



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Σχεδίαση και βελτιστοποίηση σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δαρδαμάνης Κ. Λάμπρος

Επιβλέπων : Αντώνιος Κλαδάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2016





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Σχεδίαση και βελτιστοποίηση σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δαρδαμάνης Κ. Λάμπρος

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 29<sup>η</sup> Μαρτίου 2016.

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

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

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

Αθήνα, Μάρτιος 2016



.....  
Δαρδαμάνης Λάμπρος

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

Copyright © Δαρδαμάνης Λάμπρος, 2016.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς 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 διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη σχεδίαση ενός σύγχρονου ηλεκτρικού κινητήρα μονίμων μαγνητών, με αντικειμενικό σκοπό την επίτευξη της επιθυμητής απόδοσης του κινητήρα βελτιώνοντας σημαντικά τον συντελεστή απόδοσης, την ποιότητα ισχύος, την κυμάτωση της ροπής, το μέγιστο ρεύμα τριφασικού βραχυκυκλώματος, το κατασκευαστικό κόστος και το βάρος του κινητήρα. Επιπλέον, βασικό σκοπό αποτελεί η δημιουργία μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας μέσω της οποίας μπορεί να σχεδιαστεί ηλεκτρικός κινητήρας μονίμων μαγνητών βασισμένος στις προδιαγραφές της εκάστοτε εφαρμογής.

Αρχικά, πραγματοποιείται μια σύντομη περιγραφή των διαφορετικών ειδών ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών καθώς και οι εφαρμογές στις οποίες συναντώνται. Κατόπιν αυτού διερευνώνται οι προδιαγραφές του προς μελέτη κινητήρα και προσδιορίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που κρίνονται καταλληλότερα για την εφαρμογή αυτή. Η μέθοδος προκαταρκτικής σχεδίασης ηλεκτρικών κινητήρων που παρουσιάζεται στην συνέχεια, βασίζεται στη μελέτη των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία μιας ηλεκτρικής μηχανής. Για την κατανόηση της μεθοδολογίας σχεδίασης, οι θεωρητικές αρχές που διέπουν την διαδικασία αυτή καθώς και τα φαινόμενα που επηρεάζουν την απόδοση και την επίδοση του κινητήρα περιγράφονται εκτενώς.

Ακολούθως πραγματοποιείται θεωρητική διερεύνηση των εξισώσεων που διέπουν το δυναμικό μοντέλο της σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών. Με την χρήση του μοντέλου αυτού πραγματοποιήθηκε ανάλυση διαφόρων μεταβατικών φαινομένων που παρουσιάζονται σε έναν ηλεκτρικό κινητήρα και αξιολόγηση αυτών για κάθε μία από τις διαμορφώσεις που μελετήθηκαν.

Έχοντας αναλύσει θεωρητικά πληθώρα διαμορφώσεων διερευνάται η πλεονεκτικότερη ανάμεσα σε πολλούς διαφορετικούς συνδυασμούς πόλων/αυλάκων με συγκεντρωμένα τυλίγματα στάτη απλής και διπλής στρώσης. Η οριστική σχεδίαση επιτυγχάνεται με την εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση των εξισώσεων του μαγνητικού πεδίου, σε συνδυασμό με την ανάλυση ευαισθησίας των τριών επικρατέστερων διαμορφώσεων, σε 8 γεωμετρικές παραμέτρους του κινητήρα.

Βάσει της επίπτωσης στη λειτουργική συμπεριφορά των χαρακτηριστικών μεγεθών του κινητήρα δημιουργήθηκαν κατάλληλες αντικειμενικές συναρτήσεις και μέσω της διεπαφής λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων (FEA) πραγματοποιήθηκε η βελτιστοποίηση του κινητήρα. Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία επιλέχθηκε η καλύτερη συμβιβαστική λύση για την τελική διαμόρφωση της γεωμετρίας του κινητήρα. Τέλος, η επιλεγθείσα διαμόρφωση αναλύθηκε εκτενώς σε τρία διαφορετικά σημεία λειτουργίας.

Λέξεις-Κλειδιά: κινητήρες μονίμων μαγνητών, απόδοση, επίδοση, συγκεντρωμένα τυλίγματα κλασματικού βήματος, τυλίγματα απλής και διπλής στρώσης, επιφανειακοί μόνιμοι μαγνήτες, παραμετροποιημένη σχεδίαση, ανάλυση μεταβατικών φαινομένων, προσομοίωση ηλεκτρικής μηχανής, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων, πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση γεωμετρίας.

## Abstract

The present diploma thesis undertakes the design and optimization procedure of a synchronous, permanent-magnet, electric motor. The main objective is to achieve the desirable machine performance while, on one hand, improving the motor's efficiency and power quality and, on the other hand, minimizing manufacturing costs and overall weight. A basic objective is the development of a complete methodology for designing a synchronous permanent-magnet electric motor, adapted to the specifications of each application.

Initially is presented a short description of the different types of permanent magnet motors and their use in several applications. Afterwards, the specifications of the motor are examined and the geometric configurations which are suitable for this application are defined. The preliminary design methodology of electrical motors presented in this thesis, is based on the study of the electromagnetic phenomena that take place during the operation of an electric motor. The theoretical principles of this procedure, as well as the phenomena that influence the efficiency and the performance of the electrical motor, are thoroughly and extensively presented, in order to better illustrate the design methodology.

Subsequently, a theoretical analysis of the equations of the synchronous, permanent-magnet machine dynamic model is undertaken. Based on this model, the various transient phenomena of an electric motor are analyzed and evaluated in order to enable that all motor components meet the specified technical standards.

Having analysed numerous geometrical configurations, the favored configuration is sought among many potential poles/slots combinations of single and double layer concentrated windings. The final design stage is implemented by using the finite element method in combination with the sensitivity analysis techniques on eight geometrical parameters of the motor.

Based on the impact on operating characteristics of every technical parameter of the machine, aggregated objective functions were developed and by using the application programming interface (API) of the finite element analysis software, motor optimization has been performed. Following the aforementioned procedure, the optimal solution for the final configuration of the motor geometry has been selected. Finally, the selected configuration has been thoroughly analyzed for three alternative loading conditions.

Key-words: permanent magnet synchronous motor (PMSM), efficiency, performance, concentrated fractional slot windings, single and double layer concentrated windings, surface permanent magnet rotor, parametric design, transient phenomena analysis, simulation of electrical machine, finite element method, sensitivity analysis technique, multi-criteria optimization.



## Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά, τον καθηγητή μου κ. Αντώνη Κλαδά, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου την παρούσα εργασία, για την καθοδήγησή του αλλά και για τις γνώσεις που μου μετέδωσε τόσο στο πλαίσιο των προπτυχιακών μαθημάτων όσο και κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Ιδιαιτέρες ευχαριστίες οφείλω και στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Αποστόλη Διαμαντή για την άριστη συνεργασία που είχαμε καθώς και για την καθοδήγηση και τη στήριξη που μου παρείχε.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Χρήστο Κρασόπουλο για την βοήθεια και τη συνεργασία του κατά την διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου, που στάθηκαν στο πλευρό μου καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.



## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή .....	15
1.1 Σκοπός της εργασίας.....	15
1.2 Δομή της εργασίας.....	15
Κεφάλαιο 2 : Εφαρμογές ηλεκτρικών κινητήρων .....	17
2.1 Ηλεκτρικοί κινητήρες για την πρόωση πλοίων .....	17
2.2 Ηλεκτρικοί κινητήρες σε οχήματα πόλης.....	19
2.2.1 Ηλεκτρικό όχημα .....	19
2.2.2 Το υβριδικό όχημα.....	21
2.3 Ηλεκτρικοί κινητήρες στην αεροναυπηγική.....	22
2.4 Σύγκριση διαφόρων ειδών κινητήρων .....	23
Κεφάλαιο 3: Βασική σχεδίαση της γεωμετρίας του κινητήρα .....	29
3.1 Προκαταρκτική Σχεδίαση .....	29
3.1.1 Διαστασιολόγηση του διακένου.....	30
3.1.2 Προσδιορισμός χαρακτηριστικών του στάτη .....	32
3.1.3 Ειδική ηλεκτρική και μαγνητική φόρτιση.....	35
3.1.4 Προσδιορισμός χαρακτηριστικών του δρομέα .....	35
3.1.4.1 Μόνιμοι Μαγνήτες.....	35
3.1.5 Διατάξεις μονίμων μαγνητών.....	36
3.1.6 Μαγνήτιση των μονίμων μαγνητών .....	38
3.1.6.1 Κατηγοριοποίηση μηχανών μονίμων μαγνητών με βάση τη θέση του μαγνήτη .....	40
3.1.6.1.1 Μηχανή με επιφανειακούς μαγνήτες και εσωτερικό ρότορα .....	40
3.1.6.1.2 Μηχανή με επιφανειακούς μαγνήτες και εξωτερικό ρότορα.....	41
3.1.6.1.3 Μηχανή εσωτερικών μαγνητών (Inset PM Machine).....	41
3.1.6.1.4 Μηχανή εσωτερικών μαγνητών (Buried PM Machine).....	42
3.1.7 Επιλογή τύπου τυλίγματος.....	43
3.1.8 Επιλογή αριθμού πόλων και αυλάκων .....	46
3.1.9 Ασύμμετρη μαγνητική έλξη.....	48
Κεφάλαιο 4: Παραμετροποιημένη σχεδίαση και ανάλυση ηλεκτρικού κινητήρα .....	49
4.1 Πεδιακή ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία .....	49
4.1.1 Μαγνητοστατικά Προβλήματα .....	49
4.1.2 Οριακές συνθήκες.....	52
4.1.3 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων .....	53
4.1.4 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων στο FEMM .....	53
4.2 Παραμετροποιημένη Σχεδίαση.....	55
4.3 Αρχική Σχεδίαση Κινητήρα .....	57
4.4 Χαρακτηριστικά μεγέθη κινητήρα .....	58

4.4.1. Εύρεση μέγιστης γωνίας ροπής.....	59
4.4.2 Κυμάτωση ροπής .....	63
4.4.3 Ροπή Ευθυγράμμισης (cogging torque).....	64
4.4.4 Υπολογισμός ΗΕΔ και του αρμονικού της περιεχομένου .....	66
4.4.5 Ρεύμα Βραχυκύκλωσης.....	68
4.4.6 Αυτεπαγωγές ευθέως και εγκάρσιου άξονα .....	69
4.4.7 Permanent Magnet Flux .....	72
4.4.8 Απώλειες πυρήνα .....	73
4.4.9 Υπολογισμός Rs.....	74
4.4.10 Απώλειες Χαλκού .....	76
4.4.11 Απώλειες Τριβών & Ανεμισμού .....	77
4.4.12 Υπολογισμός συντελεστή απόδοσης κινητήρα .....	78
4.5 Μοντέλο σήματος σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών .....	79
4.5.1 Μαθηματικό μοντέλο σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών σε φασικές συνιστώσες a, b,c.....	79
4.5.2 Στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς – μετασχηματισμοί Clark - Park.....	81
4.5.3 Δυναμικό μοντέλο σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών σε στρεφόμενο πεδίο αναφοράς (qd0).....	83
4.5.4 Το μοντέλο στο περιβάλλον Simulink .....	85
4.5.5 Διαδικασία προσομοιώσεων .....	91
4.5.6 Μηχανικές καταπονήσεις στον άξονα του κινητήρα.....	92
4.5.7 Μηχανικές καταπονήσεις στον άξονα του κινητήρα.....	93
Κεφάλαιο 5: Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης .....	95
5.1 Διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων .....	97
5.1.1: 10-πολικές διαμορφώσεις .....	97
5.1.2: 14-πολικές διαμορφώσεις .....	103
5.1.3: 16-πολικές διαμορφώσεις .....	110
5.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων .....	116
5.3 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων .....	118
5.4 Εφαρμογή αντικειμενικών συναρτήσεων στον σχεδιασμό κινητήρων .....	119
5.5 Διερεύνηση αριθμού στρώσεων και γεωμετρίας κινητήρα.....	121
5.5.1: 1 <sup>ο</sup> στάδιο ανάλυσης ευαισθησίας .....	121
5.5.2: 2 <sup>ο</sup> στάδιο ανάλυσης ευαισθησίας .....	139
5.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων .....	154
5.7 Τελική διαμόρφωση κινητήρα.....	158
5.7.1 Βελτιστοποίηση βάρους λαμαρίνας .....	158
5.7.2 Βελτιστοποίηση γεωμετρίας του δοντιού του στάτη .....	159

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα .....	163
6.1 Συμπεράσματα .....	163
6.2 Πρωτότυπη συνεισφορά της εργασίας .....	164
6.3 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση .....	165
Παράρτημα Α.....	167
Συγκεντρωμένα τύλιγματα διπλής στρώσης.....	167
Παράρτημα Β.....	168
Ανάλυση ευαισθησίας ροπής για την διαμόρφωση 14/12 με συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσης.....	168
Βιβλιογραφία.....	169
Λογισμικό.....	171



## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

### 1.1 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η σχεδίαση ενός σύγχρονου κινητήρα μονίμων επιφανειακών μαγνητών με συγκεντρωμένο τύλιγμα, καθώς και η προσομοίωση των μεταβατικών φαινομένων που παρουσιάζει ένας τέτοιος κινητήρας. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθούν πολλές και διαφορετικές διαμορφώσεις κινητήρων καθώς και να πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας σε πληθώρα γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών.

Με βάση τις απαιτήσεις της εφαρμογής και τους περιορισμούς που προκύπτουν μέσα από αυτή, καταλήγουμε στις προδιαγραφές του εν λόγω κινητήρα. Στόχος είναι η μεγιστοποίηση των επιδόσεων του κινητήρα με ταυτόχρονη βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών απόδοσης. Εκτός αυτού δόθηκε μεγάλη σημασία στη δημιουργία μια μεθοδευμένης διαδικασίας μέσα από την οποία μπορεί να σχεδιαστεί ηλεκτρικός κινητήρας μονίμων μαγνητών βασισμένος στις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Κατά τη διαδικασία αυτή αναπτύχθηκαν νέες μέθοδοι σχεδιασμού οι οποίες συνδυάζουν την επίλυση μαγνητικών προβλημάτων με την μελέτη μεταβατικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την λειτουργία του κινητήρα. Τα συμπεράσματα που εξάγονται μέσα από την παρούσα εργασία και κυρίως από την διαδικασία της βελτιστοποίησης είναι γενικευμένα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πληθώρα εφαρμογών. Τέλος έχουν επιχειρηθεί καινοτομίες οι οποίες βελτιώνουν τον χρόνο επίλυσης των παραπάνω χρονοβόρων προβλημάτων.

### 1.2 Δομή της εργασίας

Στη παρούσα ενότητα παρουσιάζονται εισαγωγικά στοιχεία με σκοπό να κατατοπίσουν τον αναγνώστη σχετικά με το περιεχόμενο της εργασίας.

Το Κεφάλαιο 2 αποτελεί μία εισαγωγική ενότητα στην οποία και παρουσιάζονται διάφορες εφαρμογές ηλεκτρικών κινητήρων. Εκτός αυτών παρατίθενται τα διάφορα είδη ηλεκτρικών κινητήρων και τυχόν πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματα που παρουσιάζουν.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται εκτενής βιβλιογραφική διερεύνηση των κινητήρων μονίμων μαγνητών. Συγκρίνονται τα υλικά κατασκευής, η τοποθέτηση και η γεωμετρία των μαγνητών καθώς και το είδος των τυλιγμάτων του στάτη. Επίσης παρουσιάζονται οι προδιαγραφές του κινητήρα και πραγματοποιείται μια προκαταρκτική σχεδίαση.

Στο Κεφάλαιο 4, αναλύονται θεμελιώδη χαρακτηριστικά μεγέθη που περιγράφουν την επίδοση και την απόδοση του κινητήρα και πραγματοποιείται ένας αρχικός σχεδιασμός της γεωμετρίας του κινητήρα με τη βοήθεια λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων. Επίσης, αναλύεται εκτενώς το μοντέλο σήματος του σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών, το οποίο, εν συνεχεία θα επιτελέσει βασικό ρόλο στις προσομοιώσεις για την διερεύνηση της βέλτιστης διαμόρφωσης.

Στο Κεφάλαιο 5, καταγράφονται λεπτομερώς όλα τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν σε δύο φάσεις. Αρχικά διερευνήθηκαν πολλές διαφορετικές διαμορφώσεις κινητήρων βασισμένες στον συνδυασμό πόλων / αυλάκων και επιλέχθηκαν οι επικρατέστερες, με βάση την επίδοση και την απόδοση τους. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας στις τρεις επικρατέστερες διαμορφώσεις,

συμπεριλαμβανομένης εκείνης με τα τυλίγματα απλής στρώσης και επιλέχθηκε η επικρατέστερη διαμόρφωση.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6, παρατίθενται όλα τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διαδικασία της σχεδίασης και της μελέτης του κινητήρα, ενώ αναφέρονται και τα σημεία καινοτομίας και επιστημονικής συνεισφοράς της παρούσας εργασίας. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται παραθέτοντας μια σειρά από προτάσεις περαιτέρω διερεύνησης, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας που περιγράφεται στην εργασία αλλά και την πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων.



## Κεφάλαιο 2 : Εφαρμογές ηλεκτρικών κινητήρων

Τα τελευταία χρόνια περιβαλλοντικοί λόγοι οδηγούν την παγκόσμια κοινότητα στον επαναπροσδιορισμό των πόρων που καταναλώνει ωθώντας τους ηλεκτρικούς κινητήρες να κερδίζουν όλο και μεγαλύτερο μερίδιο της παγκόσμιας αγοράς. Εκτός των άλλων, ορισμένα από τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν είναι η μη παραγωγή οποιουδήποτε είδους ρύπου από την εξάτμιση, η αθόρυβη λειτουργία του κινητήρα, η επίτευξη υψηλών ροπών με σταθερότητα καθώς και το γεγονός ότι παρουσιάζουν πολύ λιγότερα υδραυλικά συστήματα και απαιτούν σπανιότερα συντήρηση σε μηχανικά μέρη.

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 καθώς και η μεγάλη διάρκεια φόρτισης των συσσωρευτών. Οι εξελίξεις των τελευταίων ετών στην τεχνολογία των συσσωρευτών είναι σημαντικές και η έρευνα συνεχίζεται ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα των μέσων αποθήκευσης ενέργειας, με ταυτόχρονη μείωση του βάρους και του κόστους τους. Συνεπώς, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αύξηση της παραγωγής και κυκλοφορίας ηλεκτρικών αυτοκινήτων. [1], [2]

### 2.1 Ηλεκτρικοί κινητήρες για την πρόωση πλοίων

Ως ηλεκτροπρόωση ορίζεται το είδος εκείνο της πρόωσης στο οποίο οι άξονες του πλοίου κινούνται απ' ευθείας ή και σπανιότερα μέσω μειωτήρων από ηλεκτρικούς κινητήρες και όχι από άλλες μηχανές όπως εσωτερικής καύσης, αεριοστρόβιλους και ατμοστρόβιλους.

Η ηλεκτροπρόωση δε αποτελεί καινούρια έννοια, η ιδέα δημιουργήθηκε περισσότερο από 100 έτη πριν. Επί μεγάλο διάστημα, τα συστήματα βασίζονταν σε κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Το εναλλασσόμενο ρεύμα αρχίζει να χρησιμοποιείται στα πλοία στις αρχές της δεκαετίας του 1950, αλλά τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης εξακολουθούν να στηρίζονται σε κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

Ενώ παλαιότερα η ηλεκτρική πρόωση έβρισκε μόνον πολύ εξειδικευμένες εφαρμογές όπως σε παγοθραυστικά, ερευνητικά σκάφη, σκάφη πόντισης καλωδίων, κατά τη δεκαετία του '90 παρουσιάζει μια έντονα αυξανόμενη διάδοση σε μεγάλα επιβατηγά πλοία, οχηματαγωγά, κρουαζιερόπλοια, δεξαμενόπλοια και άλλα. Η εισαγωγή των αζιμουθιακών προωστήρων προσέφερε στα πλοία ευελιξία στις κινήσεις, ευκολία στις διελεύσεις από περιοχές υψηλής κινητικότητας και τη δυνατότητα δυναμικής τοποθέτησής τους.

Η ανάπτυξη διατάξεων και τεχνικών ελέγχου κινητήρων εναλλασσομένου ρεύματος, που να ικανοποιούν τις απαιτήσεις της πρόωσης από πλευράς τόσο ευελιξίας όσο και οικονομίας καυσίμου, έδωσε τη δυνατότητα για ευρύτερη διάδοση της ηλεκτρικής πρόωσης σε εμπορικά πλοία και έτσι στις μέρες μας εκατοντάδες πλοίων χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες ως μέσο πρόωσης.

Εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης έχουμε όπως είναι φυσικό και σε μικρότερα σκάφη, όπως σε μικρού και μεσαίου μεγέθους σκάφη αναψυχής. Χρησιμοποιούνται σαν βοηθητική αλλά και σαν κύρια πρόωση. Τα συστήματα πρόωσης είναι όμοια με αυτά των ηλεκτροκίνητων

πλοίων, βέβαια μειώνεται κατά πολύ η ονομαστική ισχύς λειτουργίας και ο βαθμός πολυπλοκότητας τους.

Τα μικρά σκάφη μέχρι 6 - 7 μέτρα χρησιμοποιούν αμιγώς ηλεκτρική πρόωση, όπου μπαταρίες τροφοδοτούν τους ηλεκτρικούς κινητήρες. Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος, ελέγχουν τις στροφές της έλικας. Η ντιζελοηλεκτρική πρόωση χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερα σκάφη και έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με την αντίστοιχη της στα πλοία. Η χρήση των κινητήρων συνεχούς ρεύματος είναι ευρέως διαδεδομένη στις εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης χαμηλής ισχύος όπως και των σύγχρονων κινητήρων, κυρίως μονίμου μαγνήτη και για τα δύο είδη κινητήρων. Η μηχανή πρόωσης συνδέεται απευθείας ή μέσω μειωτήρων (τροχαλίες – μάντες) με τον άξονα της έλικας. Η αζιμουθιακή πρόωση (azimuth thrusters) σε αυτά τα συστήματα βρίσκει εφαρμογή κυρίως στην βοηθητική πρόωση (bow thrusters).

Διαδεδομένοι είναι και οι εξωλέμβιοι ηλεκτρικοί κινητήρες, στους οποίους ο ηλεκτρικός κινητήρας μπορεί να είναι έξω από το νερό, αντίστοιχα με τους συμβατικούς εξωλέμβιους κινητήρες, αλλά και μέσα στο νερό.



Σχήμα 2.1: Ηλεκτρικός κινητήρας μικρού σκάφους.

## 2.2 Ηλεκτρικοί κινητήρες σε οχήματα πόλης

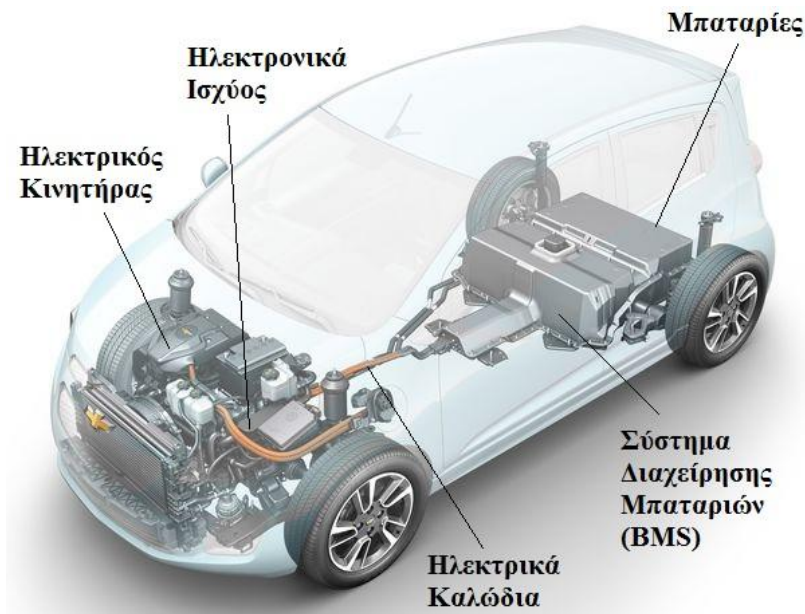
Το πρώτο όχημα που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ποτέ ήταν από τον Γάλλο εφευρέτη Νικολά Κουνιό (Nicola Joseph Cugnot) το 1769. Από τότε και μέχρι σήμερα τα οχήματα έχουν γίνει αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας των περισσότερων ανθρώπων. Οι δύο μεγαλύτερες κατηγορίες μηχανών οχημάτων είναι οι μηχανές εσωτερικής καύσης καθώς και οι ηλεκτρικές μηχανές. Αν και οι δύο αυτές κατηγορίες οχημάτων εξελίσσονταν ταυτόχρονα ανά τα έτη, τα οχήματα με μηχανές εσωτερικής καύσης είναι οι κυρίαρχοι της σημερινής αγοράς.

Τα ηλεκτρικά οχήματα θα μπορούσαν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες με βάση την πηγή της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνουν: [2]

- Πλήρως ηλεκτρικά (αυτόνομα συστήματα) όπου η κύρια πηγή ενέργειας προέρχεται από αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ δύναται να υπάρχουν και άλλες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες κλπ).
- Υβριδικά, καλούνται τα συστήματα όπου ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (με θερμικό κινητήρα) παράγει την ηλεκτρική ενέργεια κατά μείζονα λόγο, ασχέτως αν μπορεί να υπάρχουν και άλλες πηγές ενέργειας όπως αιολική, φωτοβολταϊκά κλπ καθώς και συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (μπαταρίες κυρίως).

### 2.2.1 Ηλεκτρικό όχημα

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



Σχήμα 2.2: Σύστημα κίνησης ηλεκτρικού οχήματος.

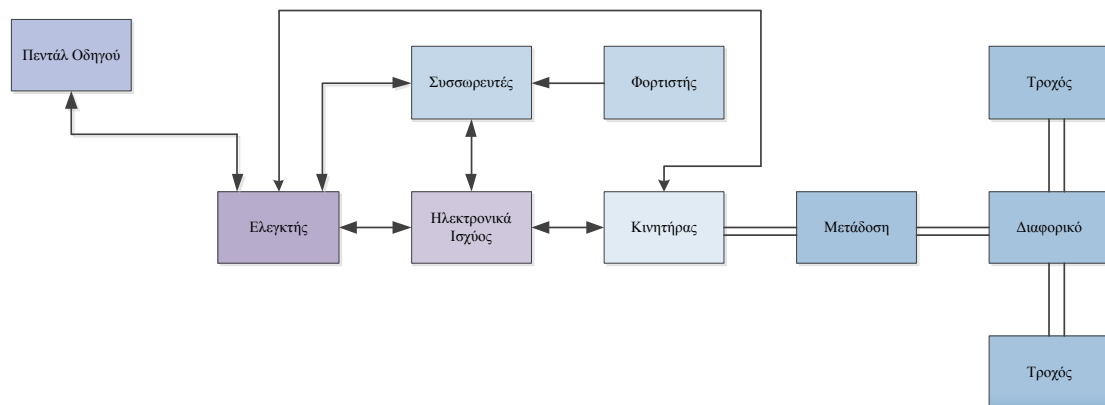
Το σχήμα 2.2 απεικονίζει το σύστημα κίνησης ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου το οποίο τροφοδοτείται από φορητή πηγή ενέργειας. Ο ηλεκτρικός και μηχανικός εξοπλισμός που

μετατρέπει την ενέργεια της πηγής σε κινητική ενέργεια στον τροχό ονομάζεται σύστημα πρόωσης.

Τα υποσυστήματα του συστήματος κίνησης ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι ο κινητήρας, ο ελεγκτής και το σύστημα οδήγησης (μετατροπέας), η πηγή ενέργειας και η μετάδοση. Η αναλυτική δομή και η αλληλεπίδραση των συνιστωσών ενός τέτοιου συστήματος φαίνεται στο *σχήμα 2.3*.

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

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



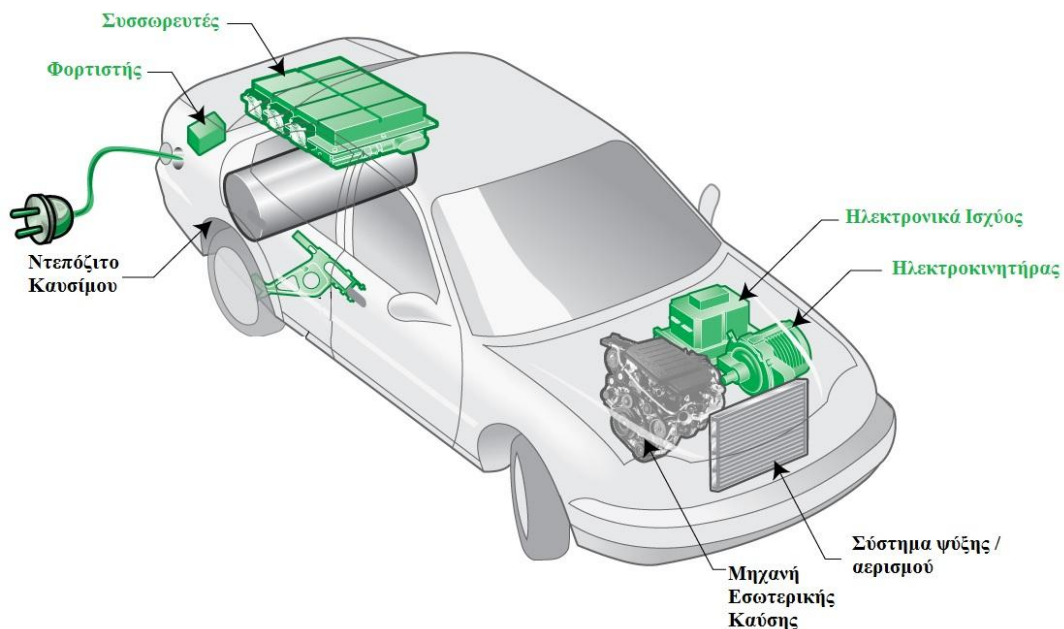
Σχήμα 2.3: Μέρη συστήματος κίνησης ενός ηλεκτροκίνητου οχήματος.

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

Ο ηλεκτρικός κινητήρας οδηγείται από μια μονάδα ηλεκτρονικών ισχύος ελεγχόμενων από μικροεπεξεργαστή ή ψηφιακό επεξεργαστή σήματος. Ο ρόλος αυτής της μονάδας είναι η μετατροπή της συνεχούς τάσης της πηγής ενέργειας σε μεταβαλλόμενη τάση επιθυμητής συχνότητας αναλόγως του σημείου λειτουργίας του οχήματος. Η τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος είναι μια σημαντική παράμετρος στην εξέλιξη συστημάτων κίνησης υψηλής επίδοσης. Τα ηλεκτρονικά ισχύος και το κύκλωμα ελέγχου τείνουν να γίνονται ταχύτερα, αποδοτικότερα και μικρότερα σε μέγεθος. Η ψηφιακή επεξεργασία σήματος επιτρέπει την εφαρμογή σύνθετων αλγορίθμων ελέγχου με μεγάλη ακρίβεια και ταχύτητα.

### 2.2.2 Το υβριδικό όχημα

Όπως υποδηλώνει και το όνομα του η πρόωση ενός τέτοιου οχήματος μπορεί να παρέχεται από δύο ή και περισσότερα είδη ενέργειας. Ένα υβριδικό όχημα παρουσιάζει αρκετά από τα πλεονεκτήματα και των δύο κατηγοριών κινητήρων καθώς για παράδειγμα μπορεί να υπάρχει μεγάλη αυτοδυναμία καυσίμων (μηχανή εσωτερικής καύσης) και ταυτόχρονα μικρές καταναλώσεις μέσα στην πόλη (ηλεκτρικός κινητήρας). Ένα παράδειγμα συστήματος κίνησης υβριδικού οχήματος διακρίνεται στο *σχήμα 2.4*.



Σχήμα 2.4: Σύστημα κίνησης υβριδικού οχήματος.

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 2.4*. Η ισχύς των δύο κινητήρων συνδυάζεται κατάλληλα ώστε να ικανοποιηθεί η απαίτηση ισχύος του οχήματος με μικρή κατανάλωση καυσίμου.

### 2.3 Ηλεκτρικοί κινητήρες στην αεροναυπηγική

Η ενέργεια που χρησιμοποιούν και καταναλώνουν τα αεροσκάφη μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στις εξής δύο κατηγορίες την πρωτεύουσα και την δευτερεύουσα. Η πρωτεύουσα αφορά το σύστημα πρόωσης του αεροσκάφους που αποτελείται από τον κινητήρα εσωτερικής καύσης. Γίνονται προσπάθειες χρήσης ηλεκτρικών κινητήρων για το σύστημα πρόωσης ενός αεροσκάφους αλλά υπάρχουν μεγάλες τεχνολογικές δυσκολίες στο να επιτευχθεί μεγάλη πυκνότητα ισχύος σε κινητήρα μικρού βάρους όπως συμβαίνει με τις τουρμπίνες των αεροσκαφών. Μέρος της ενέργειας που παράγεται από το πρωτεύον σύστημα χρησιμοποιείται σε άλλα συστήματα του αεροσκάφους, που αποτελούν την δευτερεύουσα ενέργεια.

Ο στόχος για ένα αποκλειστικά ηλεκτρικό δευτερεύον σύστημα στα αεροσκάφη είναι εξαιρετικά δύσκολο να πραγματοποιηθεί προς το παρόν, αλλά η μετατροπή πολλών συστημάτων σε ηλεκτρικά παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, μεταξύ των οποίων είναι και μείωση της μέγιστης παροχής ενέργειας μέσω του διαμοιρασμού φορτίου. Το κυριότερο όμως πλεονεκτήματα που προκύπτουν είναι η μείωση του βάρους και η μείωση του κόστους λειτουργίας. Η μείωση του βάρους μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερο κόστος χρήσης, μέσω της μείωσης της ποσότητας καυσίμων που είναι απαραίτητα για την πτήση, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα η χρήση των αεροπλάνων να καθίσταται πιο φιλική προς το περιβάλλον.

Αν και η χρήση ηλεκτρικών κινητήρων στην πρωτεύουσα ενέργεια ενός αεροσκάφους είναι δύσκολο να επιτευχθεί, οι περισσότερες βοηθητικές λειτουργίες των αεροσκαφών γίνονται με την χρήση ηλεκτρικών κινητήρων. Οι ηλεκτρικοί κινητήρες που προορίζονται για αυτή τη χρήση παρουσιάζουν πολύ ιδιαίτερα χαρακτηριστικά σε σχέση με τους άλλους κινητήρες καθώς η συντήρησή τους και η αξιοπιστία τους είναι ζωτικής σημασίας. Ένας ακόμα πολύ σημαντικός σχεδιαστικός παράγοντας είναι το βάρος. Στα αεροσκάφη διαδραματίζει σημαντικότατο ρόλο η ισχύς ανά βάρος που παρουσιάζει ο κάθε κινητήρας. Ενώ σε άλλες εφαρμογές ένας συντελεστής της τάξης του 0,5-1 (kW/kg) θα ήταν επαρκής, στην περίπτωση των αεροσκαφών αυτό θα πρέπει να ξεπερνά το 4-5 (kW/kg).

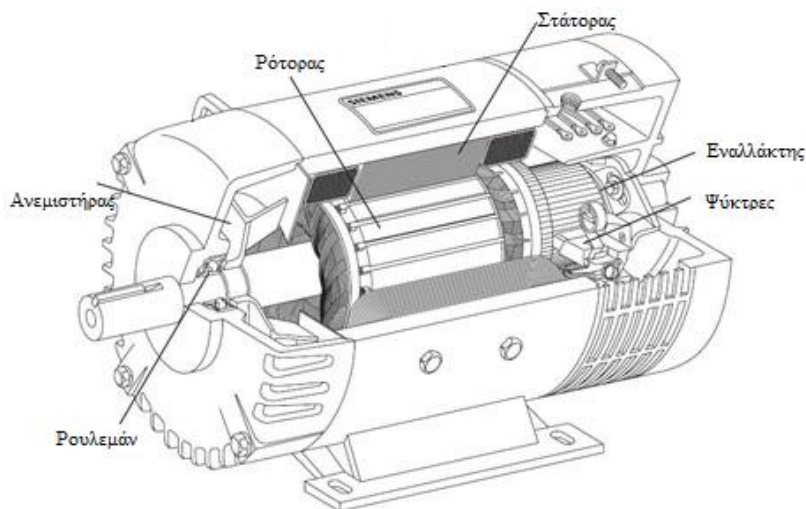


## 2.4 Σύγκριση διαφόρων ειδών κινητήρων

Υπάρχουν ορισμένες γενικές προδιαγραφές οι οποίες θα πρέπει να ικανοποιούνται με κριτήριο τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής την οποία και μελετάμε. Η συγκεκριμένη εργασία πραγματεύεται ένα κινητήρα χαμηλών στροφών και υψηλής ροπής ο οποίος θα πρέπει να παρουσιάζει τα εξής χαρακτηριστικά:

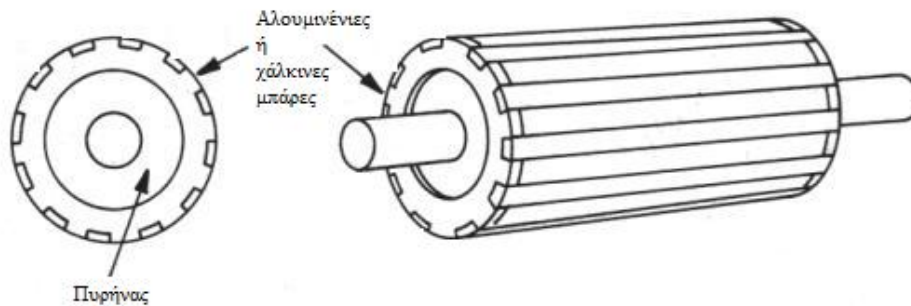
- Ευρεία περιοχή ταχυτήτων με σταθερή ροπή.
- Υψηλή πυκνότητα ισχύος.
- Υψηλή απόδοση (ιδανικά άνω του 95%).
- Χαμηλό κόστος.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής με την ελάχιστη δυνατή ανάγκη για συντήρηση.

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



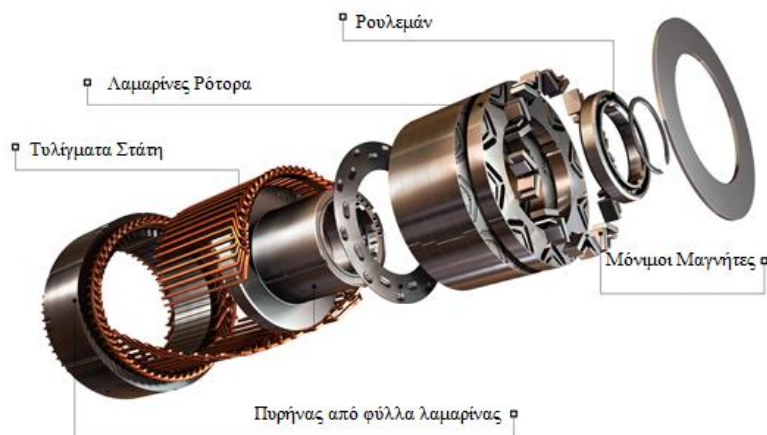
Σχήμα 2.5: Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος. Είναι εμφανή όλα τα τμήματα από τα οποία και αποτελείται ο κινητήρας.

Επίσης, σε πολλές εφαρμογές ηλεκτροκίνησης συναντάμε **κινητήρες επαγωγής** (Induction Machine). Το μικρό κόστος κατασκευής, η καλύτερη αποδοτικότητα σε σχέση με τους κινητήρες συνεχούς, ο εύκολος έλεγχος αλλά και η τεχνολογική ωριμότητα είναι κάποιοι από τους λόγους για τους οποίους επιλέγεται αυτός ο τύπος κινητήρα. Για την οδήγησή τους χρησιμοποιείται διάταξη αντιστροφέα με δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας για έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής.



Σχήμα 2.6: Κινητήρας Επαγωγής ή Ασύγχρονος κινητήρας.

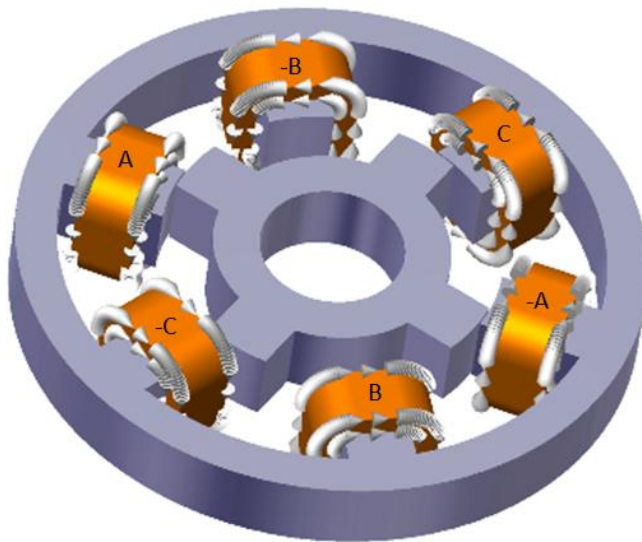
Ένας σχετικά νέος και ραγδαίως αναπτυσσόμενος τύπος κινητήρα είναι ο **σύγχρονος κινητήρας μόνιμων μαγνητών** (PMSM). Η απουσία του χαλκού από τον δρομέα (καθώς έχει αντικατασταθεί η διέγερση με μόνιμους μαγνήτες) αλλά και η απουσία ψυκτρών τον καθιστά ελαφρύτερο και αποδοτικότερο και πιο αξιόπιστο σε σχέση με τους άλλους κινητήρες. Ορισμένα από τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει είναι: το σχετικά υψηλό κόστος των μόνιμων μαγνητών, η δυσκολία συναρμολόγησης του δρομέα (θα πρέπει να κολληθούν οι μόνιμοι μαγνήτες ένας προς έναν), αλλά και η απομαγνήτιση των μόνιμων μαγνητών σε υψηλές θερμοκρασίες.



Σχήμα 2.7: Σύγχρονος Κινητήρα Μόνιμων μαγνητών.

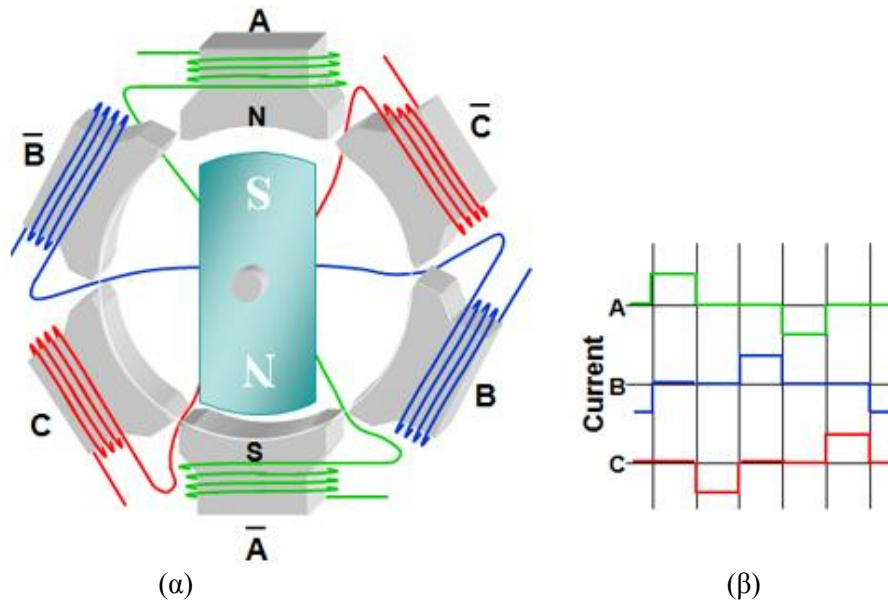


Ένας άλλος τύπος μηχανής είναι οι **σύγχρονοι κινητήρες μαγνητικής αντίδρασης** (Synchronous & Switched Reluctance Machine),- οι οποίοι δε διαθέτουν ούτε τύλιγμα διέγερσης ούτε μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα, αλλά εκμεταλλεύονται αποκλειστικά τη ροπή εκτυπότητας. Αυτός ο τύπος μηχανής έχει το πλεονέκτημα της απλότητας κατασκευής και του μικρού κόστους. Ωστόσο, σημαντικά μειονεκτήματα έχουν περιορίσει τη χρήση τους σε ειδικές εφαρμογές. Τέτοια είναι η μη-γραμμικότητα του μαγνητικού κυκλώματος, η υψηλή κυμάτωση ροπής σε χαμηλές στροφές και ο ακουστικός θόρυβος. Βέβαια, οι τεχνολογικές εξελίξεις στον έλεγχο και το σχεδιασμό έχουν εξαλείψει σε μεγάλο βαθμό κάποια από αυτά τα μειονεκτήματα με αποτέλεσμα να είναι εφικτή η αξιοποίησή τους σε σύγχρονους ηλεκτρικούς κινητήρες.



Σχήμα 2.8: Κινητήρας μαγνητικής αντίδρασης. Είναι εμφανής τόσο ο στάτης όσο και ο δρομέας του κινητήρα.

Επιπρόσθετα, υπάρχει ο **κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς συλλέκτη και ψήκτρες** (Brushless DC). Οι κινητήρες αυτοί παρουσιάζουν επίσης υψηλό βαθμό απόδοσης και μεγάλη πυκνότητα ισχύος, ενώ δύνανται να παρέχουν υψηλές τιμές ροπής λόγω της ορθογώνιας μορφής της μαγνητικής ροής και του ρεύματος. Μοιάζουν αρκετά με τους σύγχρονους κινητήρες μονίμων μαγνητών αλλά τα τυλίγματα του στάτη σε αυτή τη περίπτωση δεν τροφοδοτούνται με ημιτονοειδή ρεύματα αλλά με dc ρεύματα. Ένα μειονέκτημά τους είναι ότι απαιτείται ακριβής γνώση της θέσης του δρομέα για την οδήγησή τους, η οποία επιτυγχάνεται με αισθητήρες ή με τεχνικές υπολογισμού της θέσης του δρομέα από μετρήσεις των ηλεκτρικών μεγεθών. [2],[3]

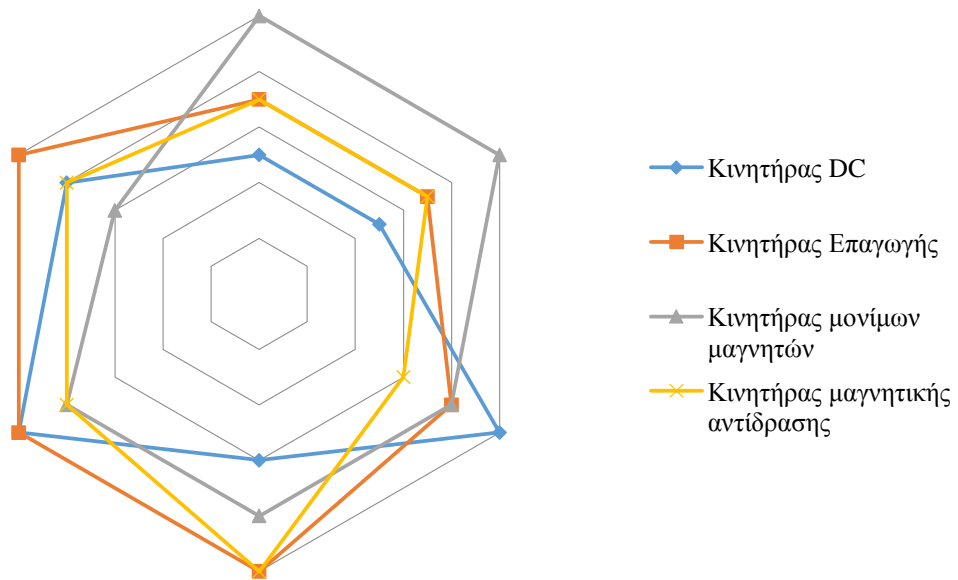


Σχήμα 2.9: Στο (α) φαίνεται η γεωμετρία ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς συλλέκτη και ψήκτρες και στο (β) τα ρεύματα που τροφοδοτούμε τα τυλίγματα του στάτη

Για την αξιολόγηση της καταλληλότητας των βασικών κατηγοριών κινητήρων που παρουσιάστηκαν παραπάνω χρησιμοποιείται ένα σύστημα βαθμολόγησης [2]. Αξιολογούνται έξι βασικά χαρακτηριστικά των κινητήρων και η κλίμακα εκτείνεται από το ένα ως το πέντε. Όπως φαίνεται στο *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.

Πίνακας 2.1: Αξιολόγηση ηλεκτρικών κινητήρων για ηλεκτροκίνηση.

	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 Ωριμότητα	5	5	4	4
Κόστος	4	5	3	4



Διάγραμμα 2.1 : Αραχνοειδές διάγραμμα με την αξιολόγηση των διαφόρων ειδών κινητήρων



## Κεφάλαιο 3: Βασική σχεδίαση της γεωμετρίας του κινητήρα

### 3.1 Προκαταρκτική Σχεδίαση

Προχωρώντας στην ανάλυση του κινητήρα μέσα από προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, ένα πολύ βασικό κομμάτι είναι να οριστεί η βασική γεωμετρία και η βασική διαστασιολόγηση του κινητήρα. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται προκαταρκτική σχεδίαση και αφορά μια ανάλυση που περιλαμβάνει τόσο θεμελιωμένους μαθηματικά τύπους όσο και εμπειρικούς, που έχουν προκύψει έπειτα από την κατασκευή πολλών ηλεκτρικών κινητήρων.

Σκοπός είναι να σχεδιαστεί ένας κινητήρας ισχύος ~1,8 kW, με ταχύτητα περιστροφής ~1700 στροφές/λεπτό.

Έτσι οι ονομαστικές του στροφές θα είναι :

$$n = \frac{60}{2\pi} \omega_{rm} \sim 1700 \text{ ΣΑΛ} \quad (3.1)$$

όπου:

$n$  : ταχύτητα δρομέα (ΣΑΛ)  
 $\omega_{rm}$  : γωνιακή ταχύτητα δρομέα ( $rad/sec$ )

Πλέον λοιπόν μπορεί να υπολογιστεί πολύ εύκολα η ονομαστική ροπή του κινητήρα, η οποία και θα είναι:

$$T_{el} = \frac{P_m}{\omega_{rm}} = \frac{1.8kW}{179,51 \frac{rad}{sec}} \cong 10N \cdot m \quad (3.2)$$

όπου:

$T_{el}$  : ηλεκτρομαγνητική ροπή  
 $P_m$  : η ισχύς του κινητήρα στον άξονα (στην προκαταρκτική θεωρούμε  $P_m = P_{el}$ )

### 3.1.1 Διαστασιολόγηση του διακένου

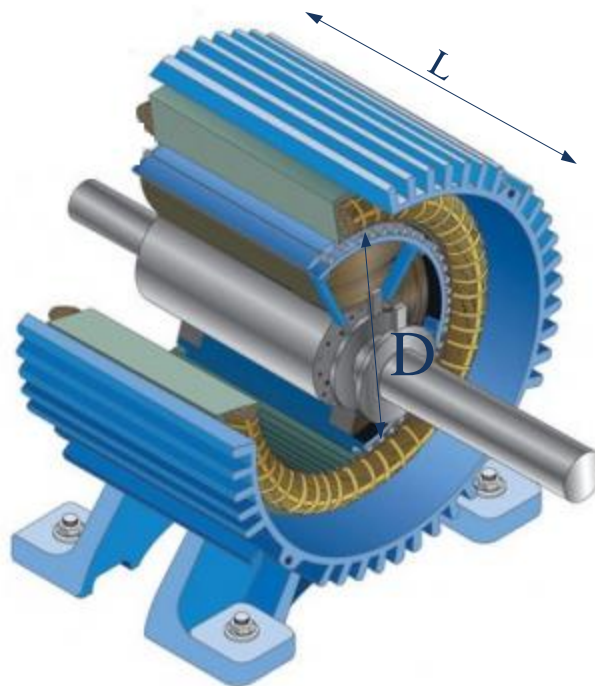
Η ροπή του διακένου μπορεί να υπολογισθεί με βάση τη μέση επαπτομενική πίεση των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο και την επιφάνεια του διακένου. Έτσι με βάση τα παραπάνω έχουμε [4]:

$$F_t = P_t \cdot A = P_t \cdot \pi DL \quad (3.3)$$

$$T_{el} = \frac{1}{2} DF_t \quad (3.4)$$

όπου:

- $P_t$  : μέση επαπτομενική πίεση των μαγνητικών
- $D$  : η διάμετρος του διακένου
- $L$  : το μήκος του ενεργού μέρους του κινητήρα



Σχήμα 3.1: Ηλεκτρική μηχανή στην οποία μπορούμε να διακρίνουμε τόσο το ενεργό μήκος (L) όσο και τη διάμετρο του διακένου (D)

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (3.3) και (3.4) παίρνουμε:

$$T_{el} = \frac{\pi}{2} D^2 LP_t \quad (3.5)$$

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

$$F_t = L \cdot \oint B_n H_t dl = \frac{L}{\mu_o} \oint B_n B_t dl \quad (3.5)$$

Ως ειδική μαγνητική φόρτιση του διακένου θα λάβουμε την τιμή  $\bar{B} = 0,5T$ , με σκοπό να ελαχιστοποιήσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο τις απώλειες σιδήρου στον στάτη. Θεωρώντας γωνία μεταξύ της ακτινικής συνιστώσας και της εφαπτομένης, τις  $45^\circ$ , έχουμε:

$$B_n = B_t = B \cdot \sin\theta = 0,5 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (3.6)$$

Εφόσον η επιφάνεια του διακένου είναι  $A = \pi DL$ , η μέση πίεση των εφαπτομενικών δυνάμεων στο διάκενο εκφράζεται ως εξής:

$$P_t = \frac{1}{\pi D \cdot \mu_o} \oint B_n B_t dl \quad (3.7)$$

Και αντικαθιστώντας μπορούμε να βρούμε την τιμή της εφαπτομενικής πίεσης:

$$P_t = \frac{B_n \cdot B_t \cdot \pi \cdot D}{\pi \cdot D \cdot \mu_o} = \frac{B_n \cdot B_t}{\mu_o} = \frac{0,354^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cong 100 \frac{kN}{m^2} \quad (3.8)$$

Μπορούμε λοιπόν πλέον πολύ εύκολα από την σχέση (3.5) να υπολογίσουμε το γινόμενο  $D^2L$  το οποίο και θα είναι:

$$D^2L = \frac{2 \cdot T_e}{\pi \cdot P_t} = \frac{2 \cdot 10N \cdot m}{\pi \cdot 100.000 \frac{N}{m^2}} = 6,36 \cdot 10^{-5} \cong 63.000mm^3 \quad (3.9)$$

Συνεπώς σε αυτό το σημείο, μπορεί να γίνει οποιαδήποτε επιλογή συνδυασμών για τα  $D$  και  $L$  που θα ικανοποιεί την παραπάνω συνθήκη. Δεδομένου ότι ο κινητήρας μας είναι μικρής ισχύος, μια συνηθισμένη πρακτική είναι η εφαρμογή του παρακάτω κανόνα [4]:

$$D \approx L \approx 65mm \quad (3.10)$$

Ως προς την επιλογή του διακένου θα πρέπει να έχει την όσο το δυνατό μικρότερη τιμή, με σκοπό να μεγιστοποιηθεί η απόδοση του κινητήρα. Με αυτό λοιπόν το σκοπό επιλέχθηκε τιμή διακένου:

$$g = 0,7mm \quad (3.11)$$

Θα μπορούσε να έχει ληφθεί και μικρότερη τιμή για ένα κινητήρα αυτού του μεγέθους, αλλά συνυπολογίζοντας το ότι ο κινητήρας θα είναι επιφανειακών μαγνητών αλλά και ότι πρόκειται για εφαρμογή σχετικά υψηλής ταχύτητας δρομέα, επιλέχθηκε η παραπάνω τιμή για να διασφαλιστεί ακεραιότητα του κινητήρα.

### 3.1.2 Προσδιορισμός χαρακτηριστικών του στάτη

Η επιλογή της ονομαστικής συχνότητας λειτουργίας του δρομέα θα συσχετιστεί με τον αριθμό των πόλων της μηχανής αλλά και με τη συχνότητα των ρευμάτων του στάτη. Γίνεται χρήση της σχέσης:

$$n = \frac{120 \cdot f_{el}}{p} \quad (3.12)$$

όπου:

$f_{el}$  : η συχνότητα των ρευμάτων του στάτη  
 $p$  : ο αριθμός των πόλων του δρομέα

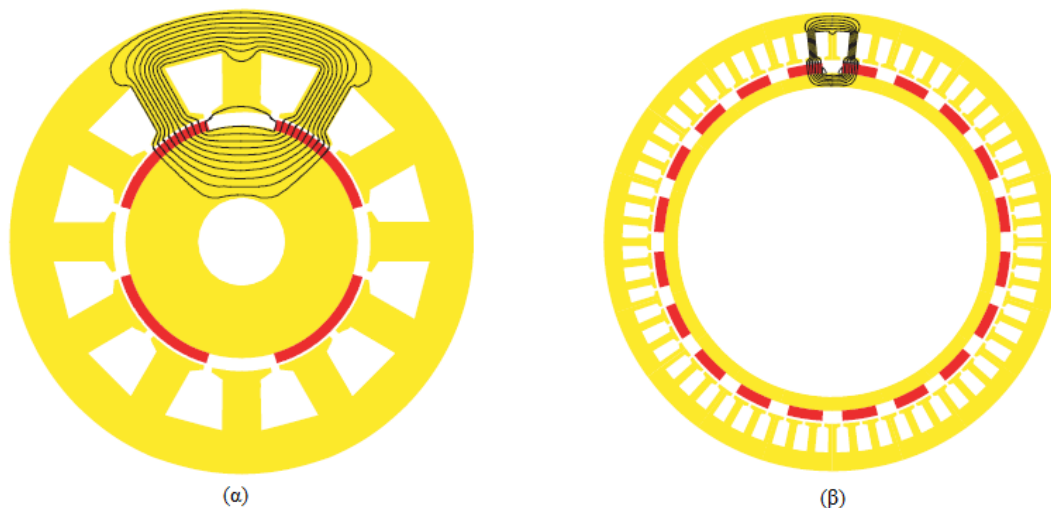
Με βάση λοιπόν τα παραπάνω μπορεί να επιλεγεί οποιοσδήποτε από τους παρακάτω συνδυασμούς:

Συχνότητα Ρευμάτων	Αριθμός πόλων
120	10
150	12
180	14
200	16
230	18
280	20

Όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα της εισαγωγής, δεν υπάρχει στην εφαρμογή αυστηρός περιορισμός για την επιλογή της συχνότητας των ρευμάτων του στάτη, καθώς αυτά μπορούν να επιλέγονται κατά βούληση επηρεάζοντας μόνο την ταχύτητα περιστροφής και σε πολύ μικρότερο βαθμό άλλα χαρακτηριστικά της μηχανής μας (απώλειες, ροπή κ.α.).



Ο λόγος για τον οποίο έχει επιλεγεί μεγάλος αριθμός πόλων δεν είναι τυχαίος. Οι μηχανές με μεγάλο αριθμό πόλων παρουσιάζουν χαμηλότερο ενεργό βάρος. Σε μια τέτοια εφαρμογή το βάρος της λαμαρίνας θεωρείται αρκετά μεγάλο σε σχέση με το μέγεθος της κατασκευής και πράγματι όπως φαίνεται και στο παρακάτω παράδειγμα σε πολυπολικούς κινητήρες υπάρχει μικρότερος συνολικός όγκος λαμαρίνας και άρα ελαφρύτερο μαγνητικό κύκλωμα. Οι μηχανές στο *σχήμα 3.2* έχουν ίδια πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο, αλλά η ροή από τον έναν πόλο στον άλλο είναι αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού των πόλων. Καθώς λοιπόν, η ροή στην πολυπολική μηχανή είναι μικρότερη, το πάχος δοντιού, το σώμα του στάτη και το σώμα του δρομέα μπορούν να μειωθούν χωρίς να κορεστεί ο σίδηρος [5].



Σχήμα 3.2: 4 πολική μηχανή (α) και 20 πολική μηχανή (β)

Όπως θα φανεί και παρακάτω, μηχανές με μεγάλο αριθμό αυλάκων και πόλων παρουσιάζουν απώλειες πυρήνα πολύ μικρότερες από τις απώλειες χαλκού, καθώς οι απώλειες πυρήνα είναι ανάλογες με τον όγκο του σιδήρου του στάτη.

Τέλος, λόγω της χρήσης συγκεντρωμένου τυλίγματος, η αύξηση του αριθμού των πόλων αναμένεται να ελαττώσει και τις απώλειες χαλκού, καθώς αυξάνοντας τους πόλους μειώνεται το πάχος του δοντιού, συνεπώς μειώνεται τόσο το μήκος των επιμέρους αγωγών, όσο και το μήκος των αγωγών εκτός ενεργού κυκλώματος. Μείωση του μήκους συνεπάγεται μείωση της αντίστασης των αγωγών οδηγώντας σε μείωση των ωμικών απωλειών τυλίγματος. Έτσι λοιπόν, για συγκεκριμένο επίπεδο τάσης, αναμένονται μικρότερες απώλειες χαλκού για μεγαλύτερο αριθμό πόλων.

Συνολογίζοντας τώρα, πως η κυρίαρχη συνιστώσα στις απώλειες για μηχανές ισχύος της ίδιας τάξης με την συγκεκριμένη εφαρμογή είναι κατά κανόνα οι απώλειες χαλκού, η επιλογή πολυπολικής μηχανής αναμένεται να οδηγήσει σε αύξηση και της απόδοσης.

