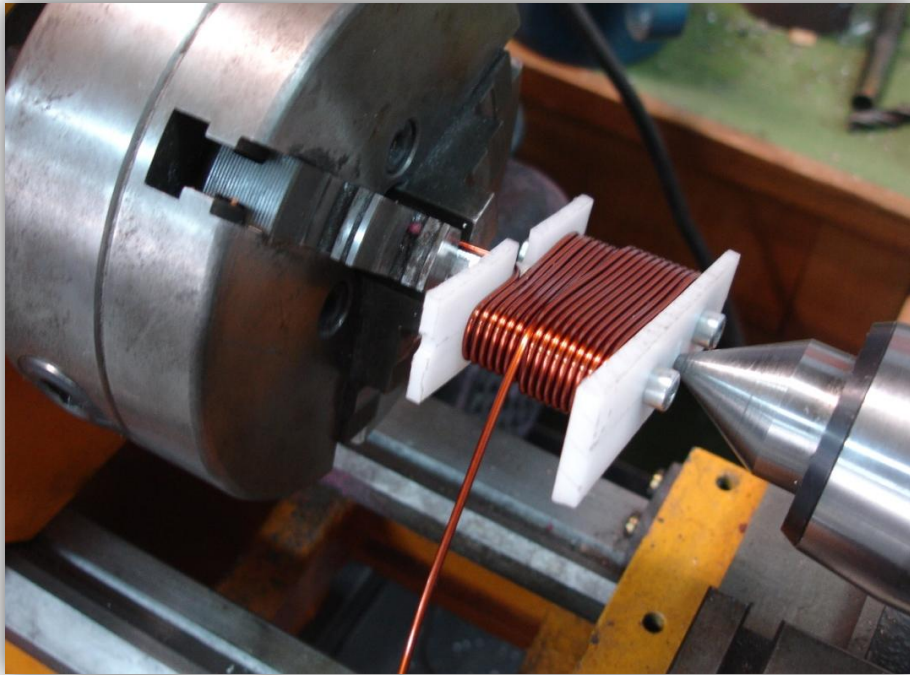
Σχήμα 4.15: Το αριστερό και μεσαίο κομμάτι του κελύφους.



Σχήμα 4.16: Το δεξιό κομμάτι του κελύφους.



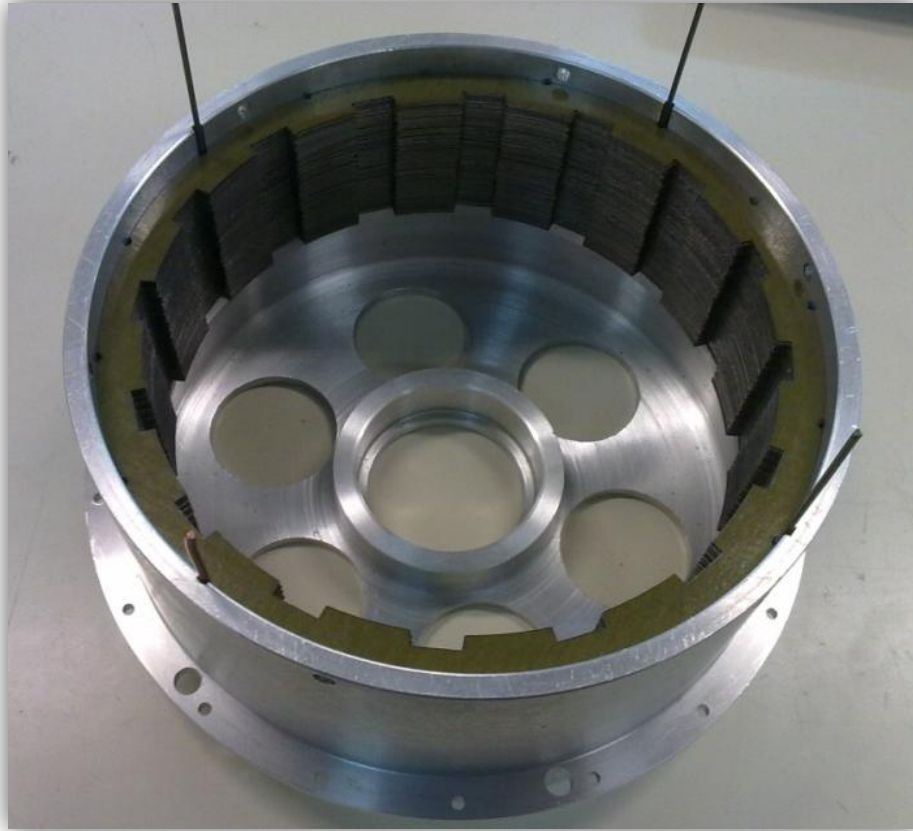
Σχήμα 4.17: Το κέλυφος συνολικά.



