



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

**Σχεδίαση κινητηρίου συστήματος για πρότυπο ηλεκτρικό  
όχημα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηλίας Α. Καραφυλλάκης

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2015





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

**Σχεδίαση κινητηρίου συστήματος για πρότυπο ηλεκτρικό  
όχημα.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηλίας Α. Καραφυλλάκης

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την <sup>η</sup> Οκτωβρίου 2015.

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

.....  
Στέφανος Μανιάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

.....

Ηλίας Α. Καραφυλλάκης

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

Copyright © Ηλίας Α. Καραφυλλάκης, 2015

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 μικρού οχήματος χρησιμοποιώντας ως κύρια κριτήρια βελτιστοποίησης τη μείωση των απωλειών του βάρους και του όγκου. Το όχημα για το οποίο σχεδιάζεται ο κινητήρας προορίζεται να συμμετάσχει σε ευρωπαϊκό διαγωνισμό πρότυπων μονοθέσιων οχημάτων οικονομικής μετακίνησης (Shell Eco Marathon). Προκειμένου να συγκριθεί με υφιστάμενο κινητήρα τροχού επιλέχθηκε να εισαχθεί στο σύστημα κίνησης ένας μειωτήρας στροφών υψηλής απόδοσης έτσι ώστε να εξετασθούν κινητήρες υψηλών στροφών που έχουν μειωμένο μέγεθος και βάρος για την ίδια ισχύ. Η εργασία σε ένα πρώτο βήμα, μετά από κατάλληλη επιλογή μειωτήρα, προσδιορίζει τις προδιαγραφές των κύριων λειτουργικών χαρακτηριστικών του κινητήρα και σε ένα δεύτερο βήμα περιλαμβάνει τη μελέτη σχεδίασης και διαμόρφωσης όλων των συνιστωσών του. Συγκεκριμένα, ο σύγχρονος κινητήρας μονίμων επιφανειακών μαγνητών που σχεδιάσθηκε χαρακτηρίζεται από χαμηλή ισχύ (~ 220 W), υψηλή ταχύτητα περιστροφής (~ 2000 ΣΑΛ), και ταυτόχρονα υψηλή απόδοση (> 90%), με δυνατότητα παροχής υψηλής ροπής εκκινήσεως.

Στην εργασία μετά από μια σύντομη παρουσίαση των εφαρμογών του ηλεκτρικού οχήματος και των διαφορετικών συστημάτων κίνησης που έχουν αναπτυχθεί πραγματοποιείται καθορισμός των χαρακτηριστικών του κινητήρα για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Αυτές οι προδιαγραφές ορίζονται βάσει των στοιχείων του οχήματος στο οποίο θα τοποθετηθεί, του τρόπου με τον οποίο θα κινεί το αυτοκίνητο για τις επιθυμητές τιμές των ταχυτήτων και των επιταχύνσεων που προβλέπονται στον αγώνα σε συνδυασμό βεβαίως και με τον συγκεκριμένο μειωτήρα στροφών. Η επιλογή του αποφασίσθηκε ύστερα από ανάλυση όλων των δυνατών συνδυασμών με βασικά κριτήρια τις χαμηλές μηχανικές απώλειες, το μικρό βάρος και τον μεγάλο λόγο μετασχηματισμού. Με βάση τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας και χρήση αναλυτικών σχέσεων προκαταρκτικής σχεδίασης πραγματοποιείται μια πρώτη εκτίμηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κινητήρα.

Ακολουθεί μία εκτενής παρουσίαση των παραμέτρων και των αυτοματοποιημένων αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται κατά την οριστική σχεδίαση χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και εφαρμόζεται η μεθοδολογία αναζήτησης της βέλτιστης διαμόρφωσης εξετάζοντας πολλούς διαφορετικούς συνδυασμούς αυλάκων/πόλων με συγκεντρωμένα τυλίγματα μονής και διπλής στρώσης και μελετώντας μια σειρά από μεγέθη όπως η μέγιστη ροπή που αποδίδει ο κινητήρας, η κυμάτωση αυτής, η αρμονική παραμόρφωση της τάσης, η απόδοση και το βάρος. Η διαδικασία αυτή οδηγεί στην επιλογή των ιδανικότερων διαμορφώσεων πάνω στις οποίες θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση ευαισθησίας για όλα σχεδόν τα γεωμετρικά μεγέθη με σκοπό την βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η τελική γεωμετρία προκύπτει μετά από σύγκριση των βελτιστοποιημένων διαμορφώσεων με κριτήριο όχι μόνο

την συμπεριφορά τους σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας αλλά και τις επιδόσεις σε μια σειρά από άλλα πιθανά σημεία λειτουργίας.

Τέλος συγκρίνονται τα χαρακτηριστικά του κινητήρα που σχεδιάστηκε με αυτά του υφιστάμενου κινητήρα τροχού στο όχημα λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες του μειωτήρα στροφών.

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

Λέξεις κλειδιά: Ηλεκτρικό όχημα, σχεδίαση ηλεκτρικού κινητήρα, ανάλυση ευαισθησίας, κινητήρες μονίμων μαγνητών, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, παραμετροποιημένη σχεδίαση, συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης, πλανητικό σύστημα μετάδοσης κίνησης.

## Abstract

The present diploma thesis undertakes the design and optimization procedure of an electric motor designed for an electric vehicle drive system application, with targets minimization of loss, weight and volume. The electric motor is intended for a light electric vehicle prototype in order to participate in the European contest of prototype vehicles presenting low fuel consumption (Shell Eco Marathon). A reducing gear unit has been introduced in the drive train in order to exploit high speed ranges involving lighter and more efficient motors. Initially, the main motor performance and efficiency specifications are given. Subsequently, the the main motor characteristics are determined. In particular, a synchronous surface mounted permanent magnet motor configuration has been selected presenting low nominal power ( $\sim 220$  W), high rotational speed ( $\sim 2000$  rpm), high efficiency ( $> 90\%$ ), and a capability to provide high torque during acceleration.

After a brief presentation of different electric drive systems developed for electric vehicle applications the main motor characteristics are determined. These specifications are defined by taking into consideration the existing vehicle prototype characteristics, the type of selected transmission, as well as the desired speeds and accelerations during the race. Based on these results, a preliminary design is performed by using standard dimensioning equations to estimate the main motor geometric characteristics. After a presentation of the parameters and automated algorithms used in the design procedure, the search of the optimal configuration is initiated by considering different combinations of slots / poles with concentrated single and double layer windings, taking into account the resulting maximum torque and its ripple, the voltage harmonic distortion, the efficiency and the weight. This procedure leads to the selection of a number of local optima on which sensitivity analysis will be carried out for nearly all geometrical parameters. The final geometry has been adopted by using as criterion not only the behavior at the nominal operating point but also the performance in a number of other frequent operating points.

Finally a comparison between the designed motor and the wheel motor already existing on the vehicle is performed, taking into account the gear unit losses.

In the developed code have been used the finite element software FEMM and the numerical integration of differential equations software MATLAB.

Keywords: Electric vehicle, electric motor design, sensitivity analysis, surface mounted magnet rotor configuration, permanent magnet motors, finite element method, parametric design, concentrated fractional slot windings, planetary transmission system.

## 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. Ιδιαίτερως ευχαριστώ επίσης τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Χρήστο Κρασόπουλο για την καθοδήγηση, την υποστήριξη, τις υποδείξεις και την πολύ καλή συνεργασία, κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

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



## Πίνακας περιεχομένων

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός της εργασίας.....	12
1.2 Δομή της εργασίας.....	12

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

2.1 Παρουσίαση ηλεκτρικού οχήματος.....	14
2.2 Σύστημα κίνησης ηλεκτρικού οχήματος.....	14
2.3 Συγκριτική παρουσίαση κινητήρων για ηλεκτρικά οχήματα.....	18

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

3.1 Κατασκευαστικά υλικά.....	20
3.1.1 Σιδηρομαγνητικά υλικά.....	20
3.1.2 Μόνιμοι μαγνήτες.....	23
3.2 Βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης.....	24
3.3 Μεθοδολογία προκαταρκτικής σχεδίασης.....	26
3.4 Πεδιακή ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.....	27
3.4.1 Μαγνητοστατικά.....	28
3.4.2 Οριακές συνθήκες.....	29
3.4.3 Πεπερασμένων στοιχείων.....	30
3.4.4 Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων με χρήση του προγράμματος femm.....	30
3.5 Τυλίγματα ηλεκτρικών μηχανών.....	31
3.5.1 Διανεμημένο και συγκεντρωμένο τύλιγμα.....	31
3.5.2 Τυλίγματα πλήρους και κλασματικού βήματος.....	33

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

4.1 Προδιαγραφές συστήματος κίνησης.....	34
4.2 Καθορισμός επιθυμητής ταχύτητας.....	34

4.3 Καθορισμός επιθυμητής επίδοσης.....	35
4.4 Σύστημα μετάδοσης κίνησης.....	38
4.4.1 Μετάδοση με χρήση ιμάντα.....	39
4.4.2 Μετάδοση με χρήση δύο συνεργαζόμενων τροχών.....	40
4.4.3 Μετάδοση με χρήση πλανητικού συστήματος .....	41
4.4.4 Σχεδίαση συστήματος κίνησης.....	43
4.5 Καθορισμός επίδοσης κινητήρα ..	49

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ 220 W

5.1 Προκαταρκτική σχεδίαση ..	50
5.1.1 Διαστασιολόγηση διακένου ..	51
5.1.2 Μελέτη στάτη .....	52
5.1.3 Μελέτη δρομέα ..	55
5.1.4 Επιλογή τύπου τυλίγματος, αριθμού πόλων και αριθμού αυλακών ...	56
5.2 Παραμετροποιημένη σχεδίαση .....	59
5.2.1 καθορισμός παραμέτρων ..	59
5.2.2 Υλοποίηση μέσω προγραμμάτων παραμετροποιημένης σχεδίασης ...	60
5.3 Διερεύνηση καταλληλότερων διαμορφώσεων ...	74
5.3.1 Διερεύνηση βασικών διαστάσεων ..	75
5.3.2 Διερεύνηση πιθανών διαμορφώσεων .....	77
5.4 Διερεύνηση βέλτιστων διαμορφώσεων ...	84
5.4.1 Ανάλυση ευαισθησίας τετραπολικής με εννέα αύλακες ..	84
5.4.2 Ανάλυση ευαισθησίας διπολικής με τρεις αύλακες ...	97
5.4.3 Επιλογή βέλτιστης διαμόρφωσης ..	108
5.4.4 Σύγκριση με τον υφιστάμενο κινητήρα...	112

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Κυριότερα συμπεράσματα ... ..	115
6.2 Σημεία επιστημονικής συνεισφοράς.....	117
6.3 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση .....	117
Βιβλιογραφία.. ..	118

# Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

## 1.1 Σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η σχεδίαση ενός ηλεκτρικού κινητήρα υψηλής απόδοσης που θα τροφοδοτηθεί μέσω αντιστροφέα με μπαταρία λιθίου και του κατάλληλου συστήματος μετάδοσης για την μετάδοση της κίνησης στους τροχούς. 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. Το ολοκληρωμένο σύστημα που σχεδιάστηκε προορίζεται να ενσωματωθεί στο όχημα «Πυρφόρος» που θα αγωνιστεί στο διαγωνισμό Shell Eco Marathon στο Λονδίνο της Μεγάλης Βρετανίας, το Μάιο 2016.

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 παράλληλη εισαγωγή συστήματος μετάδοσης κίνησης, 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 εσωτερικού 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 με παράλληλη σχεδίαση και του συστήματος μετάδοσης για ένα πρότυπο και ελαφρύ ηλεκτρικό μονοθέσιο χρησιμοποιώντας μία μεθοδολογία διερεύνησης της βέλτιστης γεωμετρίας και κατασκευαστικής διαμόρφωσης.

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

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται αρχικά τα κατασκευαστικά υλικά των ηλεκτρικών μηχανών, ενώ ακολούθως παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις σχέσεις της προκαταρκτικής σχεδίασης και ορίζονται βασικά μεγέθη όπως η ηλεκτρική και η μαγνητική φόρτιση. Στη συνέχεια περιγράφεται η μέθοδος πεπερασμένων

στοιχείων που χρησιμοποιείται για την πεδιακή ανάλυση και διερευνώνται τα τυλίγματα των ηλεκτρικών μηχανών και οι διαφορετικές τους διαμορφώσεις.

Στο τέταρτο κεφάλαιο υπολογίζονται αναλυτικά οι μηχανικές ασκούμενες στο όχημα δυνάμεις και στη συνέχεια γίνεται η σχεδίαση του συστήματος μετάδοσης εξετάζοντας όλες τις δυνατές επιλογές. Τέλος με βάση όλα τα παραπάνω εξάγονται όλες οι βασικές προδιαγραφές που θα έχει ο υπό σχεδίαση κινητήρας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, λαμβάνει χώρα η διαδικασία της σχεδίασης και της ανάλυσης του ηλεκτρικού κινητήρα. Αρχικά γίνεται ένας υπολογισμός των βασικών διαστάσεων του κινητήρα μέσω της προκαταρκτικής σχεδίασης και διερευνείται σε βάθος η βέλτιστη γεωμετρία και η διαμόρφωση του κινητήρα. Στη συνέχεια αφού γίνει εκτενής εξερεύνηση και σύγκριση των διαθέσιμων επιλογών, γίνεται και η τελική επιλογή της διαμόρφωσης του. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την σύγκριση του νέου κινητήρα που σχεδιάστηκε με τον παλαιότερο.

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

## Κεφάλαιο 2 Ηλεκτρικά οχήματα

### 2.1 Παρουσίαση 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 19ου αιώνα, ακόμα και πριν από την χρήση οχημάτων με κινητήρα εσωτερικής καύσης. 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 20ου αιώνα. Το ενδιαφέρον για το ηλεκτρικό αυτοκίνητο επανεμφανίσθηκε 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<sup>[1],[2]</sup>.

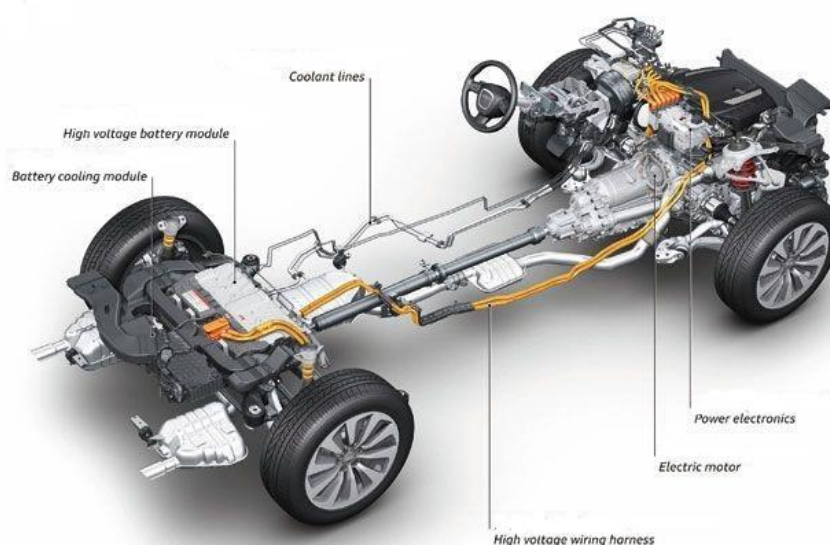
### 2.2 Σύστημα κίνησης ηλεκτρικού οχήματος

Τα ηλεκτρικά οχήματα διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα πλήρως ηλεκτρικά και τα υβριδικά οχήματα.

## 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.

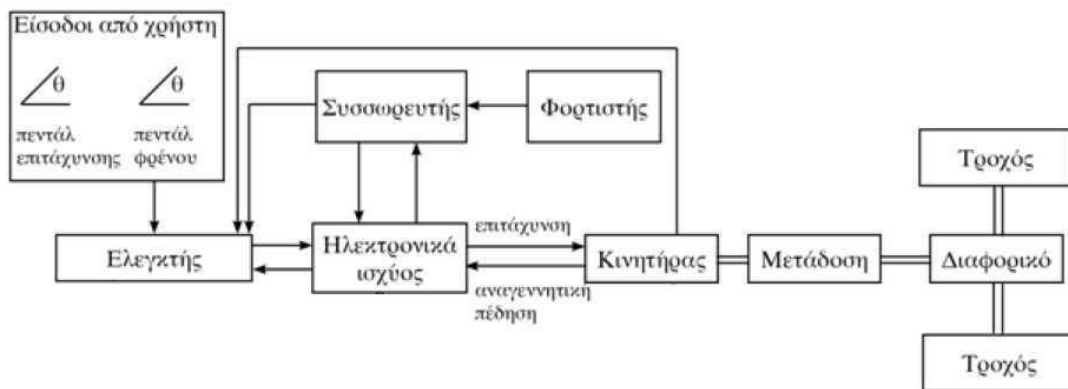
Το σχήμα 2.1 απεικονίζει το σύστημα κίνησης ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου το οποίο τροφοδοτείται από φορητή πηγή ενέργειας. Ο ηλεκτρικός και μηχανικός εξοπλισμός που μετατρέπει την ενέργεια της πηγής σε κινητική ενέργεια στον τροχό ονομάζεται σύστημα πρόωσης.



Σχήμα 2.1: Σύστημα κίνησης ηλεκτρικού οχήματος

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 μόλυβδου-οξέος που προτιμήθηκε λόγω του χαμηλού κόστους και της ανεπτυγμένης τεχνολογίας. Η ανάγκη για βελτιωμένα χαρακτηριστικά οδήγησε στην ανάπτυξη εναλλακτικών ειδών συσσωρευτών, με ψηλότερη 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 - υβριδίου (NiMH), ιόντων λιθίου (LiON), λιθίου - ιόντων πολυμερών και οι εξελιγμένοι συσσωρευτές μόλυβδου - οξέος.



Σχήμα 2.2: Συστατικά μέρη συστήματος κίνησης<sup>[14]</sup>

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.

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.

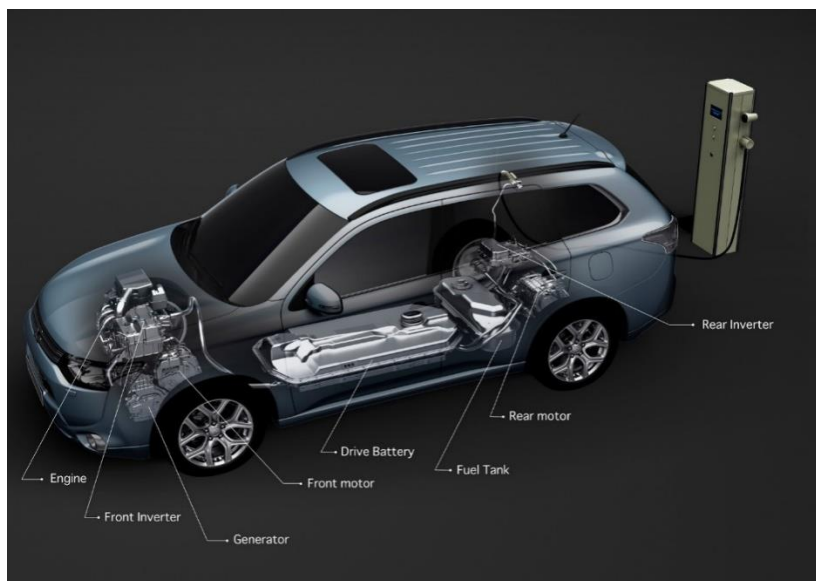
Ο ηλεκτρικός κινητήρας οδηγείται από μια μονάδα ηλεκτρονικών ισχύος ελεγχόμενων από μικροεπεξεργαστή ή ψηφιακό επεξεργαστή σήματος. Ο ρόλος αυτής της μονάδας είναι η μετατροπή της συνεχούς τάσης της πηγής ενέργειας σε μεταβαλλόμενη τάση επιθυμητής συχνότητας αναλόγως του σημείου λειτουργίας του οχήματος. 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.



### 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

### 2.3 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 υπερισχύουν 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 πρωτεύουσες σημασίες. Τεχνολογικές εξελίξεις έχουν θέσει τους κινητήρες χωρίς σύστημα συλλέκτη και ψήκτρους 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 αντιστροφής 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 δε 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 ψήκτρους (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.

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 στον πίνακα 2.1, 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 Νεοδυμίου – Σιδήρου - Βορίου το 1982, η οποία έδωσε στην αγορά φθηνότερους μαγνήτες ενώ παράλληλα οι μαγνήτες Νεοδυμίου είναι μέχρι σήμερα οι πιο ισχυροί που κυκλοφορούν.

	Κινητήρας DC	Κινητήρας επαγωγής	Κινητήρας μόνιμων μαγνητών	Κινητήρας μαγνητικής αντίδρασης
Πυκνότητα ισχύος	2.5	3.5	5	3.5
Απόδοση	2.5	3.5	5	3.5
Έλεγχος	5	4	4	3
Αξιοπιστία	3	5	4	5
Τεχνολογική εξέλιξη	5	5	4	4
Κόστος	4	5	3	4

*Πίνακας 2.1: Αξιολόγηση κινητήρων ηλεκτρικών οχημάτων*

## Κεφάλαιο 3 Σχεδίαση ηλεκτρικών μηχανών

### 3.1 Κατασκευαστικά υλικά ηλεκτρικών μηχανών

Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούμε στα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ηλεκτρικών μηχανών μόνιμων μαγνητών και θα γίνει ειδικότερη ανάλυση των ιδιοτήτων τους. Αρχικά θα εξεταστούν τα σιδηρομαγνητικά υλικά που απαρτίζουν το κύριο σώμα του στάτη και του δρομέα και στη συνέχεια οι μόνιμοι μαγνήτες.

#### 3.1.1 Σιδηρομαγνητικά υλικά

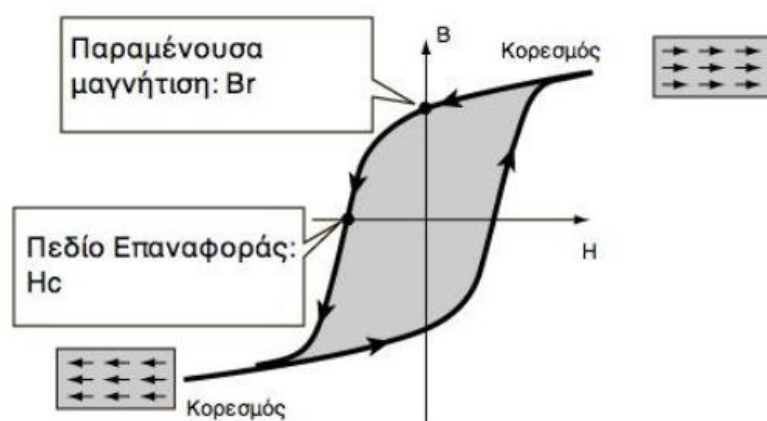
Τα σιδηρομαγνητικά υλικά απαρτίζουν το σώμα του στάτη και του δρομέα καθώς εμφανίζουν υψηλή μαγνητική διαπερατότητα. Σε εφαρμογές με χαμηλές απαιτήσεις απόδοσης χρησιμοποιείται συμπαγής σίδηρος για το σώμα της μηχανής ενώ για εφαρμογές υψηλότερων απαιτήσεων εφαρμόζεται μια τεχνική όπου ο σίδηρος δεν είναι ενιαίος αλλά αποτελείται από πολλά μικρά στρώματα σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μείωση των δινορευμάτων που δημιουργούνται λόγω του επιδερμικού φαινομένου που αποτελούν την κύρια συνιστώσα των απωλειών πυρήνα.

Οι βασικές ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες που καθιστούν τα σιδηρομαγνητικά υλικά κατάλληλα για την κατασκευή των ηλεκτρικών μηχανών είναι οι εξής:

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

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες σιδηρομαγνητικών υλικών τα μαλακά και τα σκληρά. Τα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά όπως ο μαλακός σίδηρος και ο πυριτιούχος χάλυβας μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται εύκολα. Από την άλλη πλευρά η βασική ιδιότητα των σκληρών σιδηρομαγνητικών υλικών, όπως τα κράματα Alnico, είναι ότι δεν απομαγνητίζονται εύκολα αλλά διατηρούν τις μαγνητικές τους ιδιότητες σχηματίζοντας μόνιμους μαγνήτες.

Στα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά η καμπύλη μαγνήτισης παρουσιάζει μεγάλη κλίση και ο βρόγχος υστέρησης έχει μεγάλο εμβαδό (σχήμα 3.1 ) το οποίο οδηγεί σε μικρές απώλειες υστέρησης. Έτσι οι μικρές απώλειες υστέρησης μαζί με την μεγάλη διαπερατότητα τα καθιστούν ιδανικά για χρήση σε κατασκευή μετασχηματιστών ισχύος και ηλεκτρικών μηχανών.



Σχήμα 3.1: Βρόγχος υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού <sup>[16]</sup>

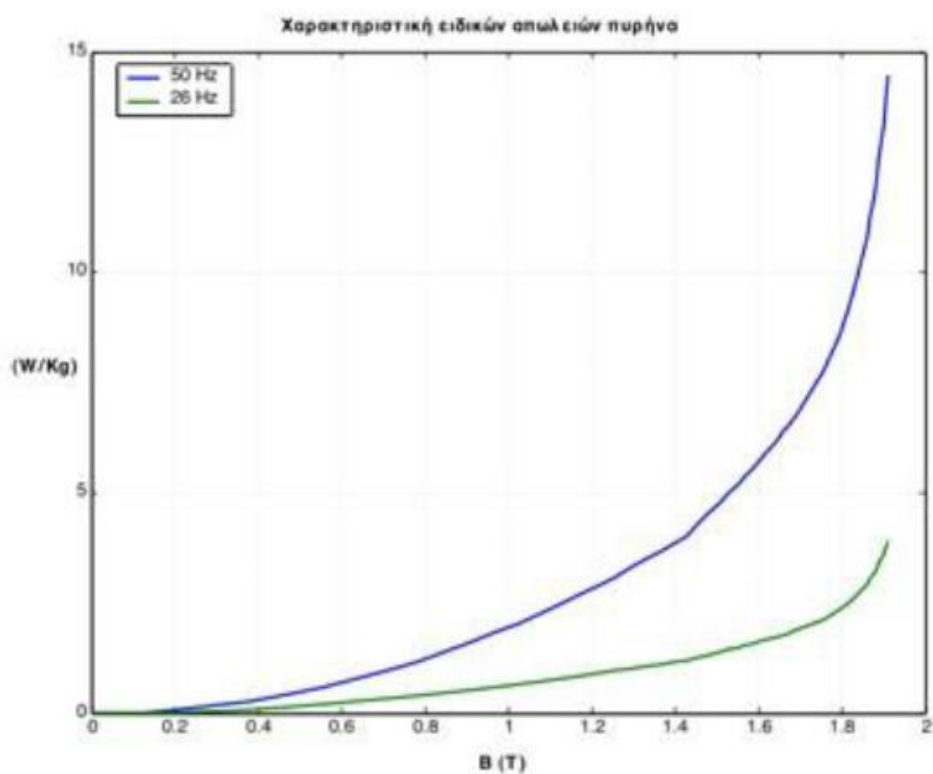
Τα σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία των μόνιμων μαγνητών παρουσιάζουν υψηλές τιμές παραμένουσας μαγνήτισης  $B_r$  και πεδίου επαναφοράς  $H_c$ . Η παραμένουσα μαγνήτιση ορίζεται ως η μαγνητική ροή στο σημείο όπου μηδενίζεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου, ενώ το μαγνητικό πεδίο αναφοράς ορίζεται ως η ένταση του μαγνητικού πεδίου που απαιτείται για την απομαγνήτιση του υλικού. Για να βελτιωθούν οι παραπάνω ιδιότητες χρησιμοποιούνται προσμίξεις στον συμπαγή σίδηρο όπως πρόσμιξη πυριτίου.

Το πυρίτιο ως ημιαγωγός αυξάνει την ηλεκτρική αντίσταση του σιδήρου μειώνοντας παράλληλα την μαγνητική του αντίσταση και βελτιώνοντας την σταθερότητα των μαγνητικών ιδιοτήτων στο χρόνο. Ωστόσο μεγάλη περιεκτικότητα σε πυρίτιο μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της μηχανικής αντοχής του σιδήρου. Επί προσθέτως μια ακόμα δυσκολία εντοπίζεται στο κατασκευαστικό κόστος καθώς οι μηχανικές και θερμικές διεργασίες που απαιτούνται για την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας επιβαρύνουν το κόστος κατασκευής της μηχανής.

Σε ασεφαρμογές για να περιοριστούν οι απώλειες δινορρευμάτων που επάγονται από το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο ο συμπαγής σίδηρος αντικαθίσταται από πολλά στρώματα μαγνητικής λαμαρίνας τα οποία καλύπτονται από μονωτικό υλικό. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται η αγωγή διαδρομή των δινορρευμάτων και ταυτόχρονα προστατεύεται ο σίδηρος από την οξείδωση.

Η σιδηρομαγνητική λαμαρίνα διακρίνεται σε δύο τύπους: με κατευθυνόμενους κόκκους και χωρίς. Η σιδηρομαγνητική λαμαρίνα χωρίς κατευθυνόμενους κόκκους είναι ιστροπική και χρησιμοποιείται κυρίως στις ηλεκτρικές μηχανές. Όσο πιο λεπτή είναι η μαγνητική λαμαρίνα τόσο πιο λίγες είναι και οι απώλειες των δινορευμάτων. Το πάχος της λαμαρίνας μειώνεται διαρκώς με την ανάπτυξη της τεχνολογίας έχοντας φτάσει σε πάχος περίπου 0,35mm. Τυπικές τιμές ειδικών απωλειών για μαγνητική επαγωγή 1,5 T και συχνότητα πεδίου 50Hz είναι 3 W/kg και 4 W/kg για ελάσματα πάχους 0,35mm και 0,5 mm αντίστοιχα.

Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη ειδικών απωλειών όπου φαίνονται πως μεταβάλλονται οι απώλειες πυρήνα σε σχέση με την μαγνητική επαγωγή για μια σιδηρομαγνητική λαμαρίνα χωρίς κατευθυνόμενους κόκκους.



Σχήμα 3.2: Τυπική καμπύλη ειδικών απωλειών σιδηρομαγνητικού υλικού για συχνότητα 50 Hz και 25 Hz<sup>[17]</sup>

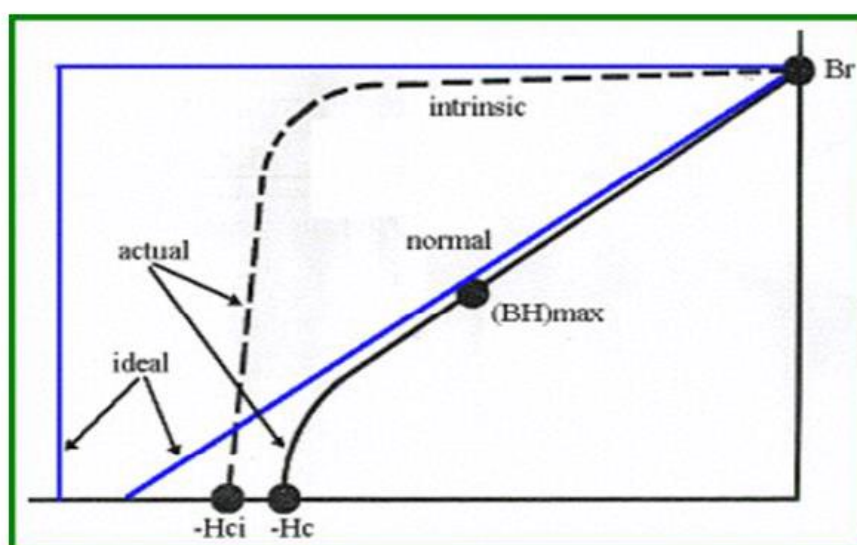
Στο παραπάνω γράφημά το οποίο αναφέρεται σε λαμαρίνα χαμηλού κόστους παρατηρούμε ότι το γόνατο βρίσκεται περίπου στα 1,5 T και ότι οι απώλειες μειώνονται όσο μειώνεται η συχνότητα.

Τα ελάσματα με κατευθυνόμενους μαγνητικούς κόκκους παρουσιάζουν μια κατεύθυνση όπου οι ιδιότητες τους εμφανίζουν σημαντική βελτίωση. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται σε μετασχηματιστές ισχύος και σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων. Η ιδιότητά τους αυτή οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές απωλειών σε σχέση

με τα ελάσματα χωρίς κατευθυνόμενους κόκκους όπου τυπική τιμή απωλειών για έλασμα 0,35 mm με επαγωγή 1,5 T και συχνότητα 50 Hz είναι 1 W/kg.

### 3.2 Μόνιμοι μαγνήτες

Οι μόνιμοι μαγνήτες αντικαθιστούν το τύλιγμα πεδίο που τροφοδοτείται από DC ρεύμα στο δρομέα στις σύγχρονες μηχανές. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως αποτελούνται από σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά τα οποία τείνουν να διατηρήσουν την μαγνήτισή τους υπό την απουσία μαγνητικού πεδίου ή ακόμα και υπό την παρουσία αντίθετου ασθενούς μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 3.3: Τυπική καμπύλη απομαγνήτισης μόνιμου μαγνήτη<sup>[16]</sup>

Το σημείο λειτουργίας πρέπει να αποφεύγεται να βρίσκεται κοντά στο γόνατο του πεδίου επαναφοράς  $H_c$  καθώς υπάρχει το ενδεχόμενο αν ασκηθεί ένα αντίθετο μαγνητικό πεδίο να απομαγνητιστεί το υλικό. Επίσης πρέπει να επιδιώκεται να βρίσκεται κοντά στο σημείο  $BH_{max}$  καθώς αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή ενέργειας του μαγνήτη.

### 3.2 Βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης

*Ειδική μαγνητική φόρτιση:*

Η ειδική μαγνητική φόρτιση  $\bar{B}$  είναι το μέγεθος που συνδέει τον αριθμό των πόλων Ρ με την μαγνητική ροή ανά πόλο Φ και ισούται:

$$\bar{B} = \frac{P \cdot \Phi}{\pi \cdot L \cdot D} \quad (3.1)$$

Όπου:

- D: το μήκος διακένου
- L: το ενεργό μήκος της μηχανής

Τυπικές τιμές για το  $\bar{B}$  είναι μεταξύ 0,5 και 0,6 Τ. Τα όρια αυτά καθορίζονται κυρίως από το φαινόμενο του κορεσμού και από το γόνατο στην καμπύλη μαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού υλικού. Από τη μια όσο αυξάνεται η μαγνητική φόρτιση, χωρίς να έχει κορεσθεί το υλικό, τόσο αυξάνεται και η δυνατότητα ροπής από την άλλη όμως αυξάνονται σημαντικά και οι απώλειες σιδήρου. Επομένως η ιδανική τιμή είναι αντικείμενο διερεύνησης για την κάθε περίπτωση ξεχωριστά.

*Ειδική ηλεκτρική φόρτιση*

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

$$ac = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_s \cdot I}{\pi \cdot D} \quad (3.2)$$

Τυπικές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης κυμαίνονται μεταξύ 15000 ΑΕ/μως 45000 ΑΕ/μ.

*Φαινόμενη ισχύς*

Η φαινόμενη ισχύς δίνεται από την σχέση:

$$S = 3 \cdot e \cdot I \quad (3.3)$$



Όπου

$I$  το φασικό ρεύμα

$e$  : η ενεργός τιμή της επαγόμενης τάσης η οποία δίνεται από την σχέση

$$e = 4,44 \cdot k_w \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi \quad (3.4)$$

$k_w$  συντελεστής τυλίγματος

$N_s$  συνολικός αριθμός ελιγμάτων ανά φάση

$\Phi$  θεμελειώδης μαγνητική ροή ανά πόλο

$f$  η ηλεκτρική συχνότητα όπου συνδέεται με την μηχανική ταχύτητα περιστροφής  $n$  σε μονάδες στροφές ανά δευτερόλεπτο με την σχέση:

$$f = \frac{n \cdot P}{2} \quad (3.5)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις έχουμε τελικά για την τριφασική φαινόμενη ισχύ:

$$S = 1,11 \cdot k_w \cdot \bar{B} \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot L \cdot ac \cdot n \quad (3.6)$$

Παρατηρώντας την παραπάνω σχέση βλέπουμε ότι η ισχύς εξαρτάται γραμμικά από την ειδική μαγνητική φόρτιση, από το τετράγωνο του μήκους διακένου και από το ενεργό μήκος. Επομένως κατά την σχεδίαση επιδιώκουμε μεγάλες ειδικές φορτίσεις προσέχοντας, ωστόσο, να μην αυξηθούν πολύ οι απώλειες σιδήρου και γεωμετρίας όσο το δυνατόν περισσότερο δισκοειδής. Αυτό γιατί, η αύξηση του μήκους διακένου οδηγεί σε μεγαλύτερη αύξηση ισχύος από ότι η αύξηση του ενεργού μήκους. Από την άλλη πλευρά όμως γεωμετρίες με έντονο δισκοειδή χαρακτήρα οδηγούν σε αυξημένες απώλειες πυρήνα καθώς ένα μεγάλο κομμάτι των καλωδίων μένει ανεκμετάλλευτο. Γίνεται, λοιπόν, εύκολα αντιληπτό ότι ο καθορισμός των ιδανικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών της μηχανής αποτελεί καθοριστικό κομμάτι τις σχεδίασης και θα γίνει εκτενότερη ανάλυση σε επόμενες παραγράφους.

### Οριακή τάση διακένου

Η οριακή τάση διακένου είναι το μέγεθος που εκφράζει την μηχανική αντοχή που πρέπει να έχει ο δρομέας της μηχανής. Εκφράζεται ως η φυγόκεντρος δύναμη που ασκείται στο δρομέα ανά μονάδα επιφάνειας.

Η φυγόκεντρος δύναμη ορίζεται από την σχέση:

$$F = m \cdot \omega_{rm} \cdot R \quad (3.7)$$

Επομένως η οριακή τάση διακένου θα είναι

$$\text{οριακη ταση διακένου} = \frac{m \cdot \omega_{rm} \cdot R}{2 \cdot \pi \cdot L} \quad (3.8)$$

Η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση διακένου είναι  $10 \text{ tn/cm}^2$ . Ωστόσο μια ασφαλής επιλογή είναι  $1 \text{ tn/cm}^2$ . Έτσι εισάγεται ένας περιορισμός από πλευράς μηχανικής αντοχής στην τελική επιλογή των γεωμετρικών διαστάσεων της μηχανής.