Με βάση τα παραπάνω, προχωρώντας στην σχεδίαση, θα επιλεγεί ένας 14 πόλικός κινητήρας με συχνότητα ρευμάτων στα 200Hz. Η μέση ροή ανά πόλο μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$\Phi = \frac{\bar{B} \cdot A}{p} = \frac{0,5 \cdot \pi \cdot 65mm \cdot 65mm}{14} = 0,474mWb \quad (3.13)$$

Και οι σπείρες (στροφές) των πηνίων της κάθε φάσης θα δίνονται από τον τύπο:

$$N_i = \frac{V_{rms}}{4,44 \cdot f_{el} \cdot \frac{p}{2} \cdot \Phi} \quad (3.14)$$

Για την εύρεση της  $V_{rms}$  θα θεωρηθεί ότι ο κινητήρας οδηγείται από διάταξη με ένα τυπικό τριφασικό αντιστροφέα PWM, ο οποίος θα έχει συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους  $m_a = 0,8$ . Θεωρώντας λοιπόν τα παραπάνω στοιχεία δεδομένα, αλλά και τάση τροφοδοσίας του αντιστροφέα  $V_{dc} = 510V$ , θα έχουμε στην έξοδο του [6]:

$$V_{rms} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot m_a \cdot V_{dc} \cong 150V \quad (3.15)$$

Άρα πλέον μπορούν να υπολογιστούν οι σπείρες από τη σχέση (3.14):

$$N_i = \frac{150}{4,44 \cdot 200 \cdot \frac{14}{2} \cdot 0,474 \cdot 10^{-3}} \cong 50 \quad (3.16)$$

Επομένως η ενεργός τιμή του ρεύματος που θα διαρρέει τα τυλίγματα του στάτη θα είναι:

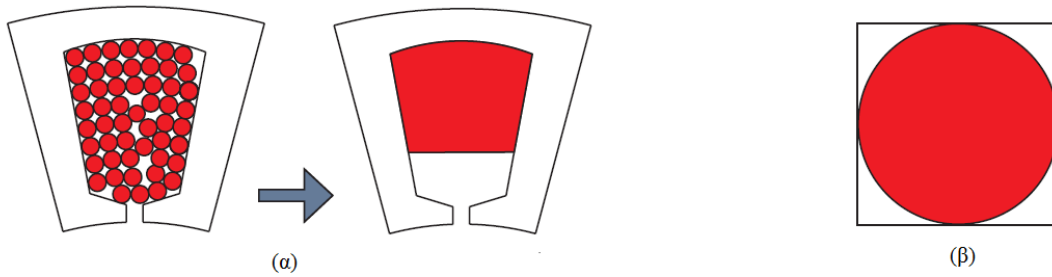
$$I_{rms} = \frac{P_m}{3 \cdot V_{rms} \cdot \cos\varphi} = 5A \quad (3.17)$$

Συνεπώς η συνολική ενεργός μαγνητεγερτική δύναμη δίνεται από την σχέση:

$$ME\Delta = N_s \cdot I_{rms} \cong 255A - \varepsilon \quad (3.18)$$

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να επιλεγεί με μεγάλη προσοχή η πυκνότητα ρεύματος, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ροπή αλλά και ταυτόχρονα αρκετά μικρή ώστε να επιτρέπει στον κινητήρα να έχει την δυνατότητα υπερφόρτωσης για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς να επηρεάζεται η ακεραιότητα των ηλεκτρικών κυκλωμάτων της μηχανής. Τυπικές τιμές πυκνότητας ρεύματος για τις οποίες και δεν χρειάζεται επιπρόσθετο σύστημα ψύξης των τυλιγμάτων είναι τα  $4 - 6 \frac{A}{mm^2}$ . [8] Με βάση τα παραπάνω επιλέγεται  $J_{rms} = 4 \frac{A}{mm^2}$ .

Για τον υπολογισμό της επιφάνειας που θα έχει η κάθε αύλακα θα πρέπει να επιλεγεί ένας συντελεστής πληρότητας. Τυπικές τιμές είναι από 0,5 έως και 0,65 για κυλινδρικά καλώδια, αλλά σε καμία περίπτωση ο συντελεστής πληρότητας δεν θα μπορούσε να ξεπεράσει την τιμή 0,7 [7]. Στο παρακάτω σχήμα (3.3), γίνεται αντιληπτός ο λόγος για τον οποίο είναι αδύνατο να επιτευχθούν πολύ μεγάλοι συντελεστές πληρότητας.



Σχήμα 3.3: Άδρακα γεμισμένη με κυλινδρικό καλώδιο (α) μέγιστος συντελεστής πληρότητας για μια σπείρα καλωδίου (β)

Συνεπώς η ελάχιστη ενεργή διατομή που πρέπει να έχει η άδρακα του κινητήρα υπολογίζεται ως εξής:

$$A_{cu} = \frac{ME\Delta}{J \cdot sff} = \frac{280A - \varepsilon}{4 \frac{A}{mm^2} * 0,5} = 127,26 mm^2 \quad (3.19)$$

όπου:

$sff$  : ο συντελεστής πληρότητας της άδρακος που έχει θεωρηθεί ίσως με 0,5.

### 3.1.3 Ειδική ηλεκτρική και μαγνητική φόρτιση

Η ειδική μαγνητική φόρτιση έχει ήδη καθοριστεί παραπάνω:

$$\bar{B} = 0,5T$$

Η ηλεκτρική φόρτιση μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση της παρακάτω σχέσης:

$$ac = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_s \cdot I_{rms}}{\pi \cdot D} = 26.175 \frac{A - \varepsilon}{m} \quad (3.20)$$

Τυπικές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης κυμαίνονται ανάμεσα στις 15.000 και 45.000. Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση καθορίζει από κοινού με την ειδική μαγνητική φόρτιση την ικανότητα παραγωγής ροπής της μηχανής. Από πλευράς απωλειών, η ειδική ηλεκτρική φόρτιση συνδέεται κυρίως με τις απώλειες χαλκού της μηχανής, καθώς αυτές ως γνωστόν μεταβάλλονται ανάλογα με το τετράγωνο του ρεύματος.

### 3.1.4 Προσδιορισμός χαρακτηριστικών του δρομέα

#### 3.1.4.1 Μόνιμοι Μαγνήτες

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
- το κράμα Νεοδυμίου αποτελεί σπάνια γαία (Rare earth element) , και η προμήθεια μαγνητών νεοδυμίου μπορεί να γίνει μόνο από πολύ συγκεκριμένες χώρες (κυρίως την Κίνα).

Σκοπός είναι , ο μαγνήτης να λειτουργεί πάντα κοντά στο σημείο μέγιστης ενέργειας, δηλαδή στο σημείο όπου το εμβαδόν του σχηματιζόμενου ορθογωνίου μεγιστοποιείται.

Στη συνέχεια, πρέπει να εκτιμηθεί η επίδραση του μαγνητικού πεδίου του στάτη στην μαγνητική επαγωγή του μαγνήτη. Θεωρώντας την καμπύλη απομαγνήτισης ως ευθεία γραμμή, μπορούμε να εξάγουμε εύκολα τη χαρακτηριστική της εξίσωση ως εξής:

$$H(B) = H_c - \frac{H_c}{B_r} B \quad (3.21)$$

όπου:  $B_r=1.29 \text{ T}$  και  $H_c=979000 \text{ A/m}$ .

Με βάση αυτά τα μεγέθη, είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε την πτώση της μαγνητικής επαγωγής όταν ο κινητήρας βρίσκεται υπό φορτίο. Αυτή η εκτίμηση πραγματοποιείται με την βοήθεια του διαφορικού της μαγνητικής επαγωγής όπως προκύπτει από την σχέση (3.21):

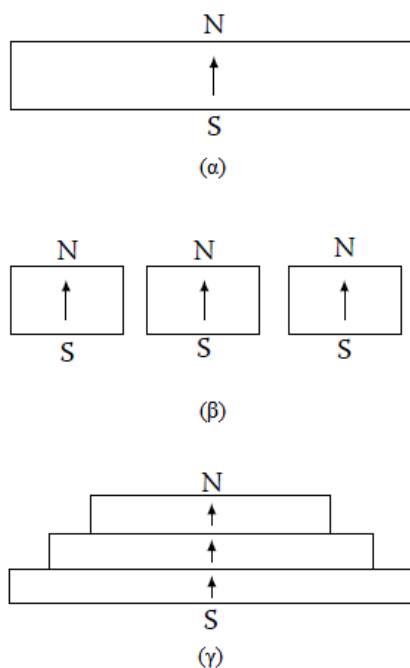
$$\Delta B = \frac{B_r}{H_c} ac = 0,0383 \quad (3.22)$$

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

### 3.1.5 Διατάξεις μονίμων μαγνητών

Υπάρχουν πολλά και διαφορετικά είδη μαγνητών μέσα από τα οποία θα μπορούσε να επιλεγεί το καταλληλότερο για την εφαρμογή μας. Θα μπορούσε να γίνει κατασκευή μαγνητών ακόμα και σε σχήμα δακτυλιδιού με οποιονδήποτε επιθυμητό προσανατολισμό των δυναμικών γραμμών που θα εφάρμοζε τέλεια πάνω στον δρομέα. Το κόστος μιας τέτοιας κατασκευής θα ήταν όμως ασύμφορο. Σε μια κατασκευή όμως είναι σημαντικό να λαμβάνουμε αποφάσεις με βάση τεχνοοικονομικά κριτήρια και όχι με αμιγώς τεχνικά κριτήρια.

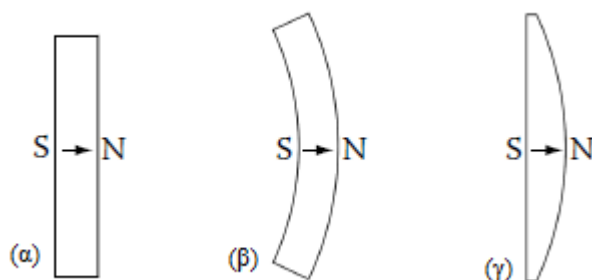
Σε έναν πόλο θα μπορούσαν να τοποθετηθούν, τόσο ένα ενιαίο κομμάτι μαγνήτη όσο και πολλοί μαγνήτες ενωμένοι μεταξύ τους με σκοπό να επιτευχθεί η επιθυμητή μαγνητική φόρτιση. Επίσης μπορούν να τοποθετηθούν πολλοί μαγνήτες, ο ένας πάνω στον άλλο. Σε αυτή τη περίπτωση μπορούν να υπάρχουν μαγνήτες διαφορετικών μεγεθών αλλά πάντοτε θα πρέπει να έχουν την ίδια διεύθυνση μαγνήτισης. Στο *σχήμα 3.5* παρακάτω, μπορούν να γίνουν διακριτοί οι τρεις διαφορετικοί τρόποι τοποθέτησης μαγνητών σε έναν πόλο.



Σχήμα 3.5: Τρόποι με τους οποίους οι μόνιμοι μαγνήτες μπορούν να τοποθετηθούν πάνω στους πόλους (α) ενιαία κομμάτια, (β) μεμονωμένα κομμάτια και (γ) ο ένας πάνω στον άλλο.

Η κάθε γεωμετρία παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αντίστοιχα. Στην περίπτωση μηχανής μικρής ισχύος (όπως είναι και η συγκεκριμένη εφαρμογή), συνήθως προτιμάται ενιαίος μόνιμος μαγνήτης. Μηχανές μεγαλύτερης ισχύος, συνήθως κατασκευάζονται με πολυτμηματικούς μαγνήτες ανά πόλο ή και με διαμορφώσεις στοίβας. Σε κάθε περίπτωση και οι δύο τύποι χρησιμοποιούνται ευρέως στην πράξη. [7]

Εκτός από τον τρόπο με τον οποίο οι μαγνήτες τοποθετούνται πάνω στο δρομέα μπορούν να έχουν διαφορετικά σχήματα. Στο σχήμα 3.6 παρακάτω παρουσιάζονται μαγνήτες με (α) ορθογωνικό σχήμα, (β) ακτινικό σχήμα και τέλος (γ) με δισκοειδές (c-breadloaf). Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό το ακτινικό σχήμα παρουσιάζει την καλύτερη και πιο ομοιόμορφη κατανομή του πεδίου στο διάκενο. Σε ότι αφορά τους ορθογώνιους μαγνήτες στην περίπτωση που είναι κομμένοι σε μεγάλα ενιαία κομμάτια συνήθως τοποθετούνται στο εσωτερικό του δρομέα, μέσα σε τρύπες που γίνονται κατά την διάρκεια κατασκευής του ή και μετά από αυτή.



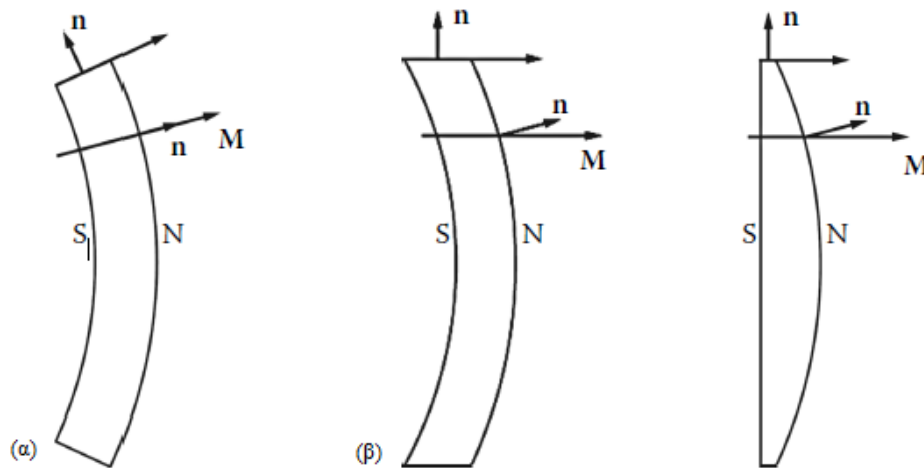
Σχήμα 3.6: Διαφορετικοί τύποι σχημάτων μόνιμων μαγνητών (α) ορθογωνικό, (β) ακτινικό και (γ) δισκοειδές (c-breadloaf)

Υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους θα μπορούσε κανείς να τοποθετήσει ή και να σχεδιάσει τους μαγνήτες ανάλογα με την φαντασία που διαθέτει και την εφαρμογή που επιθυμεί να υλοποιήσει, παρόλα αυτά κάθε τέτοια κατασκευή θα πρέπει να πραγματοποιείται με βασικό γνώμονα τα παρακάτω κριτήρια:

- Ελάχιστη δυνατή ποσότητα ανά μαγνητικό πόλο.
- Ευκολία στην τοποθέτηση, την κατεργασία και την κατασκευή του μαγνήτη.
- Η καλύτερη δυνατή κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο (όσο το δυνατόν πιο ημιτονοειδής ή τραπεζοειδής).

### 3.1.6 Μαγνήτιση των μονίμων μαγνητών

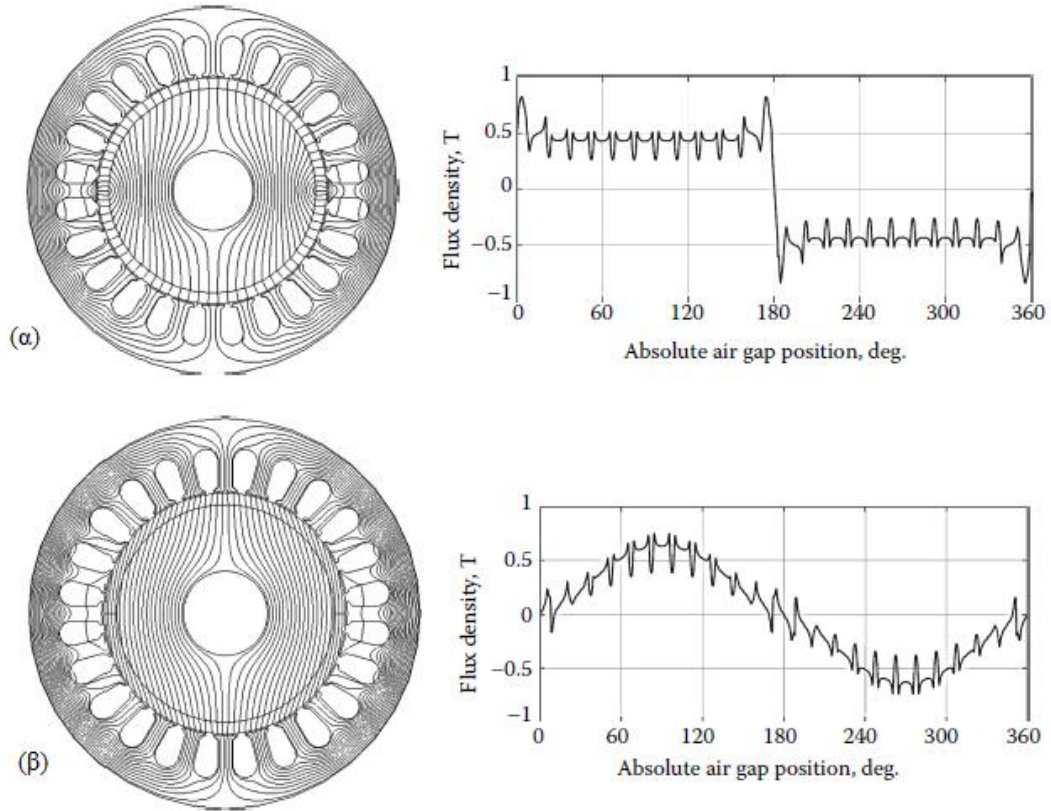
Οι μόνιμοι μαγνήτες μαγνητίζονται από τον κατασκευαστή με ορισμένο προσανατολισμό ή διεύθυνση. Η διεύθυνση της μαγνήτισης είναι ένας παράγοντας που θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπ' όψιν, καθώς εκτός των άλλων επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τόσο την κατανομή της μαγνητικής ροής όσο και την πυκνότητα ισχύος για διάφορες γεωμετρίες. Όσο χειρότερη είναι η κατανομή της μαγνητικής ροής τόσο περισσότερες θα είναι και οι αρμονικές που θα έχει η ροπή επηρεάζοντας σε μεγάλο βαθμό την επίδοση του κινητήρα. Οι πλέον διαδεδομένες διευθύνσεις μαγνήτισης είναι η ακτινική και η παράλληλη, οι οποίες θα εξηγηθούν στη συνέχεια.



Σχήμα 3.7: Τρόποι μαγνήτισης των μονίμων μαγνητών (α) ακτινική και (β) παράλληλη. [10]

Στο σχήμα 3.7, διακρίνονται και τα δύο είδη μαγνήτισης, όπου το  $\mathbf{n}$  συμβολίζει το μοναδιαίο διάνυσμα της επιφάνειας και το  $\mathbf{M}$  το μοναδιαίο διάνυσμα της διεύθυνσης της μαγνήτισης. Στο σχήμα 3.8 παρουσιάζεται η κατανομή των μαγνητικών γραμμών καθώς και η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο για τους δύο διαφορετικούς τρόπους μαγνήτισης για διπολική μηχανή με 24 αυλάκια στο στάτη.

Στο σχήμα 3.8, οι ακτινικά μαγνητισμένοι μόνιμοι μαγνήτες παράγουν τραπεζοειδή μορφή μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο, ενώ αντίθετα εκείνοι με παράλληλη φόρτιση ημιτονοειδή.



Σχήμα 3.8: Μαγνητικές γραμμές και μαγνητική επαγωγή στο διάκενο για (α) μηχανή με ακτινική μαγνήτιση και για (β) μηχανή με παράλληλη μαγνήτιση. [10]

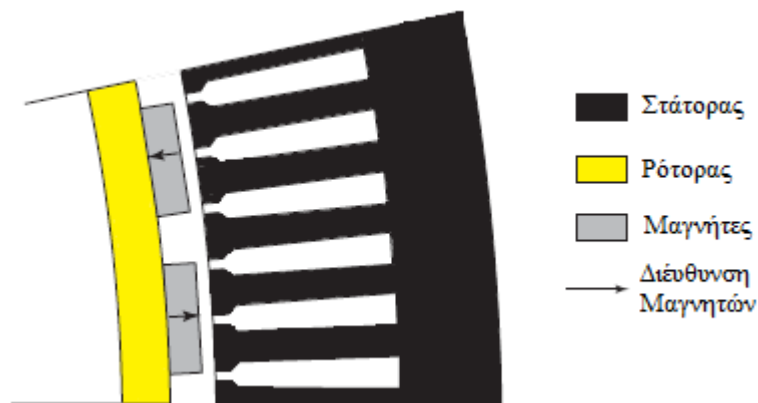
### 3.1.6.1 Κατηγοριοποίηση μηχανών μονίμων μαγνητών με βάση τη θέση του μαγνήτη

Σε αυτό το σημείο, αφού έχει επιλεγεί το είδος του κινητήρα που θα χρησιμοποιηθεί στην εφαρμογή, θα πρέπει να γίνει και μια ανάλυση των διαφόρων ειδών κινητήρων μονίμων μαγνητών που υπάρχουν, με σκοπό να επιλεγεί ο ιδανικότερος για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

#### 3.1.6.1.1 Μηχανή με επιφανειακούς μαγνήτες και εσωτερικό ρότορα

Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται ρότορας είτε συμπαγής είτε από φύλλα λαμαρίνας και στην εξωτερική του επιφάνεια προσκολλούνται οι μαγνήτες όπως φαίνεται και στο *σχήμα 3.9*.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της μηχανής είναι τόσο η ευκολία κατασκευής της, όσο και το μικρό κόστος κατασκευής που έχει σε σχέση με τους άλλους κινητήρες μονίμων μαγνητών. Σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι οι μόνιμοι μαγνήτες είναι εκτεθειμένοι και απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την σχεδίαση ώστε να αποφευχθεί ο απομαγνητισμός των μονίμων μαγνητών του ρότορα. Ένα άλλο μειονέκτημα των κινητήρων αυτού του τύπου είναι ότι οι μόνιμοι μαγνήτες είναι κολλημένοι στην επιφάνεια και κατά τη στρέψη του ρότορα δέχονται μεγάλες δυνάμεις και ελλοχεύει ο φόβος αποκόλλησης τους από το σώμα του ρότορα. Οι εφαρμογές αυτού του τύπου κινητήρα ποικίλουν από προπέλες πλοίων έως και ανεμογεννήτριες.



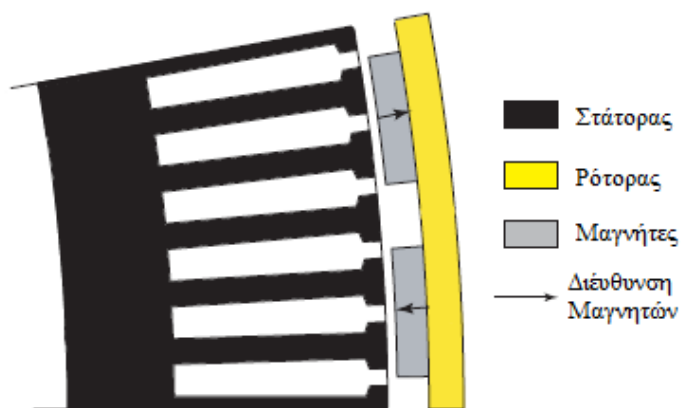
Σχήμα 3.9: Τομή μηχανής μονίμων μαγνητών με επιφανειακούς μαγνήτες και εσωτερικό ρότορα (όψη ενός πόλου) [9].



### 3.1.6.1.2 Μηχανή με επιφανειακούς μαγνήτες και εξωτερικό ρότορα

Σε αυτή την περίπτωση ο ρότορας δεν βρίσκεται στο εσωτερικό της μηχανής αλλά στην εξωτερική της επιφάνεια, ενώ και πάλι οι μόνιμοι μαγνήτες είναι προσκολλημένοι στην επιφάνεια του ρότορα.

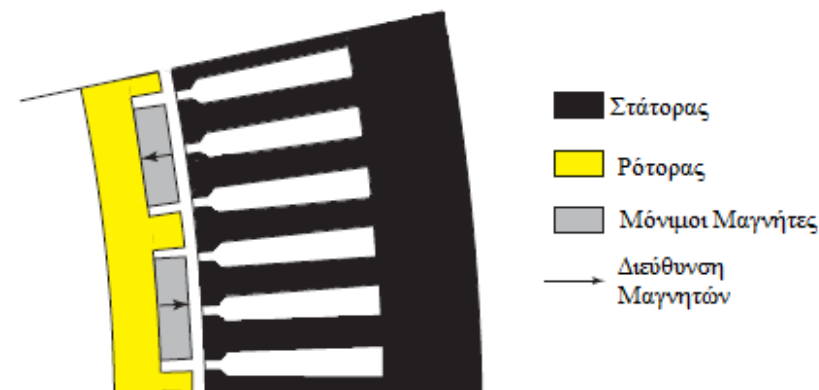
Στους μόνιμους μαγνήτες του ρότορα ασκούνται φυγόκεντρες δυνάμεις προς τα έξω καθιστώντας σχεδόν αδύνατο να αποκολληθούν οι μόνιμοι μαγνήτες από τη θέση τους. Επίσης, ένα ακόμα πλεονέκτημα που παρουσιάζει αυτό το είδος μηχανής είναι η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί απευθείας χωρίς την χρήση άξονα που εισάγει απώλειες στο σύστημα, τόσο σε εφαρμογές κίνησης όσο και σε εφαρμογές ανεμογεννητριών.



Σχήμα 3.10: Τομή μηχανής μόνιμων μαγνητών με επιφανειακούς μαγνήτες και εξωτερικό ρότορα (όψη ενός πόλου) [9].

### 3.1.6.1.3 Μηχανή εσωτερικών μαγνητών (Inset PM Machine)

Αυτό το είδος μηχανής όπως υποδηλώνει και το όνομα της αλλά και το σχήμα 3.11 έχει τους μόνιμους μαγνήτες μέσα στο σώμα του ρότορα. Αυτοί μπορούν να τοποθετηθούν είτε σε αυλάκια που δημιουργούμε στην επιφάνεια του μόνιμου μαγνήτη είτε στο εσωτερικό του ρότορα όπως θα δούμε στην επόμενη περίπτωση μηχανής. Όπως καταλαβαίνουμε σε αυτή τη περίπτωση ο κίνδυνος απομαγνητισμού των μόνιμων μαγνητών δεν υπάρχει αλλά ο σίδηρος που προεξέχει ανάμεσα στους μαγνήτες προκαλεί ροπή που αντιτίθεται στην κίνηση του ρότορα.



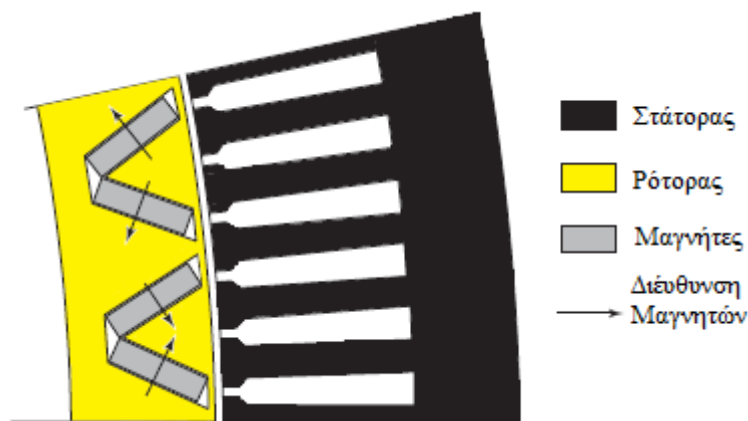
Σχήμα 3.11: Τομή μηχανής μόνιμων μαγνητών με εσωτερικούς μαγνήτες (όψη ενός πόλου) [9].

#### 3.1.6.1.4 Μηχανή εσωτερικών μαγνητών (Buried PM Machine)

Σε αυτή την περίπτωση μηχανής οι μόνιμοι μαγνήτες δεν βρίσκονται απλά μέσα στο σώμα του ρότορα αλλά έχουν τοποθετηθεί βαθιά μέσα στο σώμα του ρότορα μέσα σε τρύπες που έχουμε κάνει είτε κατά την κοπή της λαμαρίνας είτε αφού έχει γίνει ο ρότορας ένα συμπαγές σώμα.

Είναι σαφές ότι υπάρχουν παρά πολύ τρόποι με τους οποίους θα μπορούσαν να τοποθετηθούν οι μόνιμοι μαγνήτες μέσα στο ρότορα, στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένας από αυτούς (σχήμα 3.12).

Έτσι, ο κίνδυνος απομαγνητισμού των μονίμων μαγνητών είναι πλέον ελάχιστος και επίσης δεν υφίσταται κίνδυνος αποκόλλησης των μαγνητών. Επιπρόσθετα, αυτή η γεωμετρία παρουσιάζει μεγάλες τιμές πυκνότητας ισχύος στο διάκενο. Από την άλλη βέβαια, η κατασκευή ενός τέτοιου κινητήρα είναι αρκετά πιο ακριβή τόσο για συμπαγή δρομέα όσο και για φύλλα λαμαρίνας, καθώς και στις δύο περιπτώσεις απαιτείται μεγάλος χρόνος για τη δημιουργία των ανοιγμάτων.



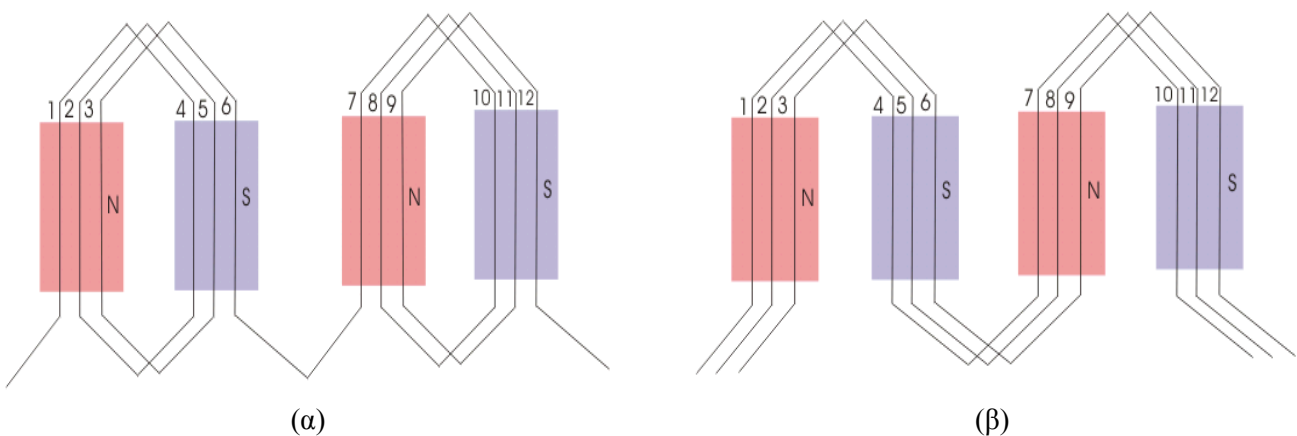
Σχήμα 3.12: Τομή μηχανής μονίμων μαγνητών με εσωτερικούς μαγνήτες τύπου V shaped (όψη ενός πόλου) [9].

### 3.1.7 Επιλογή τύπου τυλίγματος

Σε αυτό το στάδιο θα πρέπει να επιλεγεί ο τύπος των τυλιγμάτων που θα έχει ο κινητήρας. Πρόκειται για μια πολύπλοκη διαδικασία στην οποία και θα πρέπει να μελετηθούν με προσοχή τα εξής στοιχεία με βάση τις ανάγκες της εφαρμογής:

- Τυπικές τιμές συντελεστή πληρότητας που μπορούν να επιτευχθούν.
- Ημιτονικότητα μαγνητεγερτικής και ηλεκτρεγερτικής δύναμης.
- Παραγωγή αρμονικών συνιστωσών ροπής στο χώρο του στάτη.
- Κατασκευαστική δυσκολία.

Τα τυλίγματα του στάτη χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα **συγκεντρωμένα τυλίγματα** και τα **διανεμημένα ή κατανεμημένα τυλίγματα**, τα οποία με τη σειρά τους χωρίζονται σε βροχοειδή και κυματοειδή.



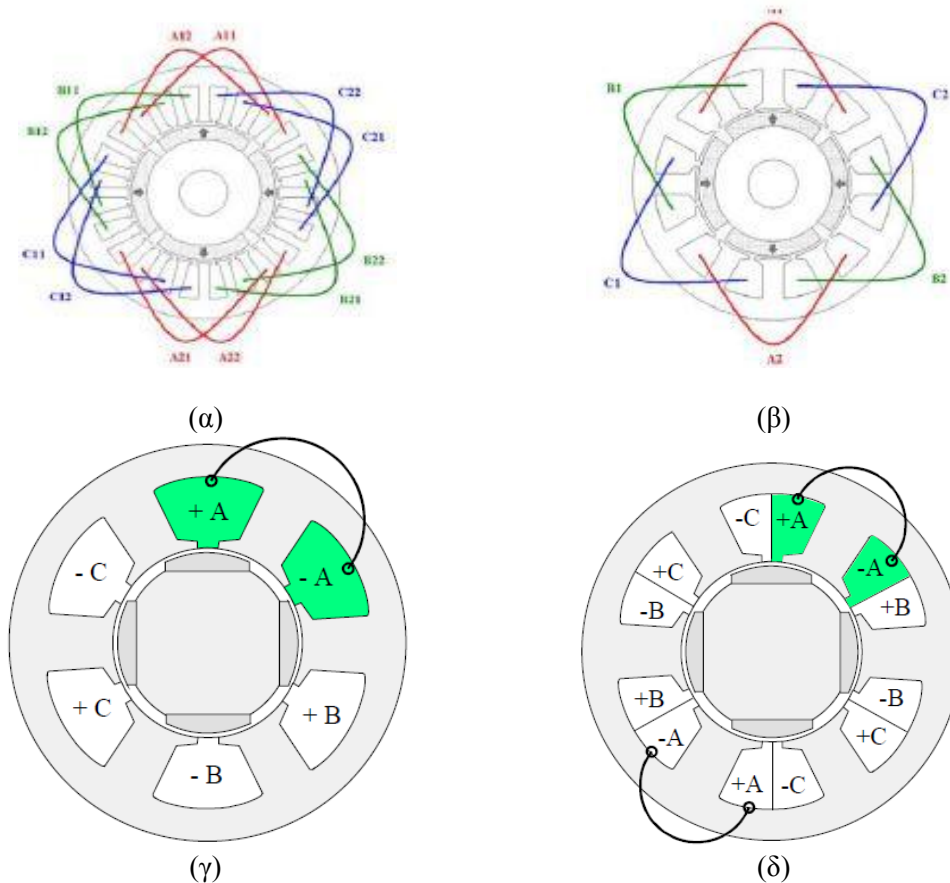
Σχήμα 3.13: Κατανομή (α) Βροχοειδούς και (β) κυματοειδούς τυλίγματος



Σχήμα 3.14 : Τα διάφορα είδη τυλιγμάτων μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος.

Το διανεμημένο επικαλυπτόμενο τύλιγμα προσφέρει ημιτονική κατανομή μαγνητεγερτικής και ηλεκτρεγερτικής δύναμης και χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή μηχανών μονίμων μαγνητών [11].

Το συγκεντρωμένο τύλιγμα μπορεί να μην παρουσιάζει τόσο καλά χαρακτηριστικά στην ημιτονικότητα της μαγνητεγερτικής και της ηλεκτρεγερτικής δύναμης αλλά πρόκειται για ένα είδος τυλίγματος που παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Αυτό οφείλεται στα πλεονεκτήματα του κάποια από τα οποία είναι η υψηλή απόδοση, τα κοντά άκρα τυλίγματος, υψηλός συντελεστής πληρότητας, η μεγάλη ισχύς, η χαμηλή ροπή ευθυγράμμισης, η μεγάλη ανοχή σε σφάλματα, η αποδυνάμωση της ροής καθώς και φυσικά η ευκολία κατασκευής του που συνεπάγεται και μικρότερο κόστος κατασκευής.



Σχήμα 3.15: Στις παραπάνω εικόνες παρουσιάζονται διάφορα είδη τυλιγμάτων όπως είναι το (α) επικαλυπτόμενο διανεμημένο το (β) επικαλυπτόμενο συγκεντρωμένο το (γ) συγκεντρωμένο τύλιγμα απλής στρώσης και το (δ) συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης

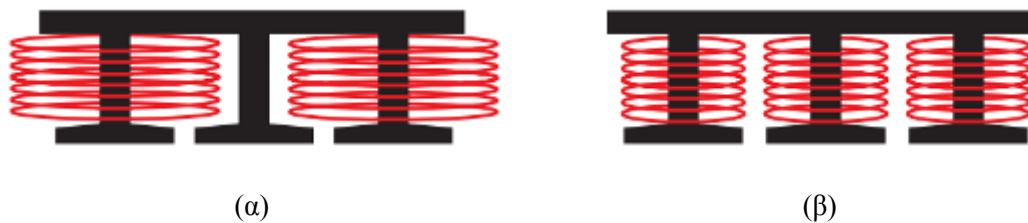
Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του κάθε είδους τυλίγματος παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (3.1).

Πίνακας 3.1: Σύγκριση μεταξύ διανεμημένων και συγκεντρωμένων τυλιγμάτων

	Διανεμημένα Τυλίγματα	Συγκεντρωμένα Τυλίγματα
Τυπικοί συντελεστές πληρότητας αύλακας	35 – 45 %	Άνω του 50 %
Αρμονικές στην MMF και EMF	Καταστέλλονται	Παρουσιάζονται και σε χαμηλές συχνότητες
Άκρα Τυλιγμάτων Παραγωγή αρμονικών συνιστωσών ροπής στο χώρο του στάτη	Μακριά επικαλυπτόμενα Θεμελιώδης	Κοντά Επικαλυπτόμενα Στις πιο πολλές περιπτώσεις παρουσιάζουν αρμονικές υψηλής τάξης
Δυσκολία κατασκευής	Δύσκολη και χρονοβόρα κατασκευή	Μεγάλη κατασκευαστική ευκολία

Για την συγκεκριμένη εφαρμογή, όπου παίζει σημαντικό ρόλο η υψηλή ισχύς για χαμηλές ταχύτητες και το μικρό μέγεθος μηχανής, ο μεγάλος συντελεστής πληρότητας αλλά και η ευκολία κατασκευής γίνεται επιλογή των συγκεντρωμένων τυλιγμάτων.

Στη συνέχεια, γίνεται η επιλογή του αριθμού στρώσεων του τυλίγματος. Υπάρχουν τα τυλίγματα μονής στρώσης, στα οποία τα πηνία τυλίγονται γύρω από εναλλασσόμενα δόντια, καθώς και διπλής στρώσης όπως φαίνονται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.16: Όψη του στάτη για τυλίγματα (α) απλής και (β) διπλής στρώσης αντίστοιχα

Η επιλογή των στρώσεων εξαρτάται κυρίως από τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής. Στον παρακάτω πίνακα γίνεται μια απλή σύγκριση ανάμεσα σε αυτούς τους δύο τύπους τυλιγμάτων για συγκεντρωμένα τυλίγματα [8].

Πίνακας 3.2: Σύγκριση χαρακτηριστικών τυλιγμάτων απλής και διπλής στρώσης.

	Απλής Στρώσης	Διπλής Στρώσης
<b>Θεμελιώδης συντελεστής τυλίγματος (winding factor)</b>	Υψηλότερος	Χαμηλότερος
<b>Συντελεστής πληρότητας αύλακας</b>	Υψηλότερος	Χαμηλότερος
<b>Άκρα τυλίγματος</b>	Μακρύτερα	Κοντύτερα
<b>Αυτεπαγωγές</b>	Υψηλότερες	Χαμηλότερες
<b>Αμοιβαίες επαγωγές</b>	Χαμηλότερες	Υψηλότερες
<b>Μορφή της EMF</b>	Τραπεζοειδής	Ημιτονοειδής
<b>Αρμονικό περιεχόμενο της MMF</b>	Υψηλότερο	Χαμηλότερο
<b>Απώλειες δινορευμάτων μόνιμου μαγνήτη</b>	Υψηλότερο	Χαμηλότερο
<b>Ικανότητα υπερφόρτισης</b>	Υψηλότερο	Χαμηλότερο

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

### 3.1.8 Επιλογή αριθμού πόλων και αυλάκων

Όπως έχει αναφερθεί, η εφαρμογή αφορά έναν κινητήρα με υψηλό συντελεστή απόδοσης. Δεν υπάρχει κάποιος αυστηρός περιορισμός στον αριθμό των πόλων καθώς οι απαιτήσεις για την τιμή της ταχύτητας δεν είναι συγκεκριμένες. Παρατηρώντας τον παρακάτω πίνακα (3.3) και αν κυμανθούμε σε μηχανή άνω των 10 πόλων παρατηρείται ότι ένας καλός συνδυασμός θα ήταν μιας μηχανής 14 πολικής με 15 αύλακες. Παρόλα αυτά θα επεξηγηθεί αργότερα ότι τέτοιου είδους συνδυασμοί αποφεύγονται καθώς εμφανίζουν το φαινόμενο της ασύμμετρης μαγνητικής έλξης. Γενικά όλοι οι συνδυασμοί για τους οποίους ισχύουν οι δύο παρακάτω τύποι παρουσιάζουν ασύμμετρη μαγνητικής έλξης και θα πρέπει να αποφεύγονται:

$$p = Q_s \pm 1$$

$$Q_s = 9 + 6k$$

Παρόλα αυτά θα συμπεριληφθούν στις προσομοιώσεις αργότερα τέτοιοι συνδυασμοί τόσο για να μελετήσουμε τα χαρακτηριστικά τους όσο και για να επιβεβαιώσουν την ύπαρξη του φαινομένου.

Πίνακας 3.3: Σύγκριση συντελεστή τυλίγματος για διάφορους συνδυασμούς πόλων και αυλάκων.

$Q_s \setminus p$	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			$q=1$					

$q=1/2, 1/4$	$q=3/8, 3/10$	$Q_s=21+6k, p=Q_s \pm 1, k = 0, 1, 2 \dots$
$q=3/7, 3/11$	$q=5/14, 5/16$	$Q_s=24+6k, p=Q_s \pm 2, k = 0, 1, 2 \dots$
$q=2/5, 2/7$	not appropriate	$k_{WT} < 0.866$

Επιλέγονται λοιπόν οι εξής συνδυασμοί πόλων / αυλάκων, για τους οποίους και θα πραγματοποιηθεί περαιτέρω ανάλυση με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων:

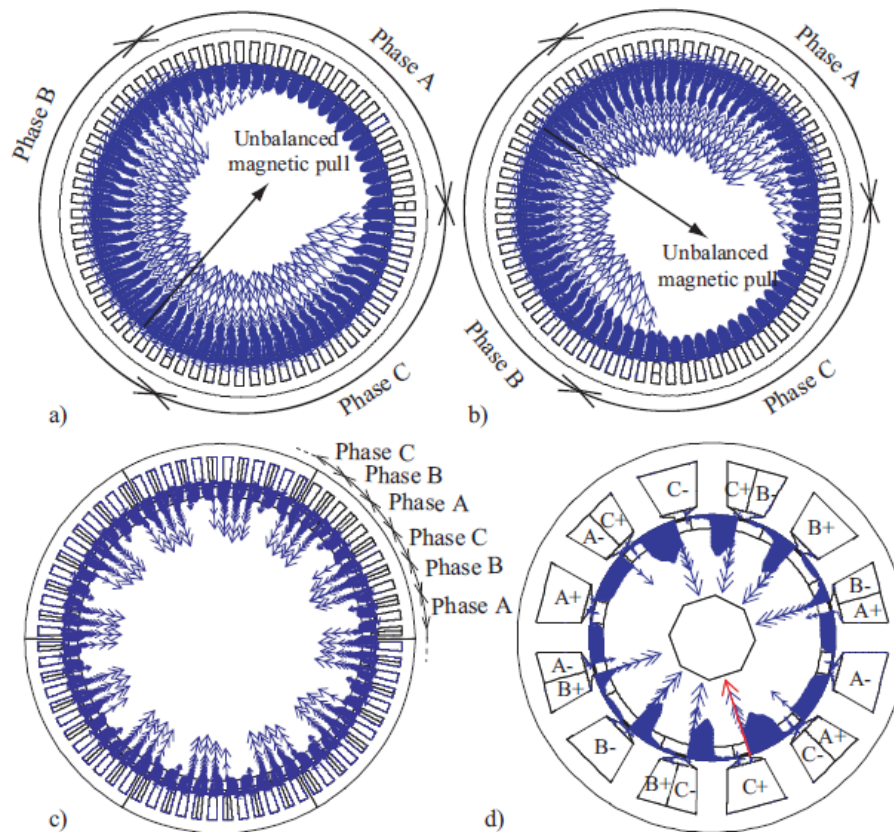
	10 πολική	14 πολική	16 πολική
Αριθμός	9	12	15
Αυλάκων	12	15	18
		18	

Στις επόμενες ενότητες γίνεται συχνή αναφορά στις παραπάνω διαμορφώσεις χρησιμοποιώντας τον συμβολισμό πόλοι / αυλάκια και στην συνέχεια το γράμμα S ή D ανάλογα με το τύλιγμα του στάτη (συγκεντρωμένα απλής ή διπλής στρώσης αντίστοιχα).



### 3.1.9 Ασύμμετρη μαγνητική έλξη

Αν οι μαγνητικές δυνάμεις δεν διανέμονται σωστά πάνω στο διάκενο, το άθροισμα τους οδηγεί σε μία μονόπλευρη μαγνητική δύναμη, η οποία και περιστρέφεται με τη κάθε στρέψη της μηχανής πάνω στο διάκενο. Πρόκειται για ένα φαινόμενο που προκαλεί έντονο θόρυβο και κραδασμούς στον άξονα [2]. Στο παρακάτω σχήμα στα (α) και (β) παρατηρείται και οπτικά το φαινόμενο αυτό για μια μηχανή με 68 πόλους και 69 αύλακες. Ενώ αντίθετα στις (γ) και (δ) απεικονίζονται δύο μηχανές που δεν παρουσιάζουν ασύμμετρη μαγνητική έλξη.



Σχήμα 3.17 : Στα (α) και (β) παρατηρούμε μια μηχανή με 68 πόλους και 69 αύλακες σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές, στη (c) μια μηχανή με 60 πόλους και 72 αύλακες ενώ στην (d) μια 10πολική με 12 αύλακες.



## Κεφάλαιο 4: Παραμετροποιημένη σχεδίαση και ανάλυση ηλεκτρικού κινητήρα

Το σημαντικότερο ίσως κομμάτι της παρούσας εργασίας αφορά την παραμετροποιημένη σχεδίαση του κινητήρα και τον τρόπο με τον οποίο αυτή επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του. Είναι λοιπόν πολύ σημαντικό να αναπτυχθεί μία τυποποιημένη διαδικασία μέσα από την οποία θα μπορεί να γίνει ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων από διάφορες διαμορφώσεις ηλεκτρικών μηχανών. Συγκρίνοντας πολλές διαφορετικές γεωμετρίες που ταιριάζουν στη συγκεκριμένη εφαρμογή θα ήταν εφικτό να καταλήξουμε στην ιδανικότερη. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ένα λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA – Finite Elements Analysis) με δυνατότητα διεπαφής με το περιβάλλον της Matlab όπου μπορούν να αναπτυχθούν κατάλληλες ρουτίνες και αλγόριθμοι. Παρακάτω, αναπτύσσονται αναλυτικότερα τόσο οι ρουτίνες όσο και ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνονται αξιολογήσιμα αποτελέσματα μέσα από αυτή τη διαδικασία.

### 4.1 Πεδιακή ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Η προκαταρκτική σχεδίαση μίας ηλεκτρικής μηχανής δίνει μία βασική προσέγγιση της απαιτούμενης διαμόρφωσης και μια αρχική διαστασιολόγηση. Όμως, η πεδιακή προσέγγιση του προβλήματος παρέχει λεπτομερή ανάλυση του μαγνητικού πεδίου, οδηγώντας στην επιβεβαίωση (ή και απόρριψη) των αναμενόμενων χαρακτηριστικών του κινητήρα, καθώς και στην διαπίστωση της ανάγκης να μεταβληθούν κάποιοι παράμετροι ή χαρακτηριστικά. Η πεδιακή ανάλυση παρέχει την κατανομή του μαγνητικού πεδίου και στη συνέχεια, με κατάλληλη μετ-επεξεργασία, μπορούν να υπολογιστούν με υψηλή ακρίβεια μεγέθη όπως δύναμη (σε κάθε συνιστώσα), ροπή, πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος, μαγνητική επαγωγή, απώλειες, καθώς και να εντοπιστούν περιοχές πυρήνα που βρίσκονται σε κορεσμό. Εξ' αιτίας της σημασίας που έχει η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στην παρούσα εργασία, θα γίνει, αρχικά, αναφορά στη θεωρία που την διέπει.

#### 4.1.1 Μαγνητοστατικά Προβλήματα

Ως γνωστόν, τα ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα διέπονται από τις τέσσερις εξισώσεις του Maxwell. Αυτές είναι:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \text{ (Νόμος του Faraday)} \quad (4.1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \text{ (Νόμος του Ampere)} \quad (4.2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \text{ (Νόμος του Gauss)} \quad (4.3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \text{ (Νόμος του Gauss)} \quad (4.4)$$

Το πρόγραμμα FEMM επιλύει ένα πλήθος προβλημάτων (ηλεκτρικά, μαγνητικά, θερμικά κοκ) και όπως τα περισσότερα προγράμματα στόχος του είναι η απλοποίηση των παραπάνω

εξισώσεων. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στα μαγνητοστατικά που αποτελούν το κύριο εργαλείο ανάλυσης των ηλεκτρικών κινητήρων. 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 μαγνητική επαγωγή  $B$  ικανοποιούν τις ακόλουθες σχέσεις:

Από τον νόμο του Ampere ισχύει πως:

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$

Όμως είναι  $\frac{\partial D}{\partial t} \approx 0$  για συχνότητες πολύ χαμηλότερες από τις ραδιοσυχνότητες και συνεπώς:

$$\nabla \times H = J$$

και από το νόμο του Gauss έχουμε πως:

$$\nabla \cdot B = 0$$

Ικανοποιείται επίσης η θεμελιώδης καταστατική σχέση μεταξύ των μεγεθών  $B$  και  $H$  για κάθε υλικό:

$$B = \mu \cdot H \quad (4.5)$$

Αν το υλικό είναι μη γραμμικό, όπως για παράδειγμα κορεσμένος σίδηρος ή μαγνήτες alnico, τότε η επιτρεπτότητα,  $\mu$ , είναι στην πραγματικότητα μία συνάρτηση του  $B$  και έτσι έχουμε:

$$\mu(B) = \frac{B}{H(B)} \quad (4.6)$$

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

$$B = \nabla \times A \quad (4.7)$$

Συνδυάζοντας λοιπόν τις σχέσεις (4.2) και (4.7) καταλήγουμε στην παρακάτω:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = J \quad (4.8)$$

Κατά αυτόν τον τρόπο, έχει ελαττωθεί η ανάλυση του προβλήματος από τις τέσσερις συζευγμένες εξισώσεις του Maxwell στην παραπάνω μία, μερική διαφορική εξίσωση.

Για ένα γραμμικό ιστροπικό μέσο (υπό την παραδοχή πως  $\nabla \cdot A = 0$ ), προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = J \quad (4.9)$$

Ως γνωστόν, τα μεγέθη  $H$ ,  $D$ ,  $B$ ,  $A$ ,  $J$  είναι διανυσματικά και έτσι αποτελούνται στον τρισδιάστατο χώρο από τρεις συνιστώσες. Όμως, αρκετές απλοποιήσεις μπορούν να λάβουν χώρα στις ηλεκτρικές μηχανές. Έτσι αν και στη γενική περίπτωση, το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό είναι ένα διάνυσμα τριών συνιστωσών, στις εφαρμογές των ηλεκτρικών μηχανών, οι δύο από τις τρεις συνιστώσες είναι μηδέν και μεταβάλλεται μόνο η κατακόρυφη συνιστώσα. Συνεπώς:

$$A = A_z \vec{l}_z \quad (4.10)$$

Το ίδιο ισχύει και για την πυκνότητα ρεύματος:

$$J = J_z \vec{l}_z \quad (4.11)$$

Ενώ για την πυκνότητα μαγνητικής ροής η ανάλυση περιορίζεται στις δύο διαστάσεις και εν προκειμένω:

$$B = B_x \vec{l}_x + B_y \vec{l}_y \quad (4.12)$$

Το πλεονέκτημα της χρήσης του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού, είναι όπως προείπαμε, 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 διαφορίση του  $A$ , κάτι που οι υπολογιστές δύνανται να εκτελούν με μεγάλη ταχύτητα.

Στην παραπάνω ανάλυση δεν έχουν ληφθεί υπ' όψιν τα δινορρέυματα. Σε περίπτωση ύπαρξης μαγνητικού πεδίου αρμονικά μεταβαλλόμενου, επάγονται δινορρέυματα. Σε υλικά με υψηλή αγωγιμότητα, αυτά θα πρέπει να συνυπολογιστούν. Με παρόμοια διαδικασία ξεκινώντας και πάλι από τις εξισώσεις του Maxwell προκύπτει πως περιοχές που επάγονται δινορρέυματα διέπονται από την ακόλουθη μερική διαφορική εξίσωση:

$$\nabla x \left( \frac{1}{\mu(B)} \nabla x A \right) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (4.13)$$

Σε περιοχές με δοσμένη πυκνότητα ρεύματος, όπως οι αύλακες υπολογίζει το  $A$  μέσω της:

$$\nabla x \left( \frac{1}{\mu(B)} \nabla x A_z \right) = J \quad (4.14)$$

Αν δεν αμεληθούν τα δινορρέυματα τότε στις περιοχές που δύναται να επαχθούν το  $A$  υπολογίζεται από την σχέση:

$$\nabla x \left( \frac{1}{\mu(B)} \nabla x A_z \right) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (4.15)$$

Το μαγνητικό πεδίο υπολογίζεται κατόπιν από τη σχέση  $B = \nabla \times A$  που με βάση τα προηγούμενα γράφεται:

$$B = \frac{\partial A_z}{\partial y} \vec{i}_x - \frac{\partial A_z}{\partial x} \vec{i}_y \quad (4.16)$$

Και τέλος το  $H$  μπορεί να υπολογιστεί από την καταστατική σχέση:

$$H = \frac{B}{\mu(B)} \quad (4.17)$$

#### 4.1.2 Οριακές συνθήκες

Η επίλυση ενός μαγνητοστατικού ή ηλεκτροστατικού προβλήματος, ανάγεται σε επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων. Είναι γνωστό από την θεωρία των μερικών διαφορικών εξισώσεων, πως προκειμένου να υπάρξει μοναδική λύση, πρέπει να ορισθούν οι οριακές συνθήκες του προβλήματος ώστε να συνταχθεί ένα καλώς τοποθετημένο πρόβλημα. Οι οριακές συνθήκες κατηγοριοποιούνται στους ακόλουθους τύπους ως εξής:

- Dirichlet: Σε αυτό τον τύπο οριακής συνθήκης, η τιμή του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού  $A$  δηλώνεται πάνω στο όριο. Αν  $A = 0$ , τότε πρόκειται για την ομογενή συνθήκη Dirichlet, διαφορετικά πρόκειται για την μη ομογενή. Η συνθήκη  $A = 0$  απαντάται συχνά σε προβλήματα ηλεκτρικών μηχανών. Η φυσική σημασία της δήλωσης  $A = 0$  κατά μήκος ενός ορίου της γεωμετρίας σε ένα μαγνητικό πρόβλημα, είναι πως η μαγνητική ροή περιορίζεται εντός των ορίων της μηχανής, ενώ οι γραμμές της μαγνητικής ροής θα είναι παράλληλες προς το σύνορο αυτό. Σε περιπτώσεις όπου μοντελοποιείται ολόκληρη η μηχανή, η χρήση μόνο αυτής της οριακής συνθήκης είναι επαρκής
- Neumann: Η οριακή αυτή συνθήκη ορίζει την κάθετη παράγωγο του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού κατά μήκος του ορίου. Η συνηθέστερη περίπτωση είναι η χρήση της ομογενούς συνθήκης Neumann δηλαδή  $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ . Συνήθως χρησιμοποιείται στα μαγνητικά προβλήματα σε περιπτώσεις διεπιφάνειας με υλικό πολύ μεγάλης επιτρεπτότητας. Η χρήση αυτής τη συνθήκης επιβάλλει στις μαγνητικές γραμμές να τέμνουν το σύνορο κάθετα.
- Robin: Η οριακή συνθήκη Robin είναι ένα είδος συνδυασμού των συνθηκών Dirichlet και Neumann, καθώς καθορίζει μια σχέση μεταξύ της των σταθμισμένων τιμών του  $A$  και της παραγώγου του. Ένα παράδειγμα τέτοιας οριακής συνθήκης είναι:

$$\frac{\partial A}{\partial n} + c \cdot A = 0$$

- Περιοδική: Μία περιοδική οριακή συνθήκη συνδέει δύο όρια. Σε αυτό τον τύπο οριακής συνθήκης, οι οριακές τιμές στα αντίστοιχα σημεία των δύο ορίων είναι ίσες.

$$A(r, \varphi) = A\left(r, \varphi + \frac{2k\pi}{p}\right) \text{ όπου } k = 1, 2, \dots, \frac{p}{2} \quad (4.18)$$

- Αντιπεριοδική: Μια αντιπεριοδική οριακή συνθήκη συνδέει επίσης δύο όρια μεταξύ τους, αλλά σε αυτή την περίπτωση τα αντίστοιχα σύνορα έχουν ίσα μέτρα αλλά αντίθετο πρόσημο.

$$A(r, \varphi) = -A\left(r, \varphi + \frac{(2k-1)\pi}{p}\right) \text{ όπου } k = 1, 2, \dots, \frac{p}{2} \quad (4.19)$$

Τόσο οι περιοδικές όσο και οι αντιπεριοδικές οριακές συνθήκες χρησιμοποιούνται όταν μοντελοποιείται ένα τμήμα μόνο της μηχανής.

### 4.1.3 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Μολονότι, η περιγραφή ενός μαγνητικού προβλήματος, μπορεί να εκφραστεί υπό τη μορφή μίας μερικής διαφορικής εξίσωσης με καλώς τοποθετημένες οριακές συνθήκες (δηλαδή ενός προβλήματος οριακών συνθηκών), ωστόσο η εύρεση μιας αναλυτικής λύσης είναι στις περισσότερες περιπτώσεις δύσκολη ή αδύνατη, με την εξαίρεση προβλημάτων πολύ απλής γεωμετρίας. Προκειμένου να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία αναπτύχθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, το αρχικό πρόβλημα και η αρχική περιοχή χωρίζονται σε έναν μεγάλο αριθμό περιοχών και αντίστοιχων υποπροβλημάτων. Η θεμελιώδης απλοποίηση, έγκειται στο γεγονός πως στα υποπροβλήματα που δημιουργούνται η επίλυση είναι απλή. Κατ' επέκταση, αν η αρχική περιοχή «τεμαχιστεί» σε επαρκή αριθμό τέτοιων υποπεριοχών, το υπολογιζόμενο μέγεθος προσεγγίζει αρκετά καλά την πραγματική του τιμή. Υπολογιστικά, το πλεονέκτημα της κατάτμησης της περιοχής του αρχικού προβλήματος σε έναν μεγάλο αριθμό μικρότερων περιοχών, είναι πως το αρχικό, δύσκολο (ή και αδύνατο) στην επίλυση πρόβλημα μετασχηματίζεται σε πολλά, αλλά υπολογιστικά ταχύτερα στην επίλυση προβλήματα. Τελικώς, ανάγεται σε ένα πρόβλημα γραμμικής άλγεβρας με χιλιάδες αγνώστων σε μορφή πινάκων. Οι πίνακες είναι συνήθως αραιοί και συμμετρικοί και έτσι με χρήση υπολογιστικών αλγόριθμων που έχουν αναπτυχθεί και αναπτύσσονται είναι δυνατή η επίλυσή του σε σύντομο χρόνο.

### 4.1.4 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων στο FEMM

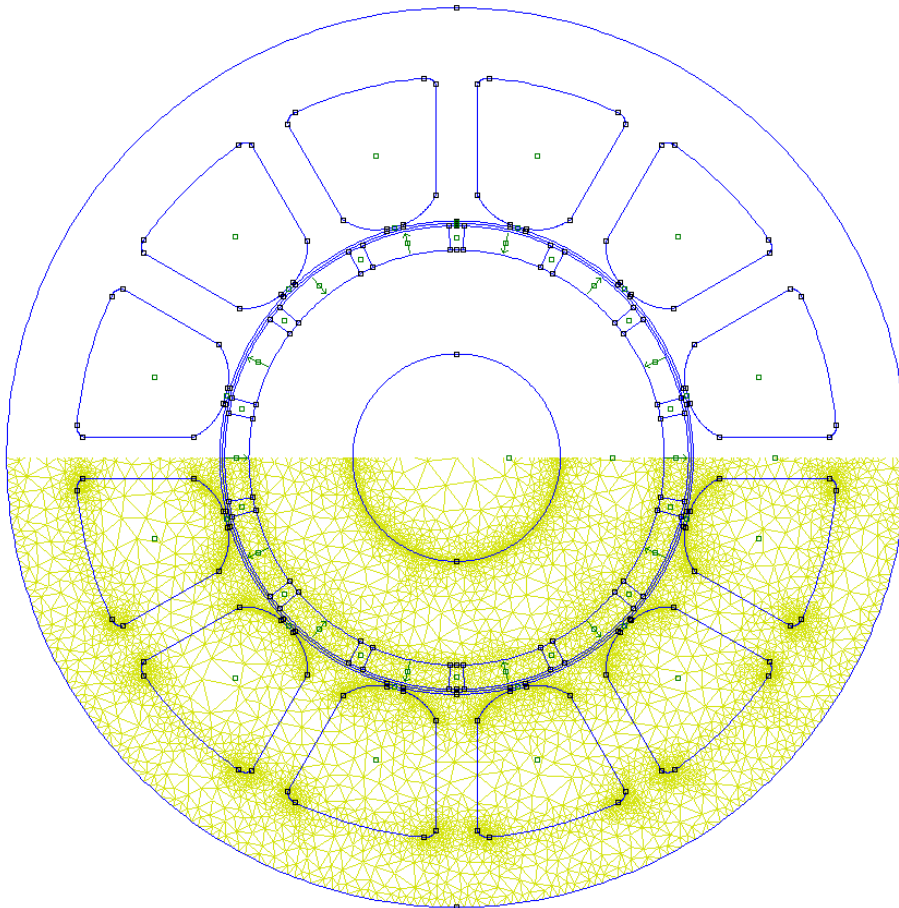
Το λογισμικό ανοικτού κώδικα FEMM ανήκει στην κατηγορία των προγραμμάτων επίλυσης ηλεκτρομαγνητικών και θερμικών προβλημάτων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Δύναται να επιλύει δισδιάστατα μαγνητοστατικά προβλήματα, καθώς επίσης και αρμονικά προβλήματα όπου τα μεγέθη μεταβάλλονται με μια συγκεκριμένη συχνότητα.