Σχήμα 4.18: Στιγμιότυπο από την συναρμολόγηση των πηνίων.



Σχήμα 4.19: Ο στάτης πλήρως συναρμολογημένος.



Σχήμα 4.20: Στιγμιότυπο από την συναρμολόγηση του δρομέα.



Σχήμα 4.21: Ο κινητήρας ολοκληρωμένος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την διερεύνηση των βέλτιστων συνιστωσών του κινητήρα που κατασκευάστηκε, δεν εξήχθησαν μόνο πολύτιμες γνώσεις για τις γεωμετρίες και τις διαμορφώσεις που εξετάστηκαν, αλλά και για τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να γίνεται αποτελεσματικά μία διαδικασία βελτιστοποίησης. Τα κυριότερα από τα συμπεράσματα απαριθμούνται παρακάτω.

5.1 Κυριότερα συμπεράσματα

Τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας απαριθμούνται παρακάτω:

1. Μετά από την κατάστρωση της πολιτικής εξοικονόμησης ενέργειας που έγινε στην παράγραφο 3.1.1, βρέθηκε ότι ο κινητήρας έπρεπε να συνδυάζει υψηλή απόδοση στην μόνιμη κατάσταση (σταθερής ταχύτητας) με ικανότητα παροχής υψηλής ισχύος κατά την διαδικασία της επιτάχυνσης που διαρκεί ελάχιστα στον αγώνα. Έτσι, διαπιστώθηκε η αναγκαιότητα της βελτιστοποίησης κυρίως στο σημείο λειτουργίας της μόνιμης κατάστασης.
2. Διαπιστώθηκε η αναγκαιότητα του ακριβούς υπολογισμού του συντελεστή πληρότητας της αύλακας κατά την διαδικασία της βελτιστοποίησης, γιατί αποδείχθηκε ότι μεταβάλλεται γρήγορα εάν η αύλακα τείνει να αποκτήσει τριγωνικό σχήμα και ως εκ τούτου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στα λειτουργικά χαρακτηριστικά του κινητήρα.
3. Παρατηρήθηκε ότι οι διαμορφώσεις με αριθμό αυλακών 9 και 15 πάσχουν από ασύμμετρη μαγνητική έλξη. Από αυτό το πρόβλημα δείχνουν να είναι απαλλαγμένες οι διαμορφώσεις με αριθμό αυλακών 12 και 18.
4. Κατά την προσομοίωση διαμορφώσεων διαφόρων συνδυασμών αυλακών/πόλων με συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης έγινε αντιληπτό ότι όσο ανεβαίνει ο αριθμός αυλακών και πόλων τόσο:
 - Μειώνεται ο συντελεστής πληρότητας
 - Αυξάνεται η ονομαστική ροπή
 - Μειώνεται η κυμάτωση ροπής
 - Αυξάνεται η Αντί-ΗΕΔ
 - Μειώνεται η αρμονική παραμόρφωση της τάσης
 - Αυξάνεται η απόδοση
 - Μειώνεται το βάρος