### Πυκνότητα ρεύματος του τυλίγματος

Η πυκνότητα ρεύματος αποτελεί βασικό κομμάτι της σχεδίασης επειδή σχετίζεται άμεσα με την αποδιδόμενη ροπή καθώς επίσης και με τις απώλειες χαλκού. Όσο αυξάνεται η πυκνότητα ρεύματος αυξάνονται και οι απώλειες με αποτέλεσμα και η θερμότητα που απελευθερώνεται. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή υλικών ή ακόμα και στον υποβιβασμό της μονωτικής τους ικανότητας. Για να αποφευχθούν αυτά τα αποτελέσματα ορισμένες φορές υπάρχει ανάγκη για χρησιμοποίηση εξαναγκασμένης ψύξης είτε αυτή είναι τεχνητός αερισμός είτε είναι κάποιο κλειστό σύστημα κυκλοφορίας ψυκτικού υγρού. Μια εμπειρική τιμή της πυκνότητας ρεύματος για να αποφευχθεί η ανάγκη για εξαναγκασμένη ψύξη είναι μέχρι  $4,5 \text{ A/mm}^2$

## 3.3 Μεθοδολογία προκαταρκτικής σχεδίασης

### Προσδιορισμός της ελάχιστης επιφάνειας διακένου

Ο προσδιορισμός της επιφάνειας διακένου γίνεται με βάση την μέγιστη επιθυμητή ροπή στο διάκενο θεωρώντας ότι η ροπή μεγιστοποιείται όταν η γωνία  $\delta$  μεταξύ του πεδίου του στάτη και του δρομέα είναι  $90^\circ$  ηλεκτρικές μοίρες. Αρχικά γίνεται υπολογισμός της εφαπτομενικής πίεσης διακένου από την σχέση:

$$P_t = \frac{\int_c B_n \cdot B_t dl}{\pi \cdot D \cdot \mu_o} \quad (3.9)$$

Όπου  $B_n, B_t$  η ακτινική και η εφαπτομενική συνιστώσα αντίστοιχα της μαγνητικής επαγωγής και το ολοκλήρωμα εκτείνεται κατά μήκος του μέσου του διακένου.

Στη συνέχεια έχοντας υπολογίσει την εφαπτομενική πίεση διακένου και με δεδομένη την επιθυμητή ροπή χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$T_{el,max} = \frac{\pi \cdot P_t \cdot D^2 \cdot L}{2} \quad (3.10)$$

Και εξάγουμε μια σχέση για το γινόμενο  $D^2L$ . Αυτήν την τιμή την χρησιμοποιούμε σαν αρχικό σημείο εκκίνησης και λαμβάνοντας υπόψιν μια σειρά από άλλες παραμέτρους καταλήγουμε τελικά στον σωστό συνδυασμό. Θα γίνει περισσότερη ανάλυση στα παρακάτω κεφάλαια.

#### *Πάχος διακένου*

Το πάχος διακένου είναι μια σημαντική παράμετρος της σχεδίασης καθώς επιδρά καθοριστικά στην επίτευξη των επιθυμητών χαρακτηριστικών που αποζητάμε ένα ηλεκτρικό κινητήρα. Κατά κανόνα επιθυμούμε το πάχος διακένου να είναι όσο το δυνατό μικρότερο με αποτέλεσμα τελικώς να καθορίζεται από την ακρίβεια κατασκευής αλλά και την ικανότητα μηχανικής στήριξης του δρομέα.

### **3.4 Πεδιακή ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία**

Η προκαταρκτική σχεδίαση ενός κινητήρα παρέχει μια βασική άποψη της απαιτούμενης διαμόρφωσης του σχεδιαζόμενου κινητήρα. Συμπληρωματικά, η πεδιακή ανάλυση μπορεί να δώσει λεπτομερή ανάλυση του μαγνητικού πεδίου και να οδηγήσει στην επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών του κινητήρα που αναμένονται από την προκαταρκτική σχεδίαση ή στη διαπίστωση της ανάγκης για βελτίωσή τους. Η πεδιακή ανάλυση παρέχει την κατανομή του μαγνητικού πεδίου και μέσω αυτής, με κατάλληλη επεξεργασία μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια μεγέθη όπως η ροπή και η δύναμη, απώλειες, πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος, όπως επίσης να εντοπιστούν περιοχές του πυρήνα που βρίσκονται σε κορεσμό.

#### **3.4.1 Μαγνητοστατικά προβλήματα**

Μαγνητοστατικά ονομάζονται τα προβλήματα στα οποία το μαγνητικό πεδίο είναι αμετάβλητο στο χρόνο. Σε αυτή την περίπτωση, η ένταση του μαγνητικού πεδίου (H) και η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου (B) ικανοποιούν τις σχέσεις :

$$\nabla \times H = J \quad (3.11)$$

Και

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.12)$$

Ικανοποιείται επίσης η θεμελιώδης σχέση μεταξύ B και H για κάθε υλικό

$$B = \mu H \quad (3.13)$$

Αν το υλικό είναι μη γραμμικό, όπως για παράδειγμα κορεσμένος σίδηρος ή μαγνήτες αλνίκο, τότε η επιτρεπτικότητα  $\mu$  είναι στην πραγματικότητα μία συνάρτηση του B:

$$\mu = \frac{B}{H(B)} \quad (3.14)$$

Η εύρεση του μαγνητικού πεδίου σε κάθε σημείο του χώρου μπορεί να επιτευχθεί υπολογίζοντας το διανυσματικό δυναμικό. Η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου γράφεται σε συνάρτηση του διανυσματικού δυναμικού, A, ως εξής:

$$B = \nabla \times A \quad (3.15)$$

Αυτός ο ορισμός του B ικανοποιεί πάντα την εξίσωση (3.12). Τότε, η (3.11) γράφεται ως εξής:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = J \quad (3.16)$$

Για ένα γραμμικό ιστροπικό μέσο (και υποθέτοντας ότι  $\nabla \cdot A = 0$ ), η εξίσωση αυτή καταλήγει:

$$\nabla^2 A = -\mu J \quad (3.17)$$

Στη γενική περίπτωση, το διανυσματικό δυναμικό είναι ένα διάνυσμα τριών συνιστωσών. Σε δύο διαστάσεις όμως, οι δύο από αυτές τις τρεις συνιστώσες είναι μηδέν, και μεταβάλλεται μόνο η συνιστώσα στην κατακόρυφη συνιστώσα.

Το πλεονέκτημα της χρήσης του διανυσματικού δυναμικού είναι ότι όλες οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται στο μαγνητοστατικό πεδίο συνδυάζονται σε μία εξίσωση. Εάν είναι γνωστό το  $A$ , τα  $B$  και  $H$  προκύπτουν από διαφόριση του  $A$ . Στην περίπτωση ύπαρξης μαγνητικού πεδίου αρμονικά μεταβαλλόμενου, μπορούν να επαχθούν δινορρεύματα σε υλικά με μη μηδενική αγωγιμότητα και τότε θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλες εξισώσεις του Maxwell αναφορικά με την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου.

### 3.4.2 Οριακές συνθήκες

Για να μπορέσει να γίνει η επίλυση ενός ηλεκτροστατικού ή ενός μαγνητοστατικού προβλήματος πρέπει να οριστούν οι αρχικές συνθήκες. Αυτές μπορεί να είναι οι παρακάτω:

- Dirichlet. Σε αυτό τον τύπο οριακής συνθήκης, η τιμή του δυναμικού  $A$  δηλώνεται στο πάνω στο όριο, π.χ.  $A=0$ . Δηλώνοντας σε ένα μαγνητικό πρόβλημα  $A=0$  κατά μήκος ενός ορίου της γεωμετρίας, αποτρέπεται η μαγνητική ροή από το να διαπεράσει το όριο αυτό.
- Neumann. Αυτή η οριακή συνθήκη ορίζει την κάθετη παράγωγο του δυναμικού κατά μήκος του ορίου και συνήθως χρησιμοποιείται στα μαγνητικά προβλήματα στην περίπτωση διεπιφάνειας με υλικό πολύ μεγάλης επιτρεπτότητας.
- Robin. Η οριακή συνθήκη Robin είναι ένα είδος συνδυασμού μεταξύ των Dirichlet και Neumann, καθορίζοντας μια σχέση μεταξύ της τιμής του  $A$  και της παραγώγου του. Ένα παράδειγμα τέτοιας οριακής συνθήκης είναι:

$$\frac{\partial A}{\partial n} + cA = 0 \quad (3.18)$$

Αυτή η οριακή συνθήκη χρησιμοποιείται συνήθως για να επιτρέψουν σε ένα περιορισμένο χωρικά πρόβλημα να μιμηθεί τη συμπεριφορά μιας άπειρης χωρικά περιοχής.

- Περιοδική. Μια περιοδική οριακή συνθήκη συνδέει μαζί δύο όρια. Σε αυτό τον τύπο οριακής συνθήκης, οι οριακές τιμές σε αντίστοιχα σημεία των δύο ορίων ισούνται.
- Αντιπεριοδική. Μια αντιπεριοδική οριακή συνθήκη συνδέει επίσης δύο όρια μεταξύ τους, αλλά σε αυτή την περίπτωση τα αντίστοιχα σημεία έχουν μεγέθη ίσου μέτρου αλλά αντίθετου πρόσημου.

### 3.4.3 Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Αν και οι συνθήκες ενός μαγνητικού προβλήματος μπορούν να εκφραστούν υπό τη μορφή μιας διαφορικής εξίσωσης, με ορισμένες οριακές συνθήκες, ωστόσο είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί μια αναλυτική λύση, παρά μόνο για προβλήματα πολύ απλής γεωμετρίας. Αυτή τη δυσκολία έρχεται να ξεπεράσει η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, χωρίζοντας το πρόβλημα σε ένα μεγάλο αριθμό περιοχών και αντίστοιχων υποπροβλημάτων που όμως αναφέρονται σε απλή γεωμετρία και είναι εύκολη η επίλυσή τους. Αν η αρχική περιοχή τεμαχιστεί σε μεγάλο αριθμό τέτοιων υποπεριοχών, το υπολογιζόμενο δυναμικό προσεγγίζει αρκετά καλά την ακριβή του τιμή. Το πλεονέκτημα της διαίρεσης της περιοχής του προβλήματος σε ένα μεγάλο αριθμό μικρών στοιχείων είναι ότι το πρόβλημα μετασχηματίζεται από ένα μικρό αλλά δύσκολο στην επίλυση πρόβλημα, σε ένα μεγάλο αλλά σχετικά εύκολο στην επίλυση. Το πρόβλημα αυτό παίρνει τη μορφή ενός προβλήματος γραμμικής άλγεβρας με πολλές χιλιάδες αγνώστων συνήθως, και υπάρχουν αλγόριθμοι που επιτρέπουν την επίλυσή του σε σύντομο χρόνο.

### 3.4.4 Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων με χρήση του προγράμματος femm

Το ελεύθερο λογισμικό femm ανήκει στην κατηγορία προγραμμάτων επίλυσης πεπερασμένων στοιχείων και επιλύει δισδιάστατα και μαγνητοστατικά προβλήματα, όπως επίσης προβλήματα όπου τα μαγνητικά μεγέθη μεταβάλλονται με μια συγκεκριμένη συχνότητα. Ειδικότερα, το πρόγραμμα αυτό διακρίτοποιεί 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 γραμμικής άλγεβρας σχηματίζεται με ελαχιστοποίηση του μέτρου του σφάλματος ανάμεσα στην πραγματική διαφορική εξίσωση και την προσεγγιστική διαφορική εξίσωση.

Η διαδικασία επίλυσης ενός μαγνητικού προβλήματος από το femm έχει τα παρακάτω στάδια:

- a) Σχεδίαση της γεωμετρίας, ορισμός των οριακών συνθηκών και των υλικών.
- b) Πλεγματοποίηση του προβλήματος με επιθυμητό αριθμό τριγωνικών στοιχείων.
- c) Επίλυση του προβλήματος γραμμικής άλγεβρας και εύρεσης του διανυσματικού δυναμικού.
- d) Απεικόνιση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

## 3.5 Τυλίγματα ηλεκτρικών μηχανών

### 3.5.1 Διανεμημένο και συγκεντρωμένο τύλιγμα

Η βασικότερη διάκριση μεταξύ των τυλιγμάτων των ηλεκτρικών μηχανών είναι αυτή του συγκεντρωμένου και του διανεμημένου τυλίγματος. Το διανεμημένο τύλιγμα αποτελεί την πιο καθιερωμένη και ευρέως χρησιμοποιημένη επιλογή ενώ το συγκεντρωμένο αποτελεί μια πιο μοντέρνα επιλογή η οποία κερδίζει συνεχώς έδαφος.

Η ιδέα του διανεμημένου τυλίγματος προέκυψε από την ανάγκη για παραγωγή ημιτονοειδούς ΗΕΔ ή ΜΕΔ στο διάκενο (χωρική κατανομή), προκειμένου να παραχθεί στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

Ωστόσο το κύμα της ΜΕΔ ενός πηνίου έχει γενικά τετραγωνική μορφή. Άρα για να επιτευχθεί ημιτονικότητα, είναι αναγκαία η κατάλληλη τοποθέτηση των πηνίων στα αυλάκια ώστε να καταφέρουμε χρησιμοποιώντας ορθογωνικές κατανομές, να προσεγγίσουμε την ημιτονική. Αυτό σημαίνει ότι οι σπείρες κάθε τυλίγματος, κατανέμονται κατάλληλα στα αυλάκια, προκειμένου να σχηματίσουν πηνία πλήρους ή κλασματικού βήματος. Μάλιστα όσες περισσότερες είναι οι πλευρές πηνίου ανά πόλο και φάση, τόσο καλύτερα προσεγγίζουμε την ημιτονική κυματομορφή.

Από την άλλη πλευρά όσον αφορά το συγκεντρωμένο τύλιγμα όλες οι σπείρες του τυλίγονται σε σειρά σχηματίζοντας ένα πολύκλωνο πηνίο. Κάθε πηνίο, τυλίγεται γύρω από ένα δόντι κι έτσι κατασκευάζεται το τύλιγμα της μηχανής.

Με την προϋπόθεση ότι γνωρίζουμε τους πόλους και τις αύλακες μιας μηχανής μπορούμε να αποφανθούμε αν πρόκειται για γεωμετρία σε συγκεντρωμένο η διανεμημένο τύλιγμα χρησιμοποιώντας των αριθμό αυλακών ανά φάση και ανά πόλο  $q$ :

$$q = \frac{Q}{m \cdot P} \quad (3.19)$$

Όπου  $m$  ο αριθμός των φάσεων.

Εάν το  $q < 1$  τότε έχουμε συγκεντρωμένο τύλιγμα, ενώ αν  $q = 1$  τότε διανεμημένο.

Το συγκεντρωμένο τύλιγμα παρουσιάζει κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με το διανεμημένο τα κυριότερα από αυτά είναι:

- I. Κοντύτερα, μη επικαλυπτώμενα άκρα τυλιγμάτων (μειωμένες απώλειες  $Cu$ ).
- II. Εύκολη κατασκευή, λιγότερα πηνία.
- III. Δεν υπάρχουν αμοιβαίες αυτεπαγωγές μεταξύ φάσεων, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη ανοχή σε αντίστοιχα σφάλματα.
- IV. Κατάλληλα για λειτουργία flux weakening, λόγω υψηλής αυτεπαγωγής ευθέως άξονα.
- V. Μεγαλύτερες τιμές συντελεστή πληρότητας χαλκού στην αύλακα.

Από την άλλη πλευρά, το διανεμημένο τύλιγμα υπερτερεί στα ακόλουθα:

- I. Προσφέρει καλύτερη ημιτονικότητα, άρα μικρότερη αρμονική παραμόρφωση τάσης, και χαμηλότερες παρασιτικές ροπές (cogging torque).
- II. Παρέχει περισσότερες κατασκευαστικές επιλογές, όσον αφορά τους δυνατούς συνδυασμούς για τον αριθμό των πόλων και των αυλακιών.
- III. Συνδυάζεται καλύτερα με ασύγχρονες μηχανές.
- IV. Προσφέρει μεγαλύτερη ΗΕΔ, χάρη στον υψηλότερο συντελεστή τυλίγματος kw, που επιτυγχάνεται.

Το συγκεντρωμένο τύλιγμα μπορεί να υλοποιηθεί με συγκεκριμένους συνδυασμούς όπως φαίνεται στο σχήμα 3.20 μαζί με την τιμή αντίστοιχη τιμή του συντελεστή τυλίγματος για κάθε ένα συνδυασμό ξεχωριστά.

$Q_s \setminus p$	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			$q=1$					

Σχήμα 3.4: Δυνατοί συνδυασμοί πόλων-αυλάκων για συγκεντρωμένο τύλιγμα, και οι αντίστοιχοι συντελεστές

Ικανοποιητικές τιμές συντελεστή τυλίγματος, θεωρούνται αυτές που προσεγγίζουν την μονάδα, και ένα συχνό όριο είναι να απαιτείται  $kw \geq 0.866$ , έτσι ώστε να μην προκαλείται μεγάλη απομείωση της θεμελιώδους της επαγόμενης τάσης.

### 3.5.2 Τυλίγματα πλήρους και κλασματικού βήματος

Το πολικό βήμα ορίζεται ως η γωνιακή απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πόλων της μηχανής. Ένα πολικό βήμα αντιστοιχεί πάντοτε σε 180 ηλεκτρικές μοίρες



ανεξάρτητα από τον αριθμό των πόλων της μηχανής. Η μετατροπή του σε μηχανική γωνία γίνεται από την σχέση:

$$\rho_p = \frac{360}{P} \quad (3.20)$$

Το βήμα ενός πηνίου (coil-pitch) ορίζεται ως η γωνιακή απόσταση μεταξύ των δύο πλευρών του εν λόγω πηνίου (coil sides). Αν η απόσταση αυτή είναι ίση με την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πόλων, τότε λέμε ότι έχουμε τύλιγμα πλήρους βήματος. Αντίθετα, αν η απόσταση αυτή είναι μικρότερη, και αποτελεί ένα κλάσμα του πολικού βήματος, τότε έχουμε τύλιγμα κλασματικού βήματος. Έτσι ένα πηνίο βήματος 5/6 καλύπτει τα 5/6 της απόστασης μεταξύ δύο πόλων. Μπορούμε να μετατρέψουμε το βήμα αυτό σε ηλεκτρικές μοίρες μέσω της σχέσης:

$$\rho = \frac{\theta_m}{\rho_p} \cdot 180^\circ \quad (3.21)$$

Το βασικό πλεονέκτημα των γεωμετριών κλασματικού βήματος σε σχέση με πλήρους είναι η απομείωση των ανώτερων αρμονικών χώρου που εισάγουν τα τυλίγματα. Η απομείωση αυτή επιτυγχάνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

Η χρήση του κλασματικού βήματος διπλής στρώσης σε μια μηχανή, συνεπάγεται ότι σε κάποιες από τις αύλακές της, θα φιλοξενούνται αγωγοί διαφορετικών φάσεων μέσα στην ίδια αύλακα.

Αυτό έχει ως συνέπεια την δημιουργία ρευμάτων, οι γωνίες των οποίων (αν αυτά περιγράφουν ως διανύσματα χώρου) θα λαμβάνουν τιμές μεταξύ των γωνιών των δύο διαφορετικών φάσεων, που συνυπάρχουν στη συγκεκριμένη αύλακα.

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η δημιουργία ρευμάτων (άρα και αντίστοιχων κυμάτων ΜΕΔ) με ενδιάμεσες τιμές φάσης, οι οποίες συμβάλλουν στην ημιτονικότητα της κατανομής.

Εκτός βέβαια από στην απομείωση των αρμονικών, με το κλασματικό βήμα απομειώνεται σε κάποιο βαθμό και η θεμελιώδης συνιστώσα των παραγόμενων κυμάτων ΜΕΔ, γεγονός που έχει δυσμενείς συνέπειες στην ικανότητα ροπής της μηχανής. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιείται κατά τη σχεδίαση ένας συμβιβασμός μεταξύ των αντικρουόμενων κριτηρίων, και μια τυπική απαίτηση προβλέπει οι αρμονικές να περιορίζονται τελικά στο 5% της θεμελιώδους συνιστώσας.

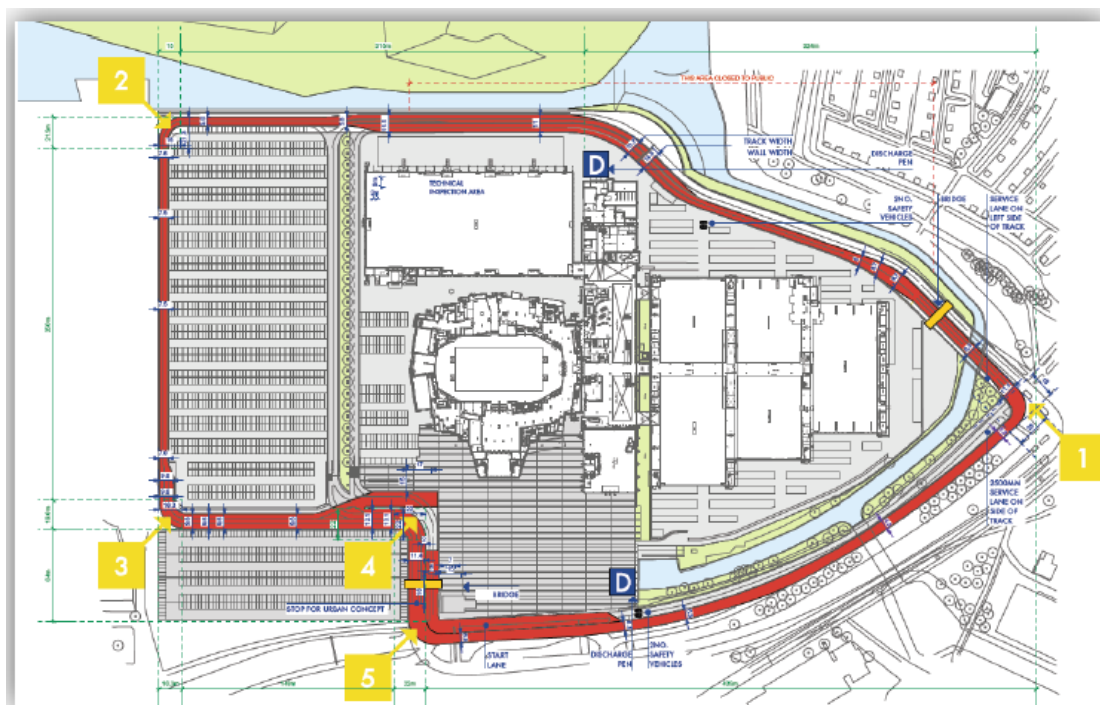
## Κεφάλαιο 4 Σχεδίαση συστήματος κίνησης

### 4.1 Προδιαγραφές συστήματος κίνησης

Ο υπό σχεδίαση κινητήρας προορίζεται να ενσωματωθεί στο ερευνητικό όχημα «Πυρφόρος» όπου θα συμμετάσχει στο διαγωνισμό εξοικονόμησης καυσίμου ShellEcoMarathon. Ο συγκεκριμένος αγώνας είναι ένας αγώνας εξοικονόμησης επομένως ο κινητήρας θα πρέπει να συνδυάζει υψηλή απόδοση με όσο το δυνατό χαμηλότερο βάρος. Από την άλλη, όπως θα φανεί παρακάτω, δεν υπάρχει ανάγκη για πολύ μεγάλη επίδοση.

### 4.2 Καθορισμός επιθυμητής ταχύτητας

Για να υπολογίσουμε την ιδανική ταχύτητα που πρέπει να έχει το όχημα μας πρέπει να συνυπολογίσουμε τους κανόνες του διαγωνισμού και την χάραξη της πίστας που θα αγωνιστεί. Η διοργανώτρια αρχή δεν επιβάλλει κάποιο περιορισμό ούτε για την αναπτυσσόμενη ταχύτητα ή την επιτάχυνση ωστόσο για να είναι έγκυρη η προσπάθεια θα πρέπει να ολοκληρωθούν 10 γύροι σε χρόνο μικρότερο από 39 λεπτά.



Σχήμα 4.1: Ahoj circuit

Επειδή φέτος είναι η πρώτη φορά που ο διαγωνισμός θα πραγματοποιηθεί στο Λονδίνο και δεν έχουν γίνει γνωστές λεπτομέρειες για την πίστα η μελέτη θα γίνει για το circuit του Rotterdam (σχήμα 4.1), όπου γινόντουσαν οι αγώνες μέχρι πέρυσι.

Το συνολικό μήκος του είναι 1,63km χωρίς ιδιαίτερα μεγάλες κλίσεις. Οι στροφές είναι κάθετες ωστόσο το μεγάλο πλάτος του δρόμου επιτρέπει την διέλευση από αυτές χωρίς να είναι απαραίτητος ο περιορισμός της ταχύτητας του οχήματος. Έτσι με βάση τα παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψη ότι σκοπός του διαγωνισμού είναι να ολοκληρωθεί η απαιτούμενη απόσταση με όσο το δυνατό χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι πρέπει να διατηρούμε σταθερή την ελάχιστη δυνατή ταχύτητα όπου θα επιτρέπει στο όχημα να ολοκληρώσει τον αγώνα σε χρόνο όσο πιο κοντά γίνεται στα 39 λεπτά.

Η συνολική απόσταση θα είναι:

$$S_{tot} = 16.300 \text{ m}$$

Και επομένως η επιθυμητή ταχύτητα θα είναι:

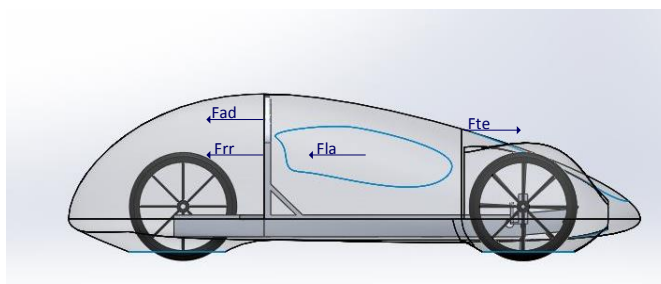
$$u = \frac{S_{tot}}{t_{max}} = \frac{16,3 \text{ km}}{\frac{39}{60} \text{ h}} \approx 25 \text{ km/h} = 6,94 \text{ m/s} \quad (4.1)$$

#### 4.3 Καθορισμός επιθυμητής επίδοσης

Η κίνηση του ηλεκτρικού οχήματος ανάλογα με την ανάγκη σε ροπή μπορεί να χωριστεί σε δύο διαφορετικές φάσεις:

- Την εκκίνηση που είναι αναγκαία η μέγιστη αποδιδόμενη ροπή
- Την διάρκεια του αγώνα όπου η αποδιδόμενη ροπή είναι τέτοια ώστε το όχημα να διατηρεί σταθερή ταχύτητα.

Για να προσδιορίσουμε την αποδιδόμενη από το κινητήρα ροπή στον κινητήριο τροχό πρέπει να γίνει αναλυτικός υπολογισμός των ασκούμενων στο όχημα δυνάμεων για κάθε μια από τις παραπάνω διαφορετικές φάσεις ξεχωριστά. Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 4.2) παρουσιάζονται όλες οι δυνάμεις που ασκούνται στο όχημα.



Σχήμα 4.2: Κατανομή ασκούμενων δυνάμεων στο όχημα

Η συνολική δύναμη πρόωσης ( $F_{te}$ ) που καλείται να παράγει ο κινητήρας ισούται με το άθροισμα όλων των δυνάμεων που ασκούνται στο όχημα, δηλαδή:

$$F_{te} = F_{la} + F_{rr} + F_{ad} \quad (4.2)$$

Όπου:

$F_{la}$  η δύναμη ευθύγραμμης επιτάχυνσης (με τη φορά αδράνειας)

$F_{rr}$  η αντίσταση κύλισης

$F_{ad}$  η οπισθέλκουσα δύναμη από αεροδυναμικές τριβές

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε κάθε όρο ξεχωριστά και θα προσπαθήσουμε να κάνουμε μια καλή προσέγγιση της τιμής τους.

Η αντίσταση κύλισης οφείλεται κατά κύριο λόγο στην τριβή των ελαστικών με το έδαφος κατά την διάρκεια της κύλισης και υπολογίζεται από την σχέση:

$$F_{rr} = \mu_{rr} * m * g \quad (4.3)$$

Όπου  $\mu_{rr}$  ο συντελεστής τριβής ολίσθησης ο οποίος εξαρτάται από το είδος του ελαστικού και την πίεση του καθώς επίσης και από το οδόστρωμα. Όσο αυξάνουμε την πίεση του ελαστικού τόσο μειώνεται ο συγκεκριμένος συντελεστής και επομένως και η αντίσταση κύλισης, αλλά από την άλλη πλευρά μειώνεται η ποιότητα κύλισης λόγω αύξησης των κραδασμών και μείωσης της πρόσφυσης. Η τιμή του  $\mu_{rr}$  κυμαίνεται μεταξύ του 0,015 για συμβατικά ελαστικά και φτάνει την τιμή 0,005 για ειδικά ελαστικά που προορίζονται για ηλεκτρικά οχήματα. Στη δική μας περίπτωση τα ελαστικά μπορούν να χαρακτηριστούν ως χαμηλής αντίστασης κύλισης λειτουργώντας σε υψηλές πίεσης με αποτέλεσμα η ιδανική τιμή για τον συντελεστή να είναι 0,005.

Όσον αφορά το βάρος του οχήματος μπορούμε να υποθέσουμε ότι θα κυμαίνεται γύρω στα 30 kg. Αν συνυπολογίσουμε και το βάρος της οδηγού τελικά θα είναι κοντά στα 80 kg. Με βάση όλα τα παραπάνω η τιμή της αντίστασης κύλισης θα είναι:

$$F_{rr} = \mu_{rr} * m * g = 0,005 * 80 * 9,78 = 3,9 \text{ N}$$

Τέλος αξίζει να σημειώσουμε ότι η αντίσταση κύλισης είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα του οχήματος μ' αποτέλεσμα η παραπάνω τιμή να ισχύει καθ' όλη την διάρκεια της κίνησης.

Η οπισθέλκουσα δύναμη οφείλεται στη τριβή του οχήματος με τον αέρα και όπως είναι φυσικό εξαρτάται από την ταχύτητα κίνησης του οχήματος και από το σχήμα του. Ορίζεται ως:

$$F_{ad} = \frac{1}{2} * \rho * A * C_d * u^2 \quad (4.4)$$

Όπου:

$\rho$ : η πυκνότητα του αέρα με τιμή  $1,2 \frac{kg}{m^3}$  στους  $20^\circ$

A: η μετωπική επιφάνεια

$C_d$ : ο συντελεστής οπισθέλκουσας δύναμης

u: η ταχύτητα του οχήματος

Ο συντελεστής οπισθέλκουσας δύναμης εξαρτάται από τις διάφορες προεξοχές τις επιφάνειας του οχήματος όπως καθρεύτες αεροτομές και μπορεί να υπολογιστεί είτε θεωρητικά με τη χρήση κατάλληλου μοντέλου είτε πειραματικά με τη χρήση αερογέφυρας. Ωστόσο στα πλαίσια της εργασίας αυτής δεν κατέστη εφικτό να εφαρμοστεί κάποιος από τους παραπάνω τρόπους και για αυτό το λόγο θα προσπαθήσουμε να κάνουμε μια καλή προσέγγιση. Τα αυτοκίνητα πόλης παρουσιάζουν τιμή του συντελεστή  $C_d$  το πολύ 0,3. Έτσι είναι ασφαλές να υποθέσουμε ότι στο όχημα μας το οποίο διαθέτει ένα πολύ καλό αεροδυναμικό σχήμα δεν μπορεί να έχουμε τιμή μεγαλύτερη από αυτή και επομένως θα την χρησιμοποιήσουμε στην ανάλυση μας ως το χειρότερο σενάριο .

Η ταχύτητα του οχήματος αυξάνεται κατά την διάρκεια της επιτάχυνσης μ' αποτέλεσμα να αυξάνει και η οπισθέλκουσα δύναμη. Άρα όπως κάναμε και στην περίπτωση του συντελεστή  $C_d$  θα θεωρήσουμε το χειρότερο σενάριο που μας προσφέρει παράλληλα την μεγαλύτερη ασφάλεια στους υπολογισμούς μας δηλαδή να έχουμε συνέχεια την μέγιστη ταχύτητα  $6,94 \frac{m}{s}$ . Τέλος η μετωπική επιφάνεια του «Πυρφόρου» ανέρχεται στα  $58000 \text{ mm}^2$  ή  $0,58 \text{ m}^2$ .

Επομένως με βάση όλα τα παραπάνω η ζητούμενη δύναμη είναι:

$$F_{ad} = \frac{1}{2} * \rho * A * C_d * u^2 = \frac{1}{2} * 1,2 * 0,58 * 6,94 = 0,7 \text{ N}$$

Η τελευταία συνιστώσα της δύναμης πρόωσης είναι η δύναμη ευθύγραμμης επιτάχυνσης η οποία σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα υπολογίζεται από την σχέση:

$$F_{la} = m * a \quad (4.5)$$

Όπου m η μάζα του οχήματος και a η επιτάχυνσή του. Για να ορίσουμε τον ρυθμό αύξησης της ταχύτητας πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι επιθυμούμε όσο το δυνατό λιγότερο βάρος στο όχημά μας. Μεγάλες επιταχύνσεις θα οδηγούσαν σε μεγάλες

ανάγκες σε ροπή με αποτέλεσμα αύξηση του βάρους του κινητήρα. Επομένως πρέπει να επιλεχτεί η ελάχιστη δυνατή επιτάχυνση όπου δεν θα επηρεάζεται η επίδοση κατά την διάρκεια του αγώνα.

Με βάση τα παραπάνω θα ήταν ιδανικό να μπορεί το όχημά μας να αποκτή την ονομαστική ταχύτητα του σε 30 δευτερόλεπτα. Άρα:

$$a = \frac{25 \frac{km}{h} - 0 \frac{km}{h}}{30 s} = \frac{6,96 \frac{m}{s}}{30 s} = 0,23 \frac{m}{s^2}$$

Και συνεπώς η δύναμη ευθύγραμμης επιτάχυνσης θα είναι:

$$F_{la} = m * a = 80 kg * 0,23 \frac{m}{s^2} = 18,4 N$$

Με βάση λοιπόν όλα τα παραπάνω μπορούμε να υπολογίσουμε την συνολική δύναμη πρόωσης κατά την φάση της επιτάχυνσης:

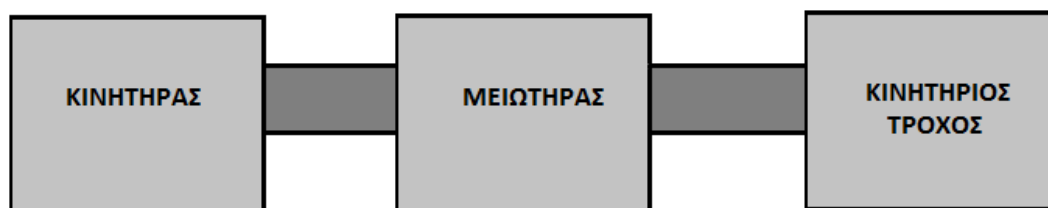
$$F_{temax} = F_{la} + F_{rr} + F_{ad} = 18,4 + 3,9 + 0,7 = 23 N$$

Ενώ κατά την διάρκεια του αγώνα θα είναι:

$$F_{temean} = F_{la} + F_{rr} + F_{ad} = 0 + 3,9 + 0,7 = 4,6 N$$

#### 4.4 Σύστημα μετάδοσης κίνησης

Το σύστημα κίνησης θα αποτελείται από τρία στάδια (σχήμα 3.3). Η σχεδίαση του έγινε από τον κινητήριο τροχό προς τον κινητήρα. Έτσι αφού έγινε ο προσδιορισμός της επιθυμητής ταχύτητας και ροπής του τροχού πριν γίνει οριστική επιλογή των χαρακτηριστικών του κινητήρα πρέπει να γίνει η σχεδίαση του συστήματος μετάδοσης που θα αποτελείται από έναν μειωτήρα στροφών.



Σχήμα 4.3: Block διάγραμμα του συστήματος κίνησης

Ο λόγος που προκρίθηκε η χρησιμοποίηση ενός μειωτήρα στροφών σαν σύστημα μετάδοσης κίνησης αντί της απευθείας τοποθέτησης του κινητήρα στον τροχό βρίσκεται στην συσχέτιση βάρους και ροπής σ' ένα κινητήρα. Πιο συγκεκριμένα όπως αναφέραμε προηγουμένως όσο μεγαλύτερη είναι η ανάγκη σε ροπή τόσο μεγαλώνει και το βάρος του κινητήρα. Άρα ο στόχος μας με την χρησιμοποίηση αυτού του ενδιάμεσου σταδίου είναι να καλύψουμε τις ανάγκες σε ισχύ του οχήματός μας παράγοντας την στον κινητήρα σε υψηλότερες στροφές με αντίστοιχη μείωση της αποδιδόμενης ροπής. Έτσι για παράδειγμα αν είναι αναγκαία 220W στα 200 r/s χρειαζόμαστε ροπή:

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{220}{200} = 1.1 \text{ Nm}$$

Ενώ στα 300 r/s:

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{220}{300} = 0,73 \text{ Nm}$$

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό η βασική μας απαίτηση από το σύστημα μετάδοσης είναι να επιτυγχάνει όσο τον δυνατό μεγαλύτερη μείωση στροφών. Ωστόσο όπως κάθε άλλο μηχανικό σύστημα έτσι και αυτό εισάγει κάποιες απώλειες. Επομένως εισάγουμε και άλλη μια παράμετρο που είναι οι μηχανικές απώλειες. Πιο συγκεκριμένα πρέπει να βρεθεί μια διάταξη που από την μια θα προσφέρει ικανοποιητική μείωση στροφών αλλά από την άλλη δεν θα εισάγει τόσο μεγάλες απώλειες που θα αναιρούν τα ενδεχόμενα οφέλη.

