



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

**Σχεδίαση και σύγκριση εναλλακτικών τοπολογιών κινητήρα  
επαγωγής για εφαρμογή σε σύστημα ελιγμών πλοίου**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Κωνσταντίνα Ι. Νικολάου

**Επιβλέπων :** Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.





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

## Σύγκριση εναλλακτικών τοπολογιών κινητήρα επαγωγής για εφαρμογή σε σύστημα ελιγμών πλοίου

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνα Ι. Νικολάου

**Επιβλέπων :** Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .....

.....

Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Στέφανος Μανιάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Σταύρος Παπαθανασίου

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2014

.....  
Κωνσταντίνα Ι. Νικολάου

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

Copyright © Κωνσταντίνα Ι.Νικολάου, 2014.

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.

## **Ευχαριστίες**

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

Ευχαριστώ θερμά, τον Καθηγητή μου κ. Αντώνιο Κλαδά, για την καθοδήγησή του και την άψογη συνεργασία για την περάτωση της εργασίας, διαφωτίζοντας τις όποιες απορίες μου επί του θέματος της σχεδίασης και λειτουργίας των ηλεκτρικών κινητήρων. Ιδιαίτερώς ευχαριστώ επίσης τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Μπενιακάρ Μίνω που με στήριξε πρόθυμα και απλόχερα σε όλη τη διαδικασία ολοκλήρωσης της παρούσας εργασίας.



## **Περίληψη**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρείται λεπτομερής σχεδίαση και ανάλυση της συμπεριφοράς κινητήρα επαγωγής ισχύος 112 kW, ο οποίος προορίζεται για εφαρμογές συστημάτων ελιγμών πλοίων.

Η μέθοδος σχεδιασμού που αναπτύχθηκε περιλαμβάνει τα ακόλουθα τρία στάδια: Σε ένα πρώτο στάδιο προκαταρκτικής σχεδίασης προσδιορίζονται τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά του διακένου, του δρομέα και του στάτη της μηχανής χρησιμοποιώντας αναλυτικές σχέσεις με βάση τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά επίδοσης. Σε ένα δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται η οριστική σχεδίαση της γεωμετρίας του κινητήρα χρησιμοποιώντας αριθμητική ανάλυση του μαγνητικού πεδίου του ενεργού μέρους με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμό με την τεχνική ανάλυσης ευαισθησίας των γεωμετρικών παραμέτρων του κινητήρα. Τέλος σε ένα τρίτο στάδιο αποτιμάται η συμπεριφορά σε όλες τις συνθήκες φόρτισης, χρησιμοποιώντας υπολογισμούς με βάση τις παραμέτρους του ανά φάση ισοδύναμου κυκλώματος που προέκυψαν από την πεδιακή ανάλυση.

Προκειμένου να επιλεγεί η καταλληλότερη γεωμετρία κινητήρα για την συγκεκριμένη εφαρμογή συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα της προαναφερόμενης μεθοδολογίας για τρεις περιπτώσεις κινητήρων κατασκευαστικής κλάσης B, C και D κατά NEMA, αντίστοιχα, και προέκυψε συνολικό μικρό προβάδισμα του κινητήρα κλάσεως D έναντι των υπολοίπων.

## **Λέξεις Κλειδιά**

Κινητήρες επαγωγής, δρομέας κλωβού, προκαταρκτική σχεδίαση, βελτιστοποίηση γεωμετρίας, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, τεχνική ανάλυσης ευαισθησίας παραμέτρων, ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα.

## **Abstract**

This dissertation introduces a methodology for electric machine geometry optimization enabling design of a 112 kW three phase squirrel cage induction motor for ship thruster propulsion applications.

The methodology developed is consisted of three steps: In a first step the preliminary design of the main air-gap, rotor and stator dimensions is undertaken by using classical formulae. In a second step the final motor design is performed by using Finite Element Method analysis of the electromagnetic field equations of the active part in conjunction with sensitivity analysis techniques and convenient parameterization of the design variables. In a third step, the motor performance in all operating conditions is analyzed and compared by using the per-phase equivalent circuit of the motor deduced by the magnetic field analysis.

In order to select the optimal motor geometry for the specific application, three alternative motor configurations corresponding to NEMA classes B, C and D, respectively, have been examined through the methodology developed and the D class motor presented a slight overall advantage.

## **Keywords**

Induction motor, cage rotor, preliminary design, geometry optimization, finite element method, sensitivity analysis technique, motor equivalent circuit.



## Περιεχόμενα

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ ΠΛΟΙΩΝ ΚΑΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΛΙΓΜΩΝ ΠΛΟΙΟΥ (BOW AND STERN THRUSTERS) .....</b>	<b>13</b>
1.1 ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ .....	13
1.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗΣ .....	14
1.3 ΑΙΤΙΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗΣ .....	15
1.4 ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΩΣΗΣ ΠΛΟΙΩΝ .....	16
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ .....</b>	<b>19</b>
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	19
2.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ .....	19
2.2.2 <i>Δρομέας</i> .....	21
2.2.3 <i>Τυλίγματα</i> .....	22
2.3 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ .....	23
2.3.1 <i>Ανάλυση Ισοδυνάμου Κυκλώματος</i> .....	28
2.3.2 <i>Χαρακτηριστική Ροπής – Στροφών</i> .....	31
2.4 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ .....	34
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ .....</b>	<b>37</b>
3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ .....	37
3.2 ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ .....	39
3.2.1 <i>Βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης</i> .....	40
3.2.2 <i>Βήματα της προκαταρκτικής σχεδίασης</i> .....	43
3.3 ΠΕΔΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	44
3.3.1 <i>Μαγνητοστατικά προβλήματα</i> .....	45
3.3.2 <i>Οριακές συνθήκες</i> .....	46
3.3.3 <i>Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων</i> .....	47
3.3.4 <i>Το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων femm</i> .....	47
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΙΓΜΩΝ ΠΛΟΙΟΥ (BOW AND STERN THRUSTERS) .....</b>	<b>49</b>
4.1 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ .....	49
4.2 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ .....	50
4.2.1 <i>Διαστασιολόγηση διακένου</i> .....	50
4.2.2 <i>Παραμετροποιημένη σχεδίαση</i> .....	52

4.2.3 Σχεδίαση στάτη .....	52
4.2.4 Σχεδίαση Δρομέα .....	55
4.2.4.1 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης B .....	56
4.2.4.2 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης C .....	57
4.2.4.3 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης D .....	58
4.2.5 Τελική Γεωμετρία .....	58
4.3 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ .....	60
4.4 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ .....	61
4.4.1 Ωμικές απώλειες .....	61
4.4.2 Απώλειες πυρήνα .....	62
4.4.3 Απώλειες τριβών .....	62
4.4.4 Απώλειες Ανεμισμού .....	63
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΟΡΙΣΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ .....</b>	<b>65</b>
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ FEMM .....	65
5.1.2 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΡΧΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ .....	72
5.1.2.2 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης C .....	73
5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΑΥΛΑΚΩΝ ΣΤΑΤΗ ΚΑΙ ΔΡΟΜΕΑ. ....	74
5.2.1 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης B .....	75
5.2.1.1 Μεταβολή γεωμετρικών παραμέτρων κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης B .....	75
5.2.1.2 Απώλειες τελικής γεωμετρίας κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης B .....	92
5.2.2 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης C .....	93
5.2.2.1 Μεταβολή γεωμετρικών παραμέτρων κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης C .....	94
5.2.3 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης D .....	132
5.2.3.1 Μεταβολή γεωμετρικών παραμέτρων κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης D .....	132
5.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ .....	145
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ....</b>	<b>149</b>
6.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ .....	149
6.1.1 Απλοποιημένο Ισοδύναμο κύκλωμα. ....	149
6.1.2 Αναγνώριση των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων .....	150
6.2 ΕΞΑΓΩΓΗ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΡΟΠΗΣ-ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ .....	152
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ .....</b>	<b>155</b>

<b>7.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.</b>	
.....	155
<b>7.1.1 Δοκιμή κενού φορτίου</b> .....	156
<b>7.1.2 Δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα</b> .....	159
<b>7.1.3 Υπολογισμός παραμέτρων 3D φαινομένων</b> .....	161
<b>7.1.4 Το ισοδύναμο κύκλωμα</b> .....	163
<b>7.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ</b> .....	164
<b>7.2.1 Καμπύλη ρεύματος – ολίσθησης</b> .....	164
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	167
<b>8.1 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ</b> .....	167
<b>8.2 ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	168
<b>8.4 ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ</b> .....	169
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	171
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΟΜΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ</b>	
<b>ΕΠΙΔΟΣΗΣ</b> .....	174
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΔΟΜΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ</b> .....	175



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ ΠΛΟΙΩΝ ΚΑΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΛΙΓΜΩΝ ΠΛΟΙΟΥ (BOW AND STERN THRUSTERS)

#### 1.1 Ηλεκτροπρόωση

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 κινητήριες μηχανές όπως ντήζελ, αεριοστρόβιλους και ατμοστρόβιλους. Φυσικά οι κινητήρες ντήζελ, αεριοστρόβιλοι και ατμοστρόβιλοι εξακολουθούν να υπάρχουν στις εγκαταστάσεις ηλεκτροπρόωσης, αλλά αντί να κινούν απ' ευθείας το αξονικό σύστημα με την έλικα κινούν ηλεκτρικές γεννήτριες, που με τη σειρά τους τροφοδοτούν τους ηλεκτρικούς κινητήρες προώσεως, οπότε και αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως "primemovers" ('κινητήριες μηχανές'). Η προωστήρια εγκατάσταση συμπληρώνεται από κάποιο σύστημα ελέγχου για τον χειρισμό της, δηλαδή την εκκίνηση, την αυξομείωση στροφών και την αλλαγή φοράς περιστροφής των ηλεκτρικών κινητήρων [10-15].

Η ηλεκτρική πρόωση έχει αρχίσει να εφαρμόζεται πριν από περίπου 55 χρόνια [10]. Επί μεγάλο διάστημα, η χρήση των συστημάτων είχε σκοπό την παραγωγή συνεχούς ρεύματος και κίνηση με συνεχές ρεύμα. 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. Κατά την τελευταία εικοσαετία, η ανάπτυξη διατάξεων και τεχνικών ελέγχου κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος (μέσω μετατροπών ηλεκτρονικών ισχύος), 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. Γενικότερα, η διαρκώς αυξανόμενη χρήση της ηλεκτροπρόωσης δημιουργεί νέα δεδομένα για τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας των πλοίων. Τα τεχνολογικά επιτεύγματα στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος και η εφαρμογή τους κινητήρες πρόωσης προσφέρουν μεγάλα πλεονεκτήματα σε σχέση με το παρελθόν αλλά παράλληλα δημιουργούν μεγαλύτερες απαιτήσεις από την πλευρά της παραγωγής, του ελέγχου, της διανομής και της ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος.

Δεδομένης της ραγδαίως αναπτυσσόμενης έρευνας επί των ηλεκτροπροωστήριων συστημάτων, κρίνεται χρήσιμο να επεξηγηθούν οι παρακάτω βασικοί όροι που χρησιμοποιούνται συχνά στη σύγχρονη βιομηχανία [10-15].

- Πλήρης Ηλεκτροπρόωση (Full Electric Propulsion) : Η εγκατάσταση προώσεως κατά την οποία το πλοίο κινείται αποκλειστικά από ηλεκτρικούς κινητήρες. Τα ζεύγη κινητηρίων μηχανών-γεννητριών που τροφοδοτούν τους κινητήρες

πρώσεως, υπάρχουν αποκλειστικά για το σκοπό αυτό (δεν τροφοδοτούν δηλαδή άλλα φορτία). Η ηλεκτρική ισχύς για όλους τους άλλους καταναλωτές του πλοίου παράγεται από άλλες γεννήτριες.

- Ολοκληρωμένη Πλήρης Ηλεκτροπρόωση (Integrated Full Electric Propulsion-I.F.E.P.) : Η εγκατάσταση ηλεκτροπρόωσης στην οποία τα ίδια ζεύγη κινητηρίων μηχανών - γεννητριών, τροφοδοτούν τόσο τους ηλεκτρικούς κινητήρες πρώσεως, όσο και τα υπόλοιπα ηλεκτρικά φορτία του πλοίου.
- Πλήρως Εξηλεκτρισμένο πλοίο (All Electric Ship -A.E.S.): Το πλοίο που διαθέτει ολοκληρωμένη πλήρη ηλεκτροπρόωση και επιτελεί σε ευρεία έκταση τις λειτουργίες του μέσω ηλεκτρικών μηχανημάτων και συστημάτων.
- Ηλεκτρικό δίκτυο πρώσεως (Propulsion Network): Το τμήμα εκείνο (ανεξάρτητο ή 'ενσωματωμένο') του ηλεκτρικού δικτύου πλοίου που τροφοδοτεί τα ηλεκτρικά φορτία που σχετίζονται με την πρόωση.
- Ηλεκτρικό δίκτυο χρήσεως (Ship Service System): Το υπόλοιπο, πλην δικτύου πρώσεως, ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου.

### 1.2 Εφαρμογές της ηλεκτροπρόωσης

Ενώ παλαιότερα η ηλεκτρική πρόωση έβρισκε μόνο πολύ εξειδικευμένες εφαρμογές στα πλοία (παγοθραυστικά, ερευνητικά σκάφη, σκάφη πόντισης καλωδίων), κατά τη δεκαετία του '90 παρουσιάζει μια έντονα αυξανόμενη διάδοση σε πλοία όπως μεγάλα επιβατηγά, οχηματαγωγά, κρουαζιερόπλοια, δεξαμενόπλοια, κ.λ.π.



Εικόνα 1.1 Δεξαμενόπλοιο στο οποίο εφαρμόζεται η ηλεκτρική πρόωση. [11]

Γενικά, η ηλεκτρική πρόωση μπορεί να αποδειχθεί η καταλληλότερη λύση στις ακόλουθες κατηγορίες εφαρμογών:

- Σκάφη με υψηλές απαιτήσεις ελκτικών ικανοτήτων.
- Σκάφη με μεγάλη ισχύ βοηθητικών μηχανημάτων.
- Σκάφη με μεγάλα φορτία ενδιαίτησης και έντονη διακύμανση της ισχύος πρόωσης
- Σκάφη εξοπλισμένα με πολλές ταχύστροφες μη αναστρέψιμες μηχανές.
- Υποβρύχια και βαθυσκάφη.

Ειδικά, όσον αφορά στα πολεμικά πλοία, η ηλεκτροπρόωση αποτελεί τη βασική επιλογή για την κίνηση των υποβρυχίων [10-11]. Η χρήση της σε πολεμικά πλοία επιφάνειας, που μέχρι σήμερα ήταν σχετικά περιορισμένη, προσελκύει ξανά το έντονο ενδιαφέρον των ναυτικών χωρών που κατασκευάζουν πολεμικά πλοία και εξετάζεται πλέον σαν υποψήφιο σύστημα για την προωστήρια εγκατάσταση της επόμενης γενιάς και των μεγάλων πολεμικών πλοίων.

### 1.3 Αίτια διάδοσης ηλεκτροπρόωσης

Οι κύριες αιτίες της αναζωπύρωσης του ενδιαφέροντος της θαλάσσιας βιομηχανίας για τη χρήση της ηλεκτροπρόωσης είναι :

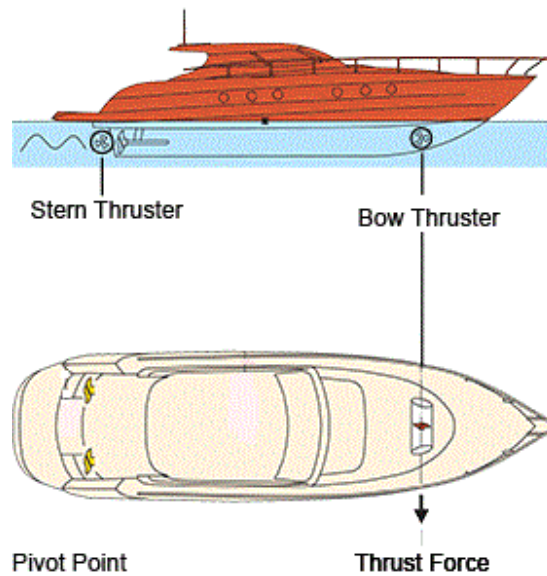
- Η αύξηση των ηλεκτρικών καταναλωτών στα πλοία και η τάση για την ηλεκτροποίηση των πλοίων (με αποκορύφωση το Πλήρως Εξηλεκτρισμένο Πλοίο), δηλαδή η τάση όλες οι λειτουργίες, κύριες και βοηθητικές, να γίνονται πλέον από ηλεκτρικά συστήματα και μηχανήματα αντικαθιστώντας π.χ. υδραυλικά, μηχανικά ή συστήματα ατμού.
- Η ανάγκη για περισσότερο 'αθόρυβη' λειτουργία των πλοίων.
- Η αναζήτηση προωστήριων συστημάτων με χαμηλότερο κόστος ζωής και μειωμένες απαιτήσεις επανδρώσεως.
- Η ωρίμανση τεχνολογιών που απαιτούνται για να αξιοποιηθεί το πλήρες δυναμικό της ηλεκτροπρόωσης. Τέτοιες τεχνολογίες είναι κυρίως των ηλεκτρικών κινητήρων και των ηλεκτρονικών ισχύος για τον έλεγχό τους.

Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι η επιλογή συστήματος ηλεκτροπρόωσης για ένα πλοίο, προσφέρει περισσότερη ελευθερία στη σχεδίαση και στην επιλογή των υποσυστημάτων και της διάταξης όλης της προωστήριας και ηλεκτρικής εγκατάστασης. Σε κάθε περίπτωση αξίζει να σημειωθεί, ότι οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι η μόνη λύση για τη βοηθητική πρόωση (δηλαδή το σύστημα των πλευρικών προωστήριων μηχανισμών που επαυξάνουν την ελκτική ικανότητα των σκαφών ιδίως εντός των λιμένων) με αξιοποίηση κυρίως επαγωγικών κινητήρων μεγάλης ισχύος [10-15].

### 1.4 Κινητήρες σε συστήματα πρόωσης πλοίων

Σε συστήματα πρόωσης πλοίων χρησιμοποιούνται:

Κινητήρες επαγωγής: Οι κινητήρες επαγωγής μεγάλης ισχύος απαιτούν μεγάλο διάκενο αέρα το οποίο οδηγεί σε μείωση του συντελεστή ισχύος, της πυκνότητας ροπής και της απόδοσης του κινητήρα. Είναι τεχνολογικά ώριμοι και έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης. Χρησιμοποιούνται συχνά ως βοηθητικοί πλευρικοί προωστήριοι μηχανισμοί (bow thrusters, stern thrusters) για τη βελτίωση της ικανότητας ελιγμών των πλοίων.



Εικόνα 1.2 Πρωραίοι και πρυμναίοι προωστήριοι μηχανισμοί σε σκάφος [34]

Σύγχρονοι κινητήρες: Απαιτούν ξεχωριστή τροφοδοσία στο δρομέα πράγμα που αυξάνει την πολυπλοκότητα. Οι σύγχρονοι κινητήρες έχουν μεγαλύτερες απαιτήσεις συντήρησης λόγω της ύπαρξης δακτυλίων ολίσθησης και ψηκτρών. Ωστόσο έχουν υψηλότερη απόδοση και συντελεστή ισχύος σε σχέση με τους κινητήρες επαγωγής ωστόσο υπάρχει κίνδυνος αποσυγχρονισμού σε περίπτωση εφαρμογής μεγάλου φορτίου σε κατάσταση ελιγμού. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε μεγάλα ναυτικά βοηθητικά πλοία τα οποία σχεδιάζονται για χαμηλότερες ταχύτητες.

Σύγχρονοι κινητήρες μονίμων μαγνητών: Χαρακτηρίζονται από υψηλή πυκνότητα ισχύος και χαμηλό θόρυβο γι' αυτό και είναι κατάλληλοι για χρήση σε ένα μεγάλο εύρος πλοίων. Τόσο οι κινητήρες επιφανειακών μαγνητών όσο και οι κινητήρες εσωτερικών μαγνητών έχουν υψηλή απόδοση.

Υπεραγωγιμοί σύγχρονοι κινητήρες υψηλής θερμοκρασίας: Οι κινητήρες αυτοί μπορεί να έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος και να είναι πιο αθόρυβοι από τους κινητήρες

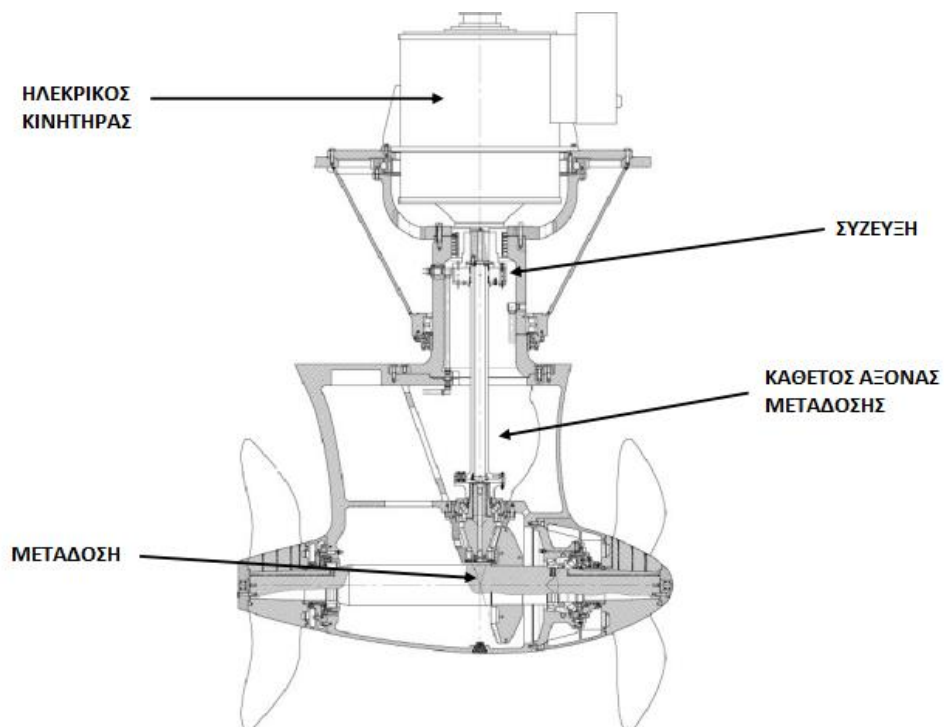


## Κεφάλαιο 1

---

μονίμων μαγνητών αλλά δεν είναι ακόμα τεχνολογικά ώριμοι. Μπορούν να μεταφέρουν υψηλή πυκνότητα ρεύματος έχοντας αμελητέες απώλειες ισχύος στο δρομέα και μπορούν να παράγουν διπλάσια ισχύ εξόδου από τους συμβατικούς κινητήρες με περιελίξεις χαλκού σε παρόμοιο μέγεθος. Προσφέρουν την υψηλότερη ενεργειακή απόδοση.

Τα βασικά μέρη ενός ηλεκτρικού κινητήρα σε σύστημα ελιγμών πλοίου παρουσιάζεται διαγραμματικά στην *εικόνα 1.3*:



*Εικόνα 1.3 Βασικά μέρη κινητήρα σε τυπικό σύστημα ελιγμών πλοίου [35]*



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής και κυρίως των κινητήρων. Εξάγεται και αναλύεται το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα επαγωγής και παρουσιάζεται η διαδικασία εξαγωγής της χαρακτηριστικής ροπής στροφών. Δίδεται η κατηγοριοποίηση των κινητήρων κατά NEMA και τα χαρακτηριστικά κάθε κατηγορίας. Τέλος παρουσιάζεται η χρήση κινητήρων για την πρόωση πλοίων.

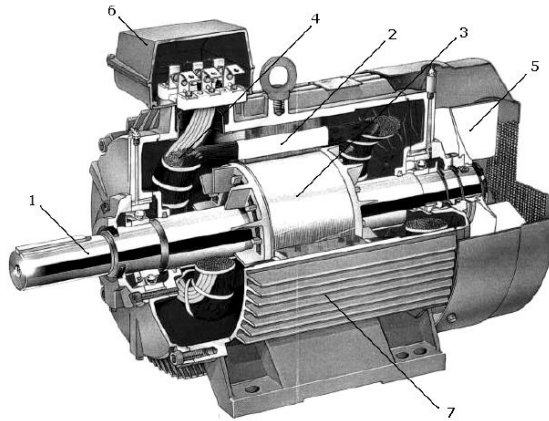
#### 2.1 Εισαγωγή

Οι επαγωγικές μηχανές αποτελούν τις πιο διαδεδομένες μηχανές στα βιομηχανικά συστήματα κίνησης και στις περισσότερες οικιακές εφαρμογές. Η απλή κατασκευή τους, το χαμηλό κόστος, η ελάχιστη συντήρηση και η απευθείας σύνδεση τους στο εναλλασσόμενο δίκτυο είναι τα κύρια πλεονεκτήματα των μηχανών επαγωγής.

Στο εμπόριο διατίθενται διάφορα είδη επαγωγικών μηχανών καθένα για διαφορετική εφαρμογή. Αν και οι επαγωγικές μηχανές είναι εύκολες στο σχεδιασμό και την κατασκευή σε σχέση με τις μηχανές συνεχούς ρεύματος, ο έλεγχος της ροπής και της ταχύτητας που απαιτείται σε αρκετές εφαρμογές απαιτεί μεγαλύτερη κατανόηση του σχεδιασμού και των χαρακτηριστικών της μηχανής και τις καθιστά σε πολλές περιπτώσεις πιο πολύπλοκες από τις μηχανές συνεχούς ρεύματος.

#### 2.2 Κατασκευαστικά στοιχεία μηχανών επαγωγής

Όπως οι περισσότερες μηχανές, μια επαγωγική μηχανή διαθέτει ένα σταθερό εξωτερικό μέρος, που ονομάζεται στάτης και ένα δρομέα ο οποίος περιστρέφεται στο εσωτερικό με ένα προσηκτικά κατασκευασμένο διάκενο αέρος μεταξύ των δύο. Το *σχήμα 2.1* είναι μια τομή της μηχανής όπου φαίνονται τα κύρια κατασκευαστικά στοιχεία της.



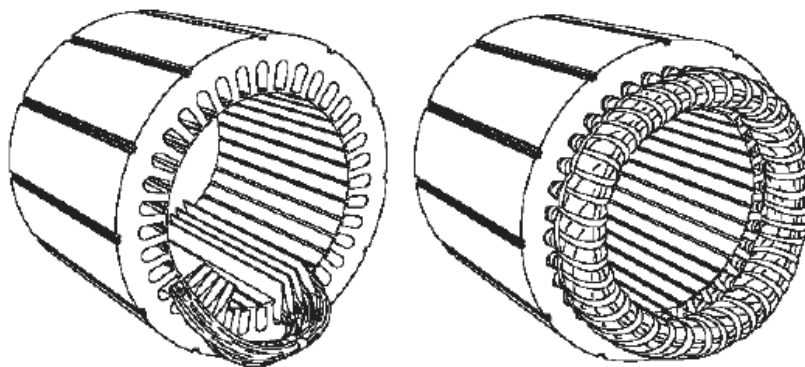
Σχήμα 2.1 κινητήρας επαγωγής βραχυκυκλωμένου κλωβού: 1. άξονας 2. Στάτης 3. Δρομέας 4. τυλίγμα στάτη 5. Φτερωτή ανεμισμού 6. Κιβώτιο σύνδεσης τυλιγμάτων/ακροδεκτών 7. Πλαίσιο (κατασκευή ABB, 90kW, 1484 ΣΑΛ, 630kg) [1]

Πρακτικά όλες οι μηχανές χρησιμοποιούν την περιστροφή ενός μαγνητικού πεδίου για την κίνηση του δρομέα τους. Η τριφασική επαγωγική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος είναι ο μόνος τύπος μηχανής όπου το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο παράγεται φυσικά στο στάτη λόγω της φύσης της τροφοδοσίας. Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος εξαρτώνται είτε από μηχανική είτε από ηλεκτρονική μετατροπή για τη δημιουργία στρεφόμενων μαγνητικών πεδίων ενώ η μονοφασική επαγωγική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος εξαρτάται από επιπρόσθετα ηλεκτρικά στοιχεία.

Στο εσωτερικό κάθε μηχανής σχηματίζονται δύο σύνολα ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Στην επαγωγική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος το ένα σύνολο σχηματίζεται στο στάτη λόγω της τροφοδοσίας που συνδέεται στα τυλίγματα του. Η εναλλασσόμενη μορφή της τροφοδοσίας επάγει μια ηλεκτρομαγνητική δύναμη (ΗΜΔ) στο δρομέα σύμφωνα με το νόμο του Lenz και έτσι δημιουργείται το δεύτερο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο (εξ ου και το όνομα επαγωγική μηχανή). Η αλληλεπίδραση των δύο αυτών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων παράγει ροπή. Ως αποτέλεσμα η μηχανή περιστρέφεται στην κατεύθυνση της παραγόμενης ροπής.

### 2.2.1 Στάτης

Ο στάτης είναι κατασκευασμένος από λεπτά φύλλα αλουμινίου ή σιδήρου τα οποία συνδέονται μεταξύ τους ώστε να σχηματίσουν ένα κοίλο κύλινδρο, τον πυρήνα του στάτη, με αυλακώσεις όπως φαίνεται στο *σχήμα 2.2*



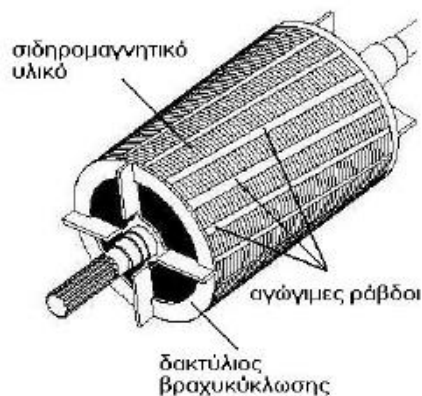
Σχήμα 2.2 Στάτης μηχανής επαγωγής [1]

Τα τυλίγματα τοποθετούνται κατά κανόνα στις ομοιόμορφα διανεμημένες αύλακες του σιδηρομαγνητικού υλικό του στάτη. Για να σχηματιστεί ένα πλήρες τύλιγμα, τοποθετούνται όμοια πηνία σε απέναντι αύλακες και στη συνέχεια συνδέονται μεταξύ τους σε ομάδες. Οι ομάδες πηνίων των τριφασικών μηχανών συνδέονται σε αστέρα ή τρίγωνο. Τα τυλίγματα μπορεί να είναι μονής ή διπλής στρώσης. Στα τυλίγματα διπλής στρώσης κάθε αύλακα περιέχει δύο πλευρές πηνίου, μια στην κορυφή και μια στον πυθμένα της. Κάθε πηνίο έχει μια πλευρά σε πάνω μέρος και την άλλη σε κάτω μέρος αύλακας. Ανάλογα με το τύλιγμα και την τροφοδότηση η μηχανή μπορεί να έχει οποιοδήποτε αριθμό μαγνητικών πόλων. [1,3]

### 2.2.2 Δρομέας

Στο δρομέα της μηχανής επαγωγής, το τύλιγμα είναι ηλεκτρικά κλειστό και πολύ συχνά δεν έχει εξωτερικούς ακροδέκτες. Υπάρχουν δύο τύποι τυλιγμάτων δρομέα που χρησιμοποιούνται:

- Τύλιγμα κλωβού: Το τύλιγμα αυτό αποτελείται από αγώγιμες ράβδους αλουμινίου ή χαλκού οι οποίες βραχυκυκλώνονται στα άκρα τους με δακτυλίους και τοποθετούνται σε αύλακες στο πυρήνα του δρομέα.

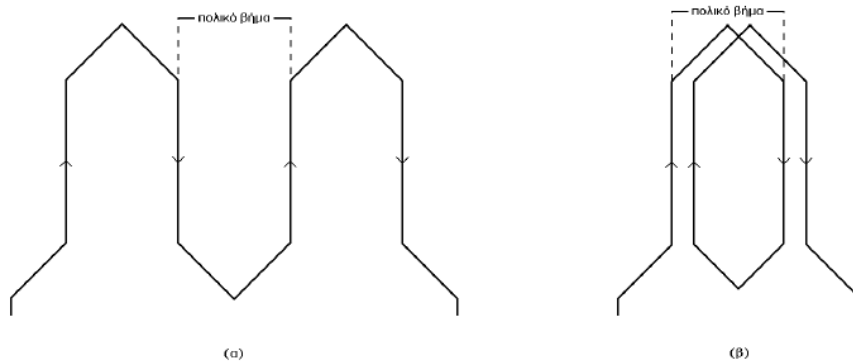


Σχήμα 2.3 Δρομέας με τύλιγμα κλωβού [1]

- Τύλιγμα δρομέα με δακτυλίους. Τυλιγμένοι δρομείς για κινητήρες μέχρι 10kW εφοδιάζονται με συμμετρικά τριφασικά τυλίγματα όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στο στάτη. Για δρομείς κινητήρων μεγαλύτερης ισχύος χρησιμοποιούνται σχεδόν πάντοτε δύο στρώματα με δύο πλευρές πηνίου σε κάθε αύλακα και με ακέραιο ή κλασματικό αριθμό αυλάκων ανά πολικό βήμα και φάση  $q$ . Η σύνδεση των τριών φάσεων στο δρομέα γίνεται συνήθως κατά αστέρα.

### 2.2.3 Τυλίγματα

Η επιλογή του είδους του τυλίγματος της μηχανής έχει στόχο την όσο καλύτερη χωρική κατανομή του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Υπάρχουν δύο ειδών τυλίγματα. Το βροχοειδές τύλιγμα (σχήμα 2.4 β) που συναντάται συνήθως σε μηχανές με μικρό αριθμό πόλων, κινητήρες πολλών στροφών ή γεννήτριες θερμικών σταθμών και το κυματοειδές (σχήμα 2.4α) που συναντάται σε κινητήρες χαμηλών στροφών ή γεννήτριες υδροηλεκτρικών σταθμών.



Σχήμα 2.4 Τυλίγματα ηλεκτρικών μηχανών: (α) κυματοειδές, (β) βροχοειδές [3]

### 2.3 Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα

Η τροφοδότηση του στάτη με εναλλασσόμενη τάση δημιουργεί κύμα ΜΕΔ που στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα  $n_s$  [ΣΑΛ]:

$$n_s = \frac{120 f}{p} \quad (2.1)$$

Όπου  $f$  είναι η ηλεκτρική συχνότητα τροφοδοσίας και  $p$  το πλήθος πόλων μηχανής.

Αντίστοιχα σε  $rad/sec$  η σύγχρονη ταχύτητα είναι:

$$\omega_s = \frac{2 \pi f}{p/2} \quad (2.2)$$

Έστω ότι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι  $n$ . Τότε ορίζεται η ολίσθηση  $s$  από τη σχέση:

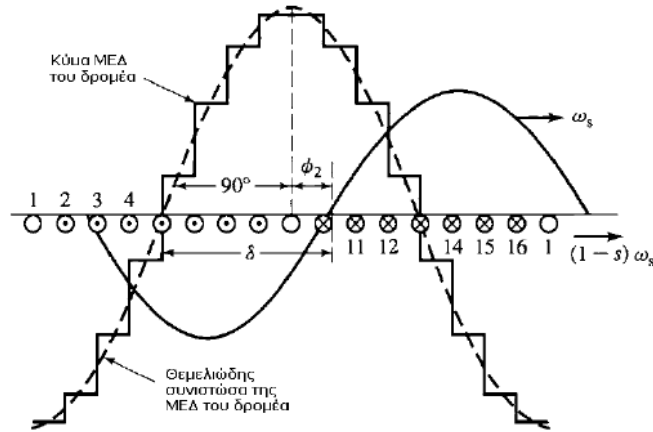
$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2.3)$$

Η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα μπορεί τότε να εκφραστεί ως συνάρτηση της ολίσθησης και της σύγχρονης ταχύτητας ως εξής:

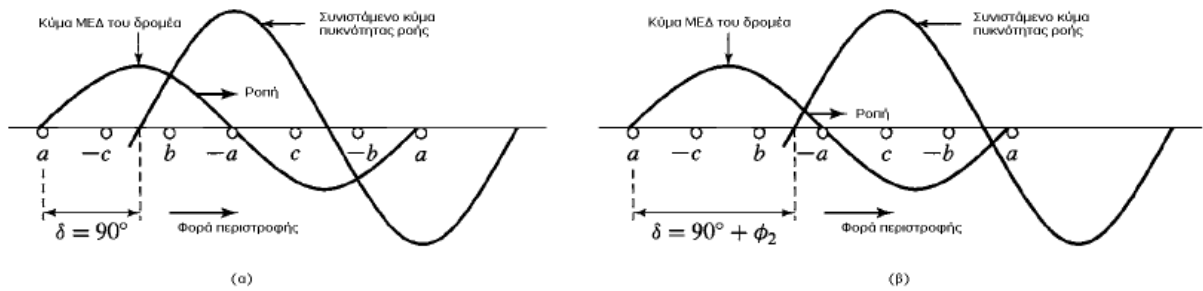
$$n = (1 - s)n_s \quad (2.4)$$

Το κύμα πυκνότητας ροής του στάτη κινείται ως προς το δρομέα με την ταχύτητα ολίσθησης  $sn_s$ . Επάγει συνεπώς στο τυλίγμα του δρομέα εναλλασσόμενες τάσεις συχνότητας  $sf_r$ , όπου  $f$  είναι η συχνότητα των ρευμάτων του στάτη. Επειδή ο δρομέας είναι βραχυκυκλωμένος, οι επαγόμενες στο τυλίγμα του τάσεις θα προκαλέσουν εναλλασσόμενα τριφασικά ρεύματα και συνακόλουθα ένα μαγνητικό πεδίο που θα στρέφεται με ταχύτητα  $sn_s$  ως προς το δρομέα. Ως προς το στάτη συνεπώς, το μαγνητικό πεδίο του δρομέα περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα  $n_s$ . Το κύμα της μαγνητεγερτικής δύναμης (ΜΕΔ) του δρομέα σχηματίζει επομένως μια σταθερή γωνία με το συνιστάμενο κύμα ροής, η οποία υπερβαίνει τις 90 ηλεκτρικές μοίρες κατά τη γωνία του συντελεστή ισχύος  $\cos\varphi_2$  του τυλίγματος του δρομέα.

Τα κύματα μαγνητικής ροής και ΜΕΔ στο διάκενο φαίνονται στο *Σχήμα 2.5* και *Σχήμα 2.6* για την περίπτωση τυλίγματος κλωβού και τυλιγμένου δρομέα, αντίστοιχα.



Σχήμα 2.5 Ανάπτυξη κύματος ΜΕΑ σε δρομέα με τύλιγμα κλωβού [1]



Σχήμα 2.6 Συνιστάμενο κύμα ΜΕΑ και κύμα ΜΕ δρομέα: (α)  $\cos\phi_2=1$ , (β)  $\cos\phi_2\neq 1$  [1]

Ένα ισοδύναμο κύκλωμα μόνιμης κατάστασης μπορεί να κατασκευαστεί θεωρώντας μηχανές με συμμετρικά τυλίγματα που διεγείρονται από συμμετρικές πηγές τάσης. Επίσης η μηχανή θεωρείται ότι είναι συνδεσμολογημένη σε αστέρα ώστε τα ρεύματα να είναι ρεύματα γραμμής και οι τάσεις φασικές. Με τον τρόπο αυτό παράγεται ένα ισοδύναμο κύκλωμα της μιας φάσης. Τα ρεύματα και οι τάσεις των άλλων φάσεων μπορούν να βρεθούν με κατάλληλη μετακίνηση της φάσης ( $\pm 120^\circ$  στην περίπτωση τριφασικής μηχανής).

Αρχικά θεωρείται ο στάτης. Το κύμα ροής του διακένου που στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα παράγει συμμετρικές πολυφασικές αντι-ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις στις φάσεις του στάτη. Η τάση ακροδεκτών τα στάτ διαφέρει από την αντι-ΗΕΔ κατά την πτώση τάσης στο σύνθετη αντίσταση σκεδάσεως του στάτη  $Z_1=R_1+jX_1$ . Η διανυσματική σχέση ανά φάση είναι:

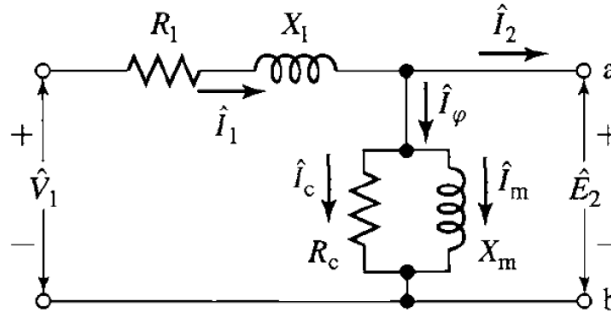
$$\hat{V}_1 = \hat{E}_2 + \hat{I}_1(R_1 + jX_1) \quad (2.5)$$



## Κεφάλαιο 2

Όπου  $V_1$  είναι η τάση ακροδεκτών στάτη,  $\hat{E}_2$  η αναπτυσσόμενη αντι-ΗΕΔ από τη συνισταμένη ροή διακένου,  $\hat{I}_1$  το ρεύμα του στάτη,  $R_1$  η πραγματική αντίσταση στάτη και  $X_1$  η αντίδραση σκέδασης του στάτη.

Οι θετικές φορές των ρευμάτων και των τάσεων σημειώνονται στο ισοδύναμο κύκλωμα που φαίνεται στο *Σχήμα 1.7*.



*Σχήμα 2.7* Ισοδύναμο κύκλωμα στάτη κινητήρα επαγωγής [1]

Η συνισταμένη ροή διακένου δημιουργείται από τις συνδυασμένες ΗΕΔ των ρευμάτων του στάτη και τα δρομέα. Ακριβώς όπως στο ανάλογο του μετασχηματιστή, το ρεύμα μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες. Η συνιστώσα φορτίου  $\hat{I}_2$  παράγει ΜΕΔ η οποία αντιτίθεται ακριβώς στην ΗΕΔ του ρεύματος του δρομέα. Η συνιστώσα διεγέρσεως  $\hat{I}_\phi$  είναι το πρόσθετο ρεύμα του στάτη το οποίο απαιτείται για τα δημιουργία της συνισταμένης ροής διακένου και είναι συνάρτηση της ΗΕΔ  $\hat{E}_1$ . Το ρεύμα διεγέρσεως μπορεί να αναλυθεί σε μια συνιστώσα απωλειών πυρήνα  $\hat{I}_\pi$  σε φάση με την  $\hat{E}_1$  και σε μια συνιστώσα μαγνήτισης  $\hat{I}_m$  που έπεται της ΗΕΔ κατά  $90^\circ$ . Στο ισοδύναμο κύκλωμα το ρεύμα διεγέρσεως μπορεί να περιληφθεί μέσω ενός παράλληλου κλάδου, που σχηματίζεται από την αγωγιμότητα  $g_\pi$  των απωλειών πυρήνα και από μια μαγνητίζουσα αγωγιμότητα  $b_m$  παράλληλα με την τάση  $\hat{E}_1$ , όπως φαίνεται στο *Σχήμα 1.4*. Τόσο η  $g_\pi$  όσο και η  $b_m$  συνήθως καθορίζονται στην ονομαστική συχνότητα του στάτη και για μια τιμή της  $\hat{E}_1$  πλησίον της αναμενόμενης τιμής λειτουργίας. Γίνεται η παραδοχή ότι και τα δύο παραμένουν σταθερά για τις μικρές αποκλίσεις από την τιμή η οποία σχετίζεται με την κανονική λειτουργία του κινητήρα.