Ειδικότερα, το πρόγραμμα διακριτοποιεί την περιοχή του προβλήματος χρησιμοποιώντας τριγωνικά στοιχεία καθώς πρόκειται για δισδιάστατο πρόβλημα. Κάθε στοιχείο, απαρτίζεται

από αντίστοιχους κόμβους και από τους κόμβους δημιουργείται το αποκαλούμενο πλέγμα. Κάθε κόμβος χαρακτηρίζεται από μια τιμή του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού  $A$ , ενώ για τις περιοχές που βρίσκονται ανάμεσα στους κόμβους χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή. Το πρόβλημα ανάγεται πλέον στην επίλυση ενός προβλήματος γραμμικής άλγεβρας, αραιού πίνακα που λύνεται με επαναληπτικές μεθόδους. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η Newton-Raphson καθώς είναι ταχεία στην σύγκλιση και στην ικανότητα σύγκλισης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ελαχιστοποιηθεί το μέτρο του σφάλματος σε μια καθορισμένη τιμή.

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

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



Σχήμα 4.1: Σχήμα όπου φαίνεται η γεωμετρία μιας 14πολικής μηχανής με 12 αύλακες τόσο με πλέγμα 48935 στοιχείων όσο και χωρίς αυτό.

## 4.2 Παραμετροποιημένη Σχεδίαση

Αν και η προκαταρκτική σχεδίαση που πραγματοποιήθηκε παραπάνω, δίνει μια καλή προσέγγιση για τα χαρακτηριστικά που θα έχει ο κινητήρας, δεν θα μπορούσε να αποτελέσει μια συστηματοποιημένη μέθοδο εύρεσης της καταλληλότερης διαμόρφωσης, τόσο επειδή χρησιμοποιεί πολλές παραδοχές και εμπειρικούς κανόνες όσο και γιατί δεν επιτρέπει ταυτόχρονες αλλαγές πολλών μεταβλητών και ευκολία στη μελέτη του πώς αυτές επιδρούν στα χαρακτηριστικά του κινητήρα.

Με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων και της διεπαφής του με την MATLAB αναπτύχθηκαν ρουτίνες που δίνουν στον χρήστη την ικανότητα να σχεδιάσει πληθώρα γεωμετριών μηχανών μονίμων επιφανειακών μαγνητών και να την αναλύσει αντλώντας πληθώρα ηλεκτρομαγνητικών μεγεθών.

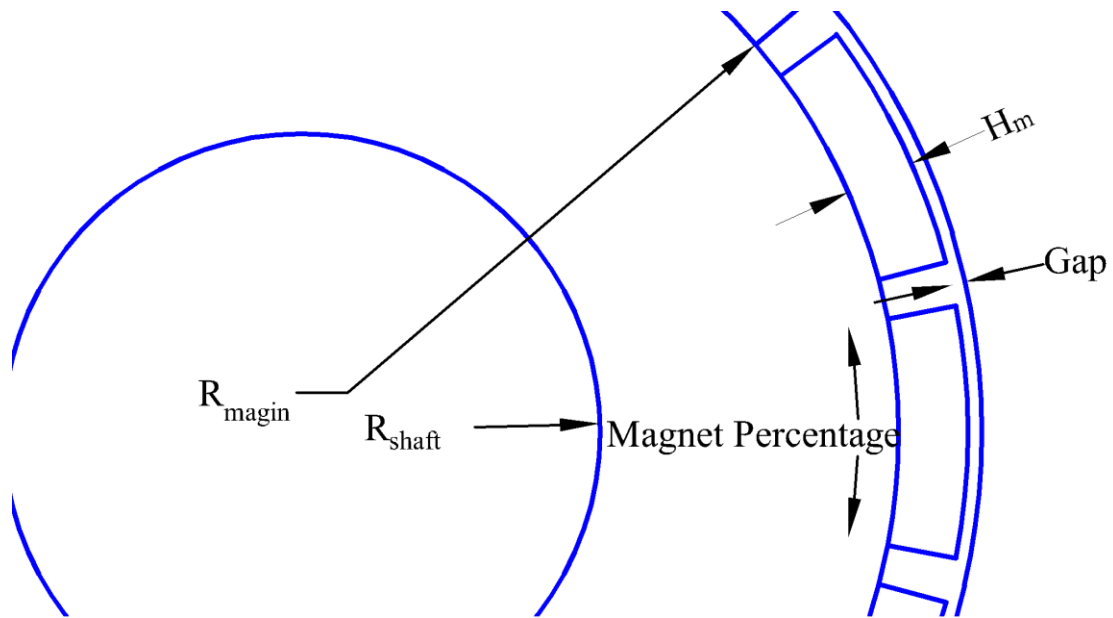
Στον παρακάτω πίνακα διακρίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα που μπορεί να επιλέξει ο χρήστης, καθώς και τα υποπρογράμματα που κατ' επιλογήν μπορούν να εκτελεστούν ή και όχι. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι έχει γίνει μεγάλη προσπάθεια οι ρουτίνες που εκτελούνται από το κυρίως πρόγραμμα να μπορούν να επιτελέσουν τόσο κομμάτι ενός ενιαίου κώδικα όσο και μεμονωμένα υποπρογράμματα που μπορούν να εκτελεστούν ανεξάρτητα. Αυτό διασφαλίζει την ικανότητα άντλησης αποτελεσμάτων, σε μικρό χρονικό διάστημα, για διαφορετικές γεωμετρίες μηχανών, μόνο για τα επιθυμητά ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη.

Πίνακας 4.1: Μεγέθη και υπορουτίνες που ορίζονται μέσα από το κυρίως πρόγραμμα.

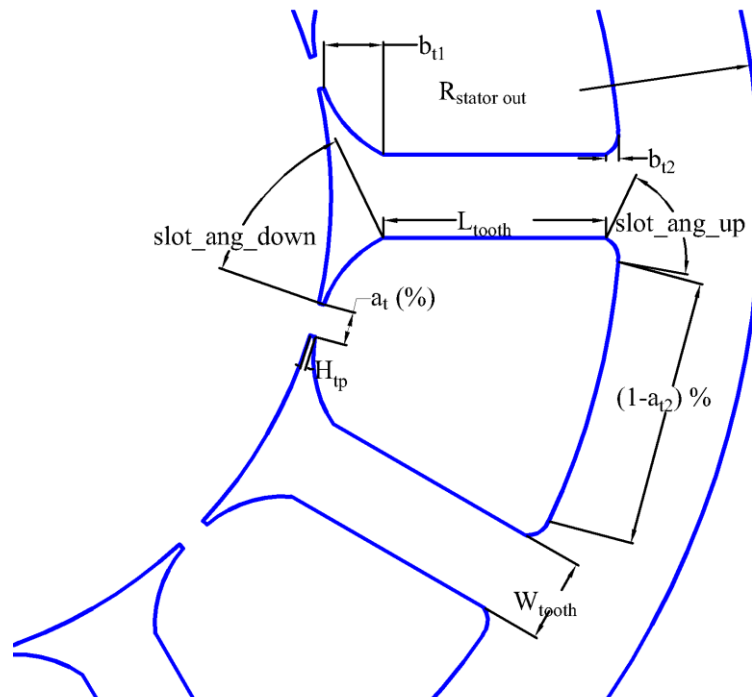
Γεωμετρικά Μεγέθη	
Αριθμός πόλων	Αριθμός αυλάκων
Εσωτερική και Εξωτερική ακτίνα δρομέα	Πάχος και Πλάτος δοντιού
Πάχος μαγνήτη	Πάχος διακένου
Ποσοστό μαγνήτη	Εξωτερική ακτίνα στάτη
Αριθμός φάσεων	Τύπος στρώσεων (απλής-διπλής)
Ενεργό μήκος μηχανής	Χωρικά ρεύματα αύλακας (J)
Τύπος τυλίγματος (Συγκεντρωμένο - Βροχοειδές)	Συντελεστής πληρότητας αύλακος
Αριθμός ελιγμάτων	Βήματα γωνιών υπολογισμών
Απόσταση αύλακος από το διάκενο	Μέγιστες γωνίες υπολογισμών
Υπορουτίνες	
Λειτουργία ή μη τεχνικών βελτιστοποίησης χρόνου	Υπολογισμός αντιστάσεων και αυτεπαγωγών τυλιγμάτων
Υπολογισμός ροπής ανατροπής	Υπολογισμός μέγιστης γωνίας ροπής και ροπής κυμάτωσης
Υπολογισμός Απωλειών	Υπολογισμός μέγιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης μέσα από δυναμική ανάλυση του μοντέλου

Επιπλέον, ο χρήστης δύναται να επιλέξει τα χαρακτηριστικά των υλικών που θα έχει ο κινητήρας. Για αυτό το σκοπό έχει δημιουργηθεί μια βιβλιοθήκη υλικών μέσα από την οποία ο χρήστης επιλέγει τόσο τα υλικά του δρομέα όσο και του στάτη. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα σύγκρισης της λειτουργίας του κινητήρα με διαφορετικά υλικά και μελέτη της συμπεριφοράς χαρακτηριστικών μεγεθών σε κάθε αλλαγή υλικού.

Στα παρακάτω σχήματα (σχήμα 4.2 και σχήμα 4.3), διακρίνονται τα γεωμετρικά μεγέθη που μπορούν να καθοριστούν μέσα από τις ρουτίνες τόσο για το στάτη όσο και για τον δρομέα.



Σχήμα 4.2: Κύρια γεωμετρικά μεγέθη παραμετροποιημένης σχεδίασης δρομέα.



Σχήμα 4.3: Κύρια γεωμετρικά μεγέθη παραμετροποιημένης σχεδίασης στάτη.



### 4.3 Αρχική Σχεδίαση Κινητήρα

Έπειτα από την εκτενή μελέτη των σχεδιαστικών χαρακτηριστικών, τόσο μέσα από την προκαταρκτική σχεδίαση, από την οποία και αντλούμε τα βασικά μεγέθη που θα έχει ο κινητήρας της εφαρμογής μας, αλλά κυρίως μέσα από σειρά προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν, στον παρακάτω πίνακα (4.2), παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα. Αυτά θα χρησιμοποιηθούν ως βάση στις συγκρίσεις διαφορετικών τοπολογιών και στην ανάλυση ευαισθησίας, που θα αναλυθούν σε επόμενες ενότητες.

Πίνακας 4.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά που θα χρησιμοποιηθούν ως βάση για τις συγκρίσεις που ακολουθούν σε απόμενες ενότητες.

Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Κινητήρα	
Εσωτερική ακτίνα δρομέα ( $R_{\text{shaft}}$ )	15 mm
Εξωτερική ακτίνα δρομέα ( $R_{\text{mag in}}$ )	35 mm
Πάχος μαγνήτη ( $H_m$ )	3.5 mm
Ποσοστό μαγνήτη (Magnet Percentage)	85%
Πάχος διακένου (Gap)	0.7 mm
Εξωτερική ακτίνα στάτη ( $R_{\text{stator out}}$ )	65 mm
Μήκος δοντιού ( $L_{\text{tooth}}$ )	16 mm
Πλάτος δοντιού ( $W_{\text{tooth}}$ )	6 mm
Απόσταση αύλακος από το διάκενο ( $H_{\text{tp}}$ )	0.25 mm
Απόσταση δοντιού από το διάκενο ( $b_{\text{t1}}$ )	3 mm

#### 4.4 Χαρακτηριστικά μεγέθη κινητήρα

Έχοντας καθορίσει μέσω της διεπαφής του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων και του περιβάλλοντος της Matlab τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, το επόμενο βήμα είναι η επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος και η λήψη των αποτελεσμάτων για την εκτίμηση τόσο της απόδοσης όσο και της επίδοσης του κινητήρα.

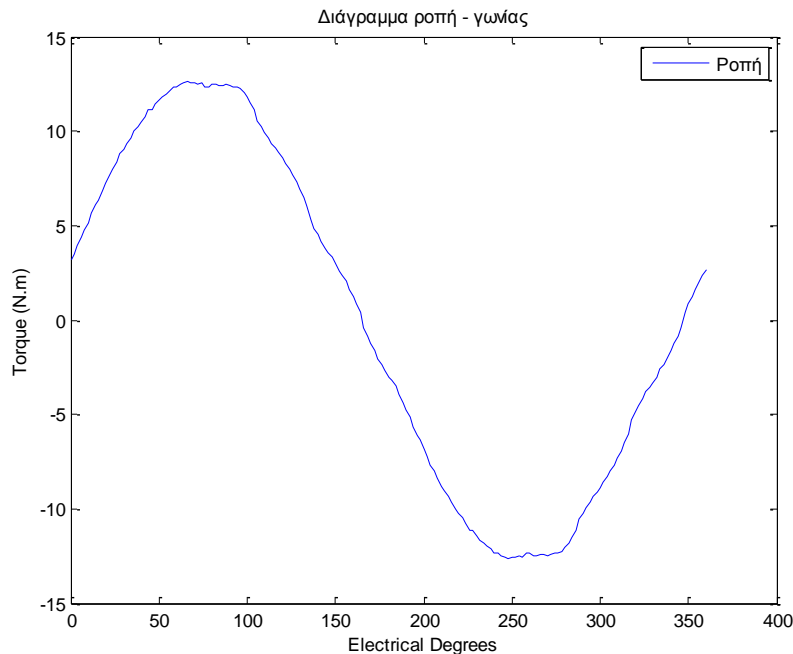
Στο παρακάτω διάγραμμα ροής 4.1, διακρίνεται ολόκληρη η διαδικασία σχεδιασμού του κινητήρα και λήψης αποτελεσμάτων για την επίδοση και απόδοση.



Διάγραμμα 4.1: Διάγραμμα ροής διεργασιών του κυρίως προγράμματος

#### 4.4.1. Εύρεση μέγιστης γωνίας ροπής

Για να εξαχθεί το διάγραμμα αυτό στο FEMM θα πρέπει να τροφοδοτηθούν οι φάσεις του στάτη με ονομαστικό ρεύμα (στην προκειμένη περίπτωση με ονομαστική πυκνότητα ρεύματος) και στην συνέχεια να στραφεί ο δρομέας με κάποιο βήμα για  $360^\circ$  ηλεκτρικές μοίρες. Το διάγραμμα που λαμβάνεται μέσα από αυτή τη διαδικασία μοιάζει με το παρακάτω και δείχνει τα διάφορα σημεία λειτουργίας που μπορούν να υπάρξουν για την συγκεκριμένη μηχανή.



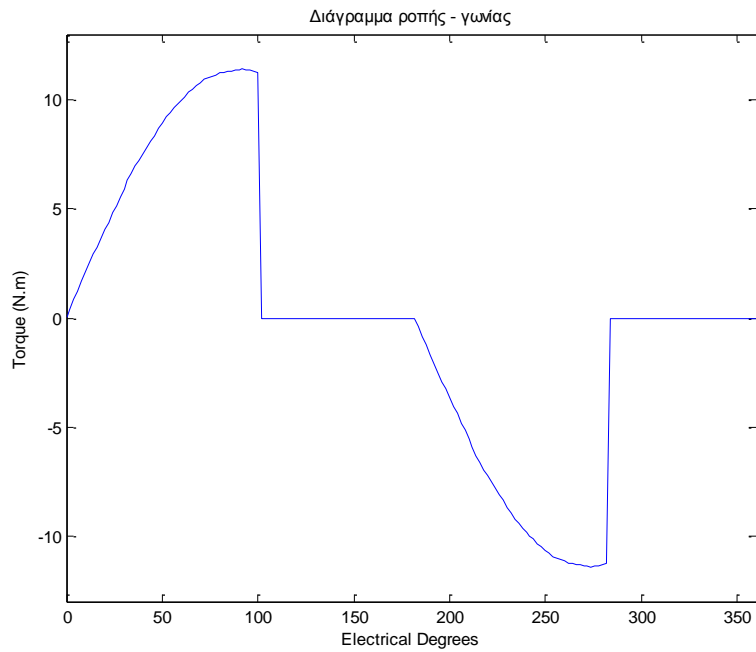
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα ροπής – γωνίας στο οποίο εξαναγκάζουμε το υπολογισμό να σταματήσει μετά την εύρεση της μέγιστης ροπής.

Επιθυμητό είναι ο κινητήρας να λειτουργεί στο βέλτιστο δυνατό σημείο, δηλαδή εκεί που παρουσιάζει τη μέγιστη ροπή. Μέσα από την παραπάνω διαδικασία δεν λαμβάνεται το διάγραμμα ροπής – γωνίας.

Το πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί είναι αριθμητικό. Όπως είναι γνωστό τα αριθμητικά προβλήματα ως επί το πλείστον είναι σχεδόν άλυτα «με το χέρι» ενώ οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές χρειάζονται αρκετό χρόνο για να τα επιλύσουν. Ο παραπάνω περιορισμός δεν αγνοήθηκε και σε πολλές περιπτώσεις αναζητήθηκαν τρόποι με τους οποίους θα μπορούσε να μειωθεί ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος.

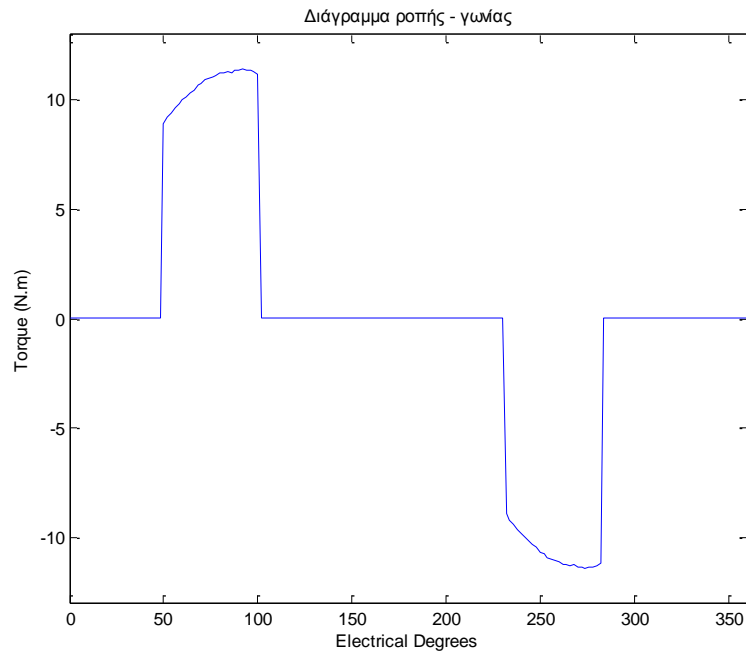
Μία από αυτές τις προσπάθειες αφορά και το διάγραμμα ροπής – γωνίας. Φτιάχνοντας πολλές διαφορετικές μηχανές παρατηρήθηκε ότι το διάγραμμα αυτό παρουσιάζει μια συγκεκριμένη μορφή που μοιάζει με ημιτονοειδή. Μια ιδέα λοιπόν θα ήταν να εξοικονομηθεί υπολογιστικός χρόνος μειώνοντας το χρόνο που είναι απαραίτητος για να υπολογιστεί το παραπάνω διάγραμμα. Αφού λοιπόν η μορφή του διαγράμματος είναι κανονικοποιημένη (δεν παρουσιάζει ξαφνικά μέγιστα ή ελάχιστα αλλά έχει μια σταθερή μορφή) μπορεί να τερματιστεί ο υπολογισμός του διαγράμματος ροπής – γωνίας όταν βρεθεί για πρώτη φορά η μέγιστη γωνία. Απαιτείται όμως προσοχή καθώς στα σημεία που το ημιτονοειδές αυτό διάγραμμα παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές του παρουσιάζονται διάφορες αυξομειώσεις (σχήμα 4.4). Έτσι ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε σε κάθε γωνία συγκρίνει την τιμή της ροπής, όχι με την προηγούμενη αλλά με τις 8 προηγούμενες, και αν είναι μικρότερη από όλες

τότε σταματάει τον υπολογισμό. Ένα διάγραμμα της αναλυτικής λειτουργίας του αλγορίθμου παρουσιάζεται παρακάτω.



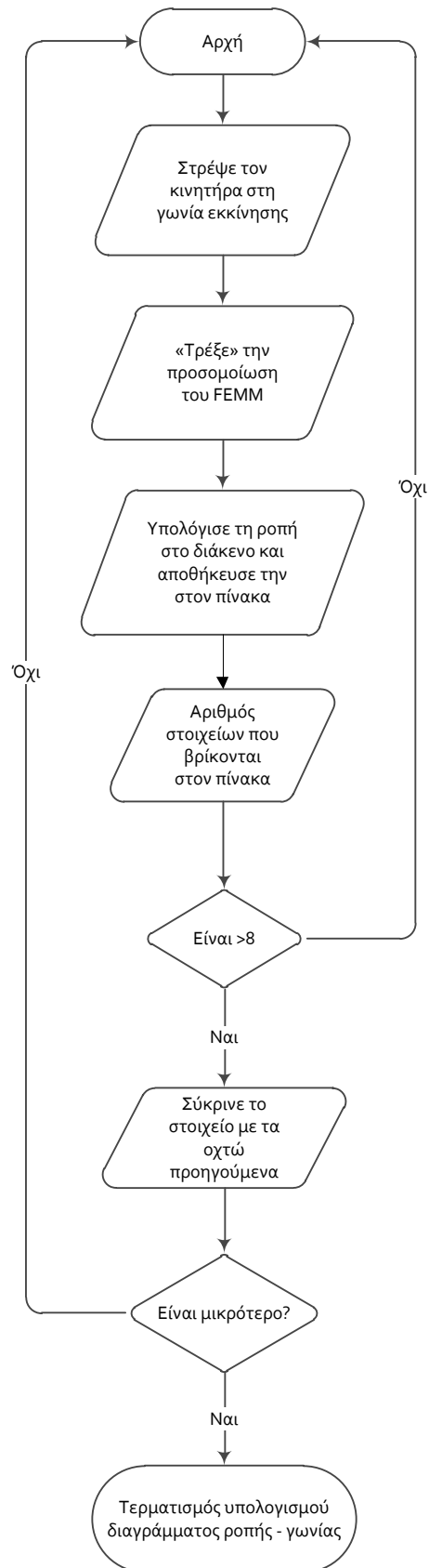
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα ροπής – γωνίας στο οποίο εξαναγκάζουμε το υπολογισμό να σταματήσει μετά την εύρεση της μέγιστης ροπής.

Επίσης κατά της διάρκεια των προσομοιώσεων παρατηρήθηκε ότι αν τα τυλίγματα έχουν τοποθετηθεί με προσοχή, και το 1<sup>ο</sup> αυλάκι περιέχει την φάση Α τότε το διάγραμμα ροπής – γωνίας θα ξεκινά πάντα με ροπή σχεδόν ίση με μηδέν, η οποία και σιγά-σιγά θα αυξάνει. Αυτό δίνει την δυνατότητα εύρεσης του μεγίστου από μη μηδενική βάση αλλά από κάποια άλλη ασφαλή τιμή (ώστε να μην έχω ξεπεράσει το μέγιστο), εξοικονομώντας με αυτό τον τρόπο αρκετό υπολογιστικό χρόνο.



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα ροπής – γωνίας στο οποίο δεν εκκινούμε την στρέψη του ρότορα από τις 0<sup>ο</sup> ηλεκτρικές μοίρες αλλά από τις 50<sup>ο</sup>.

Παρακάτω έχει παρατεθεί ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε ώστε να προκύψει το τελικό διάγραμμα ροπής – γωνίας που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.6:

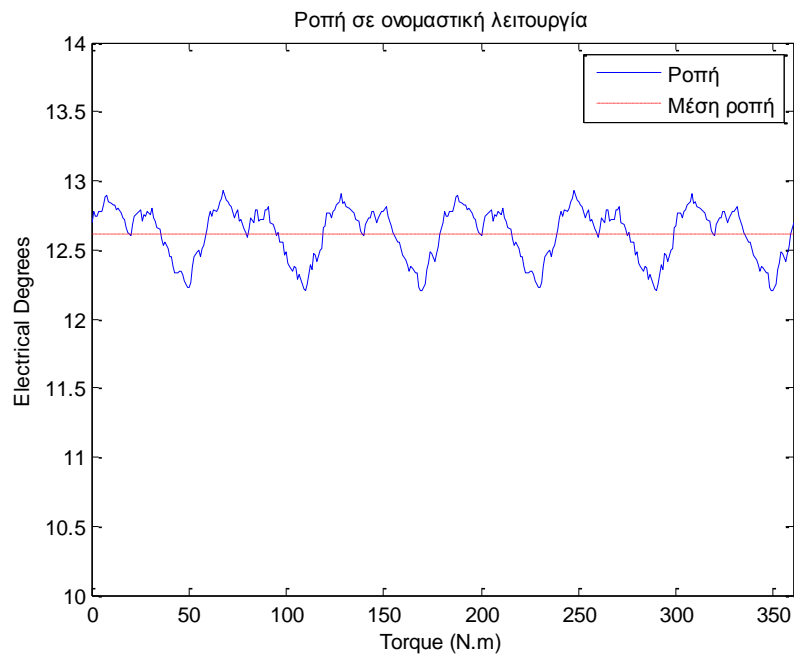


Διάγραμμα 4.2: Διεργασίες προγράμματος υπολογισμού διαγράμματος ροπής – γωνίας.

#### 4.4.2 Κυμάτωση ροπής

Εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι δύναται να γνωρίζουμε το σημείο της μέγιστης ροπής, σε αυτό βήμα στρέφεται ο ρότορας στην γωνία μέγιστης ροπής με τα ρεύματα του στάτη να μην είναι πλέον σταθερά, αλλά να ξεκινούν ταυτόχρονη περιστροφή με το ρότορα (ίδιο βήμα) μέσα στο χώρο.

Για να εξαχθεί το διάγραμμα ροπής κυμάτωσης από το FEMM θα στραφεί ο δρομέας στο επιθυμητό σημείο λειτουργίας (στην προκειμένη περίπτωση στη βέλτιστη λειτουργία) και ταυτόχρονα θα στραφεί το πεδίο του στάτη με το πεδίο του δρομέα με βήμα  $1^\circ$  ηλεκτρικής μοίρας. Το διάγραμμα λαμβάνεται μέσα από την παρακάτω διαδικασία έχει την εξής μορφή:



Σχήμα 4.7: Ροπή κυμάτωσης και μέση ροπή σε κοινό διάγραμμα.

Από αυτό το διάγραμμα μελετάται η κυμάτωση που παρουσιάζει η ροπή του κινητήρα η οποία και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

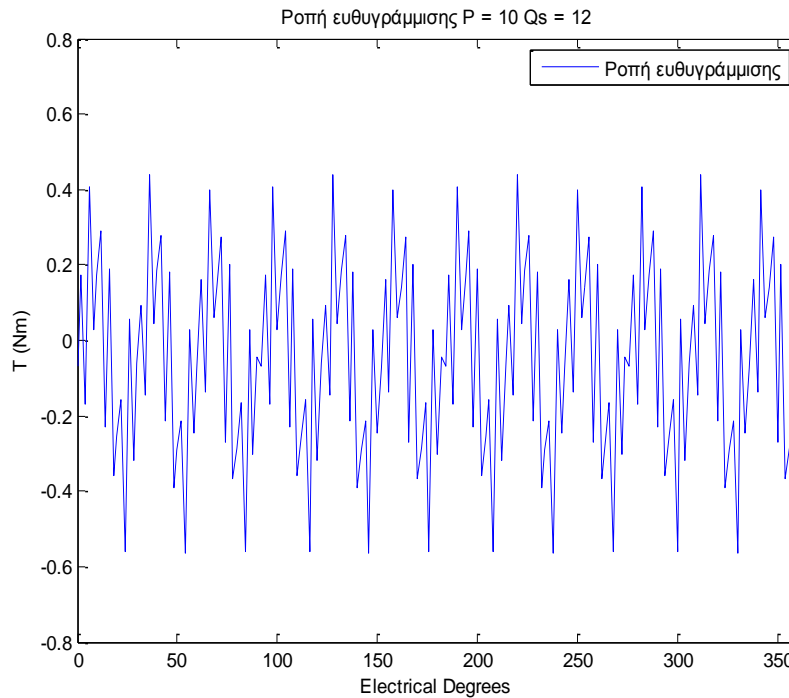
$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{mean}} = \frac{\Delta T}{T_{mean}}$$

Είναι προφανές ότι επιθυμητή είναι η μικρότερη δυνατή ροπή κυμάτωσης.

#### 4.4.3 Ροπή Ευθυγράμμισης (cogging torque)

Η ροπή ευθυγράμμισης είναι ένα φαινόμενο το οποίο παρουσιάζεται στις μηχανές μόνιμων μαγνητών και οφείλεται στην αλληλεπίδραση του μόνιμου μαγνήτη με τις αύλακες του στάτη. Πρόκειται γενικά για ένα μη επιθυμητό φαινόμενο καθώς προκαλεί κυματώσεις στην ταχύτητα και δονήσεις στον άξονα της μηχανής, ιδιαίτερα σε εφαρμογές χαμηλής ροπής και ταχύτητας.

Για να εξαχθεί το διάγραμμα της ροπής ευθυγράμμισης στο FEMM μηδενίζουμε τα ρεύματα του στάτη και στην συνέχεια στρέφουμε τον δρομέα για 180° ηλεκτρικές μοίρες οπότε και εξάγεται το παρακάτω διάγραμμα.



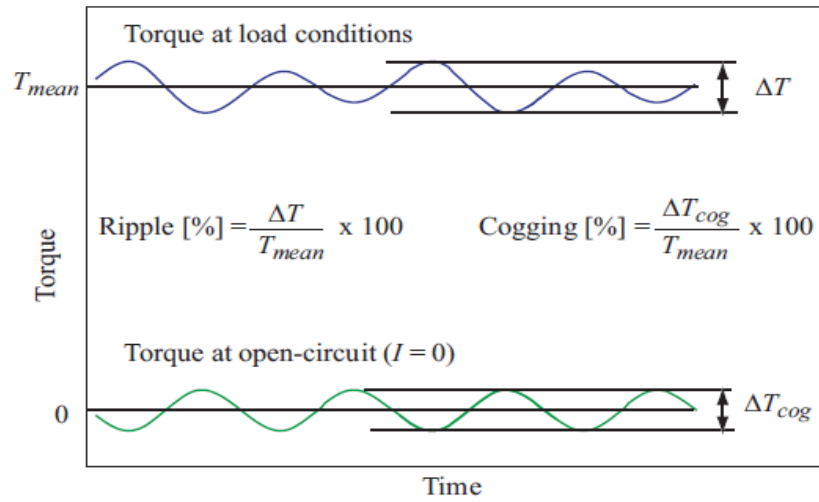
Σχήμα 4.8: Ροπή ευθυγράμμισης.

Γενικά παρατηρείται ότι η ροπή ευθυγράμμισης παρουσιάζει μια επαναληψιμότητα και αφού χρησιμοποιείται μόνο η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της θα ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθεί μικρότερη ακρίβεια στρέψης του δρομέα λαμβάνοντας τα ίδια αποτελέσματα. Για τη σύγκριση της ροπής ανατροπής σε διαφορετικούς τύπους μηχανών χρησιμοποιείται ο παρακάτω δείκτης:

$$T_{Cogging} [\%] = \frac{T_{\max,cogging} - T_{\min,cogging}}{T_{mean}} = \frac{\Delta T_{cogging}}{T_{mean}}$$



Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται η ροπή κυμάτωσης και η ροπή ευθυγράμμισης μαζί με τους δείκτες που τις χαρακτηρίζουν.



Σχήμα 4.9: Ροπή κυμάτωσης και ροπή ευθυγράμμισης μαζί με τους δείκτες που τις χαρακτηρίζουν [12].

#### 4.4.4 Υπολογισμός ΗΕΔ και του αρμονικού της περιεχομένου

Για να εξαχθεί το διάγραμμα της αντί-ΗΕΔ στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας εργαζόμαστε ως εξής:

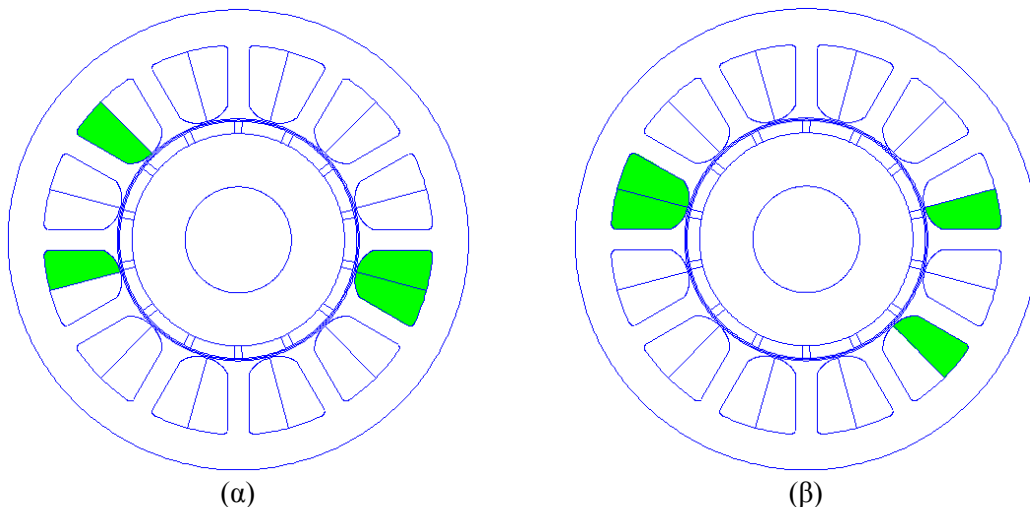
- 1) Εντοπίζονται όλες οι στρώσεις στις αύλακες του στάτη που περιέχουν το τύλιγμα “A+”.
- 2) Από το FEMM λαμβάνεται το ολοκλήρωμα του διανυσματικού δυναμικού  $A$  επάνω στη συνολική επιφάνεια αυτών των στρώσεων.
- 3) Λαμβάνεται το αντίστοιχο ολοκλήρωμα για τις στρώσεις με τύλιγμα “A-”.
- 4) Υπολογίζεται το εμβαδόν που έχουν οι στρώσεις.
- 5) Συνεπώς, η μαγνητική ροή που διαπερνά μία σπείρα του κάθε πηνίου της φάσης A δίνεται από τον τύπο:

$$\Psi_m = \left( \frac{\int A_+}{S_{slot}} - \frac{\int A_-}{S_{slot}} \right) \quad (4.19)$$

όπου:

$S$  : Είναι το εμβαδόν της μίας αύλακας. Δηλαδή αν όλα τα τυλίγματα της φάσης A+ έχουν εμβαδόν  $S_{total}$  τότε θα είναι  $S_{slot} = \frac{S_{total}}{\text{Αριθμός αυλάκων με A+}}$

*Σημείωση: Ο λόγος που λαμβάνουμε ολοκληρώματα αντί για μεμονωμένες τιμές του διανυσματικού δυναμικού  $A$  είναι ότι, στο μοντέλο, δεν έχουν τοποθετηθεί αγωγοί. Αν υπήρχαν αγωγοί τότε το  $A$  θα ήταν μονοσήμαντα ορισμένο επάνω στον αγωγό. Το ρόλο των αγωγών παίζουν ολόκληρες περιοχές που διαρρέονται από πυκνότητα ρεύματος. Έτσι, μέσω του ολοκληρώματος, παράγουμε μία «μέση τιμή» ώστε να προσεγγιστεί καλύτερα η τιμή που θα είχε το  $A$  επάνω στον αγωγό μίας «πραγματικής» μηχανής.*



Σχήμα 4.10: Στιγμιότυπο κατά το οποίο επιλέγονται οι αύλακες που φέρουν τυλίγματα (α) A+ και (β) A- αντίστοιχα

- 6) Η πεπλεγμένη ροή που εμπλέκει όλο το πηνίο της φάσης είναι  $N$  φορές το  $\Psi_m$ .  
7) Η συνολική, λοιπόν, πεπλεγμένη μαγνητική ροή που διαπερνά όλο το τύλιγμα της φάσης  $A$  είναι:

$$\Psi = N * \Psi_m \quad (4.20)$$

- 8) Η αντί-ΗΕΔ προκύπτει ως:

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{\Psi_i - \Psi_{i-1}}{dt} \quad (4.21)$$

- 9) Ως  $dt$  έχουμε το χρονικό «βήμα» που αντιστοιχεί στο βήμα  $1^\circ$  ηλεκτρικής μοίρας. Συνεπώς, έχουμε:

$$dt = \frac{d\varphi}{\omega} = \frac{0.1428}{428.57 \frac{360}{60}} \quad (4.22)$$

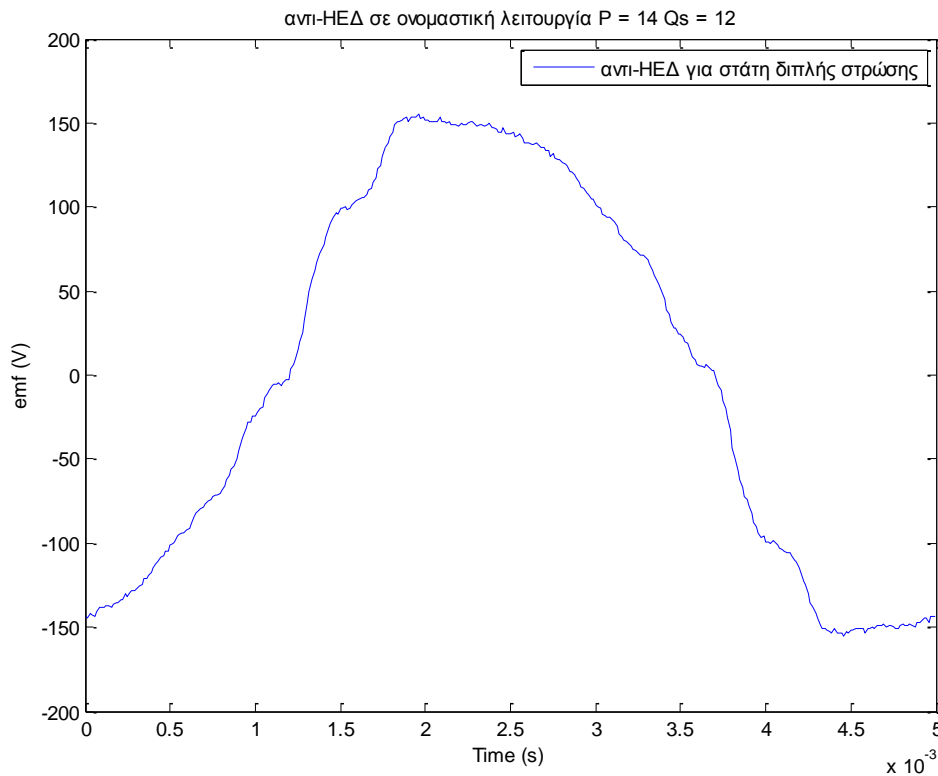
όπου:

έχουμε μετατρέψει την ονομαστική ταχύτητα των 428,57 ΣΑΛ σε μοίρες / δευτερόλεπτο (για 14-πολική μηχανή). Το  $d\varphi$  είναι οι μηχανικές μοίρες που αντιστοιχούν σε βήμα 1 ηλεκτρικής (0.1428 για 14-πολική μηχανή).

Επίσης θα μπορούσε απλούστερα να υπολογιστεί το  $dt$  με τον παρακάτω τύπο από τη στιγμή που γνωρίζουμε την συχνότητα των ρευμάτων και τον αριθμό των βημάτων σε ηλεκτρικές μοίρες:

$$dt = \frac{\text{συχνότητα ρευμάτων στάτη}}{360 (\text{αριθμός βημάτων})} \quad (4.23)$$

Από την παραπάνω διαδικασία λαμβάνεται ένα διάγραμμα της παρακάτω μορφής:



Σχήμα 4.11: Αντί-ΗΕΔ για 14 - πολική μηχανή με 12 αύλακες, απλής στρώσης.

#### 4.4.5 Ρεύμα Βραχυκύκλωσης

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την αξιολόγηση μια μηχανής είναι το ρεύμα του στάτη κατά την διάρκεια τριφασικού βραχυκυκλώματος. Μέχρι να ενεργοποιηθούν οι προστασίες του κινητήρα (ηλεκτρονικά ισχύος ή ρελέ) τα τυλίγματα της μηχανής θα υποστούν ρεύματα με τιμές υπερδιπλάσιες του ονομαστικού. Όσο μικρότερα ρεύματα βραχυκύκλωσης παρουσιάζει μια μηχανή τόσο λιγότερο καταπονούνται οι μονώσεις των τυλιγμάτων της και επομένως χρειάζεται σπανιότερα συντήρηση.

Για την μέτρηση των ρευμάτων βραχυκύκλωσης έχει αναπτυχθεί μοντέλο στο περιβάλλον Simulink της Matlab το οποίο και αναλύεται εκτενέστερα παρακάτω. Ορισμένα από τα βασικά μεγέθη που είναι απαραίτητα να εισαγάγουμε μέσα στο μοντέλο, είναι οι αυτεπαγωγές ευθέως και εγκάρσιου άξονα καθώς και η μαγνητική ροή που προκαλεί ο μόνιμος μαγνήτης (*permanent magnet flux*). Όλα τα απαραίτητα μεγέθη εξάγονται από το μοντέλο του FEMM με σκοπό να έχουμε όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται αυτό αναπτύσσεται στις δύο επόμενες υποπαραγράφους.

#### 4.4.6 Αυτεπαγωγές ευθέως και εγκάρσιου άξονα

##### Α τρόπος

Για τον υπολογισμό των αυτεπαγωγών θα πρέπει να μηδενιστεί η διέγερση της μηχανής, που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι οι μόνιμοι μαγνήτες. Για να πραγματοποιηθεί αυτό θα πρέπει να αντικατασταθεί το υλικό των μαγνητών με ένα μη μαγνητικό υλικό με την ίδια μαγνητική διαπερατότητα. Για ευκολία θα μπορούσε αυτό το υλικό να είναι ο αέρας αφού η μαγνητική διαπερατότητα των μόνιμων μαγνητών είναι κοντά στην μονάδα.

Για τον υπολογισμό της αυτεπαγωγής του ευθέως άξονα θα πρέπει να τροφοδοτηθούν τα τυλίγματα του στάτη με τα εξής ρεύματα:

$$\begin{aligned} I_a &= I_{\max} \\ I_b &= -\frac{I_{\max}}{2} \\ I_c &= -\frac{I_{\max}}{2} \end{aligned}$$

Στην συνέχεια θα υπολογιστεί η πεπλεγμένη μαγνητική ροή που διαπερνά την φάση Α και η ζητούμενη αυτεπαγωγή θα είναι:

$$L_d = \frac{\Psi_d}{I_{\max}} \quad (4.24)$$

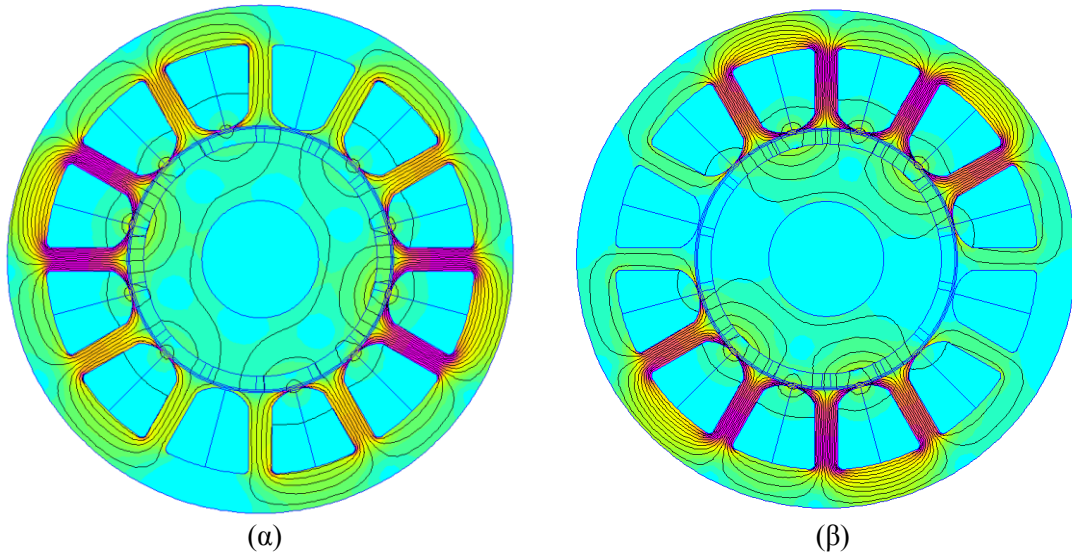
Για τον υπολογισμό της αυτεπαγωγής του εγκάρσιου άξονα υπάρχουν δύο τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Είτε να στραφεί το πεδίο του δρομέα για μισό πολικό βήμα (90° ηλεκτρικές) είτε να στραφεί το πεδίο του στάτη για μισό πολικό βήμα. Επιλέχθηκε η δεύτερη τεχνική και τροφοδοτούμε πλέον τα τυλίγματα του στάτη με τα εξής ρεύματα:

$$\begin{aligned} I_a &= 0 \\ I_b &= -\frac{\sqrt{3}}{2} I_{\max} \\ I_c &= \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\max} \end{aligned}$$

Στην συνέχεια θα υπολογίσουμε την πεπλεγμένη μαγνητική ροή που διαπερνά την φάση Α και η ζητούμενη αυτεπαγωγή θα είναι:

$$L_q = \frac{\Psi_q}{I_{\max}} \quad (4.25)$$

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι κατανομές των πεδίων στις δύο αυτές περιπτώσεις, οι οποίες και επιβεβαιώνουν ότι η μεθοδολογία που αναλύθηκε είναι και η σωστή.



Σχήμα 4.12: Κατανομή πεδίου κατά των υπολογισμό (α)  $L_d$  και (β)  $L_q$  αντίστοιχα.

Σε αυτό το σημείο θα ήταν σημαντικό να αναφερθεί ότι οι τιμές των  $L_d$  και  $L_q$  που λαμβάνονται είναι σχεδόν ίσες. Πρόκειται για ένα αποτέλεσμα εντελώς φυσιολογικό το οποίο είναι και το αναμενόμενο καθώς δεν παρουσιάζεται εκτυπότητα στους πόλους της μηχανής με βάση το σχεδιασμό της αφού η μηχανή μας είναι κυλινδρικού δρομέα.

### B τρόπος

Ένας διαφορετικός τρόπος προσέγγισης του προβλήματος θα ήταν η χρήση του υπολογισμού της ενέργειας του μαγνητικού πεδίου. Είναι γνωστό από την θεωρία των μαγνητικών πεδίων ότι ισχύει ο παρακάτω τύπος:

$$W = \frac{1}{2} \int B^* H^* dV \quad (4.26)$$

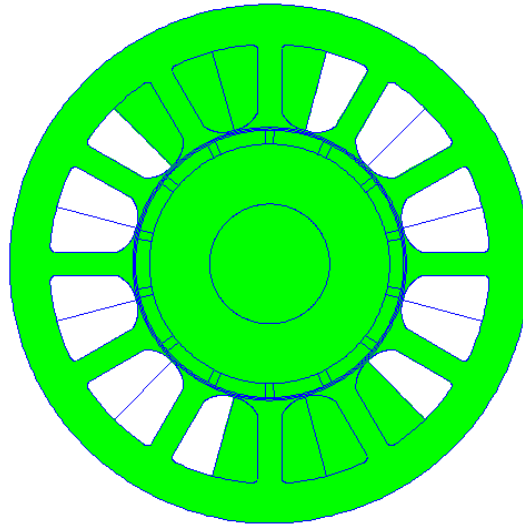
όπου:

το ολοκλήρωμα της μαγνητικής ενέργειας θα πρέπει να ληφθεί σε όλο το κύκλωμα (όλη τη μηχανή) και όχι μόνο πάνω στα τυλίγματα. Μεγάλη προσοχή απαιτείται στο γεγονός ότι θα πρέπει να συμπεριληφθούν στο ολοκλήρωμα μόνο τα τυλίγματα της μιας φάσης και όχι όλων των φάσεων ώστε ο υπολογισμός να είναι σωστός. Εφαρμόζοντας τα παραπάνω η αυτεπαγωγή υπολογίζεται ως εξής:

$$L = \frac{2W}{i^2} \quad (4.27)$$

όπου:

$i$  : το ρεύμα που διαρρέει το τύλιγμα του στάτη που συμπεριλάβαμε στον υπολογισμό της συνολικής μαγνητικής ενέργειας.



Σχήμα 4.13: Στιγμιότυπο κατά το οποίο επιλέγονται οι περιοχές για τον υπολογισμό της  $W_{total}$

### Γ τρόπος

Ένα 3<sup>ος</sup> τρόπος υπολογισμού που θα χρησιμοποιηθεί είναι αυτός μέσα από το ίδιο το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που δίνει τη δυνατότητα απευθείας υπολογισμού των αυτεπαγωγών αν ορισθεί ο τρόπος με τον οποίο είναι ενωμένα τα τυλίγματα αλλά και ο αριθμός των σπειρών.

Στον παρακάτω πίνακα διακρίνονται οι τιμές των αυτεπαγωγών όπως αυτές προέκυψαν εφαρμόζοντας και τις τρεις παραπάνω μεθόδους για την ακόλουθη μηχανή:

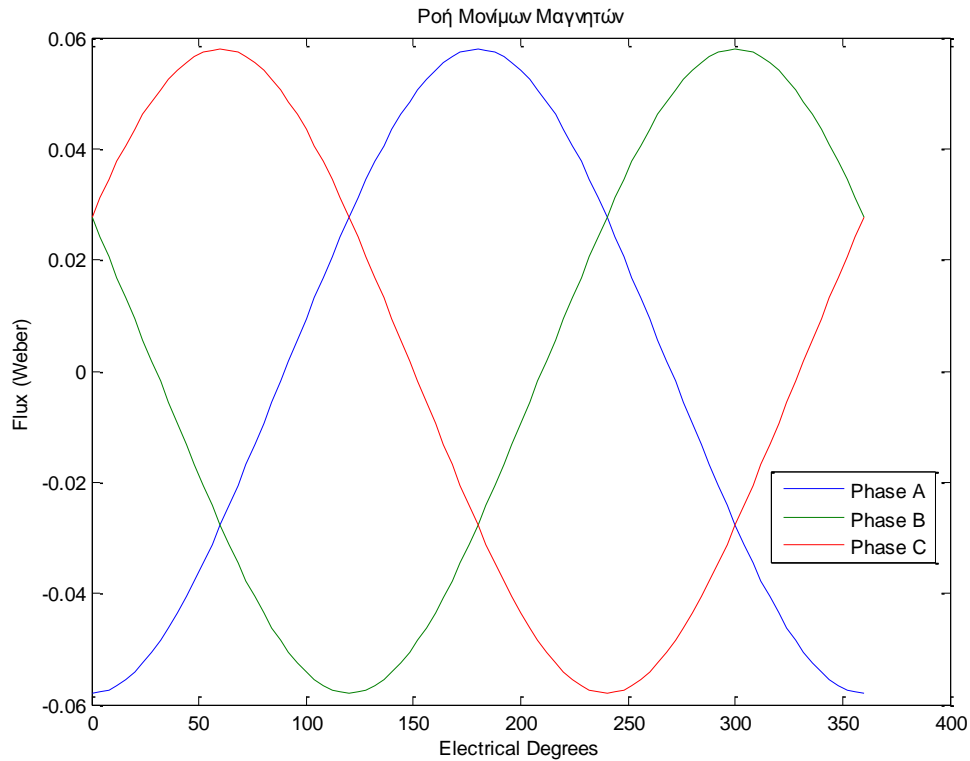
Πίνακας 4.3: Αυτεπαγωγές ευθέως και εγκάρσιου άξονα για τους τρεις διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού.

Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Μηχανής			
Αριθμός πόλων			12
Αριθμός Αυλάκων			14
Πάχος Μαγνήτη			3.5 mm
Ποσοστό μαγνήτη			85%
Συχνότητα Λειτουργίας			200 Hz
Αριθμός Σπειρών			16
Αποτελέσματα			
$L_d - 1^{\text{η}}$ μέθοδος	1,275751mH	$L_q - 1^{\text{η}}$ μέθοδος	1,273983 mH
$L_d - 2^{\text{η}}$ μέθοδος	1,306713mH	$L_q - 2^{\text{η}}$ μέθοδος	1,386163 mH
$L_d - 3^{\text{η}}$ μέθοδος	1,275751 mH	$L_q - 3^{\text{η}}$ μέθοδος	1,273983 mH

Μια βασική παρατήρηση που θα μπορούσε να γίνει στα παραπάνω αποτελέσματα είναι ότι ισχύει  $L_d \cong L_q$  κάτι απολύτως αναμενόμενο για μια μηχανή με κυλινδρικό δρομέα ή οποία και έχει συμμετρικό ευθύ και εγκάρσιο άξονα.

#### 4.4.7 Permanent Magnet Flux

Για να υπολογισθεί η επίδραση της ροής του μαγνήτη στα τυλίγματα του στάτη θα πρέπει να μηδενιστούν τα ρεύματα του στάτη και να «μετρηθεί» η μαγνητική ροή πάνω σε αυτά. Αν μαζί με την παραπάνω διαδικασία στραφεί και ο δρομέας θα ληφθεί το εξής διάγραμμα:



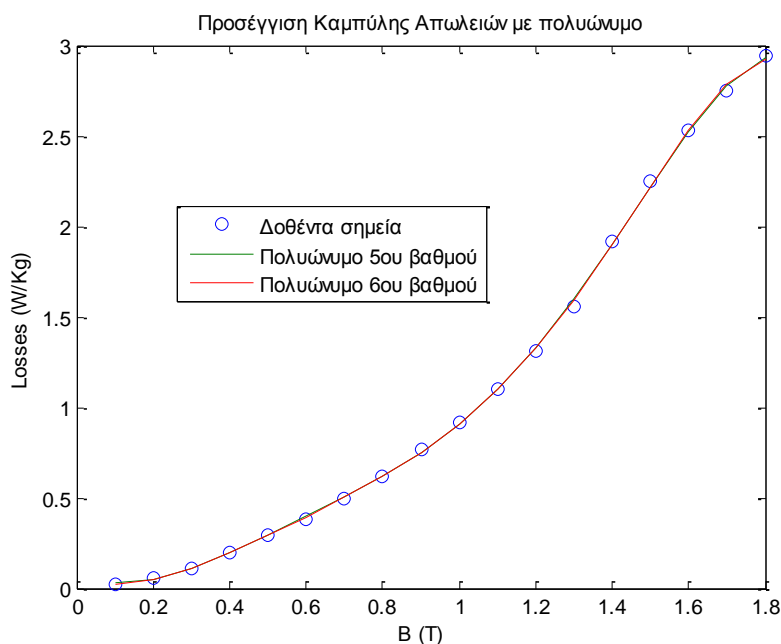
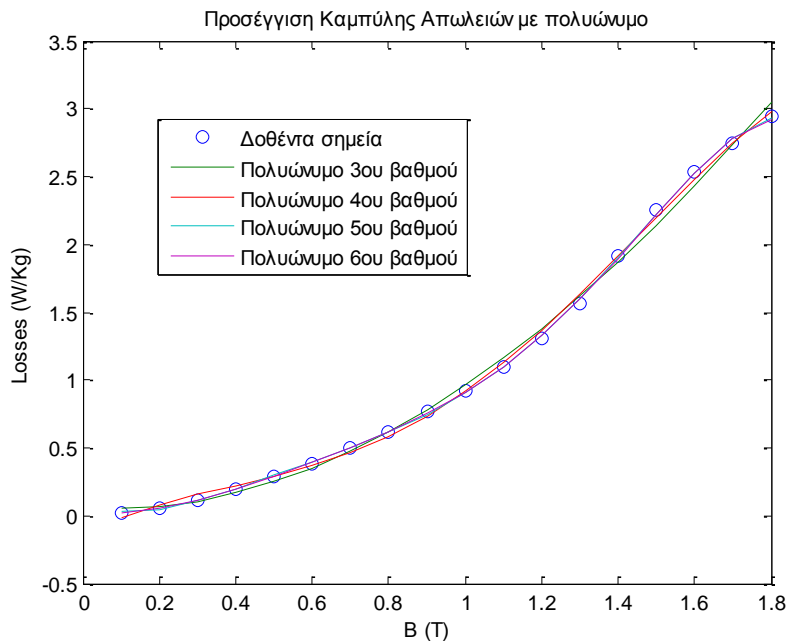
Σχήμα 4.14: Μαγνητική ροή που προκαλείται από το μόνιμο μαγνήτη κατά την περιστροφή του δρομέα για όλες τις φάσεις.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι στο δυναμικό μοντέλο θα πρέπει εισαχθεί η μέγιστη τιμή που λαμβάνεται από αυτό το διάγραμμα.



#### 4.4.8 Απώλειες πυρήνα

Ο υπολογισμός των απωλειών του πυρήνα της μηχανής είναι μια αρκετά εύκολη διαδικασία με τη βοήθεια περιβάλλοντος αριθμητικών υπολογισμών (Matlab). Αρχικά, θα πρέπει να αναζητήσουμε και να βρούμε την καμπύλη απωλειών για το σιδηρομαγνητικό υλικό που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι το M235-35A αλλά και το ειδικό βάρος του υλικού [15],[16]. Εν συνεχεία, θα προσεγγίσουμε την καμπύλη με ένα πολυώνυμο. Στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις φαίνονται οι διάφορες προσεγγίσεις για διαφορετικούς βαθμούς πολυωνύμων.



Επειδή ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για τις δύο αυτές περιπτώσεις είναι συγκρίσιμος θα μπορούσε να προτιμηθεί το πολυώνυμο 6<sup>ου</sup> βαθμού, ώστε η ακρίβεια του υπολογισμού μας να είναι όσο το δυνατόν καλύτερη. Εντούτοις, έπειτα από σειρά δοκιμών παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλώνουμε την ακρίβεια μέσα στην περιοχή των δοθέντων

σημείων, τόσο χειρότερη γίνεται στις περιοχές έξω από αυτά. Λαμβάνοντας υπ' όψιν την σημαντικότητα η διαδικασία να είναι αυτοματοποιημένη και απαλλαγμένη από λάθη, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το πολυώνυμο 3<sup>ου</sup> βαθμού.

Έχοντας λοιπόν στην διάθεση μας τα παραπάνω στοιχεία αλλά και την ειδική μάζα του σιδηρομαγνητικού M235-35A (7,6 Kg / dm<sup>3</sup>) είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τις απώλειες πυρήνα απλά βρίσκοντας την μέγιστη μαγνητική ροή του στάτη για οποιαδήποτε θέση του δρομέα και εφαρμόζοντας αυτή την τιμή στον παραπάνω τύπο.

Το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της επιφάνειας του στάτη η οποία πολλαπλασιαζόμενη με το μήκος της μηχανής θα δώσει τον όγκο του στάτη. Πολλαπλασιάζοντας αυτή τη τιμή με το ειδικό βάρος του υλικού του στάτη θα λαμβάνεται το συνολικό βάρος του στάτη και οι συνολικές απώλειες πυρήνα:

$$P_{Fe} = Losses(W / kg) * (7,6Kg / dm^3) * Iron Volume(dm^3) \quad (4.28)$$

Ο παραπάνω υπολογισμός αποτελεί μια καλή προσέγγιση του υπολογισμού των απωλειών κυρίως των υστέρησης και όχι τόσο των δινορευμάτων. Παρόλα αυτά στην παρούσα εφαρμογή το ποσοστό των απωλειών δινορευμάτων είναι πάρα πολύ μικρό και θα μπορούσαμε να τις αμελήσουμε.

#### 4.4.9 Υπολογισμός Rs

Για τον υπολογισμό της αντίστασης των τυλιγμάτων του στάτη θα πρέπει να κάνουμε χρήση του συντελεστή θερμοκρασίας καθώς η μηχανής μας δεν θα λειτουργεί στους 20°C. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε τον παρακάτω τύπο:

$$r_{cu} = r_{cu,ref} [1 + \alpha(T - T_{ref})] \quad (4.29)$$

όπου

$r_{cu}$  : αντίσταση σε θερμοκρασία "T"

$r_{cu,ref}$  : αντίσταση σε θερμοκρασία 20°C (1,75μΩ\*cm)

$\alpha$  : συντελεστής θερμοκρασία για το υλικό του αγωγού (για το χαλκό 3,9\*10<sup>-3</sup>)

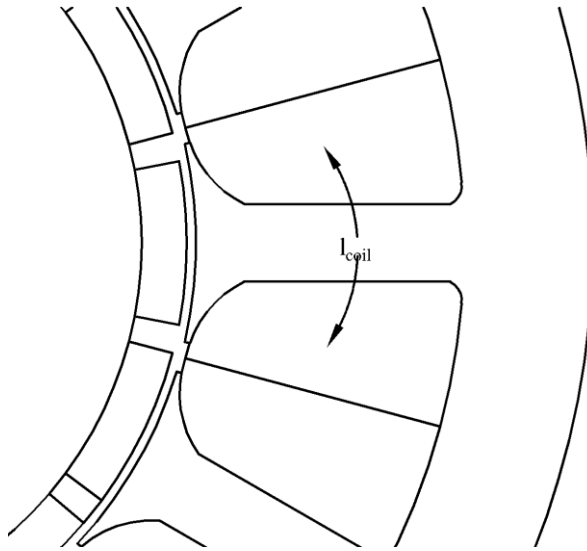
T : θερμοκρασία λειτουργίας (70°C)

Το μήκος της κάθε σπείρας δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$l_{σπείρας} = k * (2L + 2 * l_{coil}) \quad (4.30)$$

όπου

- $l_{σπείρας}$  : μήκος της κάθε σπείρας
- $k$  : συντελεστής προσαύξησης ίσως με 1,2
- $L$  : ενεργό μήκος μηχανής
- $l_{coil}$  : μήκος μεταξύ δύο διαδοχικών αυλακώσεων



Σχήμα 4.15: Αναπαράσταση μέσου μήκους μεταξύ αυλάκων.