Εξετάσαμε τρεις διαφορετικές διατάξεις:

- a) Μετάδοση με χρήση ιμάντα
- b) Μετάδοση με χρήση δύο συνεργαζόμενων τροχών
- c) Μετάδοση με χρήση ενός πλανητικού συστήματος

#### 4.4.1 Μετάδοση με χρήση ιμάντα

Αποτελείται από δύο τροχούς οι οποίοι συνεργάζονται με την βοήθεια ενός μη ελαστικού μέσου όπως ο ιμάντας. Ο λόγος μείωσης ισούται με τον λόγο των ακτινών των δύο τροχών και η ικανότητα μετάδοσης ισχύος εξαρτάται από το υλικό κατασκευής των τροχών και από το είδος αυλάκωσης του ιμάντα. Το βασικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης υλοποίησης είναι ότι εξαιτίας από τη μία της ολίσθησης που παρουσιάζεται μεταξύ του ιμάντα και του τροχού και από την άλλη της μικρής χαλάρωσης που εμφανίζει ο ιμάντας, έχουμε αυξημένες απώλειες που ανέρχονται στο 20 % της μεταδιδόμενης ισχύος.

Επιπλέον εισάγεται ένας ακόμα κατασκευαστικός περιορισμός αφού ο χώρος στο όχημα είναι περιορισμένος μ' αποτέλεσμα να μην μπορούμε να έχουμε

ικανοποιητική απόσταση μεταξύ των δύο συνεργαζόμενων τροχών και να περιορίζεται σημαντικά ο λόγος μετάδοσης.

#### 4.4.2 Μετάδοση με χρήση δύο συνεργαζόμενων τροχών

Αποτελείται από δύο τροχούς σε απευθείας συνεργασία χωρίς την παρεμβολή κάποιου άλλου μέσου (σχήμα 4.5). Ο λόγος μετάδοσης  $a$  είναι ίσος με τον λόγο των οδοντώσεων ή ισοδύναμα με τον λόγο των ακτινών τους. Άρα:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\frac{d_1}{m}}{\frac{d_2}{m}} = \frac{R_1}{R_2} \quad (4.6)$$

Αφού:

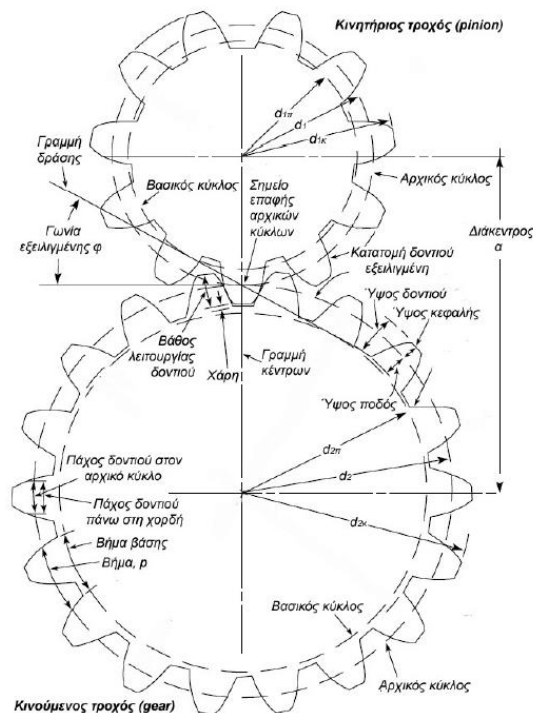
$$d = m * N \quad (4.7)$$

Όπου:

$d$ : η διάμετρος του τροχού

$N$ : ο αριθμός των οδοντώσεων

$m$ : το module



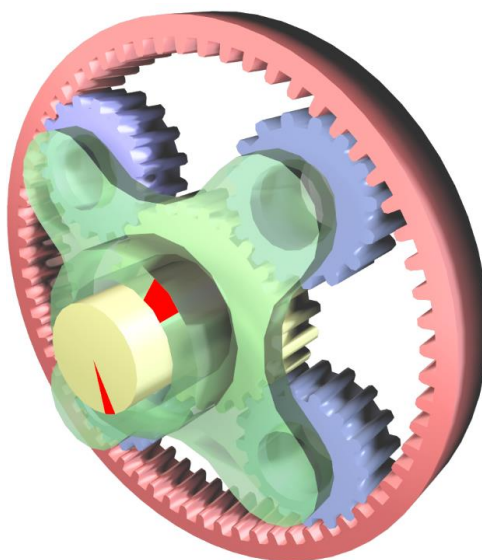
Σχήμα 4.5: Σύστημα μετάδοσης με χρήση δυο συνεργαζόμενων τροχών [18]



Με την συγκεκριμένη διάταξη επιτυγχάνουμε μείωση με σχετικά μεγάλο βαθμό απόδοσης που μπορεί να ξεπερνάει και το 90 % ανάλογα και με την φόρτιση και το υλικό κατασκευής των τροχών ωστόσο δεν είναι εύκολο να επιτύχουμε μεγαλύτερους λόγους μείωσης από 1:4. Αυτό οφείλεται στην μεγάλη φόρτιση που δέχονται τα δόντια των τροχών που συνεργάζονται κάθε φορά. Έτσι πρέπει να χρησιμοποιήσουμε υλοποιήσεις με μεγάλο module με μεγάλο ύψος όδοντος και με μεγάλο πλάτος όδοντος που μας οδηγεί σε πολύ βαριές διατάξεις.

#### 4.4.3 Μετάδοση με χρήση πλανητικού συστήματος

Αποτελείται από ένα τροχό που ονομάζεται ήλιος ή ριπίον και βρίσκεται στο κέντρο της διάταξης, τους πλανήτες που περιστρέφονται γύρω από τον ήλιο και τέλος την στεφάνη όπου είναι τοποθετημένη στο εξωτερικό περίβλημα (σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.6 : Πλανητικό σύστημα όπου με κίτρινο χρώμα απεικονίζεται το ριπίον με μπλε οι πλανήτες, με πράσινο ο πλανητικός φορέας και με κόκκινο η στεφάνη

Το πλανητικό σύστημα πλεονεκτεί σε σχέση με τα παραπάνω συστήματα που εξετάσαμε καθώς μπορεί να μας προσφέρει μεγάλο λόγο μείωσης πάνω από 1:7 με βαθμό απόδοσης κοντά στο 98%. Επίσης γενικά σαν σύστημα παρουσιάζει τέσσερεις βαθμούς ελευθερίας μ' αποτέλεσμα να προσφέρει διαφορετικούς συνδυασμούς εισόδου εξόδου και άρα και διαφορετικούς λόγους μετάδοσης. Τέλος η παρουσία των πλανητών οδηγεί σε καταμερισμό της μεταδιδόμενης ισχύος και επομένως μικρότερη καταπόνηση των τροχών. Αυτό δίνει την δυνατότητα να έχουμε τροχούς με μικρό module και πλάτος όδοντος επομένως και μικρότερο βάρος.

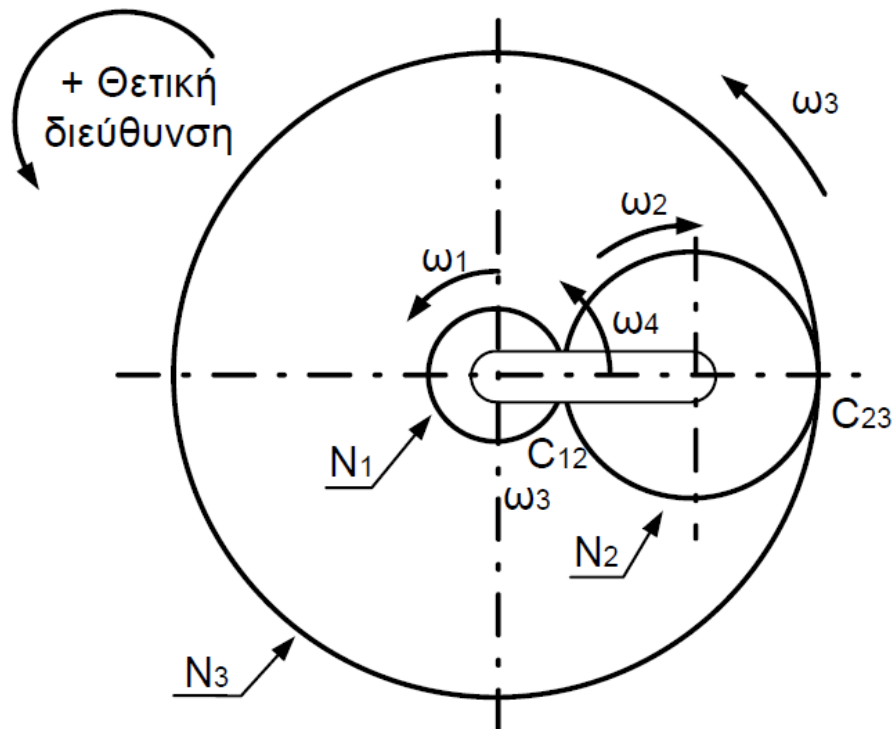
Η μηχανική ανάλυση γίνεται με βάση τις συμβάσεις του σχήματος 4.7

Για το σημείο  $C_{12}$

$$u_{12} = \omega_1 \cdot r_1 \quad (4.8)$$

$$u_{12} = \omega_4 \cdot (r_1 + r_2) + \omega_2 \cdot r_2 \quad (4.9)$$

$$\omega_1 \cdot r_1 = \omega_4 \cdot (r_1 + r_2) + \omega_2 \cdot r_2 \quad (4.10)$$



Σχήμα 4.7: Πλανητικός μηχανισμός<sup>[18]</sup>

Για το σημείο  $C_{12}$

$$u_{23} = \omega_3 \cdot r_3 \quad (4.11)$$

$$u_{23} = \omega_4 \cdot (r_1 + r_2) - \omega_2 \cdot r_2 \quad (4.12)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις χρησιμοποιώντας και τα παρακάτω:

$$\omega = \frac{2\pi}{60} \cdot n \quad (4.13)$$

$$r = \left(\frac{m}{2}\right) \cdot N \quad (4.14)$$

Τελικά έχουμε τις αναλυτικές μηχανικές σχέσεις που περιγράφουν το σύστημα:

$$n_1 \cdot N_1 = n_2 \cdot N_2 + n_4 \cdot (N_1 + N_2) \quad (4.15)$$

$$n_3 \cdot N_3 = n_2 \cdot N_2 - n_4 \cdot (N_1 + N_2) \quad (4.16)$$

Ανάλογα με το που τοποθετούμε την είσοδο του συστήματος και από που παίρνουμε την έξοδο μπορούμε να επιτύχουμε διαφορετικούς λόγους μετάδοσης είτε πρόκειται για μείωση ή για αύξηση στροφών. Οι κυριότερες επιλογές συνοψίζονται παρακάτω:

Εξωτερικός τροχός ακίνητος ( $n_3 = 0$  και  $\omega_3 = 0$ )

$$n_1 \cdot N_1 = n_4 \cdot (N_1 + N_2) + n_4 \cdot (N_1 + N_2) \quad (4.17)$$

$$i_{1,4} = \frac{n_1}{n_4} = \frac{2 \cdot (N_1 + N_2)}{N_1} = 2 + \frac{2 \cdot N_2}{N_1} \quad (4.18)$$

Ο ήλιος ακίνητος ( $n_1 = 0$  και  $\omega_1 = 0$ )

$$n_2 \cdot N_2 = -n_4 \cdot (N_1 + N_2) \quad (4.19)$$

$$n_3 \cdot N_3 = -2 \cdot n_4 \cdot (N_1 + N_2) \quad (4.20)$$

$$i_{3,4} = \frac{n_3}{n_4} = \frac{-2 \cdot (N_1 + N_2)}{N_3} = -\frac{N_1 + N_3}{N_3} \quad (4.21)$$

Βραχίονας ακίνητος ( $n_4 = 0$  και  $\omega_4 = 0$ )

$$n_1 \cdot N_1 = n_2 \cdot N_2 \quad (4.22)$$

$$n_2 \cdot N_2 = n_3 \cdot N_3 \quad (4.23)$$

$$i_{1,3} = \frac{n_1}{n_3} = \frac{N_3}{N_1} \quad (4.24)$$

#### 4.4.4 Σχεδίαση συστήματος κίνησης

Έχοντας αναλύσει όλες τις δυνατές επιλογές για το σύστημα μετάδοσης αποφασίστηκε ότι η βέλτιστη επιλογή είναι το πλανητικό σύστημα, καθώς συνδυάζει χαμηλό βάρος υψηλό βαθμό απόδοσης, υψηλό λόγο μετάδοσης δίνοντας παράλληλα την ικανότητα διατήρησης της ομοαξονικής μετάδοσης. Το επόμενο βήμα είναι ο λεπτομερής υπολογισμός των διαστάσεων των γραναζιών και η επιλογή υλικού.

Αρχικά θα αναζητήσουμε λόγο μετάδοσης 7:1 και θα χρησιμοποιήσουμε ακίνητο βραχίονα. Για το pinion ελάχιστος αριθμός οδοντώσεων είναι 15. Άρα μια ασφαλής επιλογή είναι  $N_1 = 20$  δόντια. Επομένως για την στεφάνη ισχύει:

$$N_3 = i_{1,3} \cdot N_1 = 7 \cdot 20 = 140 \text{ δόντια} \quad (4.25)$$

Και για τους πλανήτες:

$$N_2 = N_3 - N_1 = 140 - 20 = 120 \text{ δόντια} \quad (4.26)$$

Στη συνέχεια πρέπει να αποφασίσουμε το module, όπου μια καλή επιλογή λόγω μικρής ισχύος είναι module=1.5 mm

Άρα για τις διαμέτρους της στεφάνης του pinion και των πλανητών ισχύει:

$$d_1 = m \cdot N_1 = 1.5 \cdot 20 = 30 \text{ mm}$$

$$d_2 = m \cdot N_2 = 1.5 \cdot 120 = 180 \text{ mm}$$

$$d_3 = m \cdot N_3 = 1.5 \cdot 140 = 210 \text{ mm}$$

Τέλος ο μέγιστος αριθμός των πλανητών καθορίζεται από την σχέση:

$$\max \text{planets} = 2.8 \cdot \left( \frac{N_1}{N_2} + 1 \right) = 2.8 \cdot \left( \frac{20}{120} + 1 \right) = 2.97 \quad (4.27)$$

Άρα θα χρησιμοποιηθούν δύο πλανήτες.

Συγκεντρωτικά όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά των οδοντώσεων του συστήματος παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1

Μέγεθος	Σχέση υπολογισμού	Pinion	Πλανήτες	Στεφάνη
Αριθμός δοντιών		20	120	140
Module (mm)		1.5	1.5	1.5
Γωνία εξελιγμένης (mm)		20	20	20
Ύψος κεφαλής (mm)	$h_k = m$	1.5	1.5	1.5
Ύψος ποδός (mm)	$h_\pi = 1.25 \cdot m$	1.875	1.875	1.875
Αρχική διάμετρος (mm)	$D = m \cdot N$	30	180	210
Εξωτερική διάμετρος (mm)	$D_o = m \cdot (N + 2)$	33	183	213
Διάμετρος βάσης (mm)	$D_b = D \cdot \cos\varphi$	28.19	169.14	197.33
Διάμετρος ρίζας (mm)	$D_r = m \cdot (N - 2.5)$	26.25	176.25	206.25
Βήμα αρχικού κύκλου (mm)	$p = m \cdot \pi$	4.7124	4.7124	4.7124
Βήμα κύκλου βάσης (mm)	$p_b = p \cdot \cos\varphi$	4.4282	4.4282	4.4282
Πάχος δοντιού	$t = \frac{m \cdot p}{2}$	2.3562	2.3562	2.3562
Πλάτος δοντιού	$9m \leq b \leq 13m$	15	15	15

Πίνακας 4.1 : Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πλανητικού συστήματος

Το είδος του υλικού θα καθοριστεί με βάση τις ανάγκες σε αντοχή σε κάμψη και σε επιφανειακή πίεση. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές μέθοδοι για τον προσδιορισμό των παραπάνω μεγεθών και επιλέχθηκε για τον έλεγχο αντοχής σε κάμψη η μέθοδος Lewis και για την επιφανειακή αντοχή η μέθοδος Buckingham.

Αρχικά θα προσδιοριστούν μια σειρά από μεγέθη που θα είναι απαραίτητα για τους υπολογισμούς

Η μεταδιδόμενη ισχύ υπολογίζεται ότι θα είναι

$$P_{out} = 220 \text{ W} = 0.29 \text{ HP}$$

Ο κινητήριος άξονας μεταδίδει στρεπτική ροπή ίση με:

$$M_t = 71620 \cdot \frac{N}{n_1} = 71620 \cdot \frac{0.29}{1995} = 10.41 \text{ kp} \cdot \text{cm} \quad (4.28)$$

Η περιφερειακή δύναμη στο pinion είναι:

$$F_t = \frac{2 \cdot M_t}{d_1} = \frac{2 \cdot 10.41}{3} = 6.94 \text{ kp} = 69.4 \text{ N} \quad (4.29)$$

Η περιφερειακή ταχύτητα είναι:

$$u_p = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot n_1}{1000 \cdot 60} = \frac{\pi \cdot 30 \cdot 1995}{1000 \cdot 60} = 3.13 \text{ m/s} \quad (4.30)$$

$$F_d = \frac{7 + u_p}{7} \cdot F_t = \frac{7 + 3.13}{7} \cdot 69.4 = 100.43 \text{ N} \quad (4.31)$$

Η τάση κατά Lewis υπολογίζεται από την σχέση:

$$\sigma = k_{planet} \frac{F_d \cdot k_t}{b \cdot y \cdot p} \quad (4.32)$$

Όπου

b: το πλάτος του δοντιού

p: το βήμα οδόντωσης

$k_{planet}$  Συντελεστής που εξαρτάται από τον αριθμό των πλανητών. Κανονικά αφού έχουμε δύο πλανήτες θα έπρεπε να υπήρχε ίσος καταμερισμός της ισχύος ανά πλανήτη και η σταθερά να έπαιρνε τιμή 0.5. Για ασφάλεια στους υπολογισμούς όμως θα χρησιμοποιήσουμε την τιμή 0.8.

y: ο συντελεστής Lewis υπολογίζεται από τον πίνακα 4.2

$$k_t = 0.18 + \left(\frac{t}{\rho_f}\right)^{0.15} \cdot \left(\frac{t}{e}\right)^{0.45} \quad (4.33)$$

Όπου:

t: το πάχος του δοντιού

$\rho_f$  η ακτίνα καμπυλότητας στη βάση του δοντιού με  $\rho_f = 1 \text{ mm}$

ει απόσταση του σημείου εφαρμογής της δύναμης από την βάση με

$$e=2.2 \cdot m=3.3 \text{ mm}$$

Άρα:

$$k_t = 0.18 + \left(\frac{2.3562}{1}\right)^{0.15} \cdot \left(\frac{2.3562}{3.3}\right)^{0.45} = 1.1572$$

Επομένως η τάση κατά Lewis για το ρινίοντους πλανήτες και την στεφάνη αντίστοιχα είναι:

$$\sigma_1 = 0.8 \cdot \frac{100.43 \cdot 1.1572}{15 \cdot 0.114 \cdot 4.7124} = 11.53 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = 0.8 \cdot \frac{100.43 \cdot 1.1572}{15 \cdot 0.143 \cdot 4.7124} = 9.2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = 0.8 \cdot \frac{100.43 \cdot 1.1572}{15 \cdot 0.145 \cdot 4.7124} = 9.07 \text{ MPa}$$

Η μέγιστη ζητούμενη τάση απαιτείται στο ρινίον. Άρα η επιτρεπόμενη τάση που μπορεί να προσφέρει το επιθυμητό υλικό πρέπει να είναι:

$$\sigma_1 \leq \sigma_{\text{επιτ}} \Rightarrow \sigma_{\text{sat}} \cdot \frac{K_L}{K_T \cdot K_R} \geq 11.53$$

Όπου

$\sigma_{\text{sat}}$  η επιτρεπόμενη τάση του υλικού

$K_L$  συντελεστής διάρκειας ζωής

$K_T$  συντελεστής θερμοκρασίας (για θερμοκρασία  $T < 70^\circ$   $K_T = 1$ )

$K_R$  συντελεστής ασφάλειας για κανονικές απαιτήσεις σχεδιασμού 1.33

Άρα για την επιτρεπόμενη τάση του υλικού ισχύει:

$$\sigma_{\text{sat}} \geq \frac{K_T \cdot K_R \cdot 4.384}{K_L} = \frac{1 \cdot 1.33}{1} \cdot 4.384 = 15.33 \text{ MPa} \quad (4.34)$$

Ο υπολογισμός της επιφανειακής πίεσης γίνεται από την εξίσωση σχεδιασμού Buckingham:

$$K = \frac{F_t}{d \cdot b \cdot Q \cdot \cos\varphi} \quad (4.35)$$

Όπου

Qο γεωμετρικός συντελεστής Buckingham όπου υπολογίζεται από την σχέση:

$$Q = \frac{2 \cdot N_2}{N_1 + N_2} \quad (4.36)$$

Και η τιμή του για κάθε γρανάζι ξεχωριστά:

$$Q_1 = \frac{2 \cdot 120}{120 + 20} = 1.7 \text{ N/mm}^2$$
$$Q_2 = Q_3 = \frac{2 \cdot 140}{120 + 140} = 1.1 \text{ N/mm}^2$$

Άρα η τιμή της σταθεράς K για το ριπίοντους πλανήτες και την στεφάνη αντίστοιχα είναι:

$$K_1 = \frac{69.4}{30 \cdot 15 \cdot 1.7 \cdot \cos 20} \approx 0.1 \text{ MPa}$$
$$K_2 = \frac{69.4}{180 \cdot 15 \cdot 1.1 \cdot \cos 20} \approx 0.03 \text{ MPa}$$
$$K_3 = \frac{69.4}{210 \cdot 15 \cdot 1.1 \cdot \cos 20} \approx 0.02 \text{ MPa}$$

Συνοψίζοντας τις απαιτήσεις μας από το υλικό που θα απαρτίζει τον πλανητικό μηχανισμό έχουμε:

- Αντοχή σε κάμψη 15.33MPa
- Επιφανειακή αντοχή 0.1 MPa

Επίσης συνυπολογίζοντας και τις ανάγκες συνολικά της εφαρμογής προσθέτουμε:

- Χαμηλό ειδικό βάρος
- Ικανοποιητική ικανότητα απαγωγής θερμότητας

Ύστερα από εκτενή έρευνα διαπιστώθηκε ότι μια πολύ καλή επιλογή είναι το υλικό ΡΤΦΕ με 25% πρόσμιξη άνθρακα καθώς παρουσιάζει αντοχή σε κάμψη 16 MPa και επιφανειακή αντοχή σε θλίψη 6.89 MPa

Αριθμός δοντιών	Φορτίο στην κεφαλή								Φορτίο στη μέση			
	14.5°		20°		20° βαθιά		25°		14.5°		20°	
	Y=πγ	γ	Y=πγ	γ	Y=πγ	γ	Y=πγ	γ	Y=πγ	γ	Y=πγ	γ
10	0.176	0.056	0.201	0.064	0.261	0.083	0.238	0.076				
11	0.192	0.061	0.226	0.072	0.289	0.092	0.259	0.082				
12	0.210	0.067	0.245	0.078	0.311	0.099	0.277	0.088	0.355	0.113	0.415	0.132
13	0.223	0.071	0.264	0.084	0.324	0.103	0.293	0.093	0.377	0.120	0.443	0.141
14	0.236	0.075	0.276	0.088	0.339	0.108	0.307	0.098	0.399	0.127	0.468	0.149
15	0.245	0.078	0.289	0.092	0.349	0.111	0.320	0.102	0.415	0.132	0.490	0.156
16	0.255	0.081	0.295	0.094	0.360	0.115	0.332	0.106	0.430	0.137	0.503	0.160
17	0.264	0.084	0.302	0.096	0.368	0.117	0.342	0.109	0.446	0.142	0.512	0.163
18	0.270	0.086	0.308	0.098	0.377	0.120	0.352	0.112	0.459	0.146	0.522	0.166
19	0.277	0.088	0.314	0.100	0.386	0.123	0.361	0.115	0.471	0.150	0.534	0.170
20	0.283	0.090	0.320	0.102	0.393	0.125	0.369	0.117	0.481	0.153	0.544	0.173
21	0.289	0.092	0.326	0.104	0.399	0.127	0.377	0.120	0.490	0.156	0.553	0.176
22	0.292	0.093	0.330	0.105	0.404	0.129	0.384	0.122	0.496	0.158	0.559	0.178
23	0.296	0.094	0.333	0.106	0.408	0.130	0.390	0.124	0.502	0.160	0.565	0.180
24	0.302	0.096	0.337	0.107	0.411	0.131	0.396	0.126	0.509	0.162	0.572	0.182
25	0.305	0.097	0.340	0.108	0.416	0.132	0.402	0.128	0.515	0.164	0.580	0.185
26	0.308	0.098	0.344	0.109	0.421	0.134	0.407	0.130	0.522	0.166	0.584	0.186
27	0.311	0.099	0.348	0.111	0.426	0.136	0.412	0.131	0.528	0.168	0.588	0.187
28	0.314	0.100	0.352	0.112	0.430	0.137	0.417	0.133	0.534	0.170	0.592	0.188
29	0.316	0.101	0.355	0.113	0.434	0.138	0.421	0.134	0.537	0.171	0.599	0.191
30	0.318	0.101	0.358	0.114	0.437	0.139	0.425	0.135	0.540	0.172	0.608	0.193
31	0.320	0.102	0.361	0.115	0.440	0.140	0.429	0.137	0.554	0.176	0.611	0.194
32	0.322	0.102	0.364	0.116	0.443	0.141	0.433	0.138	0.547	0.174	0.617	0.196
33	0.324	0.103	0.367	0.117	0.445	0.142	0.436	0.139	0.550	0.175	0.623	0.198
34	0.326	0.104	0.371	0.118	0.447	0.142	0.440	0.140	0.553	0.176	0.628	0.200
35	0.327	0.104	0.373	0.119	0.449	0.143	0.443	0.141	0.556	0.177	0.633	0.201
36	0.329	0.105	0.377	0.120	0.451	0.144	0.446	0.142	0.559	0.178	0.639	0.203
37	0.330	0.105	0.380	0.121	0.454	0.145	0.449	0.143	0.563	0.179	0.645	0.205
38	0.333	0.106	0.384	0.122	0.455	0.145	0.452	0.144	0.565	0.180	0.650	0.207
39	0.335	0.107	0.386	0.123	0.457	0.145	0.454	0.145	0.568	0.181	0.655	0.208
40	0.336	0.107	0.389	0.124	0.459	0.146	0.457	0.145	0.570	0.181	0.659	0.210
43	0.339	0.108	0.397	0.126	0.467	0.149	0.464	0.148	0.574	0.183	0.668	0.213
45	0.340	0.108	0.399	0.127	0.468	0.149	0.468	0.149	0.579	0.184	0.678	0.216
50	0.346	0.110	0.408	0.130	0.474	0.151	0.477	0.152	0.588	0.187	0.694	0.221
55	0.352	0.112	0.415	0.132	0.480	0.153	0.484	0.154	0.596	0.190	0.704	0.224
60	0.355	0.113	0.421	0.134	0.484	0.154	0.491	0.156	0.603	0.192	0.713	0.227
65	0.358	0.114	0.425	0.135	0.488	0.155	0.496	0.158	0.607	0.193	0.721	0.230
70	0.360	0.115	0.429	0.137	0.493	0.157	0.501	0.159	0.610	0.194	0.728	0.232
75	0.361	0.115	0.433	0.138	0.496	0.158	0.506	0.161	0.613	0.195	0.735	0.234
80	0.363	0.116	0.436	0.139	0.499	0.159	0.509	0.162	0.615	0.196	0.739	0.235
90	0.366	0.117	0.442	0.141	0.503	0.160	0.516	0.164	0.619	0.197	0.747	0.238
100	0.368	0.117	0.446	0.142	0.506	0.161	0.521	0.166	0.622	0.198	0.755	0.240
150	0.375	0.119	0.458	0.146	0.518	0.165	0.537	0.171	0.635	0.202	0.778	0.248
200	0.378	0.120	0.463	0.147	0.524	0.167	0.545	0.173	0.640	0.204	0.787	0.251
300	0.382	0.122	0.471	0.150	0.534	0.170	0.554	0.176	0.650	0.207	0.801	0.255
Κανόνας	0.390	0.124	0.484	0.154	0.550	0.175	0.566	0.180	0.660	0.210	0.823	0.262

Πίνακας 4.2: Συντελεστής Lewis



#### 4.5 Καθορισμός επίδοσης κινητήρα

Η στεφάνη του πλανητικού συστήματος θα είναι ένα σώμα με τον πίσω τροχό του οχήματος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ακτίνα του πίσω τροχού μαζί με το λάστιχο είναι 0,239 μ τότε η μέγιστη ροπή που απαιτείται κατά την επιτάχυνση θα είναι:

$$T_{max} = F_{temax} * r_{wheel} = 23 * 0,239 \simeq 5,5 Nm \quad (4.37)$$

Και κατά την διάρκεια του αγώνα:

$$T_{mean} = F_{temean} * r_{wheel} = 4,6 * 0,239 \simeq 1,1 Nm \quad (4.38)$$

Ωστόσο στα πλαίσια της σύγκρισης με τον υφιστάμενο κινητήρα αλλά και με βάση τα στατιστικά στοιχεία που έχουμε από τον αγώνα θα ορίσουμε τις τιμές

$$T_{max} = 7,5 Nm$$

$$T_{mean} = 2 Nm$$

Όσον αφορά τον κινητήρα αφού έχουμε λόγο μετάδοσης 1:7 πρέπει να παράγει ροπή:

$$T_{max}^{motor} = \frac{T_{max}}{7} = \frac{7,5}{7} \simeq 1,1 Nm$$

$$T_{mean}^{motor} = \frac{T_{mean}}{7} = \frac{2}{7} \simeq 0,3 Nm$$

## Κεφάλαιο 5 Σχεδίαση και Ανάλυση κινητήρα 220 W

### 5.1 Προκαταρκτική σχεδίαση

Στην προηγούμενη ενότητα έγινε καθορισμός της απαιτούμενης δύναμης πρόωσης και ροπής που θα πρέπει να ασκείται στο όχημα. Στη συνέχεια αυτά τα μεγέθη θα μεταφραστούν σε ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη με σκοπό να γίνει η προκαταρκτική σχεδίαση και μια αρχική διαστασιολόγηση του κινητήρα. Συνοψίζοντας τα παραπάνω:

- Η μέση ταχύτητα του οχήματος είναι:  $u_{mean} = 25 \text{ km/h} = 6,95 \text{ m/s}$
- Με ακτίνα τροχού:  $r = 0,239 \text{ m}$

Επομένως η γωνιακή ταχύτητα με την οποία θα περιστρέφεται ο τροχός θα είναι:

$$\omega_w = \frac{u_{mean}}{r} = \frac{6,95}{0,239} = 29,1 \text{ r/s} \quad (5.1)$$

Και οι ονομαστικές στροφές θα είναι:

$$n_w = \frac{\omega_w * 60}{2 * \pi} = \frac{29,1 * 60}{2 * 3,14} = 278 \text{ rpm} \quad (5.2)$$

Άρα συνυπολογίζοντας ότι ο λόγος μείωσης του συστήματος μετάδοσης είναι 1:7 υπολογίζουμε την γωνιακή ταχύτητα και τις ονομαστικές στροφές του κινητήρα:

$$\omega_m = A * \omega_w = 7 * 29,1 = 203,7 \text{ r/s} \quad (5.3)$$

$$n_m = A * n_w = 7 * 278 = 1946 \text{ rpm} \quad (5.4)$$

Και τέλος την ονομαστική ισχύ του κινητήρα που ορίζεται ως το γινόμενο της αποδιδόμενης ροπής επί την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής:

$$P_{el} = T_{el} * \omega_m = 1,1 * 203,7 \simeq 220 \text{ W} \quad (5.5)$$

### 5.1.1 Διαστασιολόγηση διακένου

Η διαστασιολόγηση του διακένου περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της επιφάνειας διακένου που θα εξασφαλίσει την απαραίτητη ηλεκτρομαγνητική ροπή, τόσο στη μόνιμη όσο και μεταβατική κατάσταση λειτουργίας της μηχανής. Η ροπή διακένου  $T_e$  θα υπολογισθεί με βάση τη μέση εφαπτομενική πίεση των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο και την επιφάνεια του διακένου  $A$ , σύμφωνα με τις επόμενες σχέσεις (όπου  $D$  είναι η διάμετρος του διακένου και  $L$  το ενεργό μήκος της μηχανής):

$$F_t = P_t \cdot A \quad (5.6)$$

$$T_e = \frac{1}{2} \cdot D \cdot F_t \quad (5.7)$$

Και συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις έχουμε:

$$T_e = \frac{\pi}{2} \cdot D^2 \cdot L \cdot P_t \quad (5.8)$$

Η μέση μαγνητική δύναμη στο διάκενο υπολογίζεται από την σχέση:

$$F_t = L \cdot \oint_c B_n \cdot H_c \cdot dl = \frac{L}{\mu_o} \cdot \oint_c B_n \cdot B_t \cdot dl \quad (5.9)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η επιφάνεια διακένου είναι:

$$A = 2 \cdot \pi \cdot \frac{D}{2} \cdot L = \pi \cdot D \cdot L \quad (5.10)$$

Τελικά η μέση πίεση των μαγνητικών δυνάμεων στο μέσο του διακένου θα είναι:

$$P_t = \frac{1}{\pi \cdot D \cdot \mu_o} \cdot \oint_c B_n \cdot H_c \cdot dl \quad (5.11)$$

Στη συνέχεια όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη ενότητα η μέση μαγνητική επαγωγή στο διάκενο θα είναι  $\bar{B}=0,5$  T και θεωρώντας γωνία μεταξύ ακτινικής συνιστώσας και εφαπτομενικής  $45^\circ$  θα έχουμε:

$$B_n = B_t = 0,5 \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,354 \quad (5.12)$$

Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε την επιθυμητή τιμή της εφαπτομενικής πίεσης

$$P_t = \frac{B_n \cdot B_t \cdot \pi \cdot D}{\mu_o \cdot \pi \cdot D} = \frac{B_n \cdot B_t}{\mu_o} = \frac{0,354^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \approx 100 \text{ KN/m}^2$$

Τέλος αντικαθιστώντας στην σχέση (5.8) έχουμε:

$$D^2 \cdot L = \frac{2 \cdot T_e}{\pi \cdot P_t} = \frac{2 \cdot 1,2}{\pi \cdot 100.000} \text{ m}^3 = 7.640 \text{ mm}^3$$

Ξεκινώντας με την υπόθεση ότι  $D \approx L = 40$  mm και ύστερα από αρκετές δοκιμές καταλήγουμε στις παρακάτω διαστάσεις:

$$D = 42 \text{ mm}$$

$$L = 40 \text{ mm}$$

Όπως αναφέραμε προηγουμένως το πλάτος διακένου εξαρτάται από την ακρίβεια κοπής κατά την διάρκεια της κατασκευής. Στην δικιά μας περίπτωση αυτό ανέρχεται σε:

$$g = 0,7 \text{ mm}$$

### 5.1.2 Μελέτη στάτη

Βασικός παράγοντας για να γίνει η επιλογή των αριθμών των πόλων της μηχανής είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της μηχανής η οποία υπολογίζεται από την σχέση:

$$\omega_N = \frac{4 \cdot \pi \cdot f_{el}}{P} \quad (5.13)$$

Όπου:

P: ο αριθμός των πόλων

$f_{el}$  η συχνότητα λειτουργίας

Λύνοντας την παραπάνω σχέση ως προς το πηλίκο P/f έχουμε

$$\frac{f_{el}}{P} = 16,218$$

Για να γίνει καλύτερη εκτίμηση των δυνατών επιλογών κατασκευάζουμε των παρακάτω πίνακα:

P	$f_{el}$ (Hz)
2	32,44
4	64,87
8	129,74
10	162,18

Πίνακας 5.1: Αντιστοιχία πόλων με συχνότητα

Για να γίνει δυνατό να αποφασίσουμε τον κατάλληλο αριθμό πόλων και κατά συνέπεια και την συχνότητα λειτουργίας πρέπει να συνυπολογίσουμε το γεγονός ότι οι απώλειες σιδήρου αυξάνονται όσο αυξάνεται και η συχνότητα. Επομένως ιδανικές υλοποιήσεις είναι αυτές με όσο το δυνατόν χαμηλότερη συχνότητα λειτουργίας. Άρα είτε η διπολική είτε η τετραπολική. Η οριστική επιλογή θα γίνει στη συνέχεια μετά από εκτενή ανάλυση και σύγκρισή τους ωστόσο για να συνεχίσουμε την ανάλυσή μας θα επιλέξουμε την τετραπολική.

Η μέση μαγνητική ροή ανά πόλο είναι:

$$\Phi = \frac{\bar{B} \cdot L \cdot D \cdot \pi}{P} = \frac{0,5 \cdot 40 \cdot 42 \cdot \pi}{4} = 0,659 \text{ mWb} \quad (5.14)$$

Θεωρώντας ότι η επιθυμητή τάση τροφοδοσίας θα είναι 11 Νέχουμε για της σπείρες κάθε φάσης:

$$N_i = \frac{V_{RMS}}{4,44 \cdot f \cdot \frac{P}{2} \cdot \Phi} = \frac{11}{4,44 \cdot 64,87 \cdot 2 \cdot 0,659 \text{ mWb}} \approx 27 \quad (5.15)$$

Για την ενεργό τιμή του φασικού ρεύματος ισχύει:

$$I_{RMS} = \frac{P_{el}}{3 \cdot V_{RMS} \cdot \cos\varphi} = \frac{220}{3 \cdot 11 \cdot 0,8} = 8,33 \text{ A} \quad (5.16)$$

Όπου κάναμε την υπόθεση ότι ο κινητήρας λειτουργεί με συντελεστή ισχύος 0,8 επαγωγικό.