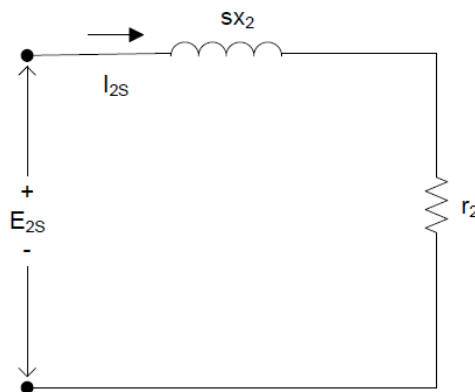
Το ισοδύναμο κύκλωμα που περιγράφει τα φαινόμενα στο στάτη ως τώρα, είναι πανομοιότυπο με αυτό του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή. Για την ολοκλήρωση του ισοδύναμου πρέπει να ενσωματωθεί και η επίδραση του δρομέα. Τα βασικά φαινόμενα είναι όμοια είτε ο δρομέας είναι βραχυκυκλωμένου κλωβού, είτε είναι δακτυλιοφόρος. Από την πλευρά τα ισοδύναμου κυκλώματος του στάτη του *Σχήματος 1.4*, ο δρομέας μπορεί να παρασταθεί σαν μια σύνθετη αντίσταση  $Z_2$ .

$$Z_2 = \frac{\widehat{E}_2}{\widehat{I}_2} \quad (2.6)$$

που αντιστοιχεί στη σύνθετη αντίσταση σκέδασης ενός σταθερού δευτερεύοντος. Για την ολοκλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος, πρέπει να προσδιοριστεί η αντίσταση αυτή, ανάγοντας τις ποσότητες στάτη και δρομέα (ρεύματα και τάσεις) σε ποσότητες του δρομέα ανηγμένες στο στάτη. Ομοίως, στην περίπτωση μιας πολυφασικής ασύγχρονης μηχανής, αν ο δρομέας αντικατασταθεί με έναν ισοδύναμο δρομέα με πολυφασικό τύλιγμα με τον ίδιο αριθμό φάσεων και ελιγμάτων με το στάτη αλλά παράγοντας την ίδια ΜΕΔ και ροή διακένου όπως ο πραγματικός δρομέας, η λειτουργία της μηχανής, όπως φαίνεται από τους ακροδέκτες του στάτη, θα είναι πανομοιότυπη. Αυτή η τεχνική θα εφαρμοστεί και εδώ καθώς αποδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμη, ειδικά για μηχανές επαγωγής δρομέα τύπου κλωβού για τις οποίες η «ταυτότητα» των τυλιγμάτων ανά φάση του δρομέα δεν είναι με καμία έννοια προφανής. Ο δρομέας μιας μηχανής επαγωγής είναι βραχυκυκλωμένος, έτσι η σύνθετη αντίδραση που εμφανίζεται λόγω της επαγόμενης από το στάτη τάσεως είναι απλά η σύνθετη αντίσταση βραχυκύκλωσης του τυλιγματος δρομέα. Συνεπώς, η σχέση μεταξύ της σύνθετης αντίστασης σκέδασης του ισοδύναμου δρομέα στη συχνότητα ολισθήσεως ( $Z_{2s}$ ) και της αντίστοιχης του πραγματικού δρομέα ( $Z_{rotor}$ ) θα είναι:

$$Z_{2s} = \frac{\widehat{E}_{2s}}{\widehat{I}_{2s}} = r_2 + jx_2 \quad (2.7)$$

Σημειώνεται ότι η αντίδραση  $x_2$  είναι η αντίδραση σκέδασης του δρομέα στη συχνότητα του στάτη ( $f_e$ ). Καθώς η πραγματική συχνότητα των ρευμάτων του δρομέα είναι η συχνότητα ολισθήσεως  $f_r = sf_e$ , μπορεί να αναχθεί στη συχνότητα αυτή απλά πολλαπλασιάζοντας την με την ολίσθηση  $s$ . Το ισοδύναμο κύκλωμα, όπως φαίνεται από το πλαίσιο αναφοράς της συχνότητας ολισθήσεως των ρευμάτων του δρομέα, δίνεται στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8 Ισοδύναμο ανά δάση κύκλωμα δρομέα πολυφασικής μηχανής επαγωγής στη συχνότητα ολισθήσεως [1]

## Κεφάλαιο 2

---

Στη συνέχεια παρατηρείται ότι το κύμα ΜΕΔ διακένου παράγεται από τη συνδυασμένη δράση του ρεύματος στάτη  $I_1$  και του αντίστοιχου ρεύματος φορτίου  $I_2$ . Το ίδιο μπορεί να εκφραστεί παρομοίως σε όρους ρεύματος στάτη και αντίστοιχου ρεύματος δρομέα  $I_{2s}$ . Αυτά τα δύο ρεύματα είναι ίσα σε πλάτος αφού το  $I_{2s}$  ορίζεται ως το ρεύμα ενός ισοδύναμου δρομέα με τον ίδιο αριθμό ελιγμάτων ανά φάση με το στάτη. Καθώς το συνιστάμενο κύμα ΜΕΔ διακένου καθορίζεται από το ανυσματικό άθροισμα του ρεύματος στάτη και δρομέα, είτε του πραγματικού ή του ισοδύναμου δρομέα, τα  $I_2$  και  $I_{2s}$  πρέπει επίσης να είναι ίσα σε φάση (στις αντίστοιχες ηλεκτρικές τους συχνότητες) γι' αυτό θεωρείται:

$$\widehat{I}_{2s} = \widehat{I}_2 \quad (2.8)$$

Τέλος, το κύμα ροής του διακένου επάγει και την ΗΕΔ  $E_{2s}$  στη συχνότητα ολισθήσεως του δρομέα και την αντι-ΗΕΔ  $E_1$  του στάτη. Αν δεν υπήρχε η επίδραση της ταχύτητας (λειτουργία με ακινητοποιημένο δρομέα) αυτές οι δύο τάσεις θα ήταν ίσες σε μέτρο καθώς ο ισοδύναμος δρομέας έχει τύλιγμα με τον ίδιο αριθμό ελιγμάτων ανά φάση όπως και ο στάτης. Ωστόσο, επειδή η σχετική ταχύτητα του κύματος ροής διακένου σε σχέση με το δρομέα είναι  $s$  φορές η ταχύτητα σε σχέση με το στάτη, η σχέση μεταξύ των πλατών των επαγόμενων ΗΕΔ – αντιΗΕΔ είναι:

$$E_{2s} = sE_1 \quad (2.9)$$

Καθώς η φάση κάθε μιας από αυτές τις τάσεις και του προκύπτοντας κύματος ροής διακένου είναι  $90^\circ$ , αυτές οι δύο τάσεις πρέπει επίσης να έχουν ίσους φασιθέτες στις αντίστοιχες ηλεκτρικές τους συχνότητες. Έτσι:

$$\widehat{I}_{2s} = \widehat{I}_2 \quad (2.10)$$

Αν διαιρεθεί η (2.9) με την (2.10) κατά μέλη και ληφθεί υπόψη η (2.8) τότε:

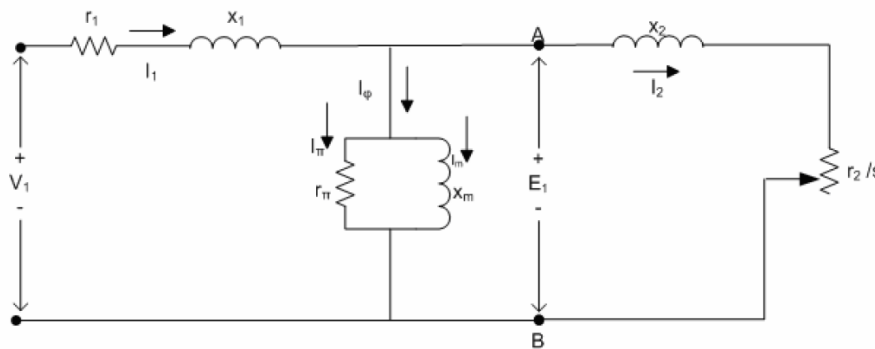
$$\frac{\widehat{E}_{2s}}{\widehat{I}_{2s}} = \frac{s\widehat{E}_1}{\widehat{I}_2} = r_2 + jx_2 \quad (2.11)$$

Αν η ανωτέρω εξίσωση διαιρεθεί με την ολίσθηση  $s$  τότε:

$$z_2 = \frac{\widehat{E}_2}{\widehat{I}_2} = \frac{r_2}{s} + jx_2 \quad (2.12)$$

Έτσι ολοκληρώνεται η κατασκευή του ανά φάση ισοδύναμου κυκλώματος της μηχανής επαγωγής. Η  $z_2$  είναι η σύνθετη αντίσταση του ισοδύναμου ακίνητου δρομέα όπως

αυτή φαίνεται από τους ακροδέκτες του φορτίου στο ισοδύναμο κύκλωμα του στάτη. Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στο ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα του *σχήματος* (2.9). Η συνδυασμένη δράση του φορτίου στον άξονα της μηχανής και της αντιστάσεως του δρομέα φαίνεται στην ανηγμένη αντίσταση  $r_2/s$ , που είναι συνάρτηση της ολίσθησης άρα και του μηχανικού φορτίου. Το ρεύμα στην ανηγμένη σύνθετη αντίσταση του δρομέα ισούται με το κομμάτι του ρεύματος του στάτη που αντιστοιχεί στο ρεύμα φορτίου. Η τάση κατά μήκος της ισούται με την τάση  $E_2$  του κυκλώματος στάτη. Σημειώνεται ότι όταν τα ρεύματα και οι τάσεις του δρομέα ανάγονται στο στάτη, οι συχνότητες τους επίσης αλλάζουν στη συχνότητα του στάτη. Όλα τα ηλεκτρικά φαινόμενα στο δρομέα, όταν παρατηρούνται από παρατηρητή σταθερά τοποθετημένο στο στάτη της μηχανής γίνονται φαινόμενα με συχνότητα αυτή του στάτη, γιατί απλούστατα τα τυλίγματα του στάτη βλέπουν τα κύματα ΜΕΔ και ροής να ταξιδεύουν με τη σύγχρονη ταχύτητα.



Σχήμα 2.9 Ισοδύναμο κύκλωμα πολυφασικού κινητήρα επαγωγής [1]

### 2.3.1 Ανάλυση Ισοδυνάμου Κυκλώματος

Από το κύκλωμα του *σχήματος* 2.9 μπορούν να υπολογισθούν το ρεύμα, η ενεργός και η άεργος ισχύς που απορροφούνται από τον κινητήρα σε δεδομένη ολίσθηση  $s$ . Επί πλέον μπορούν να καθορισθούν οι συνθήκες μηχανικής εξόδου.

Από απλή εποπτεία του ισοδυνάμου κυκλώματος διαπιστώνεται ότι η ισχύς που προσδίδεται στο διάκενο από τα τυλίγματα του στάτη είναι:

$$P_{g1} = m_1 E_1 I_2 \cos \varphi_2 \quad (2.13)$$

Όπου  $m_1$  ο αριθμός των φάσεων του στάτη. Η αντίστοιχη ροπή θα είναι τότε:

$$T = \frac{1}{\omega_s} m_1 E_1 I_2 \cos \varphi_2 = \frac{P_s}{4\pi f} m_1 E_1 I_2 \cos \varphi_2 N \cdot m \quad (2.14)$$

## Κεφάλαιο 2

---

Όπου  $\omega_s$  είναι η σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα σε μηχανικά ακτίνια ανά δευτερόλεπτο και  $P_s$  ο αριθμός των πόλων του στάτη. Η ροπή αυτή ονομάζεται εσωτερική μαγνητική ροπή του κινητήρα. Συνεπώς:

$$T = \frac{1}{\omega_s} P_{g1} \quad (2.15)$$

Εξ' άλλου το ισοδύναμο κύκλωμα δείχνει ότι  $P_{g1}$  ισούται με την ισχύ που απορροφάται από την ανακλώμενη αντίσταση δρομέα  $r_2/s$  για όλες τις φάσεις. Έτσι:

$$P_{g1} = m_1 I_2^2 \frac{r_s}{s} \quad (2.16)$$

$$T = \frac{1}{\omega_s} m_1 I_2^2 \frac{r_s}{s} \quad (2.17)$$

Η μηχανική ισχύς ισούται με τη ροπή επί τη γωνιακή ταχύτητα. Η εσωτερική μηχανική ισχύς  $P$  η αναπτυσσόμενη από τον κινητήρα, είναι τότε:

$$P = (1 - s)\omega_s T = (1 - s)P_{g1} \quad (2.18)$$

Εφ' όσον η μηχανική γωνιακή ταχύτητα του δρομέα σε ολίσθηση  $s$  είναι  $(1-s)\omega_s$  rad/sec. Δηλαδή το κλάσμα  $(1-s)$  της ισχύος που απορροφάται από το στάτη μετασχηματίζεται σε μηχανική ισχύ. Το υπόλοιπο, δηλαδή το κλάσμα  $s$  της ισχύος του στάτη, μεταφέρεται με δράση μετασχηματιστή στα ηλεκτρικά κυκλώματα του δρομέα. Η ηλεκτρική ισχύς  $P_{g2}$  που αναπτύσσεται στο δρομέα στην συχνότητα ολίσθησεως είναι γι' αυτό:

$$P_{g2} = sP_{g1} \quad (2.19)$$

Η μηχανή επαγωγής είναι έτσι ένας γενικευμένος ηλεκτρομηχανικός μετασχηματιστής που απορροφά ηλεκτρική ισχύ στα πρωτεύοντα τυλίγματα, μετατρέπει το κλάσμα  $(1-s)$  της ισχύος αυτής σε μηχανική ισχύ και μετασχηματίζει το κλάσμα  $s$  σε ηλεκτρική ισχύ στα δευτερεύοντα τυλίγματα του με μια αντίστοιχη μεταβολή στη συχνότητα του. Στον κινητήρα επαγωγής με βραχυκυκλωμένα τυλίγματα δρομέα, η ισχύς  $P_{g2}$  καταναλίσκεται ως απώλεια χαλκού στο δρομέα για όλες τις φάσεις.

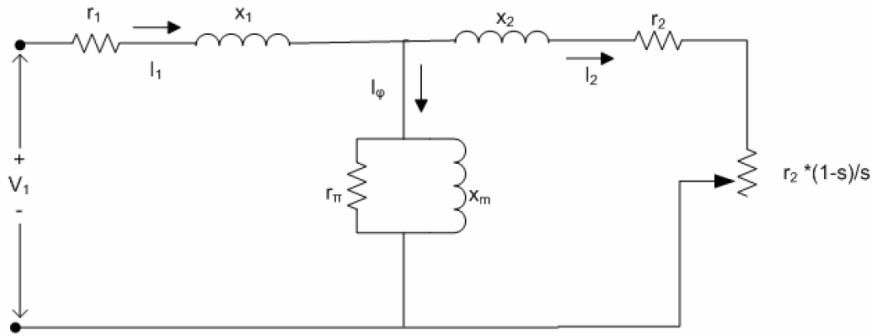
$$\text{απώλειες χαλκού δρομέα} = sP_{g1} = s\omega_s T \quad (2.20)$$

Επομένως μια μηχανή επαγωγής που λειτουργεί υπό υψηλή ολίσθηση είναι εγγενώς ένα μη αποδοτικό μέσο παραγωγής ροπής.

Αντικατάσταση της εξίσωσης 2.16 στην εξίσωση 2.18 δίνει για την εσωτερική μηχανική ισχύ.

$$P = m_1 I_2^2 r \frac{1-s}{s} \quad (2.21)$$

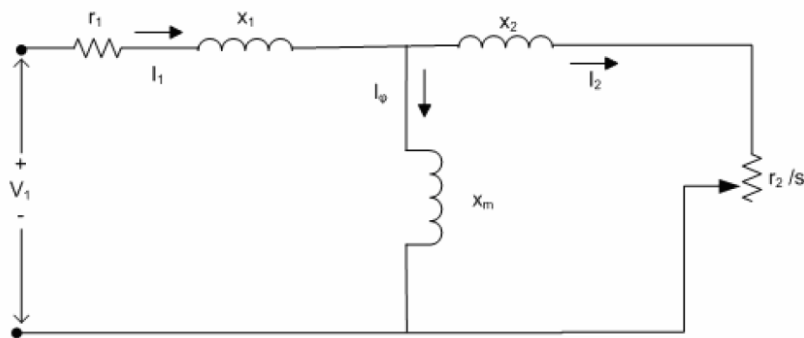
Όταν πρέπει να θεωρηθούν απόψεις ισχύος, το ισοδύναμο κύκλωμα σχεδιάζεται συχνά όπως το *σχήμα 2.10*. Η εσωτερική μηχανική ισχύς ανά φάση στάτη ισούται με την ισχύ που απορροφάται από την αντίσταση  $r_2=(1-s)/s$ .



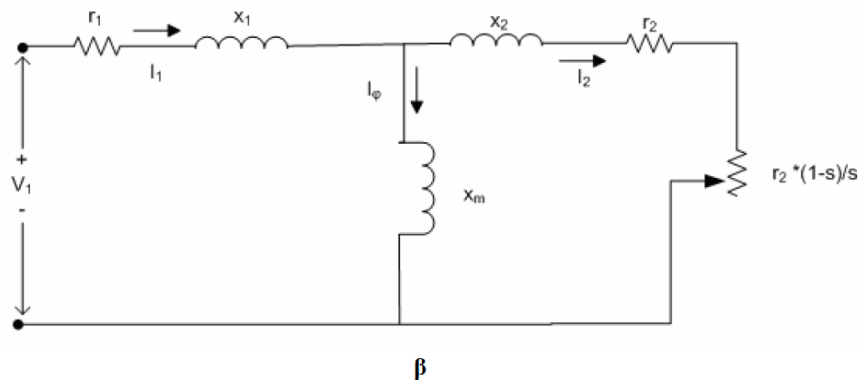
Σχήμα 2.10 Ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα μηχανής επαγωγής για προσδιορισμό ισχύος [1]

Η ροπή  $T$  και η ισχύς  $P$  δεν είναι τιμές εξόδου που διατίθενται στον άξονα, διότι η τριβή, ο ανεμισμός και οι διαφεύγουσες απώλειες φορτίου απομένουν να ληφθούν υπόψη. Είναι φανερό ότι οι τριβές και ο ανεμισμός πρέπει να αφαιρεθούν από την εσωτερική ροπή  $T$  και την εσωτερική ισχύ  $P$  και γίνεται η παραδοχή ότι οι επιδράσεις του φορτίου μπορούν να αφαιρεθούν κατά αυτό τον τρόπο. Το τελικό υπόλοιπο είναι διαθέσιμο σε μηχανική μορφή στον άξονα ως χρήσιμο έργο.

Μια απλούστευση του ισοδυναμού κυκλώματος της μηχανής προκύπτει αν η παράλληλη αντίσταση  $r_n$  παραληφθεί και η αντίστοιχη επίδραση απώλειας πυρήνα αφαιρεθεί από την  $T$  ή  $P$  συγχρόνως με την αφαίρεση της τριβής, ανεμισμού και διαφευγουσών απωλειών φορτίου. Το ισοδύναμο κύκλωμα τότε γίνεται όπως το *σχήμα 2.11 α* ή *2.11 β* και το σχετικό σφάλμα είναι αμελητέο. Μια τέτοια μέθοδος έχει ένα πλεονέκτημα κατά την δοκιμή του κινητήρα, διότι η απώλεια πυρήνα κενού φορτίου δεν χρειάζεται να χωριστεί τότε από την τριβή και τον ανεμισμό. Τα τελευταία αυτά κυκλώματα θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα κεφάλαια.



α



Σχήμα 2.11 Απλουστευμένα ισοδύναμα κυκλώματα. Η απώλεια πυρήνα συντίθεται με τις απώλειες τριβής και ανεμισμού. [1]

### 2.3.2 Χαρακτηριστική Ροπής – Στροφών

Για τον καθορισμό της ροπής και της ισχύος της μηχανής επαγωγής με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα χρησιμοποιείται το θεώρημα του Thevenin για την απλοποίηση του ισοδύναμου κυκλώματος. Με την ανάλυση αυτή η τάση του στάτη  $V_1$  στα κυκλώματα του σχήματος 2.11 αντικαθίσταται με την ισοδύναμη τάση  $V_{th}$  η οποία υπολογίζεται ως εξής.

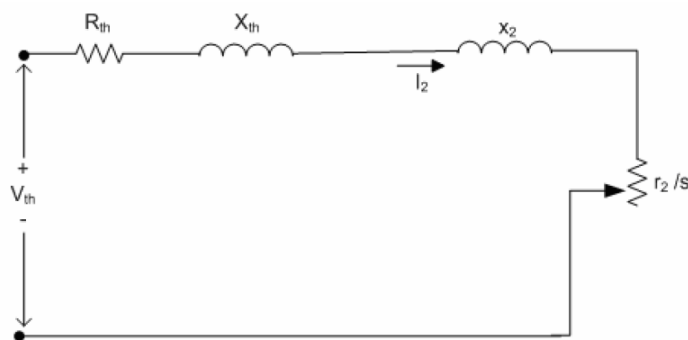
$$V_{th} = \dot{V}_1 \frac{jx_m}{r_1 + j(x_1 + x_m)} \quad (2.22)$$

Οι σύνθετες αντιστάσεις αντικαθίστανται με τις ισοδύναμες αντιστάσεις:

$$Z_{th} = (r_1 + jx_1) // x_m \Rightarrow$$

$$Z_{th} = R_{th} + jX_{th} \quad (2.23)$$

Έτσι προκύπτει το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2.12.



Σχήμα 2.12 Απλοποιημένο κατά Thevenin ισοδύναμο κύκλωμα μηχανής επαγωγής [1]

## Κεφάλαιο 2

Από το παραπάνω σχήμα μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί το ρεύμα  $I_2$  το οποίο όταν αντικατασταθεί στην εξίσωση ροπής 2.17 δίνει την έκφραση της ροπής μέσω του ισοδύναμου κυκλώματος.

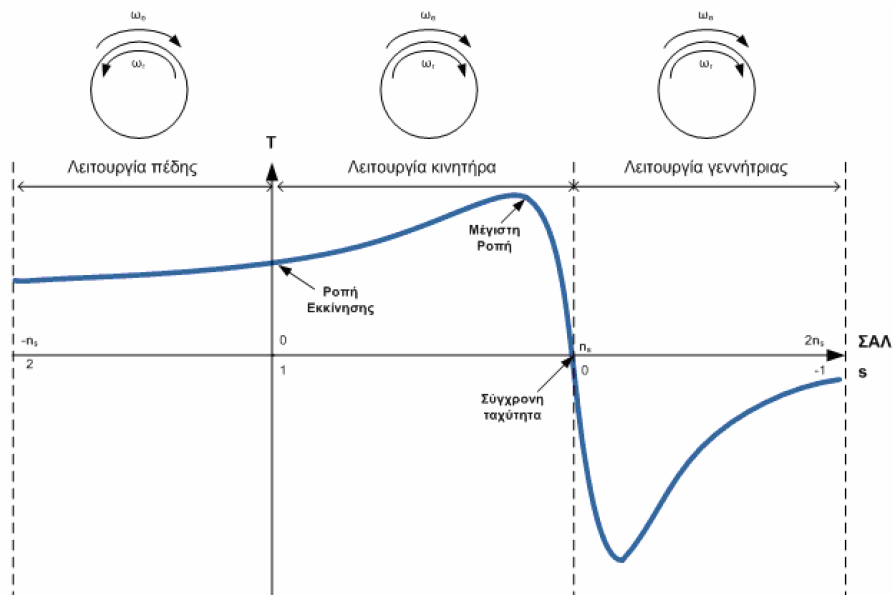
$$I_2 = \frac{V_{th}}{Z_{th} + Z_2} = \frac{V_{th}}{\left(R_{th} + \frac{r_2}{s}\right) + j(X_{th} + x_2)}$$

$$I_2^2 = \frac{V_{th}^2}{\left(R_{th} + \frac{r_2}{s}\right)^2 + j(X_{th} + x_2)^2} \quad (2.24)$$

$$\Rightarrow T = m_1 \frac{p r_2}{2} \frac{1}{s \omega_s} \frac{V_{th}^2}{\left(R_{th} + \frac{r_2}{s}\right)^2 + j(X_{th} + x_2)^2}$$

Από την εξίσωση 2.24 μπορεί να χαραχθεί η καμπύλη ροπής - ολισθήσεως που φαίνεται στο *σχήμα 2.13*. Στο *σχήμα 2.13* διακρίνονται οι τρεις περιοχές λειτουργίας της επαγωγικής μηχανής. Ανάλογα με την ολίσθηση η μηχανή συμπεριφέρεται ως κινητήρας, ως γεννήτρια ή βρίσκεται σε κατάσταση πέδης.

Η πρώτη περιοχή λειτουργίας που διακρίνεται είναι η λειτουργία πέδης η οποία υφίσταται για τιμές ολίσθησεως  $1 < s < 2$ . Η μηχανή εισέρχεται στην περιοχή αυτή όταν κατά την διάρκεια λειτουργίας της ως κινητήρας (επόμενη περίπτωση) γίνει αντιστροφή φάσεων στα τυλίγματα τροφοδοσίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την άμεση αναστροφή του μαγνητικού πεδίου οπότεν την ανάπτυξη μιας αρνητικής ροπής (ηλεκτρομαγνητική) η οποία αντιτίθεται στη ήδη υπάρχουσα ροπή (μηχανική) του δρομέα πράγμα που οδηγεί στην πέδηση της μηχανής. Αν μόλις εξισωθούν οι δύο ροπές αποσυνδεθεί η τροφοδοσία τότε γίνεται αποτελεσματική πέδηση του κινητήρα.



Σχήμα 2.13 Καμπύλη Ροπής- Στροφών  $[T-ns]$  και Ροπής- Ολίσθησεως  $[T-s]$  [1]



## Κεφάλαιο 2

Η δεύτερη περιοχή λειτουργίας είναι η κανονική περιοχή λειτουργίας της μηχανής ως κινητήρα.  $0 < s < 1$ . Όταν η ολίσθηση είναι 0 δηλαδή ο κινητήρας είναι στη σύγχρονη ταχύτητα τότε δεν αναπτύσσεται ηλεκτρομαγνητική ροπή. Καθώς η ολίσθηση αυξάνει ενώ η ταχύτητα μειώνεται η ηλεκτρομαγνητική ροπή αυξάνεται ημιγραμμικώς μέχρι τη μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής. Σε αυτή την περιοχή λειτουργίας η πτώση τάσεως στο στάτη είναι χαμηλή και η ροή διακένου παραμένει περίπου σταθερή. Πέραν της ροπής ανατροπής η ηλεκτρομαγνητική ροπή μειώνεται με την αύξηση της ολίσθησεως και για  $s=1$  βρίσκεται η ροπή εκκινήσεως. Αντικατάσταση του  $s$  στην εξίσωση της ροπής (2.24) δίνει τη ροπή εκκίνησης.

$$T_{εκκ.} = m_1 \frac{p}{2} \frac{r_2}{\omega_s} \frac{V_{th}^2}{(R_{th} + \frac{r_2}{s})^2 + j(X_{th} + x_2)^2} \quad (2.25)$$

Η μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής προκύπτει αν από την εξίσωση της ροπής (2.17) παρατηρηθεί ότι η ροπή γίνεται μέγιστη όταν η προσδιδόμενη στην αντίσταση  $r_2/s$  ισχύς γίνει μέγιστη. Η ισχύς αυτή γίνεται μέγιστη όταν η σύνθετη αντίσταση  $r_2/s$  ισούται με το μέτρο της σύνθετης αντίστασης μεταξύ αυτής και της σταθερής τάσης  $V_1$  δηλαδή:

$$\frac{r_2}{s_{maxT}} = \sqrt{R_{th} + (X_{th} + x_2)^2} \quad (2.26)$$

Η ολίσθηση τότε στη μέγιστη ροπή είναι:

$$T_{max.} = m_1 \frac{1}{2} \frac{p}{2} \frac{1}{\omega_s} \frac{V_1^2}{R_{th} + \sqrt{R_{th} + (X_{th} + x_2)^2}} \quad (2.27)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι η ολίσθηση είναι ευθέως ανάλογη προς την αντίσταση του δρομέα  $r_2$ . Όταν η αντίσταση του δρομέα αυξηθεί με την προσθήκη μιας παράλληλης εξωτερικής αντίστασης (όταν η μηχανή είναι τυλιγμένου δρομέα) η μέγιστη εσωτερική ροπή είναι ανεπηρέαστη αλλά η ταχύτητα στην οποία λαμβάνεται μπορεί να ελεγχθεί.

Η τρίτη περιοχή λειτουργίας είναι η περιοχή λειτουργίας της μηχανής ως γεννήτριας. Η συμπεριφορά αυτή λαμβάνει χώρα όταν η ολίσθηση γίνει αρνητική δηλαδή ο δρομέας περιστρέφεται σε συχνότητα μεγαλύτερη της συχνότητας του δικτύου τροφοδοσίας του στάτη. Έτσι υπάρχει ροή ισχύος από το μηχανικό μέρος στο δίκτυο του στάτη σύμφωνα με την εξίσωση:

$$P_{εσσ} = (1 - s)P_g \quad (2.28)$$

Όπου η ροπή λαμβάνεται θετική αλλά η ταχύτητα αρνητική έτσι αν η εσωτερική ισχύς είναι αρνητική τότε και η ισχύς διακένου θα είναι αρνητική.

### 2.4 Κατάταξη Κινητήρων Επαγωγής

Λόγω τις ποικιλίας των εφαρμογών και των διαφορετικών λειτουργικών χαρακτηριστικών των κινητήρων επαγωγής η NEMA (National Electrical Manufacturer Association) των ΗΠΑ προχώρησε στην κατάταξη των κινητήρων επαγωγής σε κατηγορίες ανάλογα με την χαρακτηριστική ροπής – στροφών του κάθε κινητήρα. Οι κατηγορίες αυτές ονομάζονται κλάσεις κινητήρων και παρουσιάζονται πιο κάτω.

#### **Κατασκευαστική Κλάση A:**

Οι κινητήρες κλάσης A είναι κινητήρες με τυποποιημένη σχεδίαση που παρουσιάζουν κανονική ροπή εκκίνησης, κανονικό ρεύμα εκκίνησης και χαμηλή ολίσθηση. Η ολίσθηση στη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο θα πρέπει να είναι μικρότερη από 5% και μικρότερη από αυτή ενός κινητήρα κλάσης B αντίστοιχων προδιαγραφών. Η ροπή ανατροπής είναι ίση με 200% - 300% της ροπής κατά την πλήρη φόρτιση. Η ροπή εκκίνησης είναι τουλάχιστον ίση με την ονομαστική ροπή στους μεγάλους κινητήρες και ίση ή μεγαλύτερη από το 200% της ονομαστικής ροπής στους μικρούς κινητήρες. Το σημαντικότερο πρόβλημα αυτής της κλάσης σχεδίασης είναι το ιδιαίτερα υψηλό κρουστικό ρεύμα κατά την εκκίνηση. Τα τυπικά ρεύματα εκκίνησης για τέτοιους κινητήρες είναι 500% - 800% του ονομαστικού ρεύματος. Στους κινητήρες τέτοιου είδους με μέγεθος πάνω από 7.5 hp θα πρέπει να χρησιμοποιείται κάποια μέθοδος μείωσης της τάσης κατά την εκκίνηση, με σκοπό να προστατεύεται το σύστημα ισχύος, στο οποίο συνδέονται, από μεγάλες πτώσεις τάσης. Στο παρελθόν οι κινητήρες κλάσης A αποτελούσαν καθιερωμένη σχεδίαση για εφαρμογές κάτω από τους 7.5 hp και πάνω από τους 200 hp. Όμως, στις μέρες μας έχουν αντικατασταθεί από τους κινητήρες κλάσης B. Τυπικές εφαρμογές αυτών των κινητήρων είναι η οδήγηση ανεμιστήρων, φυσερών, αντλιών, τόνων και άλλων εργαλειομηχανών.

#### **Κατασκευαστική Κλάση B:**

Οι κινητήρες κλάσεως B είναι κινητήρες με κανονική ροπή εκκινήσεως, χαμηλό ρεύμα εκκινήσεως και χαμηλή ολίσθηση. Έχουν την ίδια περίπου ροπή εκκινήσεως με τις μηχανές κλάσης A και 75% του ρεύματος εκκινήσεως αυτών. Έτσι εκκίνηση με άμεση τροφοδότηση από το δίκτυο μπορεί να εφαρμοστεί για μηχανές μεγαλύτερης ισχύος σε σχέση με την κλάση A. Το ρεύμα εκκινήσεως μειώνεται με κατάλληλο σχεδιασμό που αυξάνει την αντίδραση σκέδασης, ενώ η ροπή εκκινήσεως διατηρείται με χρήση δρομέα διπλού κλωβού ή βαθών αυλάκων. Η ολίσθηση και η απόδοση πλήρους φορτίου είναι καλές, παρόμοιες με αυτές της κλάσης A. Ωστόσο, η μεγαλύτερη αντίδραση μειώνει ελαφρά το συντελεστή ισχύος και μοιραία μειώνει τη μέγιστη ροπή (συνήθως μόνο λίγο πάνω από το 200% της ροπής πλήρους φορτίου είναι εφικτή).

Αυτός ο σχεδιασμός είναι ο πλέον κοινός για μηχανές 7,5 - 200 hp. Χρησιμοποιείται κυρίως για συστήματα σταθερής ταχύτητας όπου οι απαιτήσεις για ροπή εκκινήσεως είναι δευτερεύουσες όπως σε ανεμιστήρες, φυσητήρες, αντλίες και εργαλειομηχανές.

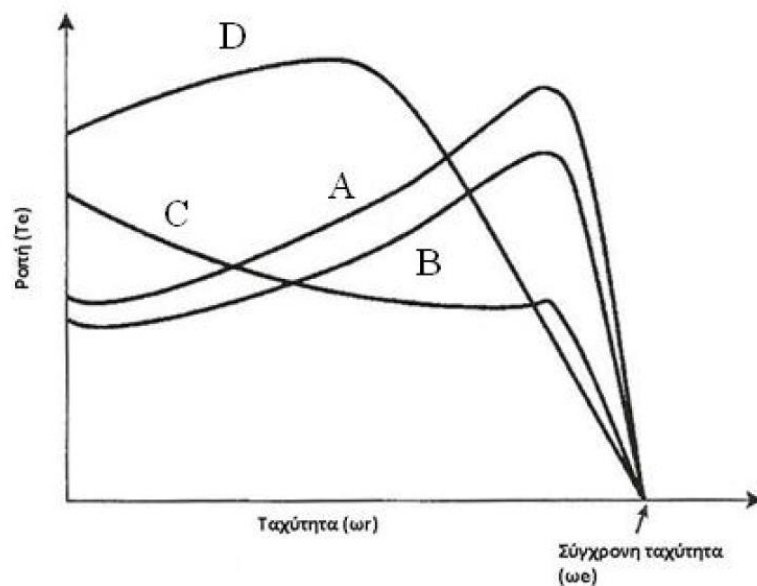
### **Κατασκευαστική κλάση C:**

Οι κινητήρες κλάσεως C είναι κινητήρες με υψηλή ροπή εκκινήσεως, χαμηλό ρεύμα εκκινήσεως. Αυτός ο σχεδιασμός χρησιμοποιεί δρομέα διπλού κλωβού με αντίσταση μεγαλύτερη από αυτή των κινητήρων της κλάσης B. Το αποτέλεσμα είναι υψηλότερη ροπή εκκινήσεως με χαμηλότερα ρεύματα εκκινήσεως αλλά κατά το μάλλον ή ήττον χαμηλότερη απόδοση και υψηλότερη ολίσθηση σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας απ' ότι στις κλάσεις A και B. Τυπικές εφαρμογές είναι οι συμπιεστές και οι ταινιοδρόμοι.

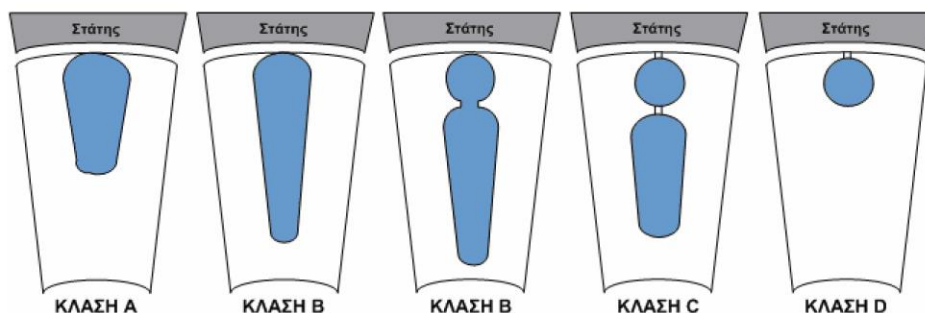
### **Κατασκευαστική κλάση D:**

Οι κινητήρες της κλάσεως D διαθέτουν μεγάλη αντίσταση δρομέα, οπότε η ροπή ανατροπής εμφανίζεται σε κάποιο σημείο με μεγάλη ολίσθηση, ενώ η ροπή εκκίνησής τους είναι αρκετά υψηλή (πάνω από το 275% της ονομαστικής ροπής). Παρουσιάζουν μικρό ρεύμα εκκίνησης, αλλά επίσης υψηλή ολίσθηση στη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο. Ουσιαστικά πρόκειται για απλούς κινητήρες κλάσης A, που διαθέτουν όμως μπάρες μικρότερης διατομής. Η μεγάλη αντίσταση στο δρομέα μετακινεί τη μέγιστη ροπή σε μια πολύ μικρή ταχύτητα. Είναι επίσης δυνατή η μετακίνηση της μέγιστης ροπής στη μηδενική ταχύτητα (ολίσθηση 100%). Η ολίσθηση αυτών των κινητήρων στην πλήρη φόρτιση είναι αρκετά υψηλή λόγω της μεγάλης αντίστασης δρομέα που διαθέτουν. Η τυπική τιμή της ολίσθησης είναι 7% - 11%, αλλά μπορεί να φθάσει στο 17% ή και πιο πάνω. Αυτού του είδους οι κινητήρες έχουν εφαρμογή στην επιτάχυνση φορτίων με μεγάλη αδράνεια, όπως οι ιδιαίτερα μεγάλοι σφόνδυλοι που χρησιμοποιούνται σε διατρητικές πρέσες ή ψαλίδια. Σε τέτοιες εφαρμογές ο κινητήρας αρχικά επιταχύνει βαθμιαία το σφόνδυλο ως τη μέγιστη ταχύτητά του, όπου ο σφόνδυλος αναλαμβάνει την οδήγηση της διατρητικής μηχανής. Μετά τη λειτουργία της διάτρησης, ο κινητήρας επιταχύνει ξανά το σφόνδυλο για σχετικά μεγάλο διάστημα μέχρι την επόμενη ενέργειά του.

Στο *σχήμα 2.14* παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ροπής - στροφών των πιο πάνω κλάσεων κινητήρων, στο *σχήμα 2.15* φαίνονται οι διαφοροποιήσεις στον κλωβό του δρομέα για την επίτευξη των χαρακτηριστικών κάθε κλάσης καθώς στον *πίνακα 2.1* φαίνονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά κάθε κλάσης.



Σχήμα 2.14 Χαρακτηριστικές Ροπής-Στροφών των κλάσεων A, B, C και D κατά NEMA. [3]



Σχήμα 2.15 Αύλακες δρομέα των διαφόρων κλάσεων. [3]

Κλάση	Ροπή Εκκίνησης	Ρεύμα εκκίνησης	Ολίσθηση	Χρήσεις
A	κανονική	κανονικό	κανονική	ανεμιστήρες, αντλίες (φορτία μικρής αδράνειας που ξεκινάνε και σταματάν ε συχνά)
B	κανονική	χαμηλό	κανονική	μεγάλοι ανεμιστήρες και αντλίες (φορτία με σημαντική αδράνεια)
C	υψηλή	χαμηλό	κανονική	συμπιεστές, ιμάντες μεταφοράς
D	υψηλή	χαμηλό	υψηλή	πρέσες, μηχανικές διατρήσεις (εφαρμογές υψηλής αδράνειας)

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά κινητήρων ανά κατασκευαστική κλάση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η παρουσίαση των βασικών μεγεθών που λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαστασιολόγηση ενός ηλεκτρικού κινητήρα και τα βήματα που ακολουθούνται κατά την προκαταρκτική σχεδίαση. Συνοψίζονται επίσης οι βασικές αρχές της ανάλυσης κινητήρων με πεπερασμένα στοιχεία.

#### 3.1 Κατασκευαστικά υλικά ηλεκτρικών μηχανών

Ο πυρήνας του στάτη ή του δρομέα κατασκευάζεται από σιδηρομαγνητικά υλικά, ώστε να μεταφέρεται η μαγνητική ροή στα κατάλληλα σημεία της μηχανής. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά παρουσιάζουν ιδιότητες οι οποίες είναι χρήσιμες αλλά και προβληματικές. Για το λόγο αυτό, οι κατασκευαστές ηλεκτρικών μηχανών πρέπει να μελετήσουν τις ιδιότητες και τα προβλήματα που παρουσιάζουν και να επιλέξουν τον κατάλληλο τύπο υλικού. Η μεταβλητότητα της μαγνητικής ροής στον πυρήνα σε συνδυασμό με το κόστος των επιμέρους υλικών καθορίζουν την επιλογή χρησιμοποίησης λαμαρίνας ή συμπαγούς σιδήρου.

Τα υλικά κατασκευής του πυρήνα θα πρέπει να εμφανίζουν τις ακόλουθες μαγνητικές και ηλεκτρικές ιδιότητες:

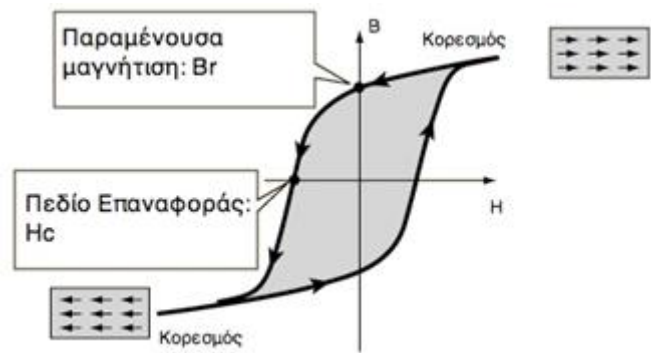
- Υψηλή μαγνητική επιδεκτικότητα και διαπερατότητα, για να έχει χαμηλή μαγνητική αντίδραση το μαγνητικό κύκλωμα.
- Υψηλή μαγνητική επαγωγή κορεσμού, ώστε να διέρχεται περισσότερη μαγνητική ροή ανά μονάδα όγκου, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται ο όγκος και το βάρος της μηχανής.
- Μικρό εμβαδό βρόχου υστέρησης και μικρή ηλεκτρική αγωγιμότητα για μειωμένες ειδικές απώλειες καθώς έτσι επιτυγχάνεται υψηλή απόδοση και μικρή θερμοκρασιακή αύξηση κατά τη λειτουργία. Επίσης, μειώνονται οι απαιτήσεις απαγωγής θερμότητας και η μέθοδος ψύξης γίνεται απλούστερη και λιγότερο δαπανηρή. Συνεπώς η επιλογή υλικών χαμηλών απωλειών μειώνει το λειτουργικό κόστος της ηλεκτρικής μηχανής.

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά κατηγοριοποιούνται σε μαλακά και σκληρά. Στα μαλακά μαγνητικά υλικά η κανονική καμπύλη μαγνήτισης εμφανίζει μεγάλη κλίση, ενώ ο βρόχος υστέρησης έχει μικρό εμβαδόν. Εξαιτίας αυτού, οι απώλειες υστέρησης είναι

### Κεφάλαιο 3

μειωμένες. Επιπλέον, τα υλικά αυτά εμφανίζουν μικρή τιμή παραμένουστος μαγνητισμού και πολύ μεγάλη σχετική διαπερατότητα. Μερικά παραδείγματα μαλακών σιδηρομαγνητικών υλικών είναι ο μαλακός σίδηρος, ο πυριτιούχος χάλυβας, τα κράματα σιδήρου-νικελίου τύπου Permalloy, και άλλα. Χρησιμοποιούνται σε διατάξεις όπως μετασχηματιστές ισχύος, ηλεκτρικές γεννήτριες και κινητήρες, που υπόκεινται στην επίδραση χρονικά μεταβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων. Από την άλλη, στην περίπτωση των σκληρών σιδηρομαγνητικών υλικών, η κανονική καμπύλη μαγνήτισης δεν εμφανίζει τόσο μεγάλη κλίση όσο των μαλακών υλικών, ενώ το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης είναι μεγάλο. Επιπλέον, εμφανίζουν μεγάλη τιμή παραμένουστος στα μαγνητισμού και χαμηλή σχετική διαπερατότητα. Ο βρόχος υστέρησης φαίνεται στο Σχήμα3.1.

Στα σκληρά μαγνητικά υλικά η κανονική καμπύλη μαγνήτισης δεν ανεβαίνει απότομα ενώ το εμβαδό του βρόχου υστέρησης είναι μεγάλο, είναι επομένως προφανές ότι οι απώλειες υστέρησης στα υλικά αυτά είναι επίσης μεγάλες. Εμφανίζουν μεγάλο παραμένουστος μαγνητισμό και χαμηλή σχετική διαπερατότητα. Ένα τυπικό σκληρό μαγνητικό υλικό είναι το κράμα Alnico. Τα σκληρά μαγνητικά υλικά είναι κατάλληλα για την κατασκευή μονίμων μαγνητών στους οποίους επιδιώκεται να έχουν μεγάλες τιμές τόσο για την παραμένουστος μαγνήτιση  $B_r$  τόσο και για το πεδίο αναφοράς  $H_c$ , ώστε να μην είναι εύκολη η απομαγνήτισή τους.



Σχήμα 3.1 Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικών υλικών. [4]

Όσο αφορά το συμπαγή σίδηρο, η προσθήκη μικρής ποσότητας πυριτίου βελτιώνει πολλές από τις ιδιότητές του: Η ηλεκτρική του αντίσταση αυξάνεται, η μαγνητική αντίσταση μειώνεται αισθητά και βελτιώνεται η σταθερότητα των μαγνητικών χαρακτηριστικών στο χρόνο. Η αύξηση της περιεκτικότητας πυριτίου περιορίζεται από το γεγονός ότι ο σίδηρος γίνεται εύθραυστος και υποβαθμίζεται η αντοχή του σε μηχανικές καταπονήσεις. Επιπλέον, σημειώνεται μικρή μείωση στην επαγωγή κόρου.

Η παρασκευή κράματος σιδήρου-πυριτίου απαιτεί θερμικές και μηχανικές διεργασίες, με συνέπεια το βελτιωμένο υλικό να έχει αυξημένο κόστος.

Η λαμαρίνα (ελάσματα σιδηρομαγνητικού υλικού) χρησιμοποιείται όταν υπάρχει εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί δινορρεύματα. Η χρήση της περιορίζει τα επαγόμενα δινορρεύματα διότι μειώνεται η αγωγή διαδρομή του ρεύματος. Για αυτό το σκοπό η μία ή και οι δύο επιφάνειες του ελάσματος είναι καλυμμένες με μονωτικό υλικό και ο προσανατολισμός τους είναι παράλληλος προς την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής. Η μονωτική επίστρωση προστατεύει επίσης το σίδηρο από την οξείδωση.

Υπάρχουν δύο τύποι ελασμάτων, με κατευθυνόμενους κόκκους ή χωρίς. Τα ελάσματα χωρίς κατευθυνόμενους κόκκους είναι ιστροπικά και χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις ηλεκτρικές μηχανές. Τυπικές τιμές ειδικών απωλειών σε μαγνητική επαγωγή 1.5 T και συχνότητα πεδίου 50 Hz, είναι 3 W/Kg και 4 W/Kg για ελάσματα πάχους 0.35 mm και 0.5 mm αντίστοιχα. Αντιθέτως, τα ελάσματα με κατευθυνόμενους κόκκους παρουσιάζουν μία κατεύθυνση στην οποία οι μαγνητικές ιδιότητες είναι βελτιωμένες και χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών και όταν απαντώνται υψηλές συχνότητες. Τυπικές τιμές απωλειών σε αυτή την περίπτωση είναι 1 W/Kg σε 1.5 T, 50 Hz, για έλασμα πάχους 0.35 mm.

Για ειδικές εφαρμογές και υψηλές συχνότητες υπάρχουν και ελάσματα από κράμα Σιδήρου - Κοβαλτίου με την ονομασία "Permendur". Αυτά παρουσιάζουν υψηλή μαγνητική επιτρεπτότητα και πολύ υψηλό σημείο κορεσμού. Χρησιμοποιούνται επίσης κράματα Σιδήρου - Νικελίου, "permalloy", τα οποία εμφανίζουν πολύ υψηλή επιτρεπτότητα και μικρή τιμή πεδίου επαναφοράς, ενώ η μαγνητική επαγωγή κορεσμού τους είναι πολύ χαμηλή [6].

### 3.2 Θεμελιώδεις σχέσεις προκαταρκτικής σχεδίασης

Στο πλαίσιο της προκαταρκτικής σχεδίασης λαμβάνονται υπόψιν τα βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης και πραγματοποιούνται τα ακόλουθα βήματα: [27]

- Προσδιορισμός της επιφάνειας του διακένου ώστε να εξασφαλίζεται η απαραίτητη ηλεκτρομαγνητική ροπή σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.
- Προσδιορισμός των διαμορφώσεων δρομέα και στάτη που επιτρέπουν τη δημιουργία κατάλληλου μαγνητικού πεδίου στο διάκενο.
- Έλεγχος των μαγνητικών και ηλεκτρικών ειδικών φορτίσεων.
- Εύρεση απωλειών σιδήρου και χαλκού και απαιτήσεων σε ψύξη.

Τα παραπάνω βήματα γίνονται με βάση ορισμένες τυπικές τιμές βασικών μαγνητικών, ηλεκτρικών και θερμικών μεγεθών. Παρακάτω παρουσιάζονται αυτά τα μεγέθη και οι βασικές σχέσεις υπολογισμού τους στην περίπτωση του τριφασικού κινητήρα.

### 3.2.1 Βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης

#### Ειδική μαγνητική φόρτιση

Η ειδική μαγνητική φόρτιση,  $\bar{B}$ , συνδέει τον αριθμό πόλων P με τη μαγνητική ροή ανά πόλο Φ και είναι:

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

όπου D είναι η διάμετρος του διακένου και L το αξονικό μήκος του ενεργού μέρους της μηχανής.

Το μέγεθος αυτό λαμβάνει συνήθως τιμές από 0.5 T ως 0.6 T και το άνω όριο τίθεται από το φαινόμενο του κορεσμού του σιδηρομαγνητικού υλικού στα δόντια του στάτη. Η υψηλή μαγνητική φόρτιση σημαίνει αυξημένη δυνατότητα παραγωγής ροπής και ισχύος. Το αντίτιμο είναι αυξημένες απώλειες πυρήνα, ειδικά όταν τα δόντια του στάτη βρίσκονται σε κορεσμό.

#### Ειδική ηλεκτρική φόρτιση

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση,  $ac$ , προσδιορίζεται από την ενεργό τιμή των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο περιφέρειας του διακένου, σύμφωνα με τη σχέση :

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

Τυπικές τιμές ηλεκτρικής φόρτισης σύγχρονων μηχανών είναι από 15000 AE/m ως 45000 AE/m. Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση καθορίζει από κοινού με την ειδική μαγνητική φόρτιση την ικανότητα παραγωγής ροπής μιας δεδομένης μηχανής. Όσο αφορά τις απώλειες, η ηλεκτρική φόρτιση συνδέεται με τις απώλειες χαλκού της μηχανής.

Τα δύο παραπάνω μεγέθη συνδέονται με τη λεγόμενη σχέση εξόδου της ηλεκτρικής μηχανής, η οποία δίνει μια εκτίμηση της ροπής ή της ισχύος εξόδου. Για την εύρεση αυτής της σχέσης λαμβάνεται υπόψιν ότι:

- Η ενεργός τιμή της επαγόμενης τάσης,  $e$ , δίνεται από τη σχέση:

$$e = 4.44 \cdot k_w \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi \quad (3.3)$$



### Κεφάλαιο 3

---

όπου  $k_w$  είναι ο συντελεστής τυλίγματος,  $f$  η ηλεκτρική συχνότητα,  $N_s$  ο συνολικός αριθμός των ελιγμάτων ανά φάση και  $\Phi$  η θεμελιώδης μαγνητική ροή ανά πόλο.