Τελικά η αντίσταση ανά φάση θα δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$R_{phase} = \frac{N * Q_s * r_{cu} * l_{σπείρας}}{m * A_{cu}} \quad (4.31)$$

όπου

- $R_{phase}$  : αντίσταση τυλιγμάτων στάτη ανά φάση
- $N$  : αριθμός περιελίξεων τυλιγμάτων
- $Q_s$  : συνολικός αριθμός αυλάκων μηχανής
- $r_{cu}$  : αντίσταση σε θερμοκρασία “T”
- $l_{σπείρας}$  : μήκος της κάθε σπείρας
- $A_{cu}$  :  $A_{cu} = \frac{A_{slot} * sff}{N}$  όπου  $A_{slot}$ :εμβαδόν μιας αύλακας και  $sff$ :συντελεστής πληρότητας

#### 4.4.10 Απώλειες Χαλκού

Στις μηχανές μονίμων μαγνητών απώλειες χαλκού παρουσιάζονται μόνο στα τυλίγματα του στάτη καθώς στον ρότορα δεν υπάρχουν τυλίγματα (όπως στις μηχανές επαγωγής και στις dc). Αφού έχει υπολογισθεί η τιμή της αντίστασης αντίσταση των τυλιγμάτων της κάθε φάσης, ο υπολογισμός των απωλειών χαλκού πραγματοποιείται με τη χρήση του παρακάτω τύπου:

$$P_{Cu} = 3 * R_{phase} * I^2 \quad (4.32)$$

όπου:

$R_{phase}$  : η τιμή της αντίστασης της κάθε φάσης

$I$  : το ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του στάτη. Δηλαδή  $I = \frac{J * sff * A_{slot}}{N}$

#### 4.4.11 Απώλειες Τριβών & Ανεμισμού

Οι απώλειες τριβών και ανεμισμού συνήθως αμελούνται, ειδικά σε εφαρμογές χαμηλών ταχυτήτων, όπως η συγκεκριμένη. Παρ' όλα αυτά, για λόγους πληρότητας έγινε προσπάθεια αποτίμησής των, ενώ δεν πρέπει να παραβλεφθεί πως σε εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων και χαμηλής ισχύος οι απώλειες τριβών και ανεμισμού είναι σημαντική συνιστώσα των συνολικών απωλειών, με σημαντική επιρροή στην απόδοση της μηχανής. Έτσι λοιπόν, προσεγγίστηκαν μέσω των ακόλουθων τύπων:

Οι απώλειες λόγω τριβών υπολογίζονται από την εμπειρική σχέση [17].

$$P_{fr} = \frac{K_{fb} * (m_{rotor} + m_{magnet}) * rpm}{1000} \quad (4.33)$$

όπου:

- $K_{fb}$  : εμπειρικός συντελεστής. Στην προκείμενη περίπτωση ίσος με 3
- $m_{rotor}$  : η μάζα του ρότορα και των μαγνητών αντίστοιχα
- $m_{magnet}$
- $rpm$  : η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα

Οι απώλειες λόγω ανεμισμού εκτιμώνται από τον τύπο [17] [18]:

$$P_{windage} = \frac{L * rpm^3 * (2R_r + 2B_m)^3}{10^6} \quad (4.34)$$

όπου

- $L$  : ενεργό μήκος μηχανής
- $rpm$  : οι στροφές του κινητήρα
- $R_r$  : η εξωτερική ακτίνα του δρομέα
- $B_m$  : το πάχος των μαγνητών

#### 4.4.12 Υπολογισμός συντελεστή απόδοσης κινητήρα

Για τον υπολογισμό του συντελεστή απόδοσης του κινητήρα θα πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η αποδιδόμενη ισχύς στον άξονα του κινητήρα. Ο υπολογισμός της αποδιδόμενης ροπής του κινητήρα γίνεται με την χρήση της παρακάτω σχέσης:

$$P_m = T_{mean} * \omega_r \quad (4.35)$$

όπου

$T_{mean}$  : η μέση ροπή, όπως αυτή έχει υπολογιστεί παραπάνω

$\omega_r$  : η ταχύτητα στροφής του κινητήρα σε (rad/sec)

Επομένως θα ισχύει:

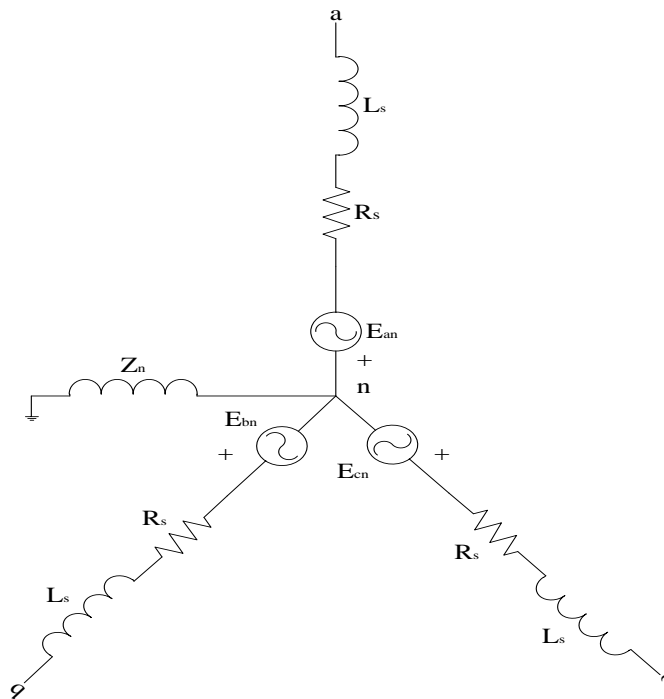
$$n = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{P_m}{P_m + P_{losses}} = \frac{P_m}{P_m + P_{Cu} + P_{Fe} + P_{windage} + P_{fr}} \quad (4.36)$$

## 4.5 Μοντέλο σήματος σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών

Βασικό άξονα της παρούσας εργασίας αποτελεί ο συνδυασμός επίλυσης μαγνητοστατικών φαινομένων με την μελέτη μεταβατικών φαινομένων. Στις παρακάτω παραγράφους περιγράφεται το δυναμικό μοντέλο ενός σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών, όπως αυτό αναπτύχθηκε με την βοήθεια του εργαλείου Simulink.

### 4.5.1 Μαθηματικό μοντέλο σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών σε φασικές συνιστώσες a, b, c

Το προτεινόμενο μοντέλο αφορά την ανάλυση της σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών [20][21].



Σχήμα 4.16 : Αναπαράσταση Μηχανής Μονίμων Μαγνητών σε a,b,c συνιστώσες

Οι εξισώσεις του μοντέλου σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών έχουν ως εξής :

Οι εξισώσεις των τάσεων :

$$\begin{aligned}
 V_a &= -R_a I_a + \frac{d\Phi_a}{dt} \\
 V_b &= -R_b I_b + \frac{d\Phi_b}{dt} \\
 V_c &= -R_c I_c + \frac{d\Phi_c}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{4.37}$$

Όπου:

- $R_a, R_b, R_c$  : οι του αντιστάσεις των τυλιγμάτων του στάτη για τις φάσεις a, ,b, c αντίστοιχα  
 $I_a, I_b, I_c$  : τα ρεύματα που διαρρέουν τα τυλίγματα του στάτη για τις φάσεις a, ,b, c αντίστοιχα  
 $\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c$  : η πεπλεγμένη μαγνητική ροή στις φάσεις a, ,b, c αντίστοιχα

Οι εξισώσεις των πεπλεγμένων ροών γράφονται :

$$\begin{aligned}\Phi_a &= L_{aa}i_a + M_{ab}i_b + M_{ac}i_c + \Phi_{ma} \\ \Phi_b &= M_{ab}i_a + L_{bb}i_b + M_{bc}i_c + \Phi_{mb} \\ \Phi_c &= M_{ac}i_a + M_{ab}i_b + L_{cc}i_c + \Phi_{mc}\end{aligned}\quad (4.38)$$

Όπου:

- $L_{aa}, L_{bb}, L_{cc}$  : οι αυτεπαγωγές των φάσεων a, ,b, c αντίστοιχα  
 $M_{ij}$  : οι αμοιβαίες επαγωγές μεταξύ των φάσεων i,j  
 $\Phi_{ma}, \Phi_{mb}, \Phi_{mc}$  : η ροή των μόνιμων μαγνητών στις φάσεις a, ,b, c αντίστοιχα

Οι εξισώσεις των επαγόμενων Αντι Ηλεκτρεγερτικών Δυνάμεων όταν  $i=0$  έχουν ως εξής :

$$\begin{aligned}e_a &= V_a(i=0) = \frac{d(\Phi_{ma})}{dt} = \frac{d(\Phi_{ma})}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = p\omega_m(\Phi_{ma}) \\ e_b &= V_b(i=0) = \frac{d(\Phi_{mb})}{dt} = \frac{d(\Phi_{mb})}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = p\omega_m(\Phi'_{mb}) \\ e_c &= V_c(i=0) = \frac{d(\Phi_{mc})}{dt} = \frac{d(\Phi_{mc})}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = p\omega_m(\Phi'_{mc})\end{aligned}\quad (4.39)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις παρατηρείται ότι, οι αυτεπαγωγές και οι αμοιβαίες επαγωγές αποτελούνται από μια θεμελιώδη συνιστώσα και από ένα άθροισμα περιττών αρμονικών που σχετίζονται με την αλλαγή της γωνίας  $\theta_e$ . Άρα καταλαβαίνουμε ότι οι εξισώσεις γίνονται ακόμα πιο πολύπλοκες αν λάβουμε υπόψη και το άθροισμα των αρμονικών συνιστωσών των αυτεπαγωγών και αμοιβαίων επαγωγών. Όμως για να απλοποιηθούν οι εξισώσεις θα προχωρήσουμε στις παρακάτω παραδοχές:

- Η πυκνότητα ροής που παράγεται από τους μόνιμους μαγνήτες είναι τέλεια ημιτονοειδείς.
- Η πεπλεγμένη ροή στο στάτη περιέχει μόνο τη θεμελιώδη συνιστώσα.
- Τα τυλίγματα του στάτη παράγουν ημιτονοειδή μαγνητεγερτική δύναμη.



Άρα οι τελικές εξισώσεις των τάσεων έχουν τη μορφή :

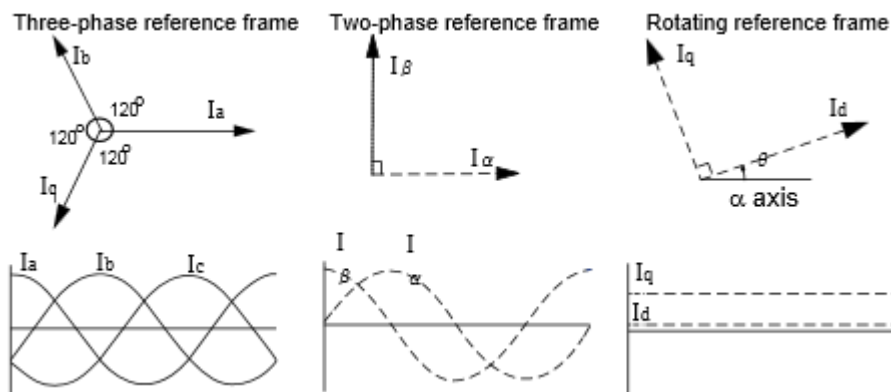
$$\begin{aligned} V_a &= e_a - R_a I_a - L_{aa} \dot{i}_a - M_{ab} \dot{i}_b - M_{ac} \dot{i}_c \\ V_b &= e_b - R_b I_b - M_{ba} \dot{i}_a - L_{bb} \dot{i}_b - M_{bc} \dot{i}_c \\ V_c &= e_c - R_c I_c - L_{ca} \dot{i}_a - M_{cb} \dot{i}_b - L_{cc} \dot{i}_c \end{aligned} \quad (4.40)$$

Η Ηλεκτρομαγνητική Ροπή δίνεται από τον τύπο :

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} = p(\Phi'_a i_a + \Phi'_b i_b + \Phi'_c i_c) \quad (4.41)$$

#### 4.5.2 Στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς – μετασχηματισμοί Clark - Park

Για να αναλυθεί μια τριφασική μηχανή συνήθως χρησιμοποιούνται μαθητικά μοντέλα, τα οποία εκμεταλλεύονται τις δυναμικές σχέσεις μεταξύ τάσεων και ρευμάτων μια ηλεκτρικής μηχανής, είναι σε θέση να προσομοιώσουν και τη λειτουργία που θα έχει τόσο σε μεταβατικές καταστάσεις όσο και σε καταστάσεις μόνιμης λειτουργίας. Παραπάνω αναπτύξαμε το μαθηματικό μοντέλο μίας σύγχρονης μηχανής μόνιμων μαγνητών με τριφασική τροφοδοσία. Τέτοια μαθηματικά είναι πολύπλοκα και απαιτούν μεγάλο υπολογιστικό χρόνο κατά την διάρκεια μιας προσομοίωσης.



Σχήμα 4.17: Επίπεδα αναφοράς

Κατά διάρκεια λειτουργίας μιας τριφασικής μηχανής επιδιώκεται μια όσο το δυνατόν πιο συμμετρική τάση. Αυτό είναι κάτι που συμβαίνει και στην πραγματικότητα τόσο όταν τροφοδοτείται ένας ηλεκτρικός κινητήρας από το δίκτυο (σπάνιο για κινητήρα μόνιμων μαγνητών), όσο και όταν τροφοδοτείται από διατάξεις με ηλεκτρονικά ισχύος. Αφού λοιπόν η τριφασική πηγή είναι πάντα συμμετρική θα μπορούσαμε να προσομοιώσουμε τον κινητήρα μελετώντας την λειτουργία του μόνο για τις δύο φάσεις και προφανώς θα ισχύουν τα ίδια αποτελέσματα και για τις 3 φάσεις, λόγω της συμμετρίας. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να επιτευχθεί με την χρήση του μετασχηματισμού Clarke:

$$\begin{bmatrix} V\alpha \\ V\beta \\ V\gamma \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix}$$

Όλες οι ποσότητες που απαιτούνται να υπολογισθούν ώστε να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση, θα πρέπει να γίνουν πάνω στο περιστρεφόμενο πεδίο του ρότορα. Δηλαδή, οι τάσεις και τα ρεύματα του κινητήρα περιστρέφονται με γωνία αντίστοιχη αυτής της περιστροφής του ρότορα. Όπως λοιπόν γίνεται εύκολα αντιληπτό, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς το οποίο και θα συμπεριελάμβανε αυτή τη γωνία περιστροφής και θα μετέτρεπε τα εναλλασσόμενα μεγέθη σε τιμές dc. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση του μετασχηματισμού Park:

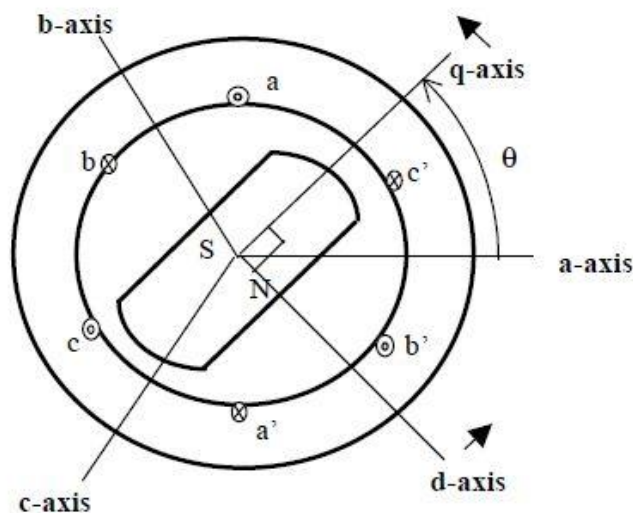
$$\begin{bmatrix} Vd \\ Vq \\ V0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & \mp\sin\theta & 0 \\ \pm\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix}$$

όπου:

η γωνία  $\theta$  που χρησιμοποιείται στο παραπάνω μοντέλο θα είναι η γωνία μεταξύ του κινούμενου συστήματος αναφοράς (dq) και του σταθερού (abc) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Ο παραπάνω μετασχηματισμός αποκαλείται και αλλιώς dq μετασχηματισμός (abc to dq transform). Τα πάνω πρόσημα αντιπροσωπεύουν το μετασχηματισμό dq, δηλαδή συμβατική φορά γεννήτριας. Ενώ, αντίθετα, τα κάτω πρόσημα αντιπροσωπεύουν το μετασχηματισμό qd και συμβατική φορά κινητήρα.

Η  $V_0$  καλείται συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας και είναι πάντα μηδέν για ένα συμμετρικό και ισορροπημένο 3φασικό σύστημα. [22]



Σχήμα 4.18: Απεικόνιση της γωνίας μεταξύ κινούμενου και σταθερού συστήματος συντεταγμένων.

Ο παραπάνω μετασχηματισμός χρησιμοποιείται για να απλουστευθεί το μαθηματικό μοντέλο και να βελτιωθεί η υπολογιστική του αποδοτικότητα. Δεν παρουσιάζει όμως ιδιαίτερη φυσική σημασία. Για να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα θα πρέπει μετά το πέρας των μαθηματικών πράξεων να εφαρμοστεί η αντίθετη διαδικασία μέσα από την οποία θα μετατραπούν τα ηλεκτρικά μεγέθη (ρεύμα εν προκειμένω) σε τριφασικά εναλλασσόμενα.

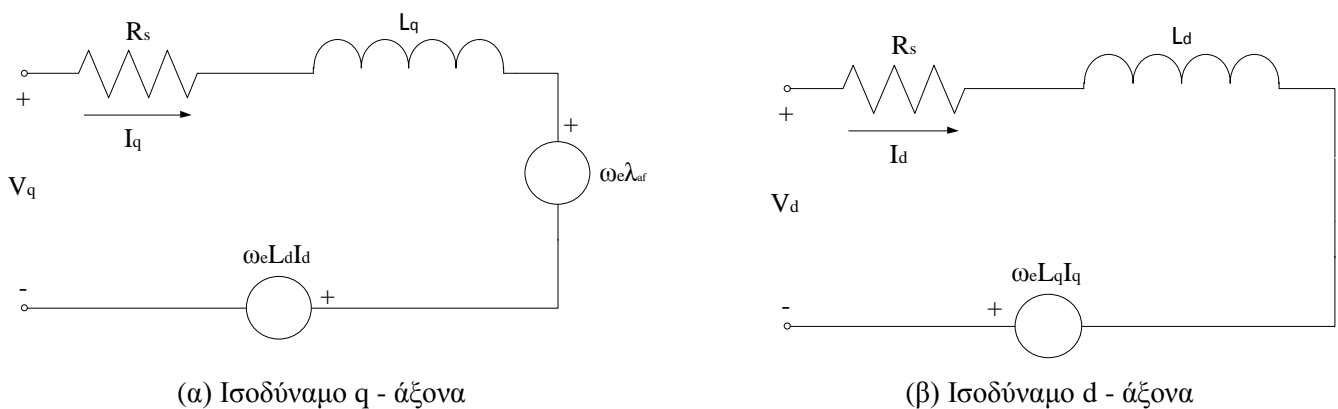
$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vd \\ Vq \\ V0 \end{bmatrix}$$

### 4.5.3 Δυναμικό μοντέλο σύγχρονης μηχανής μόνιμων μαγνητών σε στρεφόμενο πεδίο αναφοράς (qd0)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στις σύγχρονες μηχανές μόνιμων μαγνητών το ρόλο της διέγερσης (dc πεδίο) τον έχουν οι μόνιμοι μαγνήτες. Πρόκειται λοιπόν για μηχανές με μικρότερο βάρος (λόγω της μη ύπαρξης χαλκού στην διέγερση) και μέγεθος για τις ίδιες επιδόσεις, με μικρότερες απώλειες και μεγαλύτερη απόδοση. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτών των μηχανών είναι το σχετικά υψηλό κόστος των μόνιμων μαγνητών.

Κατά την επιλογή του μαγνήτη απαιτείται αρκετά μεγάλη προσοχή, καθώς θα πρέπει να έχει αρκετά υψηλό  $H_c$  ώστε να αποφευχθεί τυχόν απομαγνήτιση. Όταν χρησιμοποιούνται μαγνήτες με μικρότερο  $H_c$  και ο φόβος απομαγνήτισης είναι μεγάλος, προτιμάται να εμψυτεύουμε μέσα στο σιδηρομαγνητικό του δρομέα τους μόνιμους μαγνήτες.

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή θα γίνει χρήση του απλοποιημένου μοντέλου το οποίο και περιγράφεται από τα παρακάτω κυκλώματα:



Σχήμα 4.19: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα PMSM.

Το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τη λειτουργία μιας σύγχρονης μηχανής μόνιμων μαγνητών ανοιγμένο στον ευθύ και εγκάρσιο άξονα θα μπορούσε να περιγραφεί από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$V_q = r_s i_q + \frac{\partial \lambda_q}{\partial \omega} + \omega_r \lambda_d \quad (4.42)$$

$$V_d = r_s i_d + \frac{\partial \lambda_d}{\partial \omega} - \omega_r \lambda_q \quad (4.43)$$

όπου:

- $r_s$  : αντίσταση του στάτη ανά φάση
- $\lambda_q$  : ροή στον άξονα q
- $\lambda_d$  : ροή στον άξονα d
- $\omega_r$  : η ηλεκτρική ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα σε *rad/sec*

Ενώ οι ροές του στάτη για τον ευθύ και τον εγκάρσιο άξονα δίνονται από τους εξής τύπους:

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (4.44)$$

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_{af} \quad (4.45)$$

όπου:

- $L_q$  : αυτεπαγωγή του εγκάρσιου άξονα
- $L_d$  : αυτεπαγωγή του ευθύ άξονα
- $\lambda_{af}$  : μαγνητική ροή που προκαλείται από τον μόνιμο μαγνήτη (*flux linkage*)

Όλες οι παραπάνω εξισώσεις είναι ορισμένες με ηλεκτρικά μεγέθη (δηλαδή ηλεκτρικές μοίρες και ηλεκτρική ταχύτητα περιστροφής) τα οποία και δεν έχουν φυσική σημασία οπότε και χρειάζεται ο εξής μετασχηματισμός από ηλεκτρικά σε μηχανικά μεγέθη:

$$\omega_r = \frac{p}{2} \omega_{rm} \quad (4.46)$$

όπου:

- $\omega_r$  : ηλεκτρική ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα
- $\omega_{rm}$  : μηχανική ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα
- $p$  : ο αριθμός των πόλων της ηλεκτρικής μηχανής

Τέλος μπορούμε να προσδιορίσουμε την τιμή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής μέσα από τη σχέση:

$$T_e = \frac{3p}{2} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (4.47)$$

Επίσης θα μπορούσαμε να προσεγγίσουμε την ηλεκτρομαγνητική ροπή ως εξής:

$$T_e = T_{Load} + T_D + B \omega_{rm} + J \frac{\partial \omega_{rm}}{\partial \theta} \quad (4.48)$$

όπου:

- $T_e$  : ηλεκτρομαγνητική ροπή
- $T_{Load}$  : ροπή που απαιτεί το φορτίο
- $T_D$  : συντελεστής απόσβεσης
- $B$  : συντελεστής τριβών
- $J$  : συντελεστής αδράνειας

#### 4.5.4 Το μοντέλο στο περιβάλλον Simulink

Με την χρήση των παραπάνω εξισώσεων είναι δυνατόν να δημιουργηθεί στο περιβάλλον Simulink ένα μοντέλο που θα λαμβάνει ως εισόδους τις παρακάτω παραμέτρους και θα δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να παρατηρήσει τις μεταβατικές καταστάσεις μιας οποιαδήποτε σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών στο χρόνο:

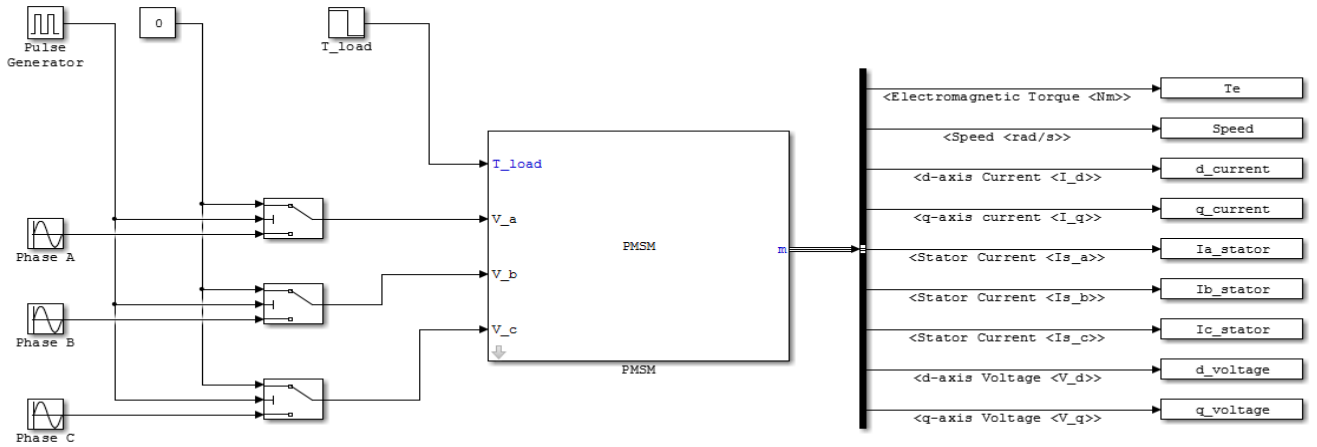
Πίνακας 4.4: Είσοδοι μοντέλου PMSM στο περιβάλλον Simulink.

Είσοδοι	
$p$	Αριθμός πόλων
$L_d$	Αυτεπαγωγή ευθέως άξονα (H)
$L_q$	Αυτεπαγωγή εγκάρσιου άξονα (H)
$R_s$	Αντίσταση στάτη ( $\Omega$ )
$\Phi_{magnet}$	Ροή Μόνιμου Μαγνήτη (Wb)
$J$	Αδράνεια Περιστροφής ( $kg \cdot m^2$ )
$B$	Συντελεστής Τριβών
$V_{stator}$	Τάση Τροφοδοσία (V)
$T$	Ροπή στον άξονα (T)

Πίνακας 4.5: Έξοδοι μοντέλου PMSM στο περιβάλλον Simulink.

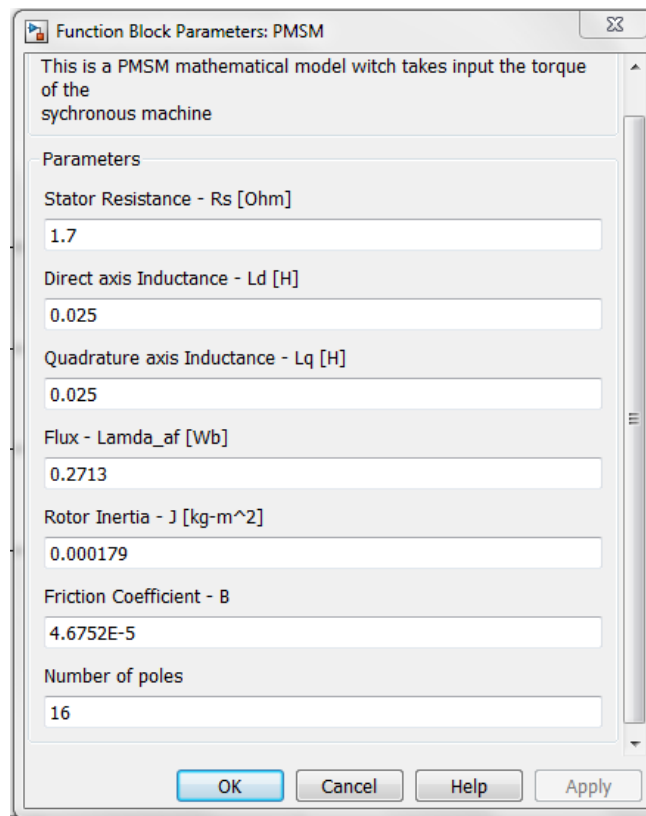
Έξοδοι	
$T_e$	Ηλεκτρομαγνητική Ροπή (N)
$I_s$	Ρεύματα Στάτη όλων των φάσεων (A)
$\omega_{rm}$	Μηχανική Γωνιακή Ταχύτητα ( $rad/sec$ και $rpm$ )
$\omega_r$	Ηλεκτρική Γωνιακή Ταχύτητα ( $rad/sec$ και $rpm$ )
$I_d$	Ρεύμα ευθέως άξονα (A)
$I_q$	Ρεύμα εγκάρσιου άξονα (A)
$V_d$	Τάση Ευθέως Άξονα (V)
$V_q$	Τάση Εγκάρσιου Άξονα (V)

Το περιβάλλον Simulink της Matlab δίνει τη δυνατότητα παραστατικού σχεδιασμού και εκτέλεσης των θεωρητικών μοντέλων σε ένα ιδιαίτερα εύχρηστο προς το χρήστη περιβάλλον. Το μοντέλο περιλαμβάνει διάφορα στάδια υλοποίησης που παριστάνονται με δομικά blocks στο Simulink και παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.



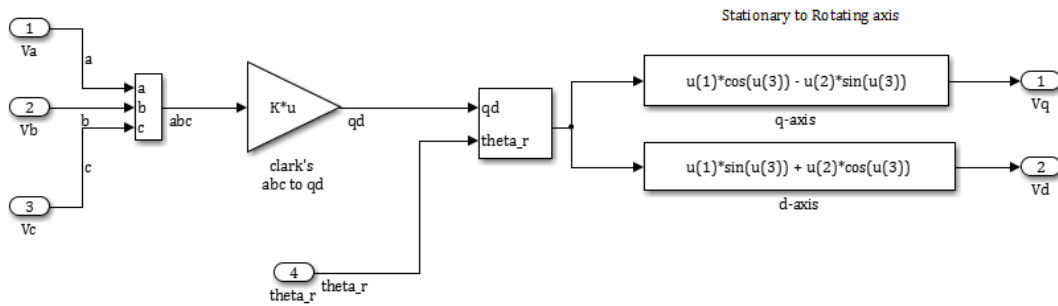
Σχήμα 4.20 : Διάγραμμα της μοντελοποιημένης μηχανής.

Κατά την διάρκεια κατασκευής του μοντέλου έγινε προσπάθεια, η χρήση του να μην περιορίζεται στην συγκεκριμένη εφαρμογή αλλά να γίνει η δημιουργία ενός έτοιμου, εύχρηστου block στο οποίο ο κάθε χρήτης είναι σε θέση να ορίσει τις απαραίτητες για την προσομοίωση παραμέτρους. Με αυτό το σκοπό, ορίστηκε block στο οποίο και ο χρήτης μπορεί να δώσει τα παρακάτω ορίσματα.

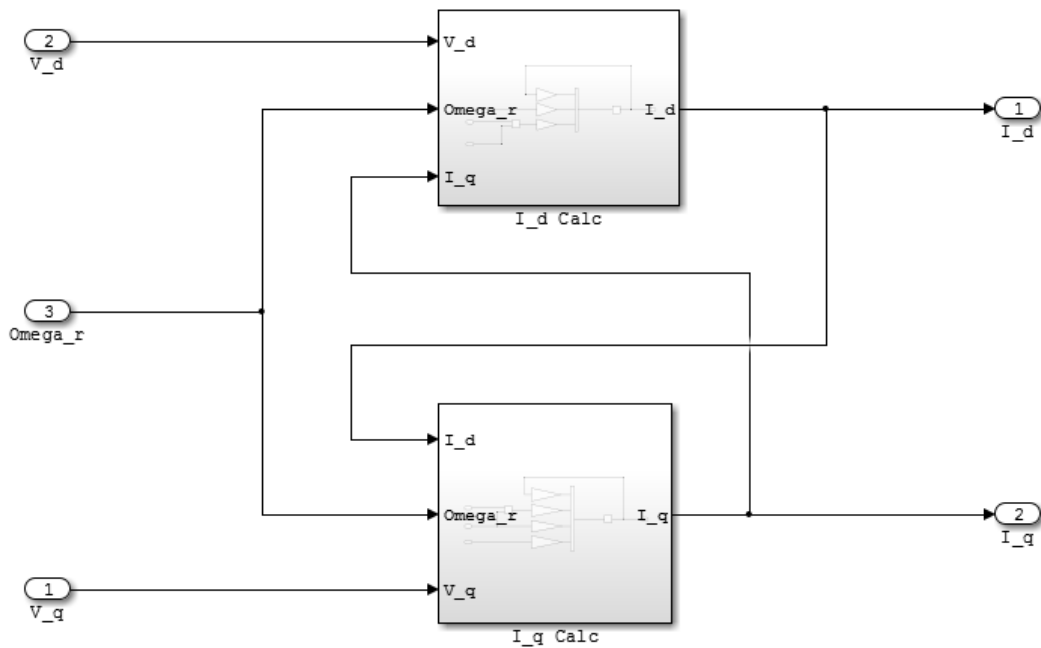


Σχήμα 4.21: Ορίσματα block της σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών..

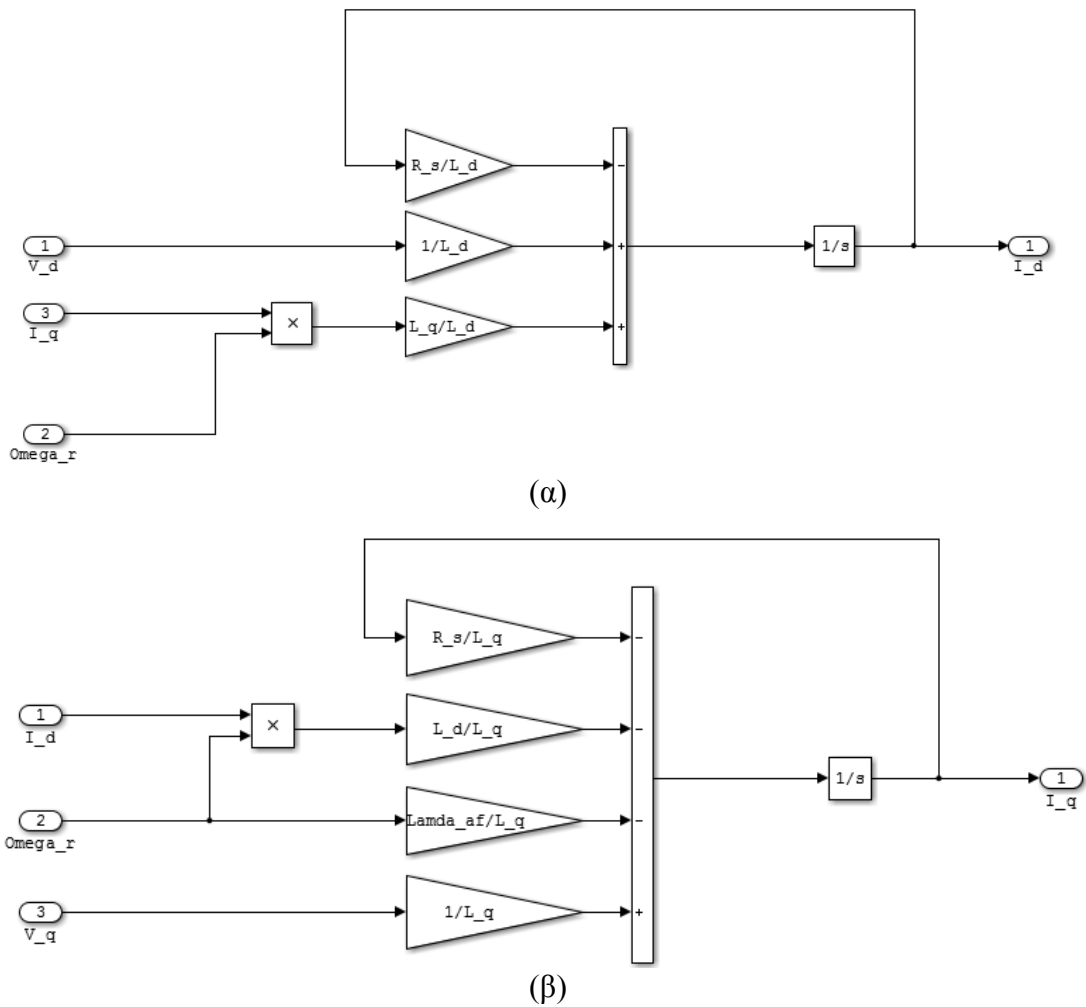
Παρακάτω παρουσιάζονται τα blocks των εξισώσεων που έχουν περιγραφεί παραπάνω:



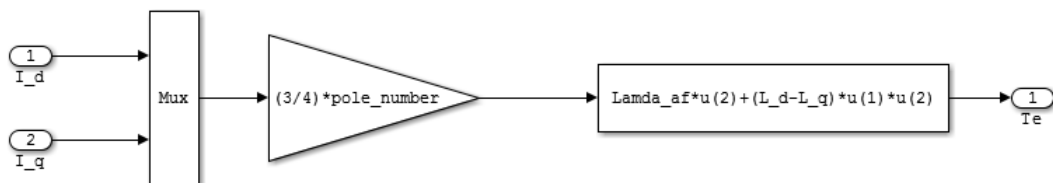
Σχήμα 4.22: Μονάδα μετασχηματισμού Clark ( $V_{a,b,c} \rightarrow V_{dq}$ ).



Σχήμα 4.23: Μονάδα υπολογισμού ρευμάτων ευθέως και εγκάρσιου άξονα.

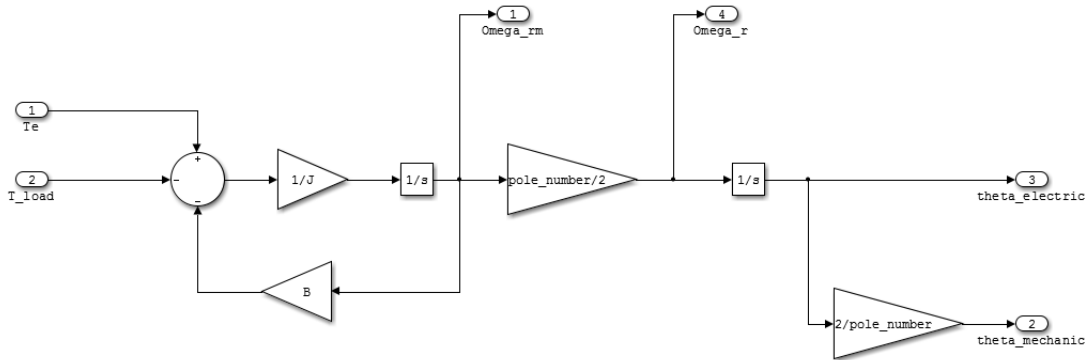


Σχήμα 4.24: Μονάδα υπολογισμού ρευμάτων (α) ευθέως και (β) εγκάρσιου άξονα.



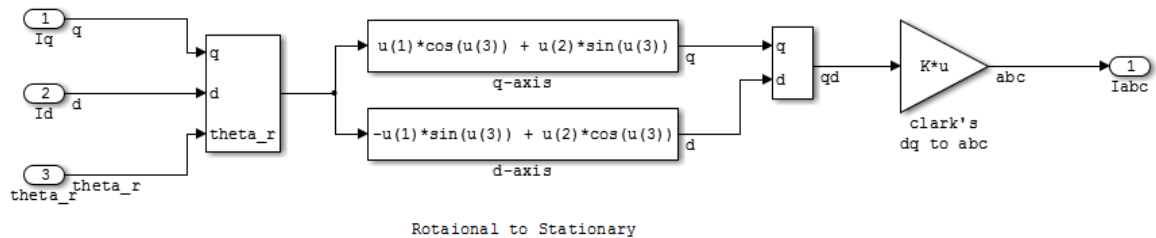
Σχήμα 4.25: Μονάδα υπολογισμού ηλεκτρομαγνητικής ροπής.





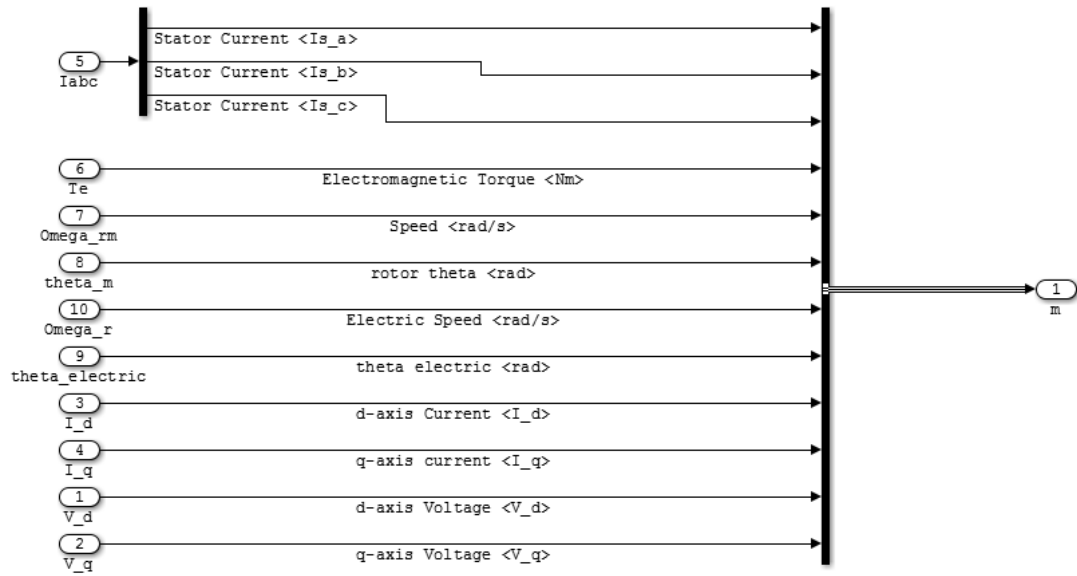
Σχήμα 4.26: Μονάδα υπολογισμού γωνιακών ταχυτήτων και γωνιών περιστροφής.

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, για υπολογιστική ευκολία κάνουμε χρήση του μετασχηματισμού Park έχοντας την δυνατότητα έτσι να αναγάγουμε ένα δύσκολο επιλύσιμο πρόβλημα σε ευκολότερο. Θα πρέπει όμως να υπάρχει η δυνατότητα στον χρήστη να μελετήσει τα ρεύματα σε abc πλαίσιο αναφοράς.



Σχήμα 4.27: Μονάδα μετασχηματισμού Clark ( $V_{dq} \rightarrow V_{a,b,c}$ )

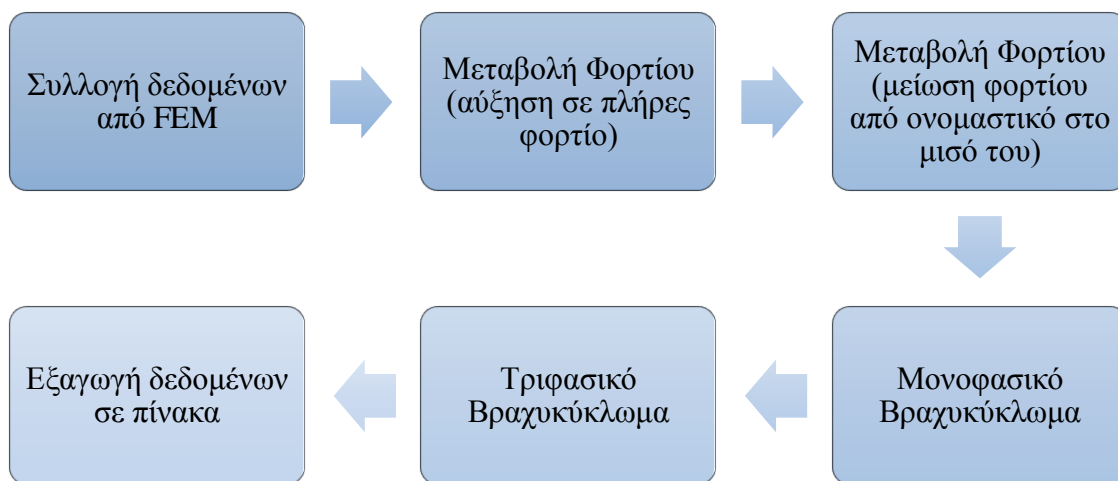
Αφού ολοκληρωθούν οι υπολογισμοί, ο χρήστης θα πρέπει να είναι σε θέση να λάβει τα αποτελέσματα, τα οποία και αποθηκεύονται αυτόματα στην επιφάνεια εργασίας της Matlab.



Σχήμα 4.28: Μονάδα Εξόδου (επιστρέφει όλες τις τιμές που είναι προς μελέτη)

#### 4.5.5 Διαδικασία προσομοιώσεων

Στην παρούσα εφαρμογή γίνεται χρήση του δυναμικού μοντέλου μιας σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών (PMSM), με σκοπό μέσα από αυτή τη διαδικασία να ληφθούν δεδομένα που θα δώσουν πληροφορία για την καταλληλότητα της μηχανής σε μεταβατικά φαινόμενα. Η προσομοίωση του κινητήρα σε μεταβατικά φαινόμενα αποτελεί μια από τις πτυχές που λαμβάνουμε υπ' όψιν για την επιλογή των καταλληλότερων σχεδιαστικών χαρακτηριστικών του. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, από το μοντέλο που έχει αναπτυχθεί και αναλυθεί με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων εξάγονται όλα τα απαραίτητα δεδομένα που χρειάζονται ώστε να συνεχίσουμε με την δυναμική ανάλυση του κινητήρα. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι διεργασίες που επιτελούνται σε αυτή τη φάση της προσομοίωσης:



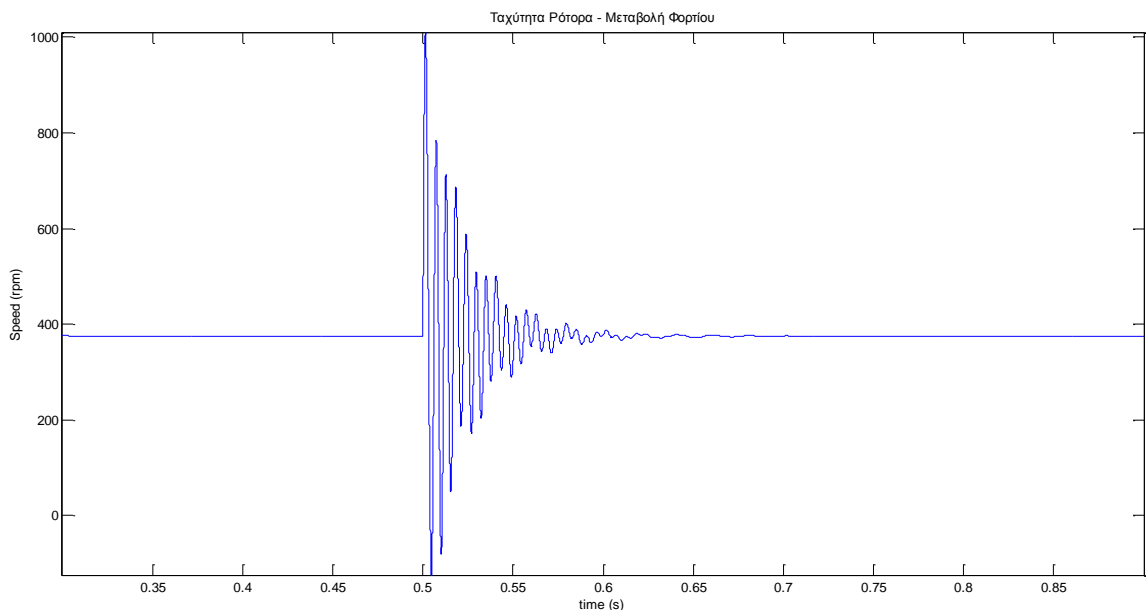
Σχήμα 4.29: Διεργασίες προσομοίωσης δυναμικού μοντέλου.

#### 4.5.6 Μηχανικές καταπονήσεις στον άξονα του κινητήρα

Σε έναν περιστρεφόμενο άξονα ασκούνται δυνάμεις εξαιτίας της αδράνειας των κινούμενων μαζών, δηλαδή του άξονα, του φορτίου του καθώς και του συστήματος μετάδοσης κίνησης (αν υπάρχει). Οι δυνάμεις αδρανείας που οφείλονται στην κίνηση του δρομέα πρέπει να εξουδετερώνονται καθώς, σε διαφορετική περίπτωση, η λειτουργία της μηχανής γίνεται με έντονους κραδασμούς, θόρυβο, φθορές και, συνεπώς, κίνδυνο πλήρους αστοχίας (καταστροφής) του κινητήρα.

Οι σύγχρονες μηχανές παρουσιάζουν πολύ καλά χαρακτηριστικά κατά τη λειτουργία τους σε μόνιμη κατάσταση. Ωστόσο, οι μεταβατικές καταστάσεις, πολλές φορές είναι αδύνατο να αποκλειστούν. Αυτές οι μεταβατικές καταστάσεις δημιουργούν προβλήματα τόσο στα ηλεκτρικά μεγέθη μια μηχανής όσο και στα μηχανικά. Παρακάτω παρουσιάζονται τα προβλήματα που προκαλούνται από τις μεταβατικές καταστάσεις μιας σύγχρονης μηχανής.

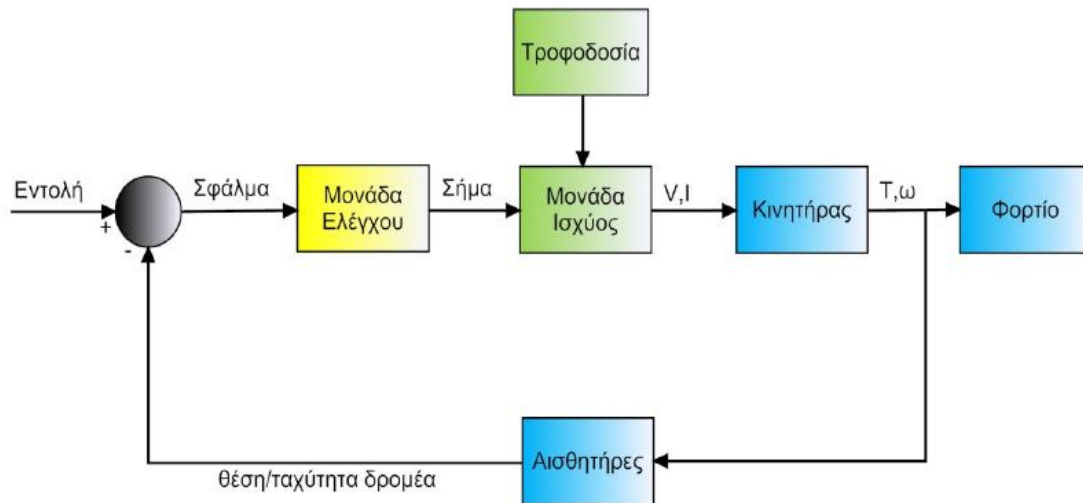
Τα μεταβατικά φαινόμενα προκαλούν έντονες μεταβολές της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, οι οποίες μεταφράζονται σε αντίστοιχες μεταβολές της ροπής στον άξονα του κινητήρα, προκαλώντας, έτσι, σημαντικές μηχανικές καταπονήσεις σε αυτόν. Εξαιτίας αυτού του φαινομένου, πολλές φορές υπερεκτιμώνται τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του δρομέα (τόσο ως προς το μέγεθος όσο και ως προς το υλικό του) με σκοπό να αποφευχθεί η καταστροφή του κινητήρα. Σημαντικές, επίσης, είναι και οι καταπονήσεις που παρατηρούνται στα ρουλεμάν ενός κινητήρα, κάνοντας, έτσι, επιτακτική την ανάγκη συχνότερης αλλαγής τους, γεγονός που αυξάνει το κόστος λειτουργίας του κινητήρα. Τέλος, τα μηχανικά μεταβατικά φαινόμενα προκαλούν κραδασμούς και θόρυβο κατά την λειτουργία του κινητήρα. Σημαντικότερες είναι οι επιπτώσεις των κραδασμών καθώς πρέπει να γίνεται πολύ προσεκτική επιλογή του μεγέθους του διακένου ώστε να αποφευχθεί τυχόν επαφή δρομέα και στάτη εξαιτίας τους.



Σχήμα 4.30: Ταχύτητα δρομέα κατά την μετάβαση από εν κενώ λειτουργία σε ονομαστικό φορτίο.

#### 4.5.7 Μηχανικές καταπονήσεις στον άξονα του κινητήρα

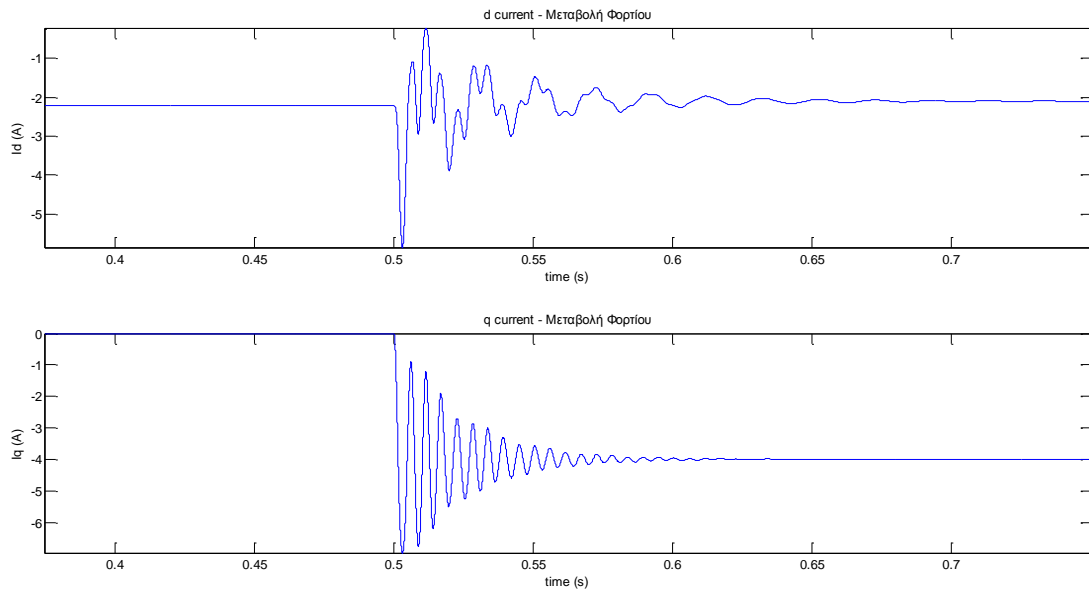
Τα ρεύματα που καταπονούν τα ηλεκτρικά κυκλώματα κατά την διάρκεια ενός μεταβατικού φαινομένου σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να αγνοηθούν. Κατά την διάρκεια που ο κινητήρας βρίσκεται σε αυτή την κατάσταση περνούν μέσα από τα τυλίγματα του ρεύματα που έχουν τιμές πολύ μεγαλύτερες από τις ονομαστικές με βάση τις οποίες και έχει γίνει η επιλογή της διατομής των καλωδίων. Αυτός ακριβώς είναι και ο λόγος που στην πλειονότητα των περιπτώσεων τροφοδοτούμε ηλεκτρικές μηχανές μέσα από διατάξεις ελέγχου ηλεκτρικών κινητήρων και όχι απευθείας από κάποια πηγή τάσης (σχήμα 4.31).



Σχήμα 4.31 Τυπικό διάγραμμα συστήματος οδήγησης ηλεκτρικού κινητήρα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι τα μεν μεταβατικά αλλαγής φορτίου δεν προκαλούν μεγάλες αυξήσεις στα ρεύματα του στάτη του κινητήρα και κυρίως πως κατά την διάρκεια ενός τριφασικού βραχυκυκλώματος δεν θα αποσυγχρονιστεί ο κινητήρας πριν να λειτουργήσουν οι διατάξεις ασφαλείας (απλούστερη διάταξή είναι αυτή του ηλεκτρονόμου). Με άλλα λόγια, πρέπει η χρονική σταθερά του μεταβατικού φαινομένου να είναι μεγαλύτερη από τη χρονική σταθερά ενεργοποίησης των προστασιών. Έτσι μπορούν να αποφευχθούν οι έντονες μηχανικές καταπονήσεις που προκαλούνται στον άξονα από έναν αποσυγχρονισμό.

Όπως και στα μηχανικά μεταβατικά, έτσι και στα ηλεκτρικά, όσο πιο έντονα είναι τόσο περισσότερο θα καταπονούνται τα ηλεκτρικά κυκλώματα του κινητήρα με αποτέλεσμα να απαιτείται και συχνότερα συντήρηση αυτού του μέρους της ηλεκτρικής μηχανής.



Σχήμα 4.32: Ρεύματα ευθέως και εγκάρσιου άξονα κατά τη μετάβαση από εν κενώ λειτουργία σε ονομαστικό φορτίο.

Η μεταβατική κατάσταση κατά την οποία υπάρχουν τα πιο έντονα ηλεκτρικά και μηχανικά μεταβατικά φαινόμενα είναι αυτή του τριφασικού βραχυκυκλώματος, που ονομάζεται αλλιώς και σφάλμα. Η τιμή του μέγιστου ρεύματος κατά την διάρκεια ενός σφάλματος αποτέλεσε ένα σημαντικό παράγοντα στην επιλογή της καταλληλότερης διαμόρφωσης.

## Κεφάλαιο 5: Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης

Η προκαταρκτική σχεδίαση δεν είναι ικανή να δώσει ακριβείς τιμές των διαστάσεων του κινητήρα. Επίσης, δεν μπορεί να ορίσει όλες τις διαστάσεις, αλλά μόνο τις πιο βασικές. Για αυτούς τους λόγους πρέπει να γίνει μία οριστικοποίηση αυτών, μέσω προσομοιώσεων. Έχοντας λοιπόν ολοκληρωθεί τόσο η προκαταρκτική σχεδίαση αλλά και έχοντας αναλύσει εκτενώς τον τρόπο με τον οποίο αντλούνται δεδομένα μέσα από τις προσομοιώσεις υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης πολλών και διαφορετικών διαμορφώσεων με σκοπό την εύρεση της ιδανικότερης. Διατηρώντας σταθερά τα γεωμετρικά μεγέθη του κινητήρα (ποσοστό μαγνήτη, πάχος μαγνήτη, πάχος δοντιού κ.α.) θα προχωρήσουμε με την σύγκριση των διαφορετικών διαμορφώσεων.

Στην συνέχεια αυτής της ενότητας, θα παρουσιαστούν εκτενώς τα αποτελέσματα που προέκυψαν έπειτα από την μελέτη των εξής διαμορφώσεων:

- 10-πολικόι κινητήρες με:
  - 12 αυλάκια (απλής και διπλής στρώσης)
  - 9 αυλάκια (διπλής στρώσης)
- 14 – πολικόι κινητήρες με :
  - 12 αύλακες (απλής και διπλής στρώσης)
  - 15 αύλακες (απλής και διπλής στρώσης)
  - 18 αύλακες (διπλής στρώσης)
- 16-πολικόι κινητήρες με:
  - 15 αύλακες (απλής και διπλής στρώσης)
  - 18 αύλακες (διπλής στρώσης)

Κατά την διάρκεια εύρεσης της καταλληλότερης διαμόρφωσης ή και των καταλληλότερων γεωμετρικών χαρακτηριστικών είναι σημαντικό ένας σχεδιαστής να μην περιορίζει τις επιλογές του σε μηχανές με συγκεκριμένο αριθμό πόλων. Με την εξέλιξη των ηλεκτρικών ισχύος μπορεί κανείς να πετύχει την κατάλληλη ταχύτητα περιστροφής κάνοντας μικρές προσαρμογές στην συχνότητα των ρευμάτων του στάτη. Ο αριθμός των πόλων δεν θα επηρεάσει την επιλογή της τελικής διαμόρφωσης. Όπως έχει αναφερθεί και στην εισαγωγή, βασικό άξονα της παρούσας εργασίας αποτελεί η σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων κινητήρων οι οποίοι και παρουσιάζουν παρόμοια ή ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Δηλαδή στην ουσία με γνώμονα το κόστος κατασκευής και λειτουργίας που έχει ένας τέτοιος κινητήρας συγκρίνουμε πολλές και διαφορετικές διαμορφώσεις τόσο ως προς την επίδοση τους όσο και προς την απόδοση τους μελετώντας τα παρακάτω βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη:

- Μέγιστη ροπή σε ονομαστική κατάσταση λειτουργίας
- Κυμάτωση της ροπής
- Ροπή ανατροπής
- Πλάτος αντί-ΗΕΔ
- Συνολική αρμονική παραμόρφωση αντί-ΗΕΔ
- Μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης
- Συνολικές απώλειες
- Ισχύς εξόδου
- Απόδοση κινητήρα
- Βάρος κινήτα

*Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης*

Καθένα από τα παραπάνω μεγέθη επηρεάζει με τον τρόπο του τόσο την επίδοση όσο και την απόδοση του κινητήρα. Είναι αρκετά δύσκολο σε αυτές τις περιπτώσεις να βρεθεί ένα ολικό μέγιστο στο οποίο και θα έχει επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή διαμόρφωση. Αυτό συμβαίνει τόσο γιατί βελτιώνοντας ένα χαρακτηριστικό επηρεάζεται ένα άλλο αλλά και εξαιτίας του γεγονότος ότι τα αποτελέσματα που εξάγουμε βασίζονται σε προσομοιώσεις και όχι σε μετρήσεις πραγματικών κινητήρων. Επίσης, στην παρούσα φάση δόθηκε ειδική μέριμνα στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η οποιαδήποτε μεταβολή στην γεωμετρία ενός μικρού κινητήρα μονίμων μαγνητών επηρεάζει τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του. Τα οριστικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά τα οποία και θα αποτελέσουν βάση σύγκρισης για τις διαφορετικές διαμορφώσεις επιλέχτηκαν ύστερα από πληθώρα προσομοιώσεων και αφού μελετήθηκε προσεκτικά πως επηρεάζει το κάθε χαρακτηριστικό την επίδοση κυρίως του κινητήρα. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις διαφορετικές διαμορφώσεις μηχανών.

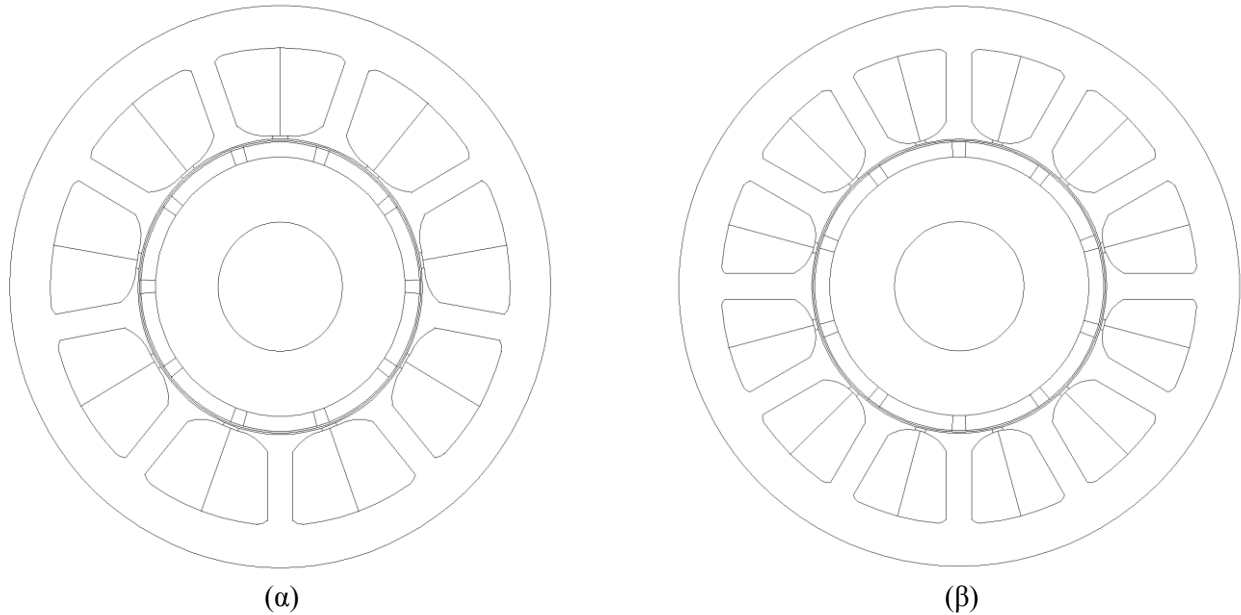
Στις διαμορφώσεις απλής στρώσης έχουν εφαρμοστεί οι διπλάσιες περιελίξεις σε σχέση με τις διαμορφώσεις απλής στρώσης με σκοπό να υπάρχει ο ίδιος αριθμός αγωγών ανά αύλακα και στις δύο περιπτώσεις.