Η μαγνητεργετική δύναμη δίνεται από την σχέση:

$$ME\Delta = I_{RMS} \cdot N_i = 27 \cdot 8,33 = 224,9 \text{ A} - \varepsilon \quad (5.17)$$

Για να υπολογίσουμε την απαιτούμενη διατομή αύλακος πρέπει πρώτα να ορίσουμε την πυκνότητα ρεύματος. Όπως αναφέραμε προηγουμένως για να μην έχουμε εξαναγκασμένη ψύξη πρέπει η πυκνότητα να είναι το πολύ ίση με 4 A/mm<sup>2</sup>. Άρα:

$$A_{cu} = \frac{ME\Delta}{J} = \frac{224,9}{4} = 56,22 \text{ mm}^2 \quad (5.18)$$

Λόγω της δυσκολίας που παρουσιάζεται κατά την κατασκευή του τυλίγματος του στάτη ο συντελεστής πληρότητας θα είναι αρκετά χαμηλός και ίσος με 0,3. Επομένως η συνολική διατομή της αύλακας θα πρέπει να είναι τουλάχιστον:

$$A_{slot} = \frac{A_{cu}}{0,3} = \frac{56,22}{0,3} = 187,4 \text{ mm}^2$$

#### Υπολογισμός ειδικών φορτίσεων

Όσον αφορά την ειδική μαγνητική φόρτιση αυτή είναι:

$$B_{av} = 0,5 \text{ T}$$

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση υπολογίζεται ως εξής

$$\alpha_c = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_i \cdot \frac{P}{2} \cdot I_{RMS}}{\pi \cdot D} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 27 \cdot 2 \cdot 8,33}{\pi \cdot 4,2} = 20,46 \text{ A} - \varepsilon/m \quad (5.19)$$

### 5.1.3 Μελέτη δρομέα

Στις μηχανές μόνιμων μαγνητών, όπου ο δρομέας δε φέρει τύλιγμα, βασικό κριτήριο κατά το σχεδιασμό είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών πυρήνα. Στην παράγραφο αυτή επιχειρείται μια πρώτη εκτίμηση για τις διαστάσεις των μαγνητών του δρομέα, και εξετάζεται μια τυπική καμπύλη απομαγνήτισης.

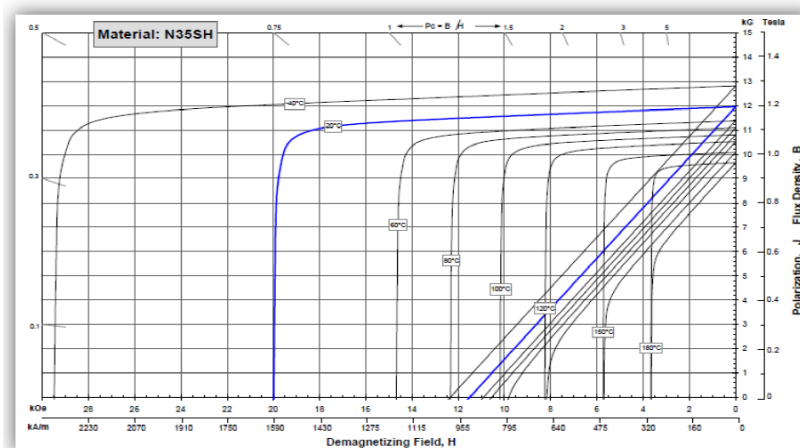
Όσον αφορά το υλικό του μόνιμου μαγνήτη, οι μαγνήτες κράματος Νεοδυμίου-Σιδήρου-Βορίου (NdFeB), αποτελούν την καταλληλότερη επιλογή, καθώς:

- προσφέρουν την μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας
- είναι ανθεκτικοί σε φαινόμενα απομαγνήτισης.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα αυτού του τύπου μαγνητών, είναι ότι:

- δεν είναι ιδιαίτερα ανθεκτικοί σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών
- έχουν μικρή μηχανική αντοχή με αποτέλεσμα να υπάρχει ενδεχόμενο θραύσης τους
- το Νεοδύμιο αποτελεί σπάνια γαία (Rare earth element), και η προμήθεια μαγνητών νεοδυμίου μπορεί να γίνει μόνο από πολύ συγκεκριμένες χώρες (κυρίως την Κίνα).

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 5.1 Καμπύλη απομαγνήτισης μαγνητών N40

Για να γίνει επαλήθευση υπολογίζουμε την επίδραση του πεδίου του στάτη στη μαγνητική επαγωγή μέσω της ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης και της καμπύλης απομαγνήτισης. Συγκεκριμένα η ειδική ηλεκτρική φόρτιση είναι:

$$ac = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_i \cdot \frac{P}{2} \cdot I_{RMS}}{\pi \cdot D} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 27 \cdot 2 \cdot 8,33}{\pi \cdot 4,2} = 20,46 \text{ A} \cdot \text{ε}/\text{m}$$

Αν θεωρήσουμε ότι η καμπύλη απομαγνήτισης είναι ευθεία περιγράφεται από την σχέση:

$$H(B) = \frac{929,3}{1,28} \cdot B - 929,3 = 726 \cdot B - 929,3 \quad (5.20)$$

Όπου H σε  $kA/m$  και B σε Tesla

Με τη βοήθεια της παραπάνω εξίσωσης συσχετισμού μαγνητεγερτικής δύναμης και πυκνότητας μαγνητικής ροής, μπορούμε να υπολογίσουμε την μείωση στην ονομαστική φόρτιση της πυκνότητας της μαγνητικής ροής στην επιφάνεια του μαγνήτη από την σχέση:

$$\Delta B = \frac{ac}{726} = 0,028 \quad (5.21)$$

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.

#### 5.1.4 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 ταιριάζει καλύτερα στα κριτήρια που έχουμε θέσει.

Στη συνέχεια, γίνεται η επιλογή του αριθμού στρώσεων του τυλίγματος. Υπάρχουν τα τυλίγματα μονής στρώσης, στα οποία τα πηνία τυλίγονται γύρω από διαδοχικά δόντια, καθώς και διπλής στρώσης, όπου τα πηνία τυλίγονται γύρω από κάθε δόντι.



Στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 5.2) παρουσιάζεται μία απλή σύγκριση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων του τυλίγματος μονής στρώσης και του τυλίγματος διπλής στρώσης.

	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 5.2 Σύγκριση χαρακτηριστικών τυλίγματος απλής και διπλής στρώσης

Παρατηρώντας τον πίνακα 5.2 βλέπουμε ότι οι μηχανές με κλασματικό βήμα μονής στρώσης παρουσιάζουν υψηλότερες αρμονικές χώρου στην κατανομή της ΜΕΔ λόγω του μικρού αριθμού αυλακών ανά πόλο και ανά φάση. Η συγκεκριμένη αρμονική παραμόρφωση εισάγει επιπλέον απώλειες λόγω των δινορρευμάτων στον πυρήνα. Για να μειώσουμε η ακόμα και να εξαλείψουμε τις αρμονικές χώρου της αντίδρασης τυμπάνου τοποθετούμε πολλαπλές στρώσεις τυλίγματος καθώς αυτό 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.

Ο αριθμός των πόλων, όπως ήδη αναφέραμε, θα καθοριστεί από την ταχύτητα. Έτσι για να επιτευχθεί σύγχρονη ταχύτητα 1995 ΣΑΛ πρέπει να έχουμε είτε δύο είτε

τέσσερεις πόλους. Στην συνέχεια θα εισάγουμε μια ακόμα παράμετρο στην επιλογή μας που είναι ο αριθμός των αυλακών και κυρίως ο συντελεστής τυλίγματος. Όπως αποδείχτηκε στο δεύτερο κεφάλαιο η μιγαδική ισχύς εξόδου της μηχανής είναι ευθέως ανάλογη του συντελεστή τυλίγματος. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι πόλοι οι αύλακες και οι συντελεστές τυλίγματος.

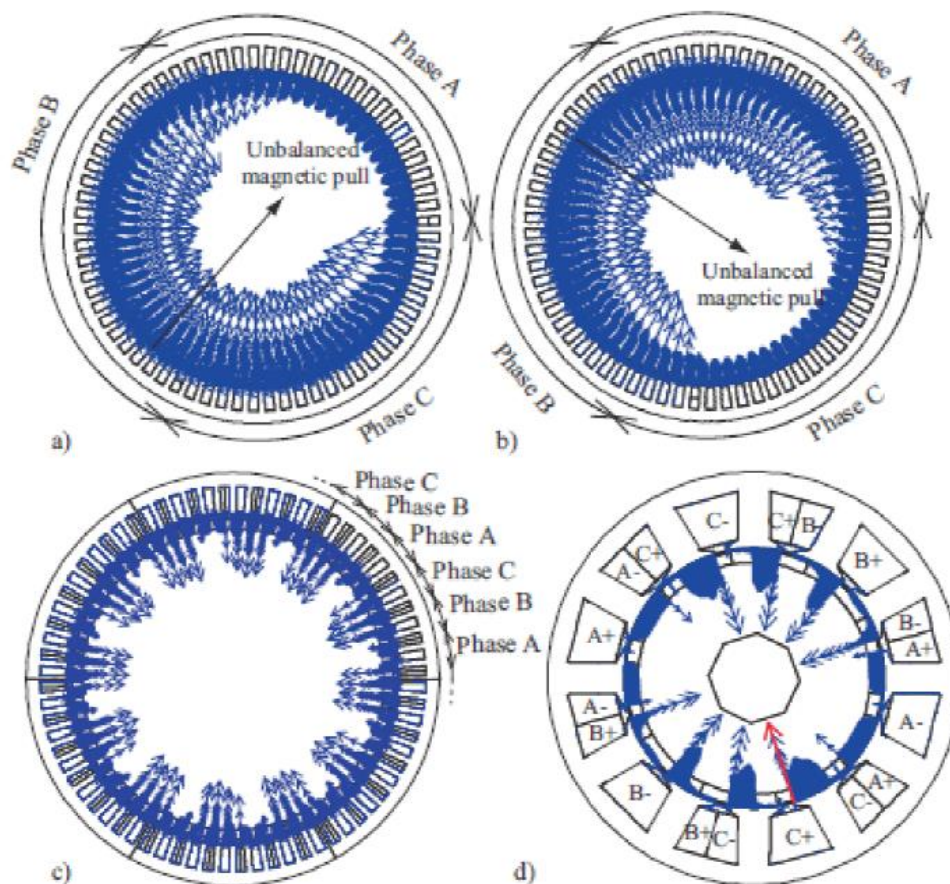
Qs/P	2	4
3	0,866	0,866
6	-	0,866
9	-	0,617

*Πίνακας 5.3 Επιλογή συνδυασμού αριθμού πόλων και δοντιών για μέγιστο συντελεστή τυλίγματος*

Βλέπουμε ότι ο λιγότερα αποδοτικός συνδυασμός είναι η τετραπολική με εννέα αύλακες. Ωστόσο δεν μπορούμε να αποφανθούμε από το στάδιο της προκαρκτικής σχεδίασης και ο τελικός συνδυασμός θα προέλθει ύστερα από την περαιτέρω ανάλυση όλων των δυνατών συνδυασμών αξιολογώντας και άλλα χαρακτηριστικά λειτουργίας όπως η ποιότητα ισχύος.

Ένας παράγοντας που θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη στο σημείο αυτό είναι η ασύμμετρη μαγνητική έλξη. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει όταν οι μαγνητικές δυνάμεις δεν είναι συμμετρικά κατανεμημένες 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 αύλακες, στην οποία και πάλι δεν υπάρχει ασύμμετρη δύναμη διότι η διάταξη των φάσεων είναι συμμετρική.

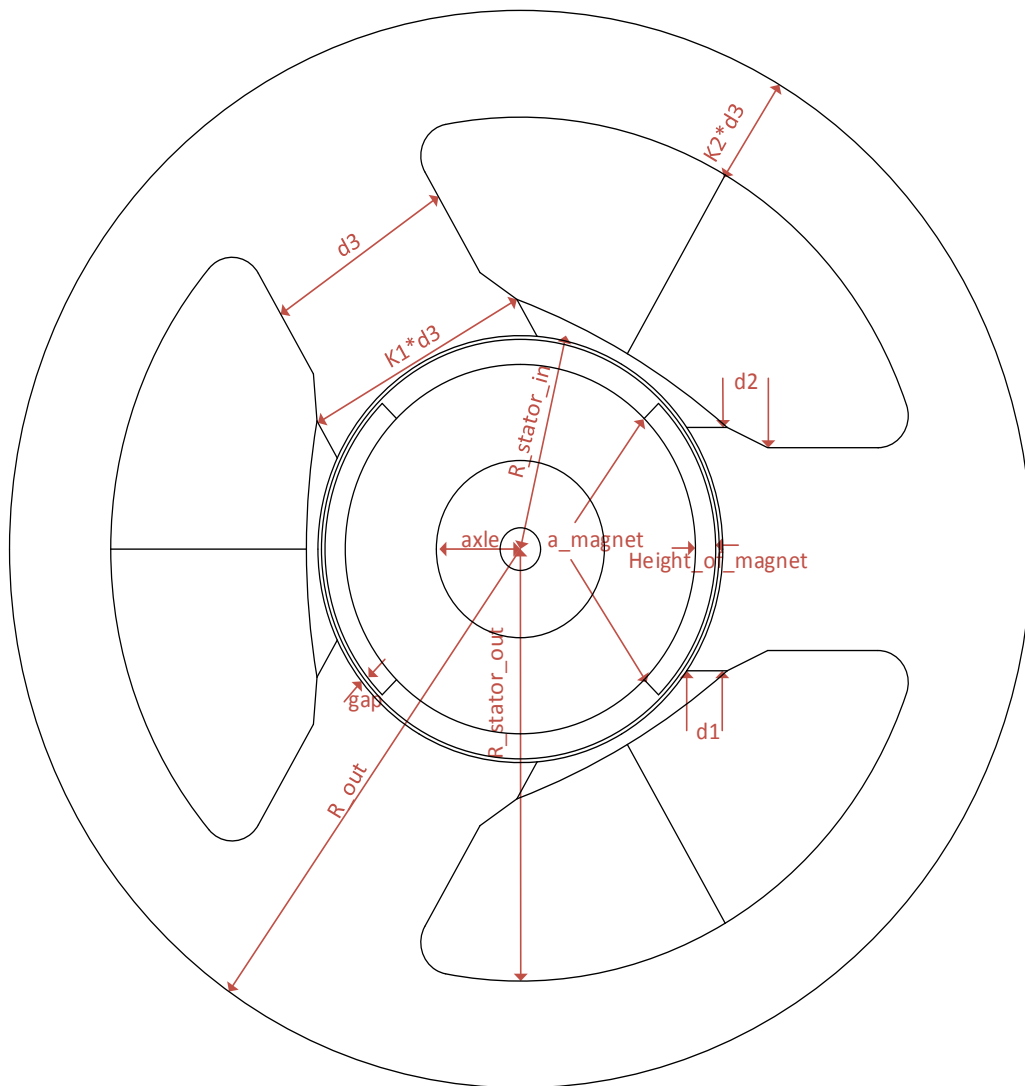


Σχήμα 5.2: Μαγνητικές δυνάμεις στον στάτη σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών με (α) και (β) 68 πόλους και 69 αύλακες, για διαφορετικές χρονικές στιγμές (c) 60 πόλους, 72 αύλακες (d) 10 πόλους, 12 αύλακες

## 5.2 Παραμετροποιημένη σχεδίαση

### 5.2.1 Καθορισμός παραμέτρων

Με την ολοκλήρωση της προκαταρκτικής σχεδίασης μας παρέχεται μια πρώτη ιδέα των μεγεθών του υπό κατασκευή κινητήρα αλλά δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να αποτελέσει αξιόπιστη μέθοδο για την εξαγωγή της τελικής γεωμετρίας. Αυτή θα προκύψει έπειτα από μια σειρά προσομοιώσεων που σκοπό έχουν να προσεγγίσουν την βέλτιστη γεωμετρία για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Για να μπορέσουν να γίνουν αυτές το πρώτο βήμα είναι να επιλεχτούν παράμετροι που θα περιγράψουν πλήρως την μηχανή. Οι παράμετροι που επιλέχτηκαν για τον σκοπό αυτό παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.3: Παράμετροι παραμετροποιημένης σχεδίασης

### 5.2.2 Υλοποίηση μέσω προγραμμάτων παραμετροποιημένης σχεδίασης

Αφού έγινε η επιλογή των παραμέτρων που μπορούν να περιγράψουν το σύνολο ενός ηλεκτροκινητήρα στο πρόγραμμα επίλυσης μαγνητοστατικού προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία, στη συνέχεια υλοποιήθηκε κώδικας που έχει την δυνατότητα να σχεδιάζει σε κάθε εκτέλεση τον ζητούμενο κινητήρα βάσει των παραμέτρων που του δίδονται. Επιπροσθέτως έχει την δυνατότητα να υπολογίζει διάφορα ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη σε θεωρητικό επίπεδο.

Παρακάτω παρουσιάζεται σχηματικά οι διεργασίες που εκτελεί ο κώδικας.



Σχήμα 5.4: Διεργασίες προγράμματος

Στη συνέχεια θα μελετήσουμε τις παραπάνω διαδικασίες ξεχωριστά μελετώντας βήμα βήμα την εκτέλεση του κώδικα και αναλύοντας κάποια σημαντικά του κομμάτια.

### Είσοδος Παραμέτρων Σχεδίασης

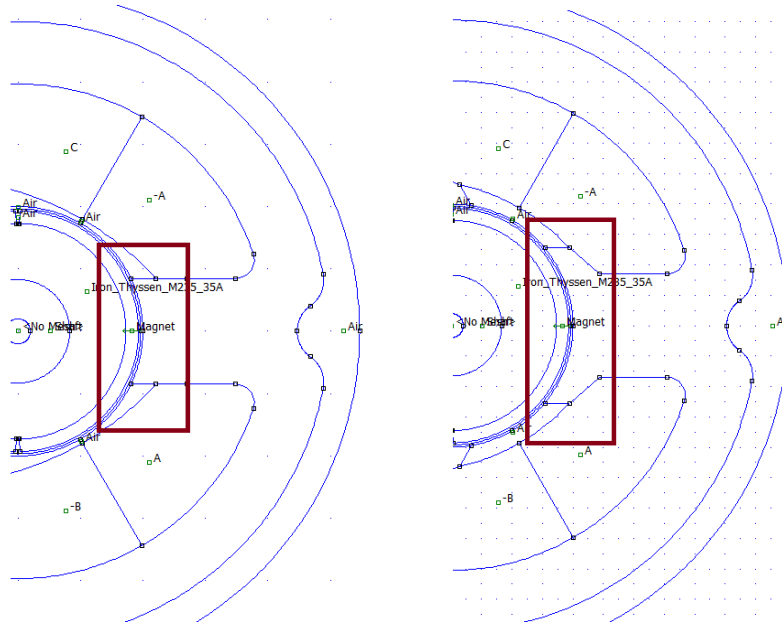
Σε αυτό το στάδιο γίνεται καθορισμός των επιθυμητών παραμέτρων του κινητήρα και του τρόπου με τον οποίο θα σχεδιαστεί. Έπειτα δίνονται συγκριμένες τιμές στις παραμέτρους που ορίσαμε στην προηγούμενη ενότητα που καθορίζουν τόσο την γεωμετρικά χαρακτηριστικά, αλλά και μια σειρά από άλλες μεταβλητές όπως ο αριθμός των πόλων που συμβάλουν στην ολοκληρωμένη περιγραφή του κινητήρα. Τα μεγέθη που προσδιορίζονται αλλά και τα υποπρογράμματα που χρησιμοποιούνται στο στάδιο αυτό φαίνονται στον πίνακα 5.4

Μεταβλητές	Υποπρογράμματα
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	Δημιουργία ανοιχτού δοντιού
Αριθμός αυλακών	Δημιουργία άνισων δοντιών
Αριθμός πόλων	Δημιουργία μαγνήτη βάσει εμβαδού
Αριθμός φάσεων	Δημιουργία μαργαρίτας
Ενεργό μήκος	Δημιουργία αύλακας βάσει εμβαδού
Τύπος τυλίγματος	
Γωνία μαγνήτη	
Ύψος μαγνήτη-Εμβαδόν μαγνήτη	
Πυκνότητα ρεύματος αύλακας	
Στροφές κινητήρα	
Συντελεστής πληρότητας	
Ακτίνα καλωδίων	
Βήμα γωνίας υπολογισμών	

Πίνακας 5.4: Μεγέθη και υποπρογράμματα που ορίζονται στο κώδικα

#### Δημιουργία ανοιχτού δοντιού

Ξεκινώντας με τα υποπρογράμματα το πρώτο που συναντάμε είναι η δημιουργία ανοιχτού δοντιού. Ως δόντι ορίζουμε την επιφάνεια που μεσολαβεί ανάμεσα σε δύο διαδοχικές αύλακες όπως αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 5.5 στα αριστερά με ανοιχτό δόντι και στα δεξιά χωρίς

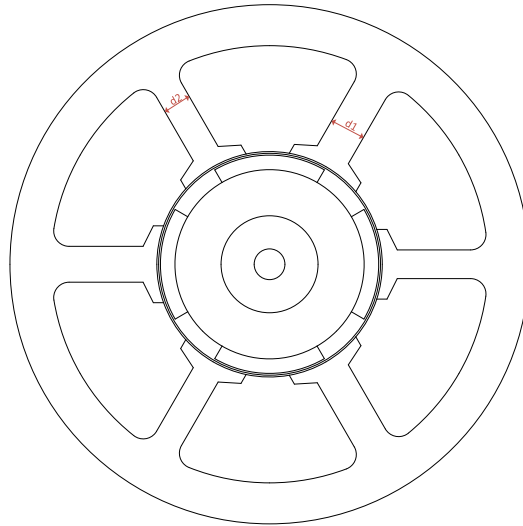


Σχήμα 5.5 Γεωμετρία κινητήρα με ανοιχτό δόντι (αριστερά) και με δόντι με προεξοχές (δεξιά)

Προσθέτοντας προεξοχές στο δόντι δημιουργούμε έναν πιο ομαλό δρόμο για την μαγνητική ροή μειώνοντας από την μια πλευρά την αρμονική παραμόρφωση της τάσης αλλά από την άλλη δυσκολεύεται η διαδικασία της κατασκευής. Έτσι ήταν αναγκαίο ο κώδικας μας να μπορεί να παράγει δόντι με διαφορετικές προεξοχές ούτως ώστε να βρεθεί η βέλτιστη γεωμετρία. Διαπιστώθηκε ότι σε σχεδιάσεις κινητήρων με έντονες αρμονικές της τάσης, επιδρούσε κατασταλτικά, με αντίκτυπο όμως την αυξημένη δυσκολία συναρμολόγησης του κινητήρα.

### Δημιουργία άνισων δοντιών

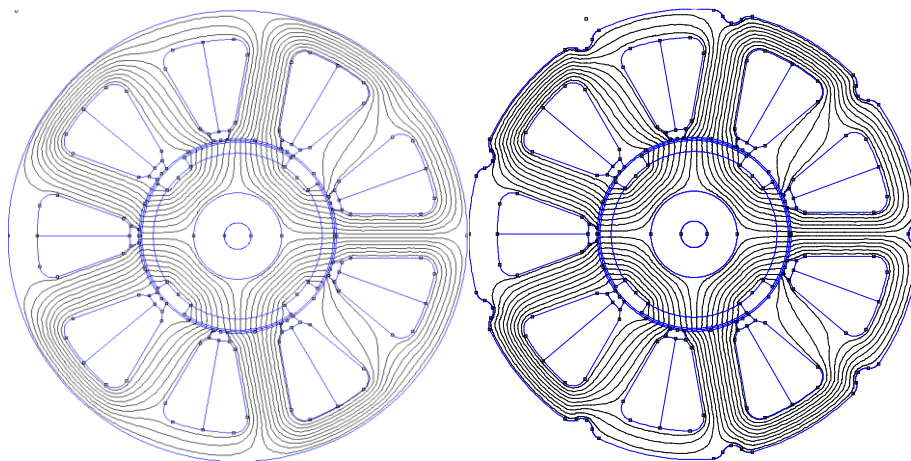
Σε μια γεωμετρία με άνισα δόντια όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6 δυο διαδοχικά δόντια έχουν διαφορετικό πλάτος αλλά ανά δύο είναι ίδια. Η συγκεκριμένη διάταξη παρουσιάζει ορισμένες φορές βελτιωμένα χαρακτηριστικά για διαμορφώσεις συγκεντρωμένου τυλίγματος μονής στρώσης. Επομένως στα πλαίσια της βελτιστοποίησης ήταν σημαντικό ο κώδικας να είχε την δυνατότητα υλοποίησης τέτοιων γεωμετριών.



Σχήμα 5.6: Γεωμετρία με άνισα δόντια

### Δημιουργία μαργαρίτας

Η μαργαρίτα αποτελεί ένα βασικό κομμάτι της σχεδίασης. Πριν γίνει ο ορισμός της καλό είναι να παρατηρήσουμε την κατανομή του μαγνητικού πεδίου του σχήματος 5.7. Παρατηρούμε ότι από ένα κομμάτι του στάτη δεν διέρχεται σχεδόν καθόλου μαγνητική ροή. Επομένως μας δίνεται η δυνατότητα να κόψουμε το συγκεκριμένο κομμάτι μειώνοντας το βάρος του στάτη χωρίς να επηρεάζουμε καθόλου τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της μηχανής. Έτσι σαν μαργαρίτα ορίζουμε το σχήμα του στάτη αμέσως μετά την συγκεκριμένη επεξεργασία.



Σχήμα 5.7 Γεωμετρία κινητήρα με μαργαρίτα (δεξιά) και χωρίς (αριστερά)



Για να γίνει καλύτερα αντιληπτό το όφελος από αυτήν διαδικασία θα εξετάσουμε ένα παράδειγμα. Το συγκεκριμένο μοντέλο που παρουσιάζεται στο παραπάνω σχήμα πριν την δημιουργία της μαργαρίτας έχει βάρος 2,2 kg ενώ μετά έχει 1,9 kg. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι έγινε 13% εξοικονόμηση στο βάρος. Τέλος αξίζει να αναφέρουμε ότι όσο πιο κυλινδρικό σχήμα έχει η μηχανή τόσο περισσότερη εξοικονόμηση υλικού αναμένουμε να γίνει.

#### Δημιουργία μαγνήτη βάσει εμβადού

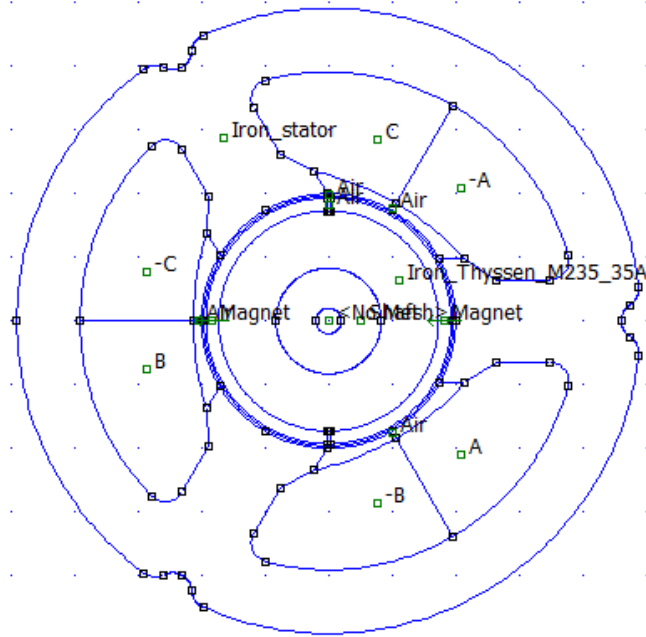
Βάσει της παραμετροποίησης του κώδικα ο μαγνήτης μπορεί να καθοριστεί με δύο παραμέτρους, το ποσοστό της γωνίας του ως προς την γωνία του πολικού βήματος και το πάχος. Κατά την ανάλυση ευαισθησίας έγινε γρήγορα αντιληπτό ότι η μεταβολή των δύο αυτών παραμέτρων έδινε μεγάλες διακυμάνσεις στην αποδιδόμενη 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 ή και το αντίστροφο.

#### Δημιουργία αύλακας βάσει εμβαδού

Κατά την ανάλυση ευαισθησίας για να μπορέσουμε να βγάλουμε σωστά αποτελέσματα έπρεπε το πεδίο του στάτη και επομένως ο αριθμός των καλωδίων να παραμένει σταθερός. Αυτό μπορούσε να επιτευχθεί σχεδιάζοντας την αύλακα κρατώντας ίδιο συντελεστή πληρότητας και εμβαδόν αύλακας.

#### **Σχεδίαση ηλεκτροκινητήρα**

Στο στάδιο αυτό με βάση της μεταβλητές που έχουν καθοριστεί προηγουμένως σχεδιάζεται η γεωμετρία του κινητήρα και στη συνέχεια αυτή θα επιλυθεί με τη μέθοδο των 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. Ένα παράδειγμα εκτέλεσης του συγκεκριμένου κώδικα παρουσιάζεται παρακάτω.

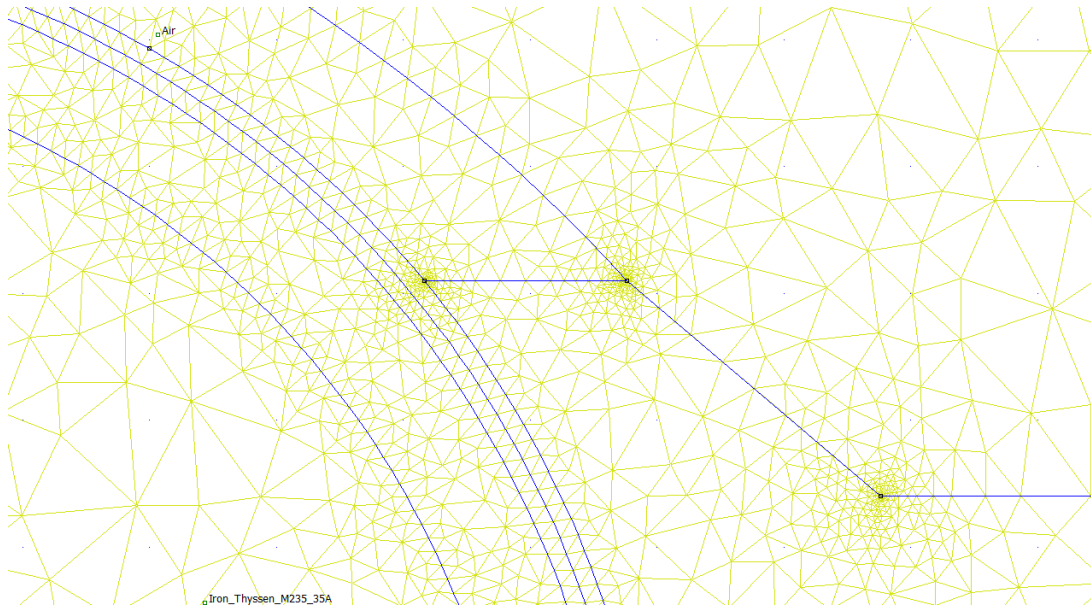


Σχήμα 5.8: Παράδειγμα υλοποίησης μοντέλου στο Femm

### Επίλυση προβλήματος

Το επόμενο στάδιο είναι να επιλυθεί το μοντέλο που δημιουργήθηκε προηγουμένως. Αποτελεί μια αυτοματοποιημένη διαδικασία και το μόνο κομμάτι που χρίζει προσοχής είναι η ακρίβεια του πλέγματος. Το femmαφού χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σπάει το μοντέλο σε πολλά μικρά επιμέρους προβλήματα τα οποία τα επιλύει. Πιο συγκεκριμένα, 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.

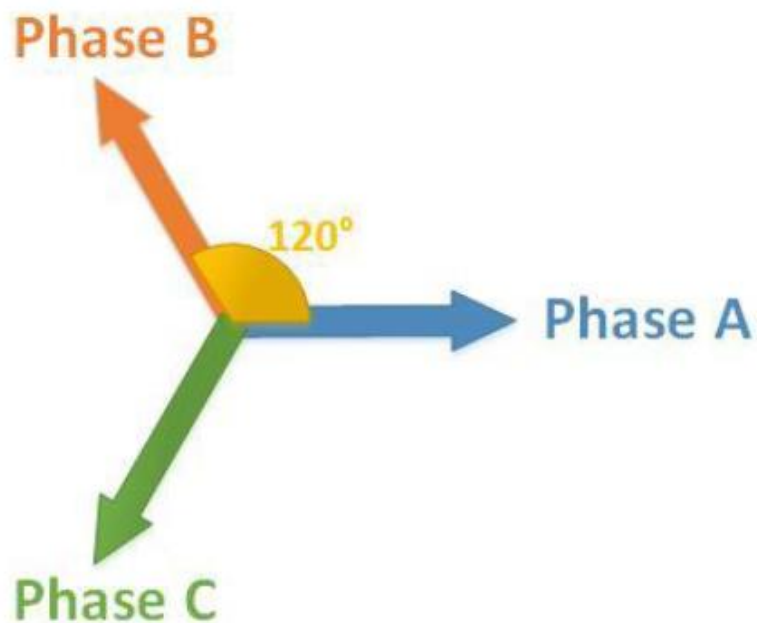
Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι ο καθορισμός του αριθμού των τριγωνικών στοιχείων που τελικά θα χρησιμοποιήσει το Femm καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το σφάλμα της μέτρησης που γίνεται. Έτσι σε μικρές περιοχές όπως το διάκενο απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός στοιχείων σε σχέση με μεγαλύτερες όπως ο στάτης ή ο δρομέας. Ένα παράδειγμα της κατανομής των τριγωνικών στοιχείων ανάλογα με την περιοχή παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.9: Παράδειγμα Κατανομής τριγωνικών στοιχείων στο σώμα της μηχανής

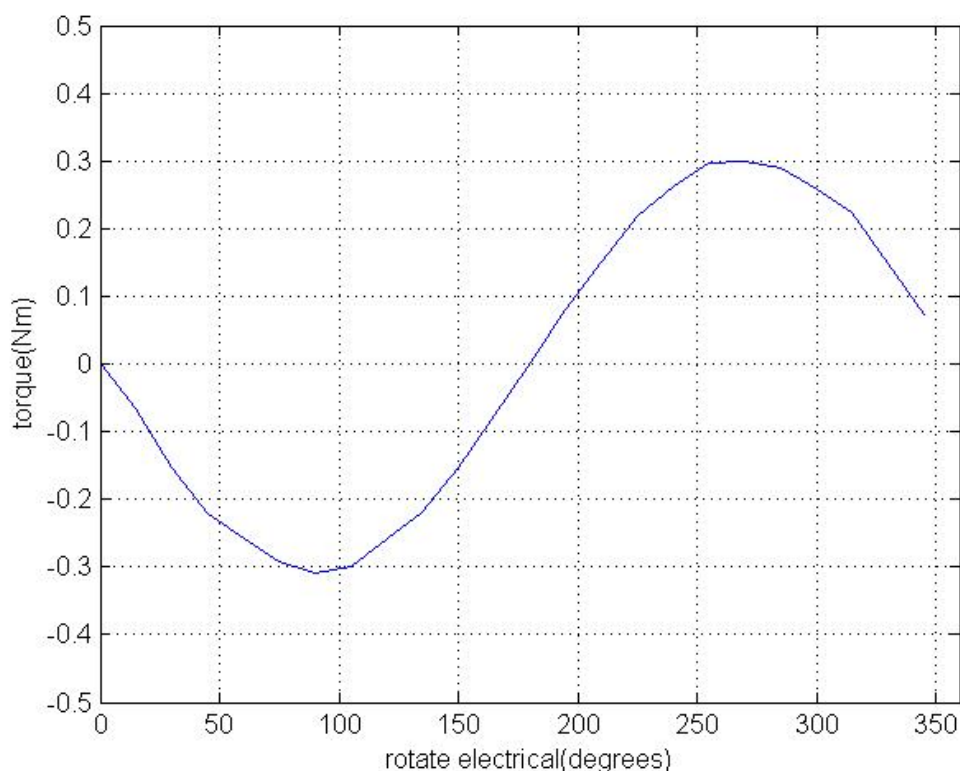
#### Υπολογισμός μέγιστης ροπής και γωνία ροπής

Για να μετρηθεί η μέγιστη αποδιδόμενη ροπή που παράγεται από ένα κινητήρα ακολουθείται μια συγκεκριμένη διαδικασία που αποτελείται από δύο βήματα. Αρχικά ορίζονται οι τιμές των ρευμάτων την χρονική στιγμή μεγίστου της φάσης A όπως φαίνεται στο σχήμα 5.10.