- Η φαινόμενη ισχύς της μηχανής δίνεται από τη σχέση:

$$S = 3 \cdot e \cdot I \quad (3.4)$$

όπου  $I$  είναι το φασικό ρεύμα.

- Η ηλεκτρική συχνότητα  $f$  συνδέεται με τη μηχανική ταχύτητα περιστροφής,  $n$ , με τη σχέση:

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

Ο συνδυασμός των παραπάνω σχέσεων δίνει την εξίσωση εξόδου της ηλεκτρικής σύγχρονης μηχανής:

$$S = 1.11 \cdot k_w \cdot \pi^2 \cdot \bar{B} \cdot ac \cdot D^2 \cdot L \cdot n \quad (3.6)$$

Όπως φαίνεται από αυτή τη σχέση, η ισχύς εξόδου της μηχανής είναι ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου του διακένου και ανάλογη του αξονικού μήκους του ενεργού μέρους του πυρήνα. Έτσι λοιπόν, κατά τη σχεδίαση ενός κινητήρα η μιας γεννήτριας πρέπει να προσδιοριστεί ο πιο συμφέρων συνδυασμός ειδικής ηλεκτρικής και μαγνητικής φόρτισης, διαστάσεων διακένου και ταχύτητας περιστροφής ώστε να ληφθεί η επιθυμητή ισχύς στην έξοδο χωρίς να θυσιαστούν άλλα χαρακτηριστικά της μηχανής, όπως για παράδειγμα η απόδοση, το κόστος κατασκευής και το συνολικό βάρος.

Το μέγεθος μιας μηχανής και η τιμή της ονομαστικής της ισχύος είναι παράγοντες καθοριστικής σημασίας για την απόδοση. Μια εκτίμηση παρέχεται με τον υπολογισμό της μεταβολής της ισχύος εξόδου και των απωλειών όταν οι διαστάσεις μιας μηχανής μεγεθύνονται κατά τον ίδιο λόγο, έστω  $x$ . Όπως αποδεικνύεται, για δεδομένη θερμοκρασιακή αύξηση η ισχύς εξόδου αυξάνεται με συντελεστή  $x^{3.5}$  ενώ οι απώλειες αυξάνονται με συντελεστή  $x^2$  [5]. Αμελώντας τις μηχανικές απώλειες, η απόδοση,  $\eta$ , υπολογίζεται ως εξής:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \propto \frac{x^{3.5}}{x^{3.5} + Kx^2} \propto \frac{1}{1 + \frac{K}{x^{1.5}}} \quad (3.7)$$

Η εξίσωση (3.7) δείχνει ότι η απόδοση αυξάνει με αύξηση στις γραμμικές διαστάσεις. Αυτό δικαιολογεί εν μέρει γιατί κινητήρες με ισχύ μικρότερη του ενός kW έχουν απόδοση της τάξης του 60%, ενώ γεννήτριες μεγάλης ισχύος έχουν απόδοση πάνω από 97%.

#### Οριακή τάση διακένου

Οριακή τάση διακένου. Αποτελεί βασικό μέγεθος της μηχανικής αντοχής της μηχανής και δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή των 10 tN/cm<sup>2</sup>. Το μέγεθος αυτό ορίζεται ως η φυγόκεντρος δύναμη του δρομέα ανά μονάδα επιφανείας.

Η φυγόκεντρος δύναμη δίνεται από τη σχέση:

$$F = m \cdot \omega_{rm} \cdot R \quad (3.8)$$

Όπου m η μάζα του δρομέα,  $\omega_{rm}$  η μηχανική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του και R η ακτίνα του. Έτσι,

$$\text{Οριακή Τάση Διακένου} = \frac{m \cdot \omega_{rm}}{2 \cdot \pi \cdot L} \quad (3.9)$$

#### Πυκνότητα ρεύματος του τυλίγματος

Η πυκνότητα ρεύματος του τυλίγματος αποτελεί βασικό ηλεκτρικό μέγεθος της μηχανής και σχετίζεται με τη θερμική της ισορροπία καθώς προσδιορίζει το μέγεθος των ωμικών απωλειών στο τυλίγμα της μηχανής. Στη συνήθη περίπτωση οι θερμικές απώλειες ισχύος στην ονομαστική κατάσταση λειτουργίας κατά πρώτο λόγο απώλειες χαλκού δεύτερο λόγο απώλειες σιδήρου. Οι θερμικές απώλειες προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας της μηχανής η οποία, μπορεί να επιφέρει καταστροφή των υλικών που την αποτελούν αν ξεπεραστούν τα όρια θερμικής αντοχής τους. Επίσης, μπορεί να προκληθεί υποβιβασμός της μονωτικής ικανότητας των μονωτικών υλικών που χρησιμοποιούνται.

Ένα εμπειρικό όριο πυκνότητας ρεύματος είναι τα 4 A/mm<sup>2</sup>, πάνω από το οποίο υπάρχει ανάγκη για εξαναγκασμένη ψύξη ώστε να αυξηθεί η ικανότητα παροχής ισχύος της ηλεκτρικής μηχανής. Η εξαναγκασμένη ψύξη υλοποιείται με τεχνητό αερισμό ή και με κλειστό σύστημα κυκλοφορίας ψυκτικού υγρού σε περίπτωση μηχανών μεγάλης ισχύος. Πιο συγκεκριμένα η μέθοδος ψύξης που χρησιμοποιείται ανάλογα με την ισχύ της μηχανής ώστε να διασφαλίζεται η ασφάλεια της μόνωσης φαίνεται στον Πίνακα 3.1.

Ισχύς ηλεκτρικής μηχανής	Μέθοδος ψύξης
$P_m < H_p$	Φυσική ψύξη
$H_p < P_m < 10^3 H_p$	Εξαναγκασμένη ψύξη αέρα
$10^3 < P_m < 10^5 H_p$	Υδροψυκτα τυλίγματα
$10^5 H_p < P_m$	Κυκλοφορία υγρού υδρογόνου

Πίνακας 3.1 Απαιτήσεις ψύξης ηλεκτρικών μηχανών ανάλογα με την ισχύ τους.

#### 3.2.2 Βήματα της προκαταρκτικής σχεδίασης

##### Προσδιορισμός της επιφάνειας διακένου

Ο προσδιορισμός της ελάχιστης επιφάνειας του διακένου γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την μέγιστη επιθυμητή ροπή διακένου. Θεωρείται ότι για την παραγωγή της μέγιστης ροπής η ηλεκτρική γωνία των πεδίων στάτη και δρομέα είναι 90 ηλεκτρικές μοίρες. Αρχικά υπολογίζεται η επαπτομενική πίεση διακένου ως εξής:

$$P_t = \frac{\int \vec{B}_n \cdot \vec{B}_t dl}{\pi \cdot D \cdot \mu_0} \quad (3.10)$$

, όπου  $B_n$  και  $B_t$  είναι η ακτινική και επαπτομενική μαγνητική επαγωγή διακένου αντίστοιχα και το ολοκλήρωμα εκτείνεται κατά μήκος του μέσου του διακένου.

Αφού υπολογιστεί η επαπτομενική πίεση, χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση για την εύρεση του γινομένου  $D^2L$ :

$$T_{el,max} = \frac{\pi \cdot P_t \cdot D^2 \cdot L}{2} \quad (3.11)$$

##### Αναλογία διαστάσεων D και L

Η διαστασιολόγηση του διακένου της ηλεκτρικής μηχανής εμπλέκει θέματα επίδοσης, απόδοσης και μηχανικής αντοχής. Όσο αφορά την επίδοση, η σχέση (3.6) υποδεικνύει ότι είναι προτιμητέες δισκοειδείς μηχανές καθώς η ισχύς της μηχανής αυξάνεται με το τετράγωνο της διαμέτρου του διακένου. Από την άλλη, η απόδοση της μηχανής δεν αυξάνεται κατ' ανάγκη όταν η αναλογία  $D/L$  είναι αυξημένη. Ο λόγος είναι ότι σε περίπτωση μεγάλης διαμέτρου διακένου σε σχέση με το μήκος της μηχανής, αυξάνεται το ποσοστό του τυλίγματος που βρίσκεται έξω από την ενεργή περιοχή του πυρήνα και κατά συνέπεια οι θερμικές απώλειες. Επίσης, μια μηχανή με πολύ μακρύ διάκενο έχει μεγάλη μάζα πυρήνα και αναμένεται να εμφανίζει αυξημένες απώλειες πυρήνα, επομένως δεν επιτυγχάνει τη βέλτιστη απόδοση.

Η μηχανική αντοχή του δρομέα και η διαστασιολόγηση του διακένου εξαρτώνται από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Σε μικρές ταχύτητες περιστροφής προτιμάται μεγάλος λόγος  $D/L$ . Σε μεγάλες ταχύτητες περιστροφής, η οριακή τάση διακένου περιορίζει τον δρομέα σε μικρή ακτίνα και πλέον η επιθυμητή ισχύς λαμβάνεται με αύξηση του αξονικού μήκους της μηχανής. Και σε αυτή την περίπτωση όμως, υπάρχει μηχανικό όριο στην μείωση του λόγου  $D/L$ , το οποίο συνίσταται στην ακαμψία του σώματος του δρομέα και την διατήρηση του διακένου.

### Κεφάλαιο 3

Στη βιβλιογραφία προσδιορίζονται ορισμένες αναλογίες που πρέπει να έχει μια μηχανή ώστε να χαρακτηρίζεται από υψηλή επίδοση, απόδοση ή ένα ισορροπημένο συνδυασμό των δύο [8]. Συνήθως γίνεται λόγος για το λόγο του αξονικού μήκους της μηχανής,  $L$  και του μήκους ενός πόλου,  $\tau$ . Το μήκος πόλου δίνεται από τη σχέση:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{P} \quad (3.12)$$

Στον *πίνακα 3.2* παρατίθενται οι περιοχές τιμών του λόγου  $L/\tau$ , η κάθε μια από τις οποίες παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά.

$L/\tau$	Χαρακτηριστικό ηλεκτρικής μηχανής
1.0	Ισορροπημένη σχεδίαση
1.0 - 1.5	Υψηλός συντελεστής ισχύος
1.5	Υψηλή απόδοση
1.5 - 2.0	Ελάχιστο κόστος

*Πίνακας 3.2 Περιοχές λόγου τιμών  $L/\tau$ .*

#### Πάχος διακένου

Αν και αναφέρεται τελευταίο, το πάχος του διακένου είναι πρωτεύουσας σημασίας για την επίτευξη των επιθυμητών χαρακτηριστικών λειτουργίας μιας ηλεκτρικής μηχανής. Γενική αρχή είναι ότι το διάκενο πρέπει να έχει το μικρότερο δυνατό πάχος, το οποίο καθορίζεται από την ακρίβεια κατασκευής και την δυνατότητα μηχανικής στήριξης δρομέα και στάτη.

#### 3.3 Πεδιακή ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

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

#### 3.3.1 Μαγνητοστατικά προβλήματα

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

$$\nabla \times H = J \quad (3.13)$$

και

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.14)$$

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

$$B = \mu H \quad (3.15)$$

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

$$\mu = \frac{B}{H(B)} \quad (3.16)$$

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

$$B = \nabla \times A \quad (3.17)$$

Αυτός ο ορισμός του  $B$  ικανοποιεί πάντα την εξίσωση 3.14. Τότε, η 3.13 γράφεται ως εξής:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = J \quad (3.18)$$

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

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = J \quad (3.19)$$

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

Το πλεονέκτημα της χρήσης του διανυσματικού δυναμικού είναι ότι όλες οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται στο μαγνητοστατικό πεδίο συνδυάζονται σε μία εξίσωση. Εάν είναι γνωστό το  $A$ , τα  $B$  και  $H$  προκύπτουν από διαφορίση του  $A$ . Η εξίσωση (3.18) έχει τη μορφή μιας ελλειπτικής μερικής διαφορικής εξίσωσης, για την επίλυση της οποίας έχει αναπτυχθεί μεγάλος αριθμός εργαλείων.

Στην περίπτωση ύπαρξης μαγνητικού πεδίου αρμονικά μεταβαλλόμενου, μπορούν να επαχθούν δινορρέυματα σε υλικά με μη μηδενική αγωγιμότητα και τότε θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλες εξισώσεις του Maxwell αναφορικά με την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου.

#### 3.3.2 Οριακές συνθήκες

Για την επίλυση ενός μαγνητοστατικού ή ηλεκτροστατικού προβλήματος θα πρέπει να ορισθούν οι οριακές συνθήκες του προβλήματος, οι οποίες μπορεί να είναι κάποιες από τις ακόλουθες:

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

$$\frac{\partial A}{\partial n} + cA = 0 \quad (3.20)$$

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

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

### 3.3.3 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Αν και οι συνθήκες ενός μαγνητικού προβλήματος μπορούν να εκφραστούν υπό τη μορφή μιας διαφορικής εξίσωσης, με ορισμένες οριακές συνθήκες, ωστόσο είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί μια αναλυτική λύση, παρά μόνο για προβλήματα πολύ απλής γεωμετρίας. Αυτή τη δυσκολία έρχεται να ξεπεράσει η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, χωρίζοντας το πρόβλημα σε ένα μεγάλο αριθμό περιοχών και αντίστοιχων υποπροβλημάτων που όμως αναφέρονται σε απλή γεωμετρία και είναι εύκολη η επίλυσή τους. Αν η αρχική περιοχή τεμαχιστεί σε αρκετό αριθμό τέτοιων υποπεριοχών, το υπολογιζόμενο δυναμικό προσεγγίζει αρκετά καλά την ακριβή του τιμή.

Το πλεονέκτημα της διαίρεσης της περιοχής του προβλήματος σε ένα μεγάλο αριθμό μικρών στοιχείων είναι ότι το πρόβλημα μετασχηματίζεται από ένα μικρό αλλά δύσκολο στην επίλυση πρόβλημα, σε ένα μεγάλο αλλά σχετικά εύκολο στην επίλυση. Το πρόβλημα αυτό παίρνει τη μορφή ενός προβλήματος γραμμικής άλγεβρας με πολλές χιλιάδες αγνώστων συνήθως, και υπάρχουν αλγόριθμοι που επιτρέπουν την επίλυσή του σε σύντομο χρόνο.

### 3.3.4 Το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων *femm*

Το ελεύθερο λογισμικό *femm* ανήκει στην κατηγορία προγραμμάτων επίλυσης πεπερασμένων στοιχείων και επιλύει δισδιάστατα και μαγνητοστατικά προβλήματα, όπως επίσης προβλήματα όπου τα μαγνητικά μεγέθη μεταβάλλονται με μια συγκεκριμένη συχνότητα. Ειδικότερα, το πρόγραμμα αυτό διακρίτοποιεί την περιοχή του προβλήματος χρησιμοποιώντας τριγωνικά στοιχεία. Σε κάθε στοιχείο, η λύση προσεγγίζεται με γραμμική παρεμβολή των τιμών του δυναμικού στις κορυφές του τριγώνου. Το πρόβλημα γραμμικής άλγεβρας σχηματίζεται με ελαχιστοποίηση του μέτρου του σφάλματος ανάμεσα στην πραγματική διαφορική εξίσωση και την προσεγγιστική διαφορική εξίσωση.

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

1. Σχεδίαση της γεωμετρίας, ορισμός των οριακών συνθηκών και των υλικών.
2. Πλεγματοποίηση του προβλήματος με επιθυμητό αριθμό τριγωνικών στοιχείων.
3. Επίλυση του προβλήματος γραμμικής άλγεβρας και εύρεσης του διανυσματικού δυναμικού.
4. Απεικόνιση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΙΓΜΩΝ ΠΛΟΙΟΥ (BOW AND STERN THRUSTERS)

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η παρουσίαση των προδιαγραφών/απαιτήσεων για την κατασκευή του ηλεκτρικού κινητήρα και η διεξαγωγή της προκαταρκτικής σχεδίασης. Η προκαταρκτική σχεδίαση ξεκινά από τις προδιαγραφές του κινητήρα και καταλήγει σε μια πρώτη γεωμετρική διαμόρφωση. Ακόμη επιλέγονται τα υλικά κατασκευής και η κατασκευαστική κλάση (NEMA) του κινητήρα. Μετά το πέρας της προκαταρκτικής σχεδίασης, ξεκινάει η διαδικασία τα βελτιστοποίησης.

#### 4.1 Προδιαγραφές κινητήρα επαγωγής

Η σχεδίαση του ηλεκτρικού κινητήρα γίνεται έτσι ώστε να ικανοποιούνται κάποιες προδιαγραφές. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή αυτές έχουν να κάνουν με την ονομαστική και μέγιστη ροπή, την ταχύτητα, το συντελεστή ισχύος, την τάση και το ρεύμα τροφοδοσίας του κινητήρα. Οι προδιαγραφές φαίνονται συγκεντρωτικά στον *πίνακα 4.1*.

Απαιτήσεις Σχεδίασης	
Τάση τροφοδοσίας (V)	400 V Δ
Ονομαστικό ρεύμα ( $I_n$ )	282 A
Ρεύμα εκκίνησης	$5I_n$
Συχνότητα (f)	50 Hz
Ονομαστική Ροπή ( $T_n$ )	$720 \pm 2\% \text{ Nm}$
Μέγιστη Ροπή ( $T_{max}$ )	$1,4 T_n$
Ροπή εκκίνησης	$1,1T_n$
Ονομαστική Ταχύτητα	1491 rpm
Ονομαστικός Συντελεστής Ισχύος	0.86
Διάμετρος άξονα του κινητήρα	100 mm

*Πίνακας 4.1 Προδιαγραφές κατασκευής.*

Υπάρχει η απαίτηση η ονομαστική ταχύτητα του κινητήρα 1491 ΣΑΛ. Αυτό σημαίνει ότι ο κινητήρας θα είναι τετραπολικός και η επιθυμητή ονομαστική του ολίσθηση είναι:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = 0.006 \quad (4.1)$$

Θεωρώντας ότι η ονομαστική ολίσθηση του κινητήρα είναι η μισή της ολίσθησης μέγιστης ροπής:

$$s_{Tmax} = 0.012$$

Επίσης η ονομαστική γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα είναι :

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = 156,14 \text{ rad/sec} \quad (4.2)$$

οπότε η ονομαστική ισχύς του κινητήρα, είναι:

$$P = T\omega = 112 \text{ kW} \quad (4.3)$$

Για να επιτευχθούν αυτές οι απαιτήσεις θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων κινητήρων κατασκευαστικής κλάσης B, C και D ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη γεωμετρία αυλάκων δρομέα.

### 4.2 Προκαταρκτική Σχεδίαση

Η προκαταρκτική σχεδίαση του κινητήρα με βάση τα μαγνητικά μεγέθη περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- Προσδιορισμό της επιφάνειας διακένου, που θα εξασφαλίσει την απαραίτητη ηλεκτρομαγνητική ροπή σε μόνιμη και μεταβατική κατάσταση λειτουργίας.
- Προσδιορισμό των διαμορφώσεων του στάτη και του δρομέα, που επιτρέπουν τη δημιουργία κατάλληλου μαγνητικού πεδίου στο διάκενο.
- Έλεγχος των μαγνητικών και ηλεκτρικών ειδικών φορτίσεων
- Υπολογισμός των απωλειών σιδήρου και χαλκού.

#### 4.2.1 Διαστασιολόγηση διακένου

Άξονα για την προκαταρκτική σχεδίαση του κινητήρα αποτελεί η απαίτηση για συγκεκριμένες τιμές μαγνητικής επαγωγής σε κάθε περιοχή του μαγνητικού κυκλώματος. Η ειδική μαγνητική φόρτιση περιορίζεται λόγω του κορεσμού του μαγνητικού υλικού (σίδηρος) και των απωλειών πυρήνα. Στον *πίνακα 4.2* ορίζονται οι τιμές για μηχανές επαγωγής. [5]

#### Μαγνητική Ροή B (T)

Διάκενο	0,7-0,90 (μέγιστη τιμή)
Τμήμα επιστροφής της ροής στο στάτη	1,4-1,7
Δόντι στάτη	1,8-1,9
Δόντι δρομέα	1,8-1,9
Τμήμα επιστροφής της ροής στο δρομέα	1,0-1,6

*Πίνακας 4.2. Επιτρεπόμενες τιμές μαγνητικής ροής στο μαγνητικό κύκλωμα ασύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών*

Για τη σχεδίαση επιλέγονται οι ακόλουθες τιμές:

Στο δόντι του στάτη  $B_{ts} = 1.8 \text{ T}$

## Κεφάλαιο 4

Στο δόντι του δρομέα  $B_{tr} = 1.9 T$

Στο σώμα του στάτη  $B_{cs} = 1.7 T$

Στο διάκενο  $B_g = 0.5 T$

Αυτές αποτελούν τις μέσες τιμές. Για τον υπολογισμό της επαπτομενικής πίεσης διακένου θεωρούμε μέγιστη τιμή μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο  $\widehat{B}_g = 0.9 T$ .

Η επιτρεπόμενη RMS τιμή της ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης κυμαίνεται μεταξύ 30 kA/m και 65 kA/m και καθορίζεται από τις απώλειες χαλκού και τον περιορισμό για την πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος στους αγωγούς που σχετίζεται με την ψύξη της μηχανής. Στον κινητήρα που σχεδιάζεται, η ψύξη γίνεται με εξαναγκασμένη ροή αέρα από ξεχωριστό ανεμιστήρα επομένως μπορεί να γίνει ανεκτή πυκνότητας ρεύματος 5-8 A/mm<sup>2</sup>. Αυτές οι τιμές είναι μεγαλύτερες από το συνήθη περιορισμό των 4 A/mm<sup>2</sup> που ισχύει στις μηχανές χωρίς σύστημα εξαναγκασμένης ψύξης και επιτρέπουν την παραγωγή της επιθυμητής ροπής σε μηχανές μεγαλύτερης ισχύος. Με βάση αυτά επιλέγεται  $A = 45 \text{ kA/m}$  και μέγιστη τιμή  $\widehat{A} = 65 \text{ kA/m}$

Οπότε η μέση επαπτομενική πίεση διακένου προκύπτει:

$$\sigma_{Ftan} = \frac{\widehat{A}\widehat{B}_g \cos\varphi}{2} = 25155 Pa \quad (4.4)$$

Αφού υπολογίστηκε η επαπτομενική πίεση, οι βασικές διαστάσεις του κινητήρα προκύπτουν:

$$T = \sigma_{Ftan} \frac{\pi}{2} D^2 L \Rightarrow D^2 L = 25510345 \text{ mm}^3 \quad (4.5)$$

Το πολικό βήμα είναι:

$$\tau_p = \frac{\pi D}{p} \quad (4.6)$$

όπου P είναι οι πόλοι του κινητήρα.

Οι τιμές του λόγου λ αξονικού μήκους της μηχανής, L προς το μήκος ενός πόλου,  $\tau_p$  δίνονται στον ακόλουθο πίνακα ανάλογα τους πόλους του κινητήρα:

p	2	4	6	8
λ	0.6-1.0	1.2-1.8	1.6-2.2	2.0-3.0

Πίνακας 4.3  $L/\tau_p$  ανάλογα με το πλήθος πόλων του κινητήρα.

Μετά από δοκιμές επιλέχθηκε  $\lambda = L/\tau_p = 1.6$  δηλαδή

$$L = 1.257D$$

Οπότε οι βασικές διαστάσεις προκύπτουν:

$$L=342.87\text{mm}$$

$$D=272.77\text{mm}$$

Για τον υπολογισμό του μήκους διακένου υπάρχουν στη βιβλιογραφία [5] τύποι που το υπολογίζουν ως συνάρτηση της ισχύος της μηχανής για λειτουργία 50 Hz. Για τον τετραπολικό κινητήρα που μελετάται, έχουμε:

$$g = 0.18 + 0.006 P^{0.4} = 0.81 \text{ mm} \quad (4.7)$$

Ωστόσο η τιμή αυτή είναι πολύ μικρή για τις προδιαγραφές του κινητήρα. Για ασύγχρονες μηχανές μεγάλης ισχύος το διάκενο πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερο για την αποφυγή μεγάλων απωλειών σιδήρου. Μάλιστα για μηχανές ισχύος της τάξεως των MW το διάκενο είναι της τάξης του 1cm. Ένα πολύ μικρό διάκενο προκαλεί μεγάλες χωρικές αρμονικές πεδίου και επιπλέον απώλειες [5]. Για τους λόγους αυτούς επιλέγεται διάκενο μεγαλύτερο από αυτό που υποδεικνύουν οι τύποι. Μετά από δοκιμές επιλέγεται  $g=5 \text{ mm}$ .

### 4.2.2 Παραμετροποιημένη σχεδίαση

Η διαστασιολόγηση του κινητήρα υπήρξε βασικό αντικείμενο μελέτης με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης τοπολογίας. Ο κινητήρας χρειάστηκε να σχεδιαστεί αρκετές φορές για διάφορες τιμές των γεωμετρικών παραμέτρων, πριν επιλεγθούν οι καταλληλότερες.

Για το λόγο αυτό, οι διαστάσεις του κινητήρα είναι παραμετροποιημένες με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξαρτώνται δυναμικά από κάποιες βασικές διαστάσεις, όπως είναι η διάμετρος του μέσου διακένου, το αξονικό μήκος της μηχανής, το πλάτος του διακένου και το πλήθος αυλάκων στάτη και δρομέα. Αυτό σημαίνει ότι μεταβάλλοντας αυτές τις σχεδιαστικές παραμέτρους, ο κινητήρας σχεδιάζεται εκ νέου προσαρμόζοντας και τις υπόλοιπες διαστάσεις με σκοπό να πληρούνται συνεχώς οι επιθυμητές προδιαγραφές. Η παραμετροποιημένη σχεδίαση στάθηκε ιδιαίτερα χρήσιμη για τη διαδικασία επιλογής των βέλτιστων γεωμετρικών παραμέτρων του κινητήρα.

### 4.2.3 Σχεδίαση στάτη

Το πλήθος των αυλάκων του στάτη  $Q$  δίνεται από τη σχέση:  $Q=mpq$ , όπου είναι το πλήθος των φάσεων ( $m=3$ ),  $p$  είναι το πλήθος των πόλων και  $q$  το πλήθος αυλάκων ανά πόλο και φάση.

## Κεφάλαιο 4

---

Λόγω των απαιτήσεων ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, η μηχανή θα είναι αναγκαστικά τετραπολική. Έπειτα από δοκιμές επιλέχθηκαν  $q=2$  αυλάκια ανά πόλο και φάση. Η τιμή αυτή επιτρέπει την επίτευξη της επιθυμητής ροπής χωρίς η πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες του στάτη να ξεπερνά τα επιτρεπτά όρια.

Η μέση ροή ανά πόλο θεωρώντας  $\bar{B} = 0,5 T$

$$\Phi = \bar{B} \frac{\pi D}{p} L = 0.03673 Wb \quad (4.8)$$

Η rms τιμή της φασικής τάσης είναι  $E=400 V$ . Οπότε οι σπείρες των πηνίων κάθε φάσης δίνονται από τη σχέση:

$$N = \frac{E}{4,44 \Phi f \frac{p}{2}} = 24.53 \quad (4.9)$$

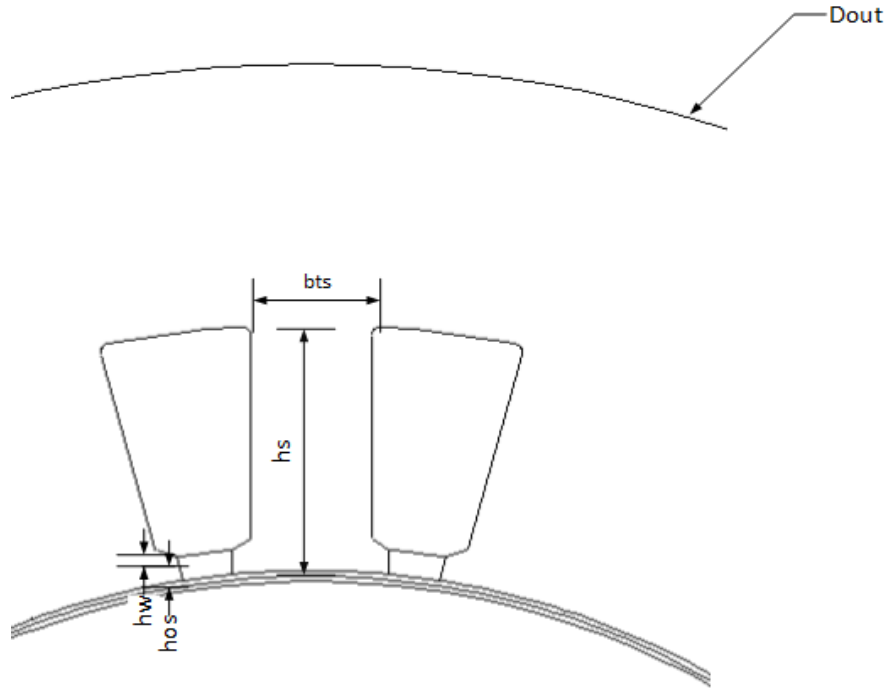
επομένως το πλήθος των αγωγών ανά αύλακα είναι:

$$n_s = \frac{N}{\frac{p}{2} q} = 6.13 \approx 6 \quad (4.10)$$

και τελικά οι τιμές που προκύπτουν είναι οι ακόλουθες:

$N=24$  ,  $\Phi=0,03754Wb$  και  $\bar{B}=0,511T$

Για τη σχεδίαση του στάτη χρησιμοποιούνται τραπεζοειδή ημίκλειστα αυλάκια, όπως φαίνεται στο *σχήμα 4.1*. Τα τραπεζοειδή αυλάκια εξασφαλίζουν το σταθερό πλάτος των δοντιών απαραίτητο για την ομαλή φόρτισή τους. Τα δόντια δηλαδή είναι παραλληλόγραμμα.



Σχήμα 4.1 Γεωμετρία αυλάκων στάτη.

Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται η γεωμετρία των αυλάκων του στάτη. Από τις διάφορες διαστάσεις άλλες επιλέγονται από τυπικές τιμές και άλλες προσδιορίζονται από εμπειρικούς τύπους ή πιο αναλυτικές σχέσεις.

Το ύψος της αύλακας στάτη  $h_s$  δίνεται από τη σχέση:

$$h_s = K \frac{\pi D}{Q} \left( 1 - \frac{B_g}{B_{ts}} \right) \quad (4.11)$$

όπου  $K$  ο λόγος του ύψους προς το πλάτος της αύλακας  $h_s/b_s$

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [8] αυτός περιορίζεται μεταξύ 3 και 6. Γενικά οι μικρότερες τιμές αντιστοιχούν σε μικρότερες μηχανές, ωστόσο για τη διατήρηση της μαγνητικής επαγωγής στο σώμα του στάτη κάτω από το 1.7 T, επιλέγουμε  $K=3.5$ .

Το ύψος  $h_{os}$  του ανοίγματος της αύλακας και το ύψος της σφηνοειδούς περιοχής  $h_w$  ορίζονται ως ποσοστά του μήκους δοντιού του στάτη.

Η εξωτερική ακτίνα του στάτη ορίζεται επίσης παραμετρικά σε σχέση με το πλήθος των αυλάκων ανά πόλο και φάση και το ύψος δοντιών του στάτη, με σκοπό να αποφευχθεί ο κορεσμός του σιδήρου.

Η rms τιμή του ρεύματος παρέχεται στις προδιαγραφές και είναι  $I_{rms} = 282$  A. Οπότε η μαγνητεγερτική δύναμη δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$ME\Delta = I_{rms}N = 6768 A - \varepsilon \quad (4.12)$$

Η αναγκαία διατομή αύλακος που θα δημιουργήσει την παραπάνω ΜΕΔ υπολογίζεται με κριτήριο την μέγιστη πυκνότητα ρεύματος, η οποία ισούται με  $J=6.5 A/mm^2$  εφόσον η μηχανή ψύχεται από ανεξάρτητο ανεμιστήρα. Συνεπώς, η ελάχιστη ενεργή διατομή υπολογίζεται ως εξής:

$$A_{cu} = \frac{ME\Delta}{J} = 1041.23 A/mm^2 \quad (4.13)$$

Θεωρώντας συντελεστή αξιοποίησης της αύλακας ίσο με 0.6, η συνολική διατομή κάθε αύλακας θα πρέπει να είναι τουλάχιστον:

$$A_{slot} = \frac{A_{cu}}{0.6} = 1735.38 mm^2 \quad (4.14)$$

Το πλάτος δοντιού του στάτη αναπαρίσταται ως ποσοστό του πολικού βήματος  $b_{ts} = p_1 \tau_p$ . Για τον υπολογισμό του ποσοστού θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν τον πλήθος  $q$  των αυλάκων ανά πόλο και φάση. Το ελάχιστο πλάτος υποδεικνύεται από την απαίτηση η μέγιστη μαγνητική επαγωγή στο δόντι να μην θέτει τη λαμαρίνα σε κορεσμό, δηλαδή να περιοριστεί σε τιμές χαμηλότερες του 1.8 Tesla. Αντιστοιχούν δύο δόντια σε κάθε πόλο. Το μαγνητικό κύκλωμα αποτελείται από δυο δόντια, τα οποία δέχονται όλη τη μαγνητική ροή του διακένου, επομένως:

$$b_{ts} \geq \frac{\Phi}{2 LB_{ts}} = \frac{0.03754}{2 \cdot 342.87 \cdot 1.8} = 30.41 mm \quad (4.15)$$

Με δεδομένο όμως πως η μαγνητική ροή δεν κατανέμεται εξίσου και στα τρία δόντια του πόλου κατά τη λειτουργία του κινητήρα, η τιμή αυτή πρέπει να θεωρηθεί ως το ελάχιστο όριο. Οπότε επιλέγεται αρχικά  $p_1=13\%$ .

### 4.2.4 Σχεδίαση Δρομέα

Κατά τη σχεδίαση ενός δρομέα κλωβού, ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στην επιλογή του κατάλληλου πλήθους αυλάκων στο δρομέα  $Q_r$ , προκειμένου να περιορίζονται κατά το δυνατόν οι παρασιτικές ροπές, πρόσθετες απώλειες, ακτινικές δυνάμεις, θόρυβος και δονήσεις.

Από τη βιβλιογραφία [5] βρίσκεται το κατάλληλο πλήθος αυλάκων δρομέα ανάλογα με τους πόλους  $p$  της μηχανής και το πλήθος αυλάκων του στάτη  $Q_s$ :

$Q_s$	$p=4$
	Επιτρεπτό πλήθος αυλάκων δρομέα $Q_r$
24	18, 30, 34, 38

Πίνακας 4.4 Πλήθος αυλάκων στάτη/ δρομέα.

Για την τετραπολική μηχανή με 24 αύλακες στο στάτη επιλέγουμε 34 αύλακες για το δρομέα. Η επιλογή αυτή έγινε μετά από δοκιμές ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ολίσθηση και ταυτόχρονα να μην υπάρχει αυξημένη πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες του δρομέα.

Το ρεύμα κάθε ράβδου του δρομέα υπολογίζεται:

$$I_b = K_I \frac{2.3.N.k_w}{Q_r} I_N \quad (4.16)$$

όπου  $K_I$  ο συντελεστής που δείχνει τη σχέση μεταξύ των μαγνητεγερτικών δυνάμεων στάτη και δρομέα. Η ΜΕΔ του στάτη είναι ελαφρώς μεγαλύτερη επομένως θεωρούμε  $K_I = 0,9$  άρα  $I_b = 1021 A$ .

Επιλέγουμε τη πυκνότητα ρεύματος στις ράβδους  $J_b=6,5A/mm^2$

Η επιφάνεια της αύλακας του δρομέα θα είναι τότε:  $A_b = \frac{I_b}{J_b} = 157.1 mm^2$

Το βήμα αύλακας του δρομέα είναι

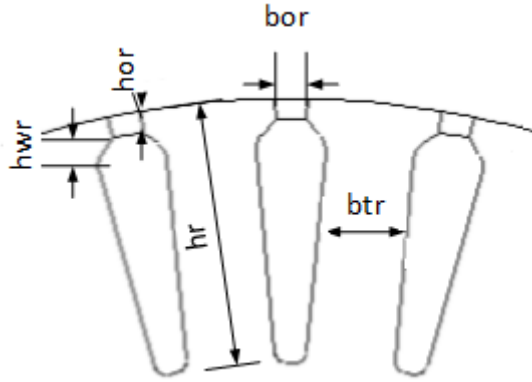
$$\tau_r = \frac{\pi(D-2g)}{Q_r} = 24.28 mm \quad (4.17)$$

Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή σχεδιάζονται κινητήρες επαγωγής κατασκευαστικής κλάσης B, C και D.

### 4.2.4.1 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης B

Στο *σχήμα 4.2* φαίνεται η γεωμετρία αυλάκων δρομέα για τον κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης B. Παρόλο που δεν είναι σαφές από το σχήμα, τα δόντια του δρομέα είναι παραλληλόγραμμα, ώστε να διατηρείται σταθερή ροή σε όλο το μήκος τους.





Σχήμα 4.2 Γεωμετρία αυλάκων δρομέα κατασκευαστικής κλάσης B

Το πλάτος δοντιού δρομέα είναι:

$$b_{tr} = \frac{B_g}{K_{Fe} B_{tr}} \tau_r \quad (4.18)$$

και προκύπτει  $b_{tr} = 7.2 \text{ mm}$ .

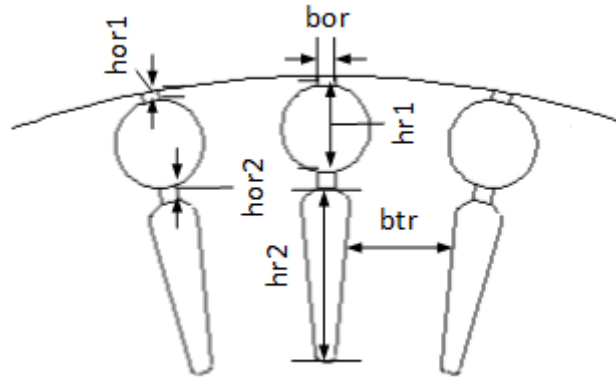
Ωστόσο το πλάτος αυτό είναι πολύ μικρό και οδηγεί σε πολύ αυξημένη τιμή μαγνητικής επαγωγής στο δόντι του δρομέα. Οπότε για την αρχική σχεδίαση επιλέγεται πλάτος δοντιού δρομέα ίσο με 28mm.

Το πάχος του δοντιού στην περίμετρο του δρομέα  $b_{os}$  τέθηκε ίσο με  $1.5b_{tr}$  και το ύψος του ανοίγματος διακένου  $h_{or}$  τέθηκε ίσο με το 8% του ύψους δοντιού του δρομέα.

Με τα παραπάνω δεδομένα μπορεί να σχεδιαστεί ο δρομέας κατασκευαστικής κλάσης B. Ενώ με βάση τα στοιχεία αυτά γίνεται μια αρχική εκτίμηση των βασικών γεωμετρικών παραμέτρων για τους κινητήρες κατασκευαστικής κλάσης C και D.

#### 4.2.4.2 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης C

Στο *σχήμα 4.3* φαίνεται η γεωμετρία των αυλάκων του δρομέα για τον κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης C. Ο δρομέας αποτελείται από δύο αύλακες. Η διάμετρος της πάνω αύλακας,  $h_{r1}$  και το πάχος δοντιού δρομέα στην περιοχή με ύψος  $h_{r2}$ ,  $b_{tr}$  υπολογίζονται ως ποσοστό του πολικού βήματος. Το συνολικό ύψος δοντιού του δρομέα  $h_{or1} + h_{r1} + h_{or2} + h_{r2}$  τίθεται ως ποσοστό της ακτίνας του δρομέα  $D_{in} - D_{shaft}$ . Όπου τα ύψη  $h_{or1}$  και  $h_{or2}$  είναι ποσοστά του συνολικού ύψους δοντιού του δρομέα. Το πλάτος του ανοίγματος της αύλακας του δρομέα προς το διάκενο  $b_{or}$  ορίζεται ως ποσοστό της διαμέτρου  $h_{r1}$  της πάνω αύλακας του δρομέα.

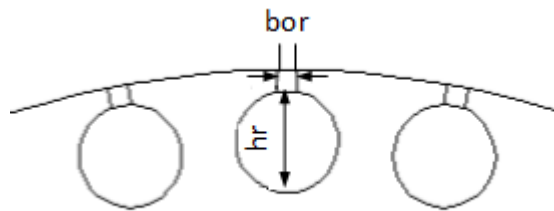


Σχήμα 4.3 Γεωμετρία αυλάκων δρομέα κατασκευαστικής κλάσης C.

Ορίζοντας τις διαστάσεις του σχήματος 4.3 προκύπτει η γεωμετρία για τον κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης C. Οι περισσότερες διαστάσεις είναι συναρτήσεις των βασικών διαστάσεων που ορίζονται για τον κινητήρα ώστε να διευκολυνθεί στη συνέχεια ο έλεγχος των επιπτώσεων μεταβολής των διαφόρων διαστάσεων στην επίδοση και την απόδοση του κινητήρα.

#### 4.2.4.3 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης D

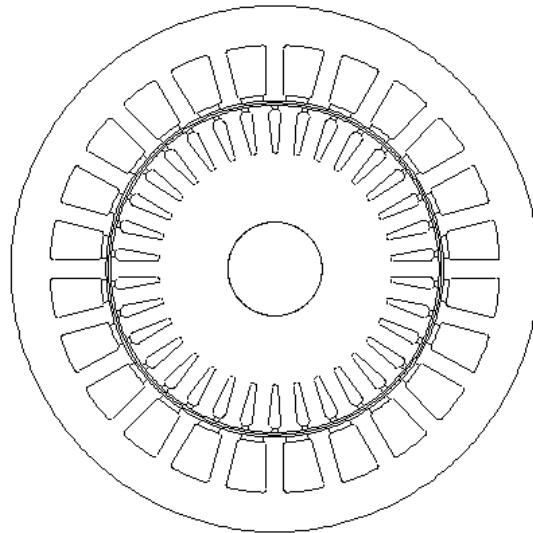
Στο σχήμα 4.4 φαίνονται οι βασικές διαστάσεις του δρομέα για τον κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης D. Σε αυτή τη γεωμετρία όπως και στις προηγούμενες η διάμετρος της αύλακας του δρομέα  $h_r$  ορίζεται παραμετρικά ως ποσοστό του πολικού βήματος και το πλάτος του ανοίγματος της αύλακας προς το διάκενο  $b_{or}$  ορίζεται ως ποσοστό του πλάτους δοντιού του δρομέα.



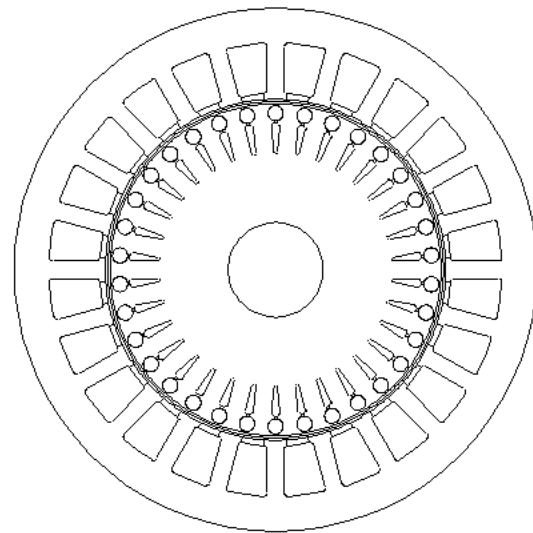
Σχήμα 4.4 Γεωμετρία αυλάκων δρομέα κατασκευαστικής κλάσης D.

#### 4.2.5 Τελική Γεωμετρία

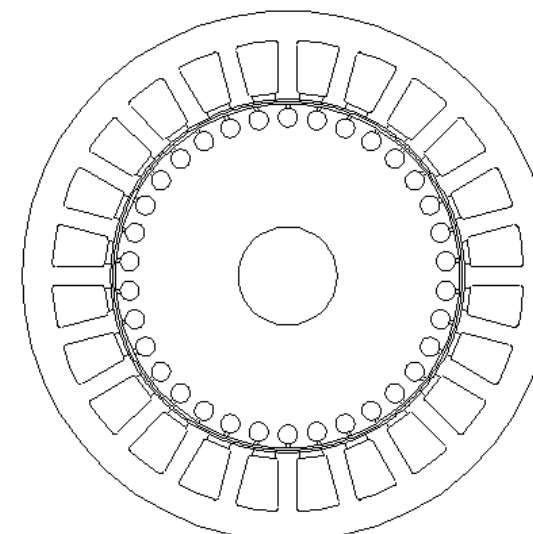
Συγκεντρώνοντας τα στοιχεία της προκαταρκτικής μελέτης και της διαστατικής ανάλυσης που προηγήθηκαν μπορεί να σχεδιαστεί η γεωμετρία του κινητήρα με ακρίβεια.



Σχήμα 4.5 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης B



Σχήμα 4.6 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης C



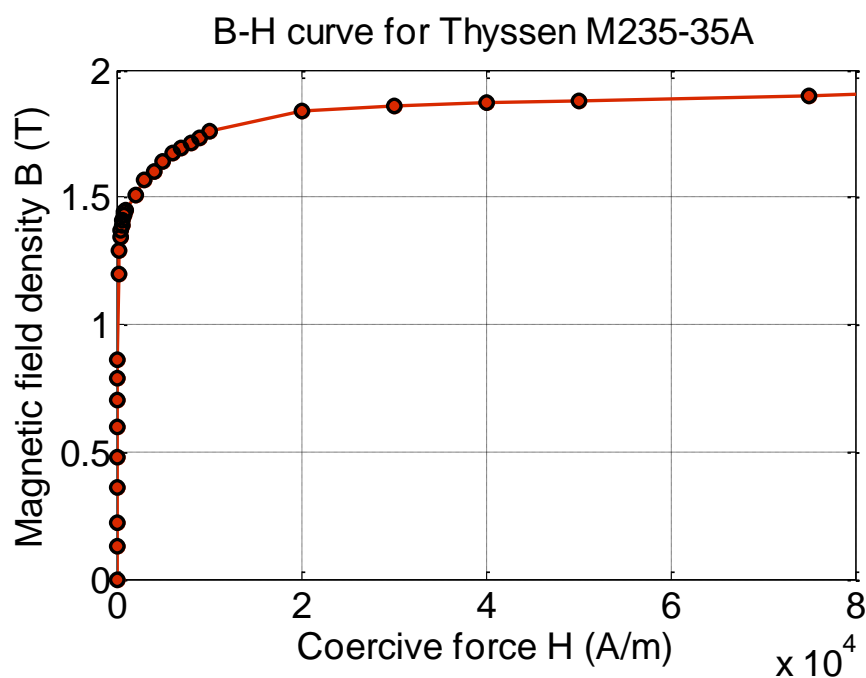
Σχήμα 4.7 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης D

Παρατηρείται ότι τα δόντια του στάτη είναι πολύ λεπτά σε σχέση με τα πλάτος των αυλάκων. Αυτό αναμένεται να οδηγήσει σε αυξημένη μαγνητική επαγωγή στα δόντια του στάτη και χαμηλή πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα. Ακόμη το σώμα του στάτη φαίνεται να έχει υπερεκτιμηθεί και υπάρχει περιθώριο μείωσης. Στο δρομέα αρχικά φαίνεται η σχέση αγωγίμου-σιδηρομαγνητικού υλικού στον πυρήνα να είναι ικανοποιητική.