## 5.1 Διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων

### 5.1.1: 10-πολικές διαμορφώσεις

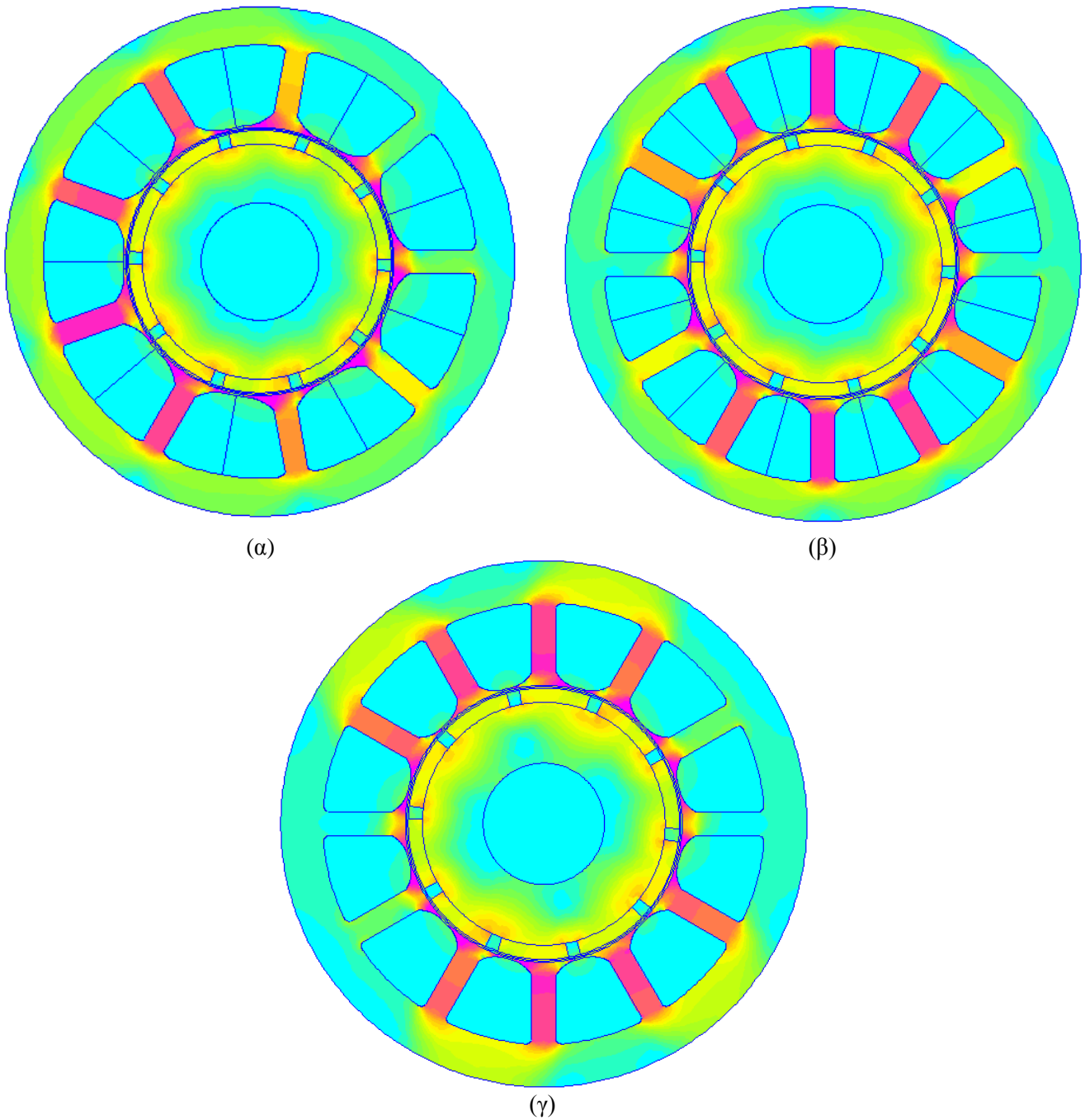
Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι όψεις των δύο διαφορετικών διαμορφώσεων 10-πολικών μηχανών που προσομοιώθηκαν:



Σχήμα 5.1: Γεωμετρίες μηχανής (α) 9/10 και (β) 12/10.

Ενώ στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι αντίστοιχες κατανομές του μαγνητικού πεδίου για την κάθε γεωμετρία μηχανής:

Χαρακτηριστικά Ρότορα		Χαρακτηριστικά Στάτη	
Αριθμός Πόλων	10	Συνολικά Αυλάκια	9 / 10
Πάχος διακένου	0,7 mm	Bt1 (Απ. Αυλ. από διάκενο)	3,5 mm
Πάχος Μαγνήτη	3,5 mm	W_tooth	6 mm
Ποσοστό Μαγνήτη	85%	L_tooth	16
Βάθος Μηχανής		65 mm	

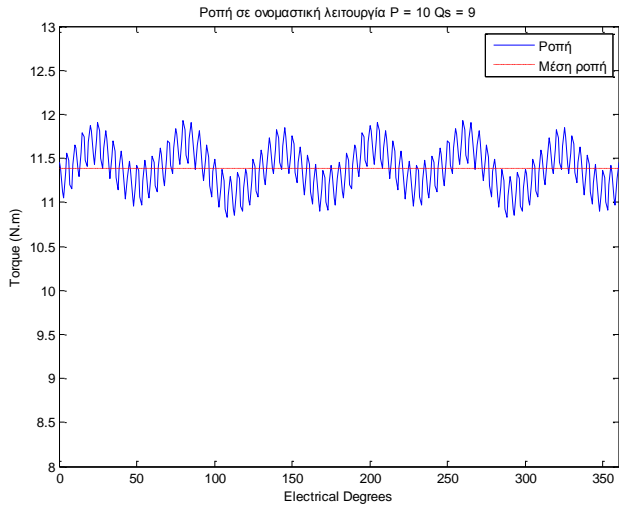


Σχήμα 5.2: Κατανομή μαγνητικού πεδίου των γεωμετριών (α) 10/9 και (β) 10/12 με τυλίγματα διπλής στρώσης και (γ) 10/12 με τυλίγματα απλής στρώσης.

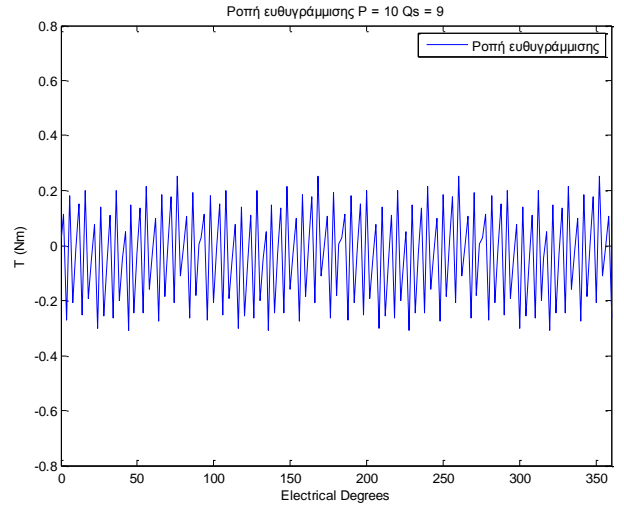
Από το παραπάνω σχήμα γίνεται και εμφανές το φαινόμενο της ασύμμετρης φόρτισης στο οποίο και έχει γίνει αναφορά κατά την προκαταρκτική σχεδίαση της μηχανής όταν γινόταν η επιλογή των συνδυασμών  $p/Q_s$ .

Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα της ροπής, της αντί-HEΔ και της ροπής ανατροπής για τις τρεις διαφορετικές διαμορφώσεις (τις δύο διπλής στρώσης και της μίας απλής στρώσης).

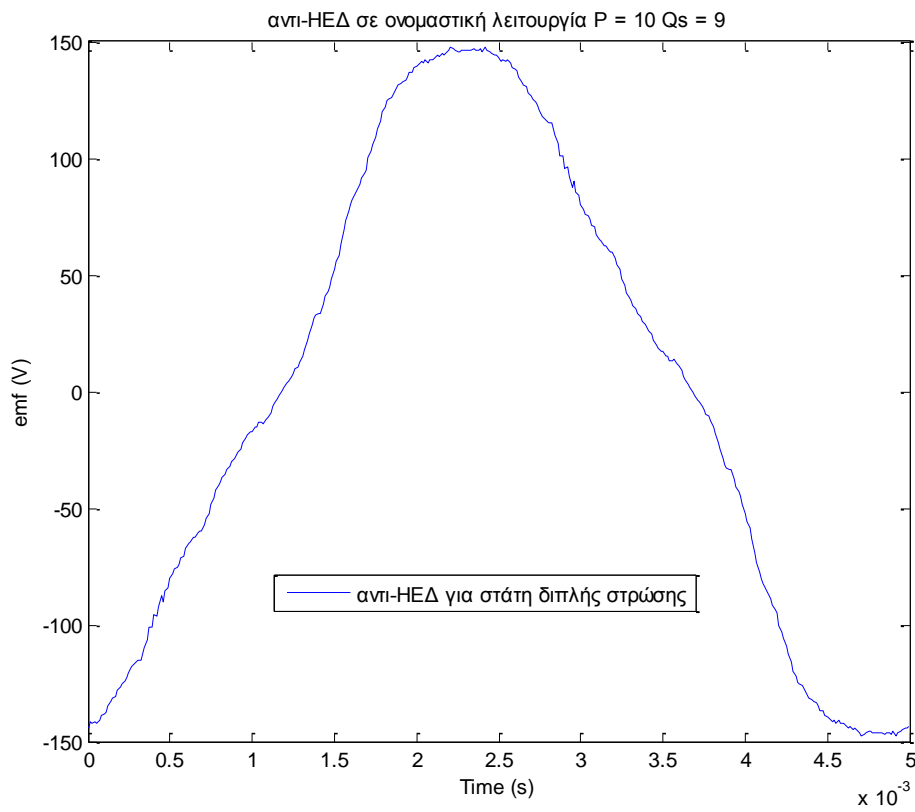
Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης



(α)



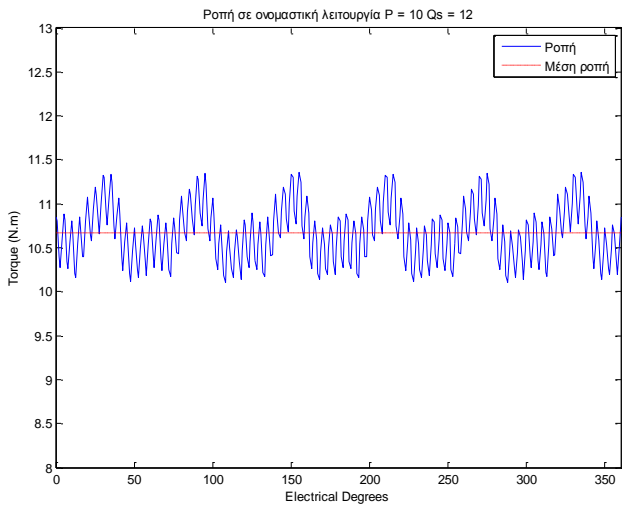
(β)



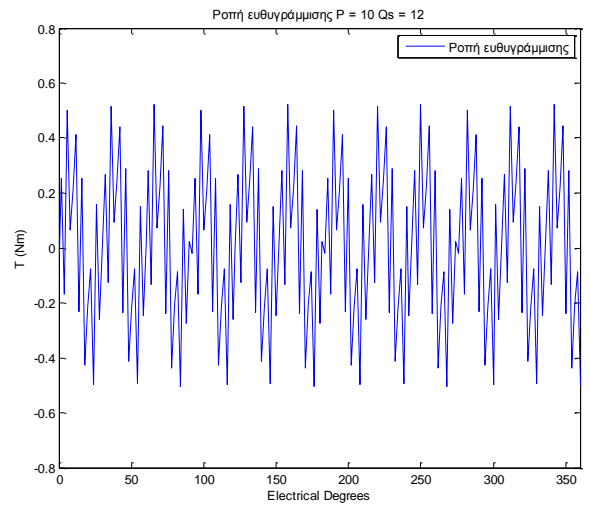
(γ)

Σχήμα 5.3: Διαγράμματα αντι-HEΔ, ροπής μόνιμης κατάστασης, ροπής κυμάτωσης και ροπής ανατροπής για την γεωμετρία 10/9 διπλής στρώσης.

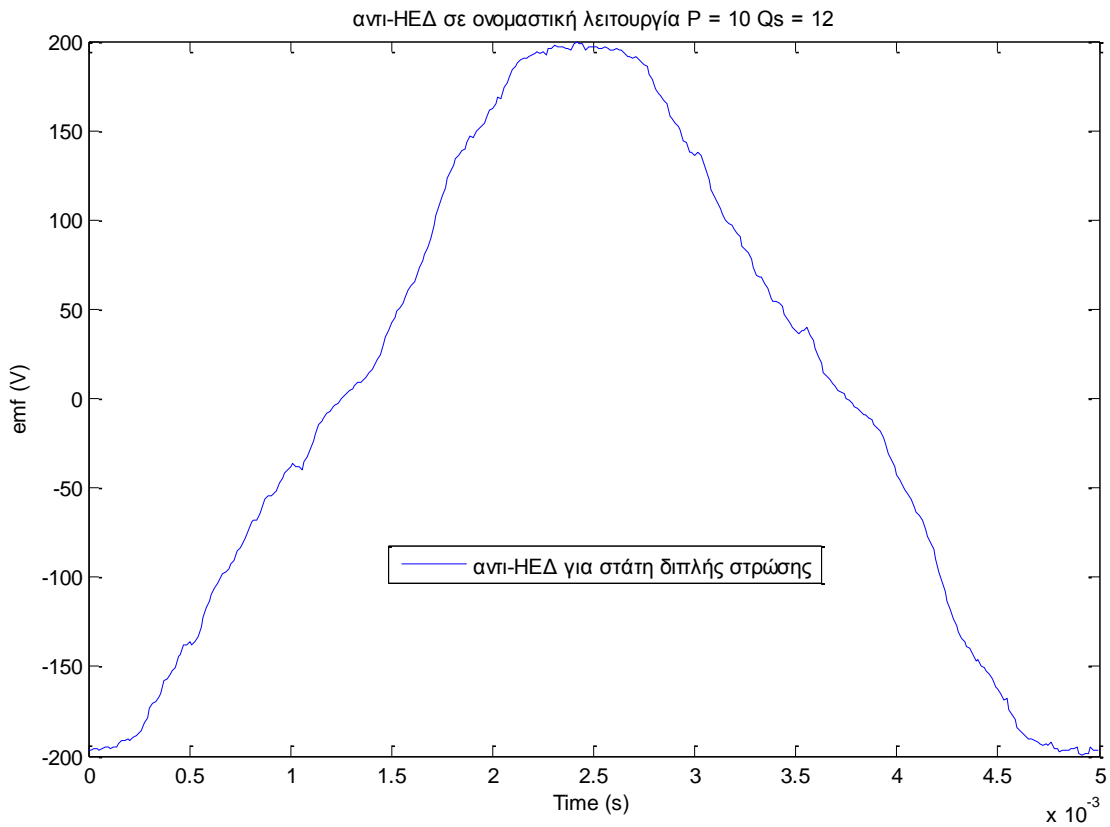
Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης



(α)



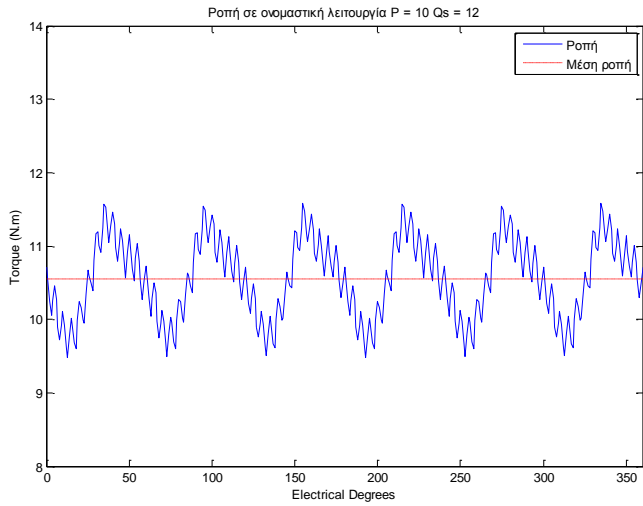
(β)



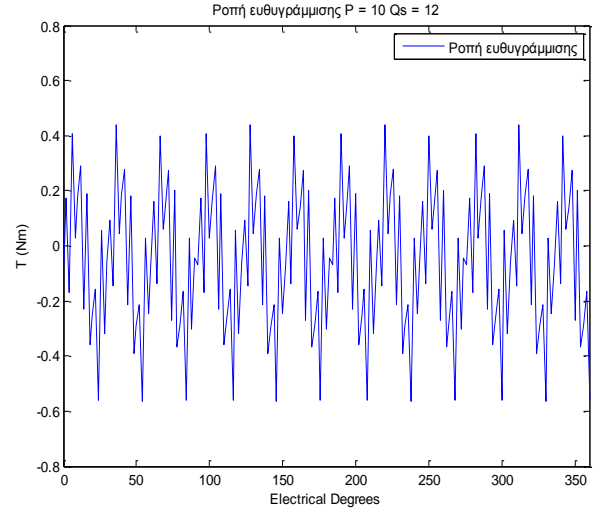
(γ)

Σχήμα 5.4: Διαγράμματα αντι-HEΔ, ροπής μόνιμης κατάστασης, ροπής κυμάτωσης και ροπής ανατροπής για την γεωμετρία 10/12 διπλής στρώσης.

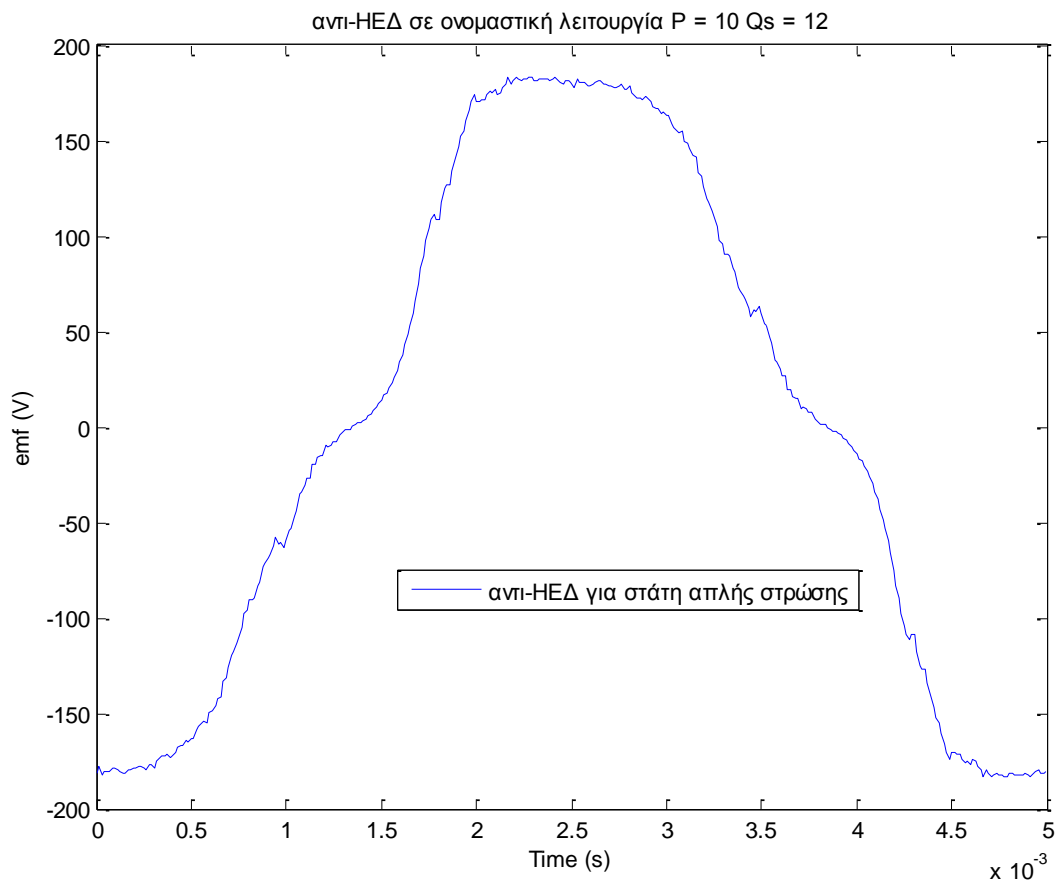
Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 5.5: Διαγράμματα αντι-HEΔ, ροπής μόνιμης κατάστασης, ροπής κυμάτωσης και ροπής ανατροπής για την γεωμετρία 10/12 απλής στρώσης.

Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης

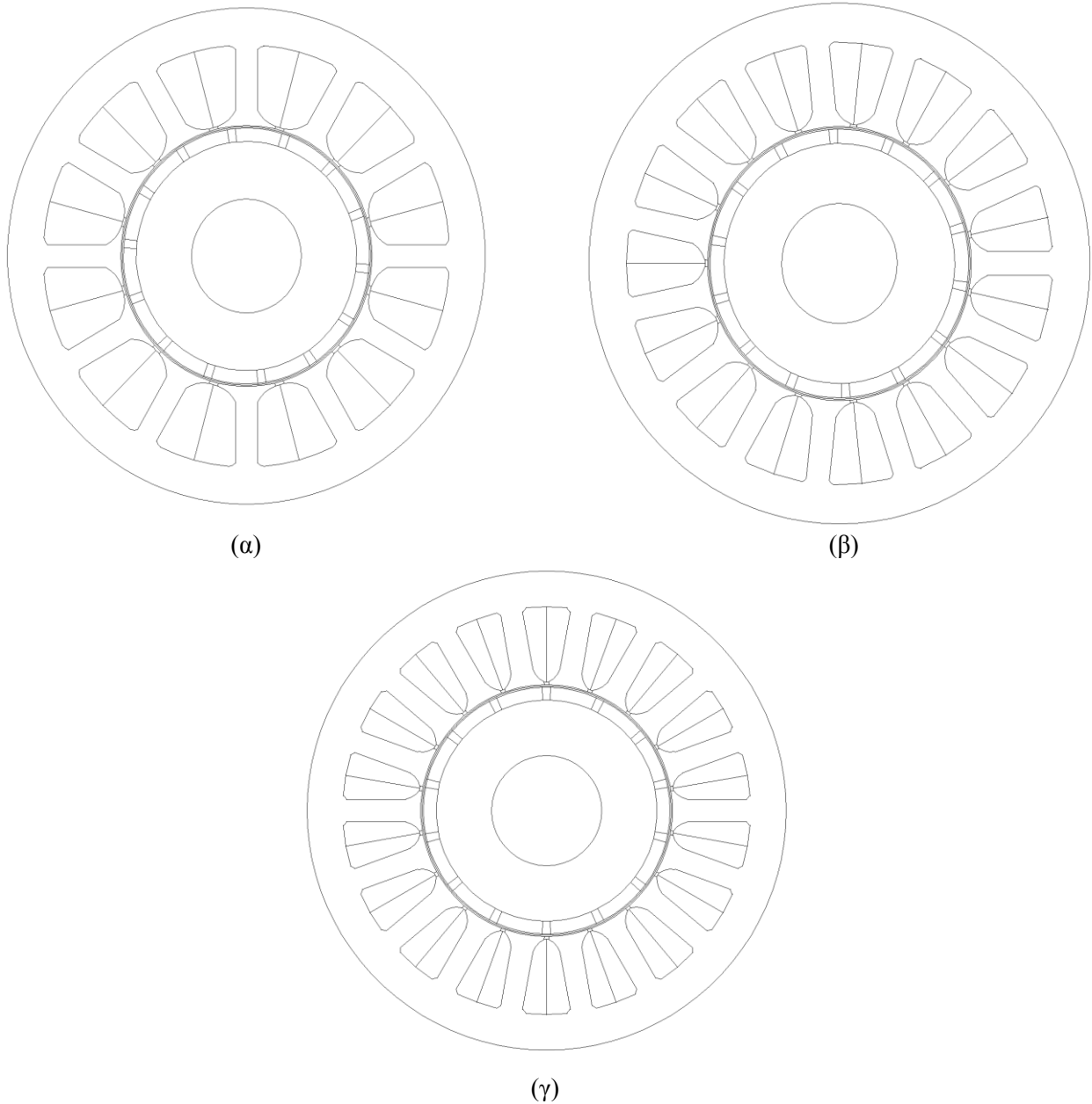
	10 – πολικοί κινητήρες		
	Αριθμός Αυλάκων (διπλή στρώση)		Αριθμός Αυλάκων (μονή στρώση)
	9	12	12
<b>Μέση ροπή (N.m)</b>	11,388	10,672	10,557
<b>Κυμάτωση ροπής (%)</b>	9,643	11,734	19,811
<b>Ισχύς Εξόδου (W)</b>	2862,229	2682,078	2653,166
<b>Απώλειες πυρήνα (W)</b>	43,867	59,953	54,084
<b>Απώλειες χαλκού (W)</b>	126,781	109,719	124,042
<b>Απόδοση κινητήρα (%)</b>	0,944	0,941	0,937
<b>Ροπή ανατροπή (%)</b>	3,423	0,575	5,692
<b>Συνολική αρμονική παραμόρφωση (%)</b>	10,789	10,809	11,509
<b><math>A_{slot}</math></b>	0,00024489	0,00016798	0,0003359
<b>Μέγιστη τιμή μαγνητικής ροής στο δόντι (T)</b>	1,56	1,79	1,71
<b>Ρεύμα βραχυκύκλωσης (A)</b>	25,03	12,75	19,43
<b>Βάρος (Kg)</b>	5,18	5,25	5,45
<b>Κατασκευαστικό Κόστος (€)</b>	44,20	44,86	45,2

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα αξίζει να σχολιαστούν τα εξής παρακάτω. Η διαμόρφωση με τα τυλίγματα απλής στρώσης παρουσιάζει χειρότερα χαρακτηριστικά ως προς την επίδοση αλλά και ως προς την απόδοση του κινητήρα. Πιο συγκεκριμένα και οι δύο διαμορφώσεις παρουσιάζουν υψηλό συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης, όπως είναι αναμενόμενο για διαμορφώσεις με μικρό αριθμό αυλάκων. Η ροπή κυμάτωσης είναι και για τις δύο περιπτώσεις απαγορευτικά υψηλή και στην περίπτωση της απλής στρώσης τυλιγμάτων παρουσιάζει τόσο υψηλά επίπεδα δείχνουν πως οποιαδήποτε βελτίωση είναι αρκετά δύσκολη. Επίσης, το ρεύμα βραχυκύκλωσης παρουσιάζει μεγαλύτερη τιμή για την διαμόρφωση απλής στρώσης, ενώ όπως ήταν αναμενόμενο το βάρος και το κατασκευαστικό κόστος είναι σχεδόν ίδιο.

Σε ότι αφορά τη διαμόρφωση με τα 9 αυλάκια στο στάτη, έχει πραγματοποιηθεί για λόγους πληρότητας και δεν θα μπορούσε να κατασκευαστεί, καθώς αν και η ροπή κυμάτωσης μοιάζει να είναι σε παρόμοια επίπεδα με αυτά των δύο άλλων διαμορφώσεων, είναι γνωστό πως διαμορφώσεις με ασύμμετρη φόρτιση προκαλούν έντονες ταλαντώσεις στον άξονα με αποτέλεσμα να προκαλείται έντονος θόρυβος κατά την διάρκεια λειτουργίας και μηχανικές καταπονήσεις του άξονα με συνέπεια την συχνότερη ανάγκη για συντήρηση.

### 5.1.2: 14-πολικές διαμορφώσεις

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι όψεις των δύο διαφορετικών διαμορφώσεων 14-πολικών μηχανών που προσομοιώθηκαν.

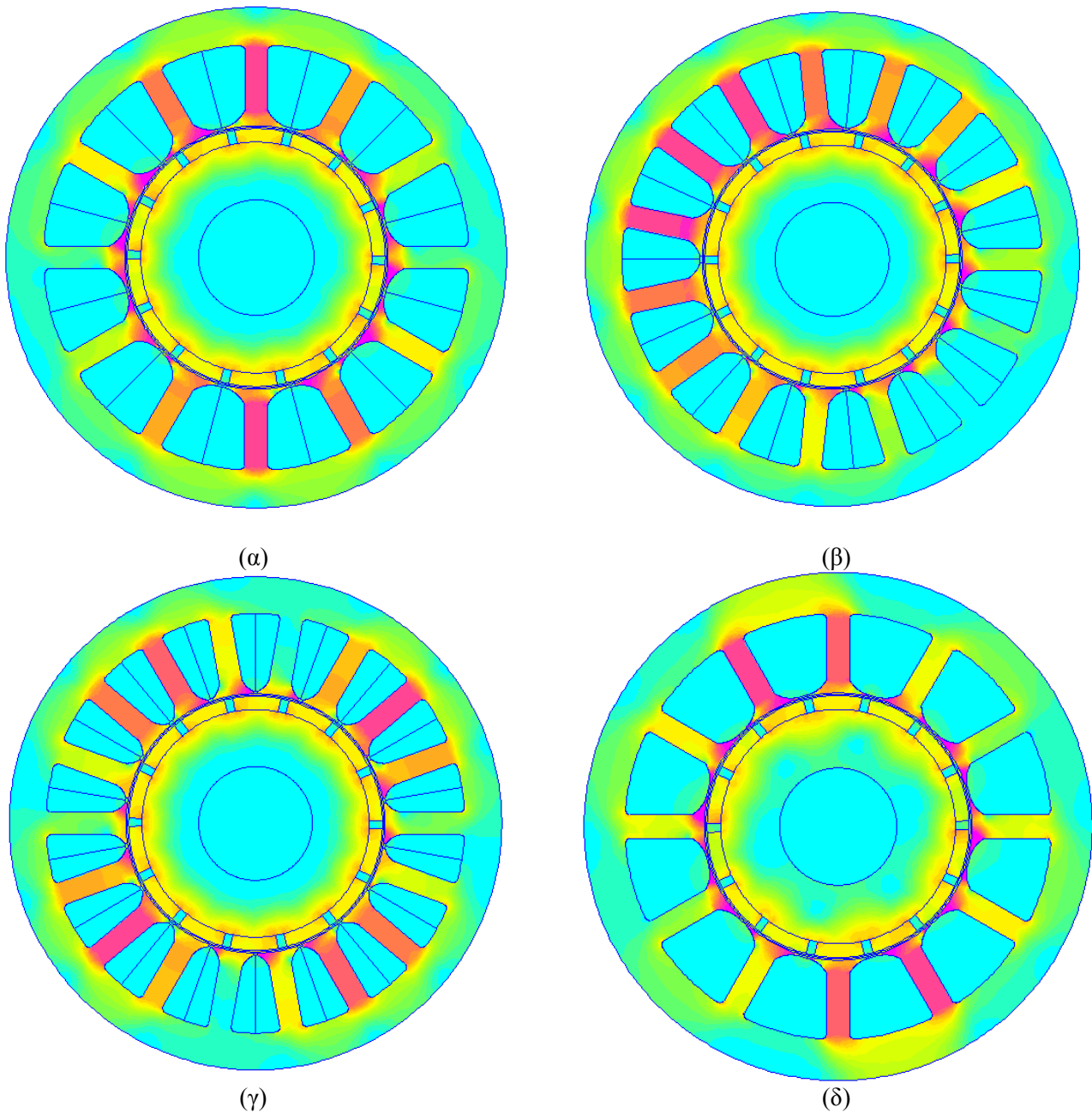


Σχήμα 5.6: Γεωμετρίες μηχανής (α) 12/14, (β) 15/14 και (γ) 18/14.

Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης

Χαρακτηριστικά Ρότορα		Χαρακτηριστικά Στάτη	
Αριθμός Πόλων	14	Συνολικά Αυλάκια	12 / 15 / 18
Πάχος διακένου	0,7 mm	Bt1 (Απ. Αυλ. από διάκενο)	3,5 mm
Πάχος Μαγνήτη	3,5 mm	W_tooth	6 mm
Ποσοστό Μαγνήτη	85%	L_tooth	16
Βάθος Μηχανής		65 mm	

Ενώ στο παρακάτω σχήμα (5.7) φαίνονται οι αντίστοιχες κατανομές του μαγνητικού πεδίου για την κάθε γεωμετρία μηχανής.

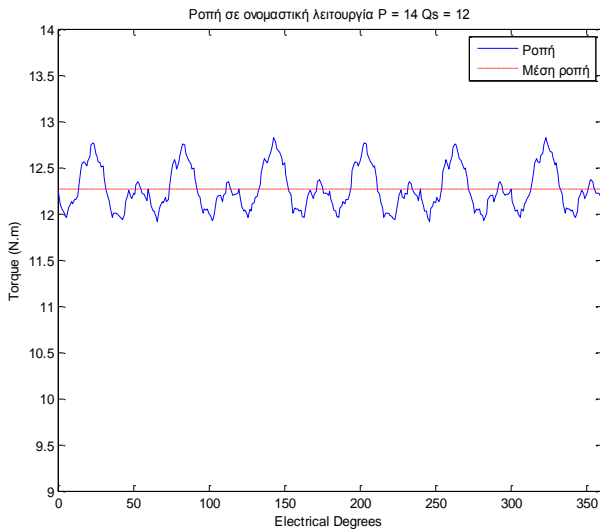


Σχήμα 5.7: Κατανομή μαγνητικού πεδίου των γεωμετριών (α) 14/12, (β) 14/15 και (γ) 14/18 με τυλίγματα διπλής στρώσης και (δ) 14/12 με τυλίγματα απλής στρώσης.

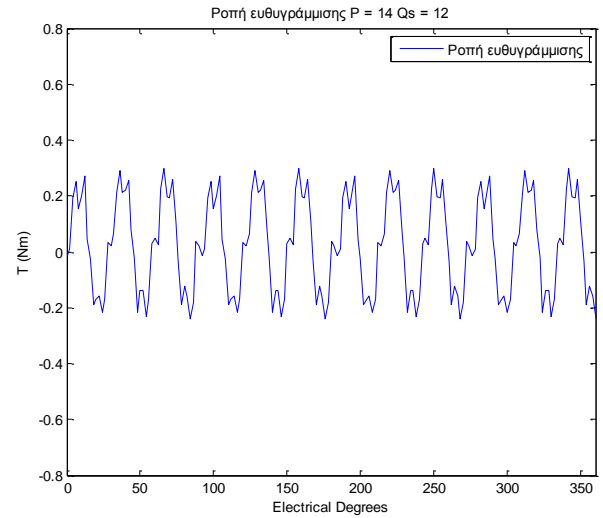


Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης

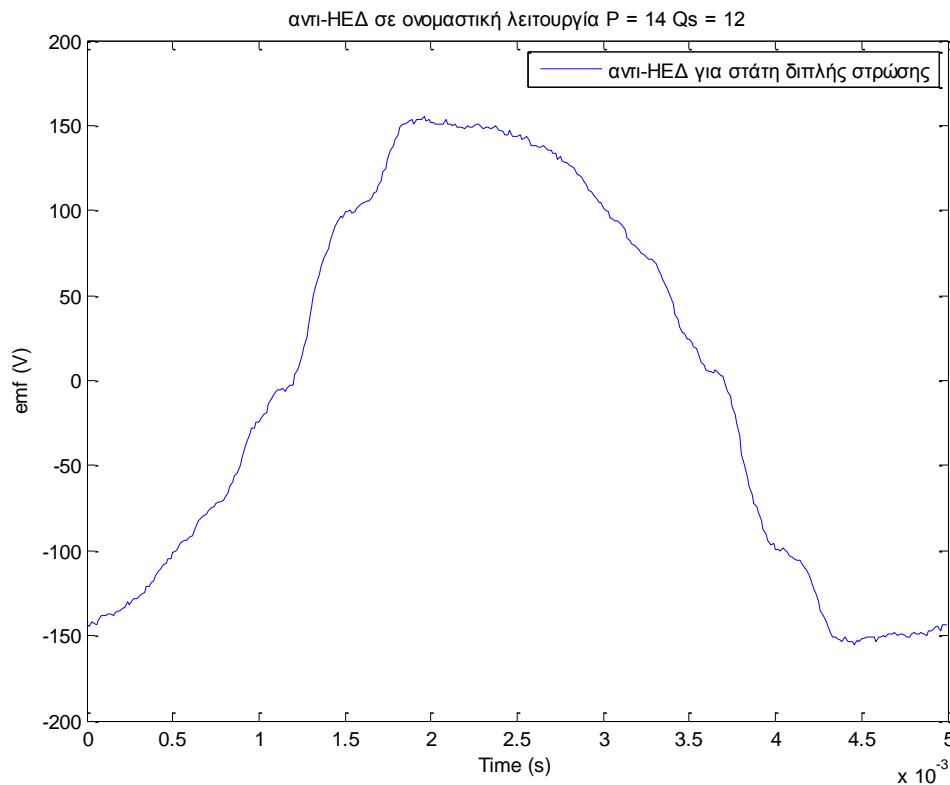
Στο σχήμα 5.7 (β) φαίνεται το φαινόμενο της ασύμμετρης φόρτισης όπως και είχε αναφερθεί από την προκαταρκτική σχεδίαση. Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα της ροπής, της αντι-HEΔ και της ροπής ανατροπής για τις τέσσερις διαφορετικές διαμορφώσεις (τις τρεις διπλής στρώσης και της μίας απλής στρώσης).



(α)



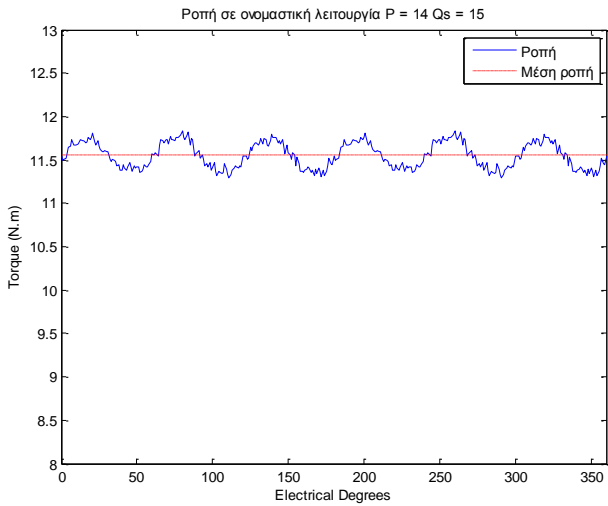
(β)



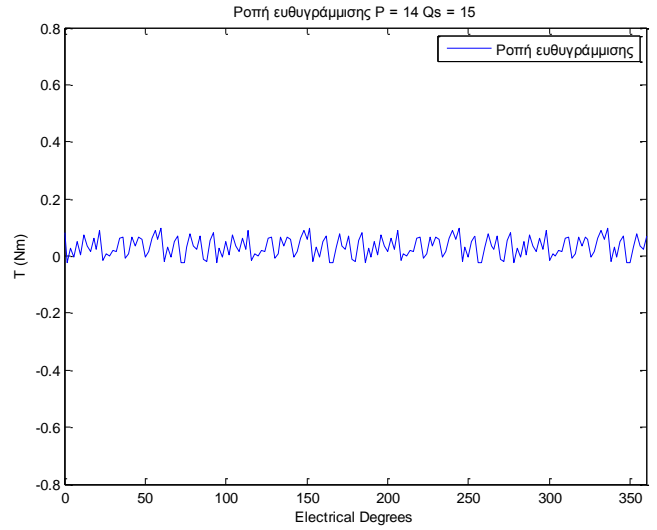
(γ)

Σχήμα 5.8: Διαγράμματα αντι-HEΔ, ροπής μόνιμης κατάστασης, ροπής κυμάτωσης και ροπής ανατροπής για την γεωμετρία 14/12 διπλής στρώσης.

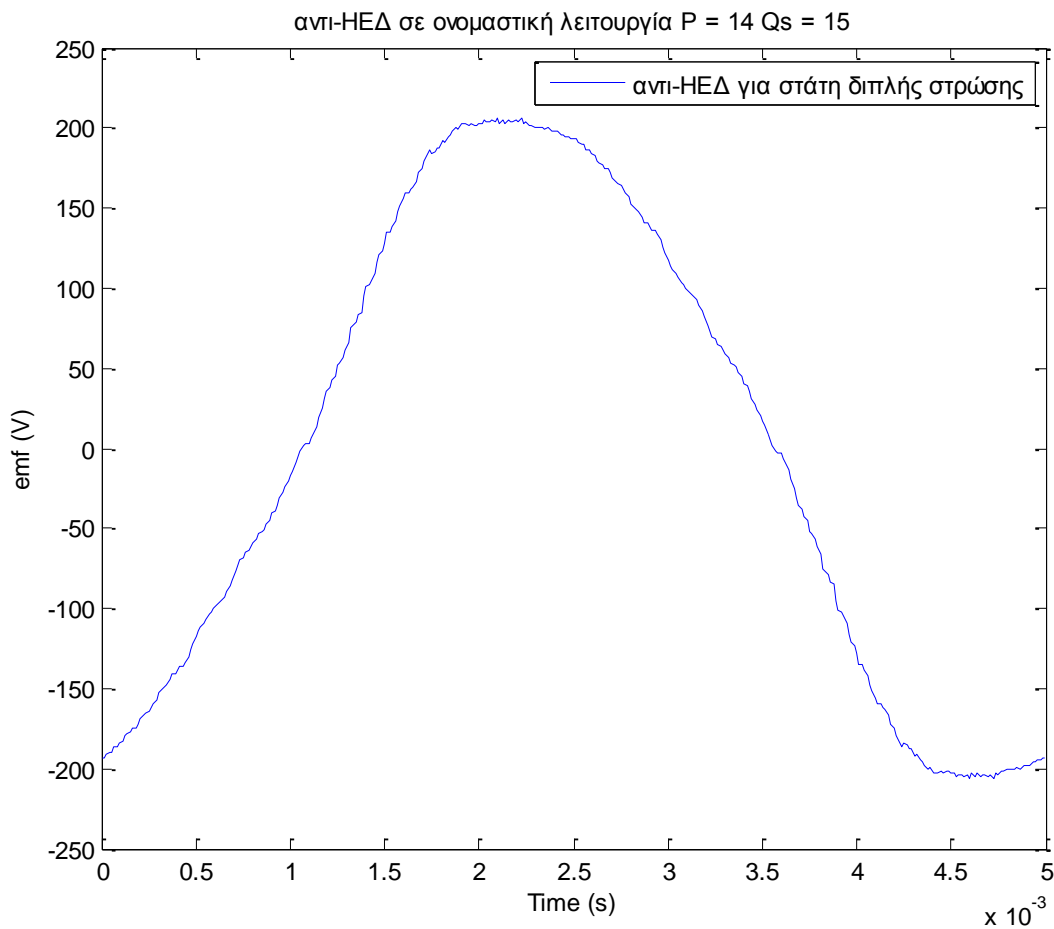
Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης



(α)



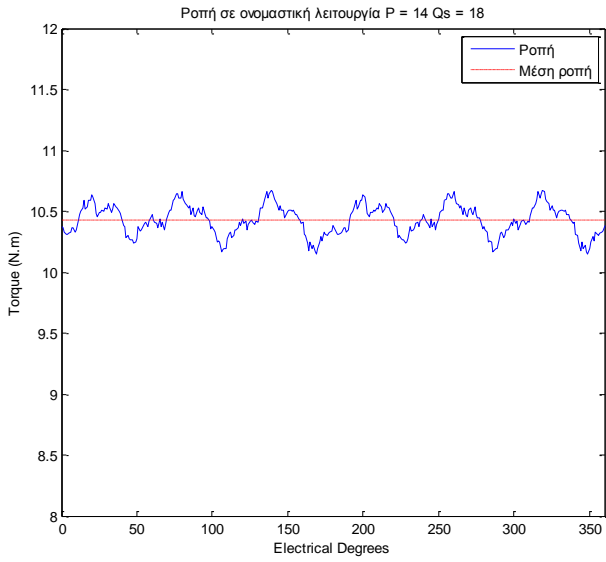
(β)



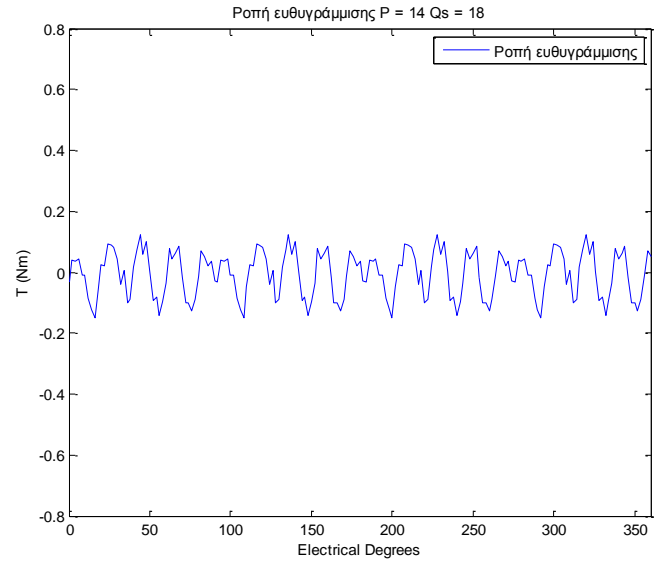
(γ)

Σχήμα 5.9: Διαγράμματα αντι-HEΔ, ροπής μόνιμης κατάστασης, ροπής κυμάτωσης και ροπής ανατροπής για την γεωμετρία 14/15 διπλής στρώσης.

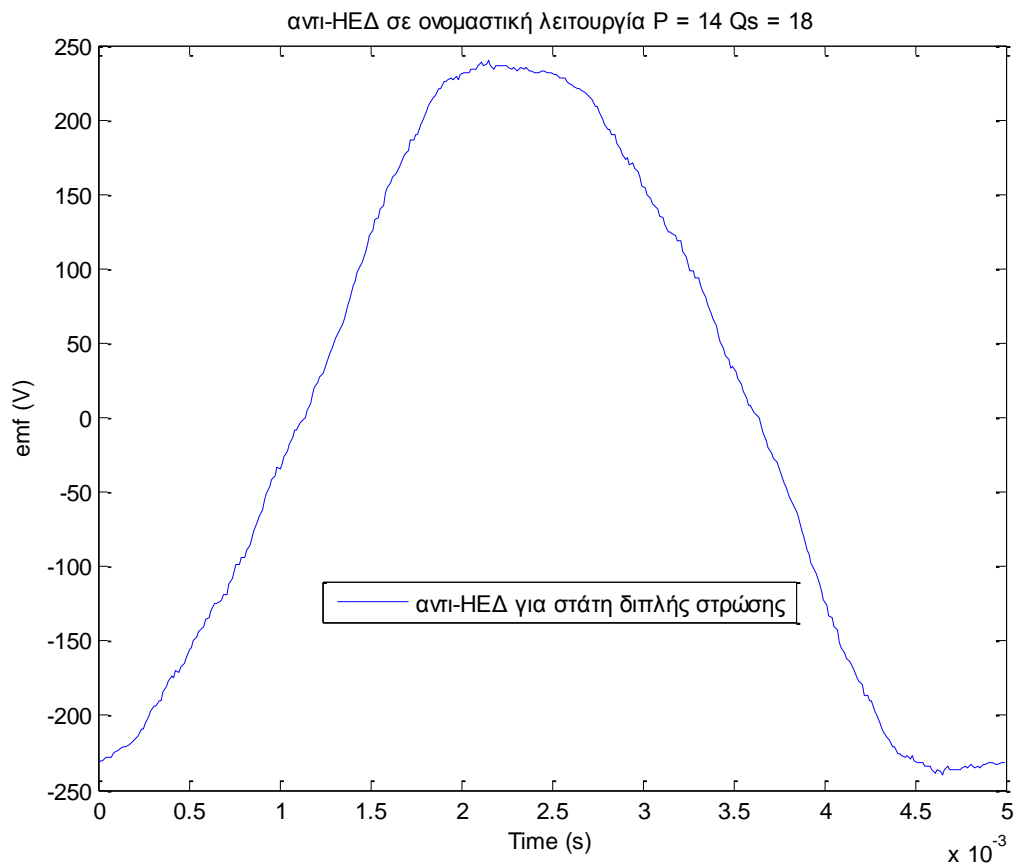
Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης



(α)



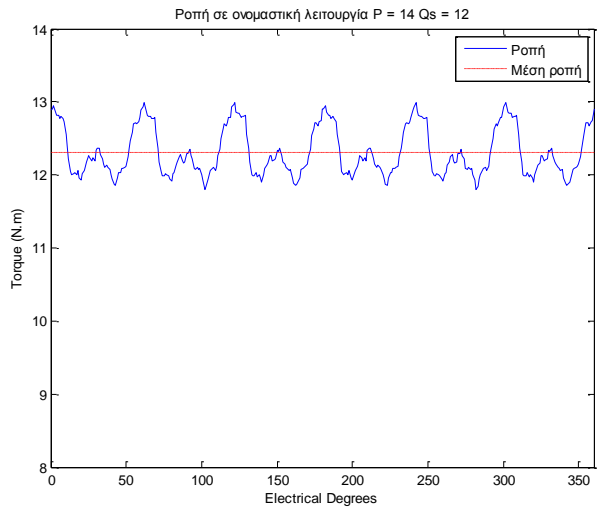
(β)



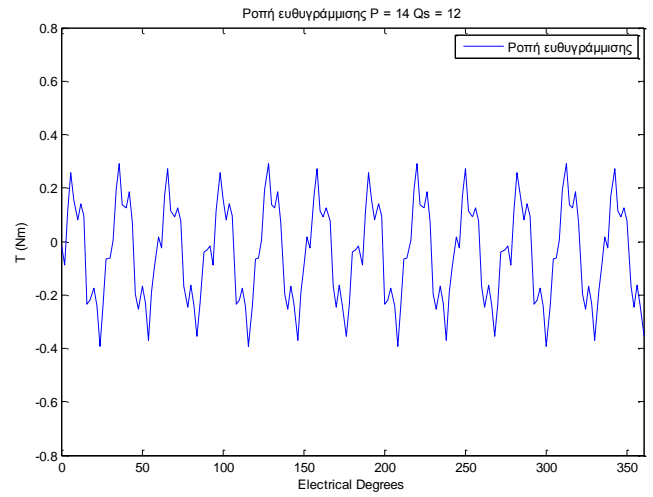
(γ)

Σχήμα 5.10: Διαγράμματα αντι-HEΔ, ροπής μόνιμης κατάστασης, ροπής κυμάτωσης και ροπής ανατροπής για την γεωμετρία 14/15 διπλής στρώσης.

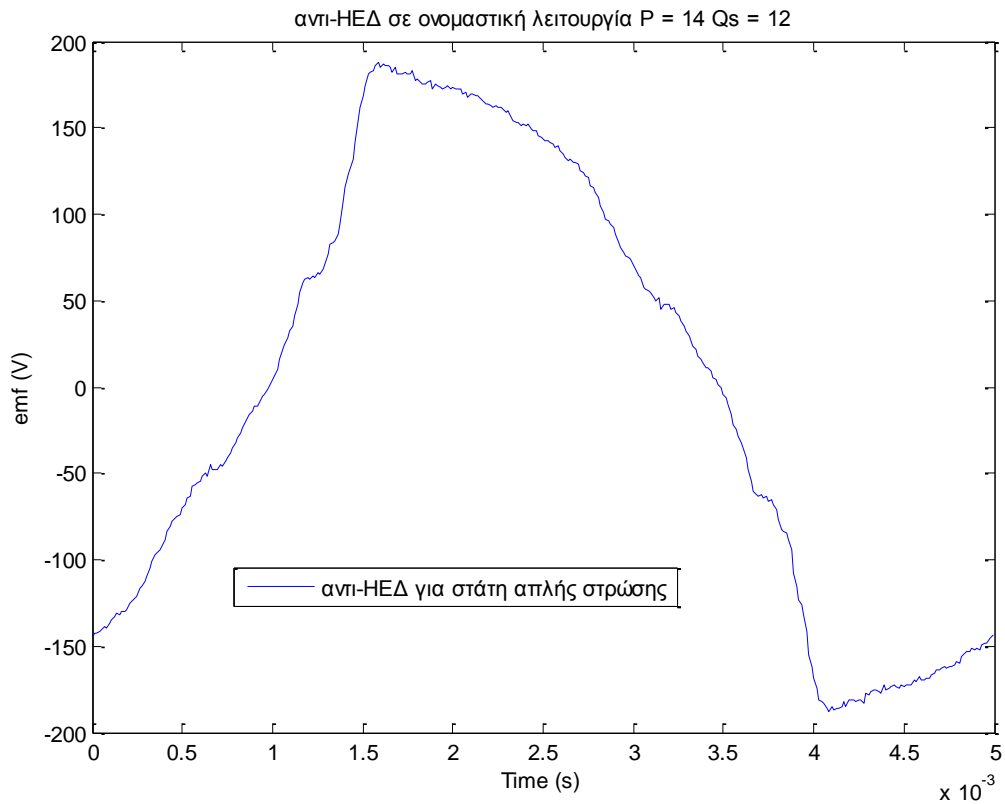
Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 5.11: Διαγράμματα αντι-HEΔ, ροπής μόνιμης κατάστασης, ροπής κυμάτωσης και ροπής ανατροπής για την γεωμετρία 14/12 απλής στρώσης.

Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης

<b>14 – πολικοί κινητήρες</b>				
	Αριθμός Αυλάκων (διπλή στρώση)			Αριθμός Αυλάκων (μονή στρώση)
	<b>12</b>	<b>15</b>	<b>18</b>	<b>12</b>
<b>Μέση ροπή (N.m)</b>	12,266	11,553	10,426	12,306
<b>Κυμάτωση ροπής (%)</b>	7,385	4,762	5,012	9,668
<b>Ισχύς Εξόδου (W)</b>	2201,946	2074,045	1871,615	2209,248
<b>Απώλειες πυρήνα (W)</b>	23,520	35,711	40,786	29,039
<b>Απώλειες χαλκού (W)</b>	109,719	96,635	85,481	124,042
<b>Απόδοση κινητήρα (%)</b>	0,943	0,940	0,937	0,935
<b>Ροπή ανατροπή (%)</b>	2,558	3,219	0,653	4,389
<b>Συνολική αρμονική παραμόρφωση (%)</b>	9,985	6,713	5,058	14,47
<b><math>A_{slot}</math></b>	0,00016798	0,00012254	0,00009251	0,0003359
<b>Μέγιστη τιμή μαγνητικής ροής στο δόντι (T)</b>	1,19	1,40	1,45	1,32
<b>Ρεύμα βραχυκύκλωσης (A)</b>	20,36	15,23	12,31	14,92
<b>Βάρος (Kg)</b>	5,25	5,32	5,39	5,35
<b>Κατασκευαστικό Κόστος (€)</b>	44,86	45,39	46,11	45,21

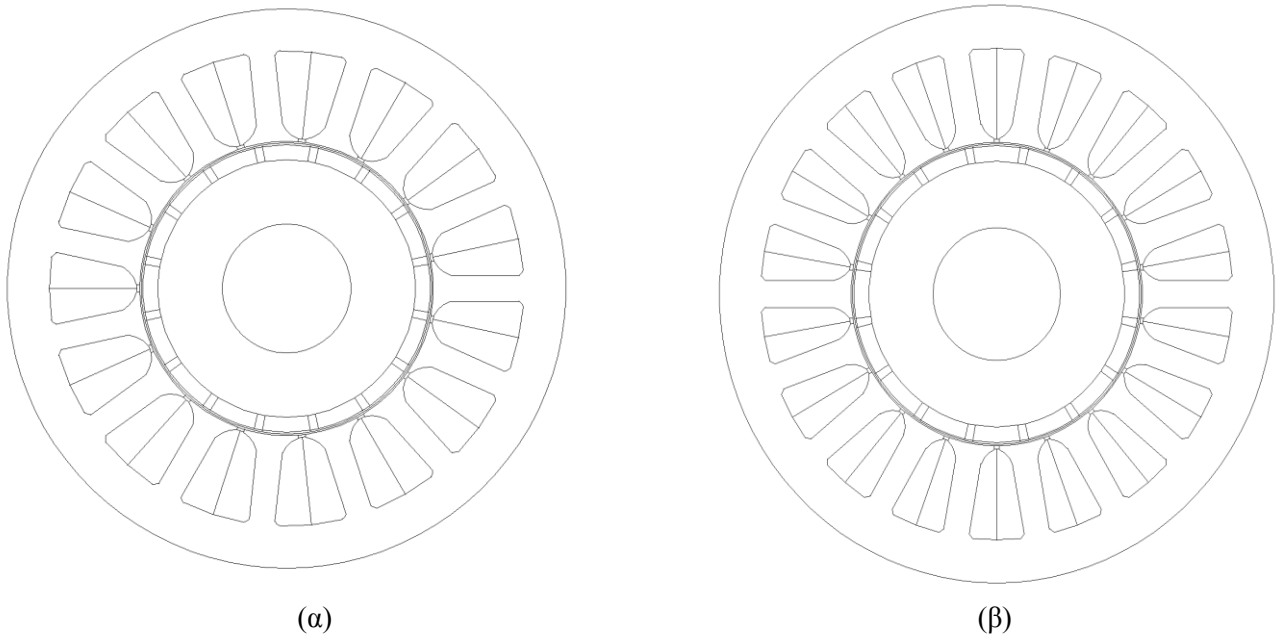
Από τον παραπάνω πίνακα μπορούν για μια ακόμα φορά να διακριθούν η υπεροχή των τυλιγμάτων διπλής στρώσης, σε σχέση με τα τυλίγματα απλής. Για τις διαμορφώσεις 14/12 παρατηρείται ότι οι δύο κινητήρες έχουν σχεδόν την ίδια ισχύ (~2,2kW), ενώ αυτός με τα τυλίγματα διπλής στρώσης παρουσιάζει 25% καλύτερη κυμάτωση στην ροπή του άξονα και 30% καλύτερη αρμονική παραμόρφωση στην αντί-HEΔ. Πρόκειται για ένα εντυπωσιακό αποτέλεσμα λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι το κατασκευαστικό κόστος των δύο κινητήρων όπως και το βάρος τους είναι σχεδόν όμοιο.

Επίσης, παρατηρείται ότι εν γένει διαμορφώσεις με μεγαλύτερο αριθμό αυλάκων παρουσιάζουν και πιο ημιτονοειδή αντί-HEΔ. Σε ότι αφορά τα ρεύματα βραχυκύκλωσης παρατηρούμε πως μειώνονται θεαματικά όσο αυξάνεται ο αριθμός των αυλακών, γεγονός που οφείλεται κυρίως στην μείωση του φασικού ρεύματος όσο μειώνεται η ενεργός επιφάνεια της αύλακας.

Καθώς μειώνεται η αποδιδόμενη ροπή στον άξονα, μειώνεται και η ισχύς του κινητήρα. Οπότε, θα αναμενόταν και μείωση του συντελεστή απόδοσης. Τουναντίον, παραμένει σχεδόν αμετάβλητη, καθώς η μείωση αυτή, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, οφείλεται στον μειωμένο όγκο χαλκού συνεπώς έχει και μειωμένες απώλειες χαλκού, που αποτελούν τη μεγαλύτερη συνιστώσα των απωλειών.

### 5.1.3: 16-πολικές διαμορφώσεις

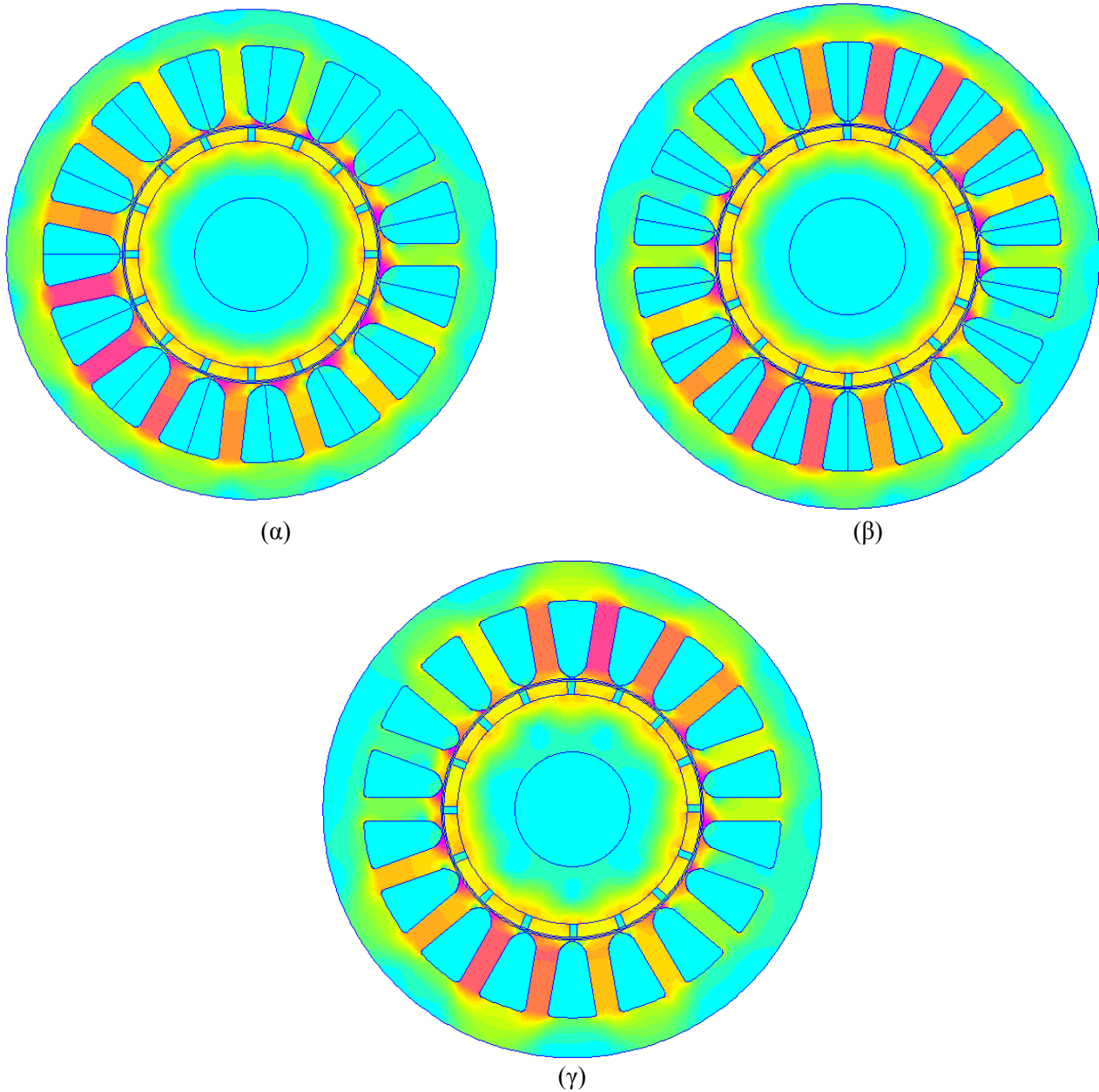
Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι όψεις των δύο διαφορετικών διαμορφώσεων 14-πολικών μηχανών που προσομοιώθηκαν.