Σχήμα 5.10: Διαδοχή των φάσεων του τριφασικού ρεύματος που εισέρχεται στον κινητήρα

Στη συνέχεια περιστρέφεται ο δρομέας με βήμα που έχουμε καθορίσει προηγουμένως και μετράμε συνεχώς την ροπή στο μέσο του διακένου. Στο τέλος παράγουμε μια κυματομορφή της ροπής σε συνάρτηση με τις ηλεκτρικές μοίρες όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.11



Σχήμα 5.11: Παράδειγμα κυματομορφής μέγιστης ροπής

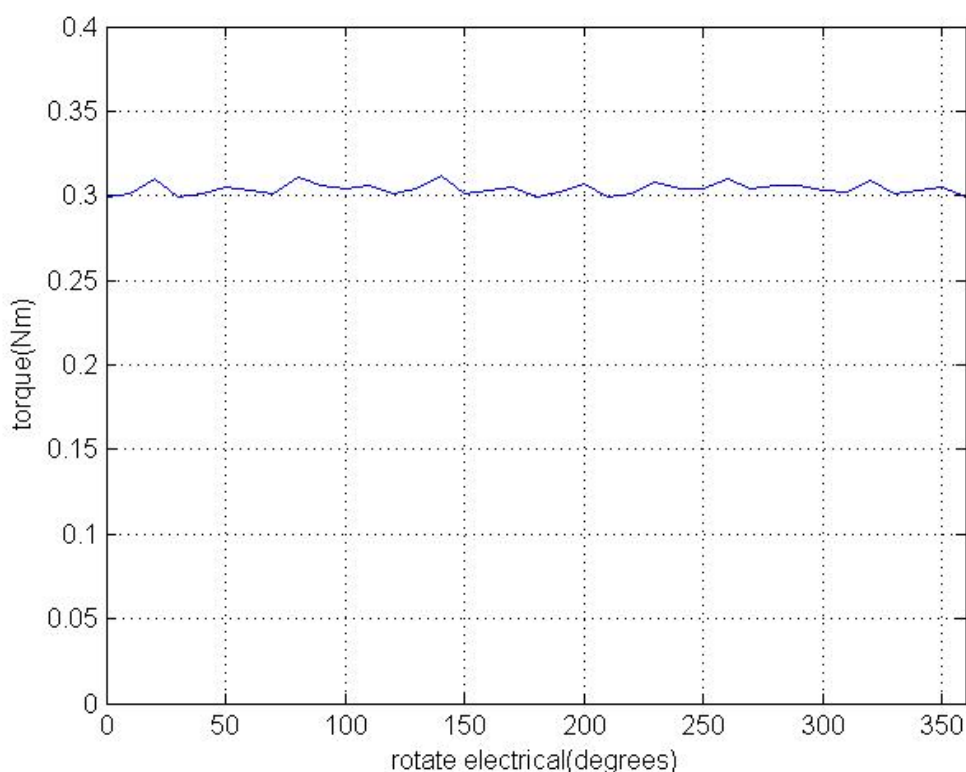
Συνεπώς με αυτό τον τρόπο βρίσκουμε την μέγιστη ροπή διακένου και η γωνία που αντιστοιχεί η συγκεκριμένη ροπή αποτελεί και τη μέγιστη γωνία ροπής. Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι η μετατροπή των μηχανικών σε ηλεκτρικών μοιρών γίνεται από την σχέση:

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m \quad (5.22)$$

### Προσδιορισμός κυμάτωσης ροπής

Η ροπή που παράγεται από ένα κινητήρα δεν είναι σταθερή αλλά ταλαντώνεται γύρω από μια τιμή που εξαρτάται από την γωνία ροπής. Έτσι για να υπολογίσουμε την κυμάτωση μέγιστης ροπής αρχικά περιστρέφουμε τον δρομέα κατά τη γωνία μέγιστης ροπής τοποθετώντας παράλληλα τα ρεύματα με μέγιστο στη φάση A και στη συνέχεια περιστρέφουμε τον δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα μεταβάλλοντας

ταυτόχρονα κατάλληλα τα ρεύματα. Ένα παράδειγμα εκτέλεσης φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.12: Παράδειγμα κυματομορφής κυματώσεως ροπής

Η κυμάτωση ροπής υπολογίζεται από την σχέση

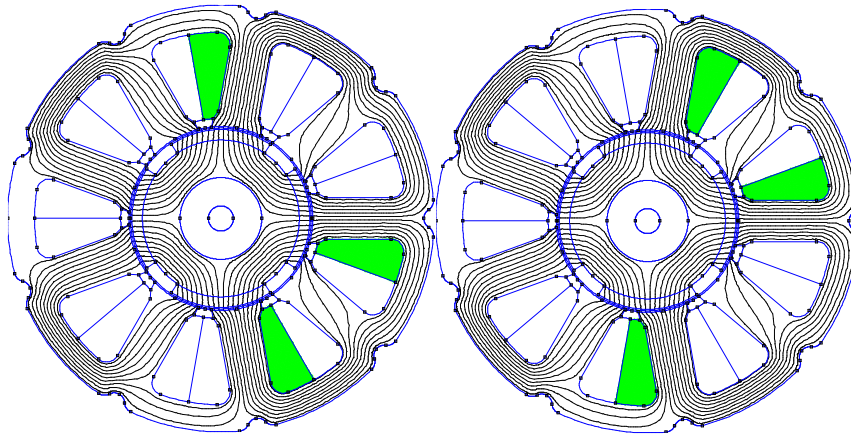
$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_o} \cdot 100\% \quad (5.23)$$

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

### Υπολογισμός ΗΕΔ και αρμονικής παραμόρφωσης της

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη ορίζεται ως 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 ΗΕΔ μετράται σε μονάδες: ενέργεια προς φορτίο, δηλαδή σε βολτ, στο διεθνές σύστημα μονάδων. 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 (σχήμα) και υπολογίζεται το διανυσματικό δυναμικό στο εσωτερικό τους. Το ίδιο επαναλαμβάνεται για την φάση -A.



Σχήμα 5.13:Επιλογή αυλακών φάσης A

Η συνολική ροή που εισέρχεται στη φάση A υπολογίζεται από την σχέση:

$$\Phi_{phA} = \frac{(A_{phA} - A_{ph-A}) \cdot n}{S_{slot}} \quad (5.24)$$

Όπου

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

$n$  ο αριθμός των σπειρών

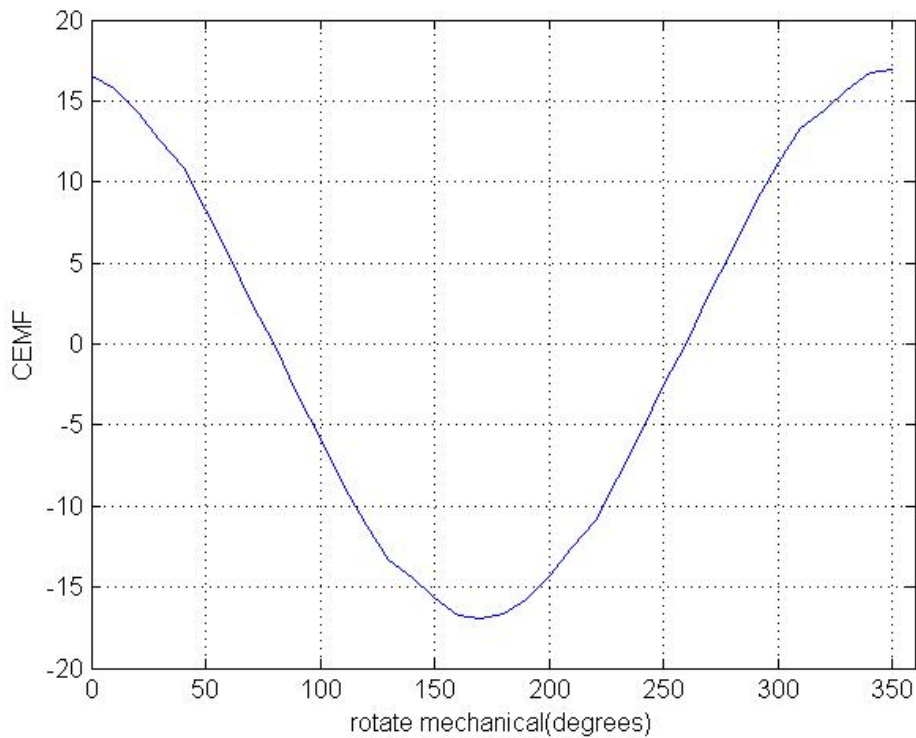
$S_{slot}$  η επιφάνεια μιας αύλακας

Και στη συνέχεια η αντί-ΗΕΔ υπολογίζεται από την σχέση

$$CEMF(V) = \frac{2\pi n}{60} \cdot \frac{\Phi_{phA}(t+1) - \Phi_{phA}(t)}{d\theta} \quad (5.25)$$

Όπου  $d\theta$  η μεταβολή της γωνίας σε rad

Αναπαριστώντας της παραπάνω τιμές σε συνάρτηση με την περιστροφή του δρομέα σε ηλεκτρικές μοίρες εξάγεται μια γραφική με ημιτονοειδή μορφή όπως φαίνεται στο σχήμα



Σχήμα 5.14: Παράδειγμα κυματομορφής της αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης

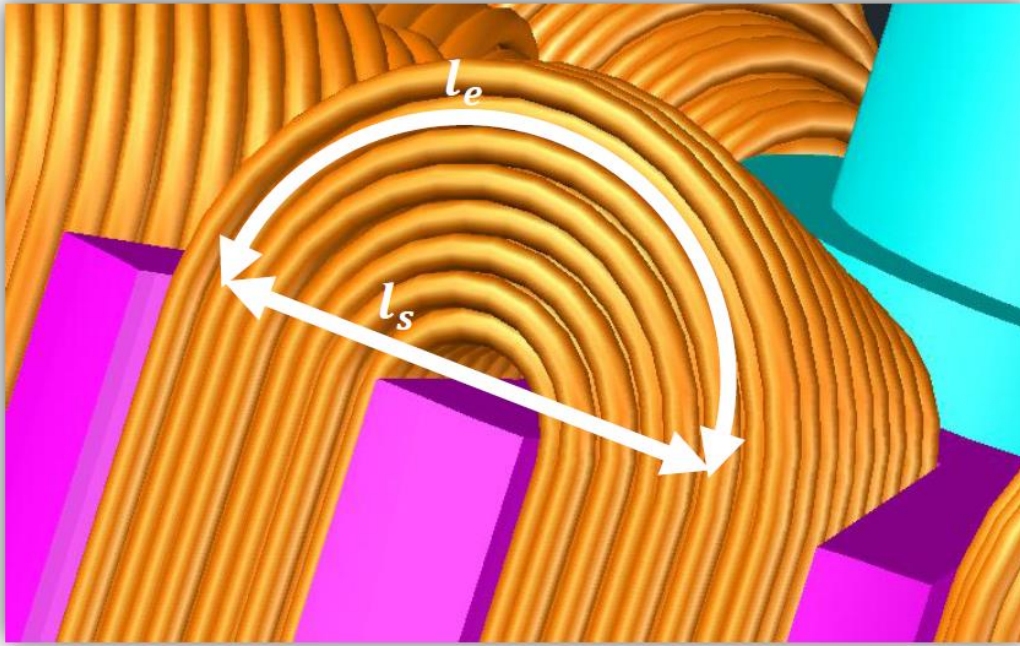
Ωστόσο στο παραπάνω μέγεθος είναι πιθανό να υπάρχουν μια σειρά από αρμονικές. Επομένως η ακριβής τιμή της ενεργού τιμής της τάσης υπολογίζεται μετά την χρήση του μετασχηματισμού Fourier καθώς επίσης και η τιμή όλων των άλλων αρμονικών συνιστωσών. Τέλος για να αξιολογήσουμε το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης χρησιμοποιούμε το στατιστικό μέγεθος THD που ορίζεται ως:

$$THD_v = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} \cdot 100\% \quad (5.26)$$

### Υπολογισμός απωλειών χαλκού

Το πρώτο βήμα για να γίνει ο καθορισμός των απωλειών χαλκού είναι να υπολογίσουμε το συνολικό μήκος κάθε σπείρας.





Σχήμα 5.15

Θεωρώντας ότι το ενεργό μήκος της μηχανής είναι ίσο με  $L$  το συνολικό μήκος των αγωγών κάθε σπείρας είναι:

$$l_{coil} = 2L + 2l_e \quad (5.28)$$

Στη συνέχεια γίνεται η εκτίμηση ότι η σχέση μεταξύ των μεγεθών  $l_e, l_s$  όπως αυτά ορίζονται στο σχήμα είναι:

$$l_e = 1,2l_s \quad (5.29)$$

Άρα τελικά έχουμε για την αντίσταση του κάθε πηνίου

$$R = \rho_{copper} \cdot \frac{2L + 2,4l_s}{s_{wire}} \quad (5.30)$$

Όπου  $\rho_{copper}$  η ειδική αντίσταση χαλκού

$s_{wire}$  η διατομή του αγωγού

Όσον αφορά την ειδική αντίσταση χαλκού αυτή μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$\rho_{copper} = \rho_{0copper} \cdot \left(1 + a_{copper} \cdot (T_{no} - T_o)\right) \quad (5.31)$$



Όπου

$$\rho_{\text{copper}} = 1,75 \cdot 10^{-5} \Omega \text{mm}$$

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

$$T_o = 20^\circ \text{C}$$

$$T_{no} = 70^\circ \text{C}$$

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

$$R_{\text{losses}} = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot \frac{Q}{3} \quad (5.32)$$

### Υπολογισμός απωλειών πυρήνα

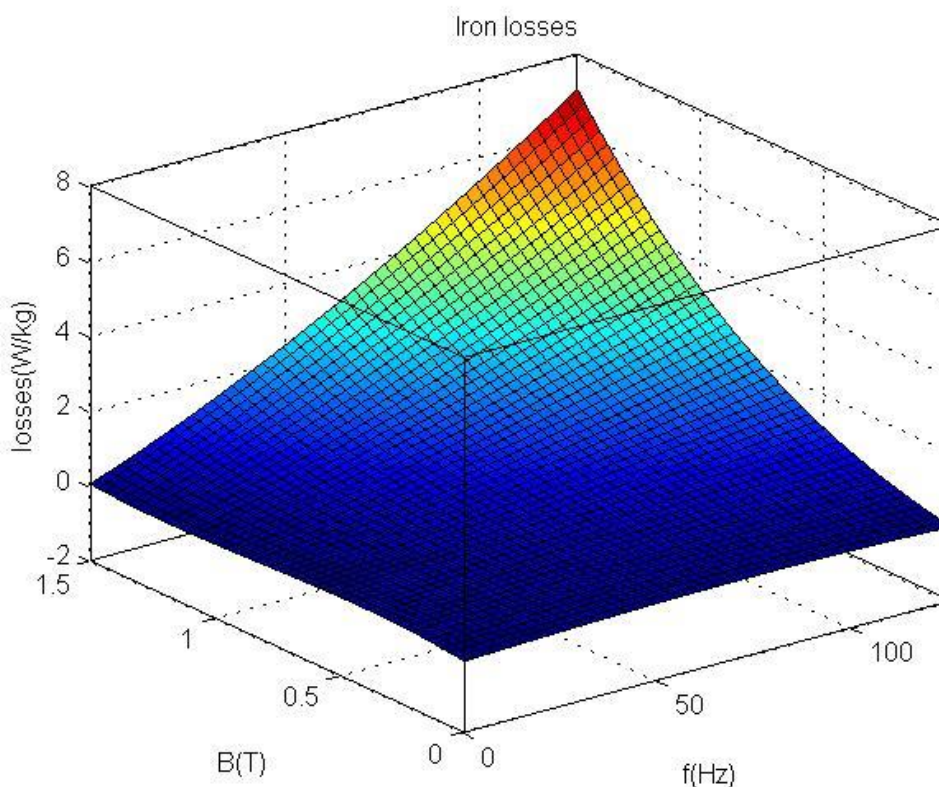
Στην υλοποίηση του κινητήρα χρησιμοποιούμε την μαγνητική λαμαρίνα M235-35<sup>A</sup> της ThyssenKrupp. Στον πίνακα παρουσιάζονται οι απώλειες σε συνάρτηση με την συχνότητα όπως αυτές αναφέρονται στο τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή.

B(T)	f=50 Hz	f=100 Hz	f=125 Hz
0,5	0,33	0,77	1,02
0,6	0,45	1,04	1,3
0,7	0,57	1,34	1,77
0,8	0,71	1,66	2,2
0,9	0,85	2,01	2,67
1	1,02	2,39	3,18
1,1	1,19	2,81	3,75
1,2	1,4	3,3	4,4
1,3	1,64	3,88	5,18
1,4	1,95	4,61	6,19
1,5	2,27	5,36	7,23
1,6	2,59	6,22	-
1,7	2,92	-	-
1,8	3,2	-	-

Πίνακας 5.5:Απώλειες πυρήνα (W/kg)

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα ήταν αρκετά απλή καθώς αξιοποιήσαμε το γεγονός ότι το Femm σπάει σε πολύ μικρά τρίγωνα την γεωμετρία του προβλήματος και να μπορούσαμε να αποτυπώσουμε 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. Το μοναδικό πρόβλημα που παρουσιάστηκε είναι ότι ο πίνακας έχει κβαντισμένες τιμές ενώ στο μοντέλο μας εμφανιζόντουσαν και ενδιάμεσες. Για να αντιμετωπιστεί αυτό κατασκευάστηκε με την βοήθεια των τιμών

του παραπάνω πίνακα μια συνάρτηση δύο μεταβλητών όπου έπαιρνε σαν όρισμα την ένταση του μαγνητικού πεδίου και την συχνότητα και επέστρεφε τις απώλειες. Αυτή σχηματικά παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχήμα 5.16: Απώλειες πυρήνα (W/kg)

### 5.3 Διερεύνηση καταλληλότερων διαμορφώσεων

Η παραμετροποιημένη σχεδίαση που περιγράψαμε προηγουμένως μας δίνει την δυνατότητα δημιουργίας αυτόματα πολλών διαφορετικών μοντέλων και μέσα από την διερεύνηση τους εξάγεται η βέλτιστη γεωμετρία για τις ανάγκες της εφαρμογής μας. Για την αναζήτηση αυτού του ολικού μεγίστου χρησιμοποιήθηκε μια διαδικασία με τα παρακάτω βασικά βήματα:

1. Χρησιμοποιώντας σαν αφετηρία τις τιμές που προέκυψαν από την προκαταρκτική σχεδίαση έγινε απόπειρα να προσεγγιστούν οι βέλτιστες γεωμετρικές διαστάσεις του κινητήρα δηλαδή το μήκος διακένου και το ενεργό μήκος της μηχανής έτσι ώστε να καλύπτεται η απαίτηση που έχουμε βάλει σε ροπή με χαμηλή σχετικά κυμάτωση ροπής και αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης. Τέλος έπρεπε να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε να βρεθεί η διαμόρφωση που θα παρέχει όσο μεγαλύτερη απόδοση.

- II. Στη συνέχεια 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.
- III. Ύστερα επιλέχθηκαν οι διαμορφώσεις που πληρούσαν καλύτερα τα παραπάνω κριτήρια και πραγματοποιήθηκαν εκτενείς αναλύσεις ευαισθησίας για την κάθε μια προκειμένου να ευρεθεί η βέλτιστη γεωμετρία. Η βελτιστοποίηση έγινε για την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα ωστόσο εξετάστηκε αναλυτικά και η συμπεριφορά του κατά την επιτάχυνση.
- IV. Στο τέλος έγινε αναλυτική σύγκριση των βελτιστοποιημένων διαμορφώσεων και σταθμίζοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους επιλέχτηκε ο τελικός κινητήρας.

### **5.3.1 Διερεύνηση βασικών διαστάσεων**

Η προκαταρκτική σχεδίαση δεν μπορεί να μας δώσει ακριβείς τιμές των διαστάσεων του κινητήρα παρά μόνο μια προσέγγιση της τάξης μεγέθους τους και μάλιστα μόνο για τις βασικές διαστάσεις. Έτσι σε πρώτο βήμα έπρεπε να κατανοήσουμε πως η μεταβολή κάθε χαρακτηριστικού επηρεάζει την συμπεριφορά του κινητήρα και στη συνέχεια να γίνει η οριστική επιλογή των παραμέτρων. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από τις μεταβολές έγινε παρατηρώντας τα διαγράμματα της ροπής της τάσης καθώς επίσης και της κυμάτωσης ροπής όπως αυτά εξάγονται από τις προσομοιώσεις. Στο στάδιο αυτό θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων για την ακτίνα του δρομέα το ενεργό μήκος της μηχανής και το πάχος δοντιού.

#### Ακτίνα δρομέα

Στο πρώτο στάδιο έγιναν δοκιμές για διάφορες τιμές της ακτίνας δρομέα έτσι ώστε ο κινητήρας που προκύπτει να έχει την ικανότητα να παράγει την απαιτούμενη ροπή. Αξίζει να γίνει ιδιαίτερη αναφορά στο πως επηρεάζει η συγκεκριμένη παράμετρος την ροπή. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιούμε την τετραπολική μηχανή με εννέα αύλακες και ενεργό μήκος 45 mm που φαίνεται στο σχήμα 5.13. Παρατηρούμε ότι με ακτίνα δρομέα 17 mm παράγεται ροπή 0,25 Nm ενώ για ακτίνα 22 mm παράγεται 0,33 Nm, δηλαδή μια μείωση της ακτίνας κατά 22% οδηγεί σε μείωση της αποδιδόμενης ροπής κατά 34%. Είναι φανερό, λοιπόν, ότι η παραμικρή μεταβολή στην διάσταση αυτή επιφέρει μεγάλες αλλαγές στην επίδοση του κινητήρα.

Αυτές οι μεγάλες αλλαγές είναι εύκολο να δικαιολογηθούν και θεωρητικά αν σκεφτούμε ότι η διάμετρος του δρομέα ταυτίζεται σε μεγάλο βαθμό με το μήκος διακένου. Όπως αναφέραμε στο τρίτο κεφάλαιο από την σχέση (2.13) η αποδιδόμενη από την μηχανή ισχύ είναι ανάλογη του τετραγώνου του μήκους διακένου. Επομένως δικαιολογούνται και οι μεγάλες μεταβολές στην ροπή.

#### Ενεργό μήκος μηχανής

Όσον αφορά το ενεργό μήκος του κινητήρα ενδιαφέρον έχει η μεταβολή των χαρακτηριστικών του κινητήρα αλλάζοντας μόνο το ενεργό μήκος και διατηρώντας όλα τα υπόλοιπα μεγέθη σταθερά. Για το σκοπό αυτό έγινε χρήση του μοντέλου του σχήματος 5.13 με ακτίνα δρομέα 22 mm και για δύο διαφορετικά μήκη 45 mm και 90 mm. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.4

Χαρακτηριστικά	Ενεργό μήκος 45 mm	Ενεργό μήκος 90 mm
Μέγιστη ροπή (Nm)	0,33	0,66
Κυμάτωση ροπής (%)	5,46	5,46
Αρμονική παραμόρφωση (%)	3,43	3,43
Ενεργός τιμή τάσης (V)	12,42	24,84
Ρεύμα γραμμής (A)	1,76	1,76
Απώλειες χαλκού (W)	1	1,6
Απώλειες σιδήρου (W)	3	6
Βάρος (kg)	2,1	4,16

Πίνακας 5.6 Χαρακτηριστικά μηχανών ενεργού μήκους 45 mm και 90 mm.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα βλέπουμε ότι όπως περιμέναμε με βάση την σχέση (2.13) η επίδοση της μηχανής έχει γραμμική εξάρτηση από το ενεργό μήκος. Επίσης η ποιότητα της αποδιδόμενης ισχύς παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Το σημαντικότερο συμπέρασμα ωστόσο αφορά της απώλειες όπου διπλασιάζονται οι απώλειες πυρήνα καθώς διπλασιάζεται και η ποσότητα σιδήρου στη μηχανή, αλλά δεν διπλασιάζονται οι απώλειες χαλκού. Αυτό συμβαίνει γιατί από την μία το κομμάτι του χαλκού που βρίσκεται μέσα στην μηχανή διπλασιάζεται αλλά μένει αμετάβλητο το κομμάτι κατά το γύρισμα του χαλκού ανά αύλακα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να έχουμε καλύτερη εκμετάλλευση χαλκού και κατά συνέπεια καλύτερη απόδοση.

Συμπερασματικά για τις εξωτερικές διαστάσεις μπορούμε να πούμε ότι η αύξησή τους οδηγεί σαφώς σε μεγαλύτερες επιδόσεις

### Πάχος δοντιού

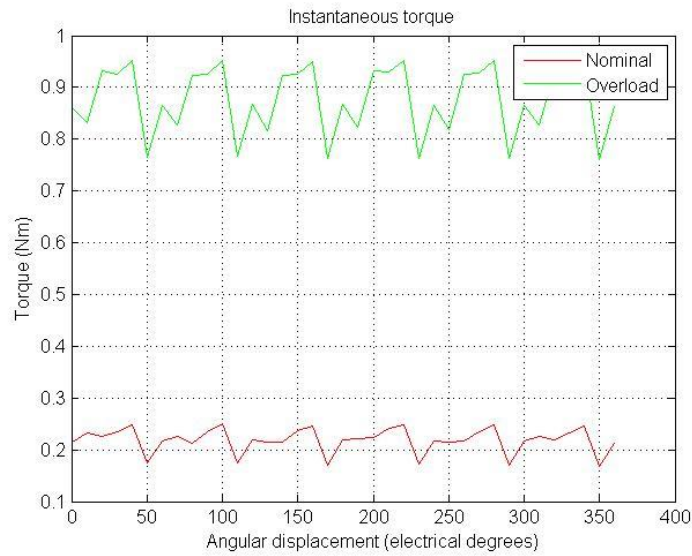
Η απόσταση δυο διαδοχικών αυλακών ή αλλιώς το πάχος δοντιού αποτελεί βασική παράμετρο κατά την σχεδίαση. Αυτό γιατί αποτελεί τον δρόμο της μαγνητικής ροής. Έτσι ένα πολύ μικρό δόντι εμποδίζει την ομαλή κίνηση της ροής με αποτέλεσμα να έχουμε αυξημένες απώλειες, θερμοκρασίες και ορισμένες φορές δημιουργείται τοπικός κορεσμός του σιδηρομαγνητικού υλικού και κατά συνέπεια να έχουμε απώλεια ισχύος. Από την άλλη πλευρά μεγάλο δόντι οδηγεί σε υλοποιήσεις με αυξημένο βάρος χωρίς να προσφέρει ιδιαίτερα άλλα οφέλη. Για να γίνει καλύτερα αντιληπτό θα χρησιμοποιήσουμε την τετραπολική του προηγούμενου παραδείγματος με πάχος δοντιού 0,5 mm και 1.1 mm όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.14 μαζί με τα αντίστοιχα διαγράμματα για την κυμάτωση και την τάση.

Με μεγαλύτερο πάχος δοντιού ο κινητήρας παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά καθώς έχουμε κυμάτωση ροπής 6% και αρμονική παραμόρφωση τάσης στο 4 % με μέγιστη ροπή στο 0,33 Nm. Μειώνοντας το πάχος δοντιού, όμως, αυξάνεται η κυμάτωση στο 11% και η αρμονική παραμόρφωση στο 13% ενώ η μέγιστη ροπή περιορίζεται στο 0,22 Nm.

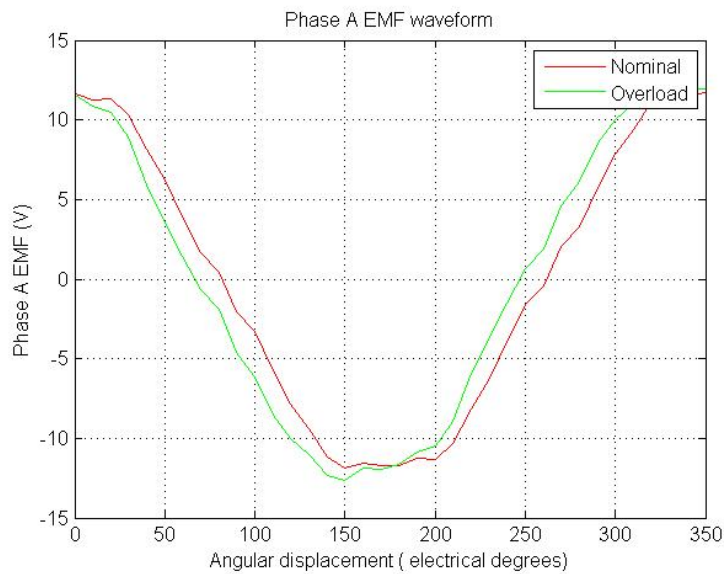
### **5.3.2 Διερεύνηση πιθανών διαμορφώσεων**

Στη φάση αυτή της σχεδίασης αφού έχει γίνει μια αρχική διαστασιολόγηση των βασικών διαστάσεων της μηχανής πρέπει να γίνει εκτενής εξέταση όλων των διαθέσιμων διαμορφώσεων για να αποφασιστεί πια είναι η καλύτερη για την εφαρμογή μας.

Πρώτα εξετάστηκε η 2-πολική διαμόρφωση με συγκεντρωμένο τύλιγμα μονής στρώσης με τρεις αύλακες. Όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα υπάρχει έντονη κυμάτωση ροπής και για πυκνότητα ρεύματος  $1 A/mm^2$  και για  $4 A/mm^2$  όπως επίσης και σχετικά μεγάλη παραμόρφωση της αντί-ΗΕΔ. Τέλος παρουσιάζει και χαμηλή επίδοση.

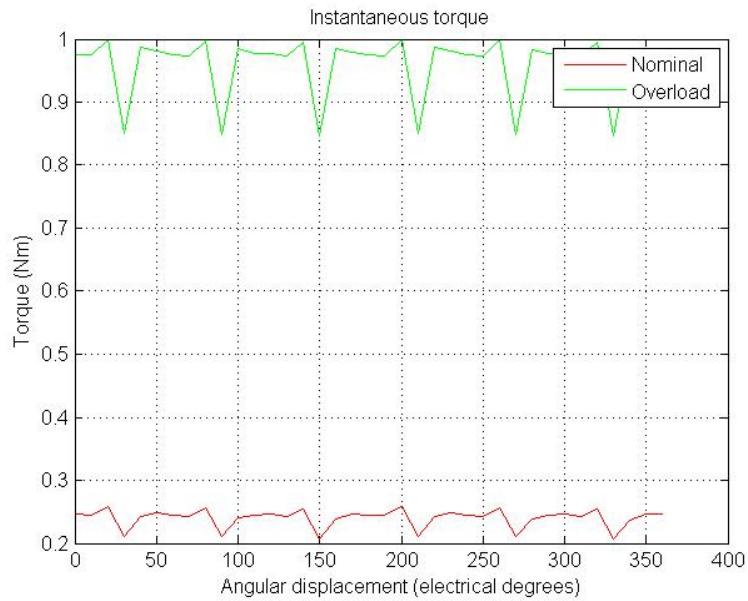


Σχήμα 5.16: Κυμάτωση ροπής 2-πολικής διαμόρφωσης με συγκεντρωμένο τύλιγμα μονής στρώσης με έξι αύλακες

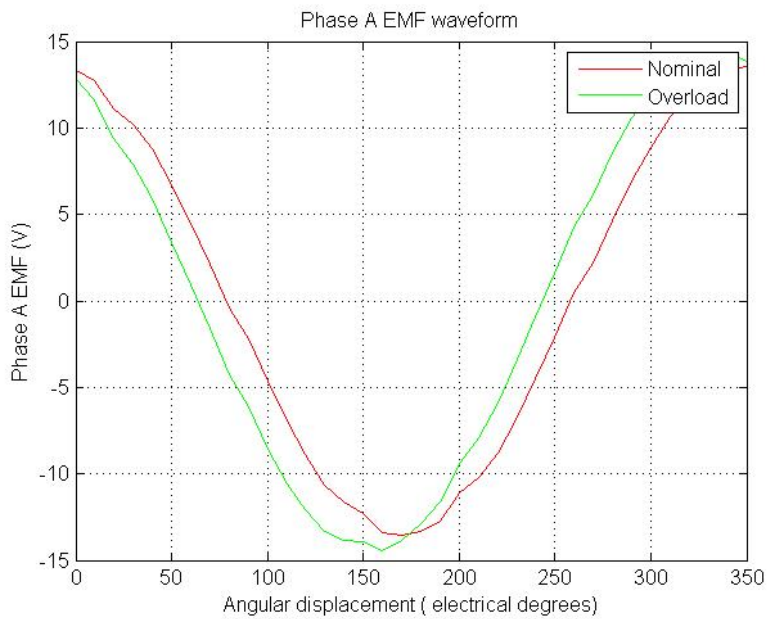


Σχήμα 5.17: Κυματομορφή τάσης 2-πολικής διαμόρφωσης με συγκεντρωμένο τύλιγμα μονής στρώσης με έξι αύλακες

Όσον αφορά την άλλη 2-πολική διαμόρφωση, με συγκεντρωμένο διπλής στρώσης παρουσιάζει πολύ βελτιωμένα χαρακτηριστικά καθώς σε σχέση με την προηγούμενη διπολική μειώνεται αισθητά η κυμάτωση ροπής αλλά και η αρμονική παραμόρφωση της αντί-ΗΕΔ. Ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό είναι και η σημαντική διαφορά στην μέγιστη αποδιδόμενη ροπή.

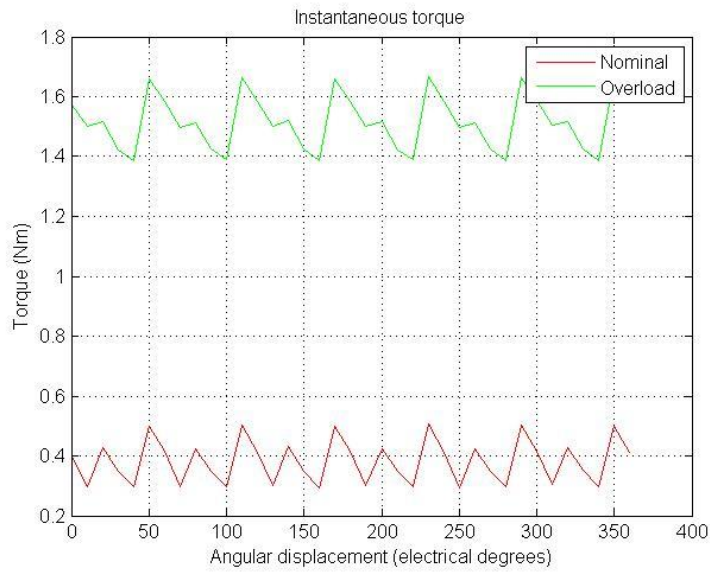


Σχήμα 5.18: Κυμάτωση ροπής 2-πολικής διαμόρφωσης με συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης με τρεις αύλακες

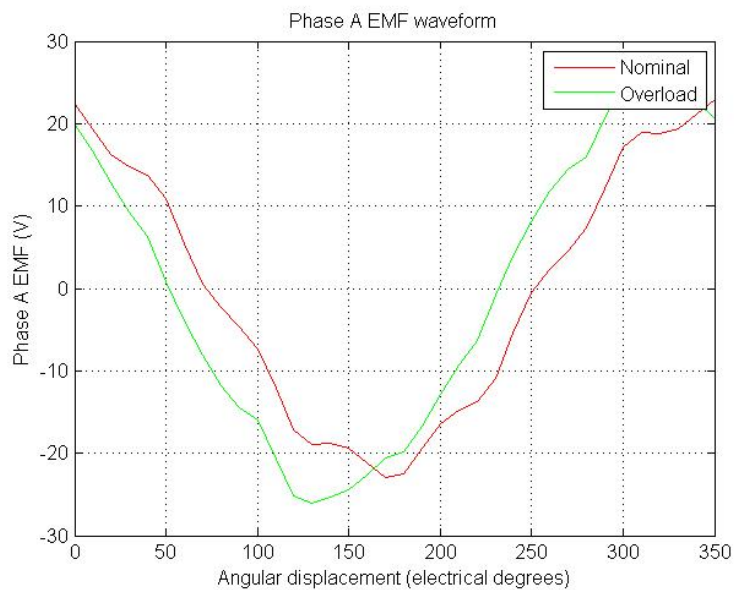


Σχήμα 5.19: Κυματομορφή τάσης 2-πολικής διαμόρφωσης με συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης με τρεις αύλακες

Η πρώτη 4-πολική που εξετάστηκε είναι η συγκεντρωμένη μονής στρώσης με 6 αύλακες. Βλέπουμε ότι έχει έντονη κυμάτωση στη ροπή και παραμόρφωση της αντί-ΗΕΔ.



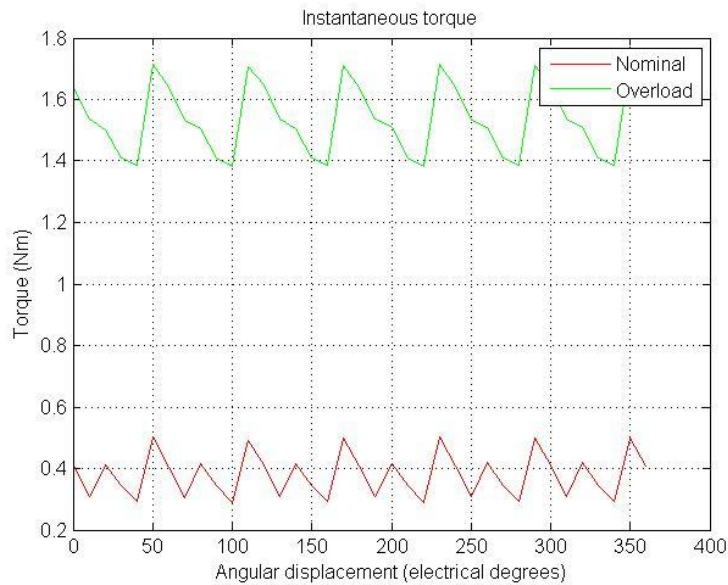
Σχήμα 5.20: Κυμάτωση ροπής 4-πολικής διαμόρφωσης με συγκεντρωμένο τύλιγμα μονής στρώσης με 6 αύλακες



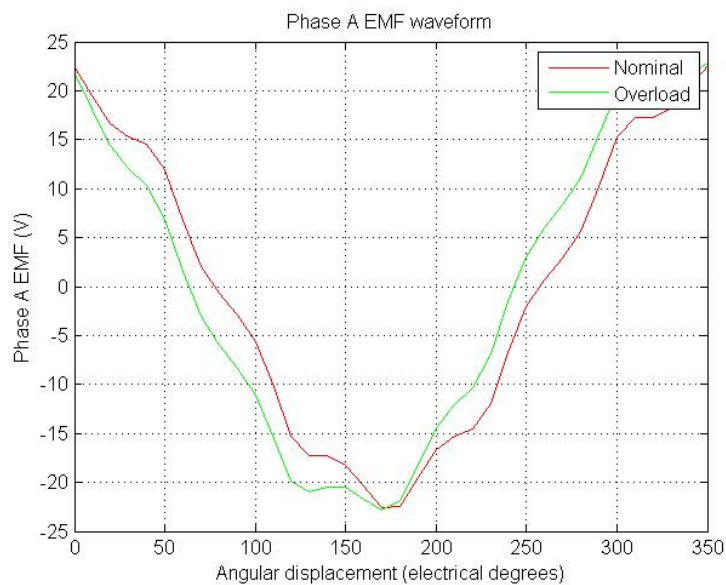
Σχήμα 5.21: Κυματομορφή τάσης 4-πολικής διαμόρφωσης με συγκεντρωμένο τύλιγμα μονής στρώσης με 6 αύλακες

Ανάλογη συμπεριφορά φαίνεται να υπάρχει και στην 4-πολική διπλής στρώσης με 6 αύλακες. Η μοναδική διαφοροποίηση βρίσκεται στην αντί-ΗΕΔ στην υπερφόρτιση όπου έχουμε μια πιο ημιτονοειδή μορφή.