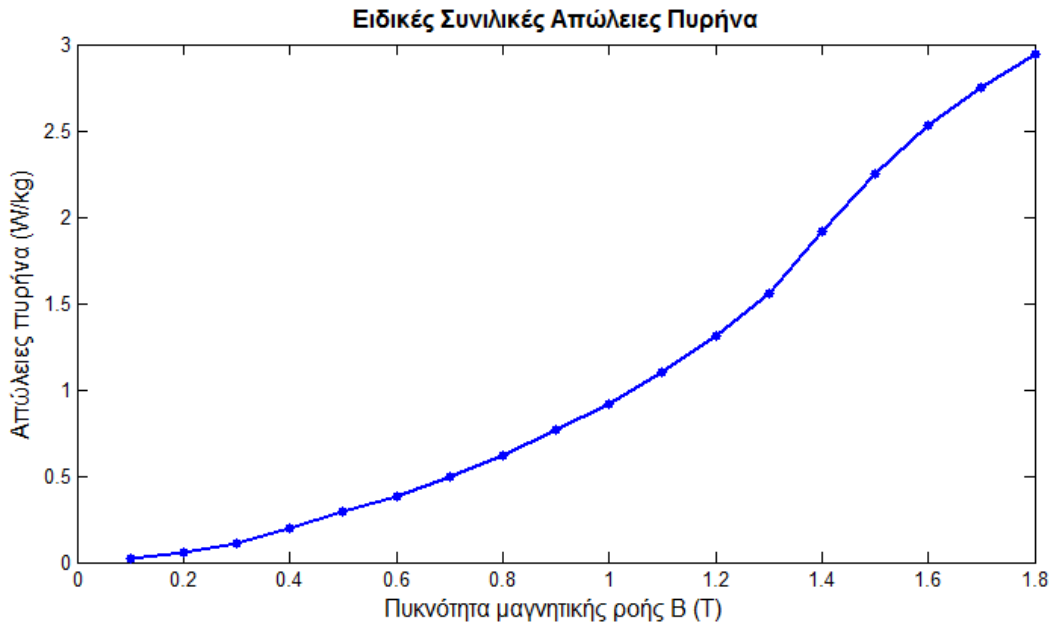
### 4.3 Υλικά Κατασκευής

Στα τυλίγματα του δρομέα μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε χαλκός είτε αλουμίνιο. Ο χαλκός έχει μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα σε σχέση με το αλουμίνιο. Ωστόσο λόγω της απαίτησης για υψηλή ολίσθηση και υψηλή ροπή εκκίνησης επιλέγεται αλουμίνιο αγωγιμότητας  $\sigma=34.45 \text{ MS/m}$ .

Για τον πυρήνα του κινητήρα χρησιμοποιείται η μαγνητική λαμαρίνα M125-35A πάχους 0.5 mm. Από τα στοιχεία του κατασκευαστή παράγονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες του υλικού.



Διάγραμμα 4.1 Μαγνητική πόλωση μαγνητικής λαμαρίνας M235-35A.



Διάγραμμα 4.2 Ειδικές συνολικές απώλειες πυρήνα μαγνητικής λαμαρίνας M235-35A στα 50 Hz.

#### 4.4 Απώλειες και Απόδοση

##### 4.4.1 Ωμικές απώλειες

##### Απώλειες χαλκού στάτη

Ο υπολογισμός των απωλειών χαλκού του στάτη γίνεται μέσω μιας διαδικασίας που δημιουργήθηκε στο MATLAB. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζει τη σχέση 4.19 για τον υπολογισμό της αντίστασης του χαλκού:

$$R_s = \frac{\rho l}{S_{cu}} \tag{4.19}$$

όπου  $\rho$  η ειδική αντίσταση του χαλκού,  $l$  το συνολικό μήκος των αγωγών χαλκού,  $S_{cu}$  το εμβαδό της αύλακας που καταλαμβάνει ο χαλκός:  $S_{cu} = S_{slot} ff = S_{slot} 0.6$  θεωρώντας συντελεστή πληρότητας της αύλακας ίσο με 60%.

Οπότε οι απώλειες χαλκού στου στάτη, είναι :

$$P_{copper\,stator} = 3 I_{rms}^2 R \tag{4.20}$$

όπου  $I_{rms}$  η rms τιμή του ρεύματος φάσης.

##### Ωμικές απώλειες δρομέα

Ο υπολογισμός των απωλειών Joule του δρομέα γίνεται ικανοποιητικά από το FEMM που υπολογίζει τα ρεύματα στην κατεύθυνση του άξονα z και χρησιμοποιεί τη σχέση  $I^2R$ .

### 4.4.2 Απώλειες πυρήνα

Ο υπολογισμός των απωλειών πυρήνα δεν είναι απλή διαδικασία. Για μια προσέγγιση των απωλειών πυρήνα της μηχανής γίνεται χρήση της καμπύλης ειδικών απωλειών του σιδήρου που δίνονται από τον κατασκευαστή. Το FEMM επιτρέπει την πρόσβαση στα αποτελέσματα κάθε στοιχείου ξεχωριστά. Έτσι, κρατώντας την τιμή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής (B) σε κάθε στοιχείο, μπορούμε αντλώντας στοιχεία από την καμπύλη ειδικών απωλειών (διάγραμμα 4.2) να υπολογίσουμε τις απώλειες σιδήρου σε κάθε στοιχείο ξεχωριστά. Αθροίζοντας τις επιμέρους απώλειες, προκύπτει μια προσέγγιση των συνολικών απωλειών στάτη και δρομέα.

Οι απώλειες πυρήνα οφείλονται στην υστέρηση και τα δινορρεύματα. Και τα δυο αυτά φαινόμενα έχουν έντονη εξάρτηση από τη συχνότητα. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα των πεδίων, τόσο σημαντικότερες είναι και οι απώλειες που προκύπτουν.

Η καμπύλη ειδικών απωλειών του σιδήρου που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις φαίνεται στο διάγραμμα 4.2 για συχνότητα 50 Hz.

Για τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα δημιουργήθηκε διαδικασία στο πρόγραμμα MATLAB η οποία για κάθε στοιχείο του πλέγματος αποθήκευε το μέτρο της πυκνότητας της μαγνητικής ροής στο σημείο αυτό και μέσω ενός πολυωνύμου 5<sup>ου</sup> βαθμού το οποίο προσέγγιζε την καμπύλη απωλειών πυρήνα συναρτήσε της μαγνητικής επαγωγής που φαίνεται στο διάγραμμα 4.2 υπολόγιζε τις απώλειες σε W/Kg του συγκεκριμένου σημείου. Ακολουθως γινόταν άθροιση των απωλειών και πολλαπλασιασμός με τη μάζα του πυρήνα.

$$P_{fe} = \sum_{i=0}^{numofelm} P_{eid,i} S_i L \rho \quad (4.21)$$

όπου  $P_{eid,i}$  είναι οι ειδικές απώλειες του στοιχείου  $i$  που προκύπτουν από την καμπύλη ειδικών απωλειών για την πυκνότητα μαγνητικής ροής του στοιχείου  $i$ , σε W/kg.  $S_i$  είναι το εμβαδό του στοιχείου  $i$ , σε mm<sup>2</sup>.  $L$  είναι το ενεργό μήκος της μηχανής και  $\rho$  είναι η πυκνότητα του υλικού, σε km/mm<sup>2</sup>.

### 4.4.3 Απώλειες τριβών

Για να γίνει μια εκτίμηση για τις απώλειες τριβών χρησιμοποιείται ο προσεγγιστικός τύπος:

$$P_{τριβ} = \frac{K(m_{rotor} + m_{slots})n_r}{1000} \quad (4.22)$$

όπου  $m_{rotor} = S_{rotor} L \rho_{iron}$

και  $m_{slots} = S_{slots} L \rho_{aluminum}$

## Κεφάλαιο 4

---

$S_{rotor}, S_{slots}$  είναι το εμβαδό σώματος του δρομέα και αυλάκων του δρομέα σε  $mm^2$  αντίστοιχα,  $L$  είναι το μήκος του κινητήρα σε  $mm$ ,  $\rho_{iron}$  και  $\rho_{aluminum}$  είναι οι πυκνότητες σιδήρου και αλουμινίου σε  $kg/m^3$  και  $n_r$  είναι η ταχύτητα του δρομέα σε στροφές ανά λεπτό.

### 4.4.4 Απώλειες Ανεμισμού

Για τον υπολογισμό των απωλειών ανεμισμού χρησιμοποιείται ο προσεγγιστικός τύπος:

$$P_{ανεμισμού} = \frac{Ln_r^3(2R_{rotor_{out}})^3}{10^6} \quad (4.23)$$

Όπου  $L$  είναι το μήκος του κινητήρα σε  $mm$ ,  $n_r$  είναι η ταχύτητα του δρομέα σε στροφές ανά λεπτό και  $R_{rotor_{out}}$  είναι η εξωτερική διάμετρος του δρομέα.





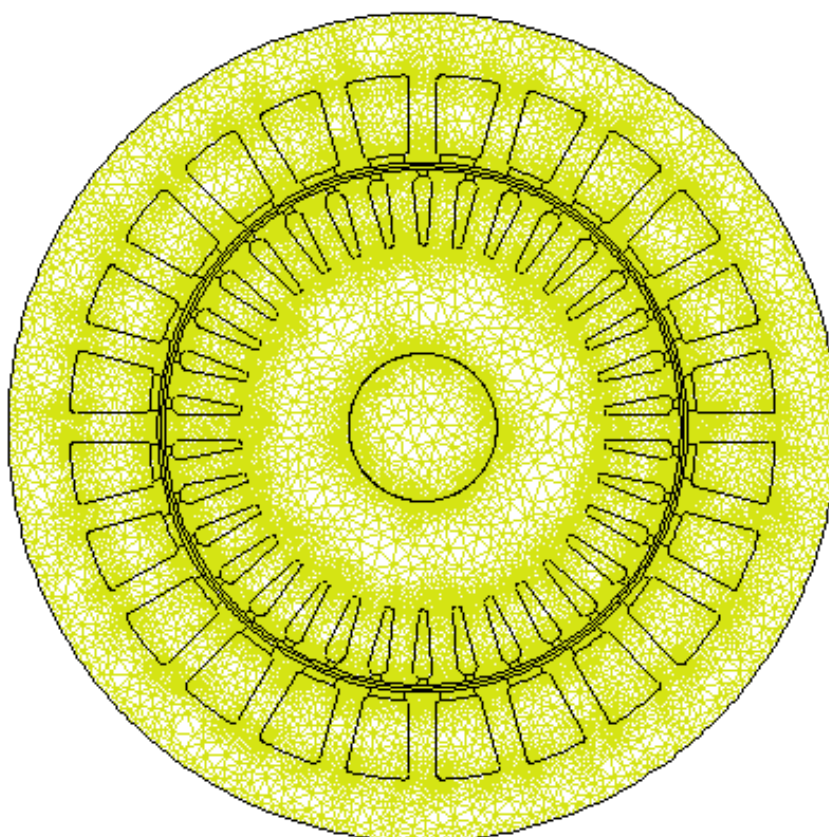
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΟΡΙΣΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

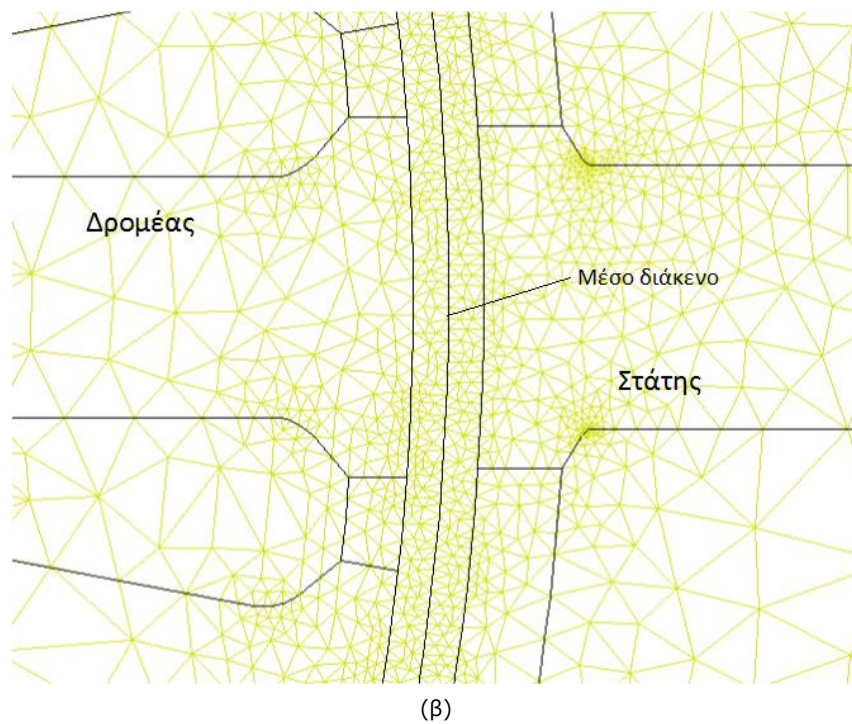
Στο κεφάλαιο αυτό ο κινητήρας που έχει προκύψει ως αποτέλεσμα της προκαταρκτικής σχεδίασης εισάγεται στο πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας. Γίνεται ανάλυση ευαισθησίας των γεωμετρικών παραμέτρων για τους κινητήρες κατασκευαστικής κλάσης B, C και D με σκοπό να γίνει σχεδίαση που θα προσεγγίζει κατά το δυνατόν τις προδιαγραφές που τέθηκαν στο κεφάλαιο 4.

#### 5.1 Εισαγωγή του κινητήρα στο πρόγραμμα FEMM

Ο κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης B σχεδιάζεται στο πρόγραμμα femm και επιλέγεται πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που θεωρείται κατάλληλο για την ανάλυση όπως φαίνεται στο σχήμα. Το πλέγμα στο διάκενο και τις λεπτομέρειες της γεωμετρίας που επιζητείται μεγαλύτερη ακρίβεια είναι πιο πυκνό από ότι στο σώμα του δρομέα και του στάτη και αποτελείται συνολικά από 44700 στοιχεία (Σχήμα 5.1).

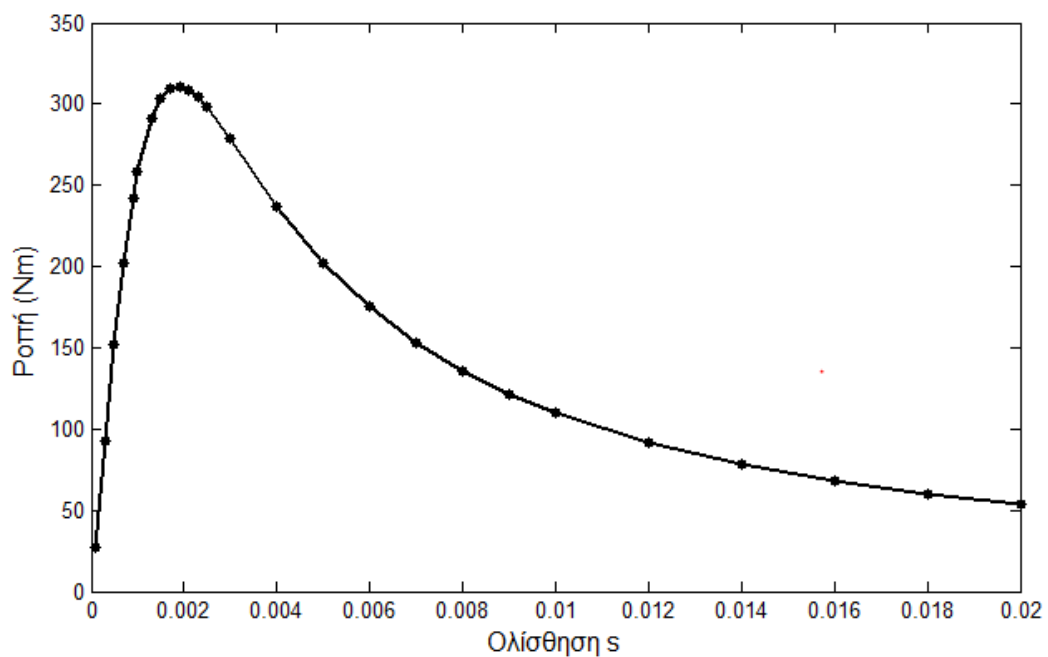


(a)



Σχήμα 5.1 (α) Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, (β) λεπτομέρεια πλέγματος στο διάκενο.

Για τον κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης B και τις διαστάσεις που προέκυψαν από την προκαταρκτική σχεδίαση, μεταβάλλεται η ολίσθηση και άρα η συχνότητα του προβλήματος και μετράται η ροπή του κινητήρα.

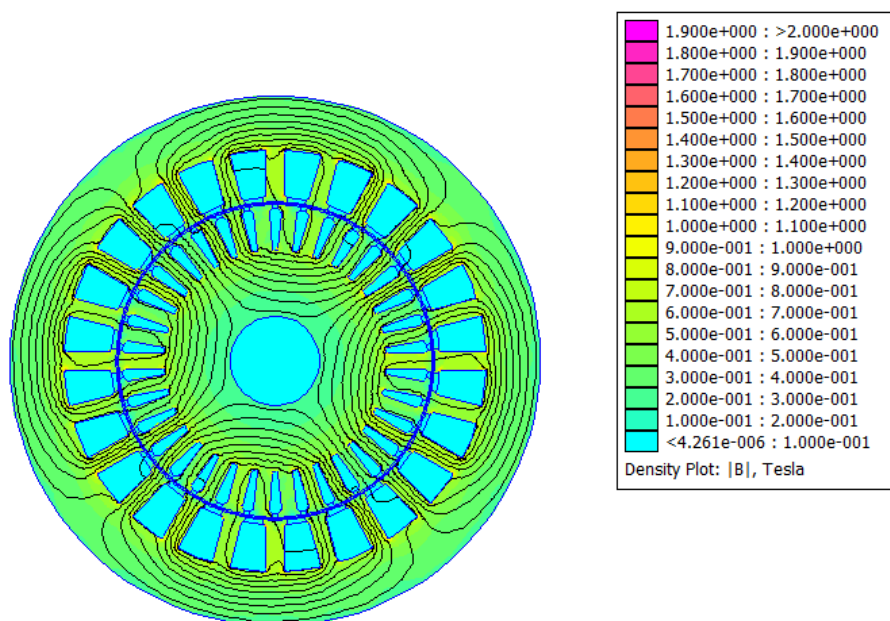


Διάγραμμα 5.1 Χαρακτηριστική Ροπής-Ολίσθησης κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης B

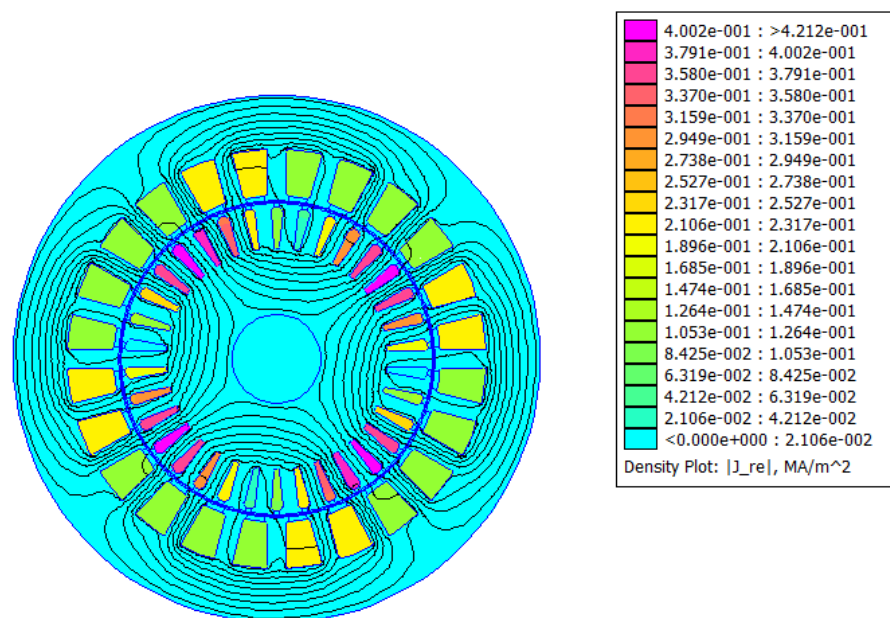
## Κεφάλαιο 5

Παρατηρείται ότι τόσο η ροπή όσο και η ολίσθηση μέγιστης ροπής είναι πολύ χαμηλότερη από την επιθυμητή. Ακόμη από το *σχήμα 5.1* γίνεται φανερό ότι και ο σίδηρος στο σώμα του στάτη και του δρομέα, το αλουμίνιο στις αύλακες του δρομέα και ο χαλκός στις αύλακες του στάτη υποχρησιμοποιούνται.

Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει περιθώριο μείωσης των αρχικών διαστάσεων του κινητήρα.



(a)



(b)

Σχήμα 5.2 Κατανομή (α) Μαγνητικής επαγωγής και (β) πυκνότητας ρεύματος κινητήρα.

## Κεφάλαιο 5

---

Μετά από δοκιμές επιλέγεται  $D^2L=7000000 \text{ mm}^3$  από όπου για  $L/\tau_p=1.6$  προκύπτει:

$$D=177.25 \text{ mm}$$

$$L=222.8 \text{ mm}$$

Για αυτά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, με εφαρμογή των σχέσεων 4.8 - 4.10, προκύπτει:

$$\Phi = \bar{B} \frac{\pi D}{p} L = 0.01551 \text{ Wb}$$

Η rms τιμή της φασικής τάσης είναι  $E=400 \text{ V}$ . Οπότε οι σπείρες των πηνίων κάθε φάσης δίνονται από τη σχέση:

$$N = \frac{E}{4,44 \Phi f \frac{p}{2}} = 58,09$$

επομένως το πλήθος των αγωγών ανά αύλακα είναι:

$$n_s = \frac{N}{\frac{p}{2} q} = 14,55 \approx 15$$

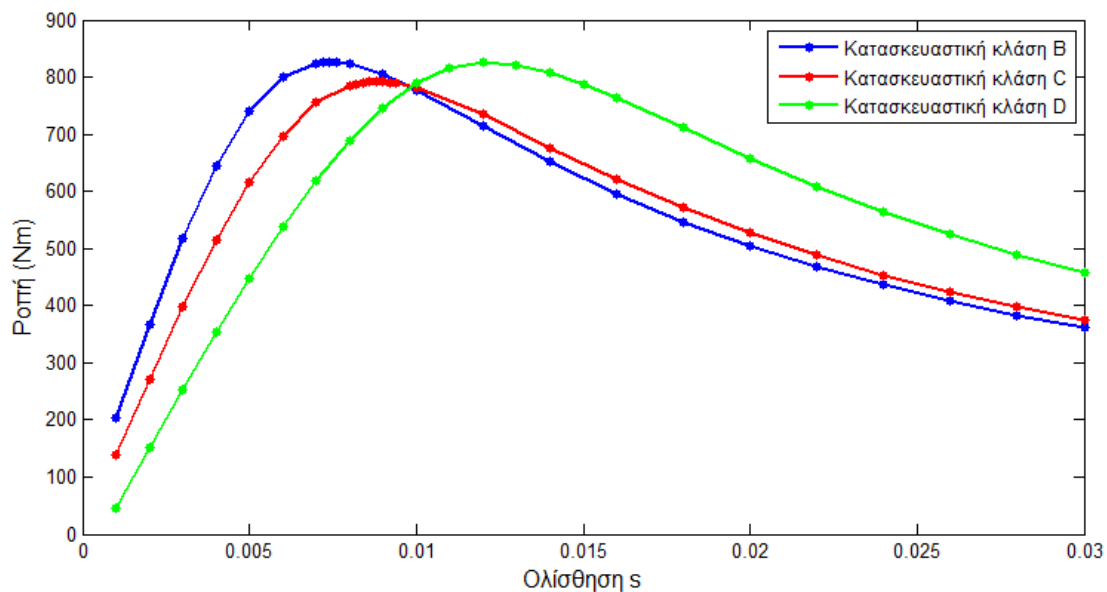
και τελικά οι τιμές που προκύπτουν είναι οι ακόλουθες:

$$N=60, \Phi=0,015 \text{ Wb} \text{ και } \bar{B}=0,4841 \text{ T}$$

Οι υπόλοιπες διαστάσεις για τις τρεις γεωμετρίες που μελετώνται προκύπτουν από την παραμετροποιημένη σχεδίαση.

Οι χαρακτηριστικές Ροπή-Ολίσθησης των κινητήρων κατασκευαστικής κλάσης B, C και D για αυτά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά φαίνονται συγκεντρωτικά στο *διάγραμμα 5.2*:

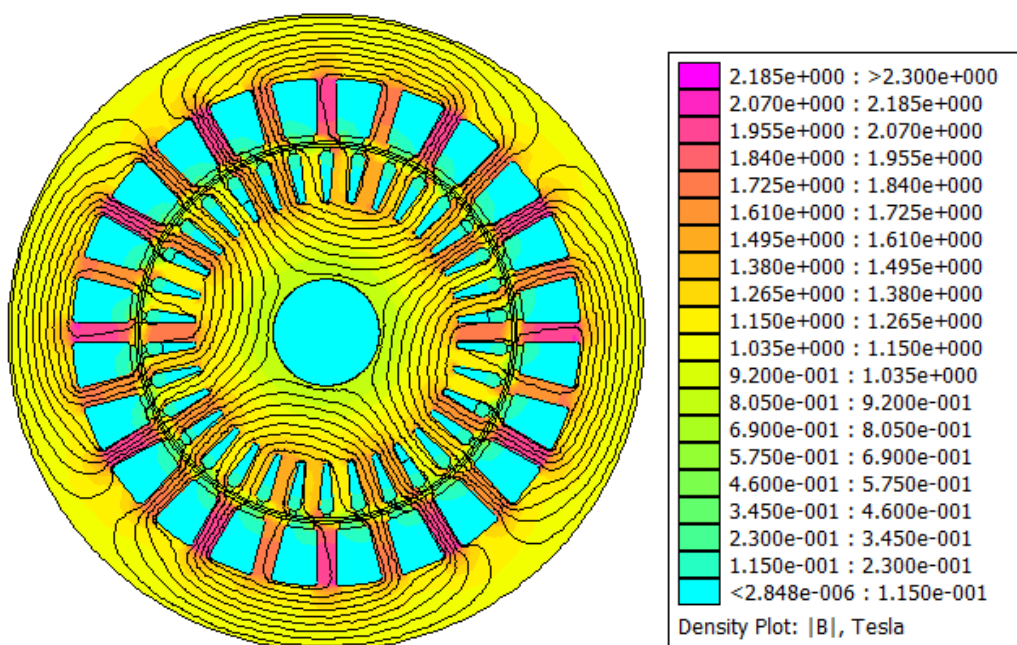
## Κεφάλαιο 5



Διάγραμμα 5.2. Καμπύλες Ροπής-Ολίσθησης κινητήρων κλάσης B, C, D.

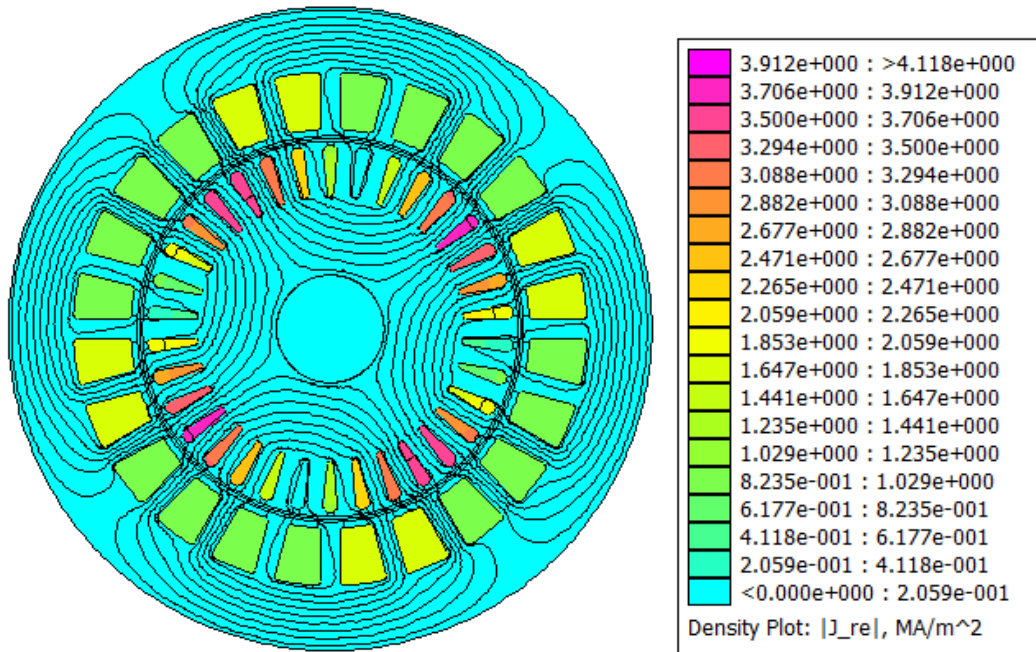
Παρατηρείται ότι ο κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης B υπερέχει ως προς τη ροπή ενώ ο κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης D παρουσιάζει μέγιστη ροπή σε μεγαλύτερη ολίσθηση.

Η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής και τις πυκνότητας ρεύματος των κινητήρων στην ολίσθηση μέγιστης ροπής φαίνεται στα σχήματα 5.3-5.5.



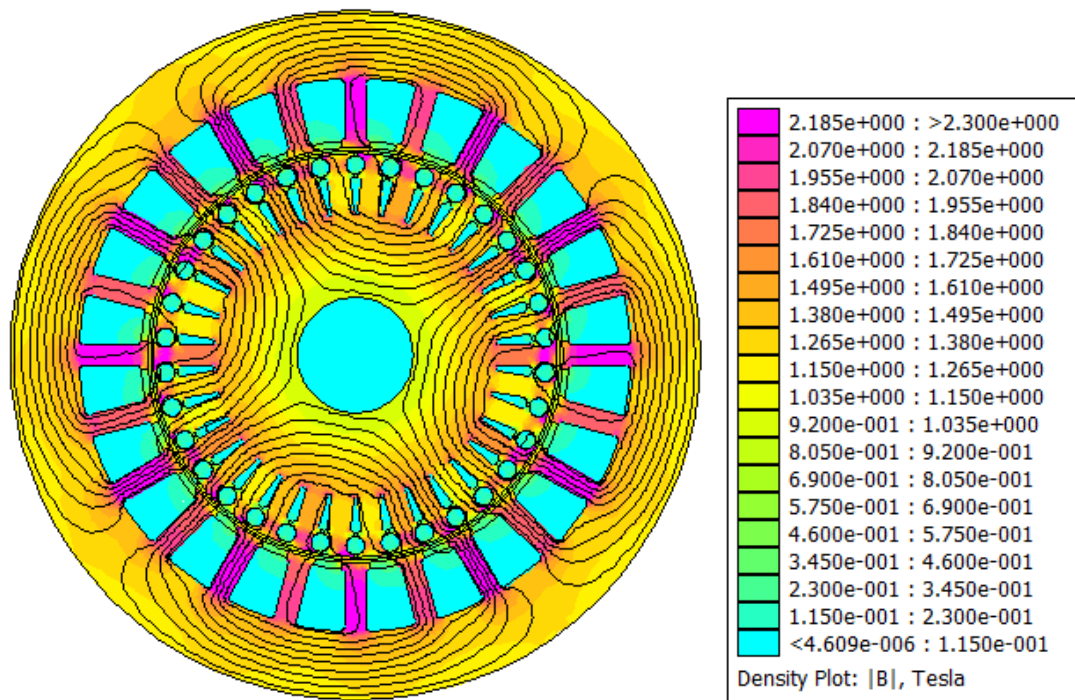
(a)



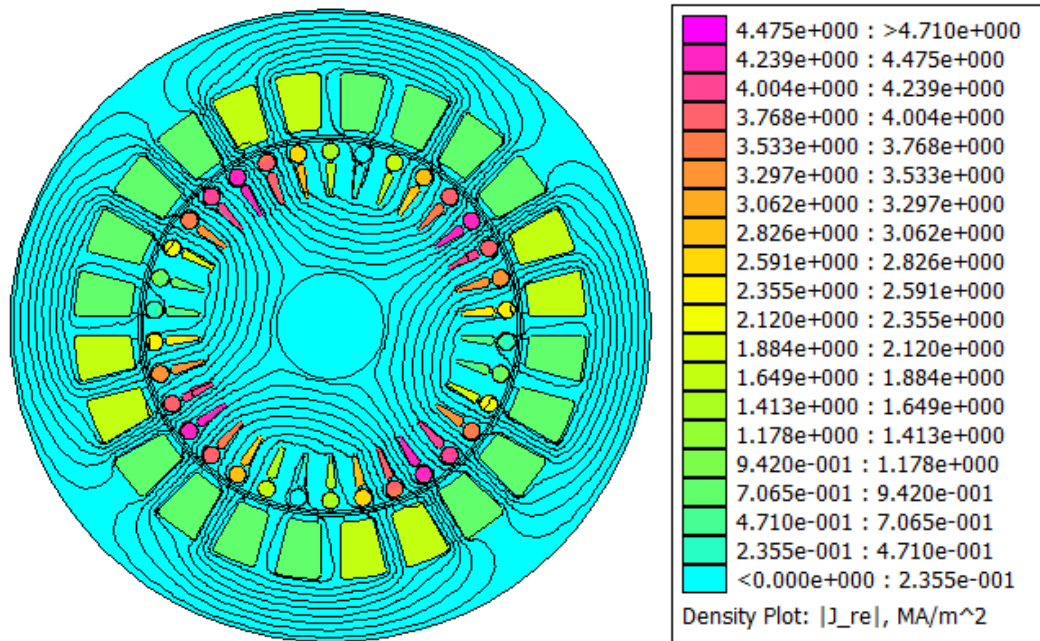


(β)

Σχήμα 5.3 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης B (α) Μαγνητική επαγωγή και (β) Πικνότητα ρεύματος.

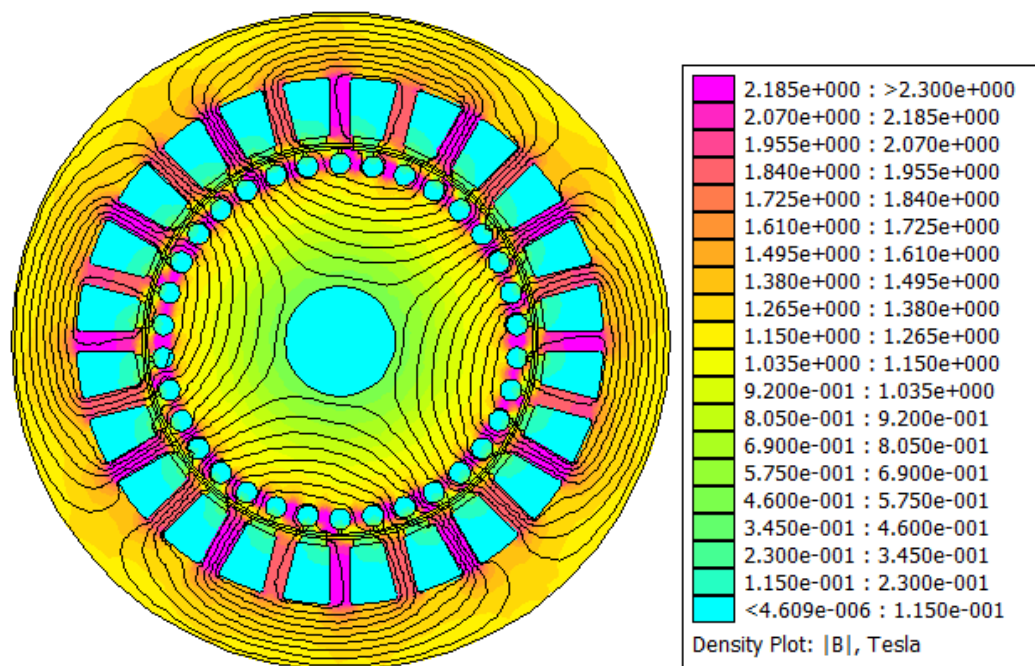


(α)

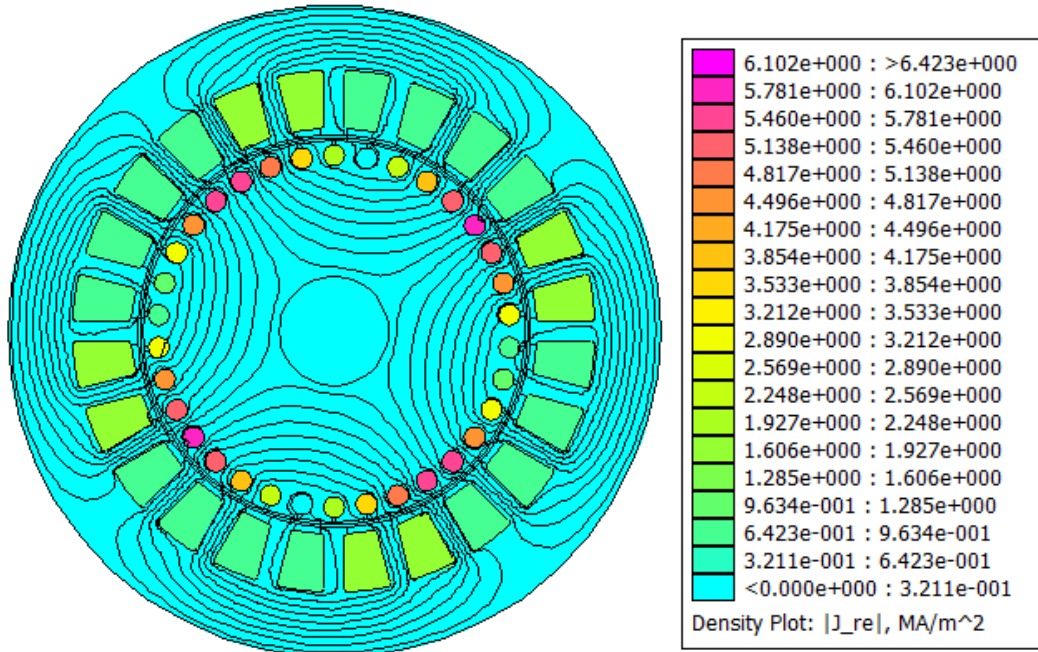


(β)

Σχήμα 5.4 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης : (α) Μαγνητική επαγωγή και (β) Πυκνότητα ρεύματος



(α)



(β)

Σχήμα 5.5 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης D: (α) Μαγνητική επαγωγή και (β) Πυκνότητα ρεύματος.

Μελετώντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης των σχημάτων γίνονται οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Ο σίδηρος του κινητήρα υπερφορτίζεται. Η μαγνητική επαγωγή στα δόντια του στάτη και του δρομέα λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες των επιθυμητών.
- Ο χαλκός στο στάτη υποχρησιμοποιείται. Λαμβάνοντας υπόψιν συντελεστή πληρότητας των αυλάκων του στάτη ίσο με 0,6 η πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες του στάτη για τον κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης B, C, D είναι αντίστοιχα 1.75, 1.7 και 3.5, πολύ μικρότερη από τα 6.5 A/mm<sup>2</sup> που θεωρήθηκαν ανεκτά κατά το σχεδιασμό.

Για τους λόγους αυτούς πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας των γεωμετρικών παραμέτρων για κάθε κατασκευαστική κλάση κινητήρα ξεχωριστά ώστε να επιτευχθεί καλύτερη αξιοποίηση των υλικών.

### 5.1.2 Απώλειες και απόδοση αρχικής σχεδίασης

Στην ολίσθηση μέγιστης ροπής υπολογίζονται οι απώλειες για την αρχική σχεδίαση που πραγματοποιήθηκε στις τρεις γεωμετρίες όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.4.

#### 5.1.2.1 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης B

Απώλειες χαλκού στάτη

$$P_{copper\,stator} = 1961.9 \text{ W}$$



Απώλειες χαλκού δρομέα  $P_{copper_{rotor}} = 1772.5 W$

Απώλειες σιδήρου στάτη και δρομέα  $P_{fe} = 52.11 W$

Για τις απώλειες τριβών ισχύει:

$$m_{rotor} = S_{rotor} L \rho_{iron} = 0,073593 m^3 0.2228 m 7874 \frac{kg}{m^3} = 129.11 kg$$

$$m_{slots} = S_{slots} L \rho_{aluminum} = 0.0135119 m^3 0.2228 m 2720 \frac{kg}{m^3} = 8.19 kg$$

$$P_{τριβ} = \frac{K(m_{rotor} + m_{slots})n_r}{1000} = 615.56 W$$

Για τις απώλειες ανεμισμού προκύπτει:

$$P_{ανεμισμού} = \frac{L n_r^3 (2 R_{rototout})^3}{10^6} = 31.75 W$$

Υπολογίζοντας την ισχύ εξόδου του κινητήρα μέσω της παραγόμενης ροπής, προκύπτει:

$$P_{out} = 129.27 kW$$

οπότε,

$$Efficiency(\%) = \frac{T \omega}{T \omega + P_{copper_{stator}} + P_{copper_{rotor}} + P_{fe} + P_{τριβ} + P_{ανεμισμού}} 100 = 96,7 \%$$

### 5.1.2.2 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης C

Απώλειες χαλκού στάτη  $P_{copper_{stator}} = 1892.5 W$

Απώλειες χαλκού δρομέα  $P_{copper_{rotor}} = 1624 W$

Απώλειες σιδήρου στάτη και δρομέα  $P_{fe} = 55.89 W$

Για τις απώλειες τριβών ισχύει:

$$m_{rotor} = S_{rotor} L \rho_{iron} = 0,0774117 m^3 0.2228 m 7874 \frac{kg}{m^3} = 135.8 kg$$

$$m_{slots} = S_{slots} L \rho_{aluminum} = 0.0103345 m^3 0.2228 m 2720 \frac{kg}{m^3} = 6.26 kg$$

$$P_{τριβ} = \frac{K(m_{rotor} + m_{slots})n_r}{1000} = 636.47 W$$

Για τις απώλειες ανεμισμού προκύπτει:

$$P_{ανεμισμού} = \frac{L n_r^3 (2 R_{rototout})^3}{10^6} = 31.68 W$$

Υπολογίζοντας την ισχύ εξόδου του κινητήρα μέσω της παραγόμενης ροπής, προκύπτει:

$$P_{out} = 123.8 \text{ kW},$$

οπότε:

$$Efficiency(\%) = \frac{T \omega}{T \omega + P_{copper\_stator} + P_{copper\_rotor} + P_{fe} + P_{τριβ} + P_{ανεμισμού}} 100 = 96.68 \%$$

### 5.1.2.2 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης D

Απώλειες χαλκού στάτη  $P_{copper\_stator} = 1902.4 \text{ W}$

Απώλειες χαλκού δρομέα  $P_{copper\_rotor} = 1958.1 \text{ W}$

Απώλειες σιδήρου στάτη και δρομέα  $P_{fe} = 56.26 \text{ W}$

Για τις απώλειες τριβών ισχύει:

$$m_{rotor} = S_{rotor} L \rho_{iron} = 0,0773527 \text{ m}^3 0.2228 \text{ m} 7874 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 135.7 \text{ kg}$$

$$m_{slots} = S_{slots} L \rho_{aluminum} = 0.0100786 \text{ m}^3 0.2228 \text{ m} 2720 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 6.108 \text{ kg}$$

$$P_{τριβ} = \frac{K(m_{rotor} + m_{slots})n_r}{1000} = 620.89 \text{ W}$$

Για τις απώλειες ανεμισμού προκύπτει:

$$P_{ανεμισμού} = \frac{L n_r^3 (2 R_{rototout})^3}{10^6} = 31.53 \text{ W}$$

Υπολογίζοντας την ισχύ εξόδου του κινητήρα μέσω της παραγόμενης ροπής προκύπτει:

$$P_{out} = 128.9 \text{ kW},$$

οπότε:

$$Efficiency(\%) = \frac{T \omega}{T \omega + P_{copper\_stator} + P_{copper\_rotor} + P_{fe} + P_{τριβ} + P_{ανεμισμού}} 100$$

$$= 96,57 \%$$

## 5.2 Ανάλυση ευαισθησίας γεωμετρικών παραμέτρων για βελτιστοποίηση γεωμετρίας αυλάκων στάτη και δρομέα.

Η ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων γίνεται με κύριο στόχο τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ροπής. Κατά την ανάλυση γίνεται καταγραφή παραμέτρων όπως η μαγνητική επαγωγή στα δόντια του στάτη και του δρομέα και η πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα, ώστε να διατηρούνται εντός των πλαισίων που έχουν τεθεί ήδη από την προκαταρκτική σχεδίαση του κινητήρα. Πιο συγκεκριμένα η πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα διατηρείται κάτω από τα  $6.5 \text{ A/mm}^2$ , η μέγιστη μαγνητική επαγωγή στο δόντι του στάτη κάτω από το  $1.8$

T, η μέγιστη μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη κάτω από 1.7 T, η μέγιστη μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα κάτω από 1.9 T και η μέγιστη μαγνητική επαγωγή στο σώμα του δρομέα κάτω από τα 1.5 T. Υπολογίζονται επίσης οι απώλειες χαλκού και σιδήρου στάτη και δρομέα για να γίνει εκτίμηση της επίδρασης στην απόδοση της μηχανής.

Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης ευαισθησίας στα τρισδιάστατα διαγράμματα το ανοιχτό μπλε χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τις τιμές των μεγεθών που βρίσκονται εντός των επιθυμητών ορίων που έχουν τεθεί.

### **5.2.1 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης B**

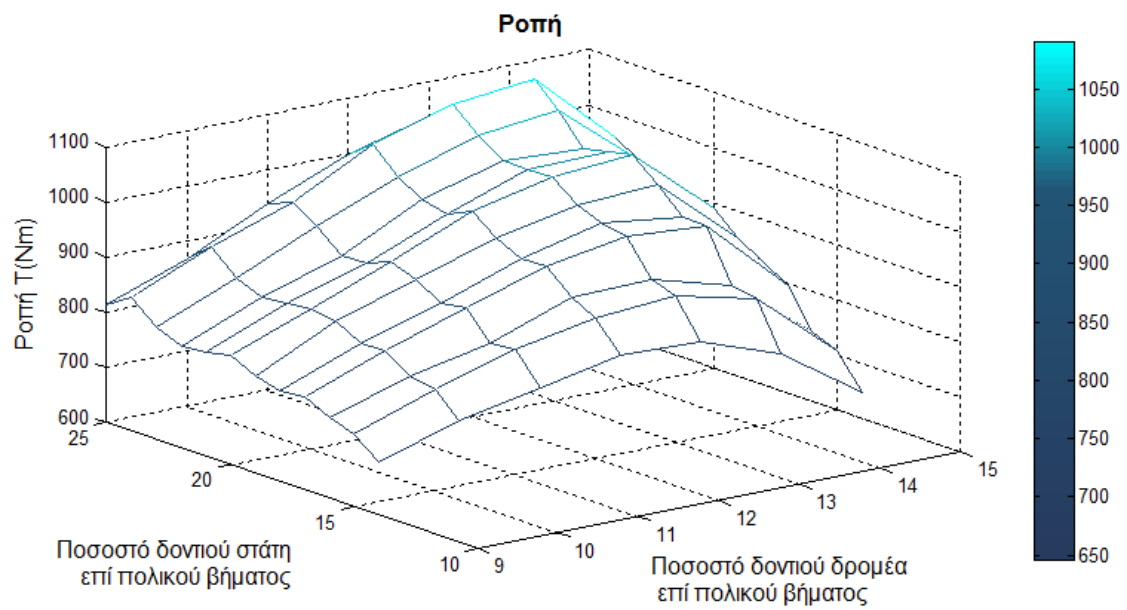
Η ολίσθηση μέγιστης ροπής όπως φαίνεται από το *Διάγραμμα 4.1* είναι 0.0088. Η ανάλυση ευαισθησίας γίνεται σε αυτή την ολίσθηση.