Σχήμα 5.12: Γεωμετρίες μηχανής (α) 16/15, (β) 16/18.

Χαρακτηριστικά Ρότορα		Χαρακτηριστικά Στάτη	
Αριθμός Πόλων	16	Συνολικά Αυλάκια	15 / 18
Πάχος διακένου	0,7 mm	Bt1 (Απ. Αυλ. από διάκενο)	3,5 mm
Πάχος Μαγνήτη	3,5 mm	W_tooth	6 mm
Ποσοστό Μαγνήτη	85%	L_tooth	16
Βάθος Μηχανής		65 mm	

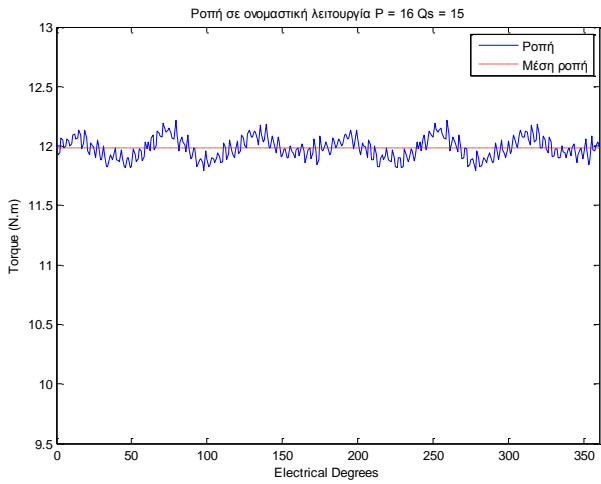
Ενώ στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι αντίστοιχες κατανομές του μαγνητικού πεδίου για την κάθε γεωμετρία μηχανής.



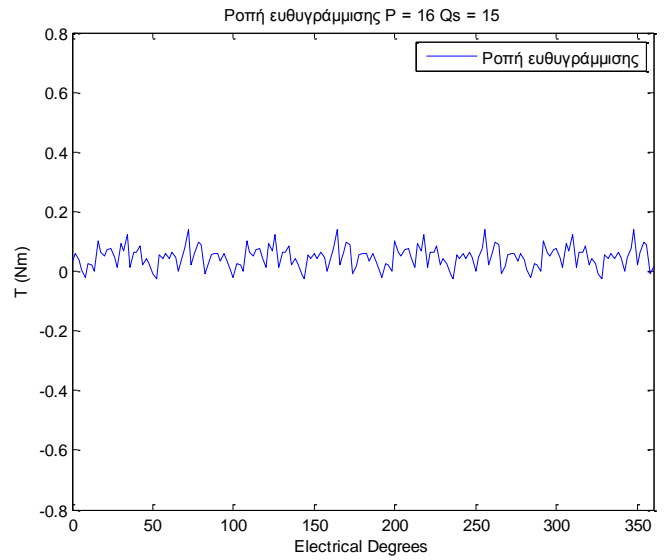
Σχήμα 5.13: Κατανομή μαγνητικού πεδίου των γεωμετριών (α) 16/15, (β) 16/18 με τυλίγματα διπλής στρώσης και (γ) 16/18 με τυλίγματα απλής στρώσης

Όπως και στις προηγούμενες γεωμετρίες έτσι και εδώ φαίνεται από την κατανομή του μαγνητικού πεδίου η ασύμμετρη φόρτιση για την μηχανή με διαμόρφωση 16/15. Παρακάτω θα παραθέσουμε κάποια από τα διαγράμματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις για τους δύο αυτούς τύπους μηχανών.

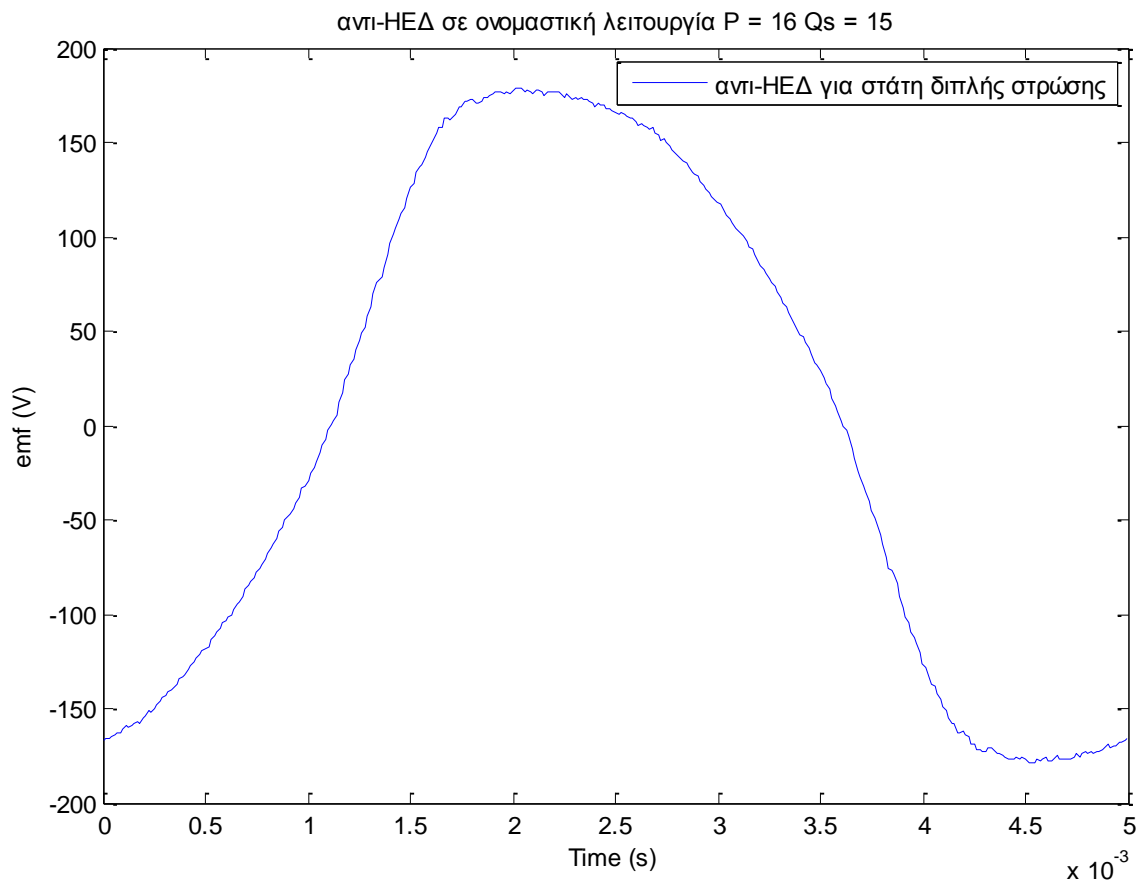
Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης



(α)



(β)

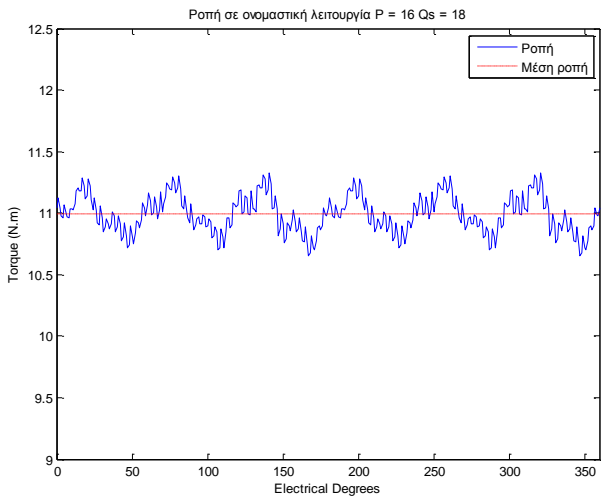


(γ)

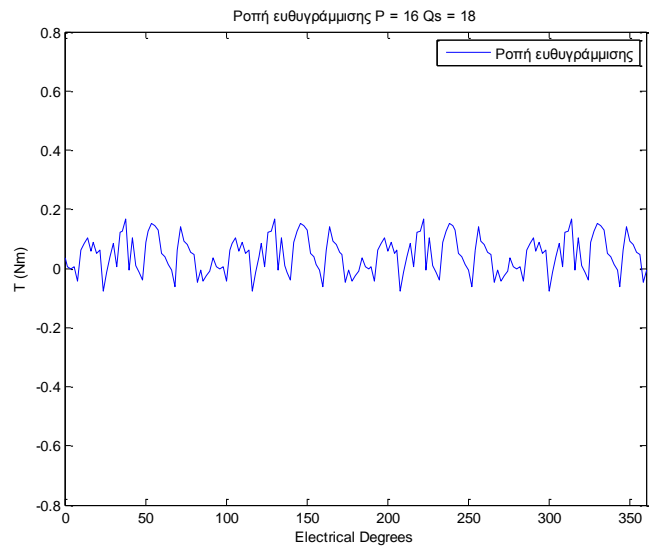
Σχήμα 5.14: Διαγράμματα αντι-ΗΕΔ, ροπής μόνιμης κατάστασης, ροπής κυμάτωσης και ροπής ανατροπής για την γεωμετρία 16/15 διπλής στρώσης.



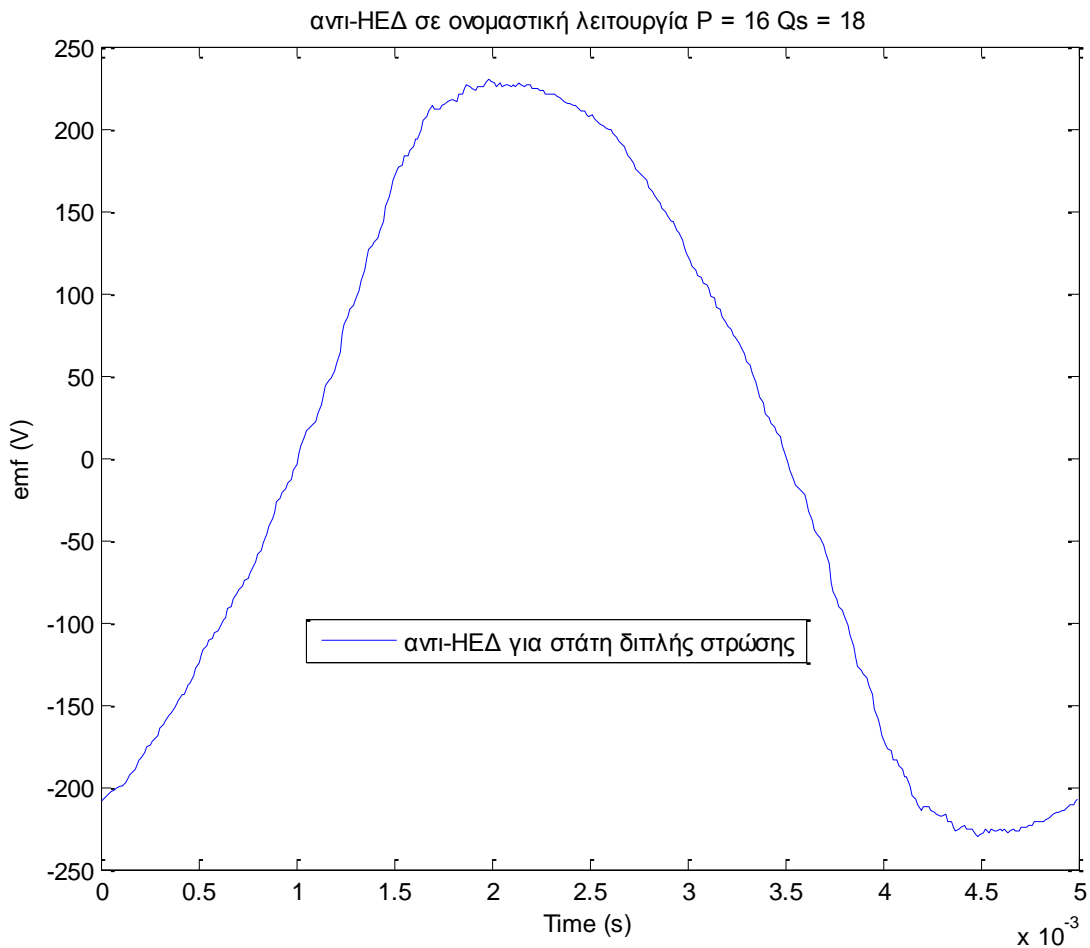
Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης



(α)



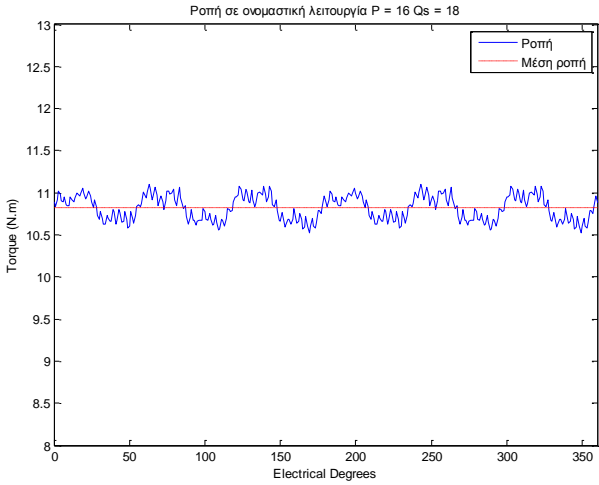
(β)



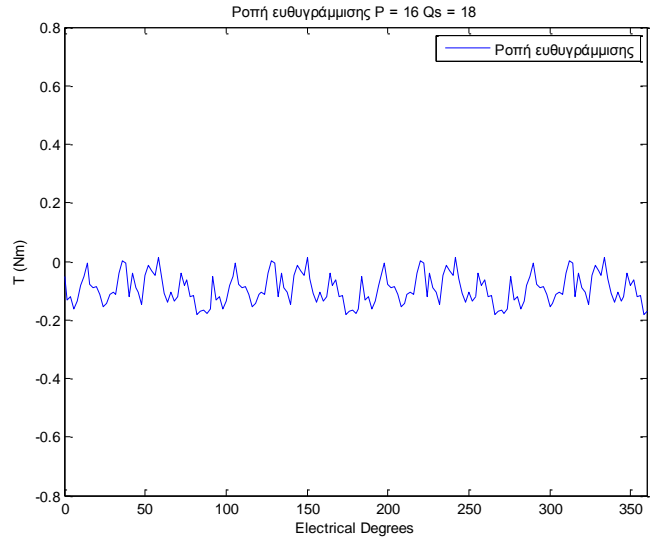
(γ)

Σχήμα 5.15: Διαγράμματα αντι-HEΔ, ροπής μόνιμης κατάστασης, ροπής κυμάτωσης και ροπής ανατροπής για την γεωμετρία 16/18 διπλής στρώσης.

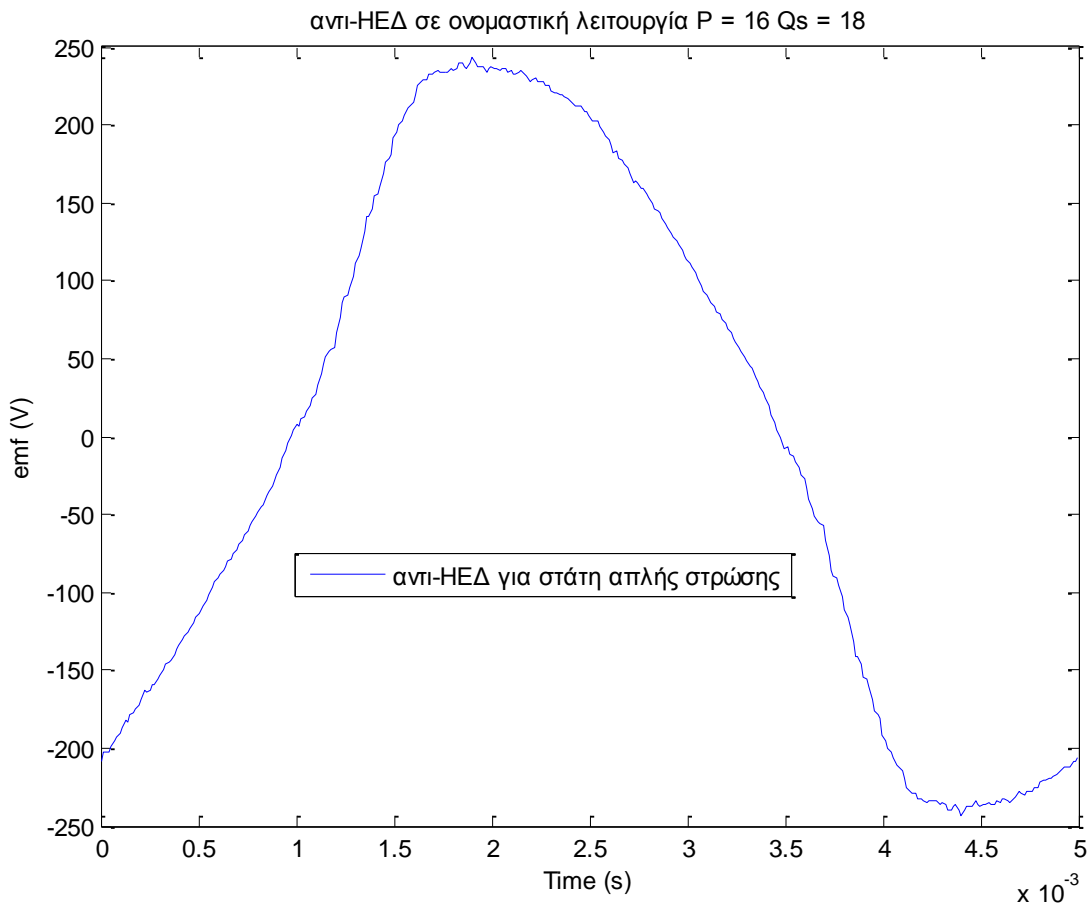
Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 5.16: Διαγράμματα αντι-HEΔ, ροπής μόνιμης κατάστασης, ροπής κυμάτωσης και ροπής ανατροπής για την γεωμετρία 16/18 απλής στρώσης.

Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης

<b>16 – πολικοί κινητήρες</b>			
	Αριθμός Αυλάκων (διπλή στρώση)		Αριθμός Αυλάκων (μονή στρώση)
	<b>15</b>	<b>18</b>	<b>18</b>
<b>Μέση ροπή (N.m)</b>	11,983	10,991	10,819
<b>Κυμάτωση ροπής (%)</b>	3,506	6,085	5,381
<b>Ισχύς Εξόδου (W)</b>	1882,238	1726,505	1699,4
<b>Απώλειες πυρήνα (W)</b>	22,077	27,493	32,528
<b>Απώλειες χαλκού (W)</b>	96,635	85,481	92,04
<b>Απόδοση κινητήρα (%)</b>	0,941	0,939	0,932
<b>Ροπή ανατροπή (%)</b>	4,742	4,458	9,496
<b>Συνολική αρμονική παραμόρφωση (%)</b>	10,603	7,200	10,2
<b><math>A_{slot}</math></b>	0,00012254	0,00009251	0,000185018
<b>Μέγιστη τιμή μαγνητικής ροής στο δόντι (T)</b>	1,13	1,22	1,31
<b>Ρεύμα βραχυκύκλωσης (A)</b>	8,32	8,93	9,35
<b>Βάρος (Kg)</b>	5,32	5,39	5,46
<b>Κατασκευαστικό Κόστος (€)</b>	45,39	46,11	46,55

Συγκρίνοντας την διαμόρφωση της 16πολικής μηχανής με τα 18 αυλάκια με την αντίστοιχη της 14πολικής, παρατηρούμε ότι παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα με σαφή υπεροχή της 14πολικής μηχανής. Στην επόμενη ενότητα θα γίνει σαφές, ότι η διαμόρφωση 14/18 δεν αποτελεί την κορυφαία διαμόρφωση αλλά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που έχει σε αυτό το βήμα είναι αρκετά κοντά στα βέλτιστα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που μπορεί να παρουσιάσει.

Και οι παραπάνω διαμορφώσεις παρουσιάζουν τιμές στα ρεύματα βραχυκύκλωσης εντός φυσιολογικών ορίων (~1,5 φορά του ονομαστικού). Συνυπολογίζοντας όλες τις παραμέτρους, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, στο επόμενο βήμα θα πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας στις διαμορφώσεις με 18 αύλακες.

## 5.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Ολοκληρώνοντας στο στάδιο των συγκρίσεων και έχοντας αποκτήσει μεγαλύτερη εμπειρία στη σχεδίαση ηλεκτρικών κινητήρων και στον τρόπο με τον οποίο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά επηρεάζουν την επίδοση και την απόδοση του κινητήρα μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Όλοι οι κινητήρες έχουν ροπή στον άξονα που πληροί τις προδιαγραφές της αρχικής σχεδίασης. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι όσο αυξάνεται ο όγκος του χαλκού αυξάνεται και η ροπή στον άξονα μη γραμμικά. Δηλαδή, μικρή ποσοστιαία αύξηση του όγκου του χαλκού προκαλεί μεγάλη ποσοστιαία αύξηση στην ροπή του κινητήρα και συνεπώς στην ισχύ του.
- Οι διαμορφώσεις απλής στρώσης παρουσιάζουν εν γένει χειρότερα χαρακτηριστικά από τις διαμορφώσεις διπλής στρώσης. Αν και η κατασκευαστική δυσκολία ενός τυλίγματος διπλής στρώσης είναι μεγαλύτερη, το κόστος των υλικών και το βάρος αυτών των κινητήρων είναι παρόμοιο, έτσι μπορούμε με ευκολία να επιλέξουμε τυλίγματα διπλής στρώσης.
- Παρατηρείται ότι όσο αυξάνονται τα αυλάκια του στάτη σε έναν κινητήρα, η συνολική αρμονική παραμόρφωση παρουσιάζει μια εντυπωσιακή μείωση ωθώντας την αντί-HEΔ του κινητήρα να πλησιάζει όλο και περισσότερο την ημιτονοειδή μορφή.
- Όλες οι διαμορφώσεις παρουσιάζουν μεγάλο συντελεστή απόδοσης με μικρές διακυμάνσεις. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω η επιλογή των 200Hz στα ρεύματα του στάτη ωθεί τον κινητήρα όχι μόνο να λειτουργεί σε υψηλότερες στροφές, αλλά και να παρουσιάζει μεγαλύτερο συντελεστή ισχύος. Αυτό συμβαίνει γιατί για δεδομένη πυκνότητα ρεύματος ο κινητήρας αποδίδει μεγαλύτερη ισχύ στον άξονα.
- Συγκρίνοντας τις απώλειες χαλκού με τις απώλειες πυρήνα παρατηρείται ότι οι απώλειες χαλκού είναι διπλάσιες και σε πολλές περιπτώσεις τριπλάσιες. Αυτό οφείλεται στην επιλογή της λαμαρίνας, η οποία έχει επιλεγεί με σκοπό την μείωση των απωλειών. Αν και οι απώλειες χαλκού αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό, όπως θα γίνει σαφές και στην επόμενη ενότητα, δύσκολα μειώνονται χωρίς να επηρεάζεται η επίδοση του κινητήρα, εν αντιθέσει με τις απώλειες πυρήνα που μπορούν να μειωθούν, αποφεύγοντας ανάλογες μειώσεις στην ισχύ του άξονα του κινητήρα.
- Αξιοσημείωτο είναι και το γεγονός ότι οι διαμορφώσεις με τυλίγματα απλής στρώσης παρουσιάζουν ελαφρώς αυξημένες απώλειες χαλκού (~10%) που οφείλεται στο μεγαλύτερο μήκος των σπειρών μεταξύ των αυλάκων.
- Τα ρεύματα βραχυκύκλωσης που έχουν υπολογιστεί παραπάνω αφορούν τριφασικό βραχυκύκλωμα στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα. Είναι σαφές, πως σχετίζονται άμεσα με το ρεύμα του στάτη στην μόνιμη κατάσταση, καθώς όσο μεγαλύτερο είναι αυτό τόσο μεγαλύτερο θα είναι και το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Έτσι στις διαμορφώσεις 10/9, 10/12 και 14/12 το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι πολύ μεγαλύτερο από τις 14/18 και 16/18.
- Το βάρος όπως και ήταν αναμενόμενο δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις ανάμεσα στις διαφορετικές διαμορφώσεις. Παρόλα αυτά ακόμα και αυτές οι μικρές διακυμάνσεις ανάλογα με την εφαρμογή, είναι δυνατόν να διαδραματίσουν

Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης

καθοριστικό ρόλο στην επιλογή της καταλληλότερης διαμόρφωσης. Σε ένα μικρό ηλεκτρικό όχημα ή σε ένα αεροπλάνο το βάρος, η καλύτερα η αποδιδόμενη ισχύς ανά μονάδα βάρους θα καθορίσει και την τελική διαμόρφωση. Αντιθέτως, σε ένα ανυψωτικό μηχάνημα το βάρος του κινητήρα δεν θα μπορούσε να αποτελέσει καθοριστικό παράγοντα επιλογής της τελικής διαμόρφωσης.

- Όπως και το βάρος των υλικών έτσι και το κατασκευαστικό κόστος δεν παρουσιάζει έντονες μεταβολές μεταξύ των διαμορφώσεων. Ως εκ τούτου, δεν θα αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην επιλογή της καταλληλότερης διαμόρφωσης. Αυτή όμως δεν είναι μια παραδοχή που θα πρέπει να κάνει πάντοτε ο σχεδιαστής ενός ηλεκτρικού κινητήρα. Όταν ο προς μελέτη κινητήρας επρόκειτο να κατασκευαστεί μαζικά και στην συνέχεια να πουληθεί, ο παράγοντας του κόστους των υλικών δεν μπορεί να αμεληθεί καθώς μικρές διακυμάνσεις στο κόστος κατασκευής ενός κινητήρα, μπορεί να αντιστοιχεί σε εκατοντάδες χιλιάδων ευρώ για έναν κινητήρα μαζικής παραγωγής.
- Στην απόφαση της τελικής διαμόρφωσης θα πρέπει οπωσδήποτε να συνυπολογιστεί και η επίδραση της ροπής ανατροπής η οποία και όχι μόνο πρέπει να υπερνικηθεί για να καταφέρει να εκκινήσει ο κινητήρας, αλλά και προκαλεί προβλήματα ταλαντώσεων και θορύβου κατά την διάρκεια λειτουργίας του κινητήρα. Ενώ φαινομενικά παρουσιάζει μη κανονικότητα ανάμεσα στις διαμορφώσεις, είναι γνωστό πως σχετίζεται άμεσα με την επίδραση της μαγνητική ροής του μόνιμου μαγνήτη με την γεωμετρία του δοντιού.

Στον ακόλουθο πίνακα διακρίνονται οι επικρατέστερες διαμορφώσεις όπως αυτές επιλέχτηκαν από την παραπάνω διαδικασία.

<b>Επικρατέστεροι Κινητήρες</b>			
	<b>14/18</b> (διπλής στρώσης)	<b>16/18</b> (διπλής στρώσης)	<b>16/18</b> (διπλής στρώσης)
<b>Μέση ροπή (N.m)</b>	10,426	10,99	10,81
<b>Κυμάτωση ροπής (%)</b>	5,01	6,09	5,38
<b>Ισχύς Εξόδου (W)</b>	1871,62	1726,5	1699,4
<b>Απώλειες πυρήνα (W)</b>	40,79	27,5	32,53
<b>Απώλειες χαλκού (W)</b>	85,48	85,48	92,04
<b>Απόδοση κινητήρα (%)</b>	0,937	0,939	0,932
<b>Ροπή ανατροπή (%)</b>	0,653	4,458	9,496
<b>Συνολική αρμονική παραμόρφωση (%)</b>	5,1	7,2	10,2
$A_{slot}$	0,00009251	0,00009251	0,000185018
<b>Μέγιστη τιμή μαγνητικής ροής στο δόντι (T)</b>	1,45	1,22	1,31
<b>Ρεύμα βραχυκύκλωσης (A)</b>	12,31	8,93	9,35
<b>Βάρος (Kg)</b>	5,39	5,39	5,46
<b>Κατασκευαστικό Κόστος (€)</b>	46,11	46,11	46,55

### 5.3 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων

Τα περισσότερα σχεδιαστικά προβλήματα περιέχουν διάφορες εξισώσεις κριτηρίων που κατά κανόνα αντικρούει η μία την άλλη. Η βελτιστοποίηση με πολλαπλά κριτήρια, επίσης γνωστή και ως βελτιστοποίηση με πολλαπλά αντικείμενα ή χαρακτηριστικά, είναι η διαδικασία της ταυτόχρονης βελτιστοποίησης δύο ή περισσότερων αντικρουόμενων ζητημάτων με διάφορους περιορισμούς.

Προβλήματα βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια μπορούν να βρεθούν σε διάφορους τομείς: παραγωγή και σχεδιασμός διαδικασιών, οικονομικά, σχεδιασμό αεροσκαφών, πετρελαϊκές βιομηχανίες, σχεδιασμό αυτοκινήτων, ή οπουδήποτε χρειάζεται να παρθεί η καταλληλότερη απόφαση για την εξισορρόπηση όλων των παραγόντων μεταξύ δυο ή περισσότερων αντικρουόμενων στόχων. Μεγιστοποιώντας το κέρδος και ελαχιστοποιώντας το κόστος ενός προϊόντος, μεγιστοποιώντας την απόδοση και ελαχιστοποιώντας την κατανάλωση καυσίμου σε ένα όχημα και ελαχιστοποιώντας το βάρος καθώς μεγιστοποιείται η αντοχή κάποιου εξαρτήματος είναι παραδείγματα προβλημάτων βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια.

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αρκετά δύσκολο να λυθούν, καθώς είναι αδύνατο να βρεθεί μοναδική λύση η οποία ταυτόχρονα θα ελαχιστοποιεί τον κάθε στόχο στο ελάχιστο δυνατό. Σε όλα τα προβλήματα βελτιστοποίησης ο σχεδιαστής πρέπει να είναι σε θέση να εντοπίσει την συμβιβαστική λύση που συνδυάζει όλα τα απαραίτητα κριτήρια. Η πιο διαισθητική προσέγγιση για την επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος είναι ο συνδυασμός όλων των αντικειμενικών συναρτήσεων σε μία μόνο συναρτησιακή μορφή, η οποία ονομάζεται συνολική αντικειμενική συνάρτηση (aggregate objective function).

Η ανάλυση ευαισθησίας αποτελεί την ευκολότερη μέθοδο βελτιστοποίησης. Διενεργώντας ανάλυση ευαισθησίας σε κάποιες παραμέτρους επιλύουμε όλα τα αριθμητικά προβλήματα που προκύπτουν και λαμβάνουμε τα αποτελέσματα. Βάσει των αποτελεσμάτων επιλέγουμε την καλύτερη γεωμετρία για τη μηχανή μας. Ένας γνωστός συνδυασμός που θα μπορούσαμε να εφαρμόσουμε ώστε να καταλήξουμε στην ιδανικότερη για την εφαρμογή μας γεωμετρία είναι το αλγεβρικό άθροισμα των αντικειμενικών συναρτήσεων πολλαπλασιασμένα με βάρη. Εφαρμόζοντας την μέθοδο αυτή υπολογίζουμε το άθροισμα  $g(x)$  των αντικειμενικών συναρτήσεων  $f_i \in F$  όπου η αντικειμενική συνάρτηση πολλαπλασιάζεται με ένα βάρος  $w_i$  που αντιπροσωπεύει τη βαρύτητα του συγκεκριμένου κριτηρίου. Έτσι με αυτή τη μέθοδο τα προβλήματα πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης, μετατρέπονται σε μονοκριτηριακά προβλήματα.

$$g(x) = \sum_{i=1}^n w_i f_i(x)$$

Κατά κανόνα, αποδεκτό είναι ότι:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

για να έχουν οι συντελεστές βάρους ένα πραγματικό νόημα που δεν θα προκαλεί προβλήματα κλίμακας και το εύρος της διακύμανσης των κριτηρίων να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Μεταβάλλοντας τις τιμές των βαρών, θα προκύψουν διαφορετικές λύσεις του προβλήματος, οι οποίες και θα αντιστοιχούν σε διαφορετικές εφαρμογές (π.χ. άλλη τελική διαμόρφωση προκύπτει για κινητήρα πλοίου και άλλη για κινητήρα ηλεκτρικού οχήματος).

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της παραπάνω μεθόδου είναι ο μεγάλος υπολογιστικός χρόνος επίλυσης των αριθμητικών προβλημάτων. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου οι παράμετροι είναι περισσότεροι από δύο. Ο χρήστης θα πρέπει να είναι σε θέση να αποφασίσει ποιες είναι εκείνοι οι παράμετροι που επηρεάζουν περισσότερο τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε εφαρμογής και να εφαρμόσει την μέθοδο σε αυτές τις παραμέτρους.

Από την άλλη πλευρά, αυτό το μειονέκτημα θα μπορούσε να αποτελέσει ταυτόχρονα και πλεονέκτημα για τον χρήστη καθώς δίνει ένα οπτικό αποτέλεσμα του τρόπου με τον οποίο οι διάφορες παράμετροι επηρεάζουν την επίδοση και την απόδοση μιας ηλεκτρικής μηχανής. Με αυτό τον τρόπο, ο χρήστης σιγά-σιγά αποκτά όλο και μεγαλύτερη εμπειρία πάνω στην σχεδίαση ηλεκτρικών μηχανών. Τέλος, πρόκειται για μια μέθοδο πολύ εύκολη στην εφαρμογή της σε οποιοδήποτε πρόβλημα σχεδιασμού.

#### 5.4 Εφαρμογή αντικειμενικών συναρτήσεων στον σχεδιασμό κινητήρων

Στη συνέχεια, θα πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας του κινητήρα για την κατάσταση μόνιμης λειτουργίας της μηχανής, κατά την οποία τα τυλίγματα του στάτη θα διαρρέονται από ρεύμα  $4 \text{ A/mm}^2$ . Σε αυτό το βήμα θα μελετηθεί η επίδραση των παρακάτω γεωμετρικών μεγεθών:

- Εύρος μαγνήτη
- Πάχος μαγνήτη
- Μήκος δοντιού
- Πάχος δοντιού

Οι αναλύσεις ευαισθησίας θα πραγματοποιηθούν σε δύο στάδια για κάθε τύπο κινητήρα. Αρχικά, θα μεταβάλουμε το εύρος του μαγνήτη με το πάχος του δοντιού και στη συνέχεια θα μεταβάλουμε το πάχος του μαγνήτη με το πλάτος του δοντιού. Τα παραπάνω γεωμετρικά χαρακτηριστικά επιλέχθηκαν καθώς επηρεάζουν έντονα τόσο την επίδοση του κινητήρα όσο και την απόδοση του. Επίσης, ο τρόπος με τον οποίο συνδυάζονται δεν είναι τυχαίος, καθώς μετά από αρκετές δοκιμές παρατηρήθηκε ότι αυτός ο συνδυασμός οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου των αντικειμενικών συναρτήσεων. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό έγκειται κυρίως στον τρόπο με τον οποίο ο συνδυασμός εύρους του μαγνήτη με το πάχος του δοντιού επηρεάζουν την συνολική αρμονική παραμόρφωση του κινητήρα (ένα χαρακτηριστικό που δύσκολα μπορεί να βελτιωθεί με μεγάλο βαθμό).

## Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης

Τα κριτήρια που έχουν τεθεί για την επιλογή της βέλτιστης γεωμετρίας είναι κοινά για όλες τις μηχανές και είναι τα εξής:

- Μέση ροπή
- Απόδοση
- Κυμάτωση ροπής
- Συνολική αρμονική παραμόρφωση της αντί-HEΔ
- Ροπή ευθυγράμμισης
- Ρεύμα βραχυκύκλωσης
- Βάρος κινητήρα
- Κατασκευαστικό κόστος

Ξεκινώντας τις πρώτες αναλύσεις ευαισθησίας παρατηρήθηκε τόσο ότι θα ήταν λάθος να αρκεστούμε στα αποτελέσματα της προκαταρκτικής σχεδίασης για την επιλογή της καταλληλότερης διαμόρφωσης όσο και πως θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια συστηματική και αντικειμενική μέθοδος για την επιλογή της καταλληλότερης διαμόρφωσης.

Κατά την διάρκεια σχεδίασης μιας μηχανής η επίδοση και η απόδοση της μηχανής είναι πάντοτε αντίπαλα δέοντα. Όσο κανείς προσπαθεί να βελτιώσει την απόδοση, μειώνει την επίδοση μιας μηχανής και αντίστροφα. Ο αντικειμενικός σκοπός της βελτιστοποίησης είναι η ικανοποίηση των απαιτήσεων της εφαρμογής και η ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση κόστους. Μια ηλεκτρική μηχανή επιβαρύνει τον κατασκευαστή αλλά και τον χρήστη της με τα εξής κόστη:

- Κόστος κατασκευής
- Λειτουργικά Κόστη

Το κατασκευαστικό κόστος αποτελείται τόσο από το κόστος των υλικών κατασκευής όσο και από το κόστος των εργασιών που απαιτούνται για την κατασκευή της ηλεκτρικής μηχανής. Επειδή σε όλες τις περιπτώσεις οι κινητήρες που κατασκευάζονται έχουν την ίδια κατασκευαστική δυσκολία, θεωρούμε αυτό το κόστος ίδιο για όλες τις περιπτώσεις και το αμελούμε (ένα σταθερό κόστος δεν μπορεί να επηρεάσει το ολικό ελάχιστο της αντικειμενικής συνάρτησης).

Το λειτουργικό κόστος αποτελείται από το κόστος λειτουργίας και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται κατά την διάρκεια ζωής της μηχανής. Μεγέθη όπως είναι η ροπή κυμάτωσης και η αρμονική παραμόρφωση της τάσης επηρεάζουν άμεσα αυτά τα κόστη της μηχανής. Μπορεί να είναι αρκετά δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί το χρηματικό ποσό με το οποίο και επηρεάζεται το λειτουργικό κόστος ενός κινητήρα αλλά γνωρίζουμε ότι όσο αυξάνει η κυμάτωση της ροπής ή η αρμονική παραμόρφωση τόσο αυξάνεται και το λειτουργικό κόστος της μηχανής. Επιθυμητή, τόσο για την ροπή κυμάτωσης όσο και για την αρμονική παραμόρφωση, είναι οποιαδήποτε τιμή κάτω από το 5%.



## 5.5 Διερεύνηση αριθμού στρώσεων και γεωμετρίας κινητήρα

Όπως έχει αναφερθεί και στην προηγούμενη ενότητα, οι επικρατέστερες γεωμετρίες για κινητήρες διπλής στρώσης είναι οι 18/14 και 18/16, ενώ στην περίπτωση τυλιγμάτων απλής στρώσης είναι η 18/16. Αυτοί είναι και οι τρεις κινητήρες των οποίων τα χαρακτηριστικά θα διερευνηθούν περαιτέρω ώστε να προκύψει και η επικρατέστερη γεωμετρία.

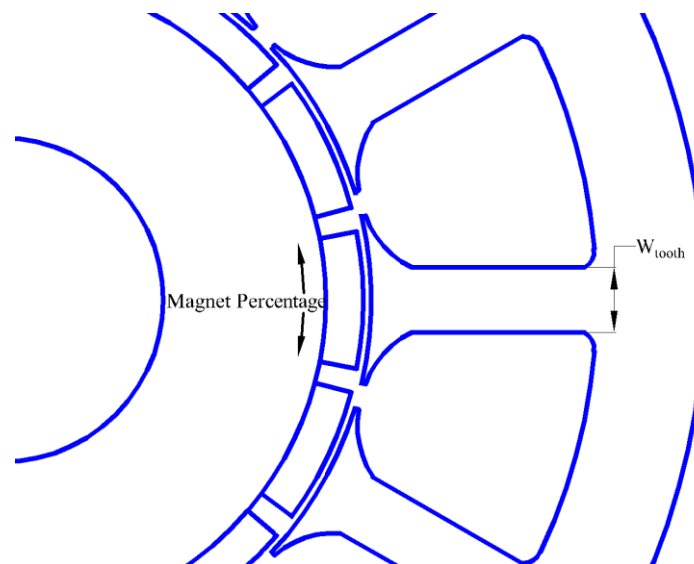
Από την παραπάνω επιλογή προκύπτουν και δύο εύλογα ερωτήματα:

- Γιατί δεν επιλέχθηκε μόνο η επικρατέστερη γεωμετρία για ανάλυση ευαισθησίας.
- Γιατί θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση για τρεις κινητήρες και όχι για όλους.

Οι απαντήσεις στα παραπάνω δύο ερωτήματα δεν ήταν σαφής από την πρώτη στιγμή που πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευαισθησίας στις διαφορετικές γεωμετρίες. Αποκτώντας εμπειρία πάνω σε αυτή την διαδικασία παρατηρήθηκε ότι οι βελτιώσεις που μπορεί να παρουσιάσει ένας κινητήρας εφαρμόζοντας την παραπάνω μέθοδο είναι περιορισμένες. Έχοντας λοιπόν την παραπάνω πληροφορία κατά νου, αλλά και με το σκοπό να παρουσιαστούν οι διαφορές σε ένα στάτη με τυλίγματα απλής και με τυλίγματα διπλής στρώσης, επιλέχθηκαν οι δύο επικρατέστερες γεωμετρίες διπλής στρώσης και η επικρατέστερη απλής στρώσης.

### 5.5.1: 1<sup>ο</sup> στάδιο ανάλυσης ευαισθησίας

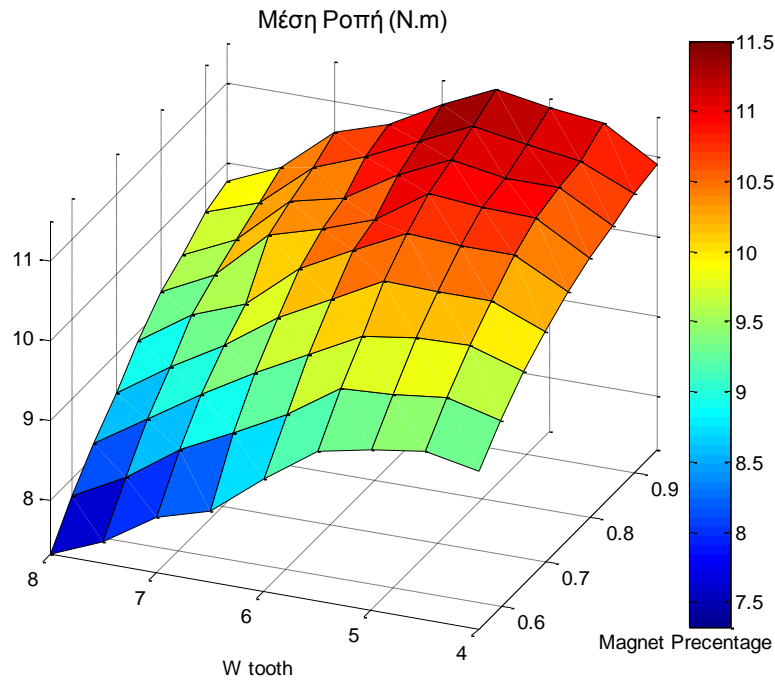
Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα όπως αυτά προέκυψαν μεταβάλλοντας το εύρος του μαγνήτη και το πάχος του δοντιού του στάτη ταυτόχρονα. Το πάχος του μαγνήτη και το πλάτος του δοντιού παραμένουν σταθερά και ανεξάρτητα των μεταβολών όπως και κάθε άλλο γεωμετρικό χαρακτηριστικό του κινητήρα.



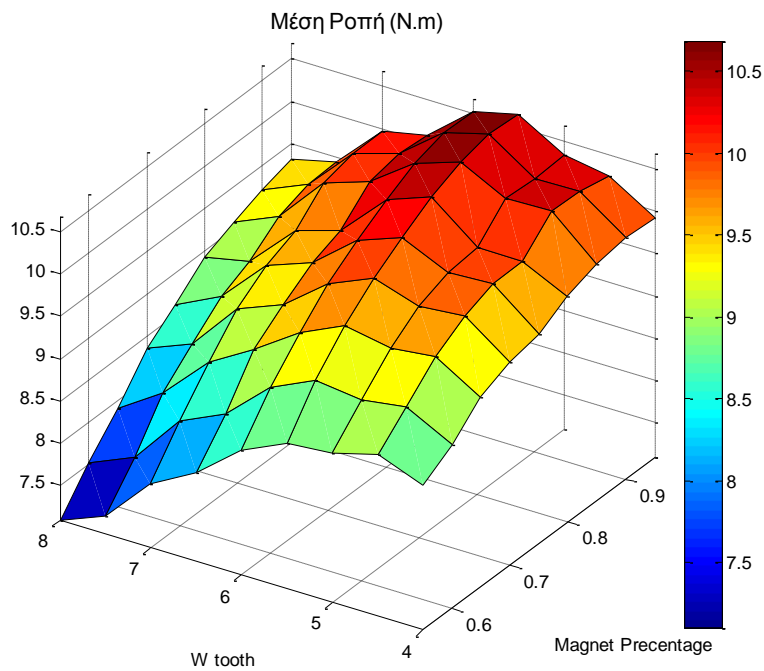
Σχήμα 5.17: Μεταβλητές που θα μεταβάλλονται κατά την ανάλυση της ευαισθησίας.

Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης

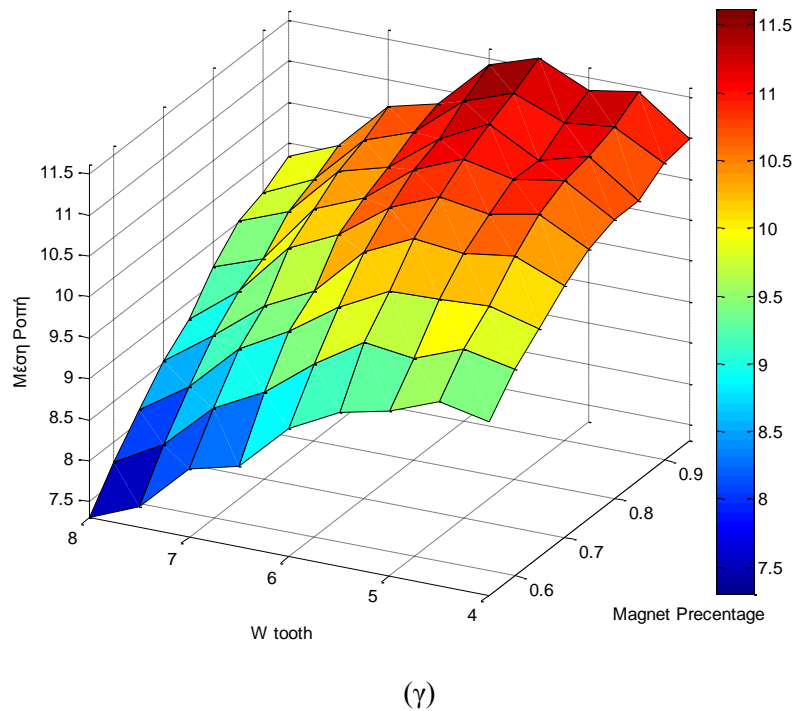
Στα παρακάτω σχήματα που ακολουθούν μπορούμε να διακρίνουμε τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζεται η ροπή του κινητήρα (σχήμα 5.18).



(α)



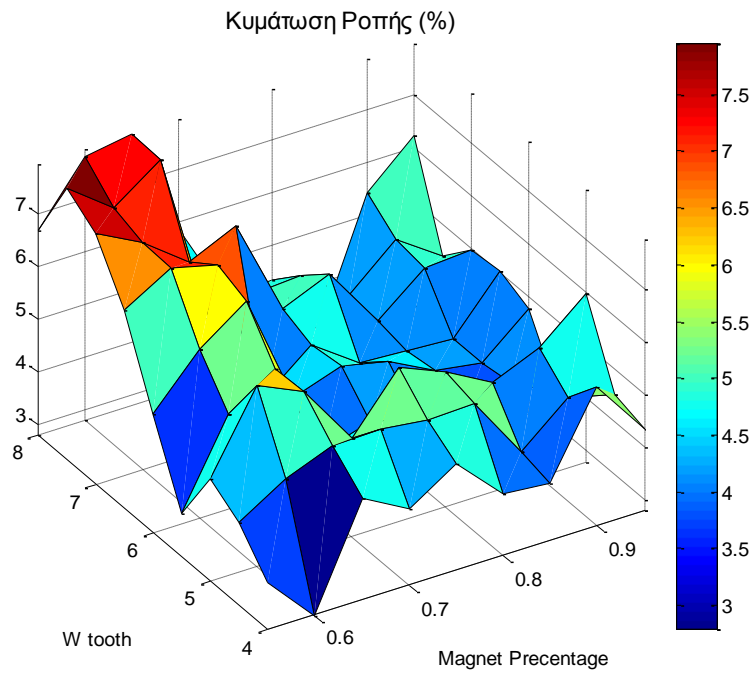
(β)



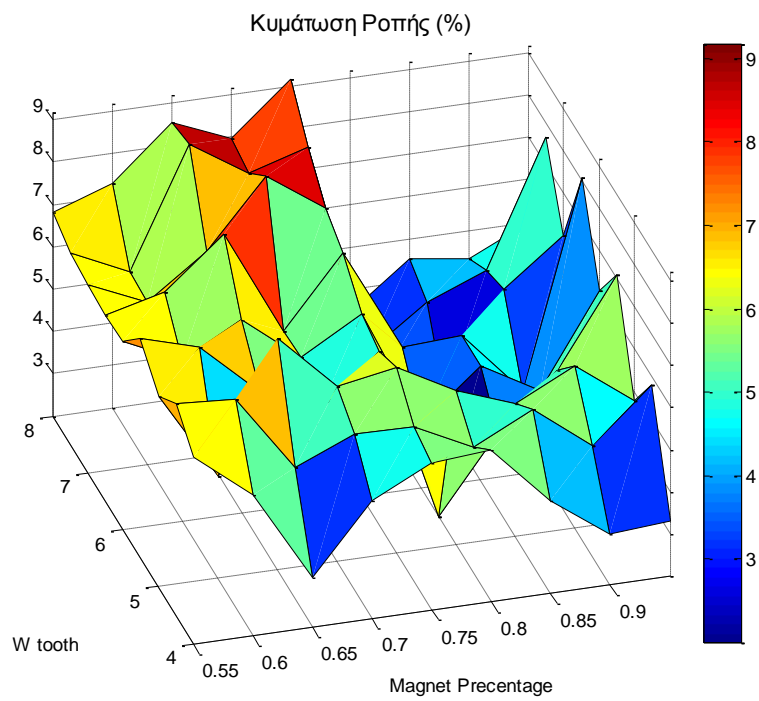
Σχήμα 5.18: Μέση ροπή του κινητήρα στο διάκενο σε N.m για τις γεωμετρίες (α) 18/16S, (β) 18/14D και (γ) 18/16D.

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνει το εύρος του μαγνήτη τόσο αυξάνει απαλά και η ροπή στον άξονα της μηχανής μας. Αναμενόμενο αποτέλεσμα καθώς όσο μεγαλώνει το πεδίο της διέγερσης τόσο μεγαλώνει και η επαγόμενη ροπή. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζει η αύξηση του πάχους του δοντιού την ροπή του κινητήρα. Θα ήταν αναμενόμενο όσο μειώνεται το πάχος του δοντιού και αυξάνεται ο όγκος του χαλκού η ροπή να αυξάνει και αυτή. Παρόλα αυτά παρατηρείται πως γύρω στα 4.5 mm η ροπή στο διάκενο αρχίζει να μειώνεται και όχι να αυξάνεται. Αυτό οφείλεται στις σκεδάσεις που πραγματοποιούνται στο σώμα του στάτη εξαιτίας του μικρού πάχους δοντιού. Στο Παράρτημα Β φαίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για την διαμόρφωση 12/14 όπου το φαινόμενο είναι εντονότερο εξαιτίας του γεγονότος ότι ο αριθμός των αυλάκων υπερβαίνει των αριθμό των πόλων και οπότε οι σκεδάσεις είναι ακόμα εντονότερες. Ανάμεσα στις τιμές 5mm και 7mm η ροπή λαμβάνει τις μέγιστες τιμές, όπως θα δούμε και στην συνέχεια και η τελική επιλογή κινητήρα θα είναι ανάμεσα σε αυτές τις τιμές.

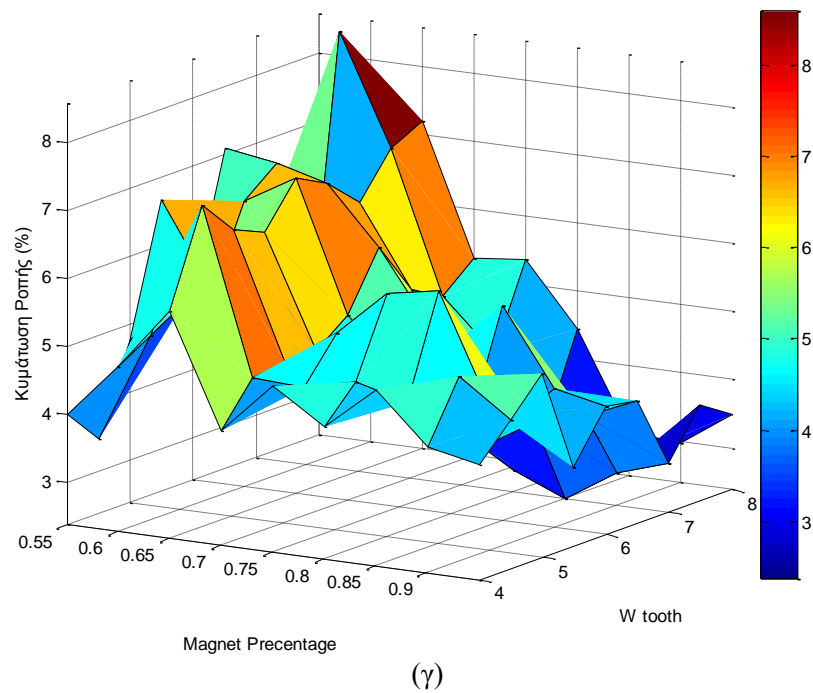
Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης



(α)



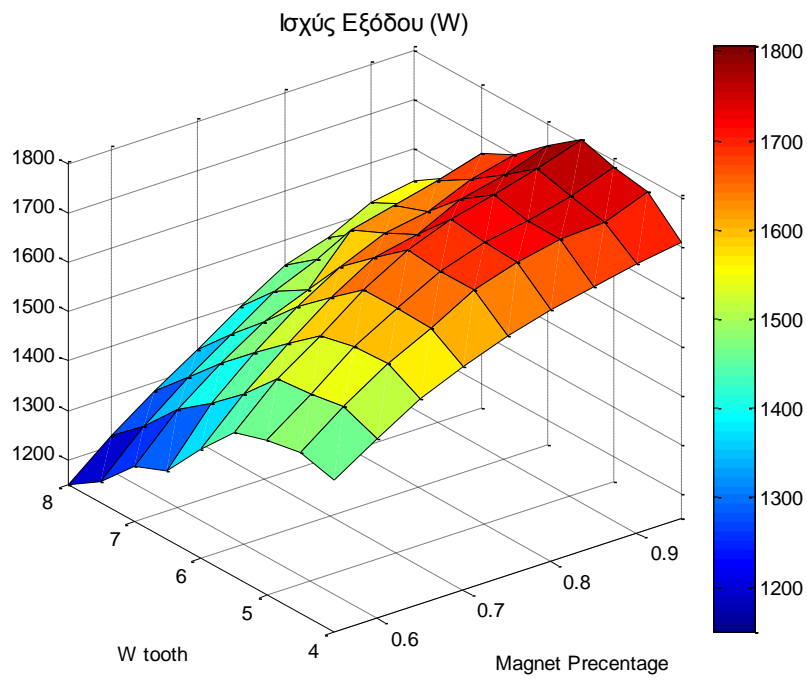
(β)



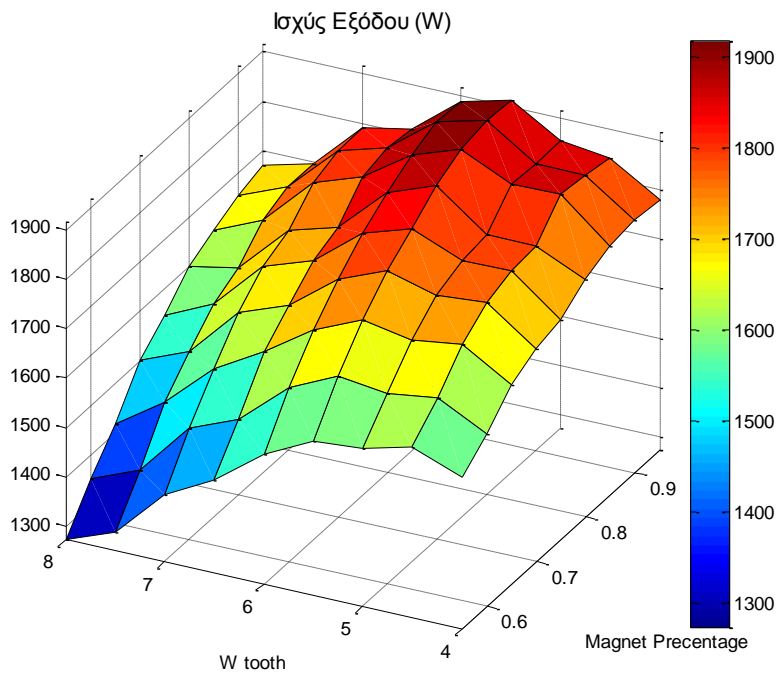
Σχήμα 5.19: Κυμάτωσης της ροπής (%) για τις γεωμετρίες (α) 18/16S, (β) 18/14D και (γ) 18/16D.

Η κυμάτωση της ροπής είναι ένα αστάθμητο χαρακτηριστικό μέγεθος ενός κινητήρα, καθώς παρουσιάζει πολύ μεγάλη ευαισθησία σε μικρές μεταβολές γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Παρόλα αυτά αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα στην επιλογή του κινητήρα καθώς σχετίζεται άμεσα τόσο με την επίδοση του κινητήρα (μεγάλες κυματώσεις προκαλούν θόρυβο και ταλαντώσεις στον άξονα) όσο και με το κόστος λειτουργίας (προκαλεί μεγάλες φθορές στα ρουλεμάν).

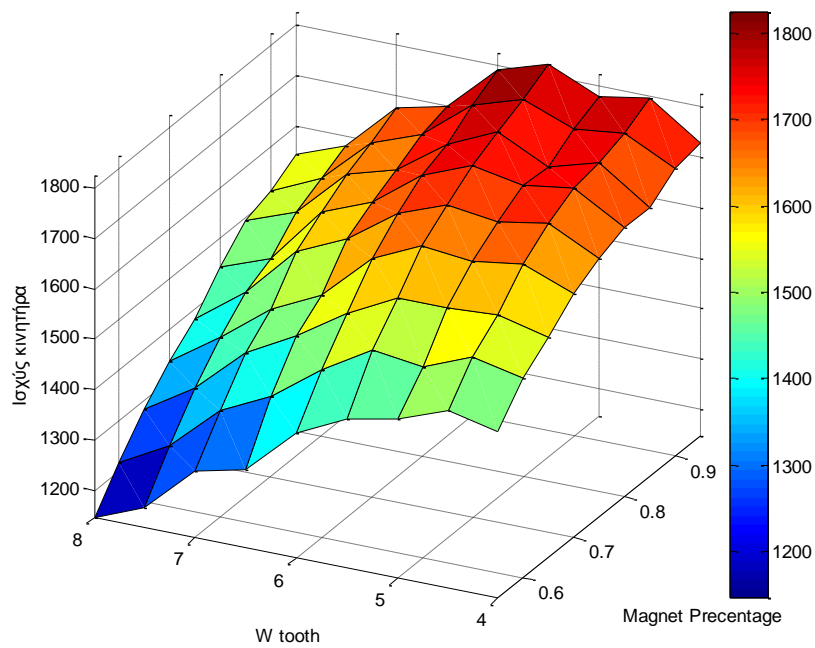
Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης



(α)



(β)



(γ)

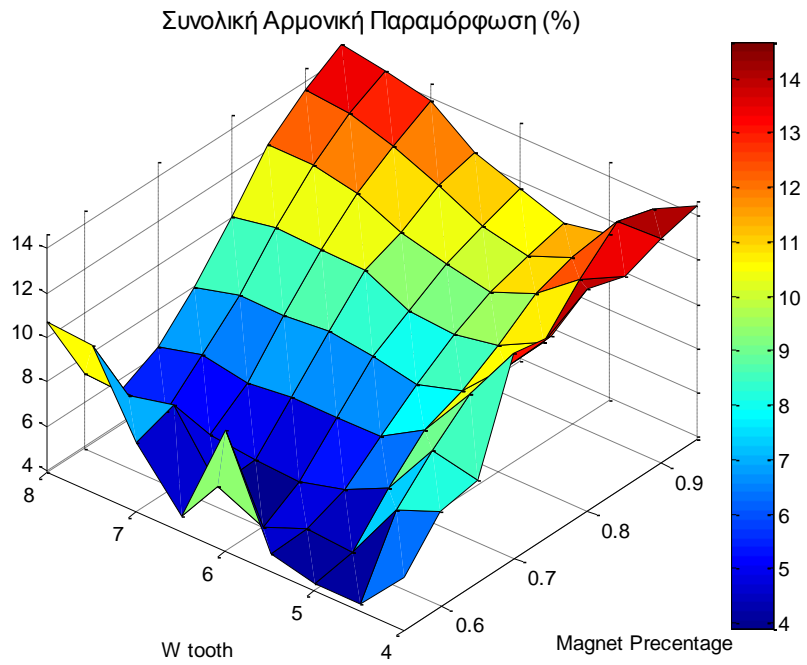
Σχήμα 5.20: Ισχύς εξόδου του κινητήρα σε Watt για τις γεωμετρίες (α) 18/16S, (β) 18/14D και (γ) 18/16D.