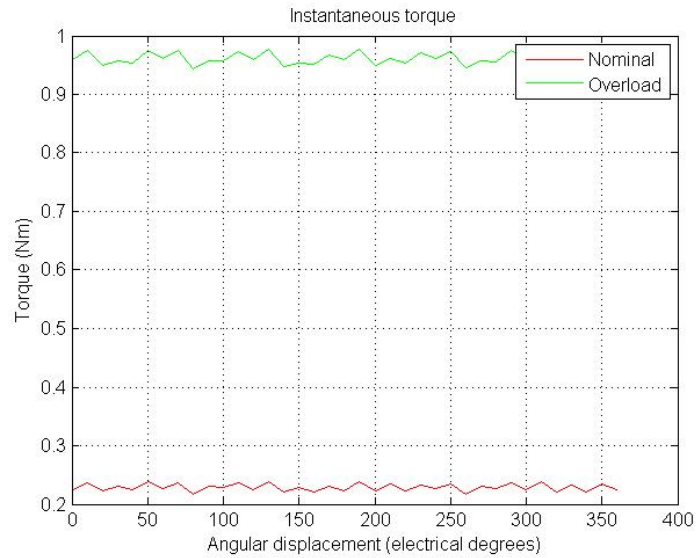


Σχήμα 5.22: Κυμάτωση ροπής 4-πολικής διαμόρφωσης με συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης με 6 αύλακες

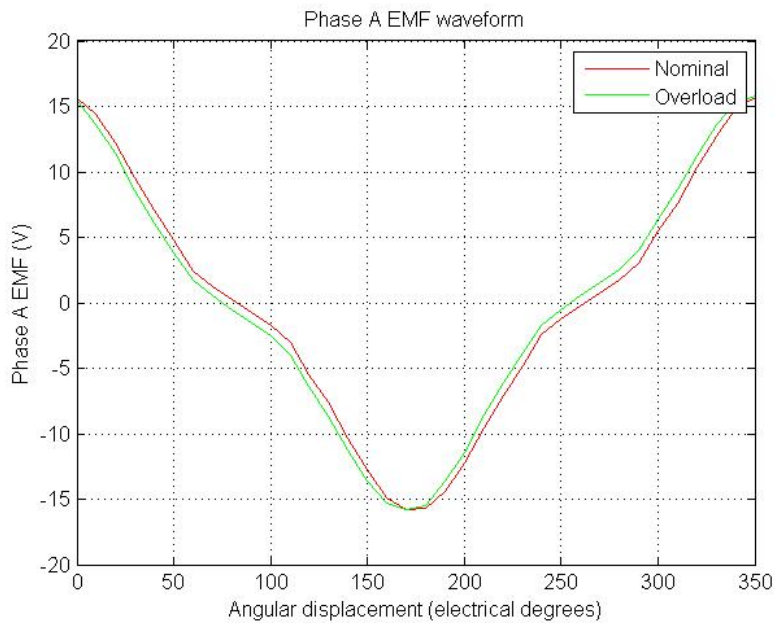


Σχήμα 5.23: Κυματομορφή τάσης 4-πολικής διαμόρφωσης με συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης με 6 αύλακες

Μακράν η καλύτερη 4-πολική είναι αυτή της διπλής στρώσης με 9 αύλακες όπου η αντί-ΗΕΔ έχει πάρει σχεδόν ημιτονοειδή μορφή και η κυμάτωση έχει περιοριστεί αισθητά. Ένα μειονέκτημα ωστόσο εντοπίζεται στην μειωμένη επίδοση σε σχέση με τις άλλες 4-πολικές διαμορφώσεις που οφείλεται στον μικρό συντελεστή τυλίγματος.



Σχήμα 5.24: Κυμάτωση ροπής 4-πολικής διαμόρφωσης με συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης με 9 αύλακες



Σχήμα 5.25: Κυματομορφή τάσης 4-πολικής διαμόρφωσης με συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης με 9 αύλακες

Για να γίνει καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από τα διαγράμματα αλλά και για να εξεταστούν και παράμετροι που δεν φαίνονται σε αυτά, θα χρησιμοποιήσουμε το συγκεντρωτικούς πίνακες 5.7 και 5.8

Τύπος μηχανής	μέγιστη ροπή(Nm)	Κυμάτωση Ροπής (%)	Αρμονική παραμόρφωση (%)	Απώλειες χαλκού (W)	Απώλειες σιδήρου (W)
2/6 S.L.	0.21	37	5.3	1.23	0.95
2/3 D.L.	0.24	15	2.2	1.3	1
4/6 S.L.	0.38	51	8.2	2.49	1.7
4/6 D.L.	0.37	55	9.1	1.35	1.74
4/9 D.L.	0.23	9.5	12	0.85	2

Πίνακας 5.7: Σύγκριση διαμορφώσεων για πυκνότητα ρεύματος 1 A/mm<sup>2</sup>

Τύπος μηχανής	μέγιστη ροπή(Nm)	Κυμάτωση Ροπής (%)	Αρμονική παραμόρφωση (%)	Απώλειες χαλκού (W)	Απώλειες σιδήρου (W)
2/3 S.L.	0.87	22	5.3	19.7	1
2/3 D.L.	0.96	12	2.2	20.8	1.1
4/6 S.L.	1.5	18	6.2	39.4	2.1
4/6 D.L.	1.53	21	6.9	21.7	1.88
4/9 D.L.	0.96	3.4	12	13	2

Πίνακας 5.8: Σύγκριση διαμορφώσεων για πυκνότητα ρεύματος 4 A/mm<sup>2</sup>

Όσον αφορά τις 2-πολικές διαμορφώσεις η καλύτερη είναι η συγκεντρωμένη διπλής στρώσης καθώς παρουσιάζει πολύ βελτιωμένη ποιότητα ισχύος με υψηλότερη επίδοση. Επίσης οι συνολικές απώλειες δεν έχουν σημαντικές διαφορές.

Από τις 4-πολικές διαμορφώσεις αυτές με 6 αύλακες έχουν μεγαλύτερη επίδοση ωστόσο παρουσιάζουν τόσο πολύ μεγάλη κυμάτωση ροπής ειδικά στην χαμηλή ισχύ που η χρησιμοποίησή τους γίνεται απαγορευτική. Η 4-πολική με 9 αύλακες φαίνεται ότι έχει πολύ καλή συμπεριφορά και είναι η καλύτερη 4-πολική διαμόρφωση.

Συγκρίνοντας τις δύο καλύτερες διαμορφώσεις βλέπουμε ότι η διαφορά τους βρίσκεται στον καταμερισμό των απωλειών. Πιο συγκεκριμένα η διπολική επειδή λειτουργεί σε χαμηλότερη συχνότητα παρουσιάζει μικρότερες απώλειες σιδήρου. Ωστόσο η τετραπολική λόγω μικρότερου πάχους δοντιού έχει καλύτερη

εκμετάλλευση χαλκού και άρα μικρότερες απώλειες χαλκού. Μάλιστα βλέπουμε ότι η διαφορά αυτή γίνεται ακόμα μεγαλύτερη όταν αυξάνεται η πυκνότητα ρεύματος.

#### **5.4 Διερεύνηση βέλτιστων διαμορφώσεων**

Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε εκτενής παρουσίαση όλων των πιθανών διαμορφώσεων που ταιριάζουν στις ανάγκες μας και ύστερα από μια πρώτη σύγκριση καταλήξαμε στις δύο καταλληλότερες. Το επόμενο βήμα είναι ύστερα από μια εκτενή ανάλυση ευαισθησίας για κάθε μια ξεχωριστά να βρεθούν τα βέλτιστα χαρακτηριστικά του κάθε κινητήρα.

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: Το βάρος, τις απώλειες, την αρμονική παραμόρφωση και την κυμάτωση ροπής.

Ωστόσο επειδή πολλές φορές υπάρχουν διαμορφώσεις όπου η μείωση του ενός χαρακτηριστικού οδηγεί στην αύξηση ενός άλλου είναι αναγκαία μια ιεράρχηση των παραπάνω κριτηρίων ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής. Με βάση όσο αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3 το κυριότερο χαρακτηριστικό είναι η απόδοση. Στη συνέχεια το βάρος καθώς χαμηλότερο βάρος οδηγεί σε μικρότερη αδράνεια συνολικά του οχήματος και επομένως μικρότερες ανάγκες σε ισχύ και τέλος η ποιότητα ισχύος.

Μια ακόμα παράμετρος που πρέπει να καθοριστεί είναι και το σημείο λειτουργίας με βάση το οποίο θα βελτιστοποιηθεί ο κινητήρας. Το σημείο αυτό θα καθοριστεί και αυτό ανάλογα με την εφαρμογή. Υπάρχουν δυο σημεία που ο κινητήρας θα λειτουργεί. Στην διάρκεια του αγώνα και κατά την εκκίνηση. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το όχημα κατά το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα καλείται να κινείται με σταθερή ταχύτητα θα πρέπει να έχει βέλτιστη συμπεριφορά σε αυτήν την κατάσταση. Επομένως η βελτιστοποίηση θα γίνει για ροπή 0,3 Nm και ταχύτητα 1995 ΣΑΛ.

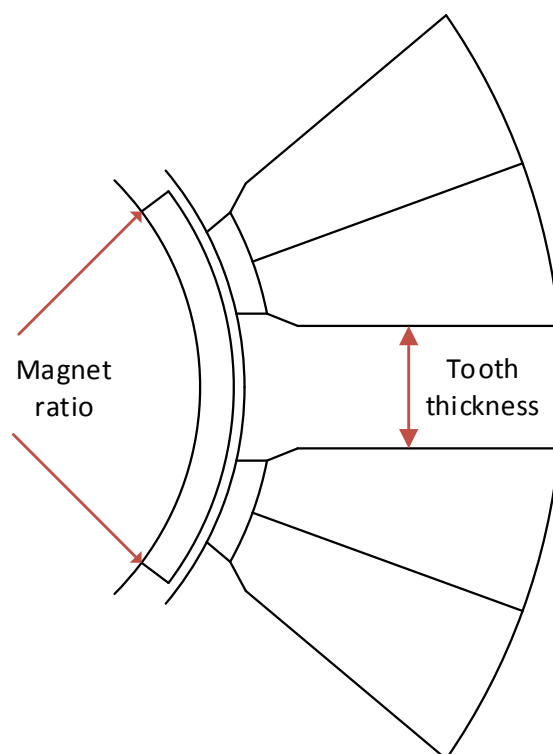
##### **5.4.1 Ανάλυση ευαισθησίας τετραπολικής με εννέα αύλακες**

Κατά την διάρκεια της αναζήτησης της βέλτιστης γεωμετρίας χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετική άξονες εργασίας:

- 1) Βελτιστοποίηση δρομέα
- 2) Βελτιστοποίηση δοντιού
- 3) Βελτιστοποίηση στάτη

### Βελτιστοποίηση δρομέα

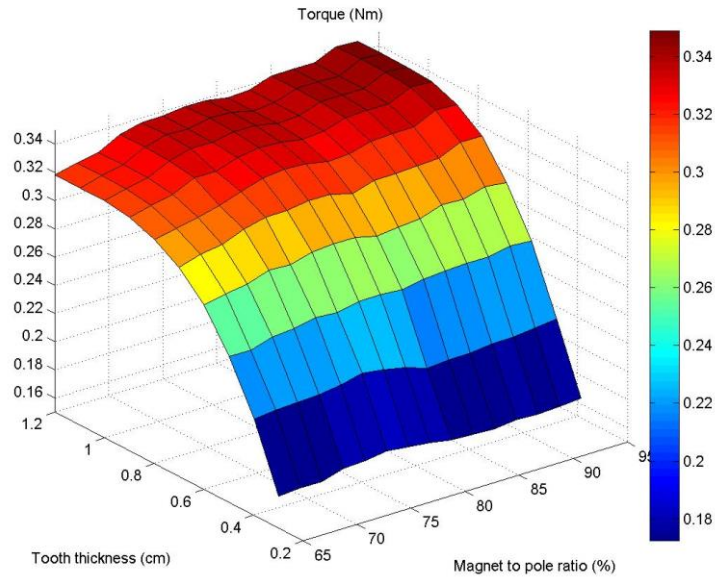
Τα κύρια χαρακτηριστικά του δρομέα είναι η γωνία μαγνήτη και το πάχος του. Εμπειρικά μια καλή αρχική τιμή για το πάχος μαγνήτη είναι 4 φορές το πάχος διακένου, δηλαδή 21 mm. Επιπλέον κατά την διάρκεια δοκιμών παρατηρήθηκε ότι η κατάλληλη γωνία μαγνήτη εξαρτάται άμεσα και από το πάχος δοντιού πιθανώς γιατί και τα δύο αυτά χαρακτηριστικά συνδέονται με την πορεία της μαγνητικής ροής στην μηχανή. Έτσι επιλέχτηκαν για την πρώτη ανάλυση ευαισθησίας όπως φαίνεται στο σχήμα (5.26).



Σχήμα 5.26: Παράμετροι που μεταβάλλονται κατά την βελτιστοποίηση του δρομέα

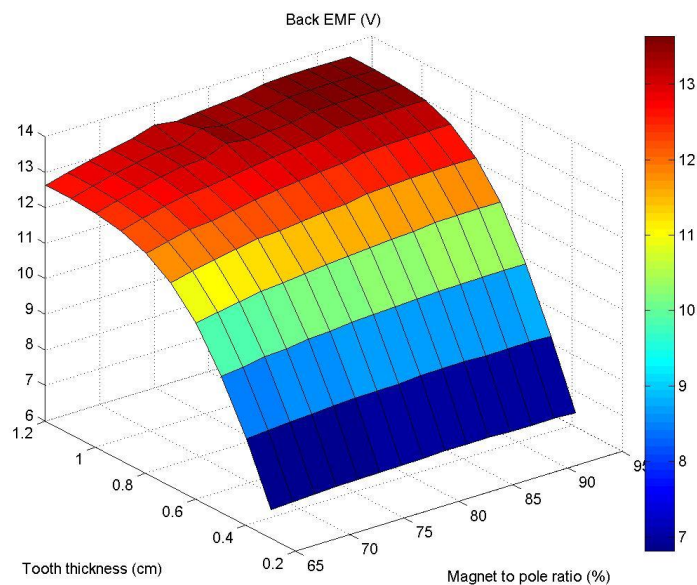
Η ανάλυση ευαισθησίας έγινε με ρεύμα  $1 \text{ A/mm}^2$  και σαν εύρος τιμών για την γωνία μαγνήτη κρίθηκε εύλογο να είναι από 65 % μέχρι 95% ενώ για το πάχος του δοντιού από 0,2 mm έως 1,2 mm. Τέλος για να διατηρούμε σταθερή την μαγνήτιση και να εξαγάγουμε ασφαλή συμπεράσματα επιλέχτηκε να παραμένουν σταθερά τόσο ο όγκος του μαγνήτη όσο και το εμβαδόν της αύλακας.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 5.27: Ανάλυση ευαισθησίας στην μέγιστη ροπή που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας.

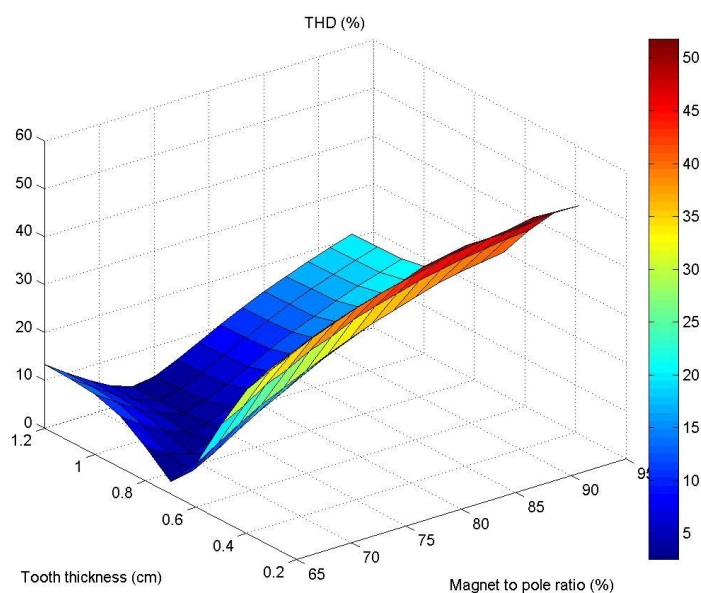
Παρατηρώντας το σχήμα (5.27) βλέπουμε ότι η μέγιστη ροπή δεν μεταβάλλεται όσο αλλάζει η πολική γωνία του μαγνήτη, αντίθετα όμως επηρεάζεται άμεσα από το πάχος δοντιού. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι μικρό δόντι εμποδίζει την ομαλή κίνηση της μαγνητικής ροής με αποτέλεσμα να περιορίζεται η ικανότητα επίδοσης του κινητήρα. Αυτό εξηγεί και την σχεδόν γραμμική αύξηση της ροπής όσο το δόντι παραμένει λεπτό και την σταδιακή μείωση του ρυθμού αύξησης της σε μεγαλύτερα πάχη.



Σχήμα 5.28: Ανάλυση ευαισθησίας στο μέτρο της αντί-ΗΕΔ.

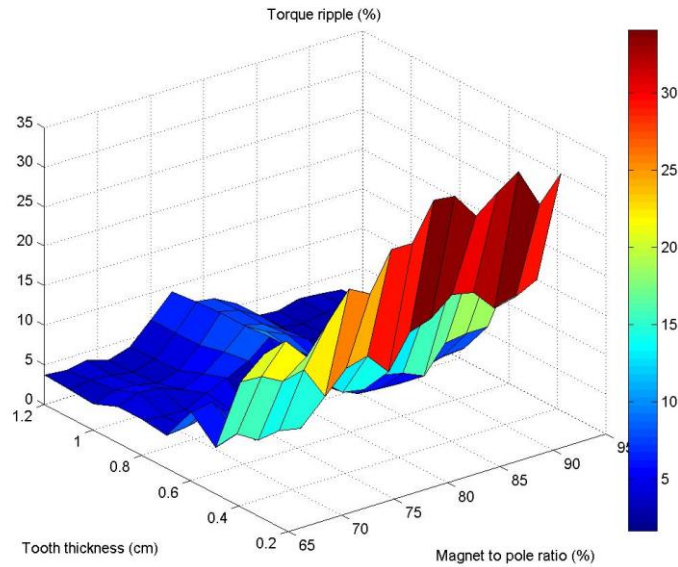
Στο σχήμα (5.28) βλέπουμε ότι η τάση έχει παρόμοια μορφή με την αποδιδόμενη μέγιστη ροπή. Αυτό ήταν αναμενόμενο αφού κρατώντας σταθερό το ρεύμα σε κάθε προσομοίωση για να αυξηθεί η επίδοση του κινητήρα πρέπει να αυξηθεί η παραγόμενη τάση. Ένα τελευταίο στοιχείο που πρέπει να παρατηρήσουμε είναι ότι υπάρχουν γεωμετρίες που η τάση αυξάνεται περισσότερο από την επιθυμητή τιμή επομένως εισάγεται εδώ ένας περιορισμός στις διαθέσιμες γεωμετρίες.

Στο σχήμα (5.29) βλέπουμε πως το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης εξαρτάται έντονα και από τις δύο μεταβλητές. Πιο συγκεκριμένα για το πάχος του δοντιού ισχύει ότι παρατηρήσαμε και στην ροπή αφού όσο πιο πολύ στενεύει τόσο περισσότερο αυξάνεται η μαγνήτιση τοπικά στο δόντι με αποτέλεσμα να πλησιάζει στον κορεσμό ο σίδηρος και να εισάγονται αρμονικές.



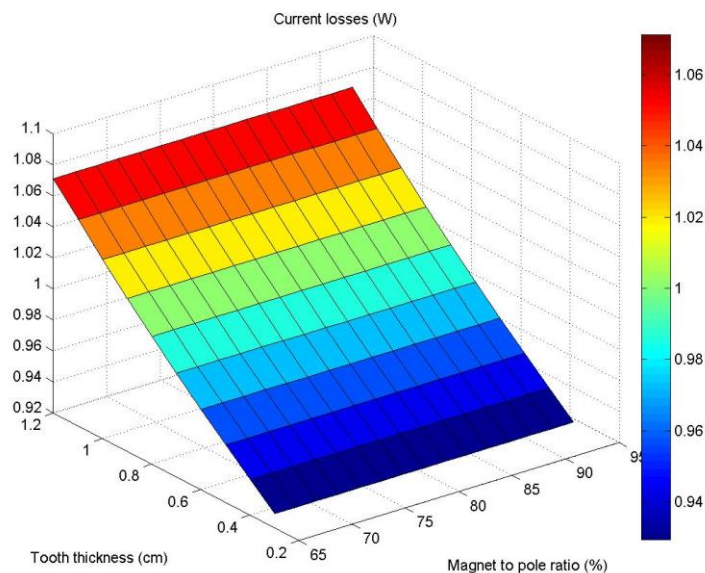
Σχήμα 5.29: Ανάλυση ευαισθησίας στην αρμονική παραμόρφωση της τάσης του κινητήρα.





Σχήμα 5.30: Ανάλυση ευαισθησίας στην κυμάτωση ροπής του κινητήρα.

Η κυμάτωση ροπής (σχήμα 5.30) φαίνεται να έχει άμεση σχέση με τον κορεσμό του σιδήρου, για αυτό τον λόγο μειώνεται σε μεγάλα πλάτη δοντιού και σε μικρότερες γωνίες μαγνήτη.



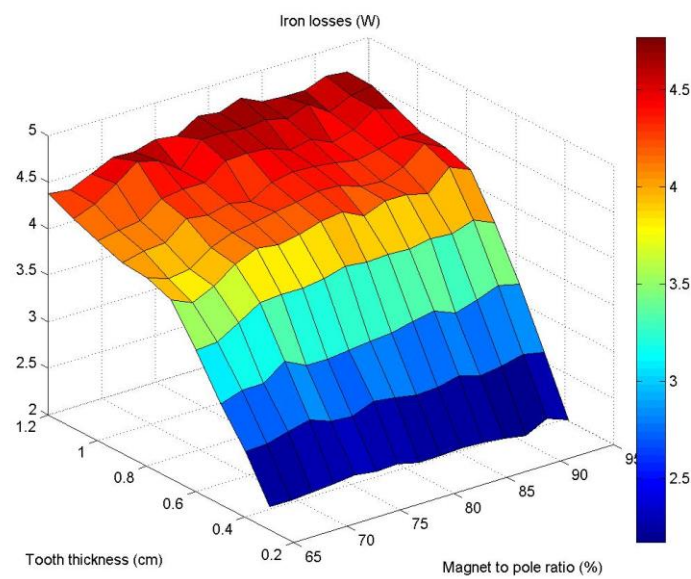
Σχήμα 5.31: Ανάλυση ευαισθησίας στις απώλειες χαλκού του κινητήρα

Οι απώλειες χαλκού (σχήμα 5.31) αφού παραμένει σταθερό το ρεύμα εξαρτώνται αποκλειστικά από την ποσότητα χαλκού στην μηχανή. Για αυτό τον λόγο δεν επηρεάζονται καθόλου από την γωνία μαγνήτη αλλά μόνο από το πάχος του

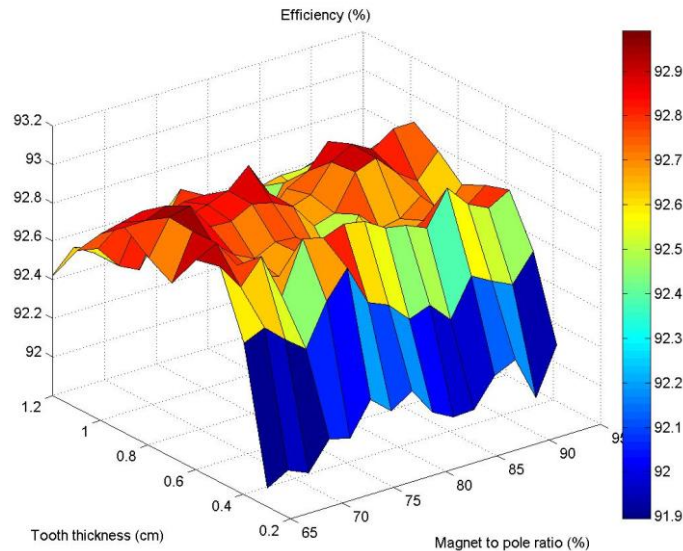


δοντιού. Αυτό γιατί αυξάνοντας την απόσταση των αυλακών αυξάνεται και το μήκος του καλωδίου που απαιτείται για να τις ενώσει, πράγμα που γενικά αποτελεί κακή χρήση του χαλκού καθώς δεν συμμετέχει στην παραγωγή ροπής.

Οι απώλειες σιδήρου(σχήμα 5.32) εξαρτώνται από την ποσότητα του σιδήρου και από την μαγνήτιση. Άρα επειδή όταν μεγαλώνουμε το δόντι προσθέτουμε σίδηρο αυξάνονται οι απώλειες και επειδή αλλάζονται την γωνία του μαγνήτη κρατούσαμε σταθερό το εμβαδόν του δεν μεταβαλλόταν η μαγνήτιση επομένως δεν άλλαζαν ούτε οι απώλειες.



Σχήμα 5.32: Ανάλυση ευαισθησίας στις απώλειες σιδήρου του κινητήρα.



Σχήμα 5.33: Ανάλυση ευαισθησίας στον βαθμό απόδοσης του κινητήρα.

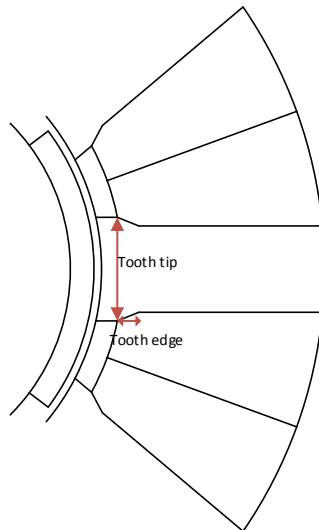
Για το τέλος αφήσαμε το κυριότερο χαρακτηριστικό που έχουμε θέσει δηλαδή την απόδοση (σχήμα 5.33) όπου παρατηρούμε ότι το μέγιστο βαθμό απόδοσης τον έχουμε για υλοποιήσεις όπου παρουσιάζεται μια ισορροπία μεταξύ των απωλειών χαλκού και σιδήρου, δηλαδή για υλοποιήσεις με δόντι κοντά σε 0,8 cm.

Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να εξάγουμε τα εξής χρήσιμα συμπεράσματα:

- a) Η γωνία μαγνήτη δεν επηρεάζει σημαντικά ούτε την απόδοση ούτε την επίδοση της μηχανής ωστόσο σε μεγάλες γωνίες παρουσιάζεται αύξηση και της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης και της κυμάτωσης της ροπής.
- b) Η αύξηση του πάχους του δοντιού οδηγεί βελτίωση της επίδοσης. Ωστόσο με πολύ μεγάλο πάχος έχουμε πολύ αυξημένες απώλειες σιδήρου που οδηγούν σε μείωση της απόδοσης
- c) Μετά από αναλυτική επεξεργασία των μετρήσεων καταλήξαμε ότι ο καταλληλότερος συνδυασμός είναι:
  - Για το πάχος δοντιού 1 cm.
  - Για την γωνία μαγνήτη 75% επί του πολικού βήματος.

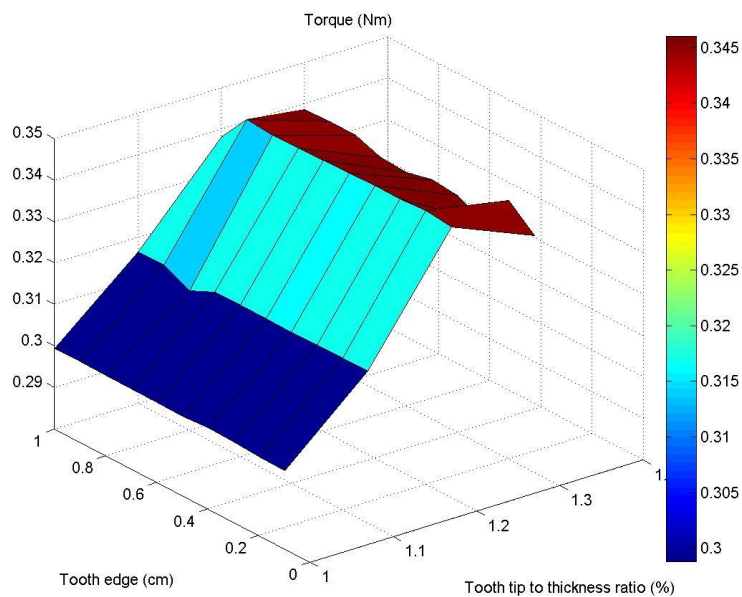
### Βελτιστοποίηση δοντιού

Προηγουμένως καταλήξαμε στο πάχος του δοντιού, αλλά μένει να προσδιοριστούν άλλες δύο παράμετροι (σχήμα 5.28). Αν χρειάζεται το δόντι να είναι ευθείο και αν όχι να βρεθεί το πάχος αυτής της προεξοχής.



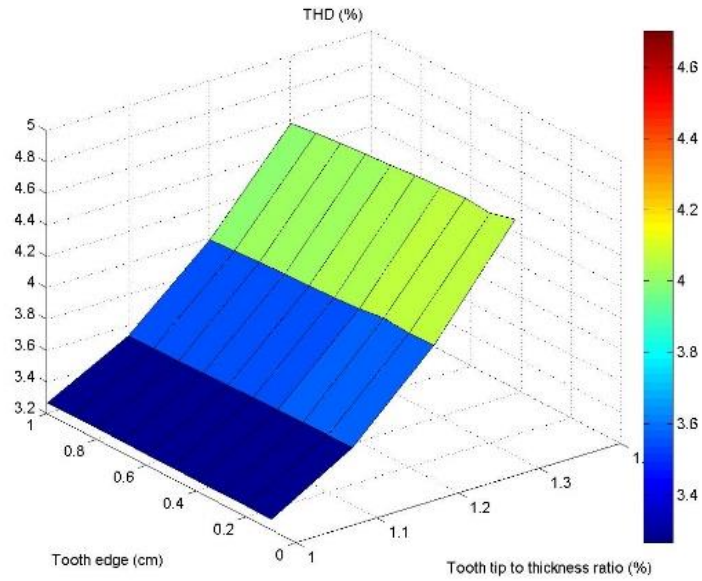
Σχήμα 5.34: Παράμετροι που μεταβάλλονται κατά την βελτιστοποίηση του δοντιού του κινητήρα.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται πως μεταβάλλονται τα βασικά χαρακτηριστικά της μηχανής με την αλλαγή των παραπάνω χαρακτηριστικών.

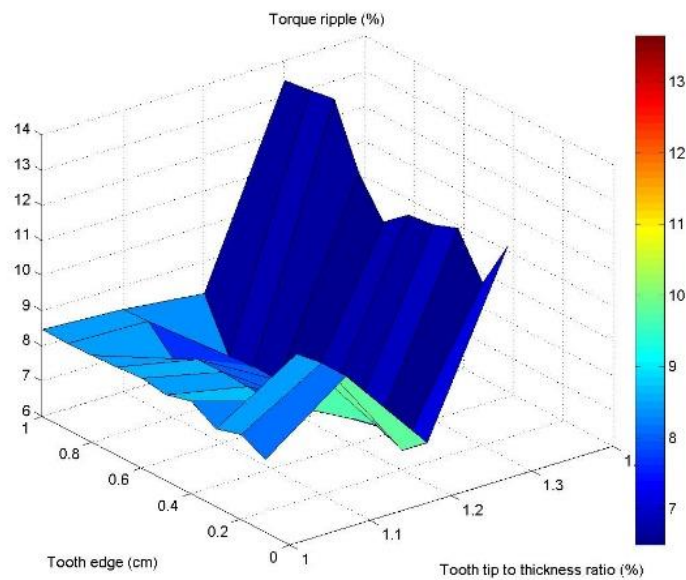


Σχήμα 5.35: Ανάλυση ευαισθησίας στην μέγιστη αποδιδόμενη ροπή του κινητήρα.

Στο σχήμα 5.35 βλέπουμε ότι η δημιουργία προεξοχής στο δόντι αυξάνει την αποδιδόμενη ροπή της μηχανής, πιθανότατα γιατί αυξάνεται η συνολική επιφάνεια του δοντιού, άρα και ο δρόμος της μαγνητικής ροής. Από την άλλη πλευρά το πάχος αυτής της προεξοχής δεν επηρεάζει καθόλου την επίδοση.



(α)

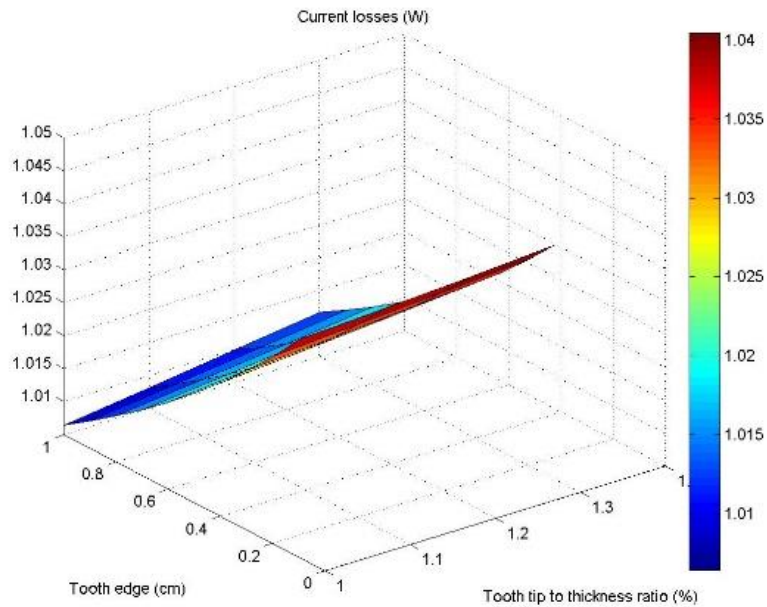


(β)

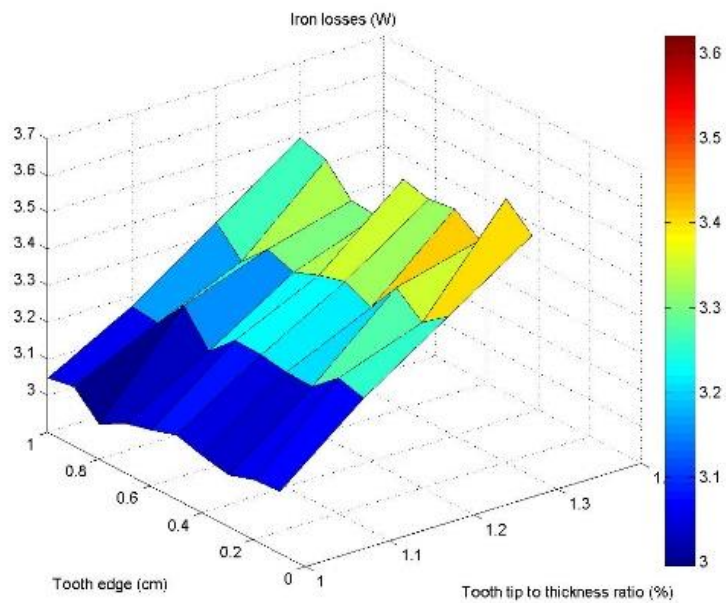
Σχήμα 5.36: Ανάλυση ευαισθησίας στην αρμονική παραμόρφωση της τάσης (α) και στην κυμάτωση ροπής (β) του κινητήρα.

Η αρμονική παραμόρφωση της τάσης (σχήμα 5.36α ) σε αντίθεση με αυτό που είχαμε προβλέψει σε προηγούμενη ενότητα φαίνεται να μην επηρεάζεται ιδιαίτερα από την αλλαγή αυτών των μεταβλητών παρόλο που εμφανίζει μια μικρή αύξηση.

Η κυμάτωση ροπής (σχήμα 5.36β ) δεν φαίνεται να έχει κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο εξάρτησης αφού παρουσιάζει μια τυχαιότητα στην μεταβολή της. Ωστόσο υπάρχουν διαστάσεις που επιτυγχάνεται σημαντικός περιορισμός της.



(α)



(β)

Σχήμα 5.37: Ανάλυση ευαισθησίας στις απώλειες χαλκού (α) και στις απώλειες σιδήρου (β) του κινητήρα.

Όσον αφορά τις απώλειες βλέπουμε ότι δεν έχουν κάποια αλλαγή. Πιο συγκεκριμένα οι απώλειες χαλκού (σχήμα 5.37α ) παραμένουν σταθερές αφού δεν αλλάζει η συνολική ποσότητα χαλκού, ενώ οι απώλειες σιδήρου(σχήμα 5.37β ) αυξάνονται λίγο με την δημιουργία προεξοχής στο δόντι λόγω αύξησης της ποσότητας σιδήρου. Ωστόσο αξίζει να παρατηρήσουμε ότι δεν αυξάνονται γραμμικά, δηλαδή οι μεγάλες προεξοχές οδηγούν σε μείωση της μαγνήτισης στο δόντι.

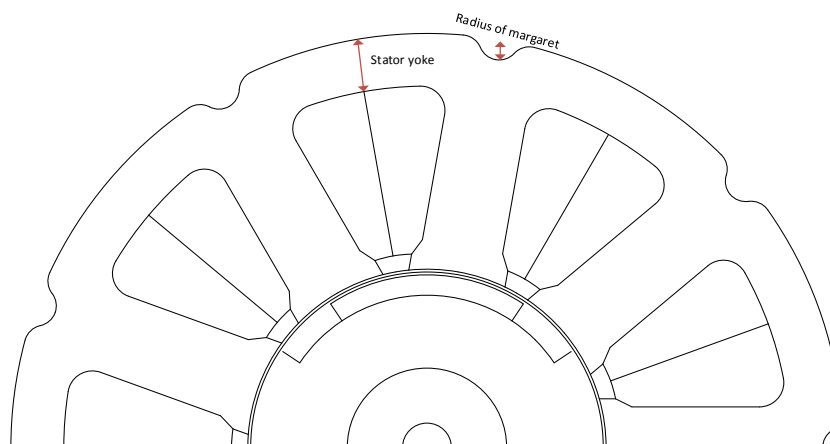
Έχοντας ολοκληρώσει την ανάλυση ευαισθησίας για το δόντι εξάγουμε τα παρακάτω χρήσιμα συμπεράσματα:

- a) Η δημιουργία προεξοχής στο δόντι οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αποδιδόμενης ροπής. Συγκεκριμένα μια εκτυπότητα στο δόντι 20% προκαλεί αύξηση ροπής 30% χωρίς να επηρεάζει σημαντικά το βάρος.
- b) Δεν παρουσιάζεται καμία άλλη ιδιαίτερη μεταβολή ούτε θετική ούτε αρνητική για κάποιο άλλο χαρακτηριστικό της μηχανής.
- c) Λαμβάνοντας υπόψη την τόσο σημαντική αύξηση ροπής που προσφέρει αυτή η διαμόρφωση δοντιού καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι αξίζει να υιοθετηθεί παρόλο την επιπλέον κατασκευαστική δυσκολία που εισάγει. Έτσι ύστερα από αναλυτική μελέτη των αποτελεσμάτων οι ιδανικές τιμές είναι:

- Για το ποσοστό της προεξοχής 120% επί του πάχους του δοντιού
- Για το πλάτος της προεξοχής 0,2cm

### Βελτιστοποίηση στάτη

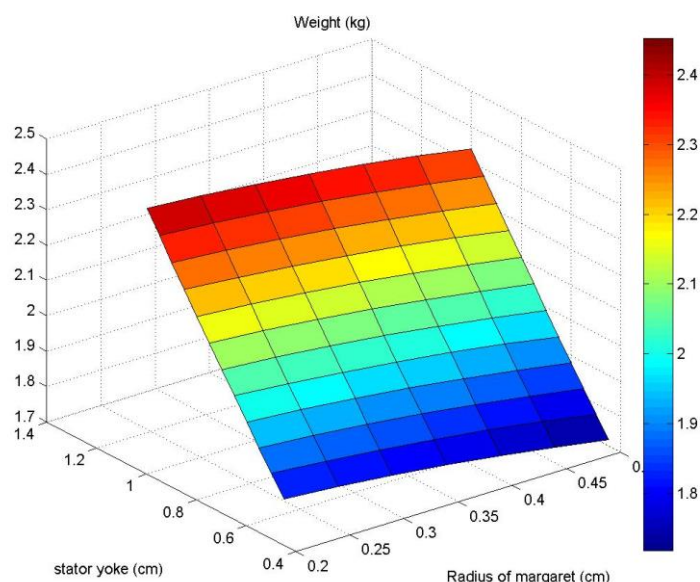
Το τελευταίο βήμα είναι να προσδιοριστεί το ελάχιστο σώμα του στάτη και η μέγιστη ακτίνα μαργαρίτας (σχήμα 5.32) ώστε να επιτυγχάνεται ελαχιστοποίηση του βάρους χωρίς να έχουμε σημαντικές επιπτώσεις στα υπόλοιπα χαρακτηριστικά.