#### **5.2.1.1 Μεταβολή γεωμετρικών παραμέτρων κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης B**

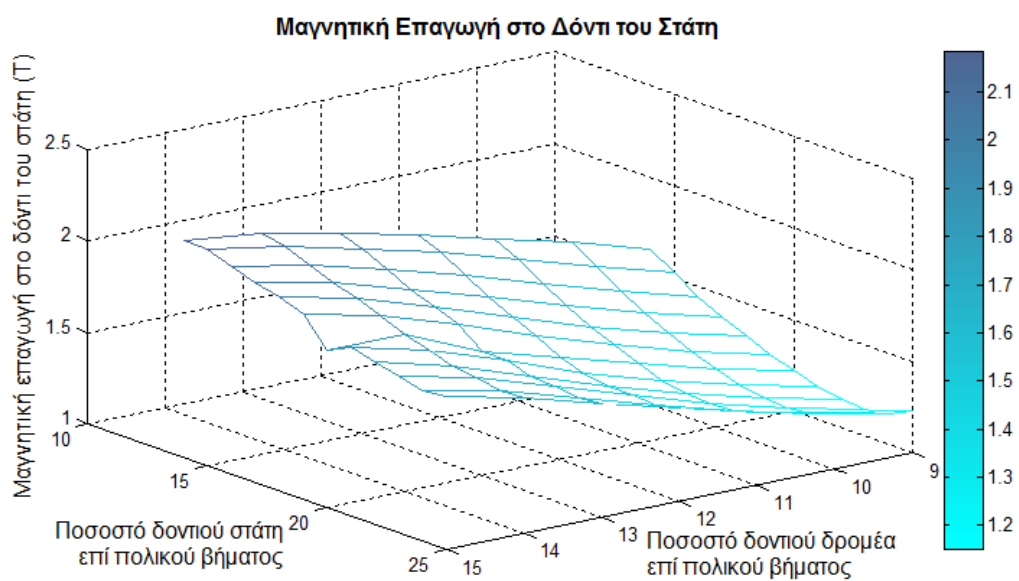
##### **Πλάτος δοντιού στάτη και δρομέα**

Αρχικά, μεταβάλλεται το πλάτος των δοντιών στάτη και δρομέα ως ποσοστό του πολικού βήματος  $\tau_p$ . Το πλάτος δοντιού στάτη μεταβάλλεται από 14% έως 25% ενώ το πλάτος δοντιού δρομέα από 9% έως 15% του πολικού βήματος.

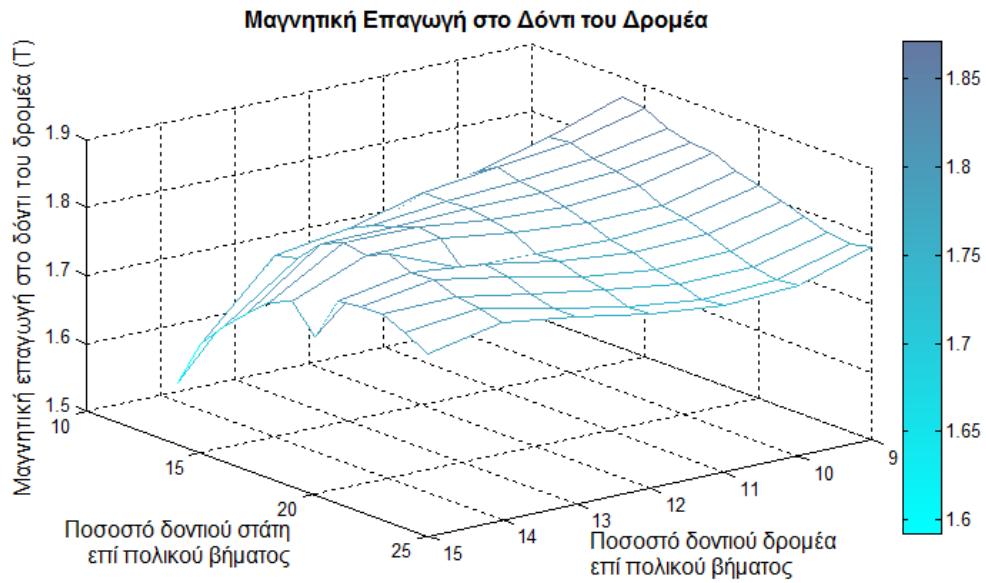
Οι προδιαγραφές που λαμβάνονται αρχικά υπόψιν για τον προσδιορισμό του βέλτιστου ποσοστού είναι η απαίτηση μέγιστης ροπής μεγαλύτερης από 1000Nm καθώς και οι περιορισμοί για την μαγνητική επαγωγή στα δόντια στάτη και δρομέα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



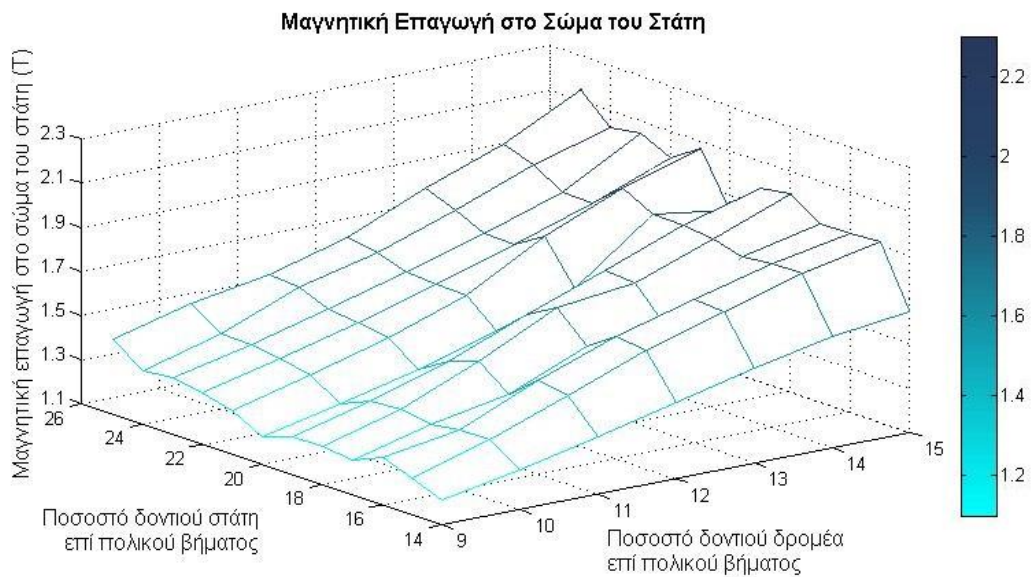
Διάγραμμα 5.3 Ροπή ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού σιάτη και δρομέα



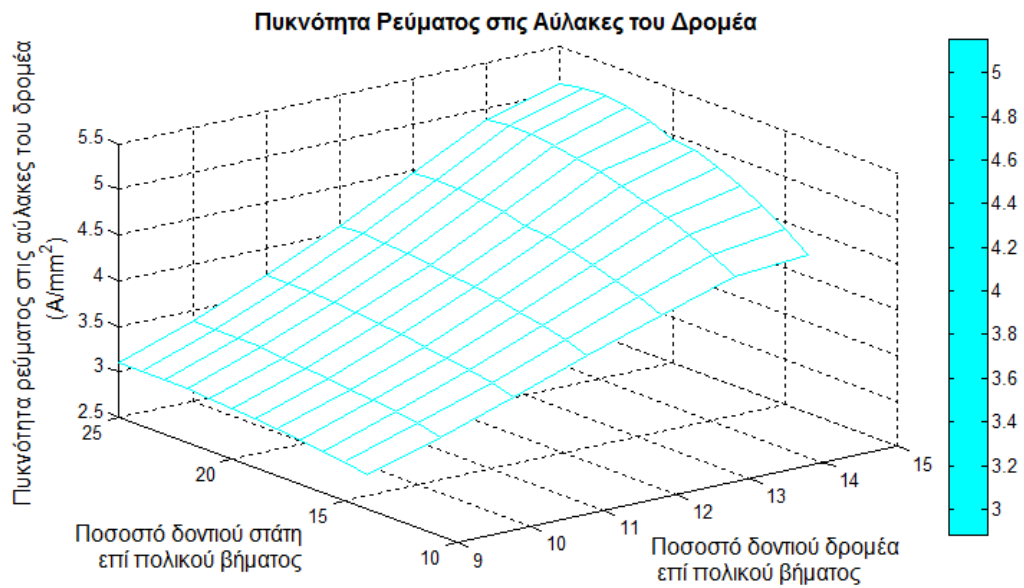
Διάγραμμα 5.4 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του σιάτη ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού σιάτη και δρομέα.



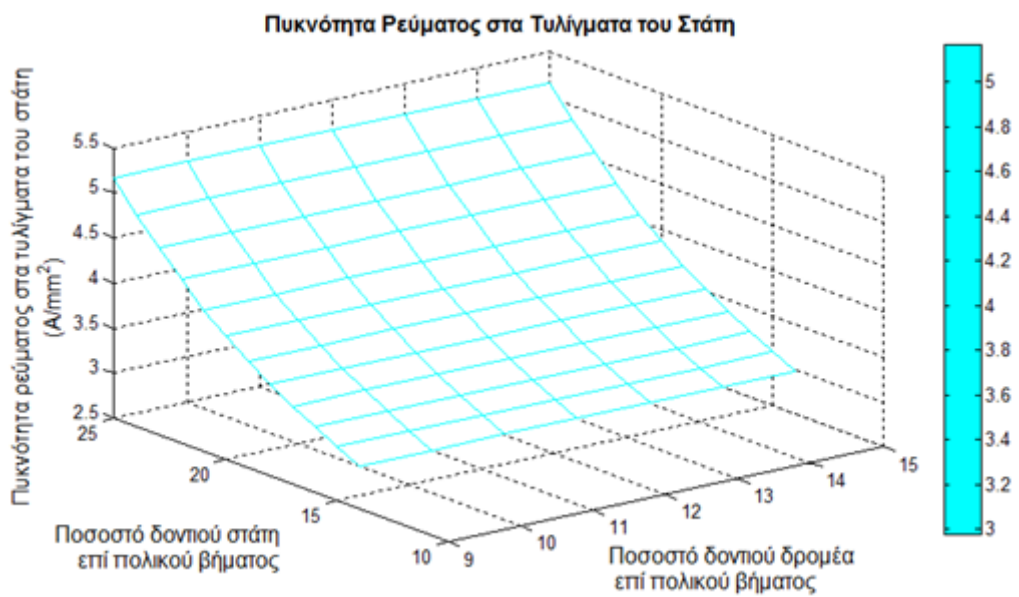
Διάγραμμα 5.5 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού στάτη και δρομέα



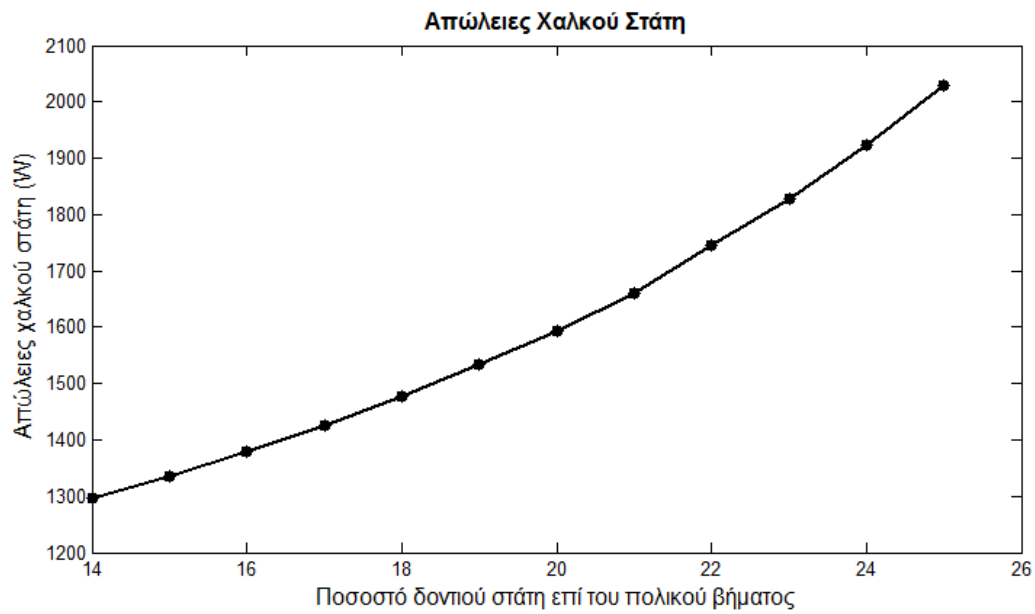
Διάγραμμα 5.6 Μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού στάτη και δρομέα.



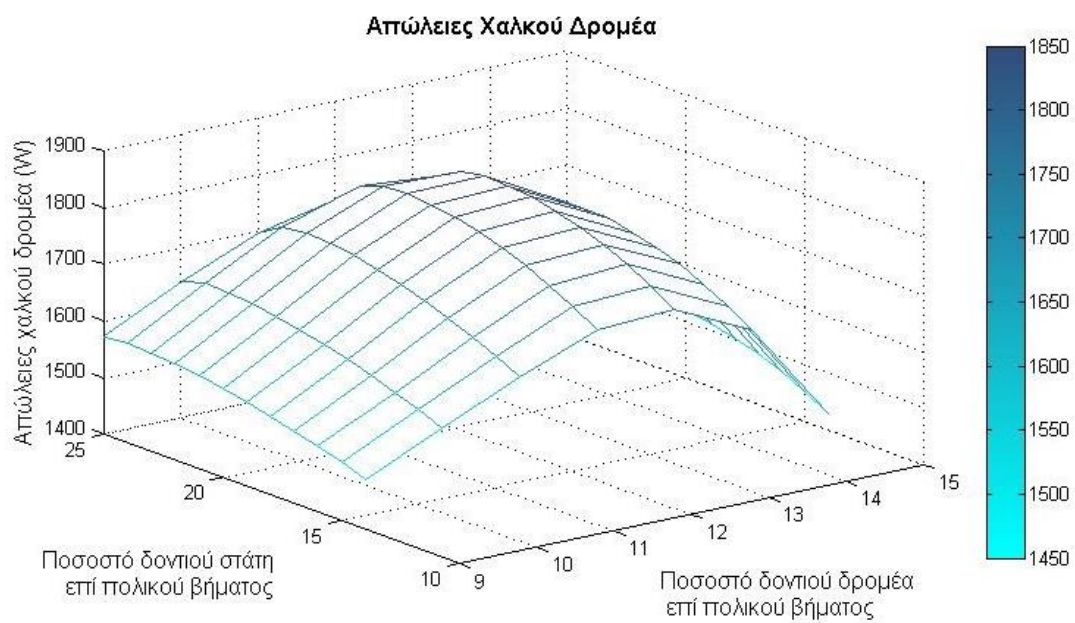
Διάγραμμα 5.7 Πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες του δρομέα ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού στάτη και δρομέα.



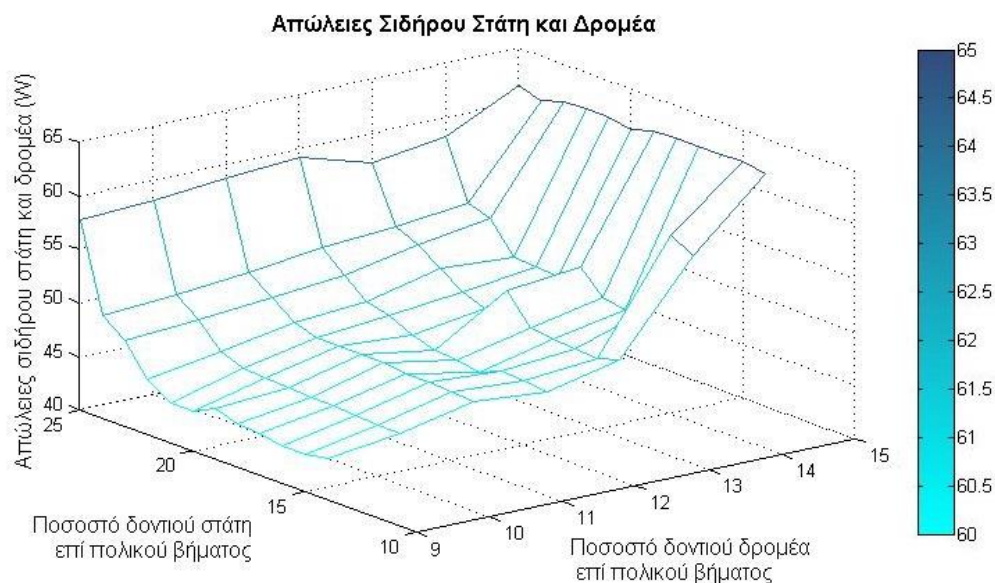
Διάγραμμα 5.8 Πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού στάτη και δρομέα.



Διάγραμμα 5.9 Απώλειες χαλκού στάτη ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού στάτη



Διάγραμμα 5.10 Απώλειες χαλκού δρομέα ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού στάτη και δρομέα



Διάγραμμα 5.11 Απώλειες σιδήρου στάτη και δρομέα ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού στάτη και δρομέα

Οι τιμές που διατηρούν τη μαγνητική επαγωγή στα δόντια του στάτη και του δρομέα σε χαμηλά επίπεδα και ταυτόχρονα οδηγούν σε ροπή μεγαλύτερη από 1000 Nm όπως φαίνεται από τα *διαγράμματα 5.3-5.5*, συνοψίζονται στον *πίνακα 5.1*:

Ποσοστό (%) Δοντιού Στάτη/Δοντιού Δρομέα	$B_{st}$ (T)	$B_{rt}$ (T)	Ροπή (Nm)
		13	
20	1.6742	1.7845	1005.5
22	1.637	1.7982	2003.6
23	1.6217	1.7843	1035
24	1.6093	1.7754	1074.5
25	1.6246	1.7762	1037.5
Ποσοστό (%) Δοντιού Στάτη/Δοντιού Δρομέα	$B_{st}$ (T)	$B_{rt}$ (T)	Ροπή (Nm)
		14	
24	1.7384	1.7982	1090.9
25	1.7398	1.7899	1042.6

Πίνακας 5.1 Περιοχή τιμών πλάτους δοντιού στάτη και δρομέα για αποφυγή αυξημένης μαγνητικής επαγωγής και πυκνότητας ρεύματος στον κινητήρα.

όπου  $B_{st}$  είναι η μαγνητική επαγωγή στο δόντι του στάτη και  $B_{rt}$  είναι η μαγνητική επαγωγή το δόντι του δρομέα.



Για όλες τις τιμές που φαίνονται στον πίνακα, η πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα στάτη και δρομέα διατηρείται πολύ κάτω από τα  $6.5 \text{ A/mm}^2$  όπως φαίνεται από τα *διαγράμματα 5.7- 5.8*. Για τις ίδιες τιμές, η μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη είναι αυξημένη. Ωστόσο δεν έχει γίνει διερεύνηση σε ως προς το ύψος δοντιού στάτη πράγμα που αναμένεται να μειώσει τη μαγνητική επαγωγή από το σώμα του στάτη.

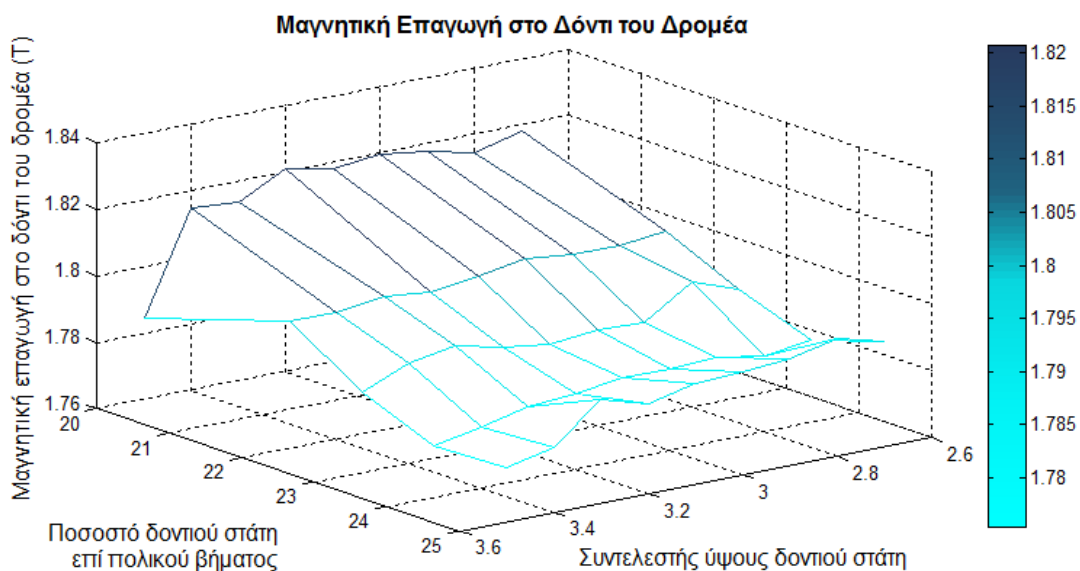
### Ύψος δοντιού στάτη

Στη συνέχεια για τις τιμές του πίνακα γίνεται ανάλυση ευαισθησίας ως προς το ύψος δοντιού του στάτη. Πιο συγκεκριμένα, όπως έχει αναφερθεί, το ύψος δοντιού του στάτη περιγράφεται παραμετρικά ως συνάρτηση άλλων χαρακτηριστικών του κινητήρα από τη *σχέση 4.11*:

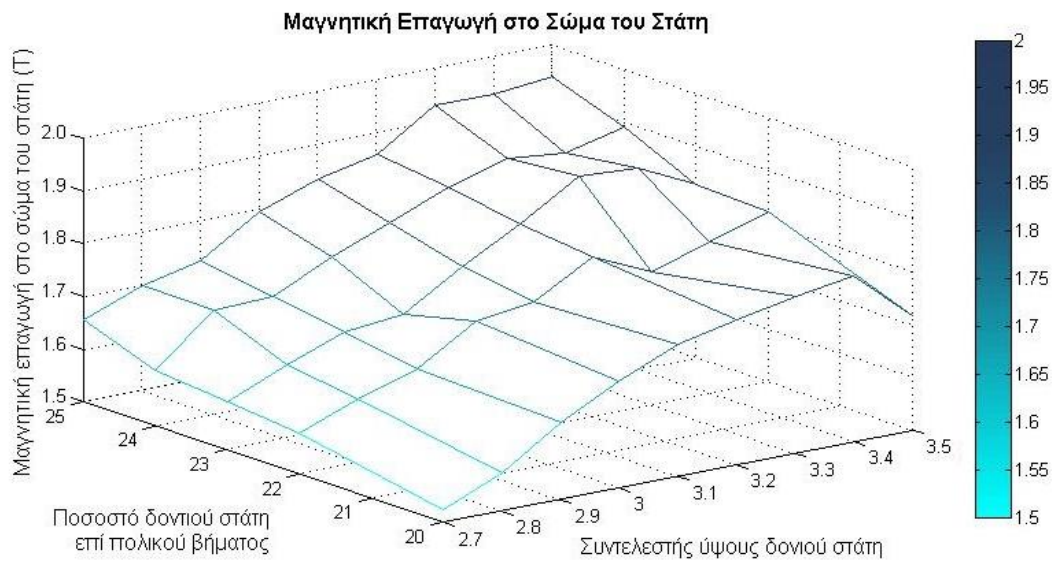
$$h_s = K \frac{\pi D}{Q} \left( 1 - \frac{B_g}{B_{ts}} \right)$$

Για την ανάλυση ευαισθησίας ως προς ύψους δοντιού του στάτη, μεταβάλλεται η τιμή του συντελεστή K από 2.7 έως 3.5 και καταγράφονται τα αποτελέσματα.

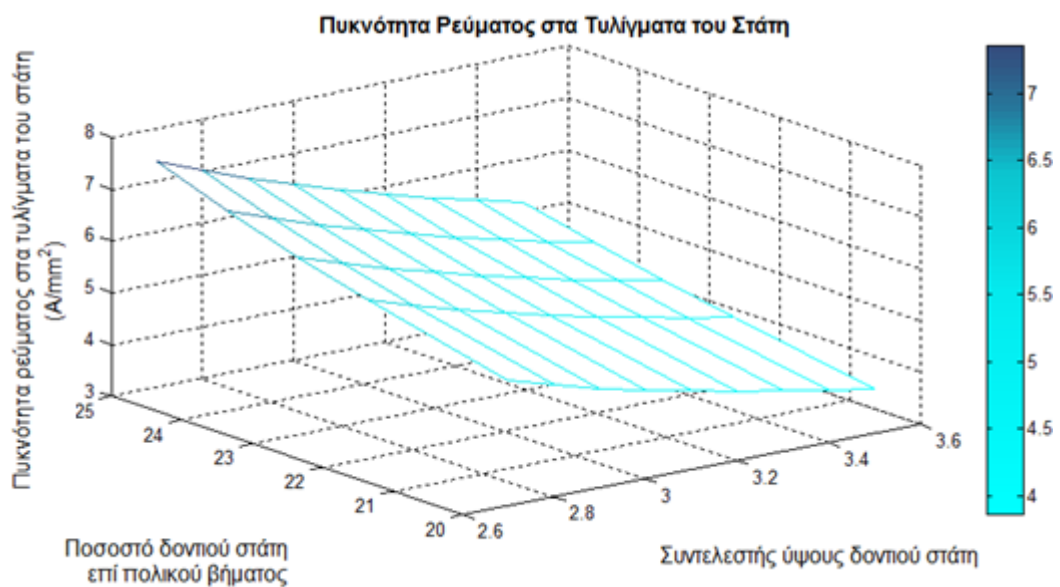
Οι προσομοιώσεις έγιναν αρχικά για τις τιμές που αντιστοιχούν σε πλάτος δοντιού δρομέα ίσο με το 13% του πολικού βήματος και άρα πλάτος δοντιού στάτη ίσο με 20% και 22-25% του πολικού βήματος. Τα αποτελέσματα για τις παραμέτρους που αποτέλεσαν βασικά κριτήρια για την επιλογή του συντελεστή φαίνονται στα *διαγράμματα 5.12-5.14*.



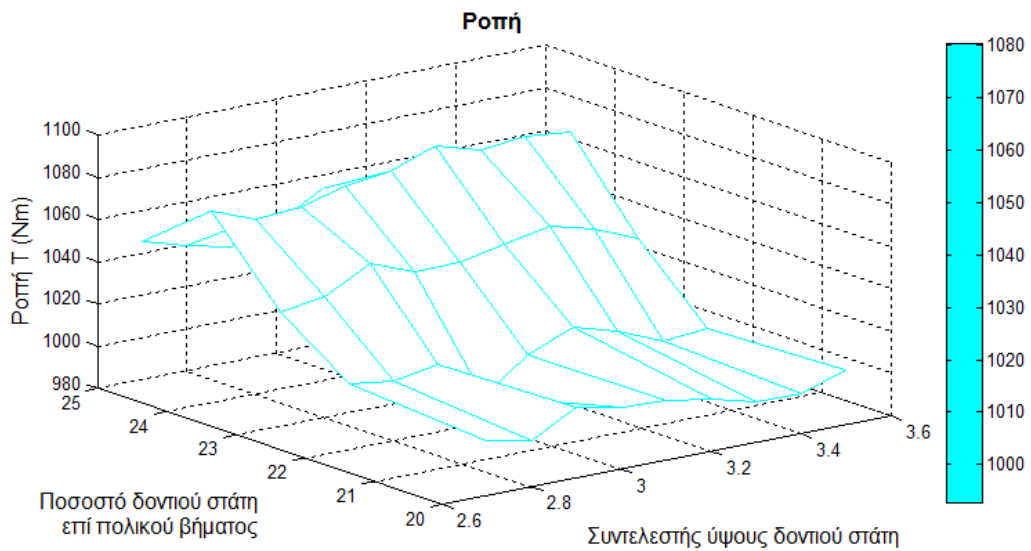
Διάγραμμα 5.12 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού στάτη και του συντελεστή ύψους δοντιού στάτη-ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα=13%



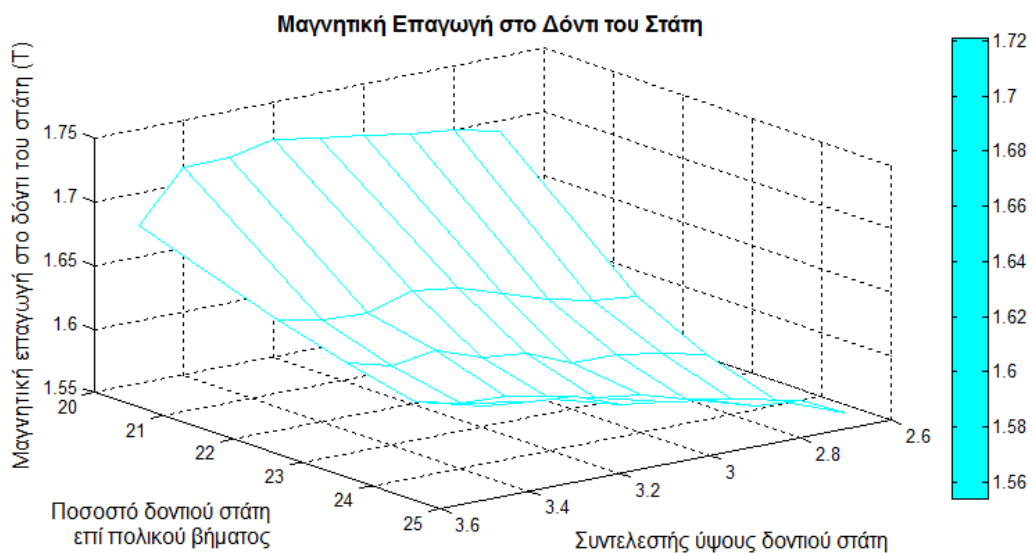
Διάγραμμα 5.13 Μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού στάτη και του συντελεστή ύψους δοντιού στάτη-ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα=13%



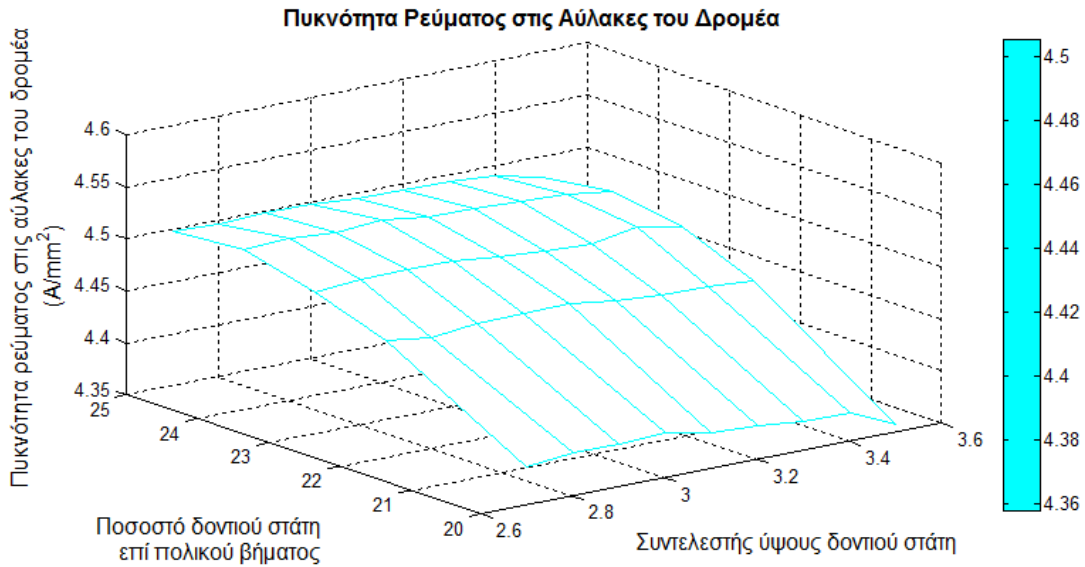
Διάγραμμα 5.14 Πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού στάτη και του συντελεστή ύψους δοντιού στάτη-ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα=13%



Διάγραμμα 5.15 Ροπή στο διάκενο ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού σάτη και του συντελεστή ύψους δοντιού σάτη-ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα=13%



Διάγραμμα 5.16 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του σάτη ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού σάτη και του συντελεστή ύψους δοντιού σάτη-ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα=13%



Διάγραμμα 5.17 Πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες του δρομέα ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού στάτη και του συντελεστή ύψους δοντιού στάτη-ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα=13%

Από τα διαγράμματα 5.12 – 5.14 προκύπτει ότι για να διατηρηθούν σε χαμηλά επίπεδα η μαγνητική επαγωγή στα δόντια του δρομέα και το σώμα του στάτη και η πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη, θα πρέπει να επιλεγθούν οι συνδυασμοί γεωμετρικών χαρακτηριστικών που συνοψίζονται στον Πίνακα 5.2:

Δόντι στάτη	$B_{rt}$ (T)	$B_{cs}$ (T)	$J_{st}$ (A/mm <sup>2</sup> )	Ροπή (Nm)
Συντελεστής ύψους/ Ποσοστό πλάτους	23			
2.7	1.7925	1.4927	6.4349	1033.8
2.8	1.7976	1.5396	6.1395	1037.3
2.9	1.7881	1.4792	5.8657	1048.6
3	1.789	1.592	5.6112	1040.5
3.1	1.7873	1.6517	5.3742	1040.8

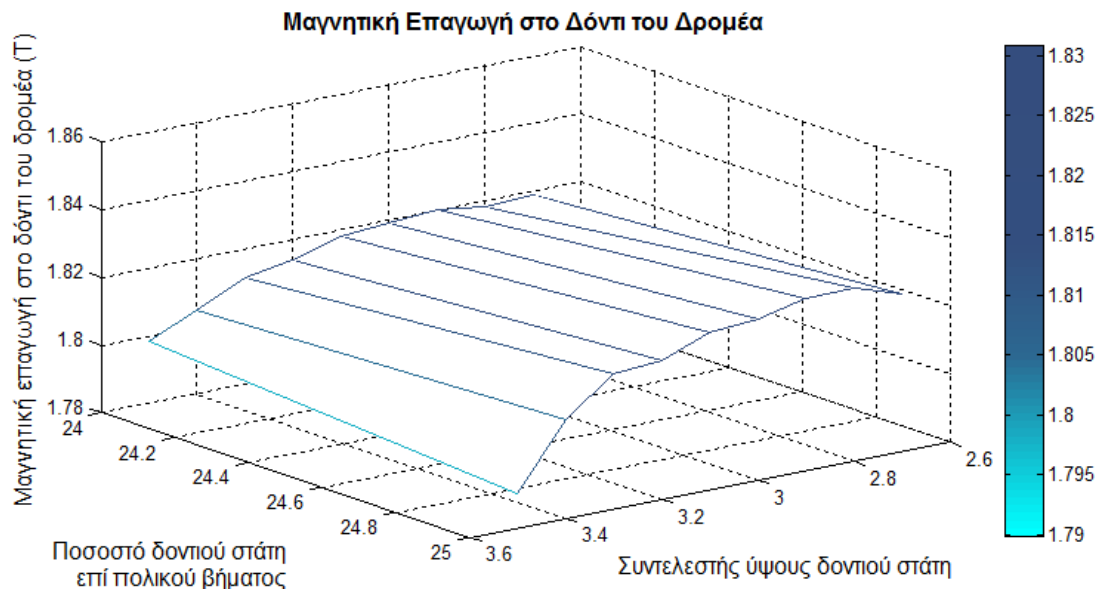
Πίνακας 5.2 Βέλτιστη περιοχή τιμών ροπής, μαγνητικής επαγωγής στο δόντι του δρομέα και το σώμα του στάτη και πυκνότητας ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη για ποσοστό δοντιού στάτη και συντελεστή ύψους δοντιού στάτη.

Από τα διαγράμματα 5.15 έως 5.17 φαίνεται ότι τόσο η μαγνητική επαγωγή στο δόντι του στάτη όσο και η πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες του δρομέα έχουν τιμές αρκετά χαμηλές όλο το εύρος τιμών που εξετάστηκαν.

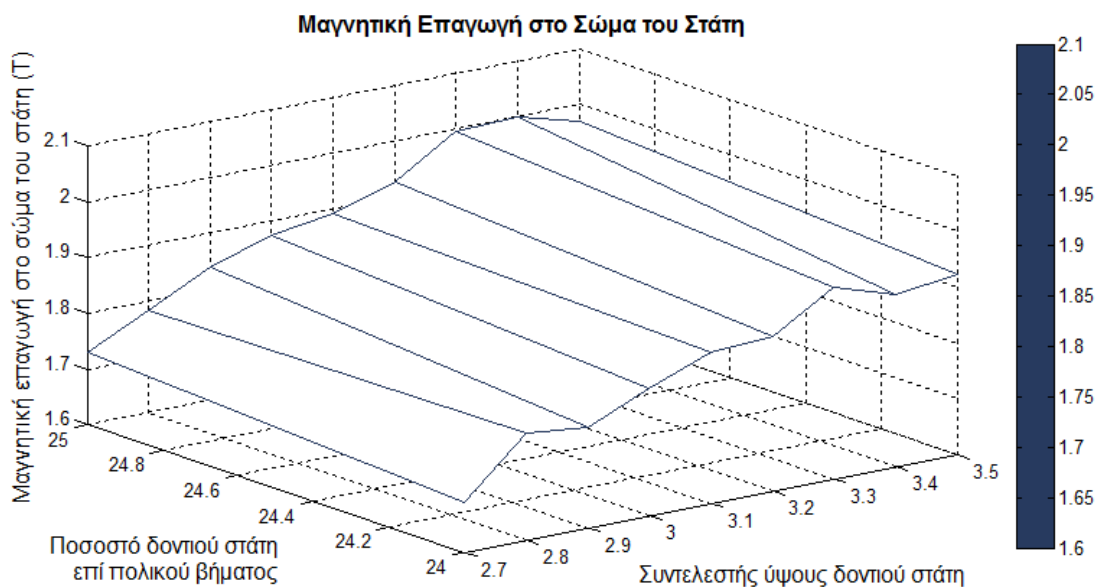
Στη συνέχεια έγιναν οι ίδιες δοκιμές για πλάτος δοντιού δρομέα ίσο με το 14% του πολικού βήματος και πλάτος δοντιού στάτη ίσο με 24% και 25% του πολικού βήματος. Ο συντελεστής ύψους δοντιού στάτη μεταβάλλεται και πάλι από 2.7 έως 3.5. Ωστόσο για όλες τις τιμές του συντελεστή η μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη διατηρείται αυξημένη και η μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα είναι οριακά

## Κεφάλαιο 5

μικρότερη από 1.8 T όπως φαίνεται στα διαγράμματα 5.18 και 5.19 οπότε δεν πραγματοποιείται περαιτέρω μελέτη.



Διάγραμμα 5.18 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού στάτη και του συντελεστή ύψους δοντιού στάτη-ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα=14%



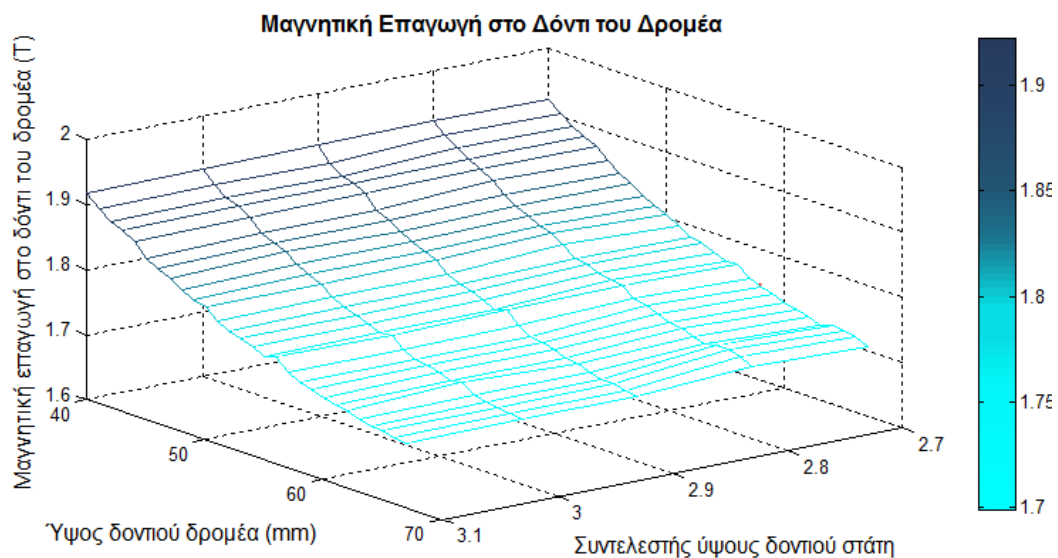
Διάγραμμα 5.19 Μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού στάτη και του συντελεστή ύψους δοντιού στάτη-ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα=14%

### Ύψος δοντιού δρομέα

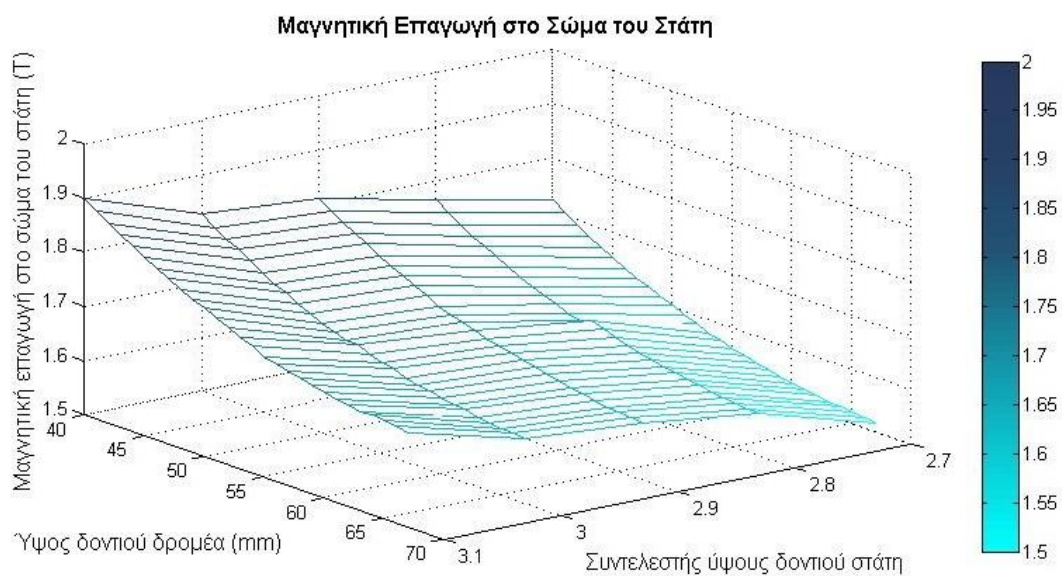
Το ύψος δοντιού δρομέα κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων είναι ίσο με 51 mm. Καθώς υπάρχουν περιθώρια αύξησης της πυκνότητας ρεύματος στις αύλακες του

## Κεφάλαιο 5

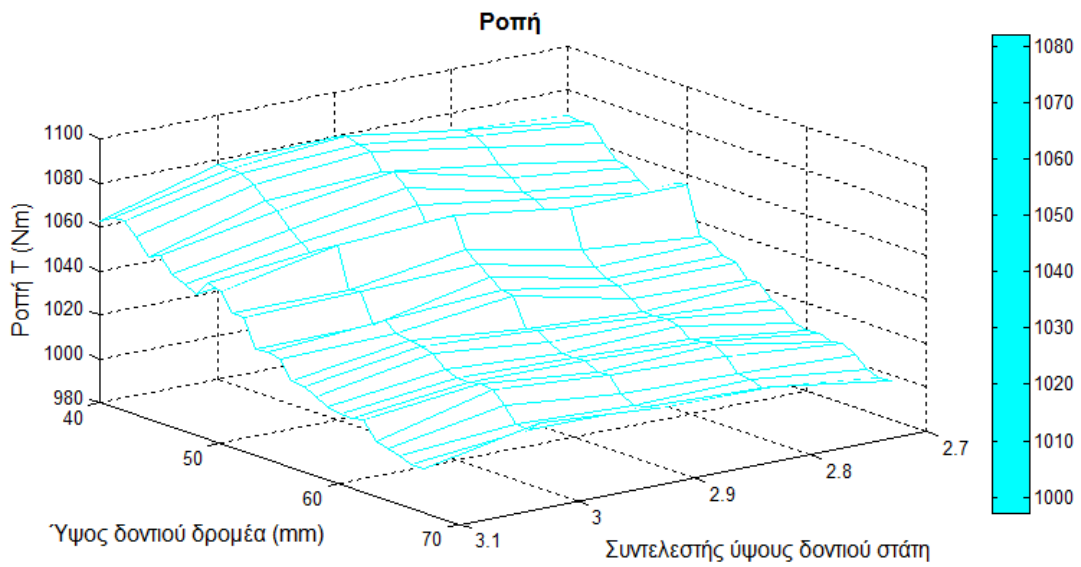
δρομέα, ελέγχονται οι επιπτώσεις μεταβολής του ύψους δοντιού του δρομέα στη φόρτιση του κινητήρα. Για τις τιμές του πίνακα 5.2, μεταβάλλεται το ύψος δοντιού του δρομέα από 40 έως 67 mm και καταγράφονται τα αποτελέσματα.



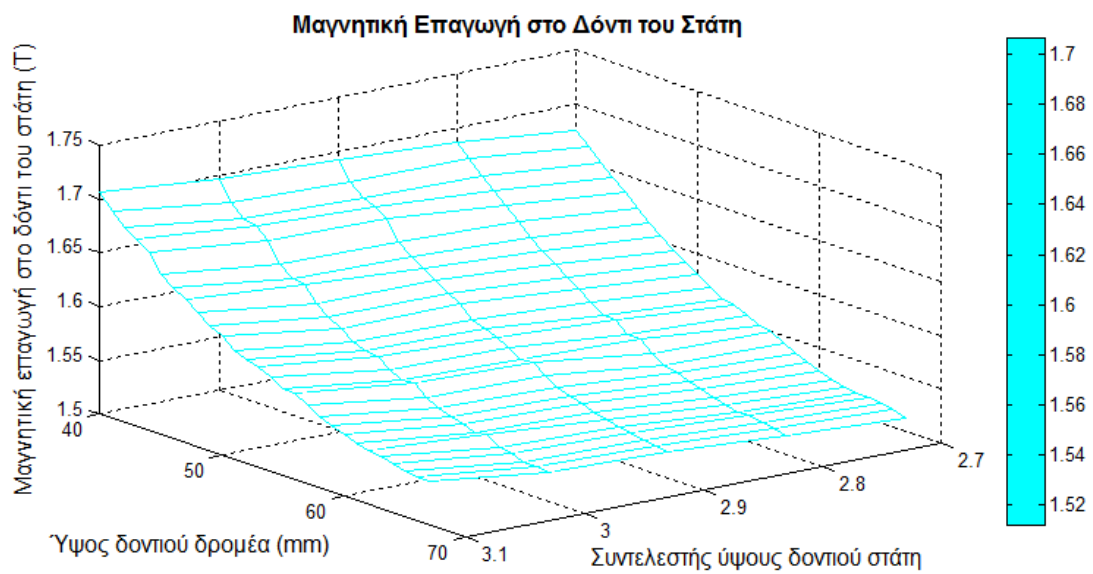
Διάγραμμα 5.20 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα ως συνάρτηση του ύψους δοντιού δρομέα και του συντελεστή ύψους δοντιού στάτη



Διάγραμμα 5.21 Μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη ως συνάρτηση του ύψους δοντιού δρομέα και του συντελεστή ύψους δοντιού στάτη

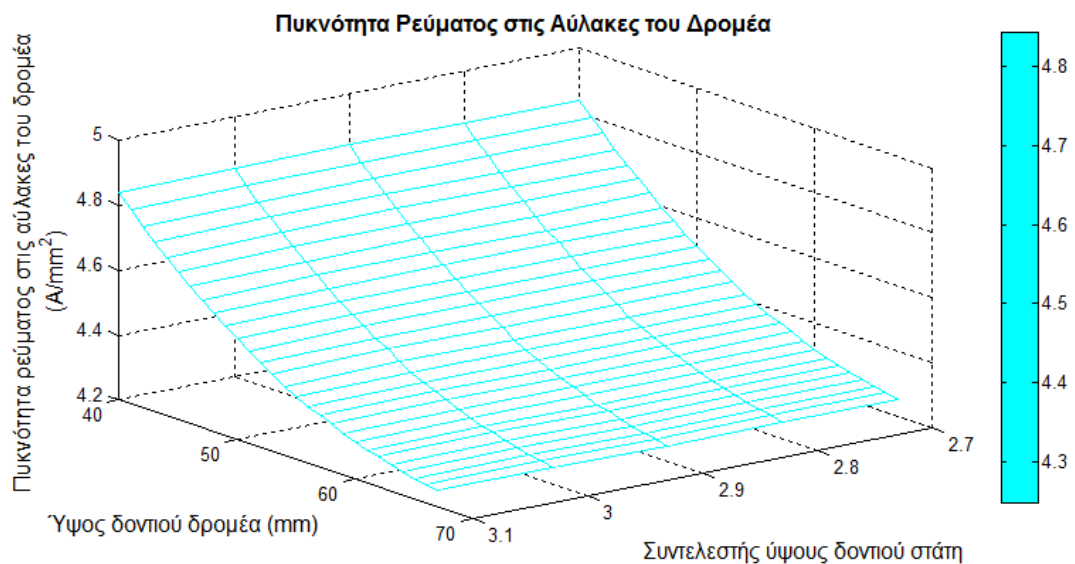


Διάγραμμα 5.22 Ροπή στο διάκενο ως συνάρτηση του ύψους δοντιού δρομέα και του συντελεστή ύψους δοντιού στάτη

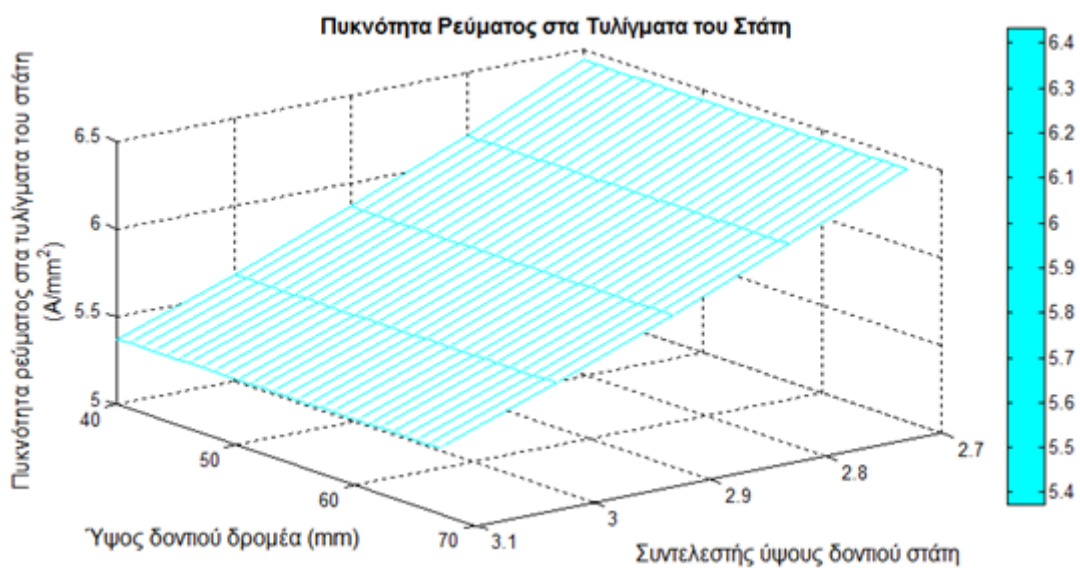


Διάγραμμα 5.23 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του στάτη ως συνάρτηση του ύψους δοντιού δρομέα και του συντελεστή ύψους δοντιού στάτη





Διάγραμμα 5.24 Πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες του δρομέα ως συνάρτηση του ύψους δοντιού δρομέα και του συντελεστή ύψους δοντιού στάτη



Διάγραμμα 5.25 Πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη ως συνάρτηση του συντελεστή ύψους αύλακας στάτη και του ύψους δοντιού δρομέα

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα 5.25 η μεταβολή του ύψους δοντιού του δρομέα δεν επηρεάζει την πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες του στάτη.