5. Κατά την προσομοίωση των διαμορφώσεων 12/10, 12/14 και 18/16 με τύλιγματα μονής και διπλής στρώσης, καθώς και με γεωμετρία άνισων δοντιών διαπιστώθηκαν τα παρακάτω:
- Με το τύλιγμα μονής στρώσης αυξάνεται θεαματικά ο συντελεστής πληρότητας. Με χρήση άνισων δοντιών αυξάνεται περαιτέρω.
 - Η γεωμετρία άνισων δοντιών εμφανίζει υψηλότερη ονομαστική ροπή, Αντί-HEΔ και αρμονική παραμόρφωση της τάσης από αυτήν των ίσων δοντιών και την διαμόρφωση με τύλιγμα διπλής στρώσης.
 - Η κυμάτωση ροπής και η αρμονική παραμόρφωση της τάσης ελαχιστοποιείται ενώ η αντί-HEΔ μεγιστοποιείται στην διαμόρφωση 18/16.
 - Η απόδοση εμφανίζει την μεγαλύτερη τιμή της και το βάρος την μικρότερη στην 18/16, αλλά η γεωμετρία άνισων δοντιών υπολείπεται των άλλων δύο σε αυτά τα δύο σημεία.
6. Από την πρώτη ανάλυση ευαισθησίας που έγινε στην 18/16 με τύλιγμα διπλής στρώσης, κατά την οποία μεταβάλλαμε την γωνία του μαγνήτη και το πάχος του, διαπιστώσαμε τα εξής:
- Η μέγιστη αποδιδόμενη ροπή του κινητήρα δεν έδειξε να επηρεάζεται πολύ από την μεταβολή των υπό εξέταση συνιστωσών.
 - Η Αντί-HEΔ εμφάνισε μεγάλες μεταβολές και μας υποχρέωσε να κινηθούμε σε συγκεκριμένες τιμές διάστασης των μαγνητών για να παραμείνουμε στα 11V.
 - Η κυμάτωση ροπής είναι ένας παράγοντας αρκετά αστάθμητος, καθώς επηρεάζεται πολύ έντονα από τις παραμικρές αλλαγές στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα και δεν μπορεί να περιοριστεί ακολουθώντας κάποια συγκεκριμένη στρατηγική.
 - Οι απώλειες πυρήνα αυξάνονται δραματικά με την αύξηση του πάχους των μαγνητών.
 - Η αρμονική παραμόρφωση της τάσης και το βάρος επηρεάζεται πολύ έντονα και από τις δύο μεταβλητές διάστασης των μαγνητών.
7. Από την δεύτερη ανάλυση ευαισθησίας που έγινε διαπιστώθηκε ότι δεν έχει ιδιαίτερο νόημα στην εφαρμογή μας η βελτιστοποίηση σε δύο σημεία λειτουργίας.

8. Κατά την ανάλυση ευαισθησίας του ποσοστού του μαγνήτη επί πολικού βήματος της διαμόρφωσης με συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης, έγινε γνωστό ότι η αρμονική παραμόρφωση της τάσης ακολουθεί μία ημιτονοειδή μεταβολή ως προς το ποσοστό του μαγνήτη. Έτσι μπορούμε να γνωρίζουμε ότι αν παρατηρηθεί μία μικρή απόκλιση κατά την κατασκευή των μαγνητών, αυτή δεν θα επηρεάσει σε δυσανάλογο βαθμό αυτό το σημαντικό μέγεθος του ηλεκτρικού κινητήρα.
9. Η διαμόρφωση με συγκεντρωμένο τύλιγμα μονής στρώσης είναι πρακτικά αδύνατο να βελτιστοποιηθεί με τέτοιο τρόπο που να πλησιάσει τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της διαμόρφωσης με τύλιγμα διπλής στρώσης.
10. Με την γεωμετρία άνισων δοντιών μπορούμε να έχουμε μία ελάφρυνση του βάρους της τάξεως του 10% χωρίς να επηρεάζονται στο ελάχιστο όλα τα μεγέθη που μετρούνται θεωρητικά στην παρούσα εργασία.
11. Το σημαντικότερο συμπέρασμα της εργασίας, όμως, εξάγεται από την τελική σύγκριση των τριών διαμορφώσεων. Βλέπουμε ότι η ανισότητα στα δόντια καθιστά την διαμόρφωση αυτή εφάμιλλη ή και καλύτερη από αυτή με το τύλιγμα διπλής στρώσης. Η πρώτη, ωστόσο, είναι ασυγκρίτως ευκολότερη στην συναρμολόγηση. Έτσι, μπορούμε να συναρμολογήσουμε εύκολα έναν κινητήρα χωρίς να κάνουμε καμία έκπτωση στα χαρακτηριστικά του.