Σχήμα 5.38: Παράμετροι που μεταβάλλονται κατά την διάρκεια βελτιστοποίησης του στάτη



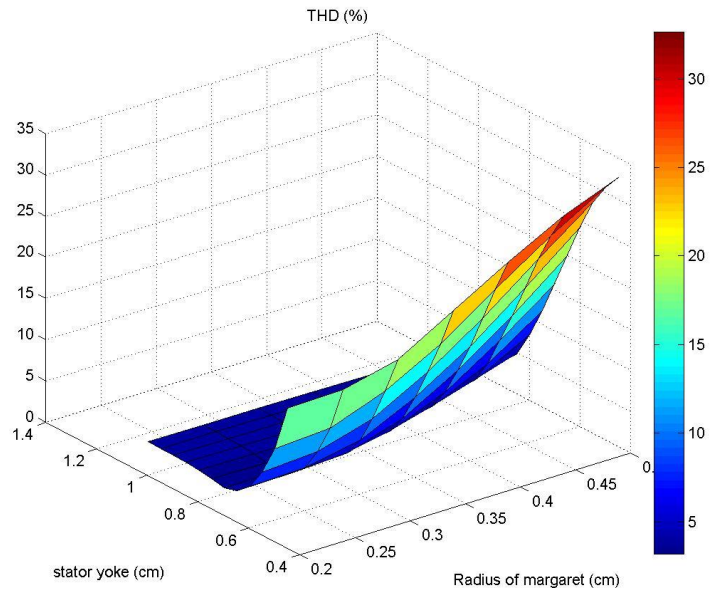
Αναμένεται μια μικρή αύξηση στην αρμονική παραμόρφωση της τάσης και της κυμάτωσης ροπής καθώς θα πιεστεί η ροή ωστόσο θα γίνει προσπάθεια να επιτύχουμε αντιστάθμιση τους μέσα από την πιθανή μείωση του βάρους και των απωλειών πυρήνα.



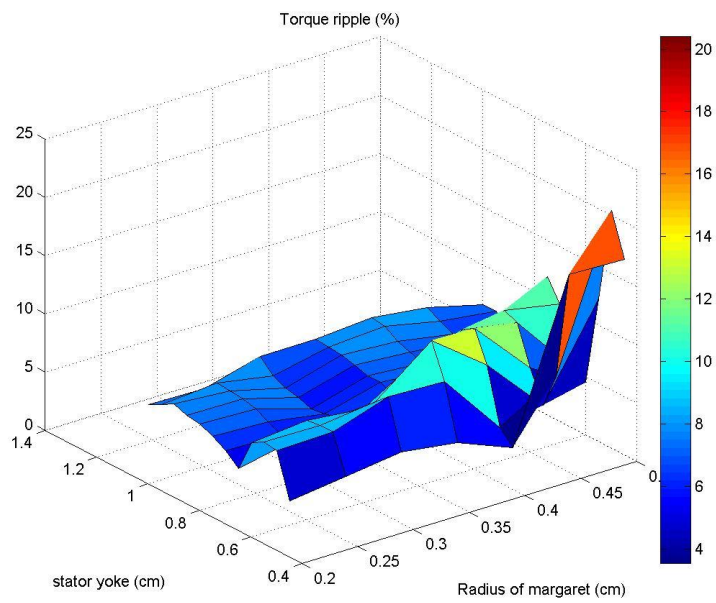
Σχήμα 5.39: Ανάλυση ευαισθησίας στο βάρος του κινητήρα.

Ξεκινώντας με το βάρος (σχήμα 5.39) βλέπουμε ότι μπορούμε να επιτύχουμε σημαντική μείωση του που ανέρχεται ακόμα και σε 29 %.

Ωστόσο πρέπει να συνεκτιμήσουμε και τις επιπτώσεις που θα υπάρχουν από την συμπίεση της ροής μελετώντας κατά κύριο λόγο την αρμονική παραμόρφωση (σχήμα 5.40α ). Η μείωση του σώματος του στάτη δεν χειροτερεύει τόσο πολύ την συμπεριφορά της μηχανής όσο η μαργαρίτα. Αυτό γιατί η μαργαρίτα δεν συμπιέζει μόνο την μαγνητική ροή αλλά διαταράσσει και την ομαλή πορεία της. Επομένως θα διαλέξουμε γεωμετρία με μικρό σώμα άλλα όχι μεγάλη ακτίνα μαργαρίτας.



(α)

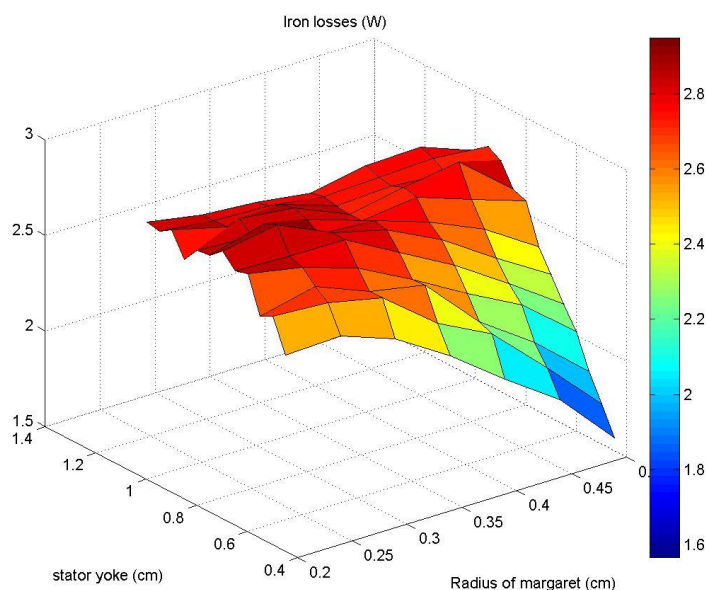


(β)

Σχήμα 5.40: Ανάλυση ευαισθησίας στην αρμονική παραμόρφωση της τάσης (α) και στην κυμάτωση ροπής (β) του κινητήρα.



Τέλος αξίζει να δούμε αναλυτικά το πως μεταβάλλονται και οι απώλειες σιδήρου (σχήμα 5.41) κάνοντας χρήση και του σχήματος 5.33 για το βάρος. Οι απώλειες σιδήρου στο μεγαλύτερο κομμάτι των μεταβολών παραμένουν σχετικά σταθερές παρόλο ότι μειώνεται η ποσότητα του σιδήρου, επειδή το όφελος από την μείωση του σιδήρου αντισταθμίζεται από την αύξηση της μαγνήτισης. Τέλος υπάρχουν περιοχές που παρουσιάζεται μεγάλη μείωση των απωλειών αλλά δεν είναι ωφέλιμες καθώς εκεί υπάρχει και μεγάλη μείωση στην ισχύ.



Σχήμα 5.41: Ανάλυση ευαισθησίας στις απώλειες σιδήρου του κινητήρα.

Οι βέλτιστες τιμές των υπό εξέταση παραμέτρων είναι:

- Για το σώμα του στάτη 0,65 cm
- Για την ακτίνα της μαργαρίτας 0,25 cm

#### 5.4.2 Ανάλυση ευαισθησίας διπολικής μηχανής με τρεις άυλακες

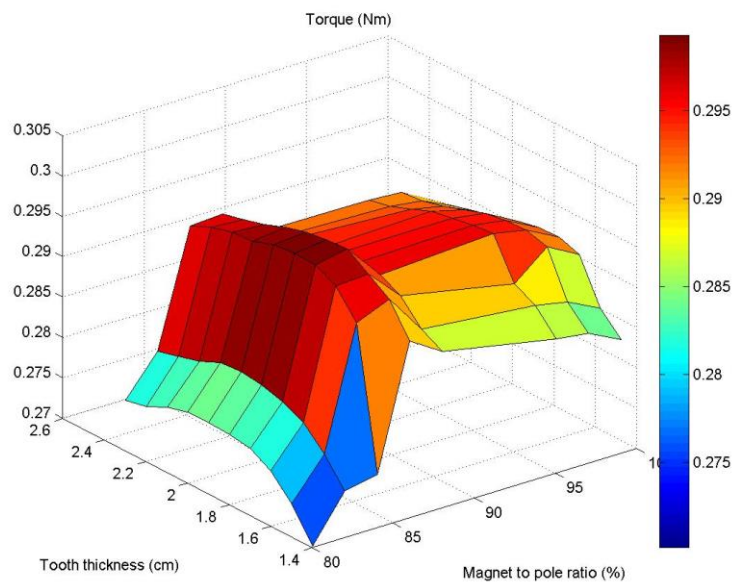
Όπως και στην προηγούμενη ανάλυση έτσι και εδώ η αναζήτηση για την βέλτιστη γεωμετρία θα κινηθεί πάνω σε τρεις κύριους άξονες:

- 1) Βελτιστοποίηση δρομέα
- 2) Βελτιστοποίηση δοντιού
- 3) Βελτιστοποίηση στάτη

Η συμπεριφορά της διπολικής μηχανής αναμένεται να έχει πολλά κοινά χαρακτηριστικά με αυτή της τετραπολικής καθώς και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιούμε συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης. Ωστόσο στις παρακάτω παραγράφους θα επιχειρηθεί σύγκρισή τους και θα γίνει προσπάθεια ερμηνείας των τυχόν διαφορών τους.

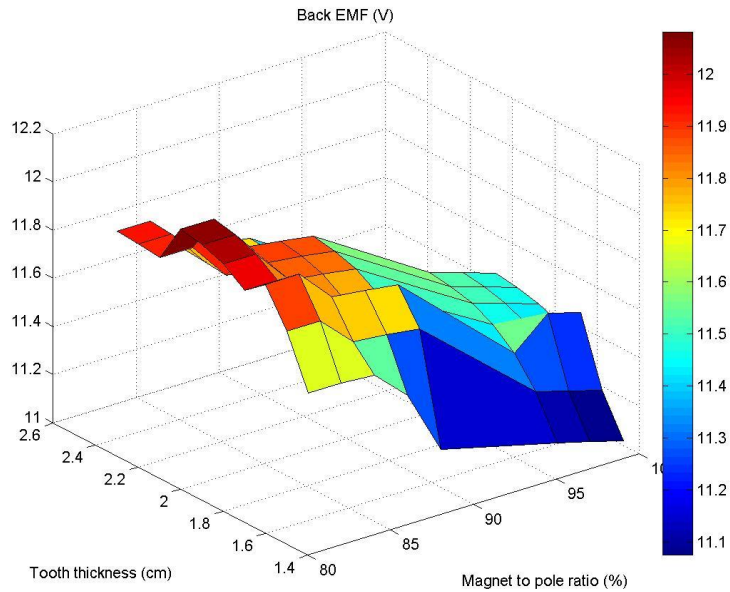
### Βελτιστοποίηση δρομέα

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στο σχήμα 5.26. Η ανάλυση ευαισθησίας έγινε με ρεύμα 1 A/mm<sup>2</sup> και σαν εύρος τιμών για την γωνία μαγνήτη κρίθηκε εύλογο να είναι από 80 % μέχρι 99% ενώ για το πάχος του δοντιού από 1,4 cm ως 2,6 cm.



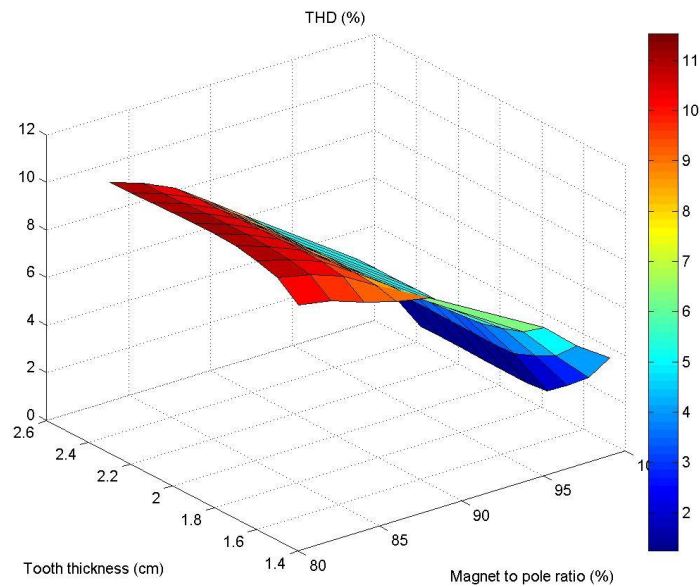
Σχήμα 5.42: Ανάλυση ευαισθησίας στην μέγιστη αποδιδόμενη ροπή του κινητήρα.

Παρατηρώντας πως μεταβάλλεται η ροπή (σχήμα 5.42) βλέπουμε ότι σε αντίθεση με το τι συνέβαινε στην τετραπολική εδώ φαίνεται ότι παραμένει σταθερή σε σχέση με την μεταβολή και της γωνίας μαγνήτη και του πάχους δοντιού. Αυτό πιθανότατα σχετίζεται με το γεγονός ότι στην διπολική έχουμε μόνο τρία δόντια και κατά συνέπεια κάθε φορά η ροή διέρχεται μόνο από ένα. Έτσι από την μία απαιτούνται πιο μεγάλα πάχη δοντιών αλλά από την άλλη σε μικρές μεταβολές του δεν παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία.



Σχήμα 5.43: Ανάλυση ευαισθησίας στο μέτρο της αντί-ΗΕΔ του κινητήρα.

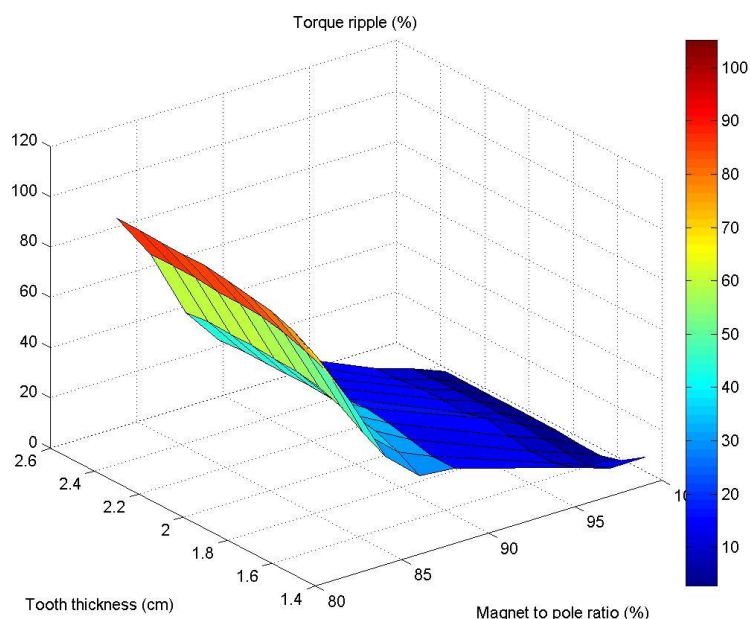
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η τάση (σχήμα 5.43) ειδικά αν γίνει μια συσχέτιση με την ροπή. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μια αύξηση της τάσης μόλις 10 % σε γεωμετρίες που παρέχουν μια αντίστοιχη αύξηση ροπής.



Σχήμα 5.44: Ανάλυση ευαισθησίας στην αρμονική παραμόρφωση της τάσης του κινητήρα.

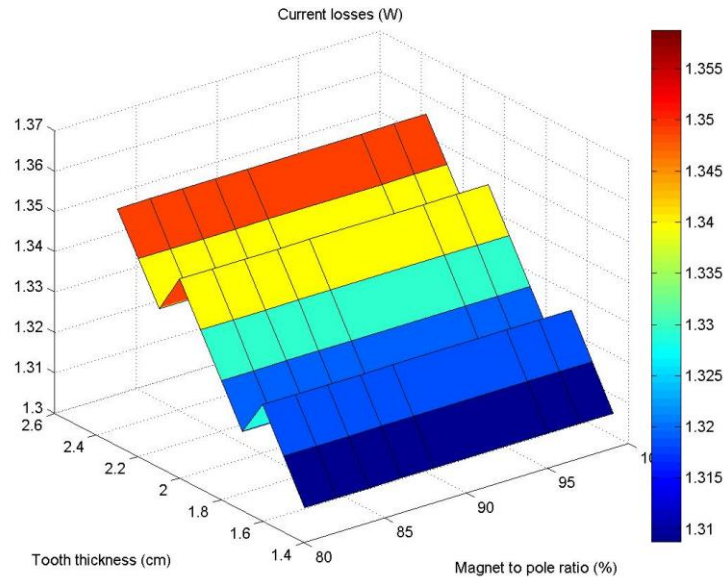
Τα μέχρι τώρα πιο σημαντικά συμπεράσματα μας τα παρέχει η μεταβολή της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης (σχήμα 5.44). Παρατηρούμε ότι εξαρτάται σχεδόν γραμμικά από την γωνία μαγνήτη. Έτσι οι καλύτερες υλοποιήσεις φαίνεται να βρίσκονται σε περιοχές μαγνήτη πάνω από 90%.

Αν επιπλέον παρατηρήσουμε και την κυμάτωση ροπής βλέπουμε ότι μεταβάλλεται ακόμα πιο έντονα από το THD. Μάλιστα σε πολύ μεγάλες γωνίες μαγνήτη επιτυγχάνεται σχεδόν πλήρη εξάλειψή της.



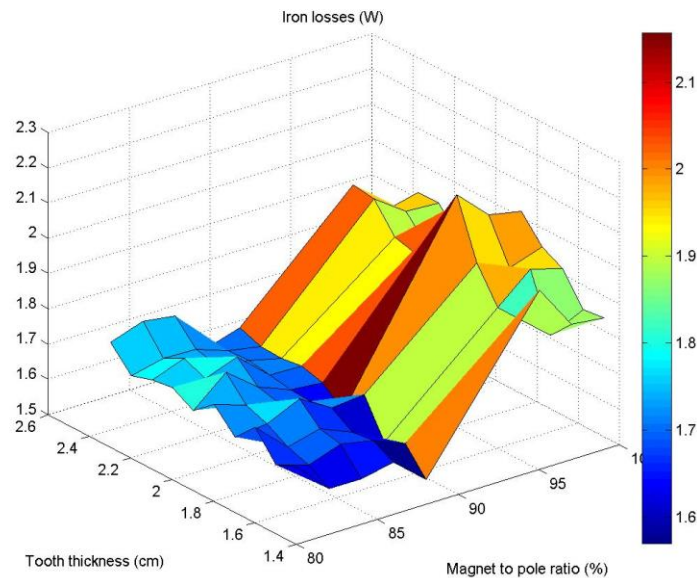
Σχήμα 5.45: Ανάλυση ευαισθησίας στην κυμάτωση ροπής του κινητήρα.

Οι απώλειες χαλκού (σχήμα 5.46) όπως εξηγήσαμε και στην προηγούμενη ενότητα δεν επηρεάζονται από την γωνία μαγνήτη αλλά μόνο από το πάχος δοντιού καθώς μεγάλα πάχη οδηγούν σε μεγάλη απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικές αύλακες άρα και αυξημένη ποσότητα χαλκού. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η διπολική έχει μεγαλύτερες απώλειες χαλκού από την τετραπολική κατά περίπου 30%. Αυτό προφανώς οφείλεται στην ανάγκη ύπαρξης μεγαλύτερων δοντιών και εκφράζει ένα από τα μεγαλύτερα ελαττώματα των διπολικών διαμορφώσεων που είναι η άσχημη εκμετάλλευση του χαλκού.



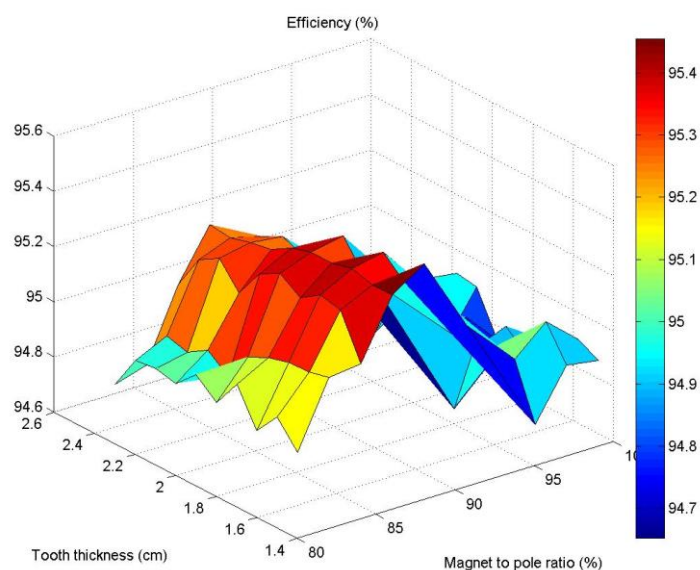
Σχήμα 5.46: Ανάλυση ευαισθησίας στις απώλειες χαλκού του κινητήρα.

Όσον αφορά της απώλειες σιδήρου (σχήμα 5.47) υπάρχουν δύο πολύ ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Πρώτον ότι οι απώλειες περιορίζονται σε διαμορφώσεις με μικρότερη γωνία μαγνήτη, πράγμα που σημαίνει ότι αφού δεν αλλάζει η ποσότητα σιδήρου πρέπει να μειώνεται δραστικά η μαγνήτιση στο δόντι. Δεύτερον ότι συγκρίνοντας με τις απώλειες της τετραπολικής βλέπουμε ότι έχουμε αισθητή διαφορά. Αυτό ήταν κάτι αναμενόμενο αφού μπορεί κατά κανόνα στην διπολική να έχουμε περισσότερη ποσότητα σιδήρου ωστόσο η συχνότητα των ρευμάτων είναι η μισή (33 Hzanτί για 66 Hz).



Σχήμα 5.47: Ανάλυση ευαισθησίας στις απώλειες σιδήρου του κινητήρα.

Τέλος αφήσαμε το σημαντικότερο όπου είναι η απόδοση. Παρατηρώντας το σχήμα 5.48 βλέπουμε ότι μεγιστοποιείται σε μικρές γωνίες μαγνήτη και σε μικρότερα πάχη δοντιών πράγμα αρκετά αναμενόμενο καθώς στα σημεία αυτά παρουσιάζεται ελαχιστοποίηση των απωλειών. Ωστόσο είναι γεωμετρίες που λόγω των έντονων παραμορφώσεων που εμφανίζει η ροπή είναι απαγορευτικές.



Σχήμα 5.48: Ανάλυση ευαισθησίας στο βαθμό απόδοσης του κινητήρα.

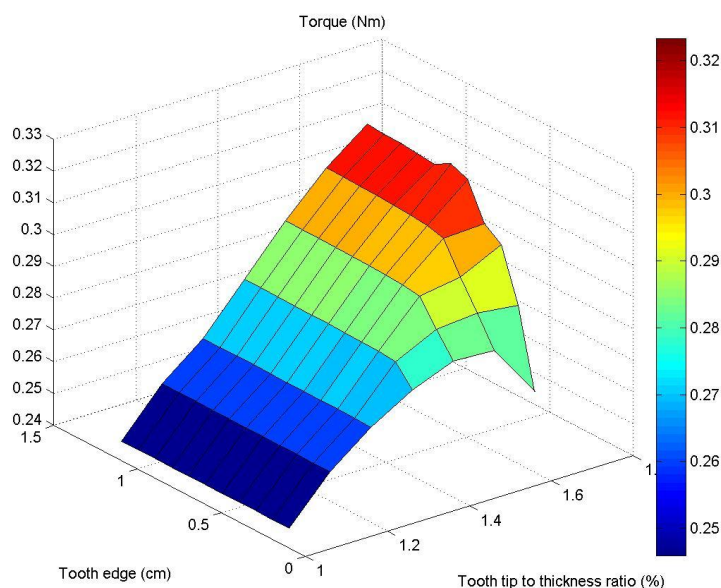
Ολοκληρώνοντας αυτό το πρώτο σκέλος της ανάλυσης καταλήγουμε στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η συμπεριφορά των παρασιτικών φαινομένων μας αναγκάζει να χρησιμοποιήσουμε πολύ μεγάλη γωνία μαγνήτη παρόλο που αυξάνονται οι απώλειες σιδήρου και δεν μας προσφέρει καμία αύξηση στην επίδοση
- Θα χρησιμοποιήσουμε όσο το δυνατόν μικρότερο δόντι καθώς από αυτό εξαρτώνται άμεσα οι απώλειες χαλκού οι οποίες είναι ακόμα αρκετά αυξημένες. Η ανάγκη αυτή γίνεται ακόμα πιο επιτακτική ειδικά αν αναλογιστούμε ότι στην εκκίνηση απαιτείται ρεύμα 4 φορές μεγαλύτερο δηλαδή απώλειες χαλκού 16 φορές παραπάνω
- Με βάση τα παραπάνω και ύστερα από εκτενή μελέτη των αποτελεσμάτων καταλήγουμε ότι οι βέλτιστες διαστάσεις είναι:
  - Για την γωνία μαγνήτη 99% επί του πολικού βήματος.
  - Για το πάχος του δοντιού 1.7 cm



### Βελτιστοποίηση δοντιού

Αφού βρέθηκε το βέλτιστο πάχος δοντιού για ολοκληρώσουμε την κατασκευή του πρέπει να προσδιορίσουμε άλλες δύο παραμέτρους όπως φαίνεται στο σχήμα 5.28, δηλαδή αν πρέπει να έχουμε προεξοχή στο δόντι και τι πάχος πρέπει να έχει. Η ανάλυση ευαισθησίας έγινε με ρεύμα  $1 \text{ A/mm}^2$  και σαν εύρος τιμών για την προεξοχή δοντιού χρησιμοποιήσαμε τιμές από 1 μέχρι 1,8 ενώ για το πάχος της προεξοχής του δοντιού από 0,1 cm έως 1,1 cm.



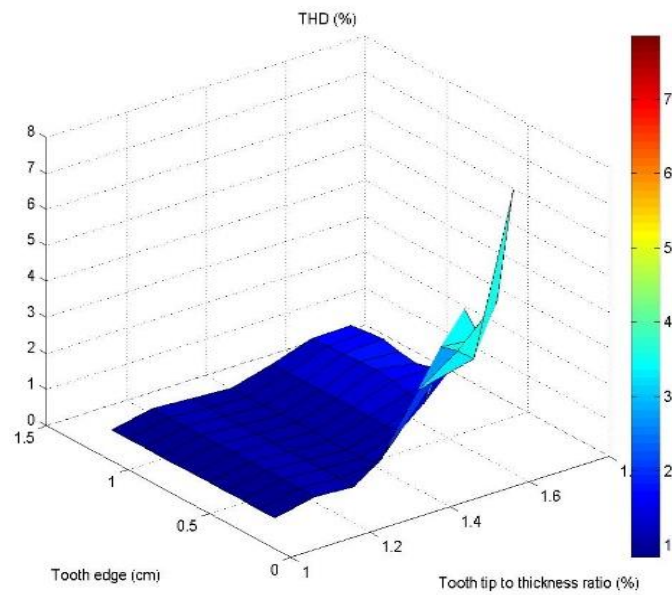
Σχήμα 5.49: Ανάλυση ευαισθησίας στην μέγιστη αποδιδόμενη ροπή του κινητήρα.

Η προεξοχή στο δόντι φαίνεται ότι επηρεάζει ακόμα περισσότερο την ροπή (σχήμα 5.49) σε σχέση με την τετραπολική, καθώς μας προσφέρει αύξηση επίδοσης που αγγίζει το 33.3 %. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό το είχαμε παρατηρήσει και στην τετραπολική ωστόσο στην διπολική με τρεις αύλακες λόγω της διαμόρφωσης του στάτη με τα μεγάλα πάχη δοντιού μπορούμε να εκμεταλλευτούμε ακόμα περισσότερο αυτό το χαρακτηριστικό και να επιτύχουμε υλοποιήσεις με μεγάλες προεξοχές με μεγαλύτερα κέρδη σε ροπή.

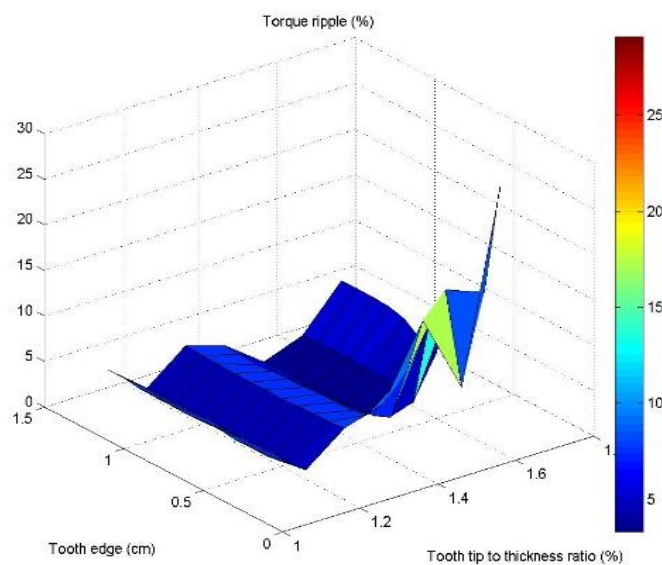
Η αιτία της τόσο μεγάλης αύξησης της ροπής πιθανότατα οφείλεται στην προσθήκη σιδήρου και στην αύξηση του δρόμου της μαγνητικής ροής. Τέλος φαίνεται ότι το πάχος της προεξοχής αυτής δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την ροπή.

Η αρμονική παραμόρφωση της τάσης (σχήμα 5.50 α) φαίνεται να μην επηρεάζεται καθόλου από τις μεταβολές των παραμέτρων. Διατηρείται πολύ χαμηλά σε όλη τις τιμές με εξαίρεση κάποιους ορισμένους γεωμετρικούς συνδυασμούς που πιθανώς να δημιουργούν κάποια «εμπόδια» στο δρόμο της ροής. Αντίστοιχα συμπεράσματα βγάζουμε και για την κυμάτωση της ροπής (σχήμα 5.50 β) αφού στους περισσότερους συνδυασμούς επιτυγχάνεται εξάλειψη της. Τέλος κάνοντας μια

σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τον τετραπολικό συνδυασμό εντοπίζουμε σημαντικές διαφορές οι οποίες πιθανότατα οφείλονται στην ιδιαιτερότητα της πολύ μεγάλης γωνίας μαγνήτη.



(α)



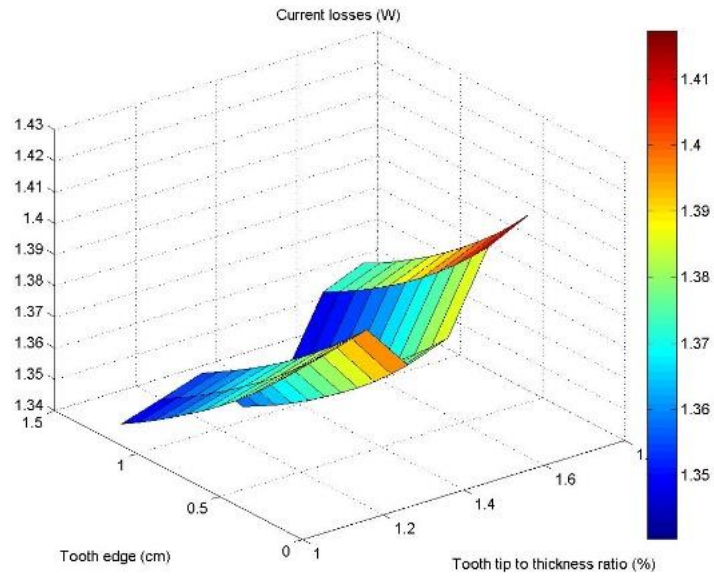
(β)

Σχήμα 5.50: Ανάλυση ευαισθησίας στην αρμονική παραμόρφωση της τάσης (α) και στην κυμάτωση ροπής (β) του κινητήρα.

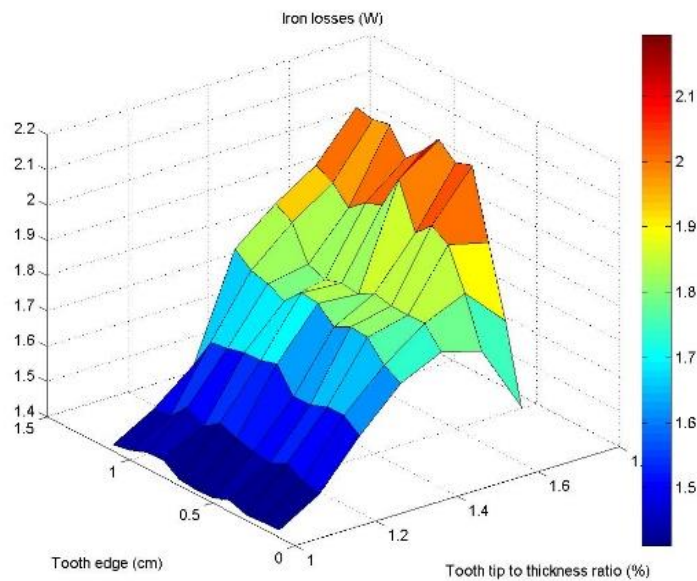
Όσον αφορά τις απώλειες χαλκού (σχήμα 5.51 α) πρακτικά παραμένουν σταθερές αφού δεν μεταβάλλεται ούτε το ρεύμα ούτε η συνολική ποσότητα χαλκού ενώ οι



απώλειες σιδήρου (σχήμα 5.51 β) αυξάνονται σημαντικά με την δημιουργία προεξοχής στο δόντι, καθώς προστίθεται σίδηρος στην μηχανή.



(α)



(β)

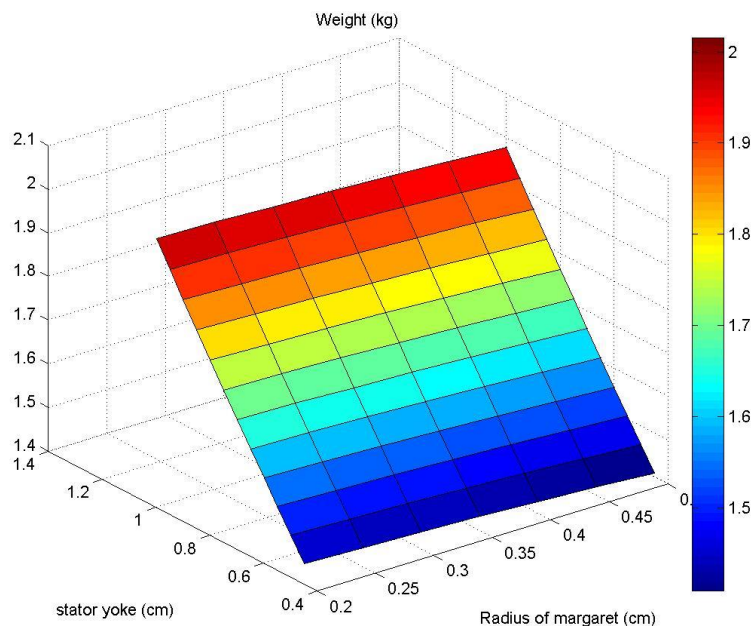
Σχήμα 5.51: Ανάλυση ευαισθησίας στις απώλειες χαλκού (α) και στις απώλειες σιδήρου(β) του κινητήρα.