Από τα διαγράμματα 5.20-5.21 φαίνεται ότι η διατήρηση της μαγνητικής επαγωγής στο σώμα του στάτη κάτω από τα 1.7 T καθώς και η ταυτόχρονη διατήρηση της μαγνητικής επαγωγής στο δόντι του δρομέα κάτω από τα 1.9 T είναι δυνατή για μήκος δοντιού δρομέα από 51 έως 64mm και συντελεστή ύψους αύλακας στάτη από 2.7 έως 3.



## Κεφάλαιο 5

---

Μετά από δοκιμές, οι τελικές διαστάσεις που επιλέχθηκαν είναι:

Πλάτος δοντιού στάτη= 23%  $t_r = 32$  mm

Πλάτος δοντιού δρομέα= 13%  $t_r = 18.1$  mm

Συντελεστής ύψους δοντιού στάτη  $K=2,7 \Rightarrow$  Ύψος δοντιού στάτη = 45.24 mm

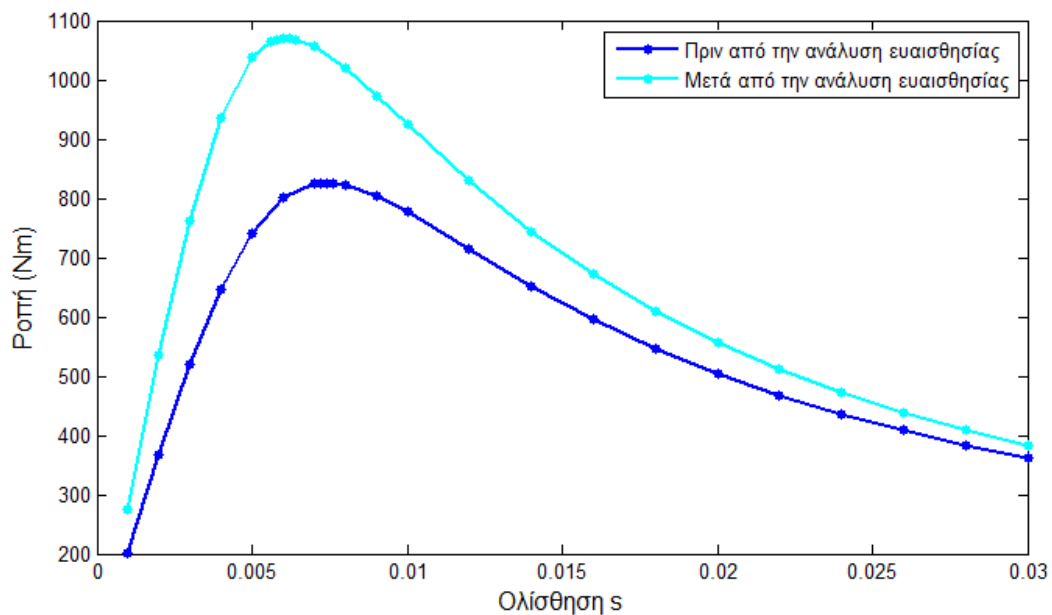
Μήκος δοντιού δρομέα = 51mm

Η επιλογή αυτών των διαστάσεων έγινε με σκοπό τη μεγιστοποίηση της ροπής διατηρώντας ωστόσο όσο γίνεται χαμηλά τη μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη και του δρομέα. Βασικός γνώμονας ήταν επίσης η επίτευξη της κατά το δυνατόν υψηλότερης ολίσθησης μέγιστης ροπής. Οι διαστάσεις αυτές και τα χαρακτηριστικά του κινητήρα που προκύπτουν συνοψίζονται στον *πίνακα 5.3*.

Γεωμετρικές Παράμετροι και Επίδοση	Αρχική Σχεδίαση	Τελική Σχεδίαση
Ονομαστική Ροπή ( $T_n$ )	530 Nm	763 Nm
Μέγιστη Ροπή ( $T_{max}$ )	826 Nm	1070 Nm
Ονομαστική Ολίσθηση ( $s_n$ )	0.0037	0.003
Ονομαστική Ταχύτητα ( $n$ )	1494.45 rpm	1495.5 rpm
Πλάτος δοντιού στάτη	18.7 mm	32.0 mm
Ύψος δοντιού στάτη	59.4 mm	45.8 mm
Πλάτος δοντιού δρομέα	17.1 mm	18.1 mm
Ύψος δοντιού δρομέα	51.1 mm	51.2 mm
Εξωτερική διάμετρος στάτη	299 mm	281 mm

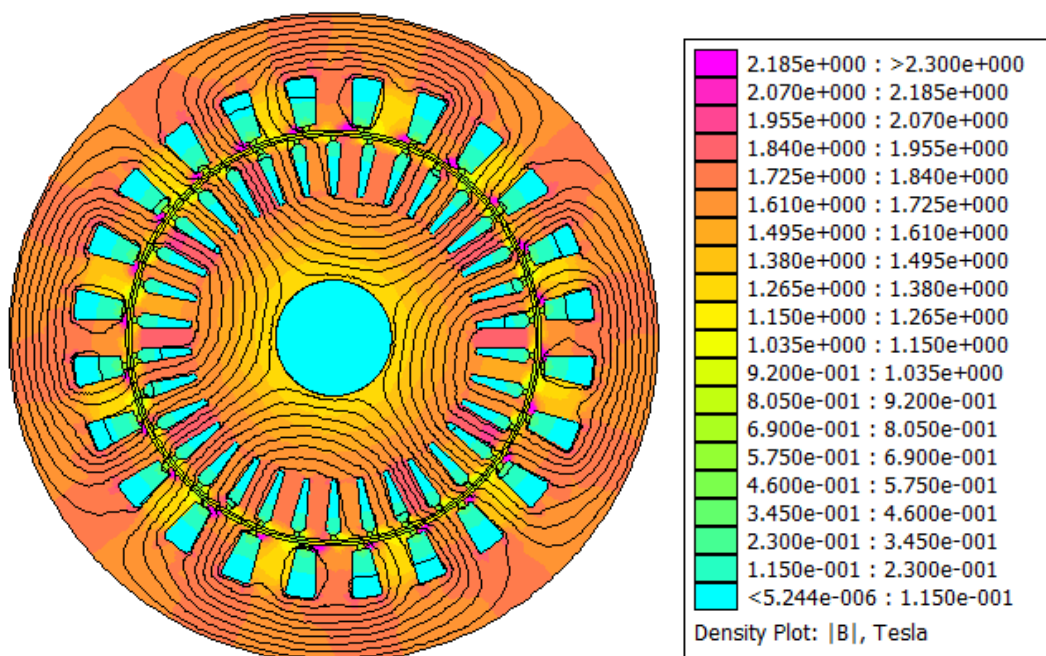
*Πίνακας 5.3 Χαρακτηριστικά του κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης B πριν και μετά από την ανάλυση ευαισθησίας.*

Θέτοντας τις τελικές διαστάσεις, λαμβάνουμε την καμπύλη ροπής- ολίσθησης του *διαγράμματος 5.26*.

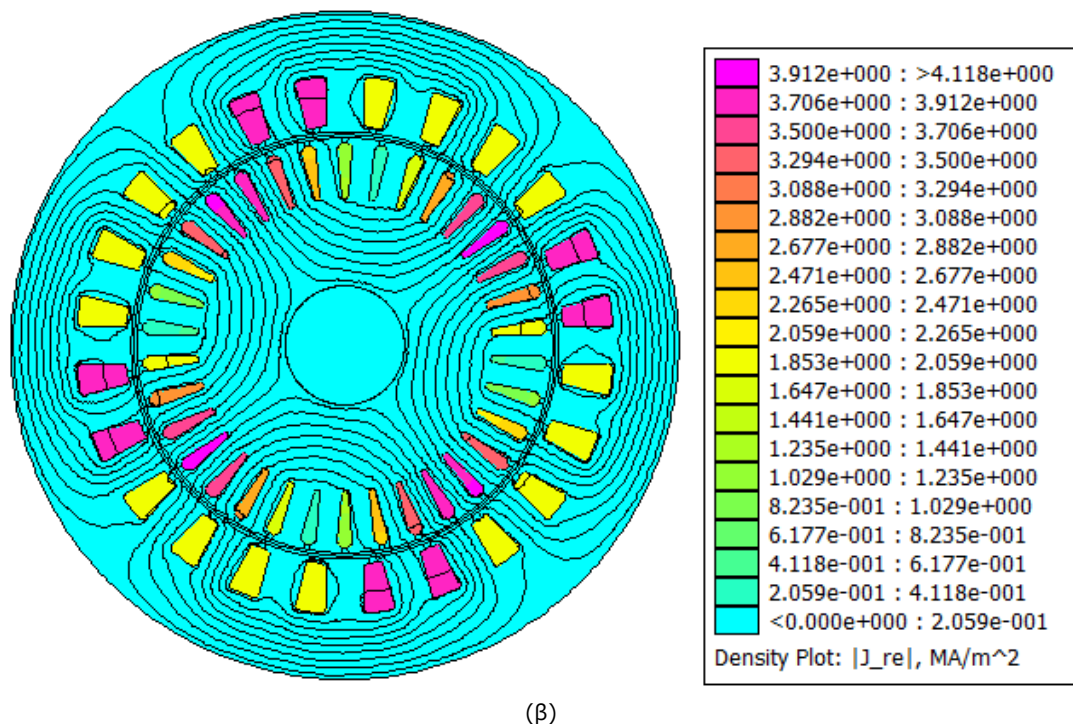


Διάγραμμα 5.26 Καμπύλη ροπής-ολίσθησης κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης B πριν και μετά από την ανάλυση ευαισθησίας

Η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής και της πυκνότητας ρεύματος στον κινητήρα στην ολίσθηση μέγιστης ροπής μετά από την ανάλυση ευαισθησίας, παρουσιάζεται στο σχήμα 5.6:



(α)

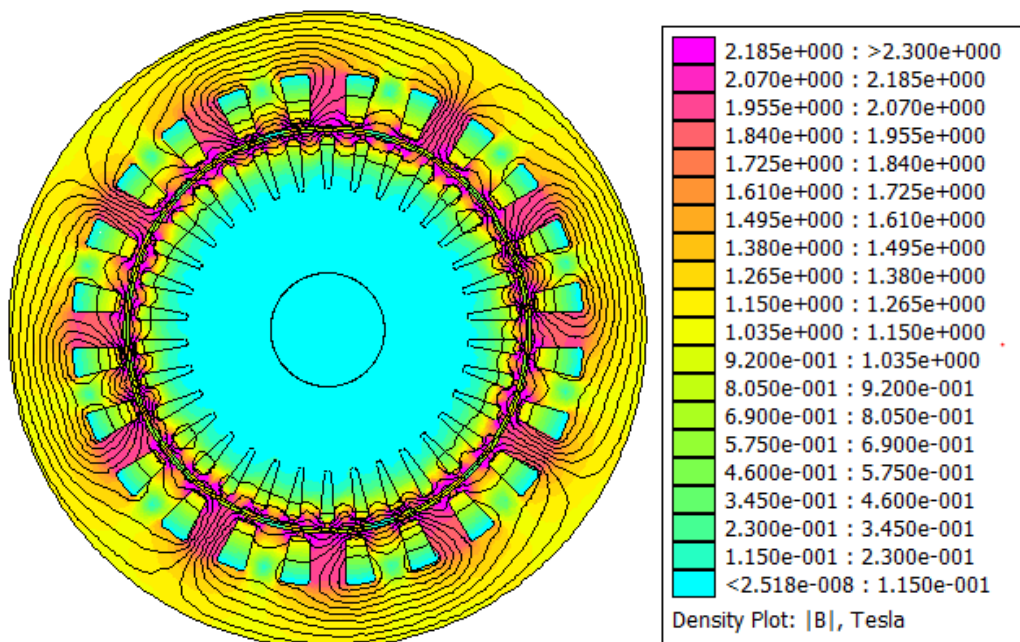


(β)

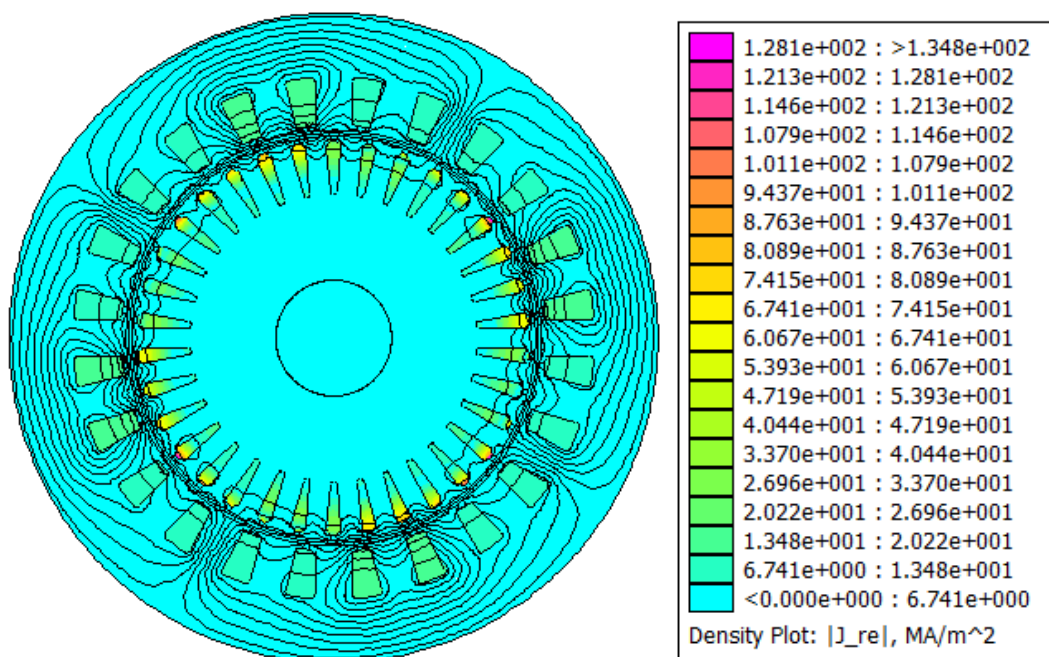
Σχήμα 5.6 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης B στην ολίσθηση μέγιστης ροπής: (α) Μαγνητική επαγωγή και (β) πυκνότητα ρεύματος.

Με την ανάλυση ευαισθησίας επιτεύχθηκε ομαλότερη κατανομή της μαγνητικής επαγωγής όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6. Επιπλέον η μέγιστη ροπή του κινητήρα αυξήθηκε κατά 22.8% και η ονομαστική ροπή αυξήθηκε κατά 30%. Ωστόσο η ονομαστική ολίσθηση του κινητήρα τώρα είναι 0.003 δηλαδή η μισή της επιθυμητής.

Για να ελεγχθεί η ροπή εκκίνησης του κινητήρα καθώς και η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής και της πυκνότητας ρεύματος κατά την εκκίνησης, τίθεται η ολίσθηση ίση με 1 και το ρεύμα ίσο με το ρεύμα εκκίνησης δηλαδή πέντε φορές το ονομαστικό ρεύμα (πίνακας 4.1). Ο κινητήρας αναλύεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Η ροπή εκκίνησης του κινητήρα προέκυψε ίση με 653.39 Nm και δεν επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες ροπής εκκίνησης που τέθηκαν από τις προδιαγραφές.



(α)



(β)

Σχήμα 5.7 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης B κατά την εκκίνηση: (α) Μαγνητική επαγωγή και (β) πυκνότητα ρεύματος.

### 5.2.1.2 Απώλειες τελικής γεωμετρίας κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης B

Στην ολίσθηση μέγιστης ροπής υπολογίζονται οι απώλειες του κινητήρα όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.4 και προκύπτει:

Απώλειες χαλκού στάτη

$$P_{copperstator} = 2495.2 \text{ W}$$

## Κεφάλαιο 5

Απώλειες χαλκού δρομέα

$$P_{copper_{rotor}} = 1893 \text{ W}$$

Απώλειες σιδήρου στάτη και δρομέα

$$P_{fe} = 50.21 \text{ W}$$

Για τις απώλειες τριβών ισχύει:

$$m_{rotor} = S_{rotor} L \rho_{iron} = 0,073593 \text{ m}^3 \cdot 0.2228 \text{ m} \cdot 7874 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 129.11 \text{ kg}$$

$$m_{slots} = S_{slots} L \rho_{aluminum} = 0.0135119 \text{ m}^3 \cdot 0.2228 \text{ m} \cdot 2720 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 8.19 \text{ kg}$$

$$P_{τριβ} = \frac{K(m_{rotor} + m_{slots})n_r}{1000} = 615.19 \text{ W}$$

Για τις απώλειες ανεμισμού προκύπτει:

$$P_{ανεμισμού} = \frac{L n_r^3 (2 R_{rotor_{out}})^3}{10^6} = 31.69 \text{ W}$$

Υπολογίζοντας την ισχύ εξόδου του κινητήρα μέσω της παραγόμενης ροπής:

$$P_{out} = 167.57 \text{ kW}$$

οπότε μπορεί να γίνει μια πρώτη εκτίμηση της απόδοσης του κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης B:

$$Efficiency(\%) = \frac{T \omega}{T \omega + P_{copper_{stator}} + P_{copper_{rotor}} + P_{fe} + P_{τριβ} + P_{ανεμισμού}} \cdot 100 = 97 \%$$

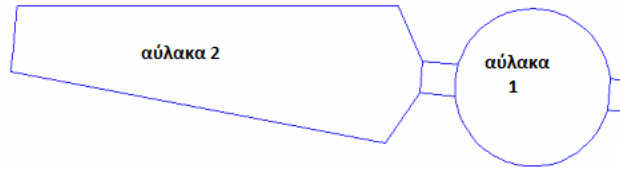
Οι απώλειες και η απόδοση του κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης B πριν και μετά από την ανάλυση ευαισθησίας συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

	Αρχική Σχεδίαση	Τελική Σχεδίαση
<b>Μέγιστη ισχύς εξόδου (<math>P_{out}</math>)</b>	129.27 kW	167.57 kW
<b>Απώλειες χαλκού στάτη</b>	1961,9 W	2495.2 W
<b>Απώλειες χαλκού δρομέα</b>	1772,5 W	1893 W
<b>Απώλειες σιδήρου</b>	52.11 W	50.21 W
<b>Απόδοση</b>	96.7%	97%

Πίνακας 5.4 Απώλειες και απόδοση κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης B πριν και μετά από την ανάλυση ευαισθησίας

### 5.2.2 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης C

Η ολίσθηση μέγιστης ροπής όπως φαίνεται από το *Διάγραμμα 5.2* είναι 0.0088. Η ανάλυση ευαισθησίας γίνεται σε αυτή την ολίσθηση. Στη γεωμετρία αυτή, ο δρομέας αποτελείται από δύο αύλακες. Στα επόμενα η στρογγυλή αύλακα θα αναφέρεται ως αύλακα 1 και η τραπεζοειδής αύλακα ως αύλακα 2 όπως φαίνεται στο σχήμα.



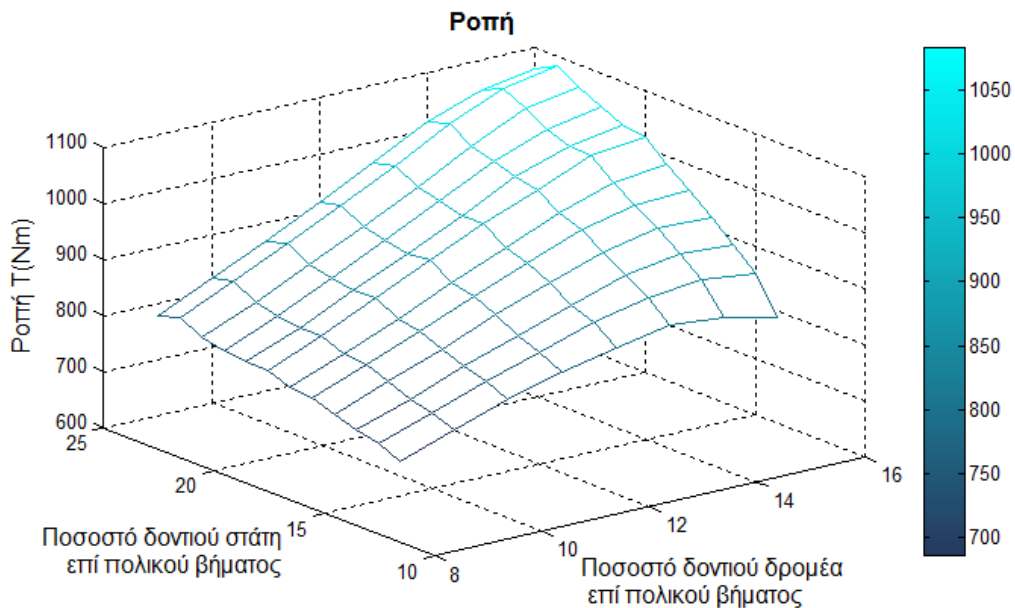
Σχήμα 5.8 Αύλακες δρομέα κατασκευαστικής κλάσης C

### 5.2.2.1 Μεταβολή γεωμετρικών παραμέτρων κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης C

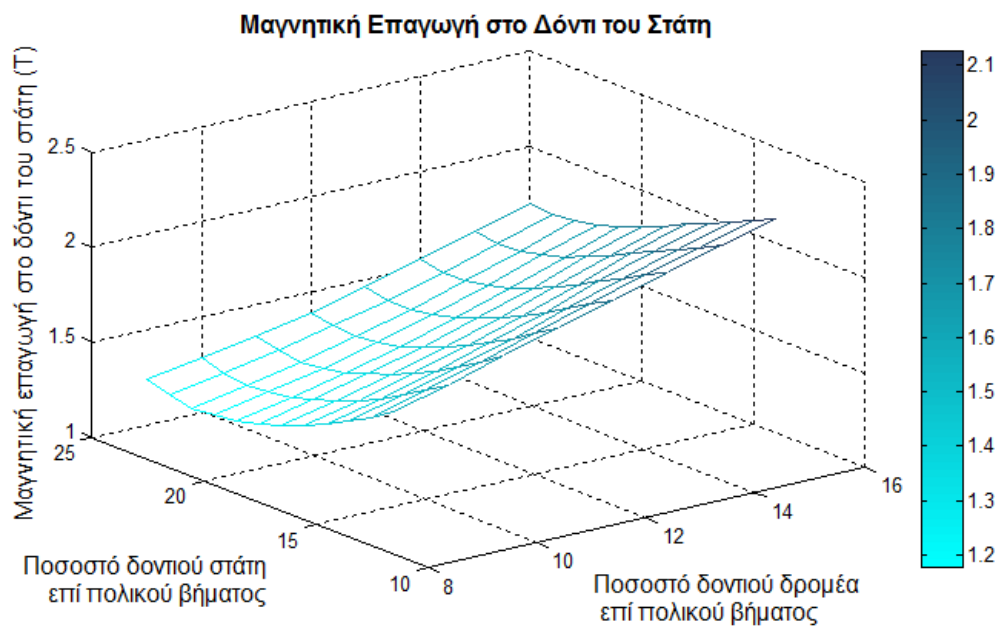
#### Πλάτος δοντιού στάτη και δρομέα

Αρχικά μεταβάλλεται το πλάτος των δοντιών στάτη καθώς και το πλάτος του παραλληλόγραμμου κομματιού των δοντιών του δρομέα ως ποσοστό του πολικού βήματος  $\tau_p$ . Το πλάτος δοντιού στάτη μεταβάλλεται από 14% έως 25% ενώ το πλάτος δοντιού δρομέα από 9% έως 16% του πολικού βήματος.

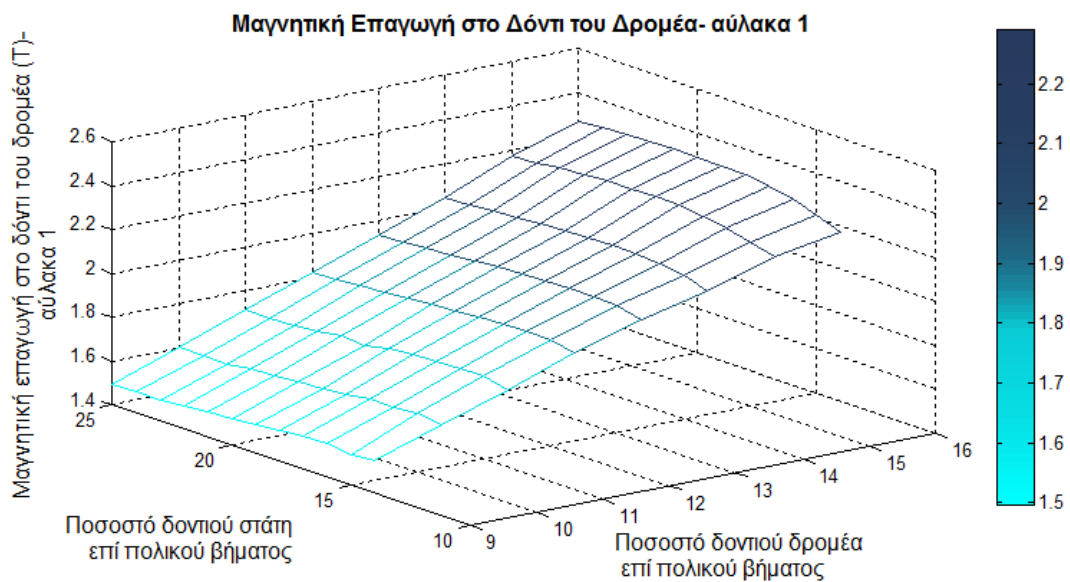
Οι προδιαγραφές που λαμβάνονται αρχικά υπόψιν είναι η απαίτηση μέγιστης ροπής μεγαλύτερης από 1000 Nm καθώς και οι περιορισμοί για τη διατήρηση της μαγνητικής επαγωγής στα δόντια του στάτη και του δρομέα σε χαμηλά επίπεδα. Σε αυτή τη γεωμετρία, επειδή δρομέας έχει δύο αύλακες η μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα μετράται σε δύο σημεία, το ένα αντιστοιχεί στην αύλακα 1 του δρομέα και το άλλο στην αύλακα 2. Το ίδιο συμβαίνει και για την μέτρηση της πυκνότητας ρεύματος στις αύλακες του δρομέα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα *διαγράμματα 5.27-5.37*.



Διάγραμμα 5.27 Ροπή ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και δρομέα επί του πολικού βήματος

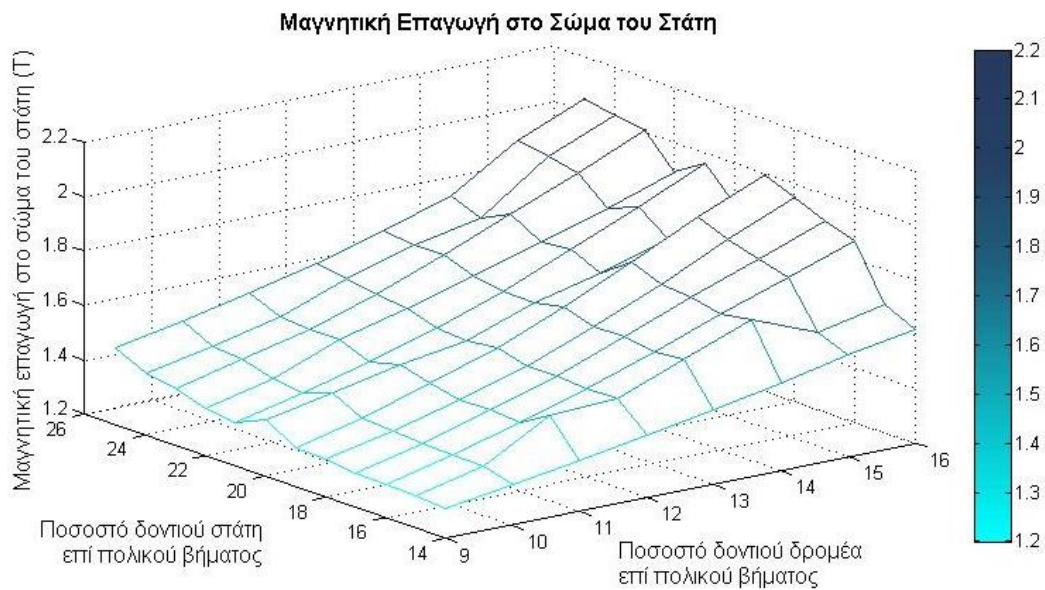


Διάγραμμα 5.28 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του στάτη ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και δρομέα επί του πολικού βήματος

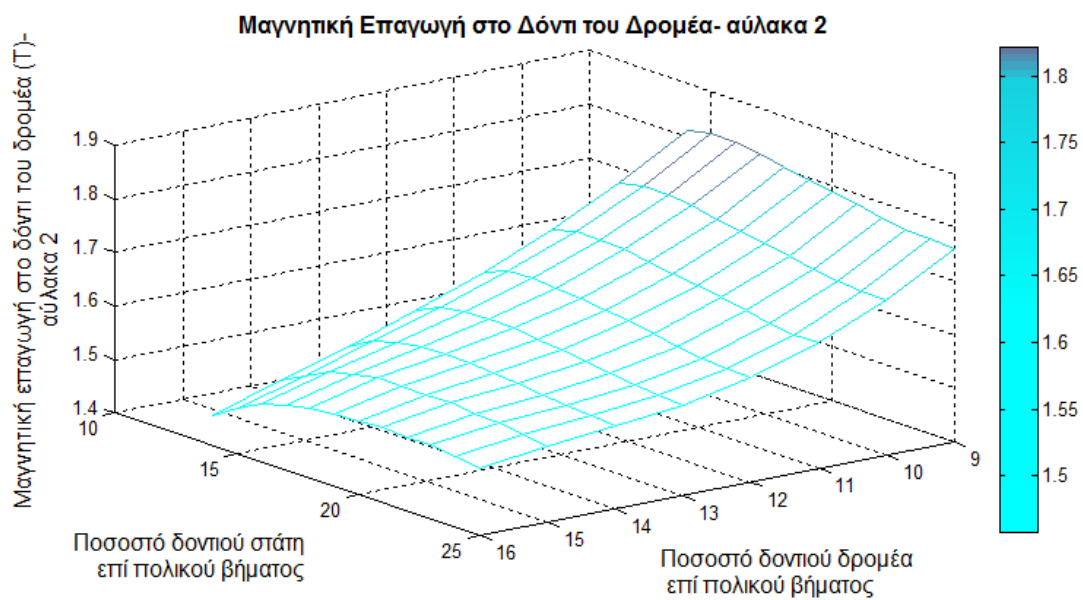


Διάγραμμα 5.29 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα στην περιοχή της αύλακας 1 ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και δρομέα επί του πολικού βήματος



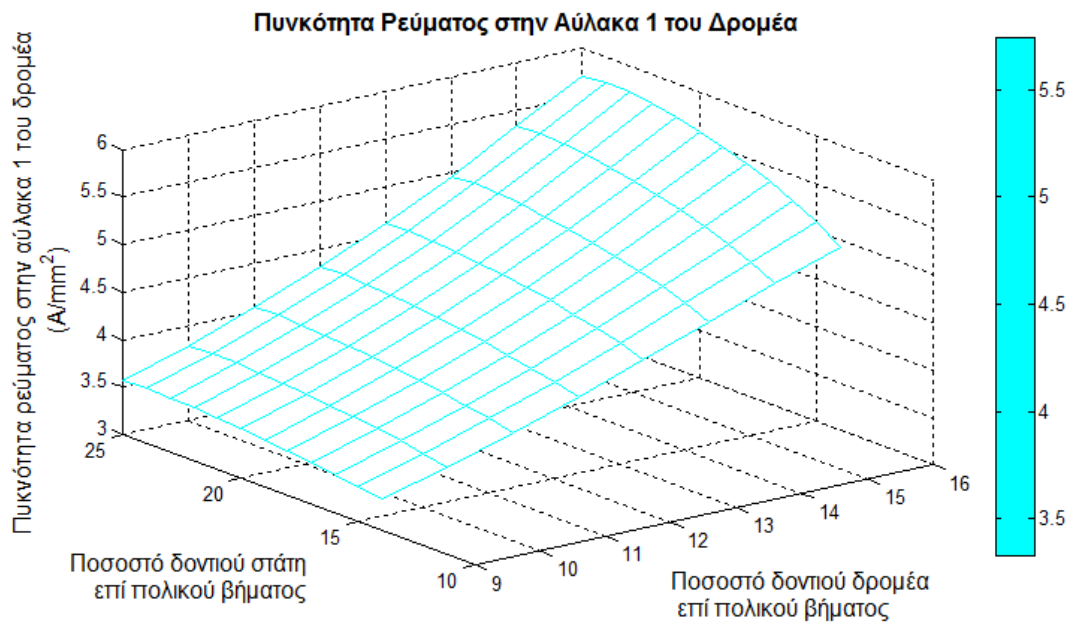


Διάγραμμα 5.30 Μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και δρομέα επί του πολικού βήματος

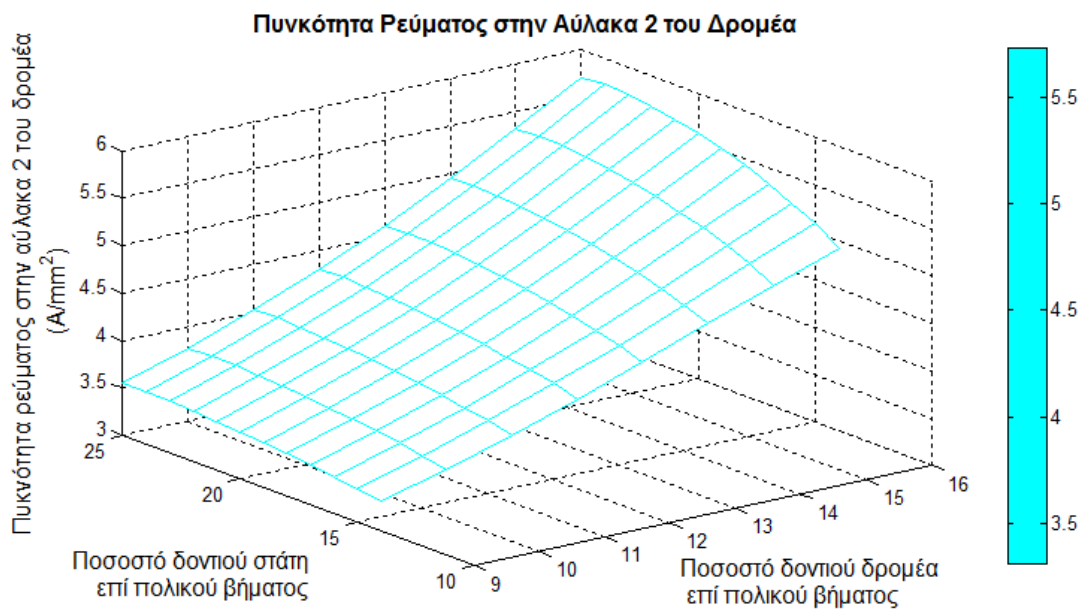


Διάγραμμα 5.31 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα στην περιοχή της αύλακας 2 ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και δρομέα επί του πολικού βήματος

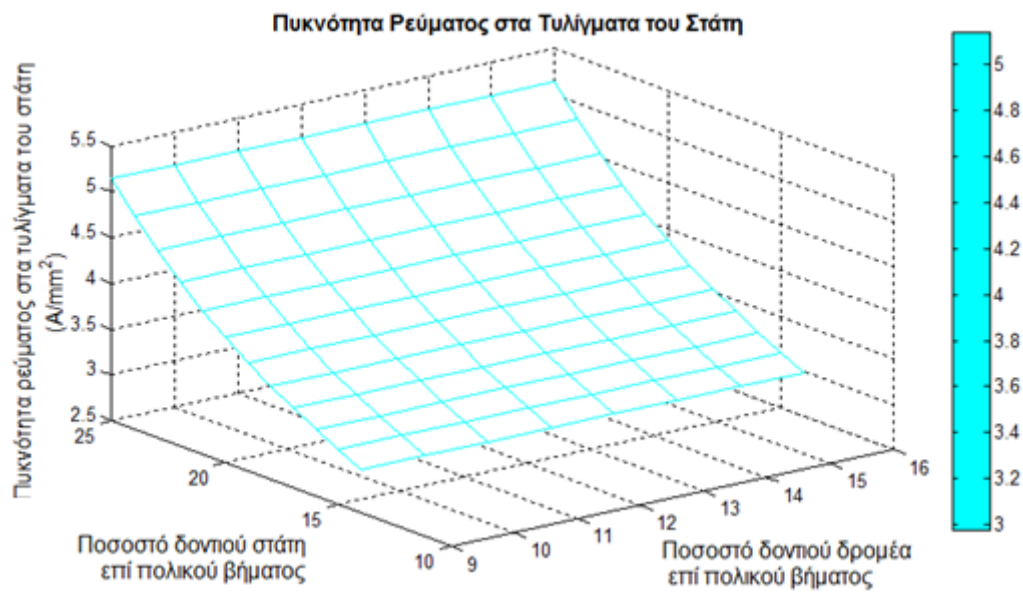




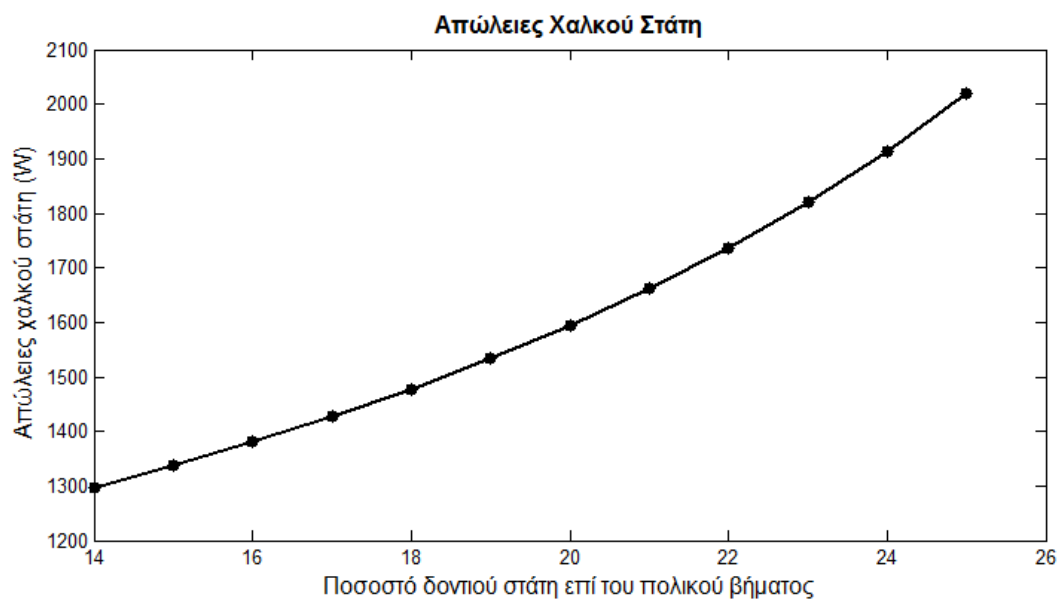
Διάγραμμα 5.32 Πυκνότητα ρεύματος στην αύλακα 1 του δρομέα ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάση και δρομέα επί του πολικού βήματος



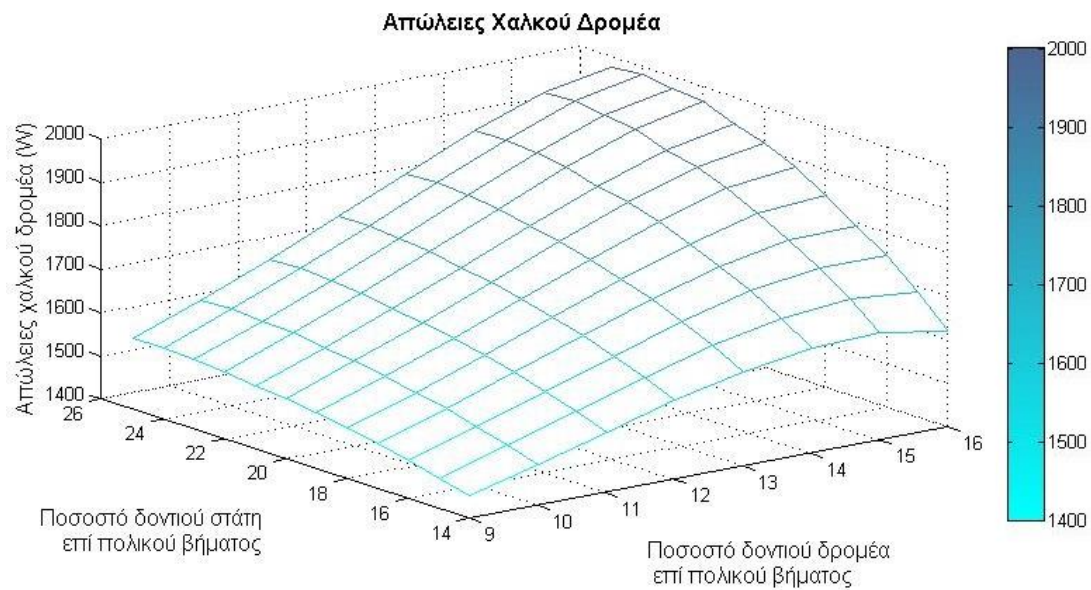
Διάγραμμα 5.33 Πυκνότητα ρεύματος στην αύλακα 2 του δρομέα ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάση και δρομέα επί του πολικού βήματος



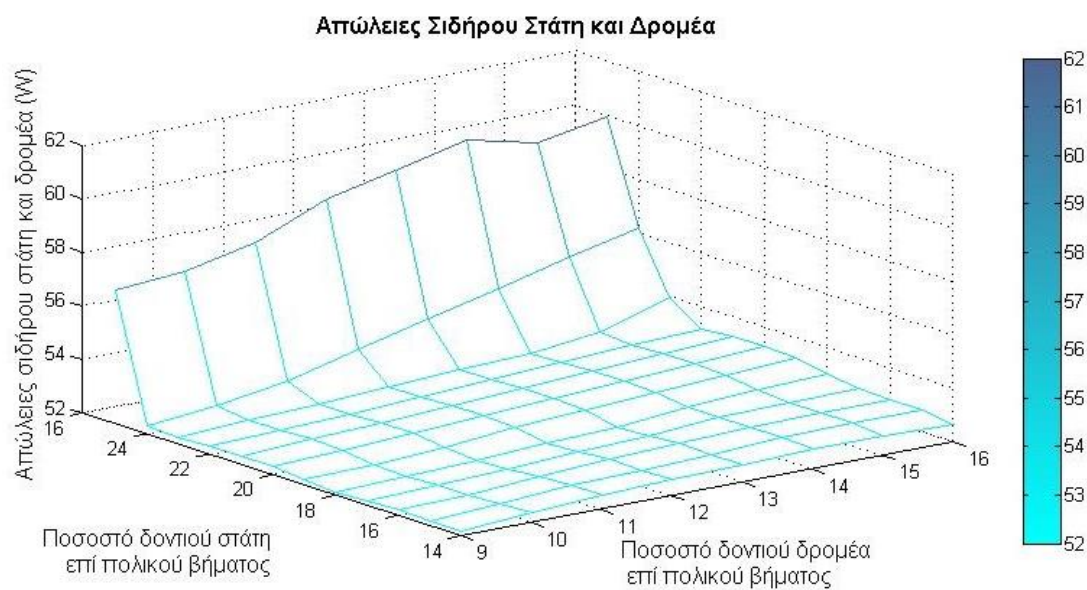
Διάγραμμα 5.34 Πικνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και δρομέα επί του πολικού βήματος



Διάγραμμα 5.35 Απώλειες χαλκού στάτη ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη επί του πολικού βήματος



Διάγραμμα 5.36 Απώλειες χαλκού δρομέα ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και δρομέα επί του πολικού βήματος



Διάγραμμα 5.37 Απώλειες σιδήρου στάτη και δρομέα ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και δρομέα επί του πολικού βήματος

Οι τιμές πλάτους δοντιού στάτη και δρομέα για τις οποίες επιτυγχάνεται ροπή μεγαλύτερη από 1000 Nm και ταυτόχρονα η μαγνητική επαγωγή στα δόντια του στάτη διατηρείται μικρότερη από 1.8 T, όπως φαίνεται στα *διαγράμματα 5.27-5.28*, συνοψίζονται στο *πίνακα 5.5*.