5.2 Σημεία επιστημονικής συνεισφοράς

Η εργασία αυτή πρωτοτυπεί στα παρακάτω σημεία:

1. Επιχειρείται ο ακριβής υπολογισμός της επίδοσης που θα πρέπει να χαρακτηρίζει τον κινητήρα αναλύοντας τις δυνάμεις που επιδρούν στο όχημα. Γίνεται ο διαχωρισμός αυτής σε δύο κατηγορίες (κατάσταση εκκινήσεως και μόνιμης ταχύτητας) και μεγιστοποιείται η απόδοση στην μόνιμη κατάσταση, διατηρώντας ποιοτικά χαρακτηριστικά στην κατάσταση εκκινήσεως.
2. Υπολογίζεται με ακρίβεια ο συντελεστής πληρότητας που θεωρητικά μπορεί να επιτευχθεί κατά την συναρμολόγηση ενός κινητήρα. Έτσι, γίνεται μία ρεαλιστικότερη σύζευξη της θεωρητικής σχεδίασης με την κατασκευή.
3. Δοκιμάζεται μεταξύ άλλων και η κάπως άγνωστη, μέχρι τώρα, γεωμετρία των άνισων δοντιών στάτη και συγκρίνεται πρακτικά με γεωμετρίες που έχουν αποδείξει την αξία τους.
4. Οι αναλύσεις ευαισθησίας γίνονται υπολογίζοντας την συντριπτική πλειοψηφία των

θεωρητικά μετρήσιμων μεγεθών σε έναν ηλεκτροκινητήρα. Έτσι η βελτιστοποίηση των κινητήρων γίνεται σε όλα τα επίπεδα.

5. Αναπτύσσεται μία μέθοδος που καταλήγει μετά από συγκεκριμένα βήματα σε μία βέλτιστη γεωμετρία και διαμόρφωση χωρίς την ύπαρξη παραδοχών και θεωρητικών υποθέσεων.
6. Η σύγκριση των τελικών γεωμετριών γίνεται αφότου αυτές έχουν πλήρως βελτιστοποιηθεί στα σημεία που επιθυμούμε, έτσι αποκλείεται η πιθανότητα να συμβεί σύγκριση μεταξύ ανόμοιων κινητήρων.
7. Η επιλογή του βέλτιστου κινητήρα δεν γίνεται μόνο βάσει θεωρητικών μεγεθών, αλλά συνυπολογίζονται και παράγοντες όπως π.χ. η πολυπλοκότητα της κατασκευής.

5.3 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση

Παρότι καταβλήθηκε προσπάθεια να σχεδιαστεί και κατασκευαστεί ο κινητήρας σε ένα δεδομένο σύντομο χρονικό διάστημα, δεν υπήρξε η δυνατότητα πειραματικής επιβεβαίωσης των χαρακτηριστικών του. Συνεπώς αυτό είναι και το πιο σημαντικό θέμα που πρέπει να διερευνηθεί αυτήν την στιγμή. Να μελετηθεί πειραματικά ο κινητήρας ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσον η θεωρητική σχεδίαση συμβαδίζει με την πρακτική. Αν όχι, να ευρεθεί σε ποια σημεία χρειάζεται βελτίωση η θεωρητική σχεδίαση ώστε να γίνει ακριβέστερη. Ένας λόγος επιπλέον για τον οποίο χρειάζεται η πειραματική επιβεβαίωση, είναι για να διαπιστωθεί και στην πράξη ότι η γεωμετρία άνισων δοντιών μπορεί να προσφέρει τα πλεονεκτήματα που υπόσχεται και δεν κρύβει κατασκευαστικές παγίδες.

Βιβλιογραφία

[1] C.C. Chan, K.T. Chau, *Modern electric vehicle technology*, University of Hong Kong, Oxford University Press.

[2] Sandeep Dhameja, *Electric Vehicle Battery Systems*, Boston, 2001, Newnes.