Όπως ήταν αναμενόμενο η μορφή του διαγράμματος ισχύος εξόδου παρουσιάζει ακριβώς την ίδια μορφή με την ροπή στο διάκενο καθώς κινητήρες με ίδιο αριθμό πόλων θα έχουν και ίδια ταχύτητα περιστροφής. Υπενθυμίζουμε ότι η ισχύς εξόδου δίνεται από την παρακάτω σχέση (4.35):

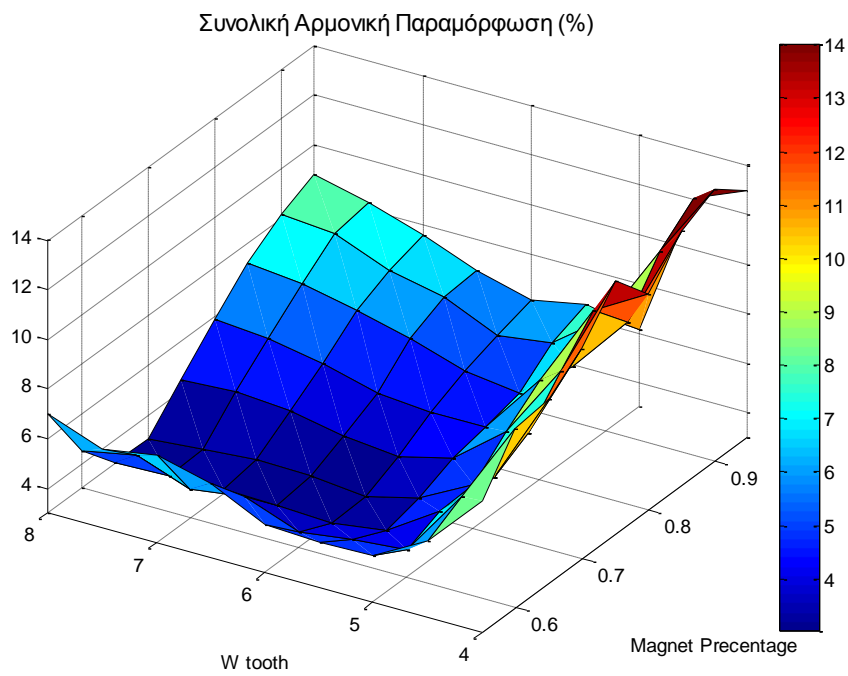
$$P_m = T_{mean} * \omega_r$$

Επομένως, η ισχύς εξόδου από μόνη της δεν μπορεί να αποτελέσει κριτήριο επιλογής της καταλληλότερης διαμόρφωσης όσο λαμβάνουμε υπ' όψιν την ροπή εξόδου.

Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης

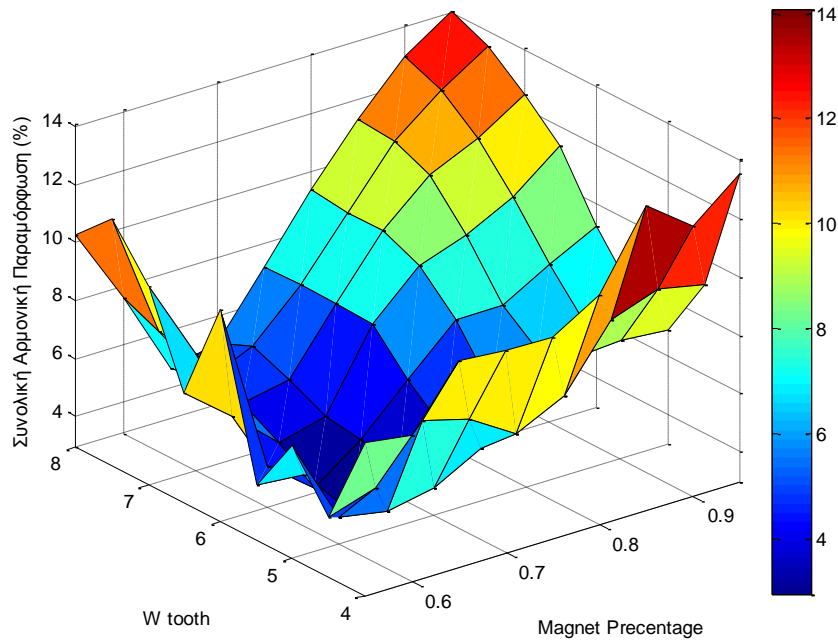


(α)



(β)



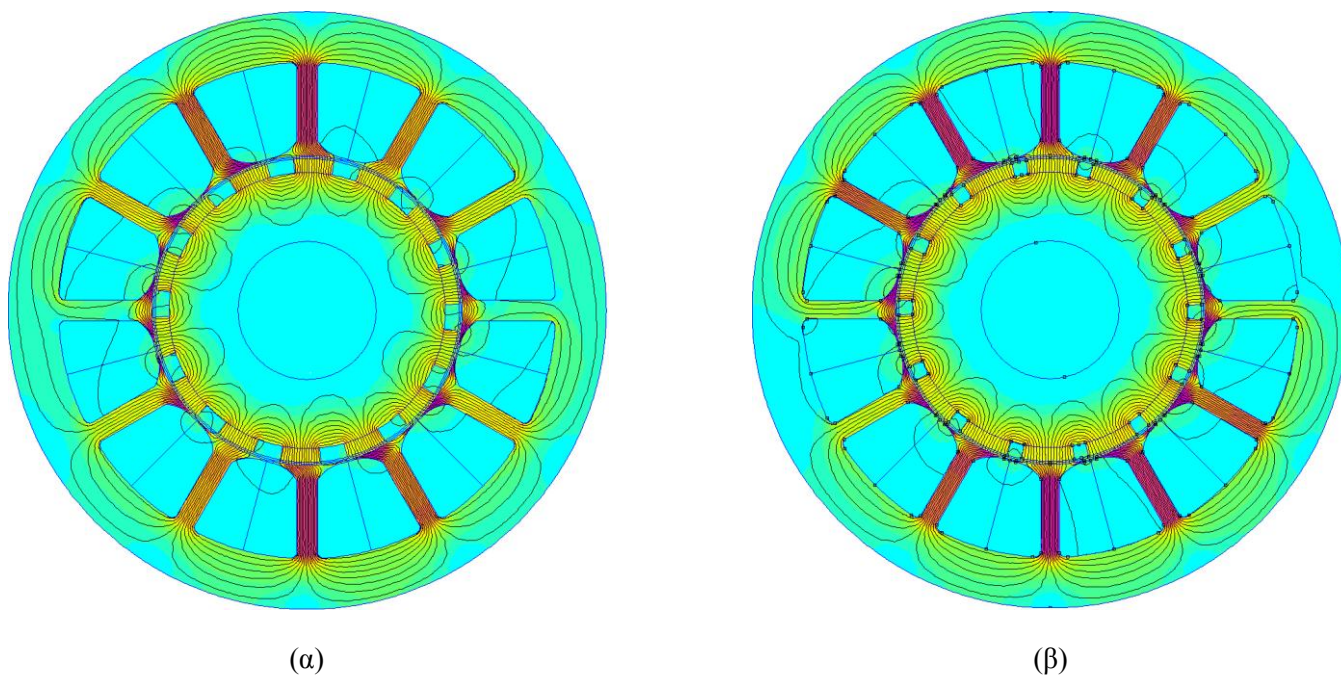


(γ)

Σχήμα 5.21: Συνολική Αρμονική παραμόρφωση της αντί – ΗΕΔ (%) για τις γεωμετρίες (α) 18/16S, (β) 18/14D και (γ) 18/16D.

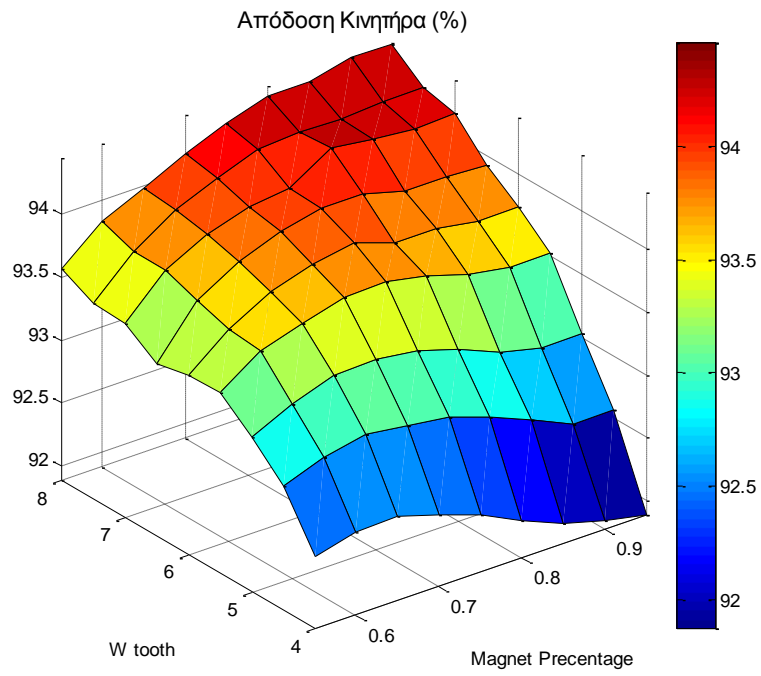
Στα παραπάνω διαγράμματα διακρίνεται ο τρόπος με τον οποίο ο συνδυασμός εύρους μαγνήτη με το πάχος δοντιού επηρεάζουν τον συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης. Ο συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης επηρεάζεται από την πυκνότητα της μαγνητικής ροής στο δόντι, καθώς μεγάλες τιμές μπορεί να προκαλούν κορεσμό τοπικά σε ορισμένα σημεία του δοντιού (σχήμα 5.22). Όσο μεγαλώνει το εύρος του μαγνήτη τόσο μεγαλύτερος κορεσμός παρατηρείται τοπικά σε ορισμένα σημεία του δοντιού, καθώς το πεδίο του δρομέα αυξάνεται. Αυτός είναι και ο λόγος που στα παραπάνω διαγράμματα η συνολική αρμονική παραμόρφωση αυξάνει, με την αύξηση του εύρους του μαγνήτη. Όμως αυξάνει και για πολύ μικρές τιμές εύρους δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο ένα τοπικό ελάχιστο. Αυτή η αύξηση οφείλεται κυρίως στις σκεδάσεις που δημιουργούνται στα αυλάκια του στάτη εξαιτίας του μικρού πεδίου του στάτη. Το ίδιο ακριβώς φαινόμενο παρατηρείται και για πολύ μικρό πάχος δοντιού.

Συγκρίνοντας τις τιμές που παρουσιάζουν οι παραπάνω διαμορφώσεις, αξίζει να σημειωθεί πως οι διαμορφώσεις 16/18 παρουσιάζουν πανομοιότυπα διαγράμματα με την διαμόρφωση διπλής στρώσης να έχει μικρότερες απόλυτες τιμές στην συνολική αρμονική παραμόρφωση. Συγκρίνοντας τις διαμορφώσεις 16/18 και 14/18 διπλής στρώσης, παρατηρούμε ότι η διαμόρφωση 14/18 παρουσιάζει συνολικά μικρότερες τιμές (καλύτερη συμπεριφορά) ενώ ο κινητήρας 16/18 παρουσιάζει μικρότερα τοπικά ελάχιστα.

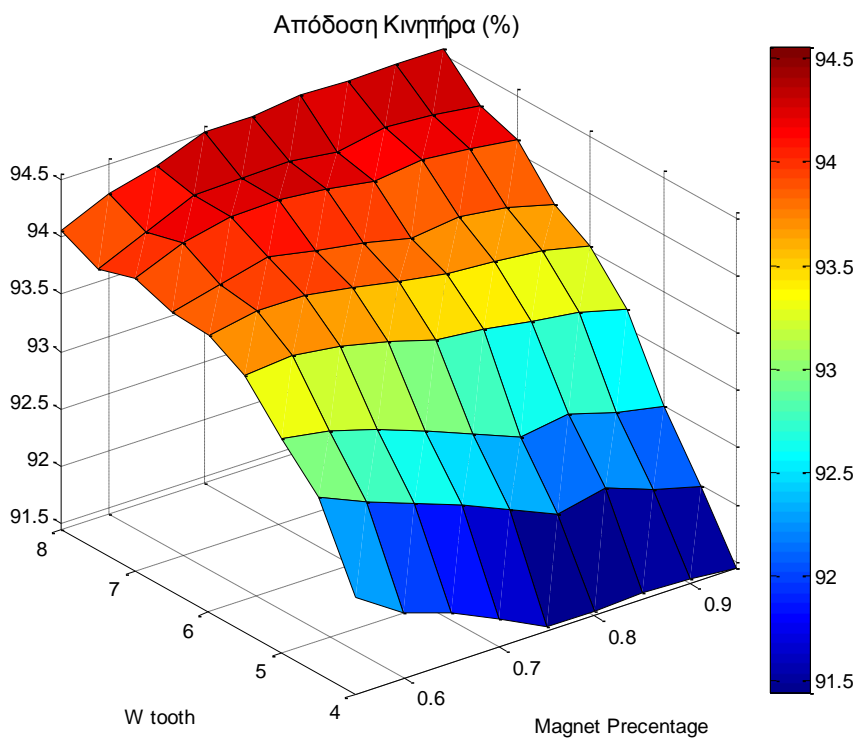


Σχήμα 5.22: Κινητήρα με πλάτος δοντιού 4mm και εύρος μαγνήτη (α) 60% και (β) 78%.

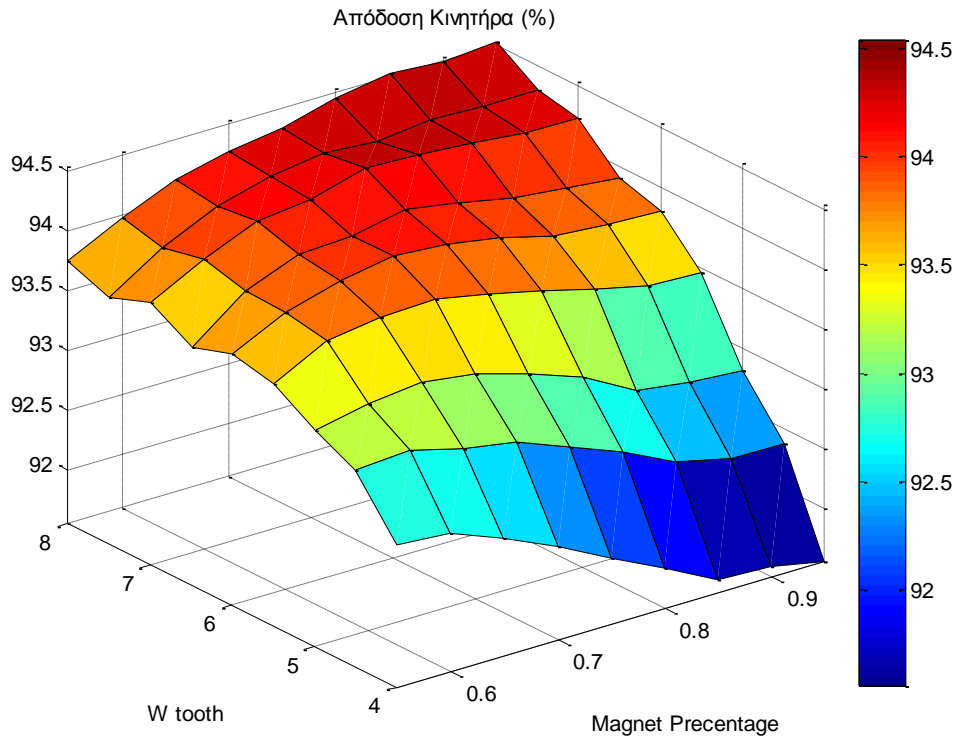
Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης



(α)



(β)



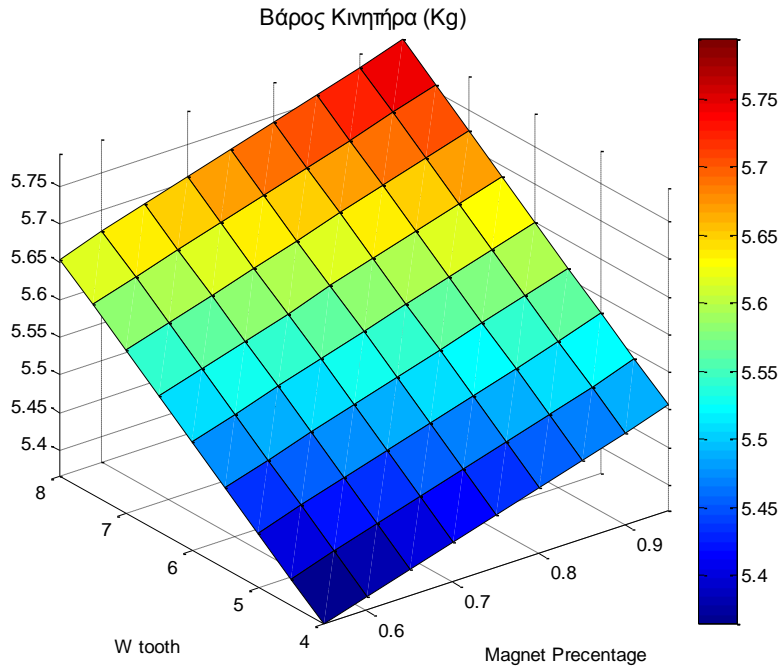
(γ)

Σχήμα 5.23: Απόδοση κινητήρα (%) για τις γεωμετρίες (α) 18/16S, (β) 18/14D και (γ) 18/16D.

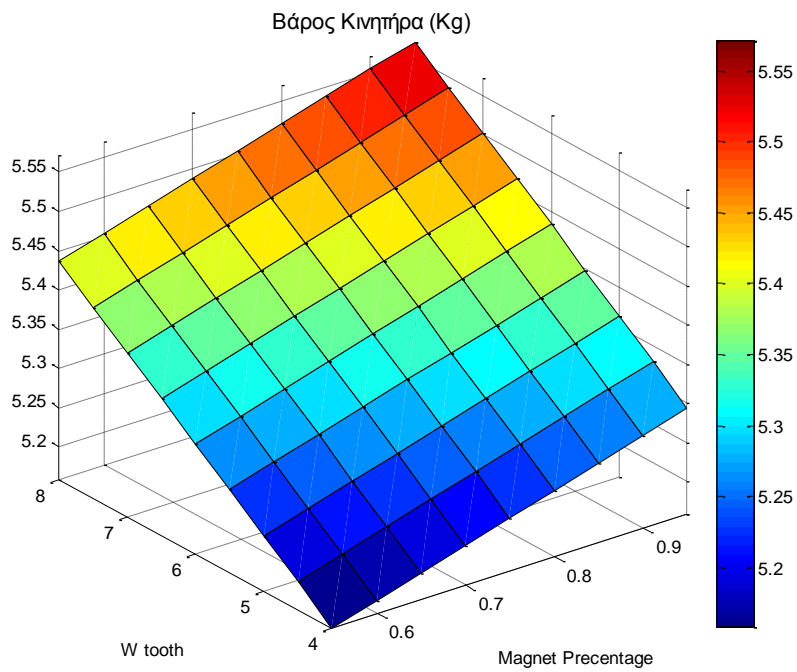
Από το σχήμα 5.18 θα αναμέναμε τα παραπάνω διαγράμματα να παρουσιάζουν παρόμοια μορφή. Δηλαδή, όσο αυξάνει το εύρος μαγνήτη και μειώνεται το πάχος του δοντιού, η απόδοση και η ισχύς στον άξονα του κινητήρα να αυξάνει. Όμως, η αύξηση της ισχύος οφείλεται κυρίως στην αύξηση του πεδίου του στάτη και κατ' επέκταση του όγκου του χαλκού. Με αυτό τον τρόπο οι απώλειες χαλκού, όσο μειώνεται το πάχος του δοντιού, αυξάνουν, με ρυθμό μεγαλύτερο από την αύξηση της ροπής με αποτέλεσμα η απόδοση να μειώνεται.

Εκτός των παραπάνω για μικρό πάχος δοντιού (κάτω από τα 5 mm) και μεγάλο εύρος μαγνήτη, οι απώλειες πυρήνα μεγιστοποιούνται προκαλώντας το ολικό ελάχιστο για εύρος μαγνήτη 95% και πάχος δοντιού 4 mm.

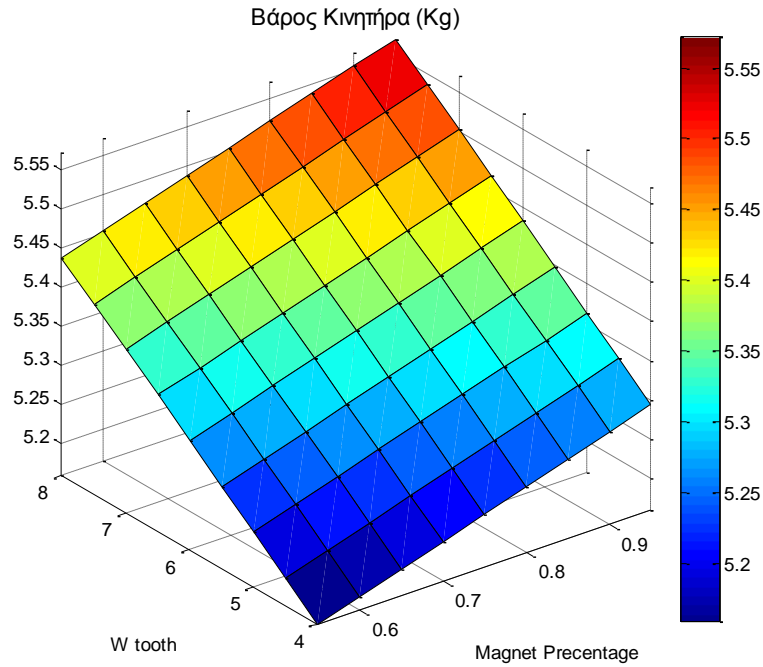
Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης



(α)



(β)

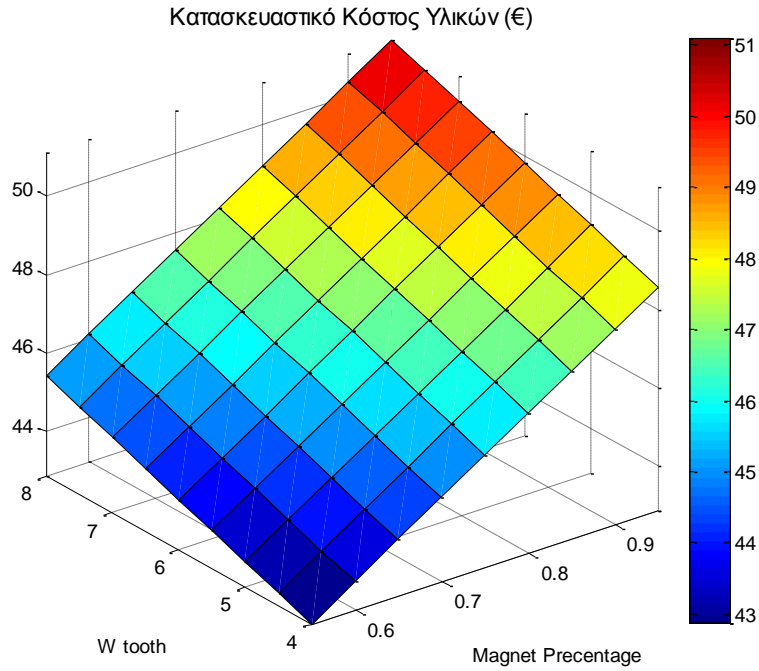


(γ)

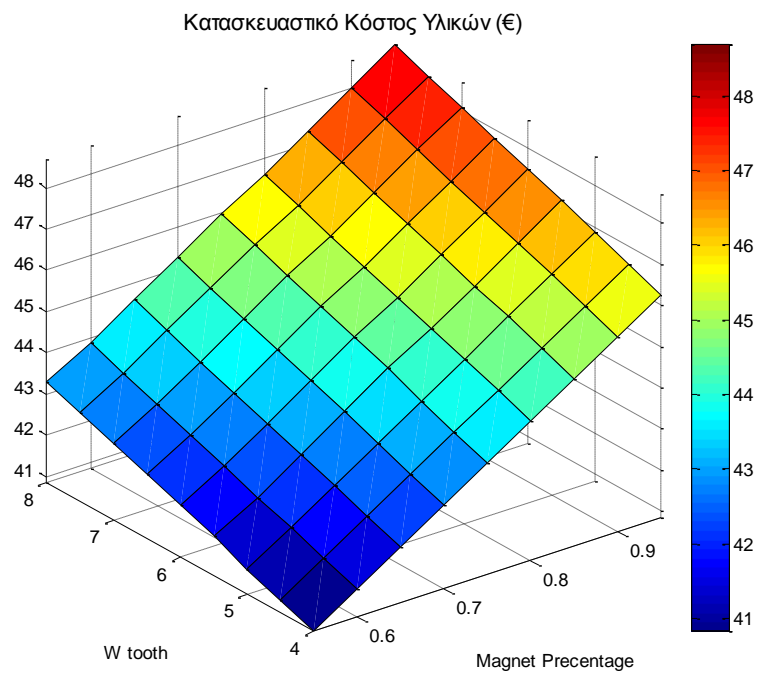
Σχήμα 5.24: Βάρος κινητήρα σε κιλά για τις γεωμετρίες (α) 18/16S, (β) 18/14D και (γ) 18/16D.

Η μορφή των παραπάνω διαγραμμάτων είναι απολύτως αναμενόμενη καθώς όσο αυξάνεται το εύρος του μαγνήτη αλλά και το πάχος του δοντιού (η λαμαρίνα είναι πιο βαριά από το χαλκό) θα αυξάνεται και το βάρος του κινητήρα. Σε πολλές εφαρμογές το βάρος, αλλά και κυρίως η ισχύς εξόδου ανά μονάδα βάρους έχουν καθοριστικό ρόλο στην επιλογή της καταλληλότερης διαμόρφωσης (π.χ. ηλεκτροκινητήρες αεροπλάνων).

Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης

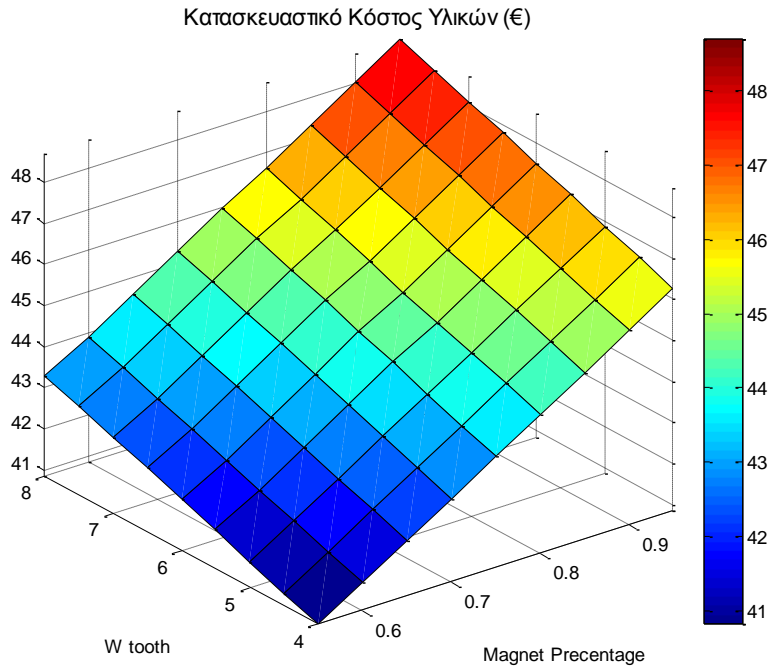


(α)



(β)

Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης



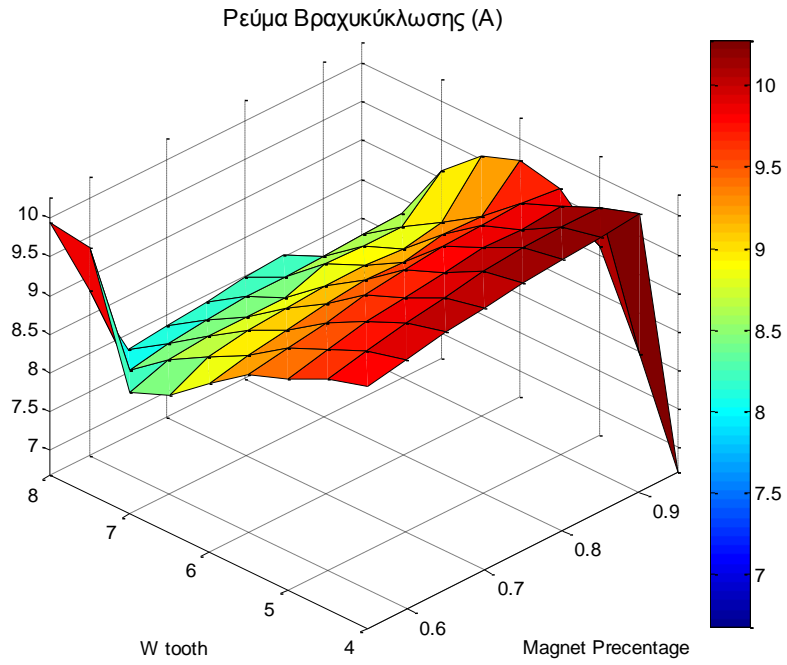
(γ)

Σχήμα 5.25: Κατασκευαστικό κόστος υλικών κινητήρα σε ευρώ για τις γεωμετρίες (α) 18/16S, (β) 18/14D και (γ) 18/16D.

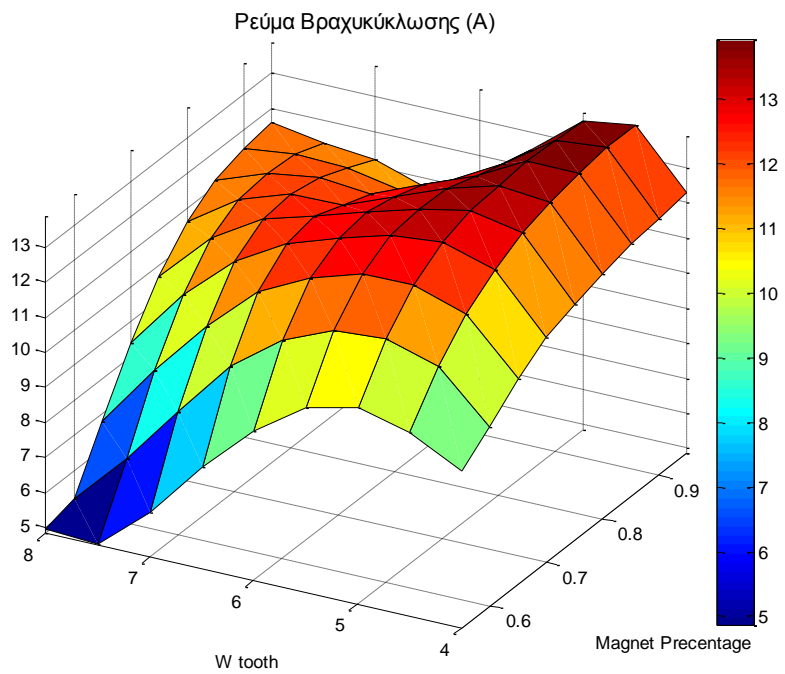
Τα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζουν μορφή ανάλογη με την αύξηση του βάρους του κινητήρα όπως είναι και αναμενόμενο. Όσο αυξάνεται ο όγκος του μαγνήτη και ο όγκος του χαλκού θα αυξάνει και το κόστος των υλικών του κινητήρα της εφαρμογής μας. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί πως το κόστος της λαμαρίνας δεν επηρεάζεται με τις παραπάνω μεταβολές, καθώς η λαμαρίνα αγοράζεται σε φύλλα τα οποία στη συνέχεια κόβονται με βάση το σχέδιο του κινητήρα.



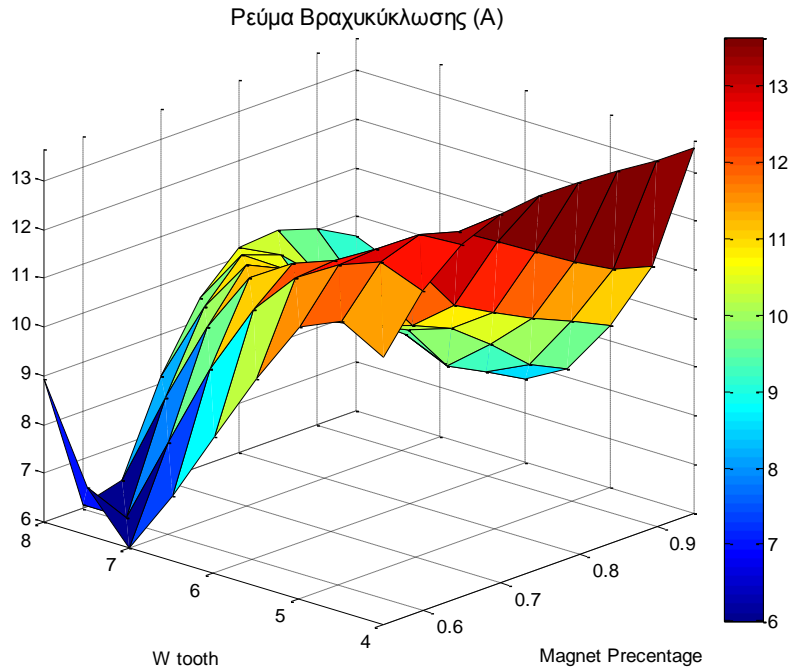
Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης



(α)



(β)



(γ)

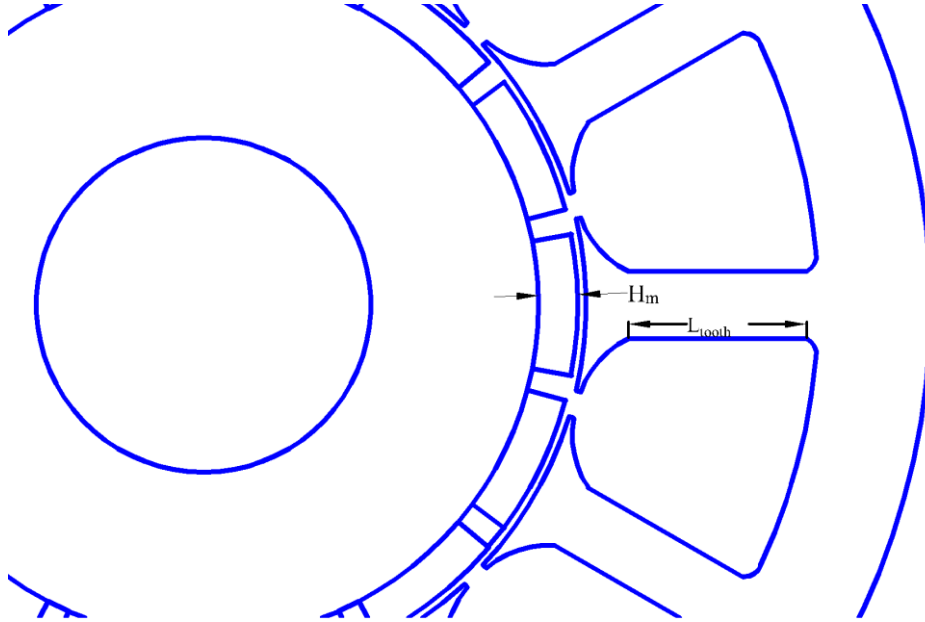
Σχήμα 5.26: Ρεύμα βραχυκύκλωσης κινητήρα σε Ampere για τις γεωμετρίες (α) 18/16S, (β) 18/14D και (γ) 18/16D.

Τα παραπάνω διαγράμματα απεικονίζουν το μέγιστο ρεύμα που εμφανίζει ο κινητήρας κατά τη διάρκεια ενός τριφασικού βραχυκυκλώματος. Τα αποτελέσματα έχουν προκύψει από δυναμική ανάλυση του κινητήρα με την βοήθεια του εργαλείου Simulink. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα το δυναμικό μοντέλο αντλεί όλα τα απαραίτητα στοιχεία που χρειάζεται από την πεδιακή ανάλυση της μηχανής. Το μοντέλο που έχει χρησιμοποιηθεί κατασκευάστηκε εξ' ολοκλήρου για το σκοπό της παρούσας διπλωματικής και αναλύεται εκτενέστερα σε προηγούμενη ενότητα.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης μετρήθηκε για τριφασικό βραχυκύκλωμα, με διάρκεια 10ms, στην διάρκεια του οποίου ο κινητήρας βρισκόταν υπό ονομαστικό φορτίο. Η τελική διαμόρφωση επηρεάζεται έντονα από το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης καθώς αποτελεί ένα πολύ σημαντικό παράγοντα του κόστους λειτουργίας ενός κινητήρα (καταπονήσεις μονώσεων). Επίσης, στην περίπτωση των σύγχρονων κινητήρων είναι πολύ σημαντικό να αποφύγουμε τον αποσυγχρονισμό της μηχανής κατά την διάρκεια ενός τριφασικού βραχυκυκλώματος πριν προλάβουν να ενεργοποιηθούν οι προστασίες του κινητήρα.

### 5.5.2: 2<sup>ο</sup> στάδιο ανάλυσης ευαισθησίας

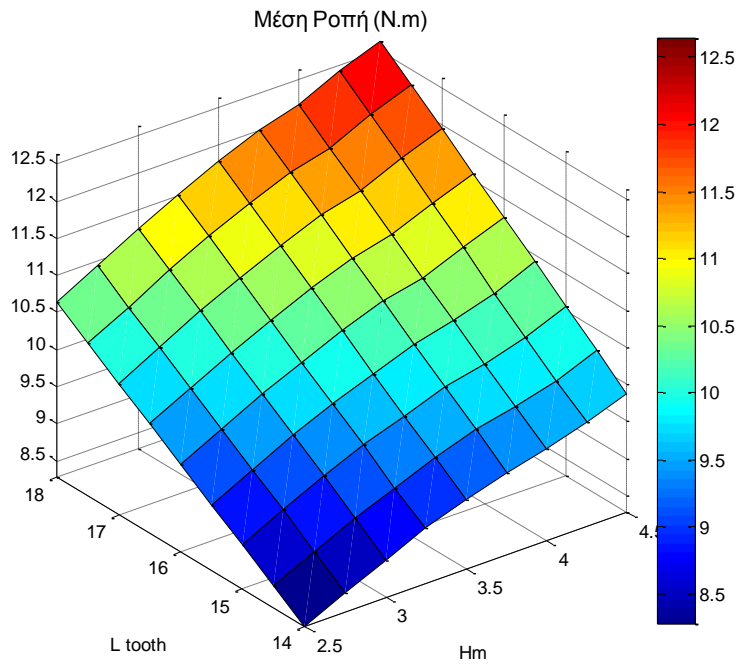
Παρακάτω, ακολουθούν τα αποτελέσματα όπως αυτά προέκυψαν μεταβάλλοντας το πάχος του μαγνήτη και το πλάτος του δοντιού του στάτη ταυτόχρονα. Το εύρος του μαγνήτη και το πάχος του δοντιού παραμένουν σταθερά όπως αυτά προέκυψαν από την βελτιστοποίηση στο προηγούμενο βήμα.



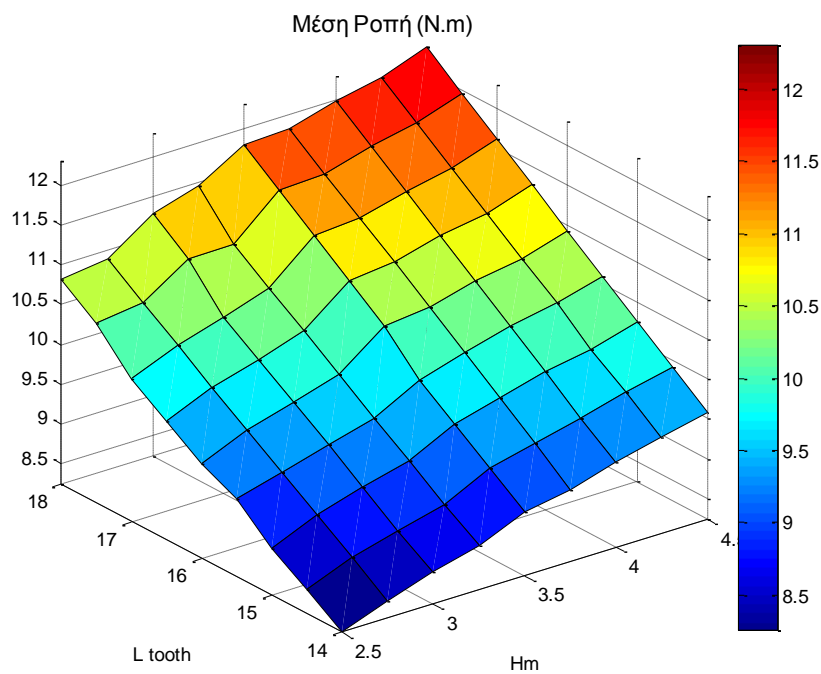
Σχήμα 5.27: Μεταβλητές που θα μεταβάλλονται κατά την ανάλυση της ευαισθησίας στο 2<sup>ο</sup> βήμα.

Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης

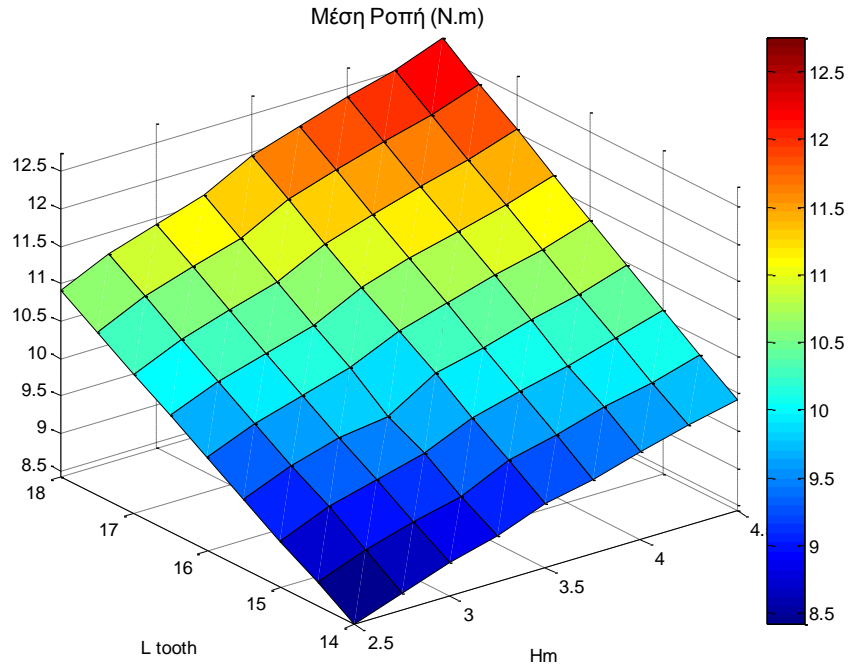
Στα παρακάτω σχήματα που ακολουθούν μπορούμε να διακρίνουμε τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζεται η ροπή του κινητήρα (σχήμα 5.28).



(α)



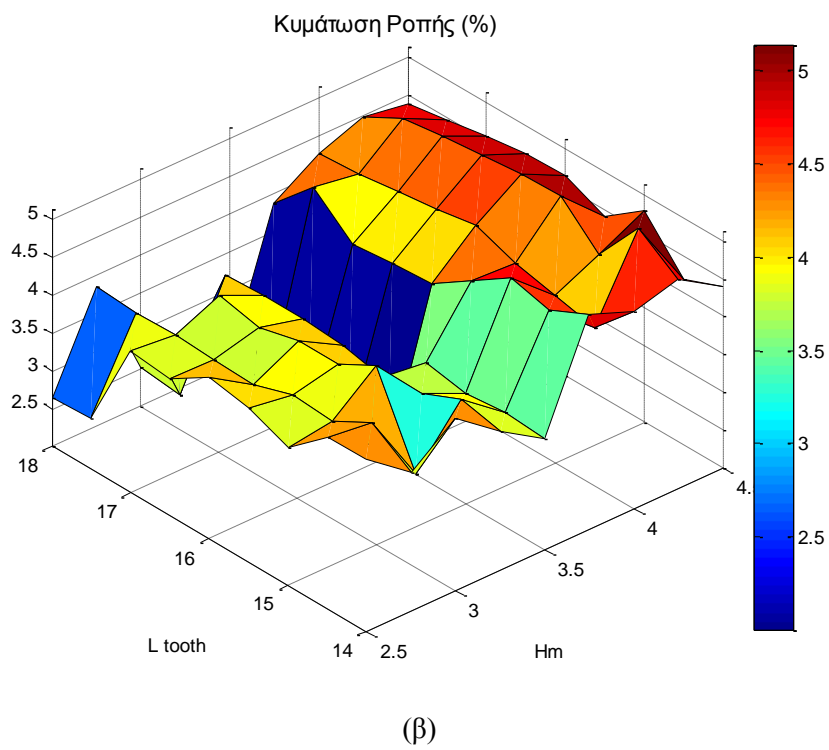
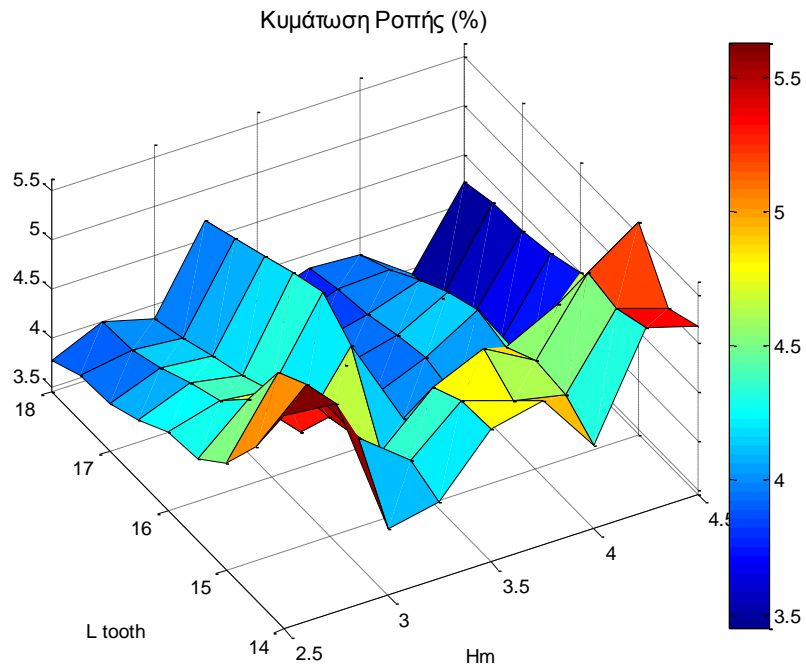
(β)

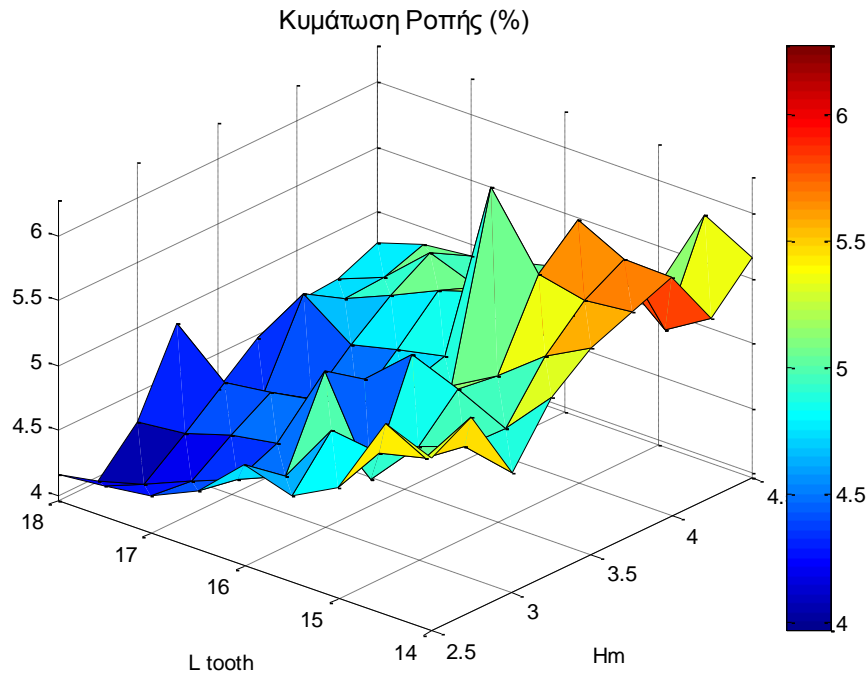


(γ)  
Σχήμα 5.28: Μέση ροπή κινητήρα σε N.m για τις γεωμετρίες (α) 18/16S, (β) 18/14D και (γ) 18/16D.

Όπως είναι αναμενόμενο, όσο αυξάνει το πάχος του μαγνήτη και όσο αυξάνει το πλάτος του δοντιού, η ροπή στο διάκενο μεγαλώνει. Με την αύξηση αυτών των διαστάσεων αυξάνεται η ένταση στο πεδίο του στάτη και στο πεδίο του δρομέα ταυτόχρονα. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η κλίση της αύξησης της ροπής είναι μεγαλύτερη για το πεδίο του στάτη. Δηλαδή πιο εύκολα αυξάνει η ροπή μεγαλώνοντας την ένταση του πεδίου του στάτη, παρά μεγαλώνοντας την ένταση του πεδίου του δρομέα.

Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης

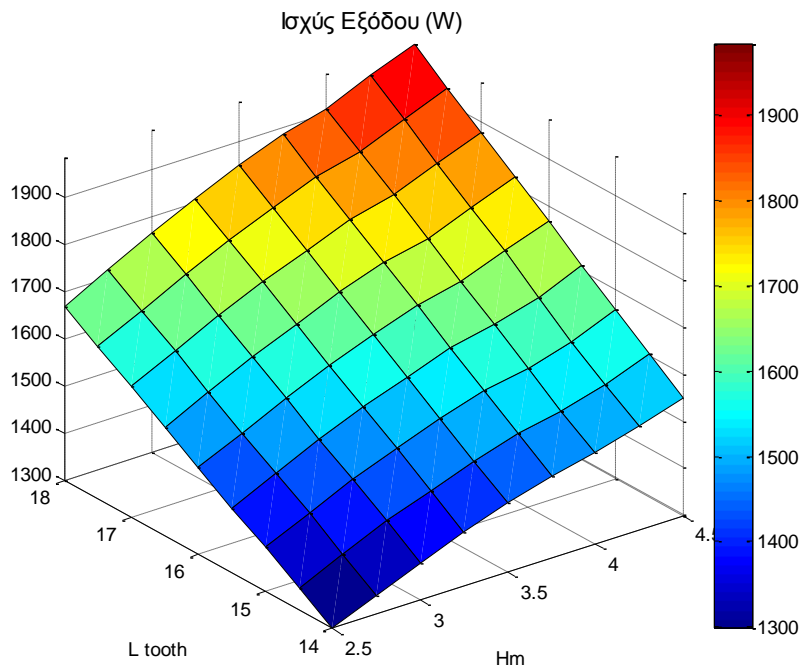




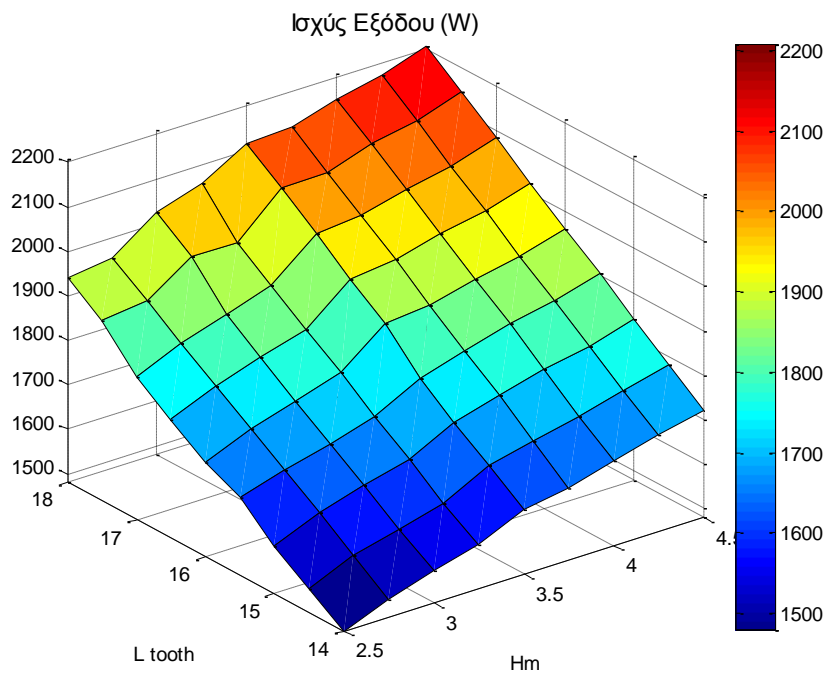
(γ)  
Σχήμα 5.29: Κυμάτωση ροπής (%) για τις γεωμετρίες (α) 18/16S, (β) 18/14D και (γ) 18/16D.

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι οι τιμές της ροπής κυμάτωσης έχουν μειωθεί σε αυτήν τη φάση για όλες τις διαμορφώσεις. Αυτό οφείλεται στο προηγούμενο στάδιο βελτιστοποίησης όπου έχουν επιλεγεί τα καλύτερα γεωμετρικά μεγέθη για το πάχος του δοντιού και το εύρος του μαγνήτη.

Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης

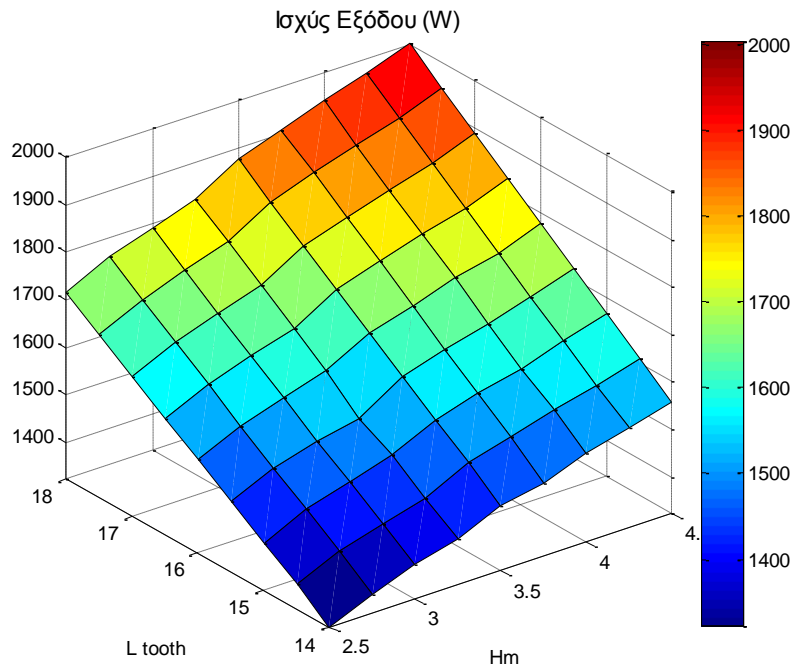


(α)



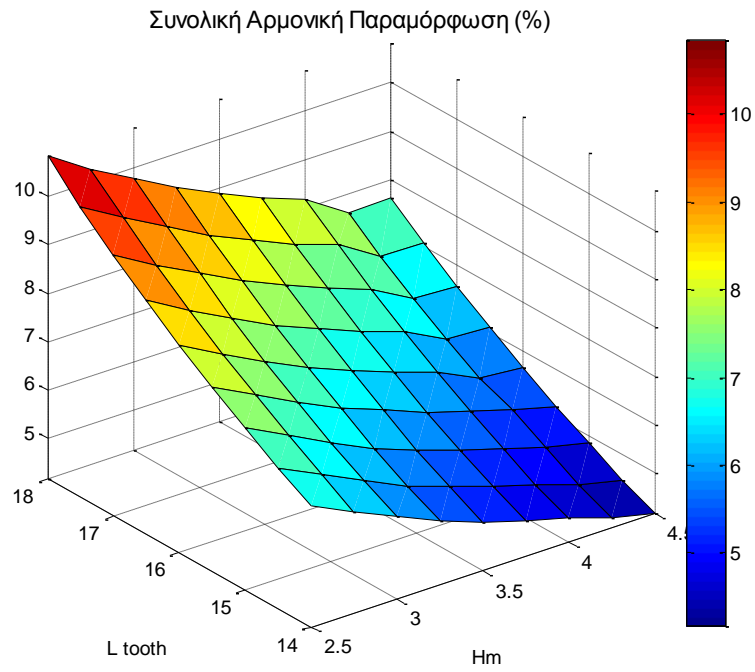
(β)



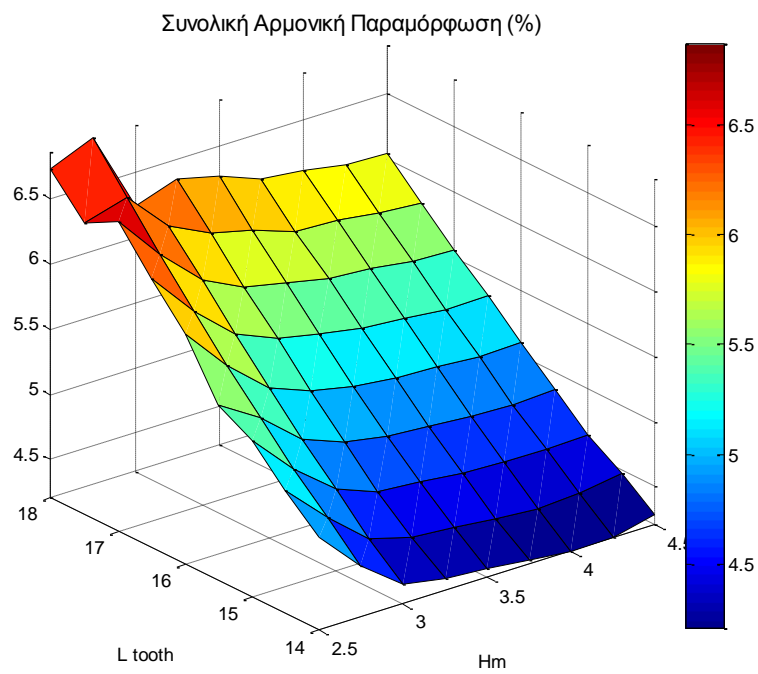


(γ)  
Σχήμα 5.30: Ισχύς εξόδου κινητήρα (W) για τις γεωμετρίες (α) 18/16S, (β) 18/14D και (γ) 18/16D.

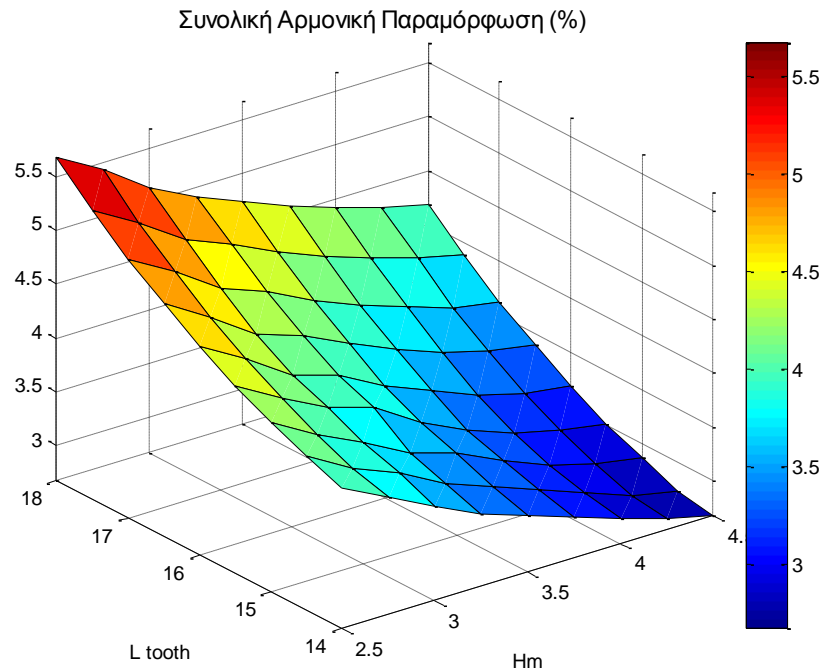
Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης



(α)



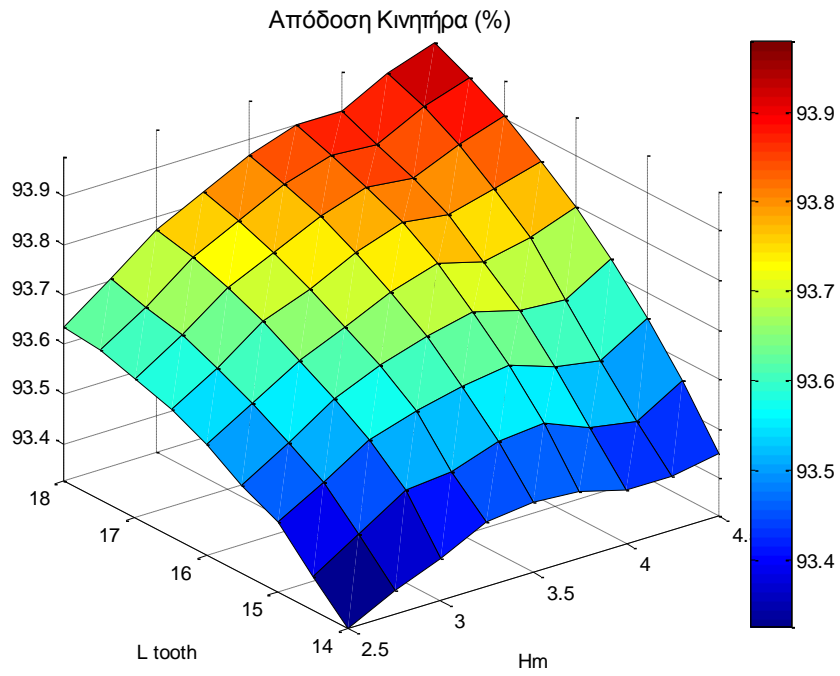
(β)



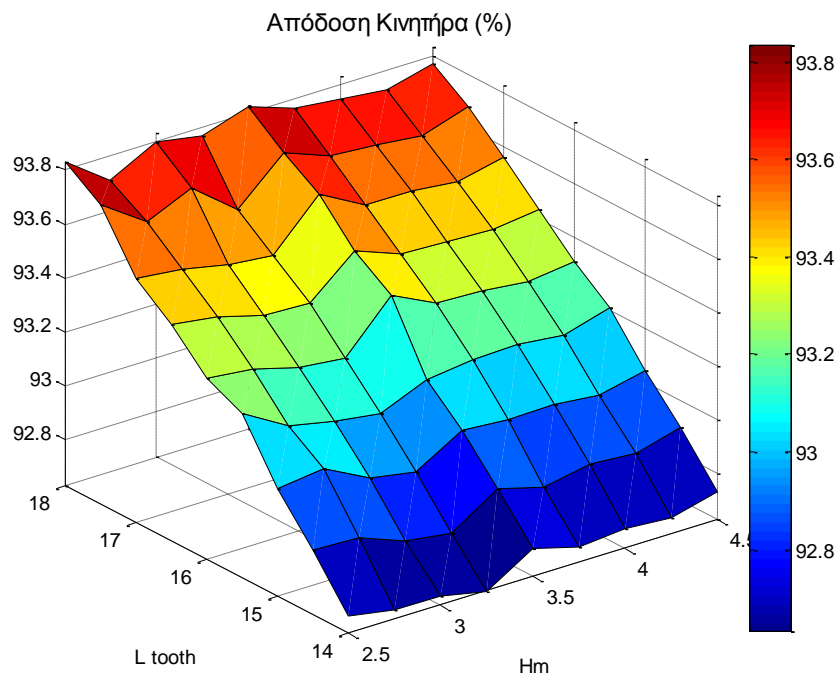
(γ)  
Σχήμα 5.31: Συνολική αρμονική παραμόρφωση (%) για τις γεωμετρίες (α) 18/16S, (β) 18/14D και (γ) 18/16D.