## Κεφάλαιο 5

Ποσοστό (%) Δοντιού Στάτη/ Δοντιού Δρομέα	$B_{st}$ (T)	Ροπή (Nm)
	14	
23	1.5198	1001.2
24	1.5166	1024.2
25	1.5382	1011.8
Ποσοστό (%) Δοντιού Στάτη/ Δοντιού Δρομέα	$B_{st}$ (T)	Ροπή (Nm)
	15	
20	1.7182	1006.6
21	1.671	1008.7
22	1.6359	1024.3
23	1.6114	1045.6
24	1.6008	1065.1
25	1.6185	1048.2
Ποσοστό (%) Δοντιού Στάτη/ Δοντιού Δρομέα	$B_{st}$ (T)	Ροπή (Nm)
	16	
21	1.7655	1024.4
22	1.7294	1043.0
23	1.7039	1062.7
24	1.6875	1083.7
25	1.6986	1063.3

Πίνακας 5.5 Βέλτιστη περιοχή τιμών ροπής και μαγνητικής επαγωγής στο δόντι του στάτη για ποσοστό δοντιού στάτη και δρομέα

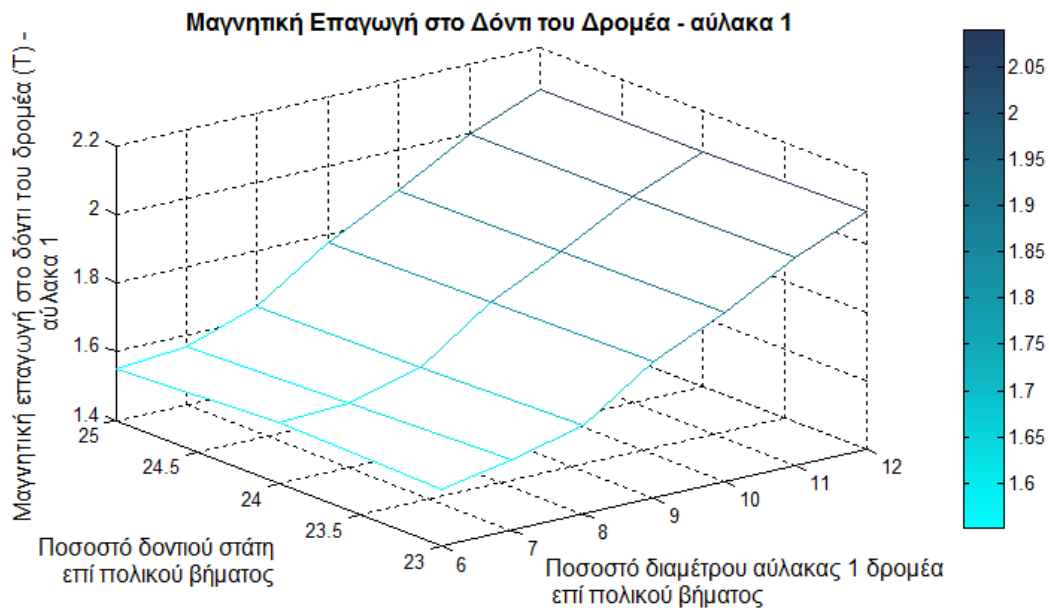
όπου  $B_{st}$  είναι η μαγνητική επαγωγή στο δόντι του στάτη.

Για τις τιμές του πίνακα 5.5 ικανοποιούνται οι απαιτήσεις ροπής και η μαγνητική επαγωγή στο δόντι του στάτη διατηρείται σε επιθυμητά επίπεδα. Ταυτόχρονα, σε όλη τη διάρκεια των δοκιμών η πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη και στις αύλακες του δρομέα καθώς και η μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα διατηρούνται σε αρκετά χαμηλά επίπεδα όπως φαίνεται στα διαγράμματα 5.31-5.34.

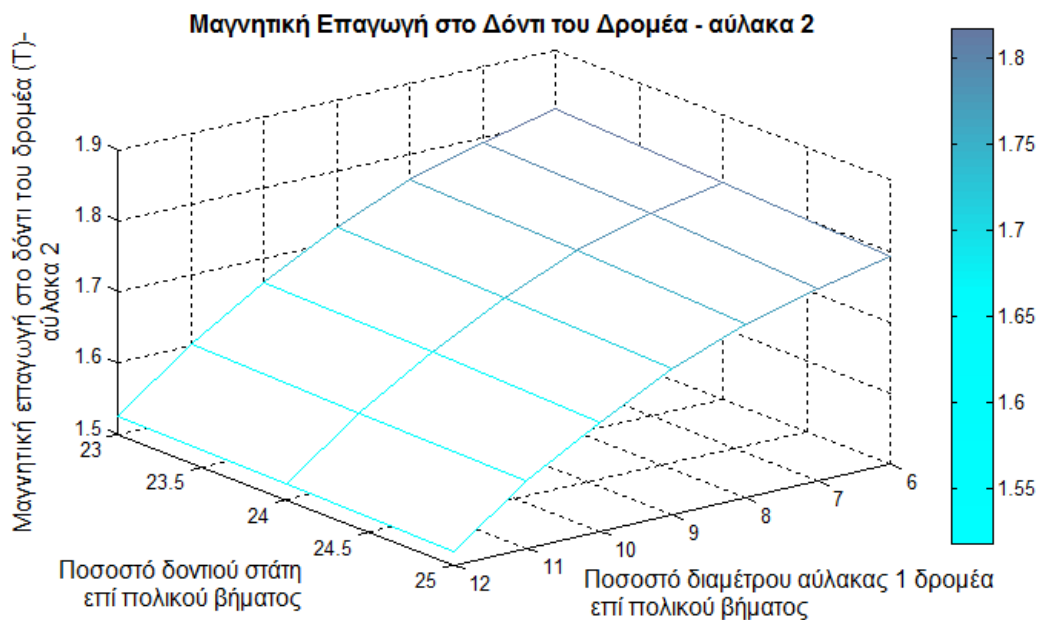
### Διάμετρος αύλακας 1 δρομέα

Στη συνέχεια μελετάται η δυνατότητα μείωσης της μαγνητικής επαγωγής στο δόντι του δρομέα στην περιοχή που αντιστοιχεί στην αύλακα 1. Για τις τιμές πλάτους δοντιού στάτη και δρομέα που αναφέρονται στον Πίνακα 5.5 μεταβάλλεται η διάμετρος της αύλακας από 6% έως 12% του πολικού βήματος και καταγράφονται τα αποτελέσματα.

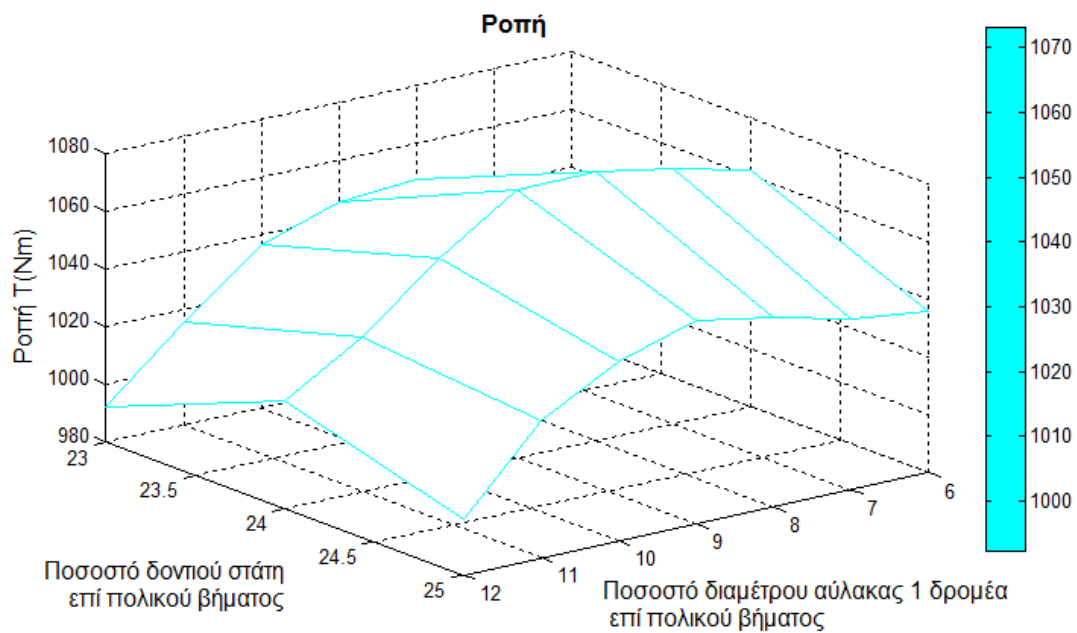
Για πλάτος δοντιού δρομέα ίσο με το 14% του πολικού βήματος:



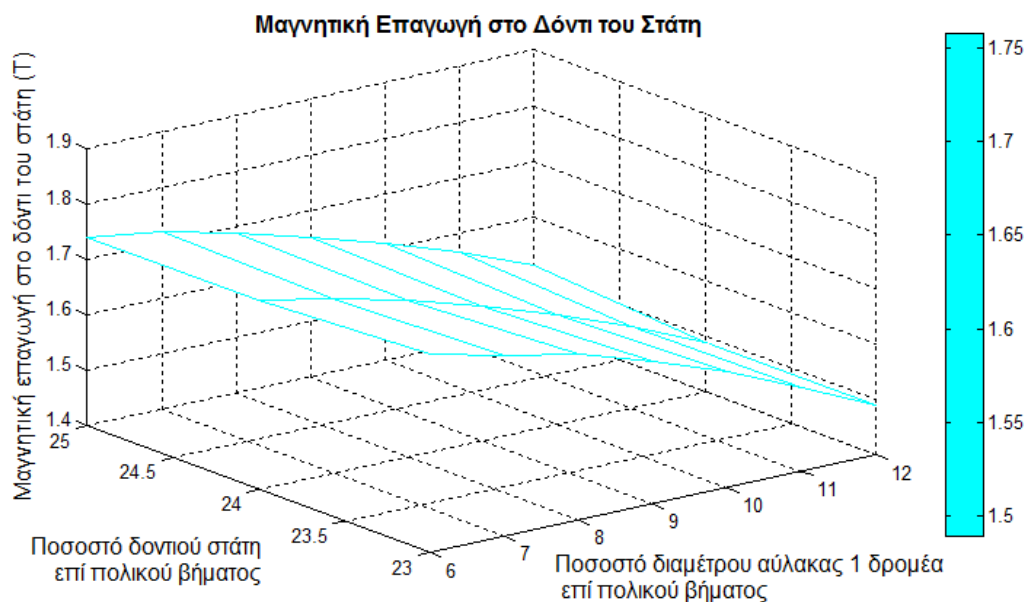
Διάγραμμα 5.38 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα που αντιστοιχεί στην αύλακα 1 ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και της διαμέτρου αύλακας 1 δρομέα επί του πολικού βήματος- ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα = 14%



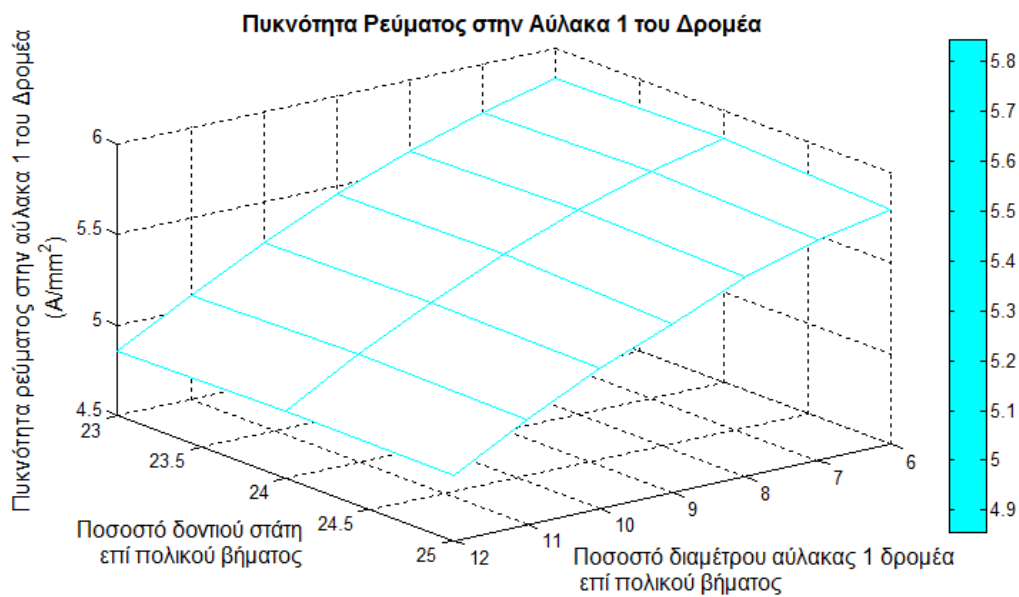
Διάγραμμα 5.39 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα που αντιστοιχεί στην αύλακα 2 ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και διαμέτρου αύλακας 1 δρομέα επί του πολικού βήματος - ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα = 14%



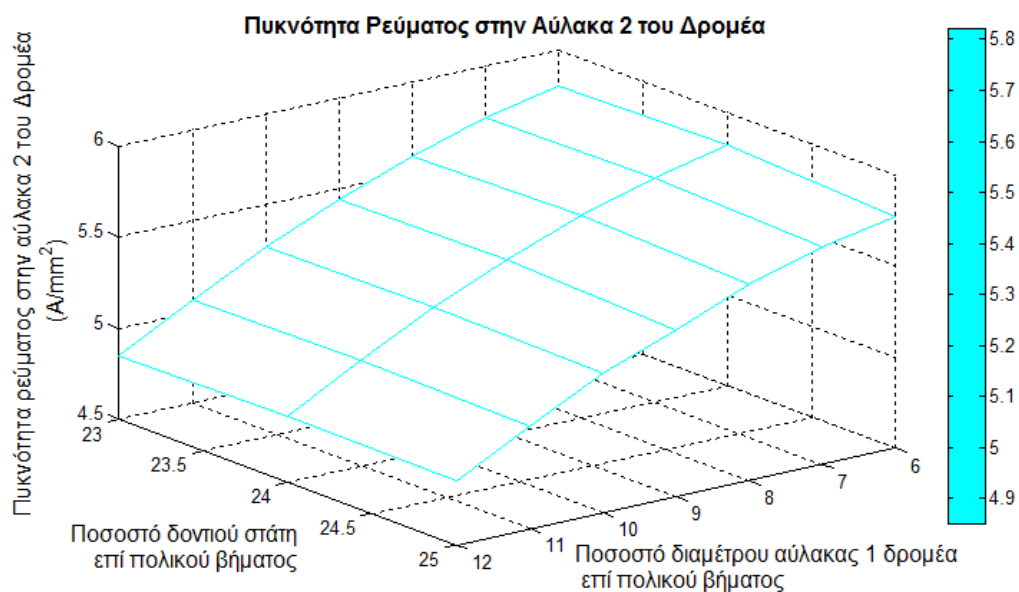
Διάγραμμα 5.40 Ροπή ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού σιάτη και διαμέτρου αύλακας 1 δρομέα επί του πολικού βήματος - ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα = 14%



Διάγραμμα 5.41 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του σιάτη ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού σιάτη και διαμέτρου αύλακας 1 δρομέα επί του πολικού βήματος - ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα = 14%

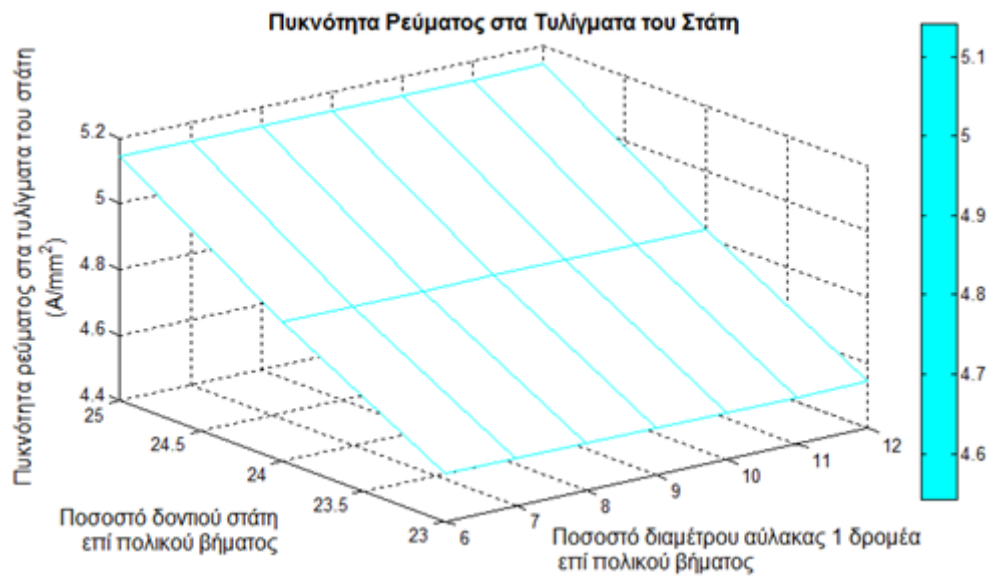


Διάγραμμα 5.42 Πυκνότητα ρεύματος στην αύλακα 1 του δρομέα ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και διαμέτρου αύλακας 1 δρομέα επί του πολικού βήματος - ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα = 14%

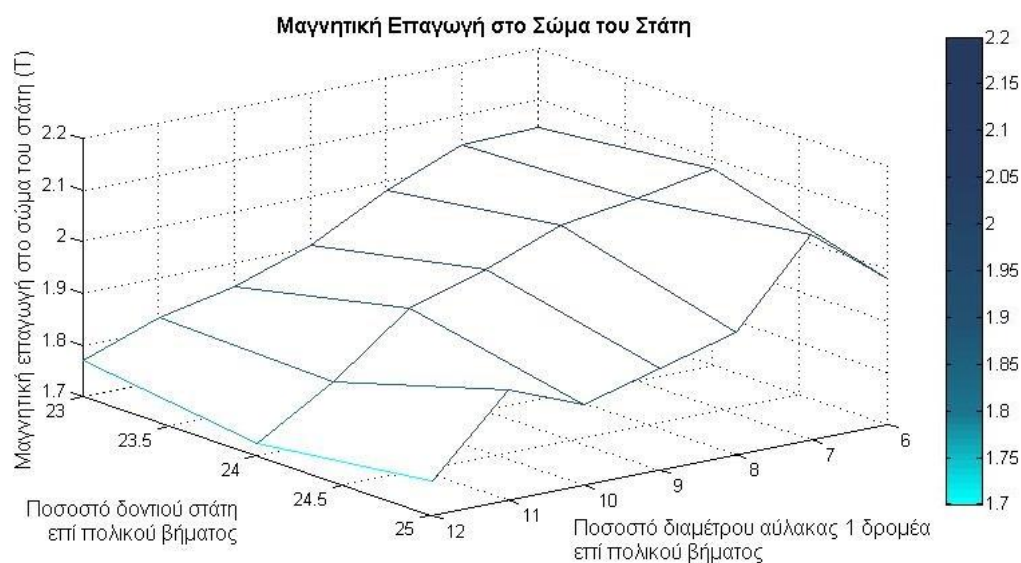


Διάγραμμα 5.43 Πυκνότητα ρεύματος στην αύλακα 2 του δρομέα ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και διαμέτρου αύλακας 1 δρομέα επί του πολικού βήματος - ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα = 14%





Διάγραμμα 5.44 Πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και διαμέτρου αύλακας 1 δρομέα επί του πολικού βήματος - ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα = 14%



Διάγραμμα 5.45 Μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και διαμέτρου αύλακας 1 δρομέα επί του πολικού βήματος - ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα = 14%

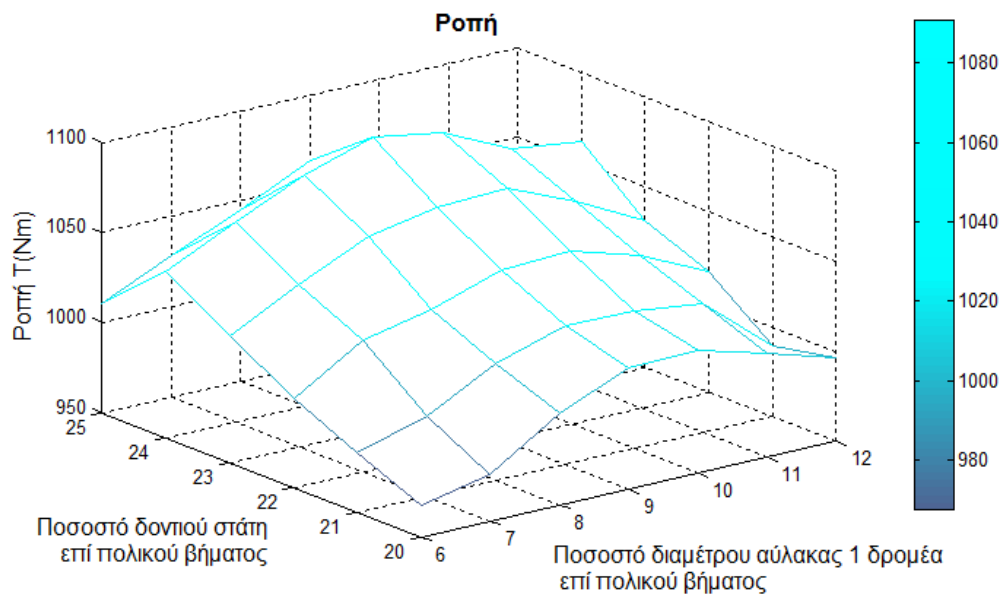
Από τα διαγράμματα 5.38-5.39 φαίνεται ότι για να διατηρηθεί κατά το δυνατόν χαμηλή η μαγνητική επαγωγή στα δόντια του δρομέα, θα πρέπει να επιλεγεί για διάμετρο αύλακας δρομέα τιμή ίση με το 6% του πολικού βήματος, πλάτος δοντιού ίσο με το 25% του πολικού βήματος και για διάμετρο αύλακας δρομέα τιμή ίση με 7-9% του πολικού βήματος, πλάτος δοντιού στάτη ίσο με 23-25% του πολικού βήματος. Τα μεγέθη των διαγραμμάτων 5.40-5.44 διατηρούνται εντός των επιθυμητών ορίων σε



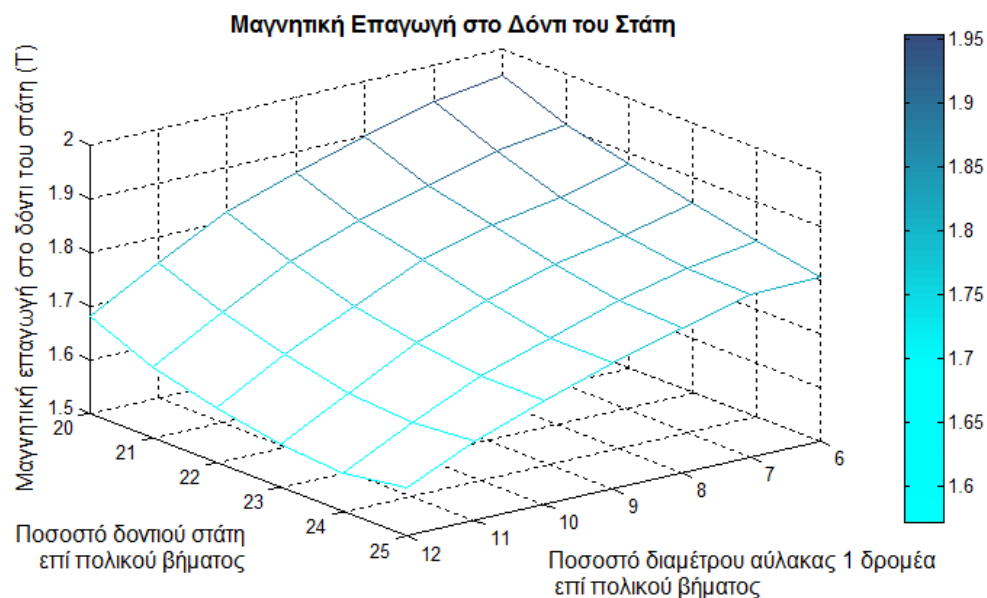
## Κεφάλαιο 5

ολόκληρο το εύρος τιμών που μελετάται. Η μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη είναι ελαφρώς αυξημένη ωστόσο δεν έχει γίνει διερεύνηση σε ως προς το ύψος δοντιού στάτη πράγμα που αναμένεται να οδηγήσει στην ελάττωσή της.

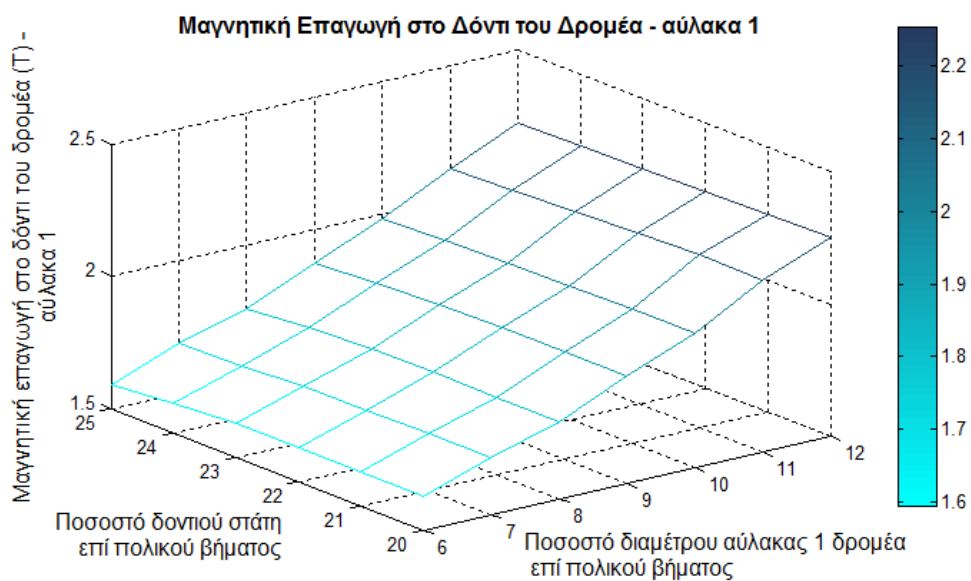
Για πλάτος δοντιού στάτη ίσο με το 15% του πολικού βήματος:



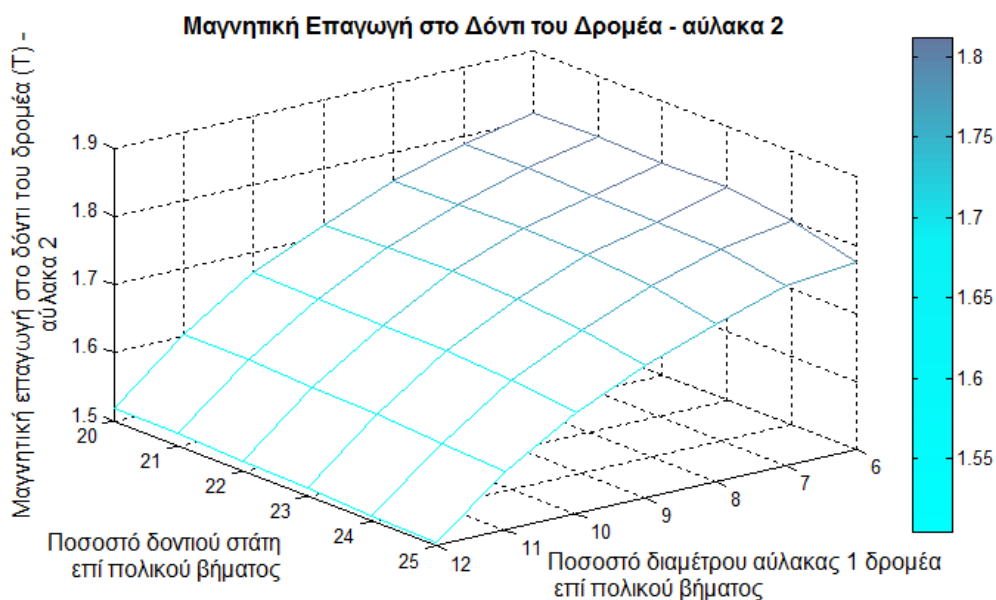
Διάγραμμα 5.46 Ροπή ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και διαμέτρου αύλακας 1 δρομέα επί του πολικού βήματος- ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα = 15%



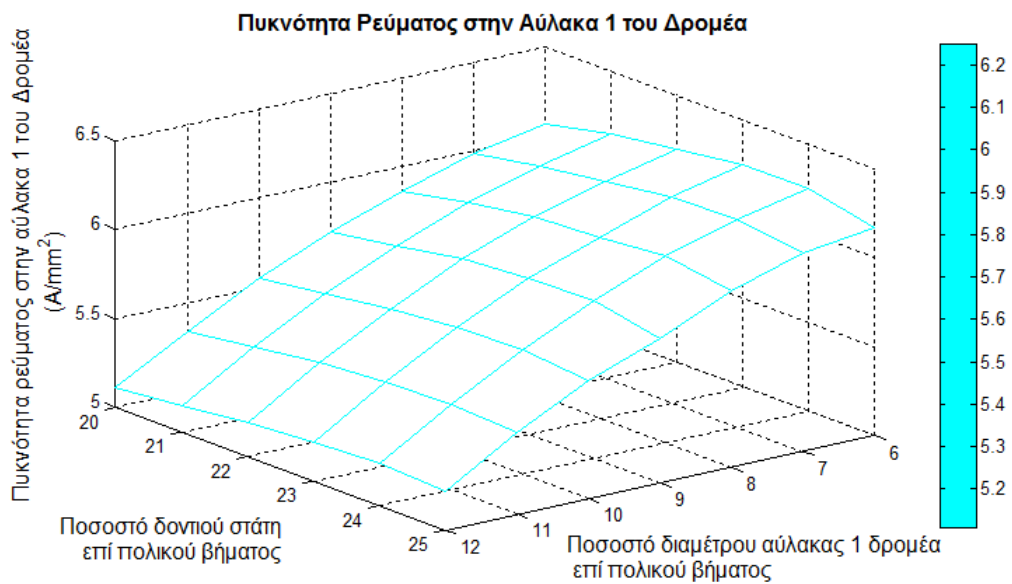
Διάγραμμα 5.47 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του στάτη ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και διαμέτρου αύλακας 1 δρομέα επί του πολικού βήματος- ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα = 15%



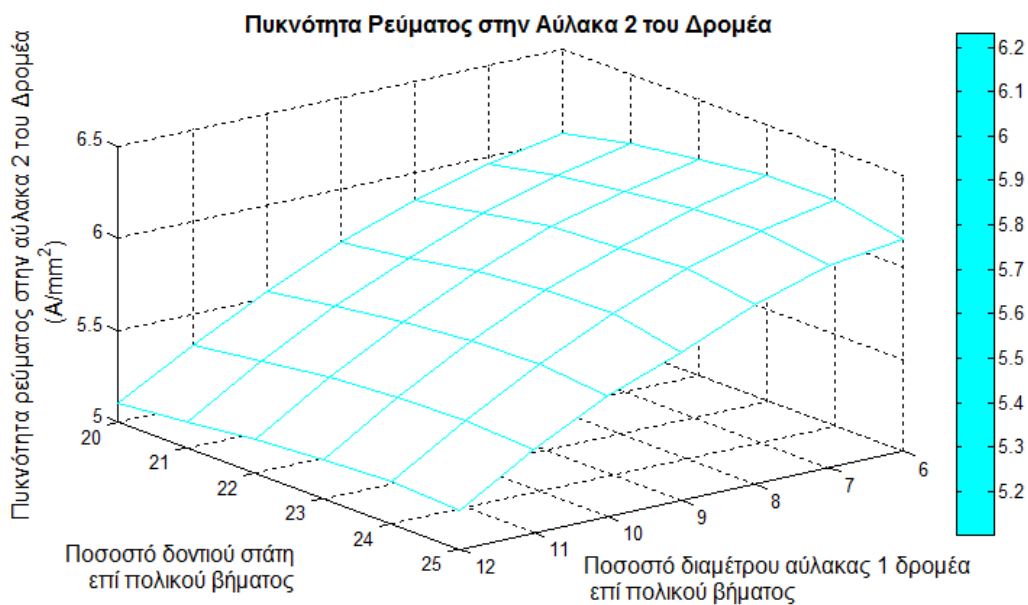
Διάγραμμα 5.48 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα που αντιστοιχεί στην αύλακα 1 ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και διαμέτρου αύλακας 1 δρομέα επί του πολικού βήματος- ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα = 15%



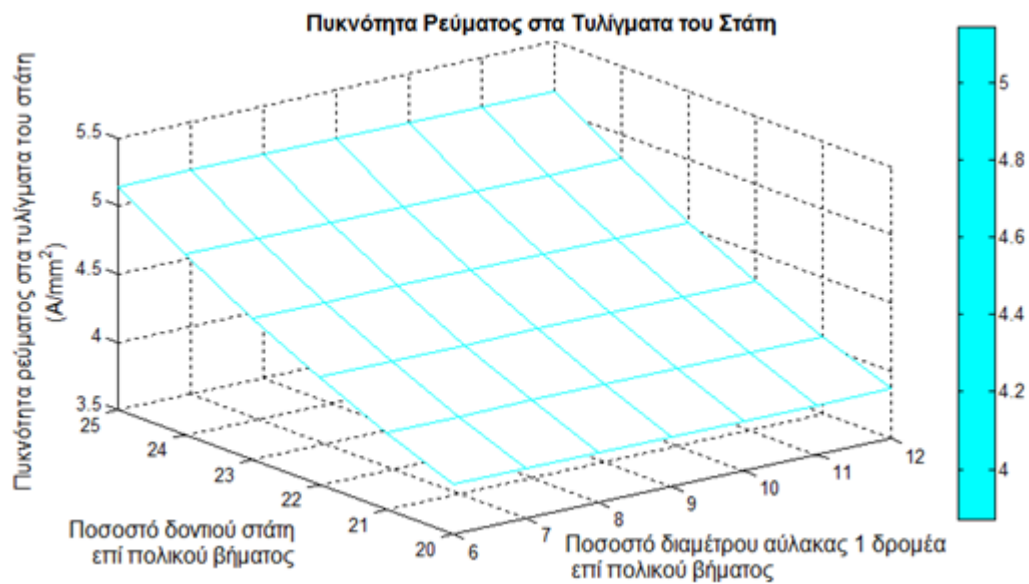
Διάγραμμα 5.49 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα που αντιστοιχεί στην αύλακα 2 ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού στάτη και της διαμέτρου αύλακας 1 δρομέα- ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα = 15%



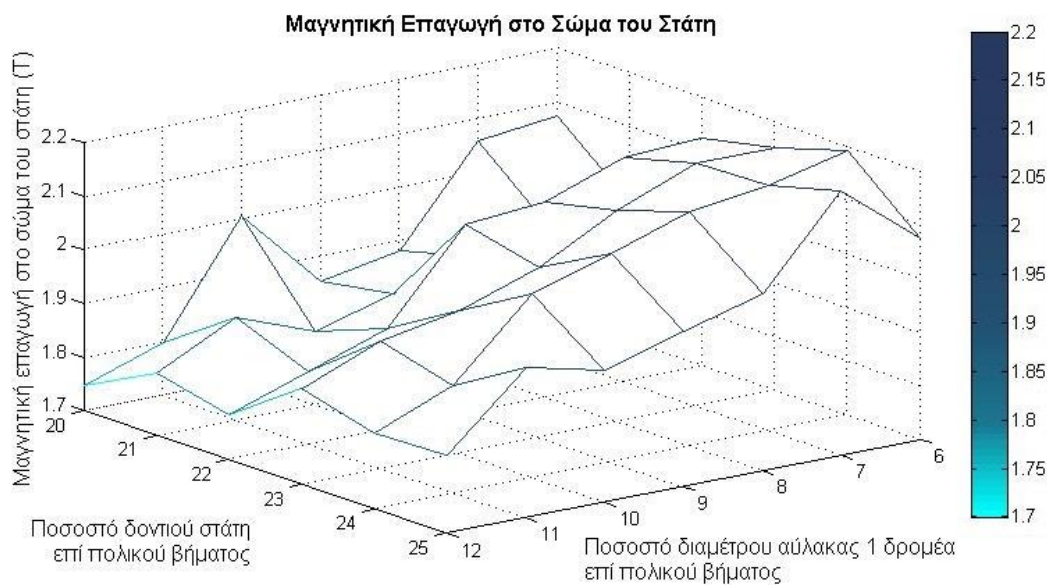
Διάγραμμα 5.50 Πυκνότητα ρεύματος στην αύλακα 1 του δρομέα ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού στάτη και της διαμέτρου αύλακας 1 δρομέα - ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα = 15%



Διάγραμμα 5.51 Πυκνότητα ρεύματος στην αύλακα 2 του δρομέα ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού στάτη και της διαμέτρου αύλακας 1 δρομέα - ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα = 15%



Διάγραμμα 5.52 Πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού στάτη και της διαμέτρου αύλακας 1 δρομέα - ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα = 15%



Διάγραμμα 5.53 Μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη ως συνάρτηση του πλάτους δοντιού στάτη και της διαμέτρου αύλακας 1 δρομέα - ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα = 15%

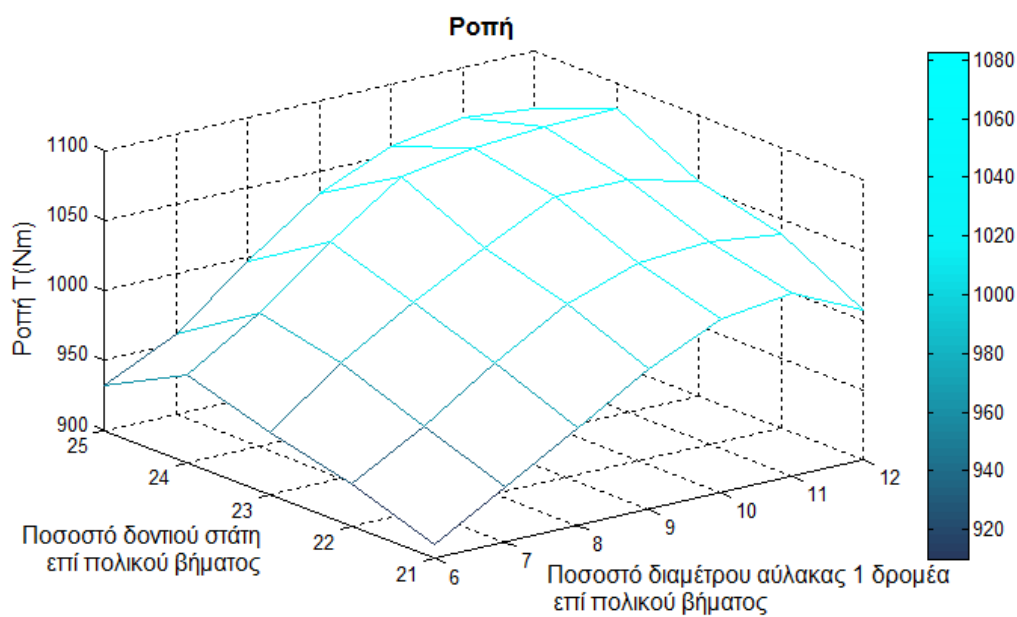
Από τα διαγράμματα 5.46- 5.49 προκύπτει για να διατηρηθεί κατά το δυνατόν χαμηλή η μαγνητική επαγωγή στο δόντι του στάτη καθώς και στο δόντι του δρομέα, θα πρέπει να επιλεγεί διάμετρος αύλακας δρομέα ίση με το 8% του πολικού βήματος και πλάτος δοντιού στάτη ίσο με 23%, 24% και 25% του πολικού βήματος. Η πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα (διαγράμματα 5.50-5.52). Επίσης από το διάγραμμα 5.52 φαίνεται πως η μεταβολή της διαμέτρου

## Κεφάλαιο 5

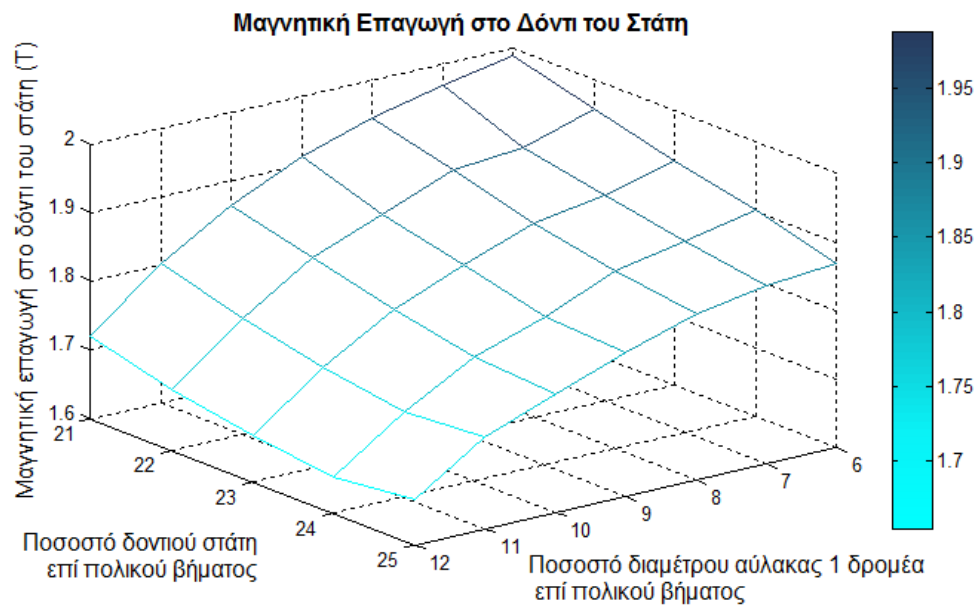
της αύλακας 1 του δρομέα δεν επηρεάζει την πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες του στάτη.

Η μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη διατηρείται ελαφρώς αυξημένη (διάγραμμα 5.53) ωστόσο αναμένεται να μειωθεί με τη μείωση του ύψους του δοντιού του δρομέα.

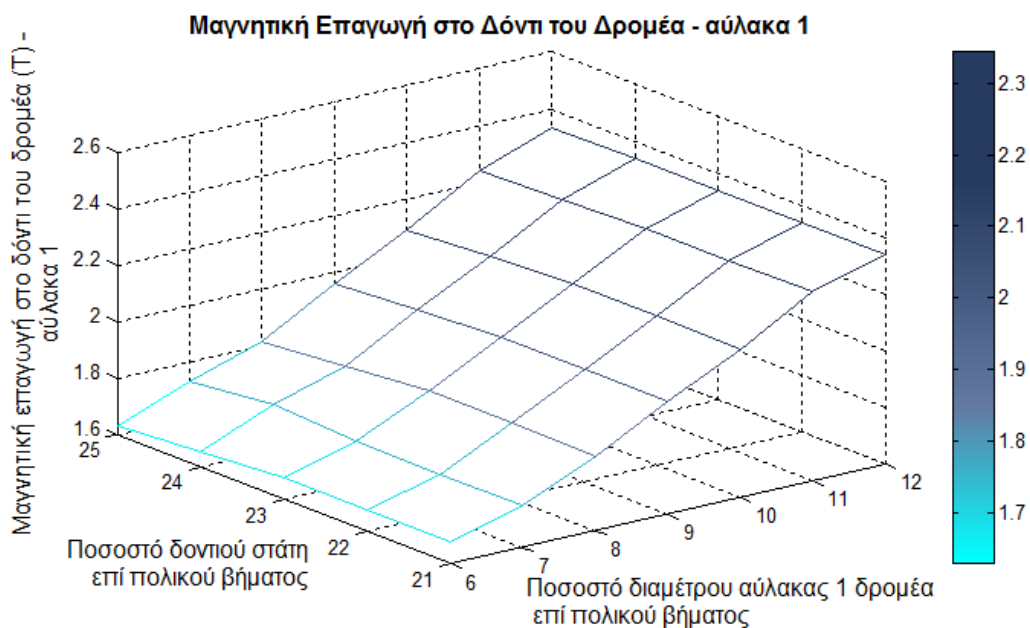
Για πλάτος δοντιού δρομέα ίσο με το 16% του πολικού βήματος δεν υπάρχουν τιμές πλάτους δοντιού στάτη και διαμέτρου αύλακας δρομέα που να οδηγούν σε χαμηλές τιμές μαγνητικής επαγωγής στο δόντι του στάτη και του δρομέα όπως φαίνεται στα διαγράμματα 5.54- 5.56. Επομένως δεν θα γίνει περαιτέρω διερεύνηση για αυτό το συνδυασμό γεωμετρικών χαρακτηριστικών.



Διάγραμμα 5.54 Ροπή ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και διαμέτρου αύλακας 1 δρομέα επί του πολικού βήματος- ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα = 16%



Διάγραμμα 5.55 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του στάτη ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και διαμέτρου αύλακας 1 δρομέα επί του πολικού βήματος- ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα = 16%



Διάγραμμα 5.56 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα που αντιστοιχεί στην αύλακα 1 ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και διαμέτρου αύλακας 1 δρομέα επί του πολικού βήματος- ποσοστό πλάτους δοντιού δρομέα = 16%

## Κεφάλαιο 5

Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της διερεύνησης ως προς το μέγεθος της διαμέτρου της αύλακας 1 του δρομέα, παρουσιάζονται στον *πίνακα 5.57*:

Ποσοστό Δόντι Στάτη/Δόντι Δρομέα	Ποσοστό αύλακας δρομέα				
	6	7	8	8	9
	14	14	14	15	14
23		+	+	+	+
24		+	+	+	+
25	+	+	+	+	+

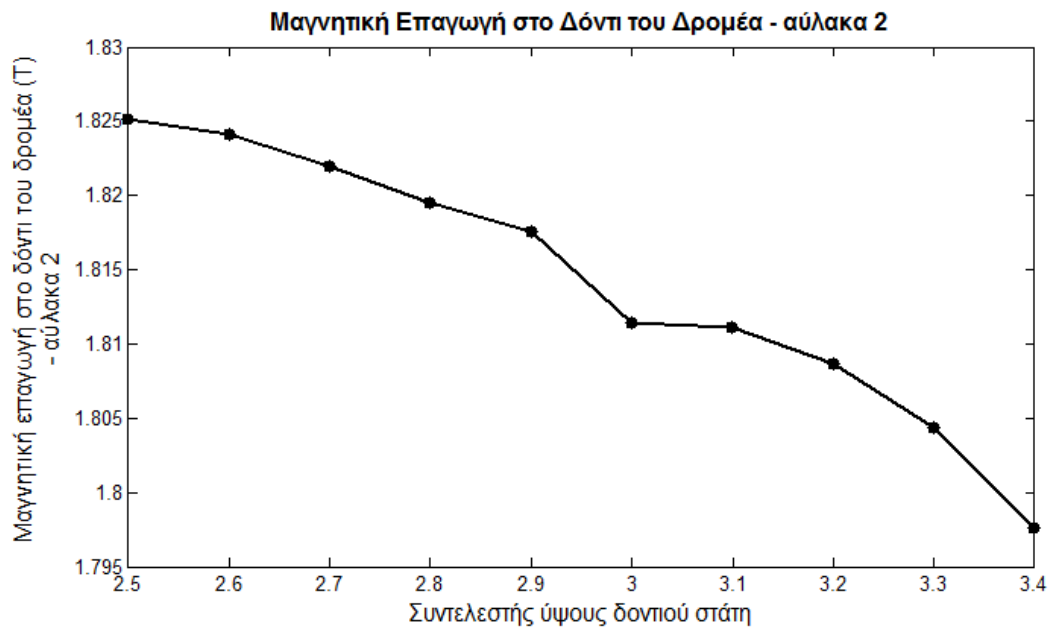
*Πίνακας 5.57 Συνδυασμοί ποσοστού δοντιού στάτη και δρομέα επί του πολικού βήματος για διατήρηση της κατανομής της μαγνητικής επαγωγής και της πυκνότητας ρεύματος του κινητήρα σε επιθυμητά επίπεδα.*

Επίσης από τα διαγράμματα 5.44 και 5.52 γίνεται εμφανές ότι η πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή της διαμέτρου της αύλακας 1 του δρομέα.