[3] Husain, Iqbal, *Electric and hybrid vehicles: design fundamentals*, New York, 2003, CRC Press.

[4] Florence Meier, *Permanent Magnet Synchronous Machines with Non-Overlapping Concentrated Windings for Low-Speed Direct-Drive Applications*, Royal Institute of Technology, School of Electrical Engineering, Electrical Machines and Power Electronics, 2008

[5] Ηλεκτρεγερτική δύναμη, http://el.wikipedia.org/wiki/Ηλεκτρεγερτική_δύναμη

[6] Κωνσταντίνος Λάσκαρης, *Σχεδιασμός και κατασκευή κινητήρων μονίμων μαγνητών για ηλεκτρικά οχήματα*, Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, 2011, ΕΜΠ.

[7] Lester Chong, Rukmi Dutta, *Parameter Analysis of an IPM Machine with Fractional-slot Concentrated Windings, Part I: Open-circuit Analysis*, 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference, Paper P-268

[8] [1] D. Ishak, Z.Q. Zhu and D. Howe, “*Permanent magnet brushless machines with unequal tooth widths and similar slot and pole numbers*,” IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 41, no.2, pp. 584-590, March/April 2005.

[9] Rafal Wrobel, Phil H. Mellor, Neville McNeill, and Dave A. Staton, *Thermal Performance of an Open-Slot Modular-Wound Machine With External Rotor*, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 25, NO. 2, JUNE 2010.

[10] Ευφροσύνη Θεοδώρου, *Σχεδίαση και πειραματική επιβεβαίωση κινητήρα μονίμων μαγνητών για εφαρμογή ηλεκτροκίνησης*, Διπλωματική εργασία, Αθήνα, 2011, ΕΜΠ.

[11] Άρης-Διονύσιος Πιτταράς, *Σχεδιασμός και μελέτη ηλεκτρογεννήτριας συνδεδεμένης στο αζονικό σύστημα πλοίου*, Διπλωματική εργασία, Αθήνα, 2012, ΕΜΠ

[12] Αναστάσιος Βήχος, *Σχεδίαση και βελτιστοποίηση κινητήρα μονίμων μαγνητών για εφαρμογή ηλεκτροκίνησης*, Διπλωματική εργασία, Αθήνα, 2009, ΕΜΠ.

[13] Άγγελος Χριστοφή, *Σχεδίαση και βελτιστοποίηση δρομέα ηλεκτρικής μηχανής επαγωγής ισχύος 2 HP*, Διπλωματική εργασία, Αθήνα, 2010, ΕΜΠ.

[14] K. Laskaris and A. Kladas, "High Torque Internal Permanent Magnet Motor for Electric Traction Applications", *Proceedings of the XVIII International Conference on Electrical Machines*, Vilamoura, Portugal, 6-9 September 2008, Paper ID 1428.

[15] K. Laskaris, E. Theodorou, V. Papanikolaou and A. Kladas, "High Efficiency Permanent Magnet Wheel Motor Design for Light Electric Vehicle Applications," *Materials Science Forum*, 721, 313, pp. 313-318, June, 2012.

[16] Laskaris, K.I., Kladas, A.G., "Internal Permanent Magnet Motor Design for Electric Vehicle Drive," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.57, no.1, pp.138,145, Jan. 2010.

[17] N. Bernard, F. Martin, and M. El-Hadi Zaim, "Design Methodology of a Permanent Magnet Synchronous Machine for a Screwdriver Application", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 27, no. 3, pp. 624-633, September 2012.

[18] Evangelos M. Tsampouris, Minos E. Beniakar, and Antonios G. Kladas, "Geometry Optimization of PMSMs Comparing Full and Fractional Pitch Winding Configurations for Aerospace Actuation Applications," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 2, pp. 943-946, February 2012.

[19] Minos E. Beniakar, Athanasios G. Sarigiannidis, Evangelos M. Tsampouris, and Antonios G. Kladas, "Multi-objective Evolutionary Optimization of a Surface Mounted PM Actuator with Fractional Slot Winding for Aerospace Applications", *Compumag 2013*, Budapest, June 2013.