Έχοντας ολοκληρώσει την ανάλυση ευαισθησίας για το δόντι εξάγουμε τα παρακάτω χρήσιμα συμπεράσματα:

- a) Η δημιουργία προεξοχής στο δόντι οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αποδιδόμενης ροπής, που πολλές φορές φτάνει ακόμα να έχει γραμμική εξάρτηση. Από την άλλη πλευρά το πλάτος της προεξοχής δεν φαίνεται επηρεάζει την συμπεριφορά της μηχανής όσο δεν δημιουργείται κάποιο εμπόδιο στην μαγνητική ροή.
- b) Δεν επηρεάζεται κανένα άλλο χαρακτηριστικό της μηχανής πέρα από μια λογική αύξηση των απωλειών σιδήρου.
- c) Λαμβάνοντας υπόψη την τόσο σημαντική αύξηση ροπής που προσφέρει αυτή η διαμόρφωση δοντιού καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι αξίζει να υιοθετηθεί παρόλο την επιπλέον κατασκευαστική δυσκολία που εισάγει. Έτσι ύστερα από αναλυτική μελέτη των αποτελεσμάτων οι ιδανικές τιμές είναι:
- Για το ποσοστό της προεξοχής 170% επί του πάχους του δοντιού
  - Για το πλάτος της προεξοχής 0,5 cm

### Βελτιστοποίηση στάτη

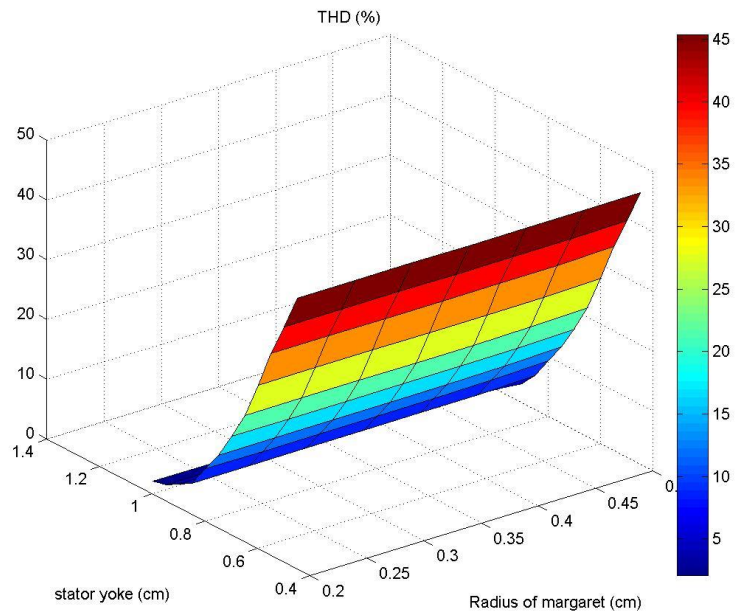
Για το τέλος έχει μείνει να υπολογιστούν οι παράμετροι του στάτη ώστε να επιτύχουμε το ελάχιστο δυνατό βάρος χωρίς ιδιαίτερη επιβάρυνση στα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του κινητήρα. Έτσι μένει να προσδιοριστεί το μέγεθος του σώματος του στάτη και της ακτίνας της μαργαρίτας (σχήμα 5.38)



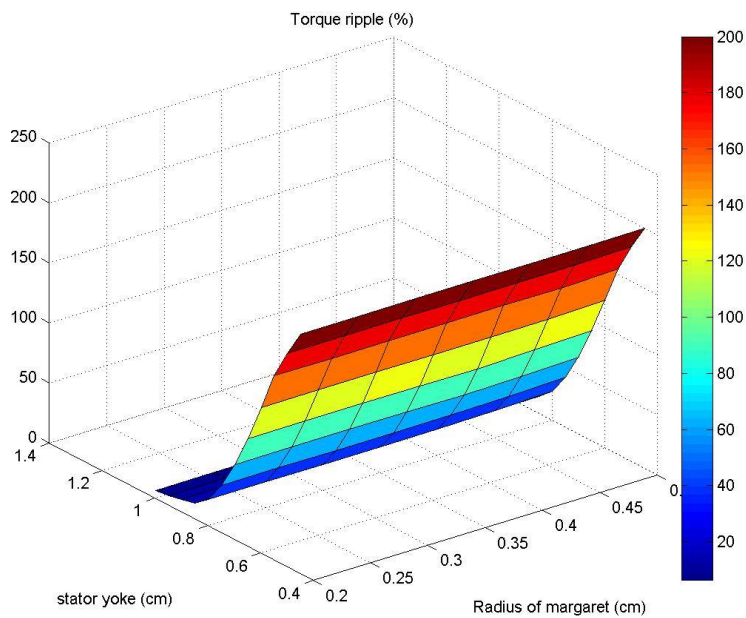
Σχήμα 5.52: Ανάλυση ευαισθησίας στο βάρος του κινητήρα.

Παρατηρώντας πως μεταβάλλεται το βάρος (σχήμα 5.52) μπορούμε να κάνουμε δύο σημαντικές παρατηρήσεις. Πρώτον ότι η μείωση του σώματος του στάτη προκαλεί μεγαλύτερη μείωση στο βάρος του κινητήρα από ότι η μαργαρίτα και

δεύτερον κάνοντας μια σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της τετραπολικής διαφαίνεται ότι απαιτείται μεγαλύτερο σώμα στάτη. Αυτό μπορεί να φανεί ακόμα καλύτερα μελετώντας πως αλλάζει η αρμονική παραμόρφωση (σχήμα 5.53 α) και η κυμάτωση ροπής (σχήμα 5.53 β).



(α)



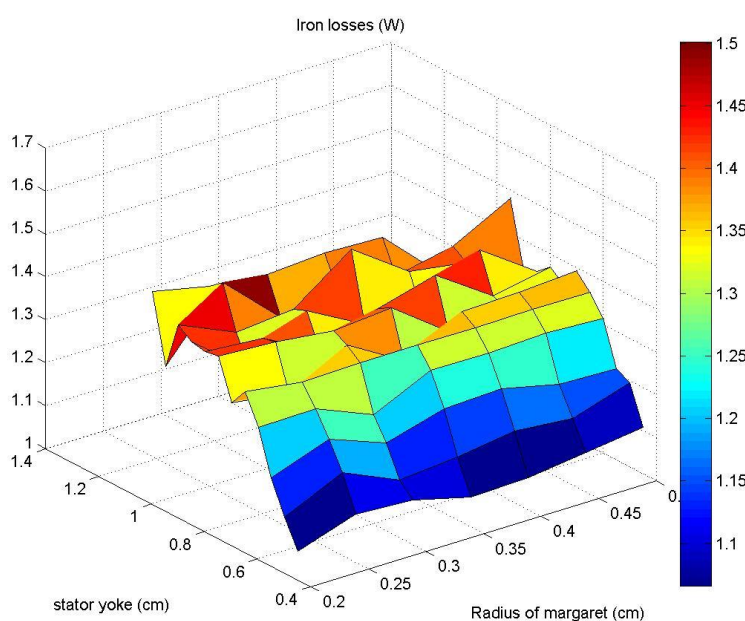
(β)

Σχήμα 5.53: Ανάλυση ευαισθησίας στην αρμονική παραμόρφωση της τάσης (α) και στην κυμάτωση ροπής (β) του κινητήρα.

Για σώμα στάτη κάτω από 0,8 cm η ροή αρχίζει να συμπιέζεται με αποτέλεσμα να έχουμε αύξηση των αρμονικών παραμορφώσεων.

Η διαφορά που παρατηρείται στην διπολική και στην τετραπολική για το μέγεθος του σώματος του στάτη είναι αναμενόμενη καθώς στις διπολικές μηχανές από το συγκεκριμένο κομμάτι σιδήρου πρέπει να διέλθει όλη η ροή, ενώ στις τετραπολικές μόνο η μισή. Αντίστοιχα όσο αυξάνονται οι πόλοι της μηχανής μοιράζεται ακόμα περισσότερο η ροή με αποτέλεσμα την δημιουργία υλοποιήσεων με πολύ μικρότερα σώματα στάτη.

Για να ολοκληρώσουμε την ανάλυση του στάτη πρέπει να δούμε πως μεταβάλλονται οι απώλειες σιδήρου (σχήμα 5.54), όπου παρατηρείται αύξηση των απωλειών ως και 50 % σε γεωμετρίες που πιέζεται έντονα η μαγνητική ροή, είτε αυτή προέρχεται από συμπίεση του σώματος του στάτη είτε από μεγάλη ακτίνα μαργαρίτας.



Σχήμα 5.55: Ανάλυση ευαισθησίας στις απώλειες σιδήρου του κινητήρα.

Κάνοντας εκτενή μελέτη των αποτελεσμάτων της ανάλυσης καταλήξαμε ότι οι βέλτιστες διαστάσεις θα είναι:

- Για το σώμα του στάτη 0,65 cm
- Για την ακτίνα της μαργαρίτας 0,25 cm

### 5.4.3 Επιλογή βέλτιστης διαμόρφωσης

Έχοντας βελτιστοποίηση και τις δύο διαμορφώσεις το επόμενο βήμα είναι να γίνει επιλογή της καλύτερης για την εφαρμογή μας. Η επιλογή αυτή θα γίνει με βάση τα

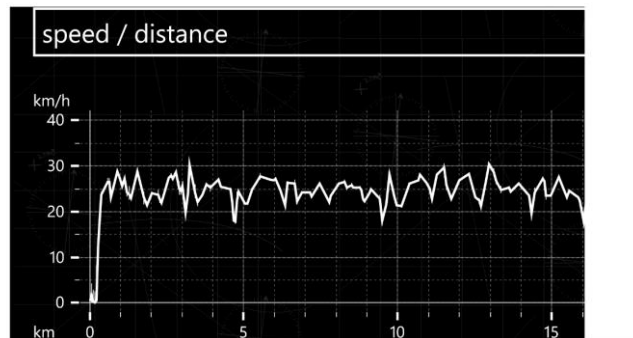
κριτήρια που είχαμε θέσει στην αρχή της ανάλυσης δηλαδή υψηλότερος βαθμός απόδοσης χαμηλότερο βάρος και ικανοποιητική ποιότητα ισχύος. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα και για τις δύο μηχανές για να γίνει καλύτερη αξιολόγηση και σύγκρισή τους.

	4-πολική		2-πολική	
	Πυκνότητα ρεύματος (1 A/mm <sup>3</sup> )	Πυκνότητα ρεύματος (4 A/mm <sup>3</sup> )	Πυκνότητα ρεύματος (1 A/mm <sup>3</sup> )	Πυκνότητα ρεύματος (4 A/mm <sup>3</sup> )
THD της Αντί-HEΔ (%)	3.86	3.69	2.25	3.89
Κυμάτωση ροπής (%)	6.34	4.31	6.67	1.97
Μέγιστη ροπή (Nm)	0.31	1.21	0.31	1.21
Αντί-HEΔ (RMS) (V)	11.9	11.7	12.2	12.8
Πάχος μαγνήτη (cm)	0.25	0.25	0.2	0.2
Βαθμός απόδοσης (%)	94.7	93.2	95.9	91.4
Απώλειες σιδήρου (W)	2.63	2.54	1.48	1.48
Απώλειες χαλκού (W)	0.98	15.8	1.4	22.4
Αριθμός καλωδίων	24	24	71	71
Εξωτερική ακτίνα	5.11	5.11	4.97	4.97
Συνολικό βάρος (kg)	1.9	1.9	1.9	1.9
Φασικό ρεύμα (A)	1.7	7	1.7	7
ισχύς εξόδου(W)	64.8	254	64.64	252

Πίνακας 5.8: Σύγκριση επικρατέστερων διαμορφώσεων

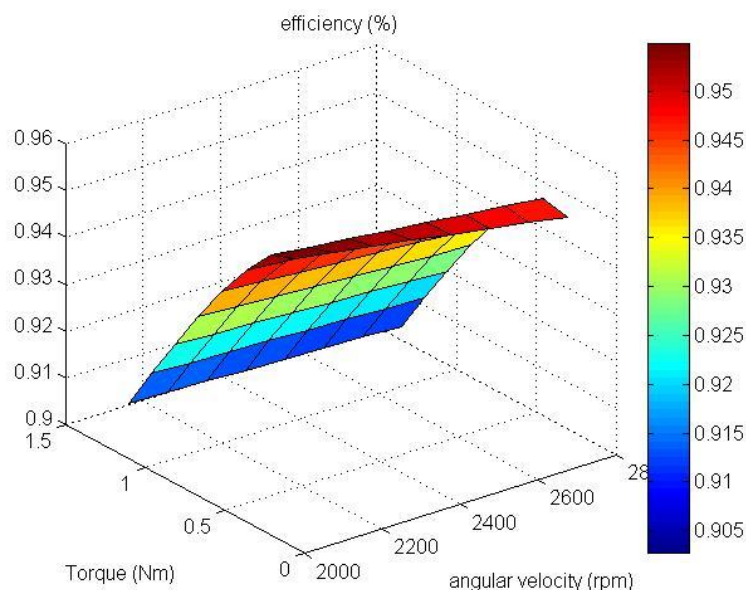
Βλέπουμε ότι και οι δύο μηχανές έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά. Ίδιο βάρος μικρές διαφορές στην αρμονική παραμόρφωση και στην κυμάτωση ροπής τόσο στην μόνιμη κατάσταση όσο και στην εκκίνηση. Η μοναδική μικρή διαφορά που έχουν εντοπίζεται στον βαθμό απόδοσης όπου μάλιστα και εδώ τα πράγματα δεν είναι ξεκάθαρα. Πιο συγκεκριμένα η διπολική παρουσιάζει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης στην μόνιμη κατάσταση κατά 1.2 % το οποίο σε πραγματικά μεγέθη μεταφράζεται σε 0.72 Wεξοικονόμηση. Από την άλλη πλευρά η τετραπολική έχει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης στην εκκίνηση και γενικά κατά την διάρκεια της μέγιστης επιτάχυνσης κατά 1.8 % το οποίο ισοδυναμεί με 4.5 Wχαμηλότερη κατανάλωση.

Στα πλαίσια της σύγκρισης των δύο κινητήρων θα χρησιμοποιήσουμε ένα μετρητικό στοιχείο που έχουμε συλλέξει από την εμπειρία του αγώνα. Εκεί φάνηκε ότι μπορεί η βέλτιστη επιλογή να είναι η κίνηση με σταθερή ταχύτητα ωστόσο αυτή την περισσότερη ώρα δεν είναι εφικτή (σχήμα 5.56), λόγω αστάθμητων παραγόντων όπως κίνησης στην πίστα η κάποια μικρή κλίση της πίστας. Έτσι ο κινητήρας αναγκάζεται να λειτουργήσει σε σημεία με ροπή ανάμεσα σε 0.3 Nm και 1,2 Nm αλλά και σε ταχύτητες ανάμεσα σε 2000 ΣΑΛ και 3000 ΣΑΛ. Επομένως πρέπει να γίνει αξιολόγηση τους σε διάφορα σημεία λειτουργίας όπως φαίνεται στα σχήματα.



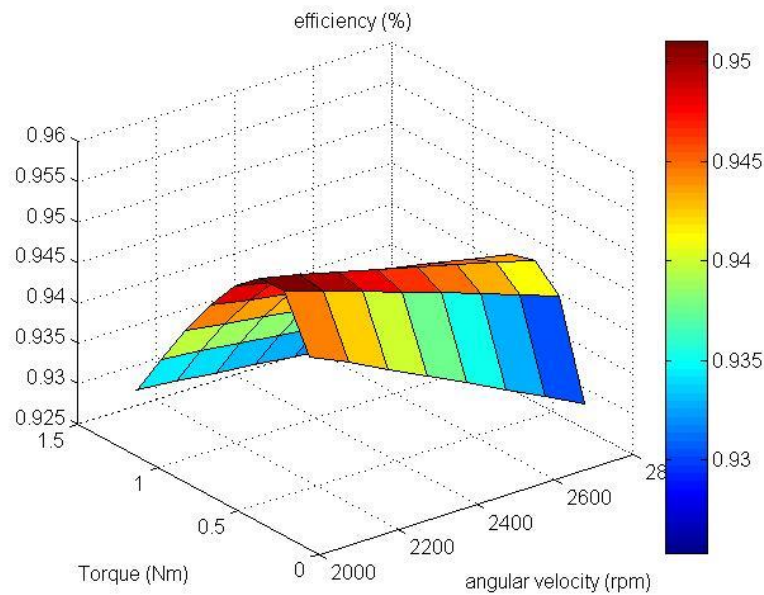
Σχήμα 5.56: Μεταβολή της ταχύτητας το οχήματος κατά την διάρκεια του αγώνα

Όσον αφορά την διπολική μηχανή φαίνεται ξεκάθαρα ότι η απόδοση της δεν εξαρτάται πολύ από την ταχύτητα περιστροφής. Αυτό γιατί για τις 3000 στροφές απαιτείται διέγερση συχνότητας 50 Hz η οποία είναι αρκετά μικρή και δεν αυξάνονται πολύ οι απώλειες σιδήρου. Από την άλλη πλευρά παρατηρούμε σημαντική μείωση του βαθμού απόδοσης όταν παράγεται μεγαλύτερη ροπή, καθώς αναγκαστικά ο κινητήρας τροφοδοτείται με περισσότερο ρεύμα και κατά συνέπεια αυξάνονται οι απώλειες χαλκού.





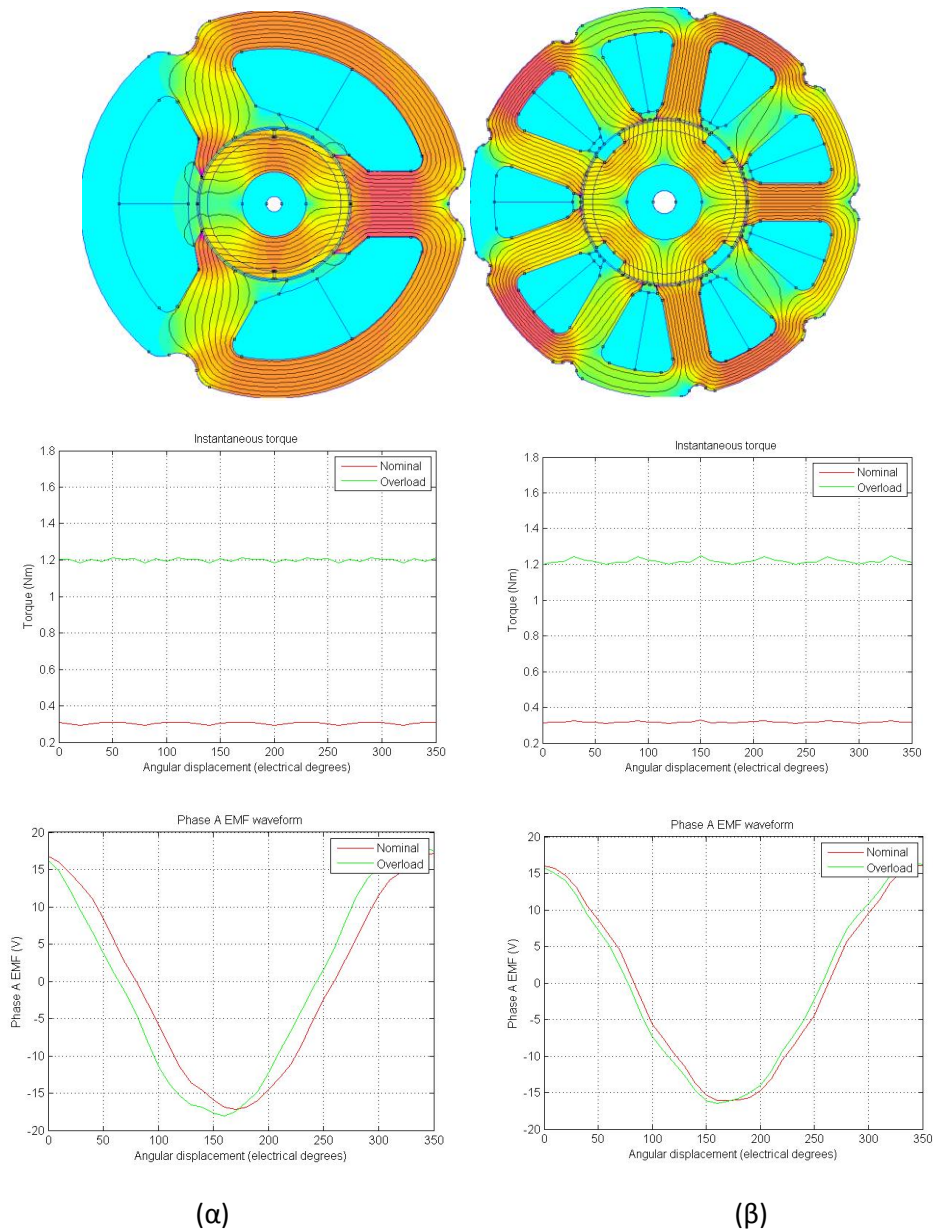
Σχήμα 5.57: Μεταβολή του βαθμού απόδοσης της 2-πολικής μηχανής σε σχέση με την γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και την ροπή εξόδου



Σχήμα 5.58: Μεταβολή του βαθμού απόδοσης της 2-πολικής μηχανής σε σχέση με την γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και την ροπή εξόδου

Ο βαθμός απόδοσης της τετραπολική γεωμετρία με την σειρά του παρουσιάζει πιο έντονη εξάρτηση από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα καθώς για να φτάσει τις 3000 ΣΑΛ πρέπει να τροφοδοτηθεί με συχνότητα 100 Hz και επομένως αυξάνονται σημαντικά οι απώλειες σιδήρου. Ωστόσο αντίθετη είναι η εικόνα με την αύξηση της αποδιδόμενης ροπής όπου παρατηρείται μια σαφώς μικρότερη μείωση του βαθμού απόδοσης. Αυτό οφείλεται, όπως σχολιάστηκε και στην προκαταρκτική σχεδίαση, στο μεγάλο πάχος δοντιού που παρουσιάζει αναγκαστικά η διπολική διαμόρφωση και οδηγεί σε όχι τόσο καλή αξιοποίηση χαλκού και τελικά σε αυξημένες απώλειες όταν αυξάνεται το ρεύμα τροφοδοσίας.

Συμπερασματικά, λοιπόν, μπορούμε να πούμε ότι παρόλο ότι η διπολική γεωμετρία προσφέρει καλύτερα χαρακτηριστικά στην λεγόμενη μόνιμη κατάσταση ωστόσο η τετραπολική λειτουργεί αποδοτικότερα σχεδόν σε όλα τα υπόλοιπα πιθανά σημεία λειτουργίας και επομένως κρίνεται ως η καλύτερη για την εφαρμογή μας.



Σχήμα 5.59: Κατανομή του μαγνητικού πεδίου κυμάτωση της αποδιδόμενης ροπής και κυματομορφή της αντί-ΗΕΔ για τον 2-πολικό κινητήρα (α) και για τον 4-πολικό (β)

#### 5.4.4 Σύγκριση με τον υφιστάμενο κινητήρα

Ο κινητήρας που χρησιμοποιεί το όχημα είναι επιφανειακών μαγνητών εξωτερικού δρομέα με 16 πόλους και 18 αυλάκια. Το τύλιγμα είναι συγκεντρωμένο μονής στρώσης και έχει χρησιμοποιηθεί γεωμετρία άνισων δοντιών. Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται αναλυτικά όλα τα χαρακτηριστικά της 16-πολικής μηχανής και της 4-πολικής που σχεδιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια.



	4-πολική		16-πολική	
	Πυκνότητα ρεύματος (1 A/mm <sup>3</sup> )	Πυκνότητα ρεύματος (4 A/mm <sup>3</sup> )	Πυκνότητα ρεύματος (1 A/mm <sup>3</sup> )	Πυκνότητα ρεύματος (4 A/mm <sup>3</sup> )
THD της Αντί-HEΔ (%)	3.86	3.69	1.8	5.6
Κυμάτωση ροπής (%)	6.34	4.31	4.3	1.3
Αντί-HEΔ (RMS) (V)	11.9	11.7	11.1	11.3
Βαθμός απόδοσης (%)	94.7	93.2	94	84.9
Απώλειες σιδήρου (W)	2.63	2.54	1.39	1.5
Απώλειες χαλκού (W)	0.98	15.8	2.45	39.2
Συνολικό βάρος (kg)	1.9	1.9	2.8	2.8

Σχήμα 5.59: Σύγκριση 4-πολικής και 16-πολικής μηχανής

Παρατηρώντας την σύγκριση των δύο κινητήρων αξίζει να σταθούμε σε τρία σημεία:

- 1) Ο υφιστάμενος κινητήρας παρουσιάζει μειωμένη κυμάτωση ροπής και αρμονική παραμόρφωση της τάσης τόσο στην μόνιμη κατάσταση όσο και στο πλήρες φορτίο.
- 2) Με την τετραπολική διαμόρφωση επιτυγχάνεται μείωση βάρους κατά 900 gr.
- 3) Ο βαθμός απόδοσης δεν παρουσιάζει σημαντική βελτίωση στην μόνιμη κατάσταση αλλά επιτεύχθηκε σημαντική διαφοροποίηση στην εκκίνηση

Ωστόσο για να ολοκληρώσουμε την σύγκριση πρέπει να εξετάσουμε συνολικά το σύστημα κίνησης ως προς το βάρος και την απόδοση.

Το σύστημα μετάδοσης που υπάρχει ως τώρα στο όχημα αποτελείται από τον κινητήρα ο οποίος είναι τοποθετημένος απευθείας στον κινητήριο τροχό και περιστρέφεται με την επιθυμητή ταχύτητα. Επομένως δεν εισάγονται απώλειες κατά την μετάδοση ισχύος.

Από την άλλη πλευρά όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4 στο υπό σχεδίαση σύστημα μετάδοσης έχει τοποθετηθεί ένας μειωτήρας στροφών με βαθμό απόδοσης 98%. Άρα ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος διαμορφώνεται ως εξής:

- Εκκίνηση:  $0,98 \cdot 0,932 = 91,33\%$
- Μόνιμη κατάσταση:  $0,98 \cdot 0,947 = 92,8\%$

Επομένως σαν συνολικά συστήματα βλέπουμε ότι στην μόνιμη κατάσταση το υφιστάμενο σύστημα είναι ελαφρώς καλύτερο ενώ στην κατάσταση επιτάχυνσης το νέο σύστημα παρουσιάζει αισθητά καλύτερη συμπεριφορά.

Η τελευταία παράμετρος που πρέπει να εξετάσουμε είναι η μείωση του συνολικού βάρους. Στην εξοικονόμηση των 900 gπου έγινε μόνο από το ηλεκτρομαγνητικό μέρος θα προστεθεί και ένα κομμάτι που θα προκύψει από το «housing» του κινητήρα. Για να γίνει πιο κατανοητό αυτό πρέπει να σκεφτούμε ότι το κέλυφος του υπάρχοντος κινητήρα είναι σχεδιασμένο να δέχεται το σύνολο του βάρους του πίσω μέρους του οχήματος. Άρα χρειάζεται μικρότερο πάχος αλουμινίου για το «housing» του νέου κινητήρα και επομένως μικρότερο βάρος.

## Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας σχεδιάστηκε σύστημα κίνησης υψηλής απόδοσης για ηλεκτρικό όχημα που αποτελείται από έναν μειωτήρα στροφών μιας σχέσης μετάδοσης και ένα κινητήρα επιφανειακών μαγνητών εσωτερικού δρομέα με συνολικό βαθμό απόδοσης πάνω από 94%. Από αυτή τη διαδικασία σχεδίασης εξήχθησαν πολύτιμες γνώσεις τόσο για τις γεωμετρίες και τις διαμορφώσεις που εξετάστηκαν, όσο και για τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να υλοποιηθεί αποτελεσματικά μία ολοκληρωμένη διαδικασία βελτιστοποίησης ηλεκτρικού κινητηρίου συστήματος.

### 6.1 Κυριότερα συμπεράσματα

Τα κυριότερα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας αφορούν τη στρατηγική ελέγχου και τα ευρήματα της σχέδιο μελέτης του κινητήρα. Συγκεκριμένα για τη στρατηγική ελέγχου παρατηρήθηκε ότι:

- Εφαρμόζοντας κατάστρωση πολιτικής εξοικονόμησης ενέργειας βρέθηκε ότι ο κινητήρας έπρεπε να συνδυάζει υψηλή απόδοση στην μόνιμη κατάσταση (σταθερή ταχύτητα στην ελάχιστη επιτρεπτή τιμή του αγώνα) με ικανότητα παροχής υψηλής ισχύος κατά την διαδικασία της επιτάχυνσης που διαρκεί ελάχιστα στον αγώνα. Έτσι, διατυπώθηκε κατ'αρχήν η αναγκαιότητα της βελτιστοποίησης στο σημείο λειτουργίας της μόνιμης κατάστασης. Ωστόσο μετά από μελέτη στατιστικών στοιχείων κατά την διάρκεια του αγώνα διαπιστώθηκε ότι η απαίτηση για διατήρηση απόλυτα σταθερής ταχύτητας δεν είναι η πλέον αποδοτική στρατηγική ελέγχου καθώς παρατηρείται οικονομικότερη λειτουργία επιτρέποντας περιορισμένη μεταβλητότητα της ταχύτητας, λόγω της διαμόρφωσης της πίστας αλλά και αστάθμητων παραγόντων. Έτσι υιοθετήθηκε και ένα δεύτερο κριτήριο που αφορά τη συνολική απόδοση σε μια σειρά στοχευμένων διαφορετικών σημείων λειτουργίας.
- Τα σημαντικότερα ευρήματα της σχέδιο μελέτης του κινητήρα είναι: Κατά τη διαδικασία σχεδίασης διαπιστώθηκε ότι η γεωμετρία με δύο πόλους και τρεις αύλακες συγκεντρωμένου τυλίγματος μονής στρώσης παρουσιάζει αισθητά μειωμένη απόδοση σε σχέση με την αντίστοιχη διπλής στρώσης λόγω του χαμηλού συντελεστή τυλίγματος.
- Η διπολική διαμόρφωση κινητήρα με τρεις αύλακες διαθέτει μόνο τρία δόντια. Έτσι όλη η μαγνητική ροή αναγκάζεται να διέρχεται από ένα δόντι κάθε φορά. Επομένως για να μην εμφανισθεί κορεσμός είναι αναγκαία μεγάλα πάχη δοντιών και μεγάλο σώμα στάτη που οδηγούν με την σειρά τους σε μηχανές με αυξημένο βάρος.

- Το μεγάλο πάχος δοντιού στις διπολικές διαμορφώσεις κινητήρα αυξάνει την ποσότητα χαλκού που απαιτείται στις κεφαλές τυλίγματος με αποτέλεσμα να αυξάνονται σημαντικά οι απώλειες χαλκού.
- Οι τετραπολικές γεωμετρίες με 6 αύλακες συγκεντρωμένου τυλίγματος είτε μονής είτε διπλής στρώσης παρουσιάζουν έντονη κυμάτωση ροπής και μεγάλη αρμονική παραμόρφωση της αντί-HEΔ. Ωστόσο, μέσω της σύγκρισης τους με τις διπολικές διαμορφώσεις, επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα προηγούμενων εργασιών που αναφέρουν ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των πόλων μιας μηχανής αυξάνεται και η ικανότητα της να παράγει ροπή.
- Η τετραπολική διαμόρφωση με 9 αύλακες συγκεντρωμένου τυλίγματος διπλής στρώσης εμφανίζει μειωμένη ικανότητα παραγωγής ροπής σε σχέση με τις άλλες τετραπολικές λόγω του μειωμένου συντελεστή τυλίγματος. Ωστόσο εξαιτίας του μεγάλου αριθμού αυλακών παρουσιάζει πολύ καλή αξιοποίηση του χαλκού με αποτέλεσμα να εμφανίζει μεγάλο βαθμό απόδοσης ειδικά σε σημεία λειτουργίας που απαιτούν μεγάλα ρεύματα γραμμής.
- Από τις αναλύσεις ευαισθησίας εξάχθηκε το συμπέρασμα ότι η συμπεριφορά ενός κινητήρα εξαρτάται πρωτίστως από το είδος του τυλίγματος (με και χωρίς επικάλυψη στα άκρα) και δευτερευόντως από τον αριθμό των πόλων καθώς οι δύο διαμορφώσεις είχαν παρόμοια συμπεριφορά στις εκάστοτε μεταβολές. Τα κοινά συμπεράσματα και για τις δύο γεωμετρίες είναι:
  - Η αύξηση του πάχους δοντιού οδηγεί σε βελτίωση των χαρακτηριστικών τους.
  - Η δημιουργία προεξοχής στο δόντι αυξάνει αισθητά την μέγιστη αποδιδόμενη ροπή χωρίς να επηρεάζει αρνητικά ή θετικά κάποιο άλλο χαρακτηριστικό.
  - 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.
  - Σε κάθε γεωμετρική διαμόρφωση στην οποία αυξάνεται η μαγνητική επαγωγή πέρα από το γόνατο κορεσμού παρατηρείται απότομη αύξηση απωλειών σιδήρου.  
Η κυριότερη διαφορά τους είναι:
  - Η αρμονική παραμόρφωση της αντί-HEΔ της διπολικής μηχανής εξαρτάται έντονα από το ποσοστό του μαγνήτη επί της πολικής γωνίας. Πιο συγκεκριμένα έχουμε βελτιστοποίηση για πλήρη κάλυψη του δρομέα με μαγνήτη. Αντίθετα στην τετραπολική έχουμε μια ημιτονοειδή εξάρτηση γωνίας μαγνήτη με αρμονική παραμόρφωση όπου μάλιστα οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις εμφανίζονται για μεγάλες γωνίες μαγνήτη.
- Επιβεβαιώθηκε η αρχική εκτίμηση ότι η παραγωγή μιας δεδομένης ισχύος σε υψηλότερες στροφές οδηγεί σε κινητήρες με υψηλότερους βαθμούς απόδοσης και χαμηλότερο βάρος. Μάλιστα το κέρδος είναι τόσο μεγάλο που

αντισταθμίζει ακόμα και τις μηχανικές απώλειες που προστίθενται από τον αναγκαίο μειωτήρα στροφών.

- Η πλήρως παραμετροποιημένη σχεδίαση που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την ανάλυση αποτελεί ισχυρό εργαλείο για την σύγκριση τοπολογιών με διαφορετικές βασικές παραμέτρους και αποτελεί αναγκαίο εργαλείο κατά την αναζήτηση της βέλτιστης γεωμετρίας.

## 6.2 Σημεία επιστημονικής συνεισφοράς

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει τα ακόλουθα σημεία επιστημονικής συνεισφοράς:

- Σχεδιάστηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα κίνησης το οποίο περιλαμβάνει μειωτήρα στροφών στο σύστημα μετάδοσης κίνησης εκτός από τον ηλεκτρικό κινητήρα. Αυτό προέκυψε ύστερα από εκτενή ανάλυση όλων των δυνατών συστημάτων με παράλληλο υπολογισμό της αντοχής τους σε θλίψη και σε κάμψη. Η επιλογή του υλικού κατασκευής έγινε με κύριο κριτήριο την μείωση των μηχανικών απωλειών και του βάρους .
- Η επιθυμητή επίδοση του κινητήρα καθορίστηκε με βάση τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στο όχημα, λαμβάνοντας υπόψη τις μηχανικές απώλειες και τον λόγο μείωσης ταχύτητας του συστήματος μετάδοσης.
- Δεν χρησιμοποιήθηκαν σημαντικές παραδοχές και θεωρητικές υποθέσεις, διότι αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία που κατά σειρά βελτιστοποιεί τον δρομέα, το δόντι του σάτη και το σώμα του σάτη, με πρόγραμμα επίλυσης μαγνητοστατικών προβλημάτων και χρήση πεπερασμένων στοιχείων η οποία καταλήγει στον προσδιορισμό της βέλτιστης γεωμετρίας.
- Η σύγκριση των εναλλακτικών διαμορφώσεων των ηλεκτρικών μηχανών δεν γίνεται μόνο σε ένα λειτουργικό σημείο βελτιστοποίησης αλλά συνεκτιμάται και η συμπεριφορά τους σε καταστάσεις με διαφορετικές ταχύτητες και σε υπερφορτίσεις.

## 6.3 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση

Η εργασία αυτή ανέδειξε ορισμένα σημεία τα οποία χρήζουν περαιτέρω συμπληρωματικής διερεύνησης. Τα κυριότερα από αυτά είναι:

- Η κατασκευή του κινητηρίου συστήματος που περιλαμβάνει τόσο τον κινητήρα όσο και τον μειωτήρα στροφών προκειμένου να πραγματοποιηθεί πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων.
- Να συγκριθεί πειραματικά η συνολική απόδοση του προτεινόμενου κινητηρίου συστήματος σε σχέση με το υφιστάμενο στις οδηγικές συνθήκες των αγώνων.

## 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] Laskaris, K.I.; Chaniotis, A.; Kladas, A.G., "High performance traction motor design and construction for small passenger electric car," in *Electrical Machines (ICEM)*, International Conference on Rome 6-8 Sept. 2010
- [6] Laskaris, K.I.; Kladas, A.G., "High torque Internal Permanent Magnet wheel motor for electric traction applications," in *Electrical Machines*, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on, 6-9 Sept. 2008
- [7] Laskaris, K.I.; Kladas, A.G., "Internal Permanent Magnet Motor Design for Electric Vehicle Drive," in *Industrial Electronics*, IEEE Jan. 2010
- [8] Laskaris, K.I.; Kladas, A.G., "Permanent magnet shape optimization for high efficiency electric traction motors," in *Electromagnetic Field Computation (CEFC)*, 2010 14th Biennial IEEE Conference on Chicago, IL, 9-12 May 2010
- [9] Patsios, C.; Tsampouris, E.; Beniakar, M.; Kladas, A., "Dynamic finite element hysteresis model for iron loss calculation under PWM excitation," in *Electromagnetic Field Computation (CEFC)*, 2010 14th Biennial IEEE Conference on , vol., no., pp.1-1, 9-12 May 2010
- [10] Beniakar, M.; Tsampouris, E.; Patsios, C.; Kladas, A., "Evolutionary optimization of Permanent Magnet machine design for traction applications," in *Electromagnetic Field Computation (CEFC)*, 2010 14th Biennial IEEE Conference on , vol., no., pp.1-1, 9-12 May 2010
- [11] 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.
- [12] Nicola Bianchi, Member, IEEE, Silverio Bolognani, Member, IEEE, and Fabio Luise "High Speed Drive Using a Slotless PM Motor" *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 21, NO. 4, JULY 2006

- [13] ΜΙΝΩΑ Η. ΜΠΕΝΙΑΚΑΡ «Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση κινητήρων με θεώρηση των απωλειών των μόνιμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης » Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, 2014 Ε.Μ.Π.
- [14] Ευφροσύνη Θεοδώρου, «Σχεδίαση και πειραματική επιβεβαίωση κινητήρα μόνιμων μαγνητών για εφαρμογή ηλεκτροκίνησης», Διπλωματική εργασία, Αθήνα, 2011, ΕΜΠ.
- [15] Κρασόπουλος Χρήστος, «Σχεδίαση και κατασκευή κινητήρα μόνιμων μαγνητών για πρότυπο ηλεκτρικό όχημα», Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2013, Ε.Μ.Π.
- [16] Αλπογιάννης Γεώργιος «Σχεδίαση και ανάλυση λειτουργίας κινητήρα εσωτερικών μόνιμων μαγνητών διπλής στρώσης για εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων», Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2013, Ε.Μ.Π.
- [17] Αναστάσιος Γ. Βήχος, “Σχεδίαση και βελτιστοποίηση κινητήρα μόνιμων μαγνητών για εφαρμογή ηλεκτροκίνησης”, 2009
- [18] Χρήστος Α. Παπαδόπουλος, «Στοιχεία μηχανών», Πάτρα, 2012
- [19] Θ.Ν. Κωστόπουλος, « Οδοντώσεις και μειωτήρες στροφών», Αθήνα, 2005