Όλα τα παραπάνω διαγράμματα είναι πανομοιότυπα μεταξύ τους και δίνουν μια πολύ καλή αίσθηση του τρόπου με τον οποίο οι σκεδάσεις στο σώμα του άξονα επηρεάζουν την συνολική αρμονική παραμόρφωση. Πιο συγκεκριμένα, όσο το πεδίο του δρομέα έχει μικρή ένταση και το μήκος των δυναμικών γραμμών είναι μεγάλο τόσο μεγαλύτερη είναι και συνολική αρμονική παραμόρφωση της αντί – ΗΕΔ. Ενώ, όσο η ένταση του πεδίου του δρομέα αυξάνει και το μήκος που πρέπει να καλύψουν οι δυναμικές γραμμές μειώνεται, η συνολική αρμονική παραμόρφωση μειώνεται.

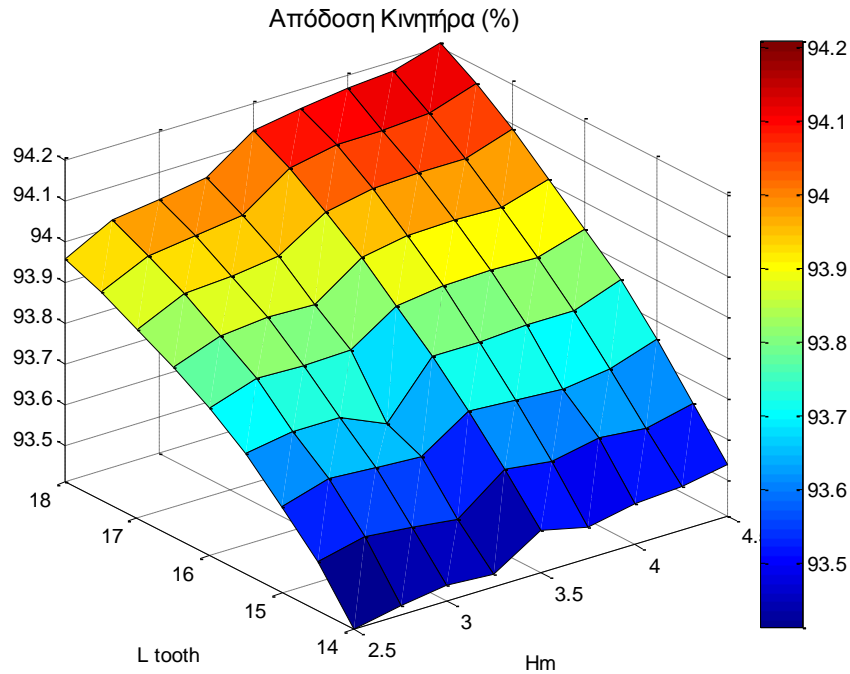
Συγκρίνοντας τις απόλυτες τιμές της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης παρατηρείται ότι η διαμόρφωση 16/18 με τυλίγματα διπλής στρώσης παρουσιάζει σαφώς καλύτερα χαρακτηριστικά από τις δύο άλλες.



(α)



(β)



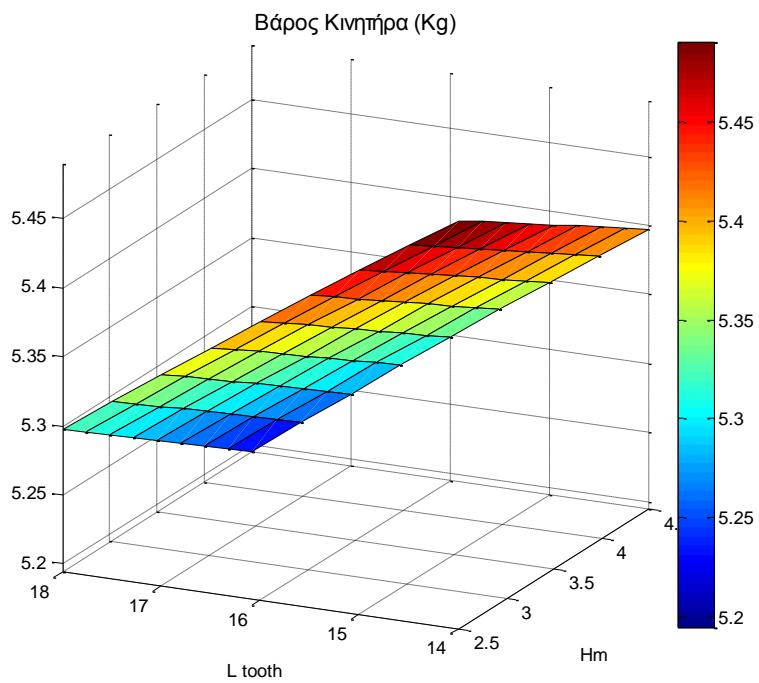
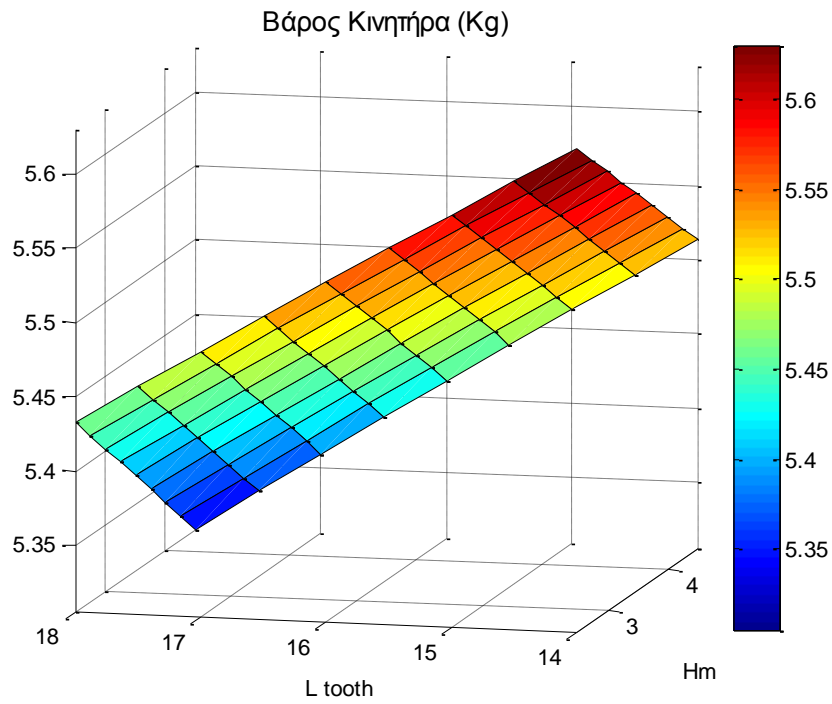
(γ)

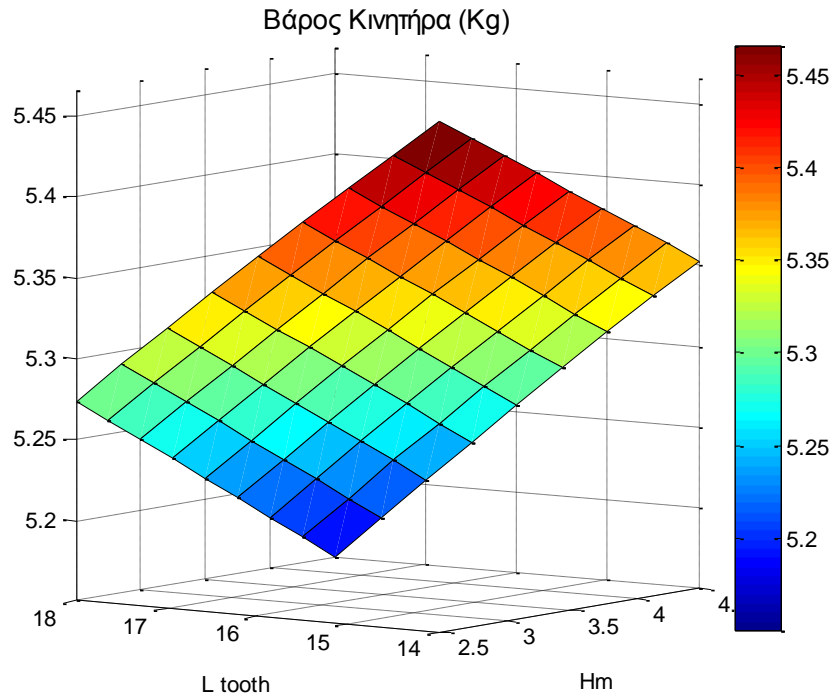
Σχήμα 5.32: Απόδοση κινητήρα (%) για τις γεωμετρίες (α) 18/16S, (β) 18/14D και (γ) 18/16D.

Εδώ είναι κάπως πιο πολύπλοκο να εξηγήσουμε την μορφή αυτού του διαγράμματος σε σχέση με την 1<sup>η</sup> φάση βελτιστοποίησης. Όσο το πλάτος του δοντιού αυξάνει, αυξάνει και ο χαλκός του στάτη και επομένως οι απώλειες χαλκού του κινητήρα. Το μεγαλύτερο ποσοστό απωλειών τέτοιων μικρών κινητήρων είναι αυτό των απωλειών χαλκού και οπότε θα περίμενε κανείς όσο αυτές αυξάνονται η απόδοση του κινητήρα να μειώνεται. Στην περίπτωση όμως της αύξησης του πλάτους του δοντιού, η ισχύς εξόδου του κινητήρα αυξάνει σε ρυθμό πολύ μεγαλύτερο από αυτό των απωλειών και ο κινητήρας παρουσιάζει καλύτερη απόδοση για μεγαλύτερο πλάτος δοντιού.

Επίσης, σε συνδυασμό με τα προηγούμενα διαγράμματα, αυτά της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης, παρατηρείται ότι για συνδυασμούς με μεγάλο πλάτος δοντιού και μεγάλο πάχος μαγνήτη η απόδοση μεγιστοποιείται χωρίς όμως να μεγιστοποιείται η συνολική αρμονική παραμόρφωση. Όπως θα δούμε και αργότερα, η τελική διαμόρφωση θα βρίσκεται μέσα σε αυτό το πεδίο.

Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης



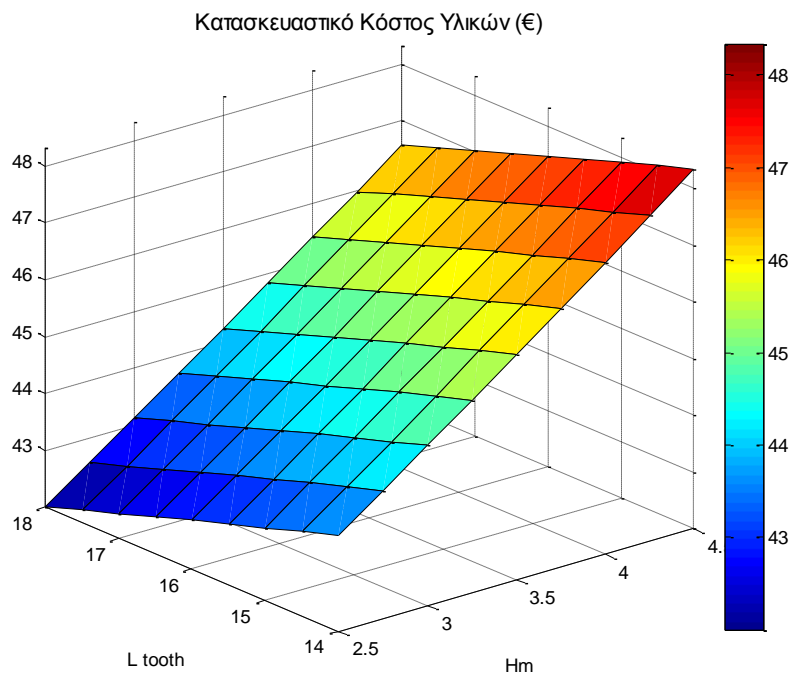
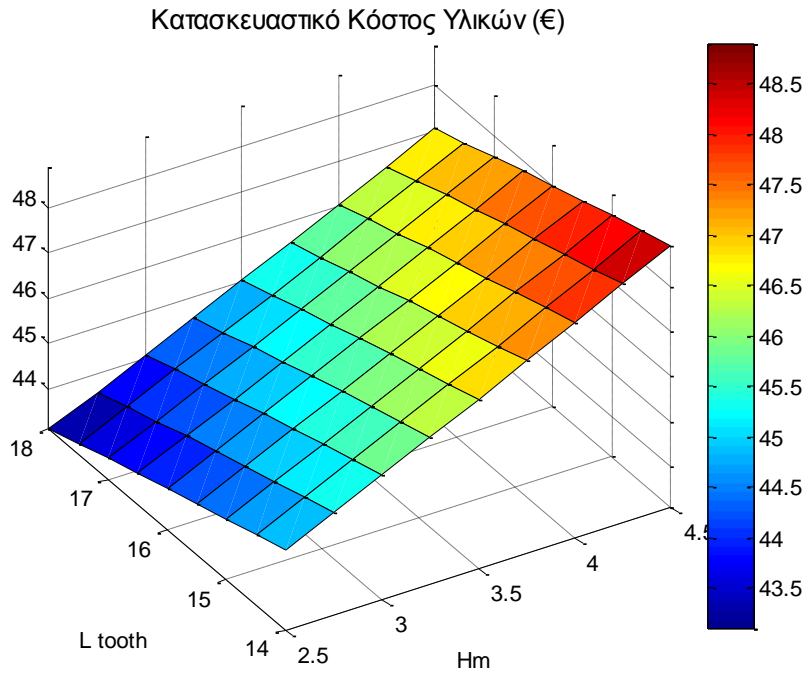


(γ)

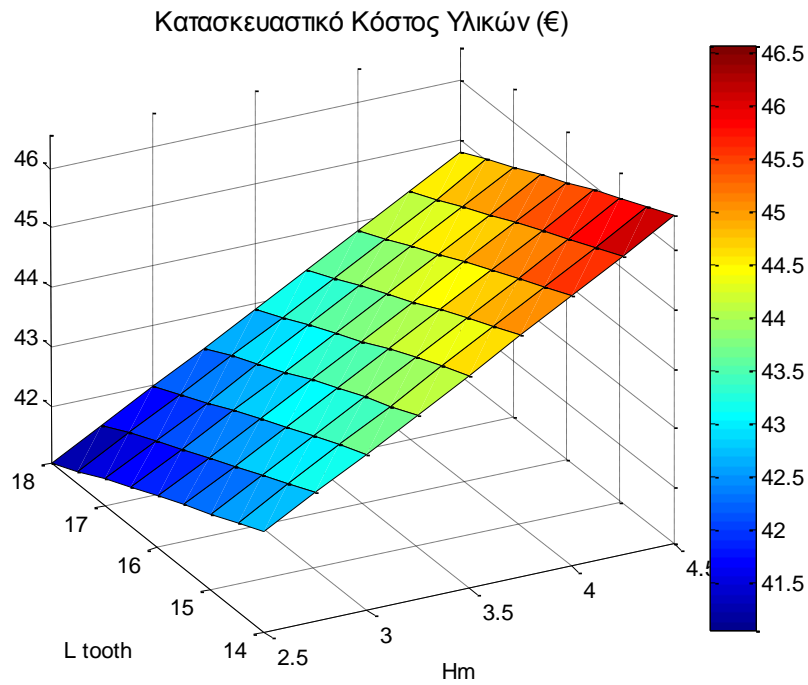
Σχήμα 5.33: Βάρος του κινητήρα σε κιλά για τις γεωμετρίες (α) 18/16S, (β) 18/14D και (γ) 18/16D.

Στα παραπάνω διαγράμματα όπως είναι και αναμενόμενο παρατηρείται ότι αύξηση του όγκου του μαγνήτη και αύξηση του όγκου του χαλκού συνεπάγεται αύξηση στο βάρος του κινητήρα και κατά συνέπεια αύξηση του κόστους των υλικών όπως φαίνεται στο σχήμα 5.33.

Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης







(γ)

Σχήμα 5.34: Κατασκευαστικό κόστος υλικών σε ευρώ για τις γεωμετρίες (α) 18/16S, (β) 18/14D και (γ) 18/16D.

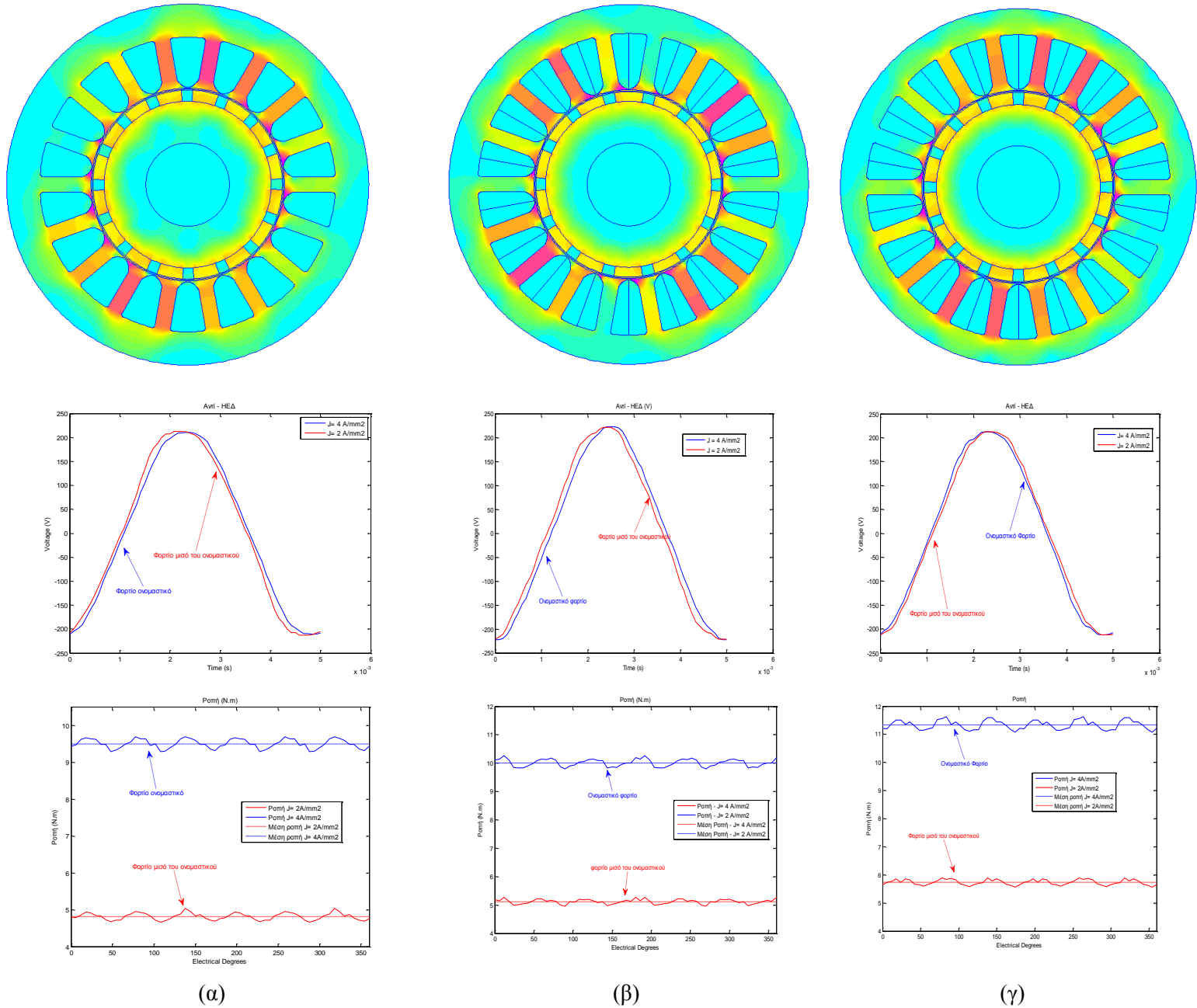
## 5.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Μετά από την επιλογή όλων των οριστικών παραμέτρων των τριών διαμορφώσεων θα πραγματοποιηθεί μια τελική σύγκριση σε 3 σημεία λειτουργίας. Ο κινητήρας της συγκεκριμένης εφαρμογής δεν θα λειτουργεί πάντα σε ονομαστικό φορτίο. Είναι δυνατόν να βρεθεί σε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας από την ονομαστική. Για το σκοπό αυτό παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των τριών διαμορφώσεων όταν βρίσκονται στις εξής τρεις καταστάσεις λειτουργίας:

- Ονομαστικό Φορτίο ( $J = 4 \text{ A/mm}^2$ )
- Φορτίο ίσο με το μισό του ονομαστικού ( $J = 2 \text{ A/mm}^2$ )
- Φορτίο ίσο με το διπλάσιο του ονομαστικού ( $J = 8 \text{ A/mm}^2$ )

Μελετώντας και τις τρεις αυτές καταστάσεις λειτουργίας η τελική επιλογή γίνεται με ακόμα περισσότερα κριτήρια, βεβαιώνοντας στον σχεδιαστή ότι η τελική του διαμόρφωση είναι πολύ κοντά στην ιδανική. Στο *σχήμα 5.35*, στα αριστερά διακρίνεται η διαμόρφωση με συγκεντρωμένα τυλίγματα απλής στρώσης 16/18, στο κέντρο την διαμόρφωση με συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσης 14/18 και στα δεξιά την διαμόρφωση με συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσης 16/18. Αρχικά παρουσιάζεται η κατανομή του πεδίου, ύστερα η κυματομορφή της αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης και τέλος η κυμάτωση ροπής. Οι κυματομορφές είναι υπολογισμένες τόσο για κατάσταση μόνιμης λειτουργίας (ονομαστικό φορτίο) όσο και για την λειτουργία σε φορτίο μισό του ονομαστικού.

Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης

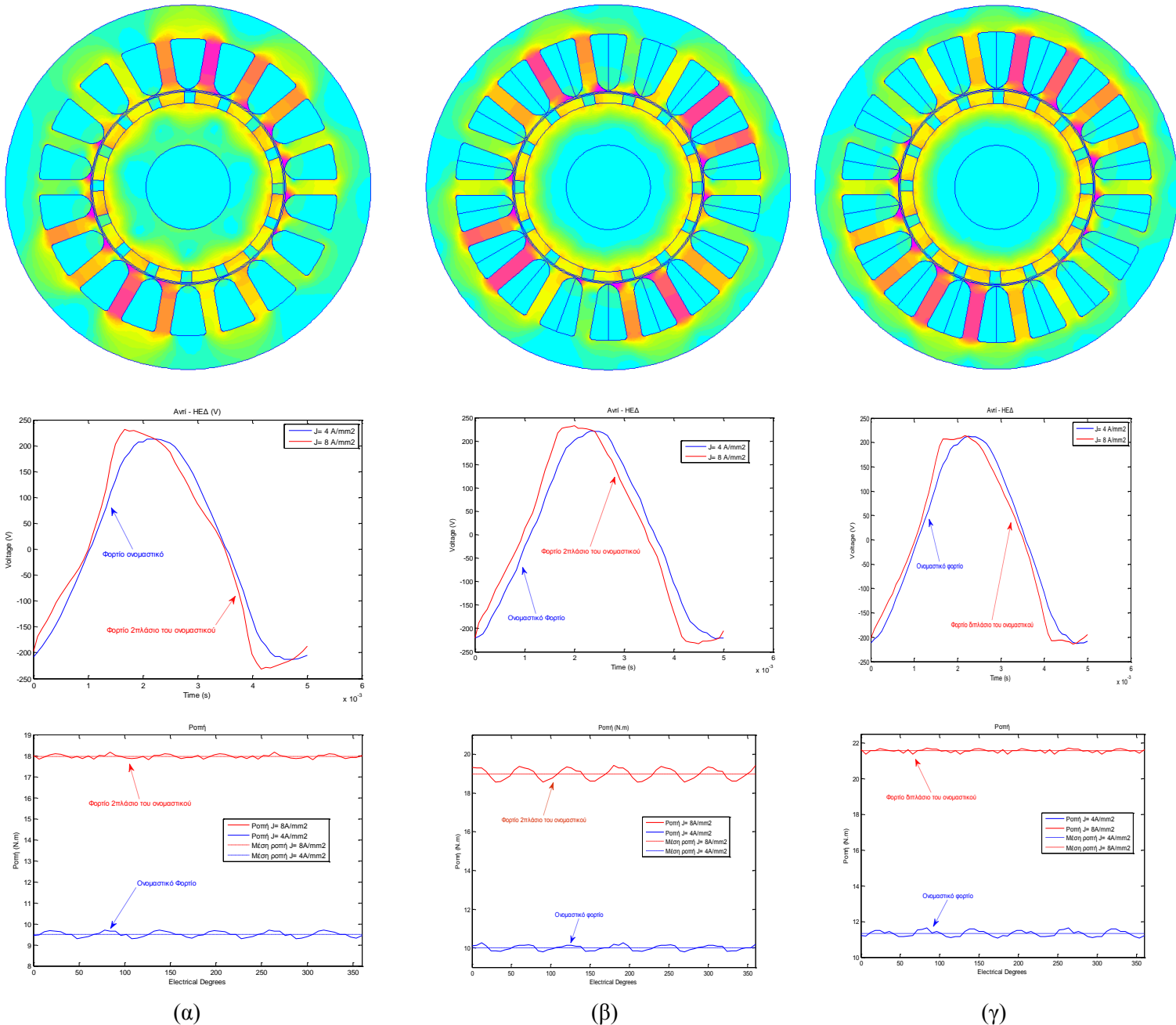


(α) (β) (γ)

Σχήμα 5.35: Στο παραπάνω σχήμα διακρίνονται ανά στήλη η κατανομή του πεδίου σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, η μορφή της αντί – ΗΕΔ και της ροπής στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και σε φορτίο μισό του ονομαστικού για τις διαμορφώσεις (α) 16/18 με τυλίγματα απλής στρώσης, (β) 14/18 με τυλίγματα διπλής στρώσης και (γ) 16/18 με τυλίγματα διπλής στρώσης.

## Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης

Στο σχήμα 5.36, στα αριστερά μπορούμε να δούμε την διαμόρφωση συγκεντρωμένων τυλιγμάτων απλής στρώσης 16/18, στο κέντρο την διαμόρφωση συγκεντρωμένων τυλιγμάτων διπλής στρώσης 14/18 και στα δεξιά αυτή την διαμόρφωση συγκεντρωμένων τυλιγμάτων διπλής στρώσης 16/18. Αρχικά παρουσιάζεται η κατανομή του πεδίου, ύστερα η κυματομορφή της αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης και τέλος η κυμάτωση ροπής. Οι κυματομορφές είναι υπολογισμένες τόσο για κατάσταση μόνιμης λειτουργίας (ονομαστικό φορτίο) όσο και για την λειτουργία σε φορτίο διπλάσιο του ονομαστικού.



Σχήμα 5.36: Στο παραπάνω σχήμα διακρίνονται ανά στήλη η κατανομή του πεδίου σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, η μορφή της αντί – ΗΕΔ και της ροπής στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και σε φορτίο διπλάσιο του ονομαστικού για τις διαμορφώσεις (α) 16/18 με τυλίγματα απλής στρώσης, (β) 14/18 με τυλίγματα διπλής στρώσης και (γ) 16/18 με τυλίγματα διπλής στρώσης

Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης

Συγκρίνοντας τα παραπάνω διαγράμματα καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

- Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται πως όλες οι διαμορφώσεις παρουσιάζουν την καλύτερη απόδοση τους στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, που οφείλεται στην σημαντικότητα που έχει δοθεί στην απόδοση του κινητήρα κατά την εφαρμογή των αντικειμενικών συναρτήσεων.
- Οι διαμορφώσεις απλής στρώσης παρουσιάζουν εν γένει χειρότερα χαρακτηριστικά από τις διαμορφώσεις απλής στρώσης. Πιο συγκεκριμένα, η διαμόρφωση 16/18 απλής στρώσης παρουσιάζει μικρότερη ροπή (σε όλες τις καταστάσεις λειτουργίας) και μεγαλύτερη συνολική αρμονική παραμόρφωση από τις διαμορφώσεις 16/18 και 14/18 διπλής στρώσης. Εκτός αυτού, παρατηρείται επίσης πως έχει και μεγαλύτερη ευαισθησία στην συνολική αρμονική παραμόρφωση όσο το φορτίο του κινητήρα αυξάνεται. Η διαμόρφωση 16/18 απλής στρώσης έχει συνολική αρμονική παραμόρφωση 14,5% οι άλλες δύο διαμορφώσεις έχουν 8,5% και 8,8% αντίστοιχα.
- Ως προς την κυμάτωση της ροπής, αυτή μειώνεται όσο αυξάνεται και το φορτίο στον άξονα του κινητήρα, αποτέλεσμα αναμενόμενο καθώς αυξάνεται στο διπλάσιο ο παρονομαστής του κλάσματος με την αύξηση της μέσης ροπής χωρίς όμως να έχουμε αντίστοιχη αύξηση στην διαφορά της μέγιστης με την ελάχιστη ροπή.
- Συγκρίνοντας τις δύο διαμορφώσεις με τυλίγματα διπλής στρώσης διακρίνεται και η μικρή υπεροχή της 16πολικής μηχανής. Τα περισσότερα χαρακτηριστικά των δύο αυτών κινητήρων είναι παρόμοια, παρόλα αυτά ο 16πολικός κινητήρας παρουσιάζει μεγαλύτερη ροπή στον άξονα για την ίδια επιφανειακή πυκνότητα ρεύματος δίνοντας ευελιξία σε μικρά σφάλματα. Αντιθέτως, ο 14πολικός κινητήρας παρουσιάζει ροπή ίση με τις ανάγκες της συγκεκριμένης εφαρμογής οπότε δεν αφήνει και το περιθώριο μικρών σφαλμάτων κατά την διάρκεια της διαδικασίας.

Πίνακας 5.1: Σύγκριση των τριών διαμορφώσεων σε τρία σημεία λειτουργίας.

	Μέση Ροπή (N.m)	Κυμάτωση Ροπής (%)	THD (%)	Απώλειες (W)	Απόδοση (%)	Ρεύμα στάτη (A)
16 - πολική απλής στρώση	4,81	7,78	2,78	65	93	2,42
	9,5	4,3	4,65	105	93,43	4,84
	18	1,91	14,45	345	89,11	9,68
14 - πολική διπλής στρώση	5,11	6,23	2,96	69	93,02	2,75
	10	4,6	3,67	123,5	93,57	5,5
	19	4,54	8,5	371,5	90,17	11
16 - πολική διπλής στρώση	5,37	5,79	2,95	60	93,81	2,84
	11,33	4,92	3,05	115	93,94	5,69
	21,56	1,56	8,8	379	89,94	11,4

## 5.7 Τελική διαμόρφωση κινητήρα

Με βάση τα παραπάνω, η κορυφαία επιλογή για την εφαρμογή μας είναι ο 16πολικός κινητήρας με τυλίγματα διπλής στρώσης. Παρουσιάζει καλύτερα χαρακτηριστικά στην απόδοση και την επίδοση του κινητήρα ενώ ταυτόχρονα πληροί καλύτερα τις προϋποθέσεις για την ταχύτητα περιστροφής και την ροπή στον άξονα του κινητήρα. Έχοντας αποκτήσει αρκετά μεγαλύτερη εμπειρία στον τρόπο με τον οποίο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα επηρεάζουν την απόδοση και την επίδοση του κινητήρα θα πραγματοποιήσουμε ορισμένες τελικές βελτιώσεις στον κινητήρα της συγκεκριμένης εφαρμογής ως προς το όγκο της λαμαρίνας του στάτη και του δρομέα, καθώς και ως προς την τελική γεωμετρία των δοντιών του στάτη.

### 5.7.1 Βελτιστοποίηση βάρους λαμαρίνας

Στον παρακάτω πίνακα διακρίνεται ο τρόπος με τον οποίο η εσωτερική ακτίνα της λαμαρίνας του δρομέα επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του κινητήρα.

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά κινητήρα κατά την μεταβολή της εσωτερικής ακτίνας του δρομέα.

Εσωτερική Ακτίνα Δρομέα (mm)	Μέση Ροπή (N.m)	Κυμάτωση Ροπής (%)	THD (%)	Απόδοση (%)	Βάρος (Kg)
10	11,32	4,968	3,193	93,931	5,448
12	11,32	4,967	3,191	93,932	5,380
14	11,32	4,965	3,192	93,932	5,299
16	11,32	4,943	3,191	93,932	5,206
18	11,32	5,099	3,180	93,932	5,101
20	11,31	4,908	3,179	93,925	4,983
<b>22</b>	<b>11,31</b>	<b>4,804</b>	<b>3,178</b>	<b>93,926</b>	<b>4,852</b>
24	11,31	5,104	3,179	93,924	4,709
26	11,31	4,996	3,177	93,927	4,554

Με βάση τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι μπορούμε να μειώσουμε έως και 7% το συνολικό βάρος του κινητήρα διατηρώντας αμετάβλητα τα χαρακτηριστικά του ή ακόμα και βελτιώνοντας σε ορισμένες περιπτώσεις. Ως εκ τούτου, η τελική επιλογή της εσωτερικής ακτίνας του δρομέα θα είναι τα 22 mm.

## Κεφάλαιο 5 – Συγκριτική διερεύνηση διαφόρων διαμορφώσεων και βελτιστοποίηση οριστικής διαμόρφωσης

Ακολουθώντας ακριβώς την ίδια λογική θα διερευνήσουμε και τα όρια της εξωτερικής ακτίνας του στάτη με σκοπό να βελτιώσουμε το συνολικό βάρος του κινητήρα, διατηρώντας σταθερά τα χαρακτηριστικά της επίδοσης και της απόδοσης. Στον παρακάτω πίνακα διακρίνεται ο τρόπος με τον οποίο η εξωτερική ακτίνα της λαμαρίνας του στάτη επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του κινητήρα.

Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικά κινητήρα κατά την μεταβολή της εξωτερικής ακτίνας του στάτη.

Εξωτερική Ακτίνα Στάτη (mm)	Μέση Ροπή (N.m)	Κυμάτωση Ροπής (%)	THD (%)	Απόδοση (%)	Βάρος (Kg)
60	11,32	5,775	3,188	94,308	3,882
62	11,31	5,836	3,170	94,155	4,261
64	11,31	4,765	3,178	94,004	4,652
66	11,31	4,860	3,192	93,847	5,056
68	11,31	4,916	3,183	93,688	5,471
70	11,30	4,768	3,184	93,519	5,900
72	11,30	5,278	3,206	93,348	6,341
74	11,30	5,580	3,189	93,174	6,794
76	11,31	5,206	3,169	93,022	7,259

Με βάση τον παραπάνω πίνακα οι βελτιώσεις που μπορούμε να κάνουμε στην εξωτερική ακτίνα του στάτη χωρίς να επηρεάσουμε έντονα την κυμάτωση της ροπής είναι να την μειώσουμε κατά 1mm μειώνοντας το συνολικό βάρος του κινητήρα κατά επιπλέον 4%, ενώ έχει επιτευχθεί συνολικά βελτίωση του βάρους κατά 11,4% από την αρχική διαμόρφωση. Πρόκειται για μια πολύ σημαντική βελτίωση αν αναλογιστούμε ότι τα χαρακτηριστικά της μηχανής έχουν παραμείνει αμετάβλητα ή και έχουν βελτιωθεί σε ορισμένες περιπτώσεις.

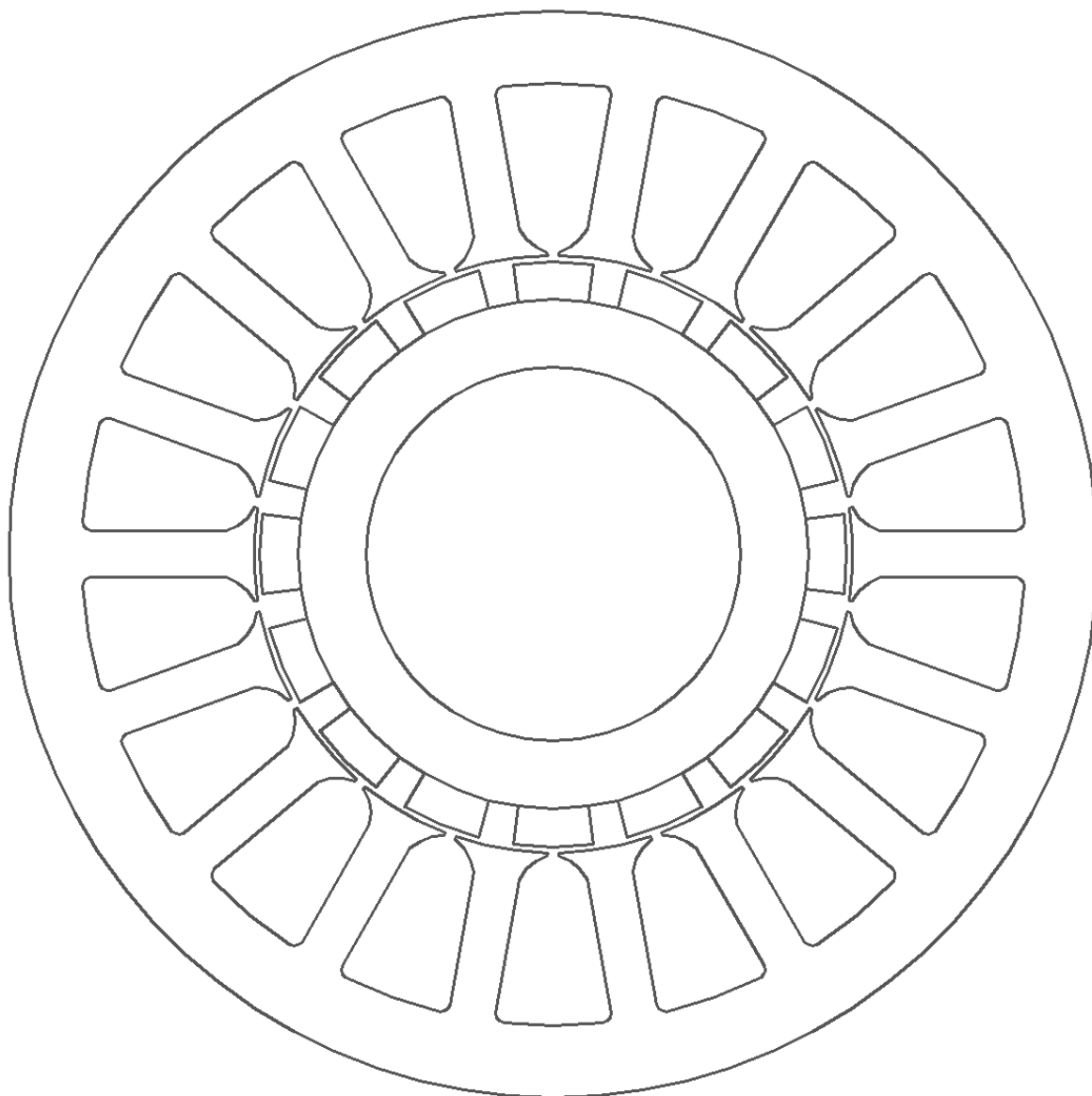
### 5.7.2 Βελτιστοποίηση γεωμετρίας του δοντιού του στάτη

Πραγματοποιήθηκε διερεύνηση σε διάφορα μεγέθη που αφορούν την γεωμετρία του δοντιού, χωρίς να επηρεάσουμε το πάχος και το μήκος του, τα οποία και έχουν ήδη βελτιστοποιηθεί στα προηγούμενα βήματα. Μέσα από αυτή τη διαδικασία προέκυψε και η τελική διαμόρφωση του κινητήρα που φαίνεται στο σχήμα 5.37.

Πίνακας 5.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά τελικής διαμόρφωσης.

<b>Τεχνικά χαρακτηριστικά κινητήρα</b>			
Αριθμός πόλων		16	
Αριθμός αυλάκων		18	
Ενεργό μήκος μηχανής		65 mm	
Εύρος μαγνήτη επί του πολικού βήματος		70%	
Πάχος μαγνήτη		4,5 mm	
Πλάτος δοντιού		16 mm	
Πάχος δοντιού		5,5 mm	
Αριθμός ελιγμάτων		50	
Διάμετρο καλωδίου		1 mm <sup>2</sup>	
Ταχύτητα περιστροφής δρομέα		1500 rpm	
Ονομαστική ισχύς		1,8 kW	
Συντελεστής πληρότητας αύλακος		0,5	
Βάρος		4,62 Kg	
	Φορτίο μισό του ονομαστικού	Ονομαστικό Φορτίο	Φορτίο διπλάσιο του ονομαστικού
Πυκνότητα Ρεύματος	2 A/mm <sup>2</sup>	4 A/mm <sup>2</sup>	8 A/mm <sup>2</sup>
Μέση ροπή	5,54 N.m	11,12 N.m	21,81 N.m
Κυμάτωση ροπής	5,89 %	3,9 %	3,31 %
Αρμονική παραμόρφωση	1,78 %	2,85 %	6,5 %
Ρεύμα Στάτη	2,92 A	5,85 A	11,71 A
Απόδοση	93,92 %	93,54 %	89,64 %





Σχήμα 5.37: Τελική διαμόρφωση κινητήρα



## Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

### 6.1 Συμπεράσματα

Συγκεντρωτικά τα κυριότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την εργασία έχουν ως εξής:

1. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία παρέχει στον χρήστη τη δυνατότητα βελτιστοποίησης οποιασδήποτε γεωμετρίας κινητήρα μονίμων μαγνητών προσαρμοζόμενη εύκολα στις ανάγκες της κάθε εφαρμογής.
2. Παρατηρήθηκε το φαινόμενο της ασύμμετρης μαγνητικής έλξης για τις διαμορφώσεις που ισχύει  $Q_s = p \pm 1$ .
3. Είναι δυνατόν να μειωθεί περαιτέρω ο υπολογιστικός χρόνος επίλυσης των παραπάνω προβλημάτων, αξιοποιώντας τις ιδιαιτερότητες της συγκεκριμένης εφαρμογής, χωρίς αυτό να συνεπάγεται αποκλίσεις στα αποτελέσματα.
4. Κατά την σύγκριση των διαφόρων εναλλακτικών διαμορφώσεων που μελετήθηκαν εξήχθησαν τα εξής επιπλέον συμπεράσματα:
  - Τα συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσης υπερτερούν σε σύγκριση με τα τυλίγματα απλής στρώσης σε όλες τις μελετηθείσες διαμορφώσεις.
  - Η αύξηση του αριθμού των αυλάκων στάτη οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της απόδοσης του κινητήρα στις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα οι κινητήρες 16/18D και 14/18D παρουσιάζουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά σε σχέση με τους κινητήρες 14/12D και 10/12D.
  - Οι διαμορφώσεις με τυλίγματα διπλής στρώσης παρουσιάζουν μεγαλύτερο συντελεστή απόδοσης, καθώς τα τυλίγματα απλής στρώσης έχουν αυξημένες απώλειες χαλκού κατά 10% εξαιτίας του μεγαλύτερου μήκους αγωγών στον στάτη.
5. Από την ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων εξήχθησαν τα εξής επιπλέον συμπεράσματα:
  - Από την ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων επιβεβαιώθηκε ότι οι κινητήρες με τυλίγματα απλής στρώσης παρουσιάζουν εν γένει χειρότερα χαρακτηριστικά από τους κινητήρες με τυλίγματα διπλής στρώσης (σύγκριση 16/18D με 16/18S). Ταυτόχρονα επιβεβαιώθηκε ότι δεν είναι εφικτό να βελτιστοποιηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να πλησιάσουν τα χαρακτηριστικά ενός αντίστοιχου κινητήρα με τυλίγματα διπλής στρώσης.
  - Στις γεωμετρίες που μελετήθηκαν διαπιστώθηκε ότι αυξάνοντας την εσωτερική ακτίνα της λαμαρίνας του δρομέα είναι δυνατόν να ελαχιστοποιηθεί το βάρος και ο όγκος της, χωρίς να επηρεαστούν σημαντικά τα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης του κινητήρα. Αντιθέτως, η εξωτερική ακτίνα του στάτη είναι δύσκολο να μειωθεί χωρίς να επηρεαστεί αντίστοιχα η απόδοση του κινητήρα.
  - Ο συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης επηρεάζεται έντονα από τοπικούς κορεσμούς στα δόντια του μαγνητικού κυκλώματος καθώς και από τις σκεδάσεις της μαγνητικής ροής.
  - Η διαμόρφωση της 16πολικής μηχανής με 18 αυλάκια στάτη και τυλίγματα διπλής στρώσης παρουσίασε τα καλύτερα χαρακτηριστικά σε τρία διαφορετικά σημεία λειτουργίας που μελετήθηκαν.

6. Είναι δυνατόν να μειώσουμε αισθητά το εύρος του μαγνήτη (με ταυτόχρονη μείωση του πάχους του δοντιού), μειώνοντας το βάρος και το κατασκευαστικό κόστος του κινητήρα επιτυγχάνοντας βελτιωμένα χαρακτηριστικά επίδοσης.
7. Μείωση του πάχους του δοντιού δεν συνεπάγεται και βελτιωμένη επίδοση. Όπως παρατηρήθηκε υπάρχει ένα ολικό μέγιστο στο διάγραμμα ροπής – πάχους δοντιού το οποίο δεν είναι εύκολο να ξεπεραστεί με περαιτέρω μείωση του πάχους του δοντιού.
8. Το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης της τελικής διαμόρφωσης παραμένει σε επίπεδα χαμηλότερα των προδιαγραφών, ενώ ταυτόχρονα αποφεύγεται ο αποσυγχρονισμός του κινητήρα κατά την διάρκεια του βραχυκυκλώματος και έως ότου ενεργοποιηθούν οι τυπικές διατάξεις προστασίας του κινητήρα.
9. Είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν σημαντικές βελτιώσεις στην κυμάτωση της ροπής και στον συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης του κινητήρα πραγματοποιώντας ανάλυση ευαισθησίας σε επιπλέον γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα. Παρά ταύτα αυτές οι αλλαγές επηρεάζουν έντονα το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης προκαλώντας αύξησή του έως και 50%.
10. Η τελική διαμόρφωση μετά τη φάση οριστικής σχεδίασης του κινητήρα παρουσιάζει συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης βελτιωμένο κατά ~59% και κυμάτωση ροπής βελτιωμένη και ~43% σε σχέση με την προκαταρκτική σχεδίαση. Τα παραπάνω αποτελέσματα φανερώσουν και την σημασία της ανάλυσης ευαισθησίας παραμέτρων κατά την παραπάνω διαδικασία.
11. Με την προαναφερόμενη διαδικασία επετεύχθη οριστική σχεδίαση κινητήρα με εξαιρετικά βελτιωμένη απόδοση, με ταυτόχρονη διατήρηση των επιθυμητών χαρακτηριστικών επίδοσης αλλά και μείωση του βάρους κατά 14,25 %.

## 6.2 Πρωτότυπη συνεισφορά της εργασίας

Η εργασία επιχείρησε τη σχεδίαση ενός κινητήρα μονίμων μαγνητών, με κεντρικό στόχο την επίτευξη της επιθυμητής επίδοσης με την βέλτιστη δυνατή απόδοση.

Πιο συγκεκριμένα, κατά την διάρκεια της παραπάνω διαδικασίας, οι κυριότερες επιμέρους τεχνικές που αναπτύχθηκαν είναι οι εξής:

1. Παραμετροποιημένη σχεδίαση κινητήρα με την βοήθεια της διεπαφής περιβάλλοντος αριθμητικών υπολογισμών και λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να πραγματοποιήσει μια πλήρως αυτοματοποιημένη διερεύνηση οποιασδήποτε γεωμετρίας και διαμόρφωσης κινητήρα.
2. Επιλογή τύπου τυλιγμάτων του στάτη (συγκεντρωμένα απλής ή διπλής στρώσης, βροχοειδή τυλίγματα) καθώς και επιλογή των πλεονεκτικότερων κατασκευαστικών υλικών τόσο για το στάτη όσο και για το δρομέα μέσα από βιβλιοθήκες.
3. Ανάπτυξη μεθοδολογίας σχεδιασμού ηλεκτρικών κινητήρων, που συνδυάζει την ανάλυση μαγνητικών προβλημάτων με ταυτόχρονη μελέτη των μεταβατικών φαινομένων που παρουσιάζει ένας κινητήρας κατά τη διάρκεια λειτουργίας του (μεταβολές φορτίου, μονοφασικό βραχυκύκλωμα, τριφασικό βραχυκύκλωμα). Η μεθοδολογία αυτή καταλήγει στη βέλτιστη γεωμετρία και διαμόρφωση ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.
4. Η επιλογή της τελικής διαμόρφωσης πραγματοποιείται συνυπολογίζοντας το κατασκευαστικό κόστος με το κόστος λειτουργίας του ηλεκτρικού κινητήρα.

### 6.3 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

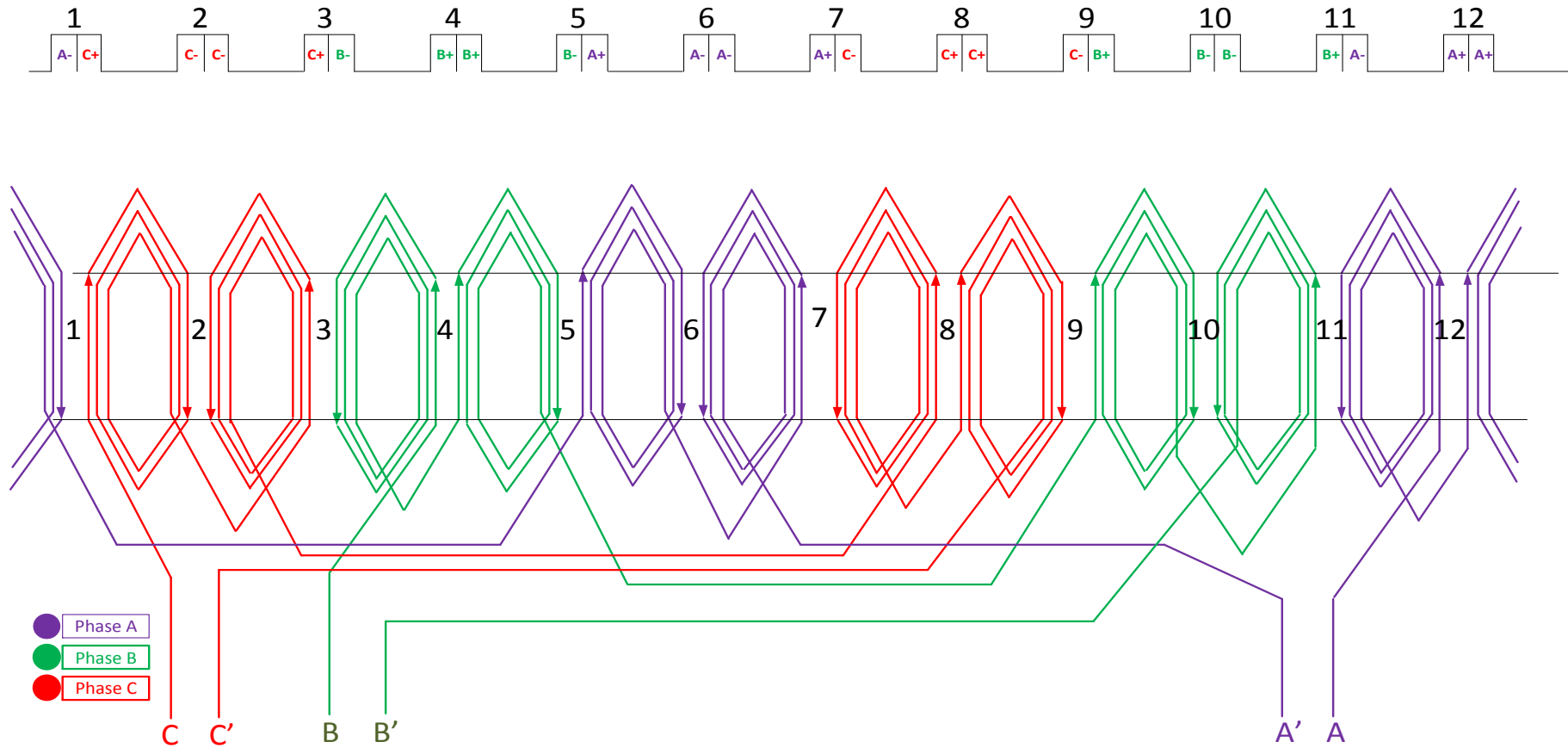
Με την ολοκλήρωση της εργασίας αναδείχθηκαν τα εξής θέματα για περαιτέρω διερεύνηση:

1. Πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων με την κατασκευή της τελικής διαμόρφωσης η οποία επιλέχθηκε βάσει της διαδικασίας που αναπτύχθηκε.
2. Σύγκριση της παρούσας βέλτιστης γεωμετρίας σύγχρονου κινητήρα μονίμων επιφανειακών μαγνητών με άλλες εναλλακτικές διαμορφώσεις δρομέα σύγχρονων μηχανών μονίμων μαγνητών (π.χ. εσωτερικών μονίμων μαγνητών, μονίμων μαγνητών σε σχήμα V κτλ.).



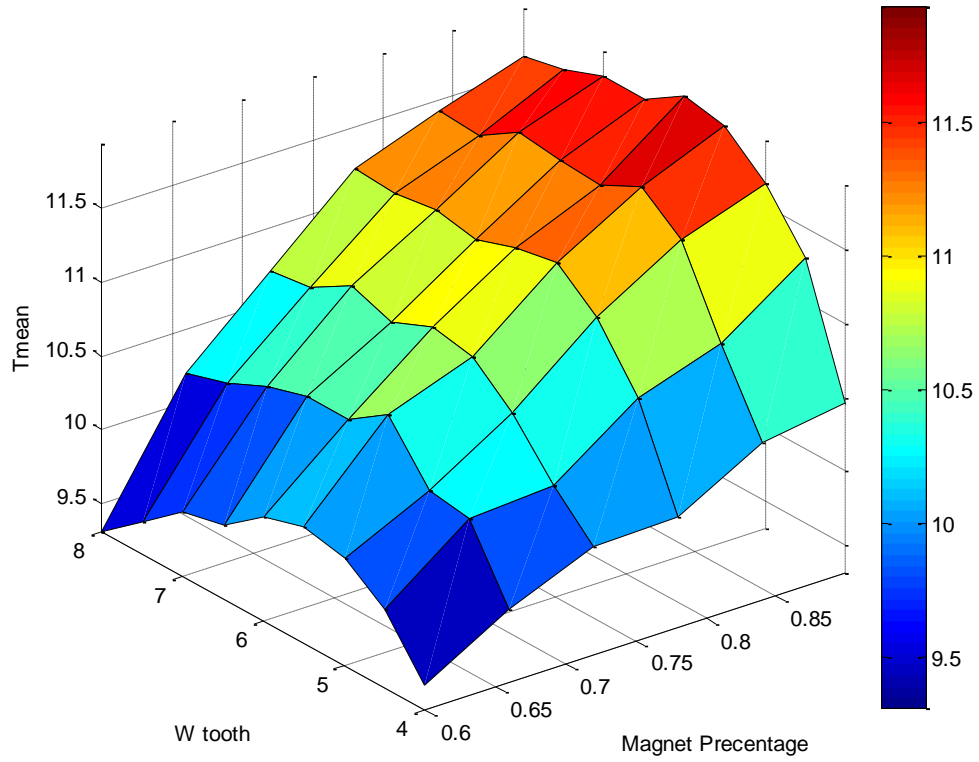
## Παράρτημα Α

### Συγκεντρωμένα τύλιγματα διπλής στρώσης



## Παράρτημα Β

Ανάλυση ευαισθησίας ροπής για την διαμόρφωση 14/12 με συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσης.





## Βιβλιογραφία

- [1] K. T. Chau, *Electric Vehicle Machines and Drives: Design, Analysis and Application*, John Wiley & Sons, 2015.
- [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] Γεώργιος Ι. Τσεκούρας, *Μελέτη κατασκευής, ανάλυση κυκλωματικής και πεδιακής συμπεριφοράς δοκιμίου 2.5kW και ανεμογεννήτριας 25kW*, Μεταπτυχιακή εργασία, Αθήνα 2000
- [5] F. Meier, *Permanent-Magnet Synchronous Machines with Non-Overlapping Concentrated Windings for Low-Speed Direct-Drive Applications*, Stockholm: Royal Institute of Technology Department of Electrical Engineering Electrical Machines and Power Electronics, 2008.
- [6] Στέφανος Μανιάς, *Ηλεκτρονικά Ισχύος, Εκδόσεις Συμείων*, Αθήνα 2014
- [7] Daniel Martinez, *Design of a Permanent-Magnet Synchronous Machine with Non-Overlapping Concentrated Windings*, 2012
- [8] T. J. Juha Pyrhonen and V. Hrabovcova, *Design of Rotating Electrical Machines*. Lappeenranta University of Technology, USA: John Wiley and Sons, 2008.
- [9] Florence Libert , *Design, Optimization and Comparison of Permanent Magnet Motors for a Low-Speed Direct-Driven Mixer*, 2004
- [10] R. Krishnan, *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*, Electrical and Computer Engineering Department Virginia Tech Blacksburg, Virginia, USA, 2010
- [11] Peter Sekerak, Valeria Hrabovcova, Juha Pyrhonen, Lukas Kalamen, Pavol Rafajdus, Matus Onufer , *Ferrites And Different Winding Types in Permanent Magnet Synchronous Motor* .
- [12] 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.
- [13] R. Deeb, *Calculation of Eddy Current Losses in Permanent Magnets of Servo Motor*, Electroscop EEICT 2011

- [14] Ειδική αντίσταση χαλκού: [http://www.engineeringtoolbox.com/resistivity-conductivity-d\\_418.html](http://www.engineeringtoolbox.com/resistivity-conductivity-d_418.html)
- [15] Καμπύλη Απωλειών σιδήρου: <http://cogent-power.com/cms-data/downloads/m235-35a.pdf>
- [16] Ειδικό βάρος M235-35A : <http://industry.arcelormittal.com/catalogue/D20/EN>
- [17] J. F. Gieras, *Permanent magnet motor technology : design and applications*, CRC Press 2010.
- [18] K. Krishna Murty, *Equation For Windage Loss Of Axial Fflux, A.C. 3 Phase Synchronous Motor*, University of Central Florida.
- [19] Bargallo, R. Llaverias, J, De Blas, A, Martín, H, Piqué, R., *Main inductance determination in rotating machines. Analytical and Numerical calculation: A didactical approach*, Politechnical University of Catalonia (UPC).
- [20] Chee – Mun Ong. *Dynamic simulation of electrical machinery*, Prentice Hall PTR:1998
- [21] Chee – Mun Ong. *Dynamic simulation of electrical machinery*, Prentice Hall PTR:1998
- [22] Dal Y. Ohm, “*Dynamic Model Of PM Synchronous Motors*”, 2000.
- [23] Anyuan Chen, Robert Nilssen, *Harmonic Analysis and Comparison of the Back EMFs of Four Permanent Magnet Machines with Different Winding Arrangements*, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2008
- [24] Ramon Bargallo, *Finite Elements for Electrical Engineering*, 2006
- [25] Seong Taek Lee, *Development and analysis of interior Permanent Magnet Synchronous Motor with Field Excitation Structure*, 2009
- [26] Stelu ța NEDELCU, Ion TRIFU, Tiberiu TUDORACH, *Finite Element Analysis of the useful magnetic flux of a low speed PMSM*, 2013
- [27] Lidija Petkovska, *Steady State Performance Evaluation of a Permanent Magnet Synchronous Motor Based on FEA*, 2008
- [28] Pia Salminen , *Fractional slot permanent magnet synchronous motors for low speed applications*, 2004
- [29] Bassel Aslan, Eric Semail, Julien Korecki, Jerome Legranger, *Slot/pole Combinations Choice for Concentrated Multiphase Machines dedicated to Mild-Hybrid Applications*, 2013

## Λογισμικό

- [1] Λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων (FEA)  
<http://www.femm.info/wiki/HomePage>
- [2] Περιβάλλον Αριθμητικών Υπολογισμών (Matlab - Mathworks)  
<http://www.mathworks.com/products/matlab/index.html> - έκδοση R2013b
- [3] Αρχιτεκτονικό – Σχεδιαστικό Λογισμικό (Autocad)  
[www.autodesk.com/products/autocad/overview](http://www.autodesk.com/products/autocad/overview) - έκδοση 2015
- [4] Λογισμικό Σχεδίασης Διαγραμμάτων (Microsoft Visio)  
<https://products.office.com/el-gr/visio> - έκδοση 2010