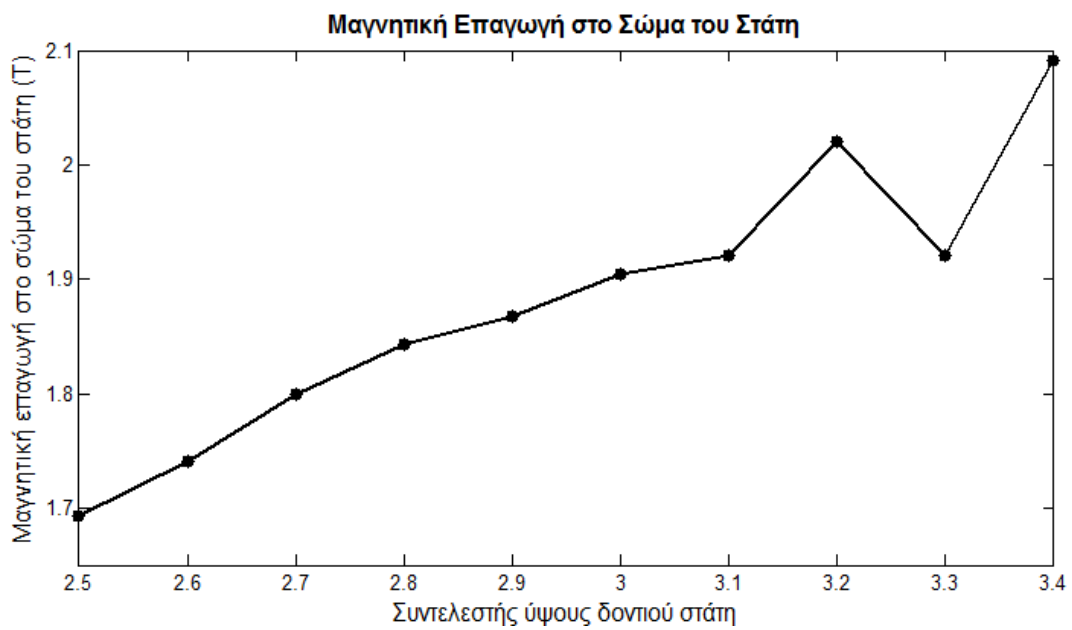
### Ύψος δοντιού στάτη

Στη συνέχεια μελετάται η δυνατότητα μείωσης της μαγνητικής επαγωγής στο σώμα του στάτη μέσω της μείωσης του ύψους δοντιού του στάτη. Για τους συνδυασμούς που παρουσιάζονται στον *πίνακα 5.6*, μεταβάλλεται ο συντελεστής ύψους δοντιού του στάτη από 2.5 έως 3.4 και καταγράφονται τα αποτελέσματα.

Για διάμετρο αύλακας δρομέα ίση με το 6% του πολικού βήματος, πλάτος δοντιού δρομέα ίσο με 14% του πολικού βήματος και πλάτος δοντιού στάτη ίσο με το 25% του πολικού βήματος, μεταβάλλεται ο συντελεστής ύψους δοντιού στάτη από 2.5 ως 3.4 και καταγράφονται τα αποτελέσματα. (*διαγράμματα 5.57-5.59*)

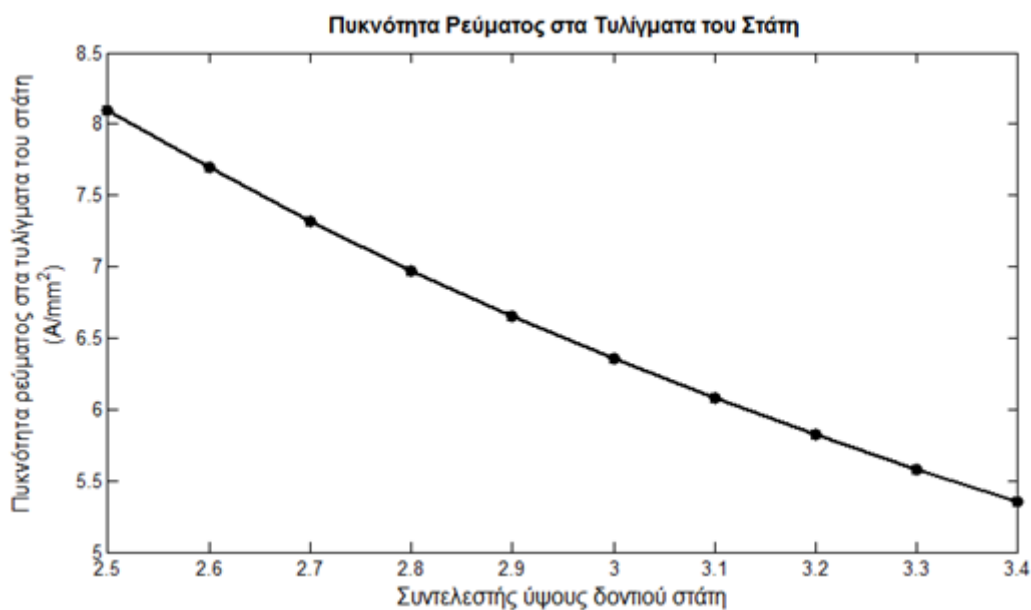


Διάγραμμα 5.57 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα που αντιστοιχεί στην περιοχή της αύλακας 2 ως συνάρτηση του συντελεστή ύψους δοντιού σάττη



Διάγραμμα 5.58 Μαγνητική επαγωγή στο σώμα του σάττη ως συνάρτηση του συντελεστή ύψους δοντιού σάττη

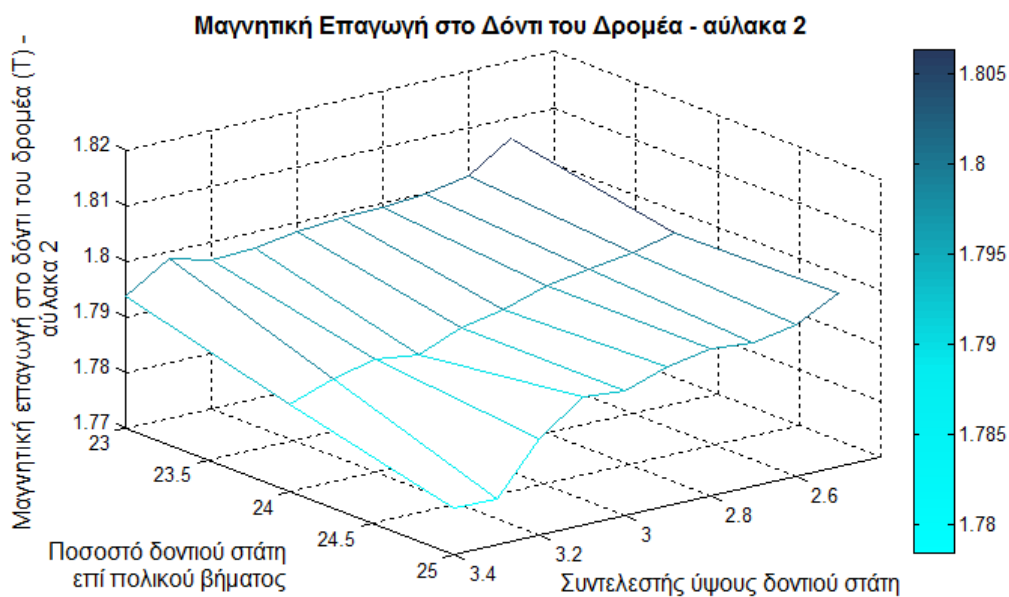




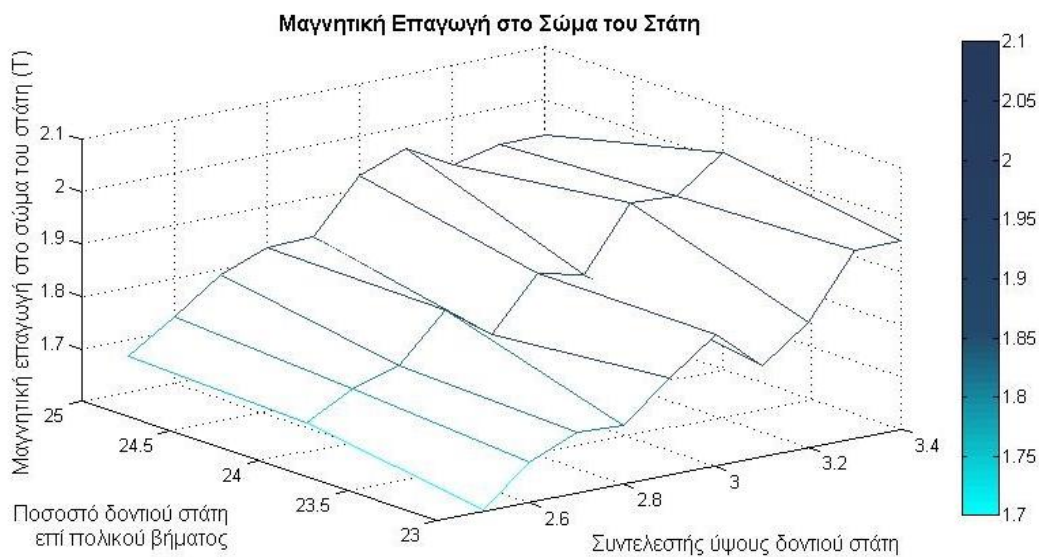
Διάγραμμα 5.59 Πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη ως συνάρτηση του συντελεστή ύψους δοντιού στάτη

Επομένως η μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη και το δόντι του δρομέα καθώς και η πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη διατηρούνται ελαφρώς αυξημένες. Επομένως δεν προχωράει η διερεύνηση για αυτούς τους συνδυασμούς γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

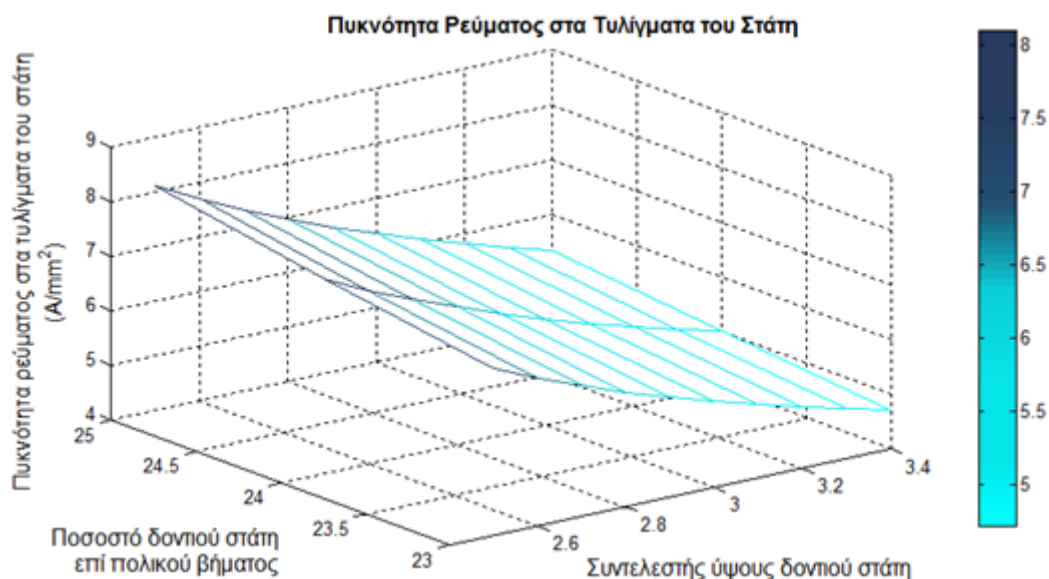
Για ποσοστό διαμέτρου αύλακας δρομέα ίσο με 7% του πολικού βήματος και ποσοστό δοντιού δρομέα ίσο με το 14% του πολικού βήματος μεταβάλλεται ο συντελεστής ύψους δοντιού στάτη από 2.5 έως 3.4 και το ποσοστό πλάτους δοντιού στάτη ως προς το πολικό βήμα από 23 έως 25% και προκύπτουν τα αποτελέσματα των *διαγραμμάτων 5.60 έως 5.62*.



Διάγραμμα 5.60 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα που αντιστοιχεί στην αύλακα 2 ως συνάρτηση του συντελεστή ύψους δοντιού στάτη και του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη επί του πολικού βήματος



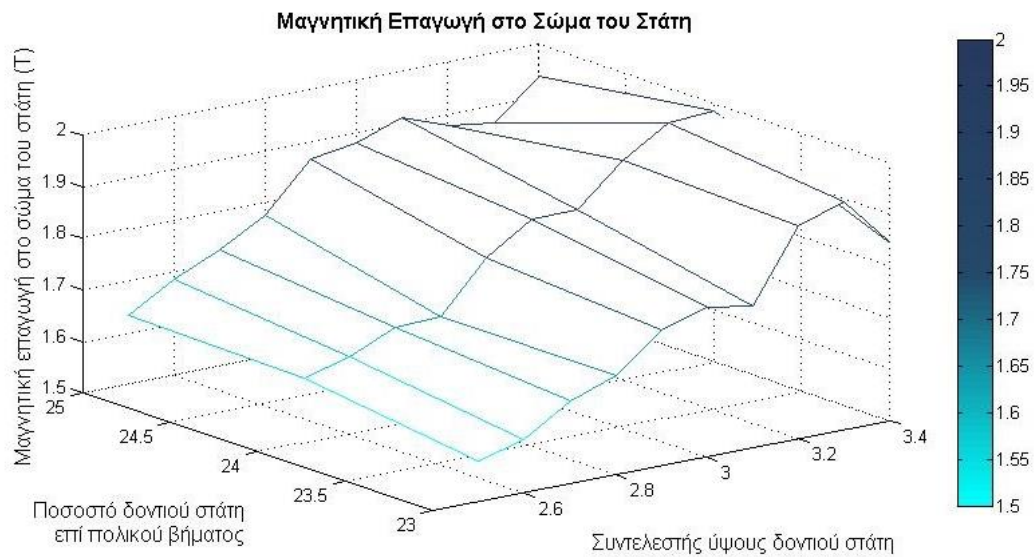
Διάγραμμα 5.61 Μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη ως συνάρτηση του συντελεστή ύψους δοντιού στάτη και του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη επί του πολικού βήματος



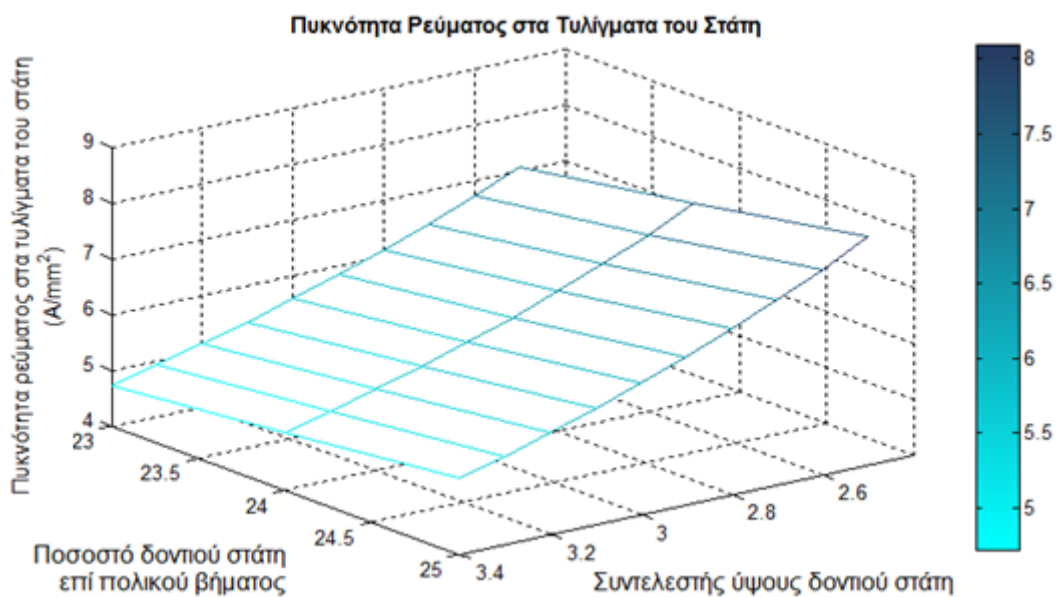
Διάγραμμα 5.62 Πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη ως συνάρτηση του συντελεστή ύψους δοντιού στάτη και του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη επί του πολικού βήματος

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι οι τιμές μαγνητικής επαγωγής στο σώμα του στάτη, μαγνητικής επαγωγής στο δόντι του δρομέα στην περιοχή που αντιστοιχεί στην αύλακα 2 και πυκνότητας ρεύματος στις αύλακες του δρομέα είναι ελαφρώς αυξημένες για τους παραπάνω συνδυασμούς.

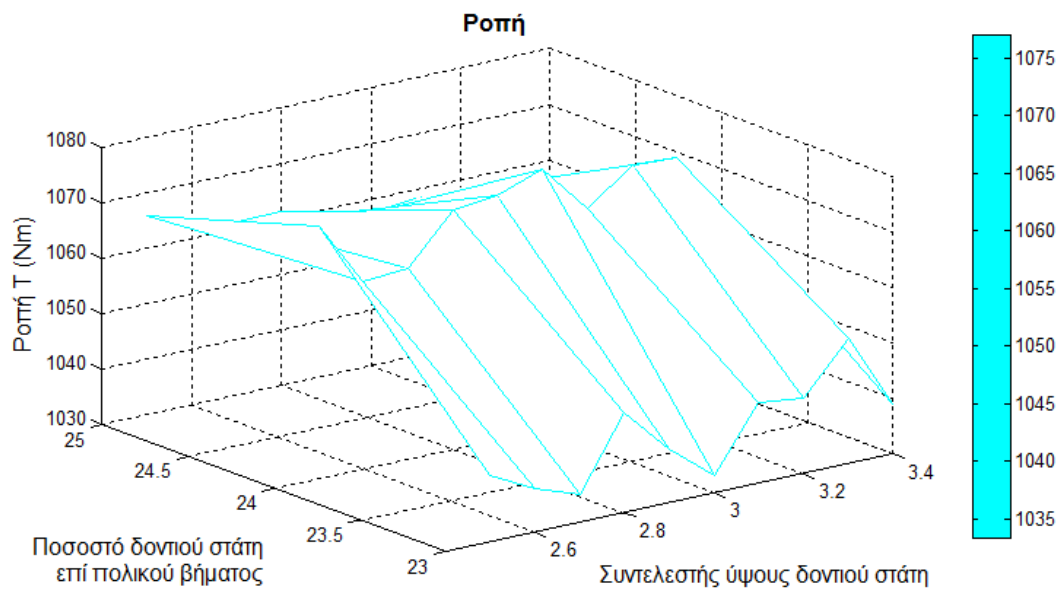
Στη συνέχεια ελέγχονται τα αποτελέσματα για ποσοστό αύλακας δρομέα ίσο με 8% του πολικού βήματος και ποσοστό δοντιού δρομέα ίσο με το 14% του πολικού βήματος. Μεταβάλλεται ο συντελεστής ύψους αύλακας στάτη από 2.5 έως 3.4 και το ποσοστό του πλάτους δοντιού του στάτη ως προς το πολικό βήμα από 23 έως 25% και προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα:



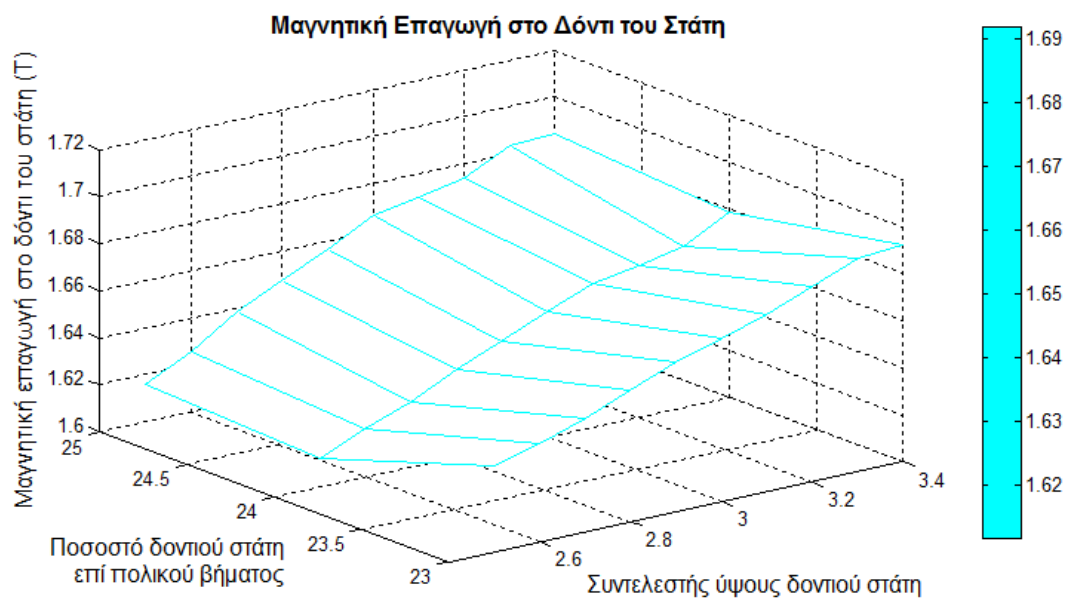
Διάγραμμα 5.63 Μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη ως συνάρτηση του συντελεστή ύψους δοντιού στάτη και του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη επί του πολικού βήματος



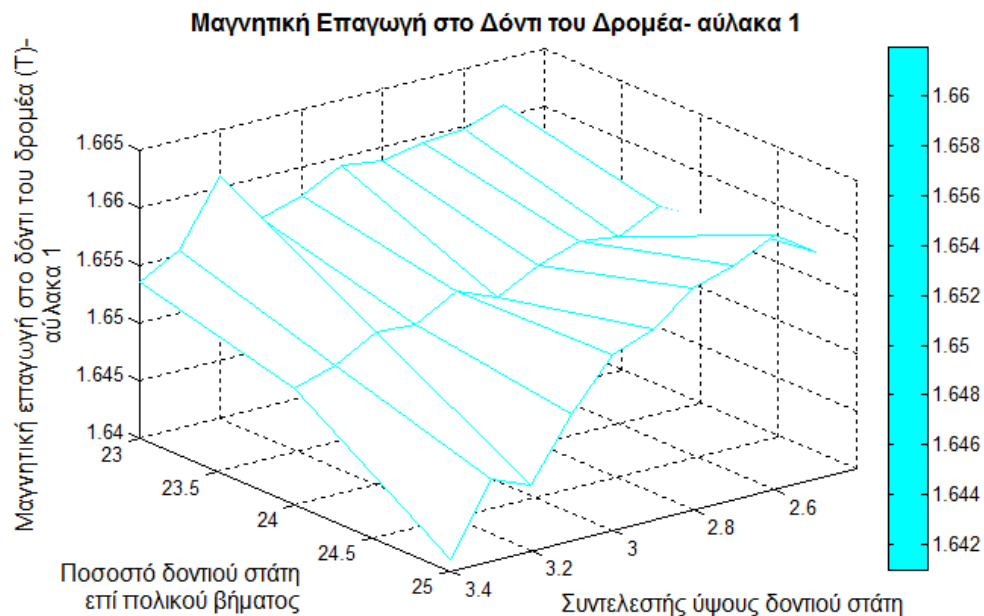
Διάγραμμα 5.64 Πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη ως συνάρτηση του συντελεστή ύψους δοντιού στάτη και του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη επί του πολικού βήματος



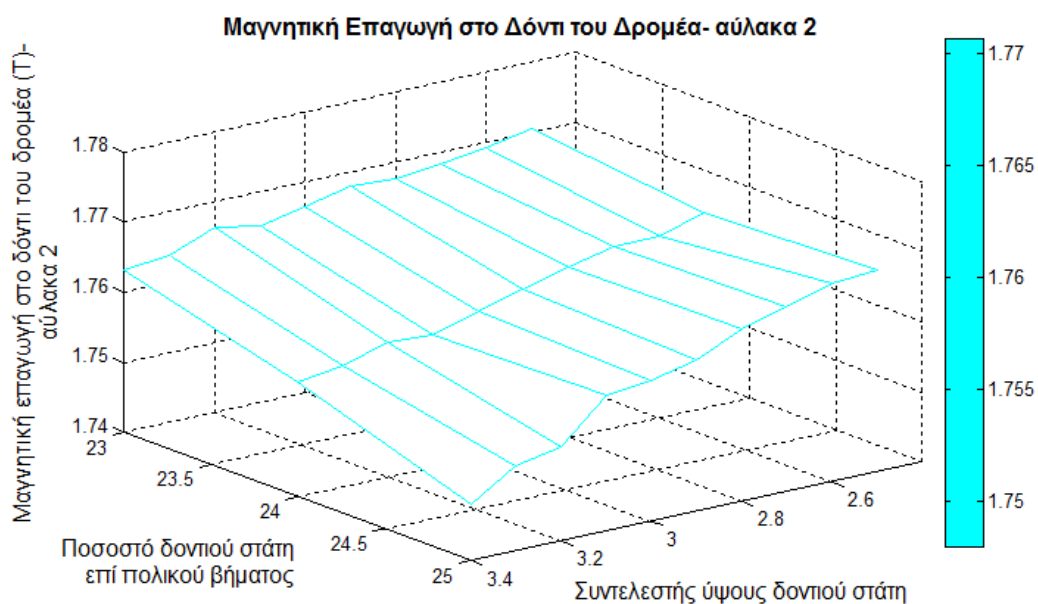
Διάγραμμα 5.65 Ροπή ως συνάρτηση του συντελεστή ύψους δοντιού σάτη και του ποσοστού πλάτους δοντιού σάτη επί του πολικού βήματος



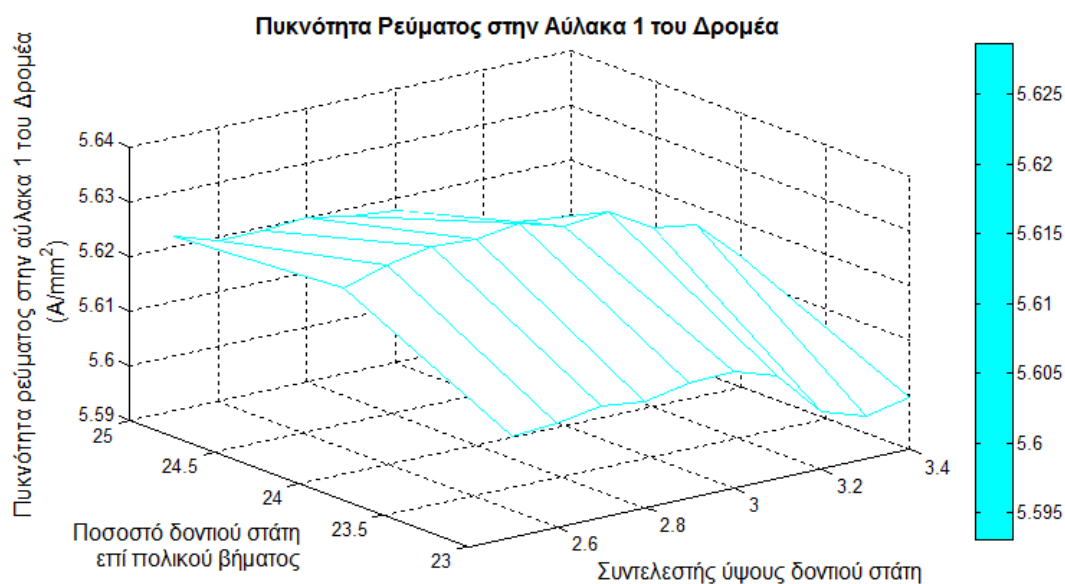
Διάγραμμα 5.66 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του σάτη ως συνάρτηση του συντελεστή ύψους δοντιού σάτη και του ποσοστού πλάτους δοντιού σάτη επί του πολικού βήματος



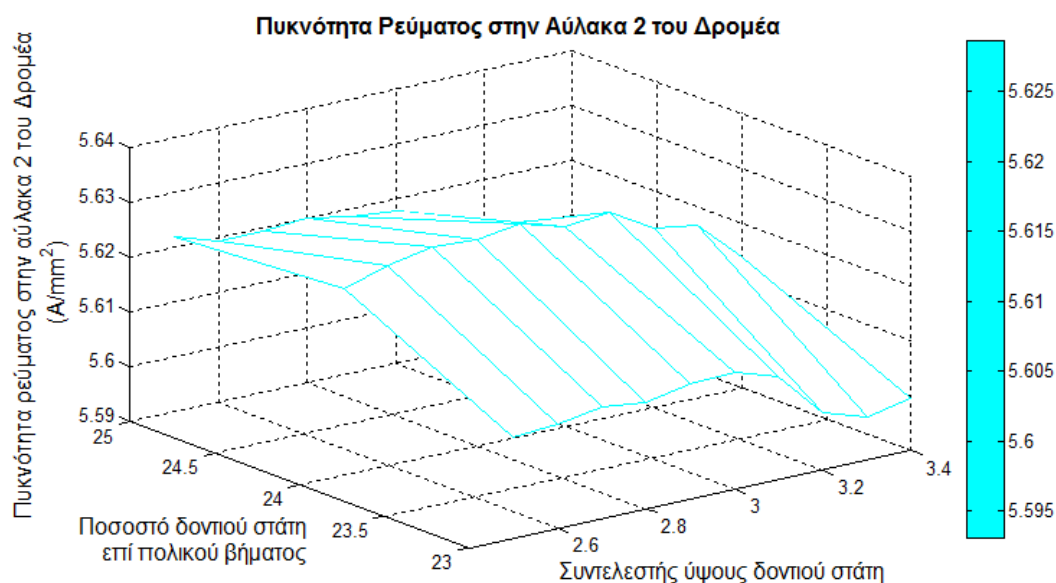
Διάγραμμα 5.67 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα στην περιοχή που αντιστοιχεί στην αύλακα 1 ως συνάρτηση του συντελεστή ύψους δοντιού στάτη και του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη επί του πολικού βήματος



Διάγραμμα 5.68 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα στην περιοχή που αντιστοιχεί στην αύλακα 2 ως συνάρτηση του συντελεστή ύψους δοντιού στάτη και του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη επί του πολικού βήματος



Διάγραμμα 5.69 Πυκνότητα ρεύματος στην αύλακα 1 του δρομέα ως συνάρτηση του συντελεστή ύψους δοντιού στάτη και του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη επί του πολικού βήματος



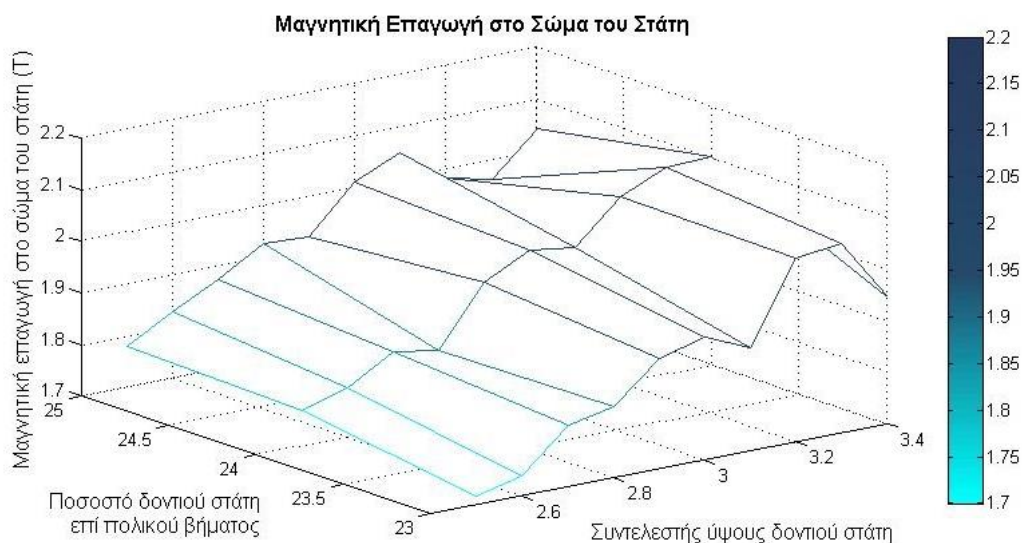
Διάγραμμα 5.70 Πυκνότητα ρεύματος στην αύλακα 2 του δρομέα ως συνάρτηση του συντελεστή ύψους δοντιού στάτη και του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη επί του πολικού βήματος

Η μείωση του ύψους δοντιού του στάτη έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητας ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη. Ωστόσο για πλάτος δοντιού δρομέα ίσο με το 23% του πολικού βήματος και συντελεστή ύψους δοντιού στάτη ίσο με 2.7 και 2.8 τα μεγέθη των διαγραμμάτων 5.63 και 5.64 διατηρούνται σε αρκετά χαμηλά επίπεδα.

Για διάμετρο αύλακας δρομέα ίση με το 8% του πολικού βήματος και πλάτος δοντιού δρομέα ίσο με το 15% του πολικού βήματος μεταβάλλεται το ύψος δοντιού στάτη από

## Κεφάλαιο 5

2.5 έως 3.4 και το ποσοστό πλάτους δοντιού σάτη ως προς το πολικό βήμα από 23 έως 25%.

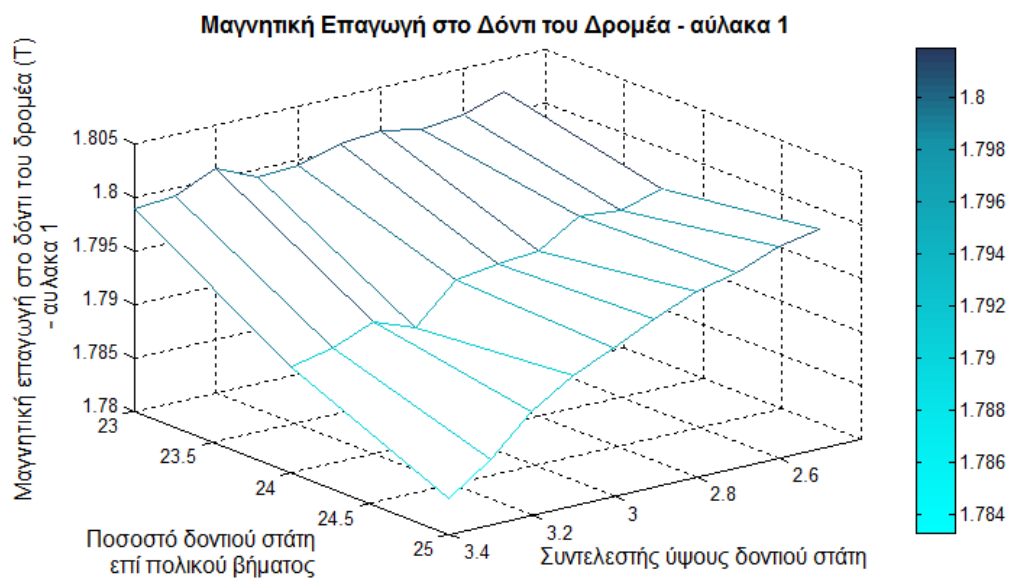


Διάγραμμα 5.71 Μαγνητική επαγωγή στο σώμα του σάτη ως συνάρτηση του συντελεστή ύψους δοντιού σάτη και του ποσοστού πλάτους δοντιού σάτη επί του πολικού βήματος

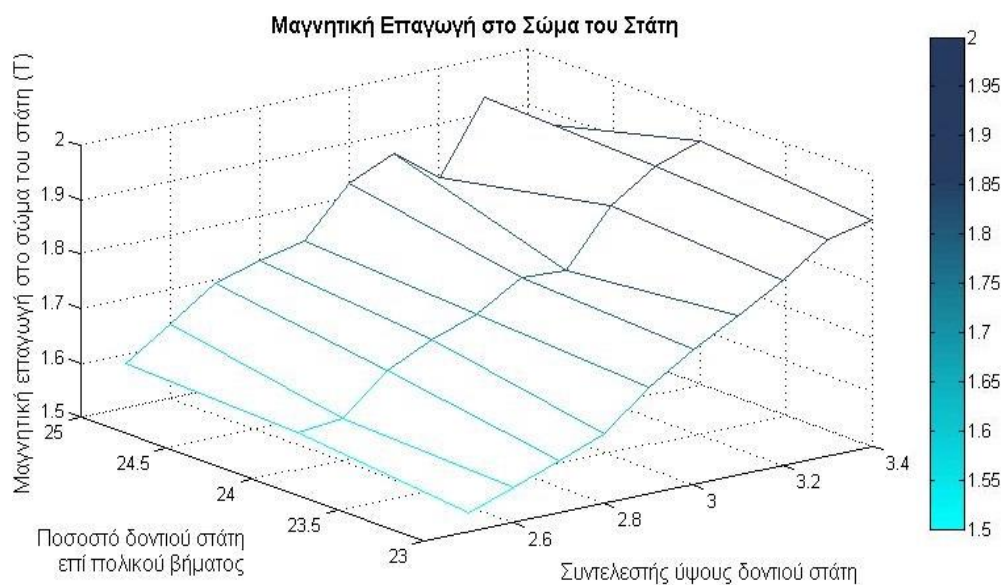
Η μαγνητική επαγωγή στο σώμα του σάτη είναι αυξημένη για όλους τους γεωμετρικούς συνδυασμούς όπως παρουσιάζεται στο *διάγραμμα 5.71* οπότε δεν πραγματοποιείται περαιτέρω διερεύνηση.

Τέλος, για διάμετρο αύλακας δρομέα ίση με το 9% του πολικού βήματος και πλάτος δοντιού δρομέα ίσο με το 14% του πολικού βήματος προκύπτουν τα αποτελέσματα των *διαγραμμάτων 5.72- 5.74*.

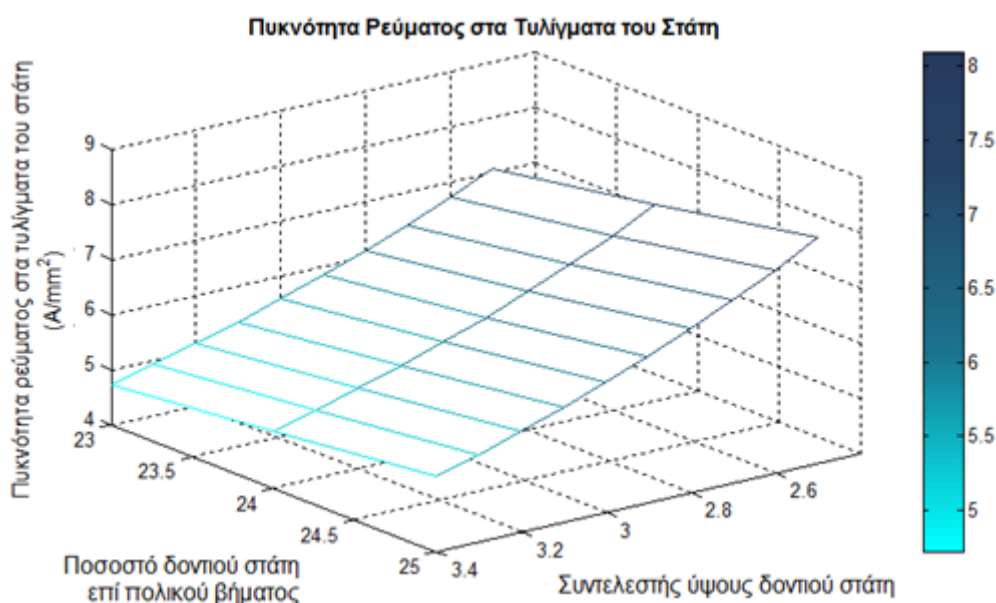




Διάγραμμα 5.72 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα που αντιστοιχεί στην περιοχή της αύλακας 1 ως συνάρτηση του συντελεστή ύψους δοντιού σάτη και του ποσοστού πλάτους δοντιού σάτη επί του πολικού βήματος.



Διάγραμμα 5.73 Μαγνητική επαγωγή στο σώμα του σάτη ως συνάρτηση του συντελεστή ύψους δοντιού σάτη και του ποσοστού πλάτους δοντιού σάτη επί του πολικού βήματος



Διάγραμμα 5.74 Πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη ως συνάρτηση του συντελεστή ύψους δοντιού στάτη και του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη επί του πολικού βήματος.

Επομένως δεν υπάρχει συνδυασμός γεωμετρικών διαστάσεων που διατηρεί σε χαμηλά επίπεδα τόσο την μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη και το δόντι του δρομέα όσο και την πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη.

Οι τιμές για το συντελεστή ύψους δοντιού στάτη και το ποσοστό πλάτους δοντιού στάτη ως προς το πολικό βήμα που ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς που έχουν τεθεί, καθώς και η παραγόμενη ροπή, η μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη και η πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη για αυτά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά συνοψίζονται στον *πίνακα 5.7*:

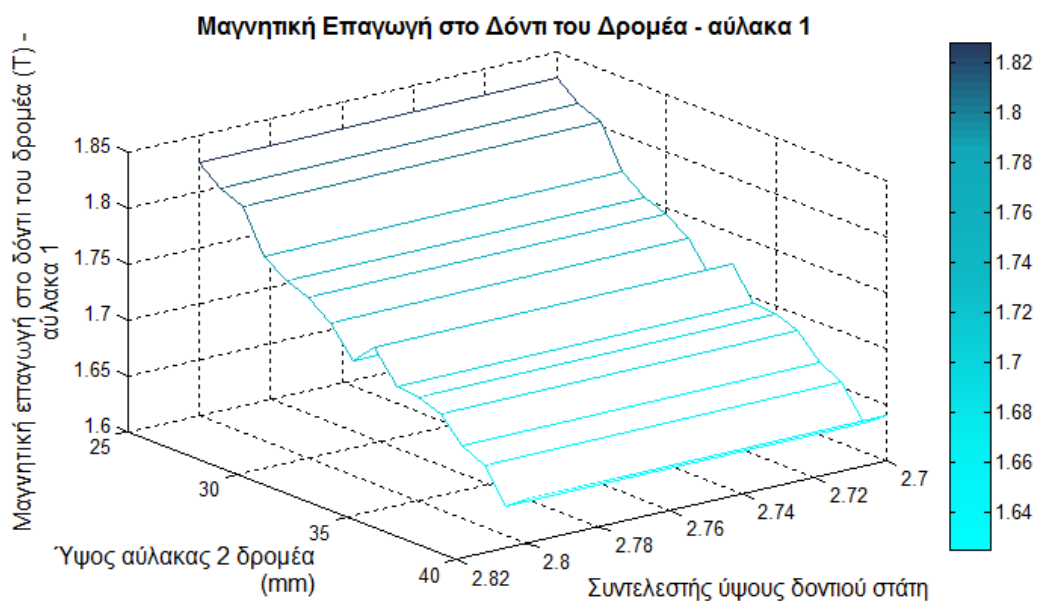
Ποσοστό πλάτους δοντιού στάτη/ Συντελεστής ύψους δοντιού στάτη	Ροπή (Nm)	B <sub>cs</sub> (T)	J <sub>st</sub> (A/mm <sup>2</sup> )
23	1047.9	1.5624	6.3942
Ποσοστό πλάτους δοντιού στάτη/ Συντελεστής ύψους δοντιού στάτη	Ροπή (Nm)	B <sub>cs</sub> (T)	J <sub>st</sub> (A/mm <sup>2</sup> )
23	1035	1.5917	6.101

Πίνακας 5.7 Βέλτιστη περιοχή τιμών ροπής, μαγνητικής επαγωγής στο σώμα του στάτη και πυκνότητας ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη για ποσοστό δοντιού στάτη και συντελεστή ύψους δοντιού στάτη.

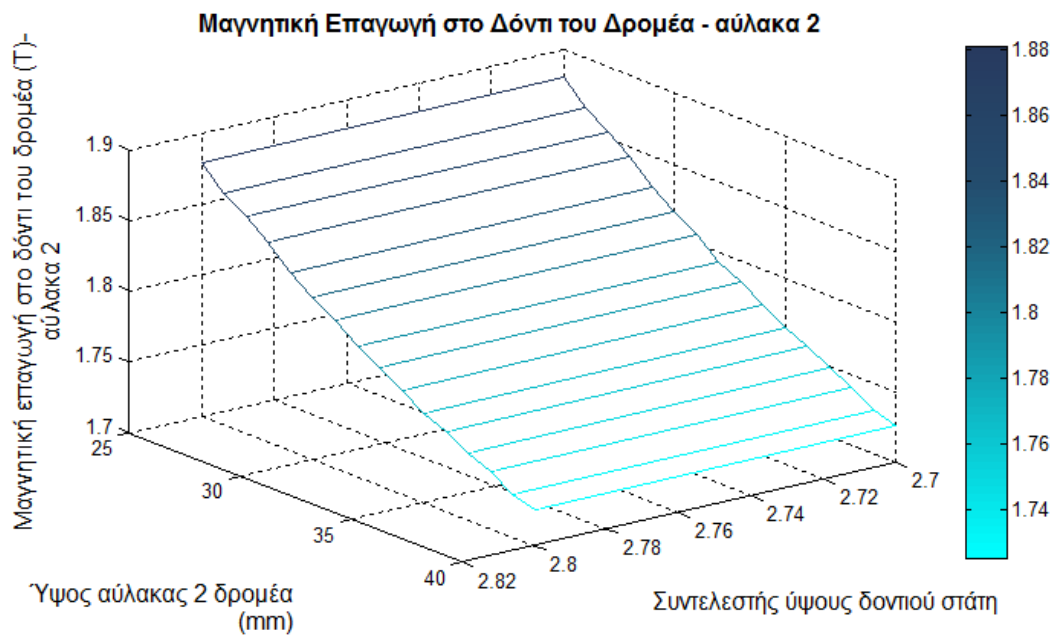
Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε διάμετρο αύλακας δρομέα ίση με το 8% του πολικού βήματος και πλάτος δοντιού δρομέα στην περιοχή της αύλακας 2 ίσο με 14% του πολικού βήματος.

### Ύψος δοντιού δρομέα στην περιοχή της αύλακας 2

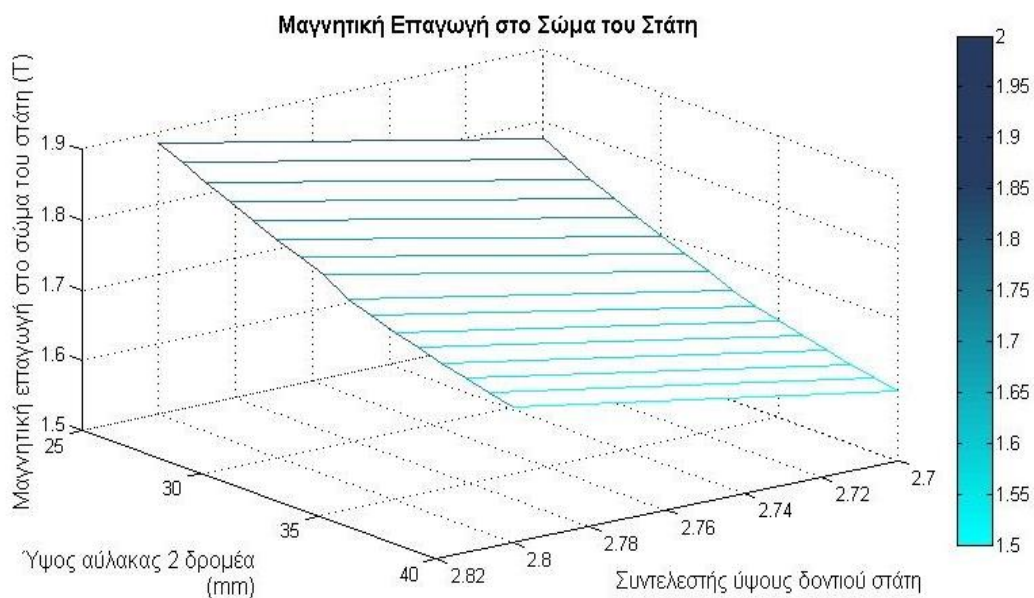
Για να ολοκληρωθεί η ανάλυση ευαισθησίας των γεωμετρικών παραμέτρων για των κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης C, ελέγχονται οι επιπτώσεις μεταβολής του ύψους της αύλακας 2 του δρομέα στη φόρτιση του κινητήρα. Από την προκαταρκτική σχεδίαση είχε εκτιμηθεί το ύψος αύλακας 2 του δρομέα ίσο με 34,5mm . Για τις τιμές γεωμετρικών παραμέτρων που αναφέρονται στον *πίνακα 5.7*, μεταβάλλεται το ύψος της αύλακας από 25 έως 40mm και καταγράφονται τα αποτελέσματα:



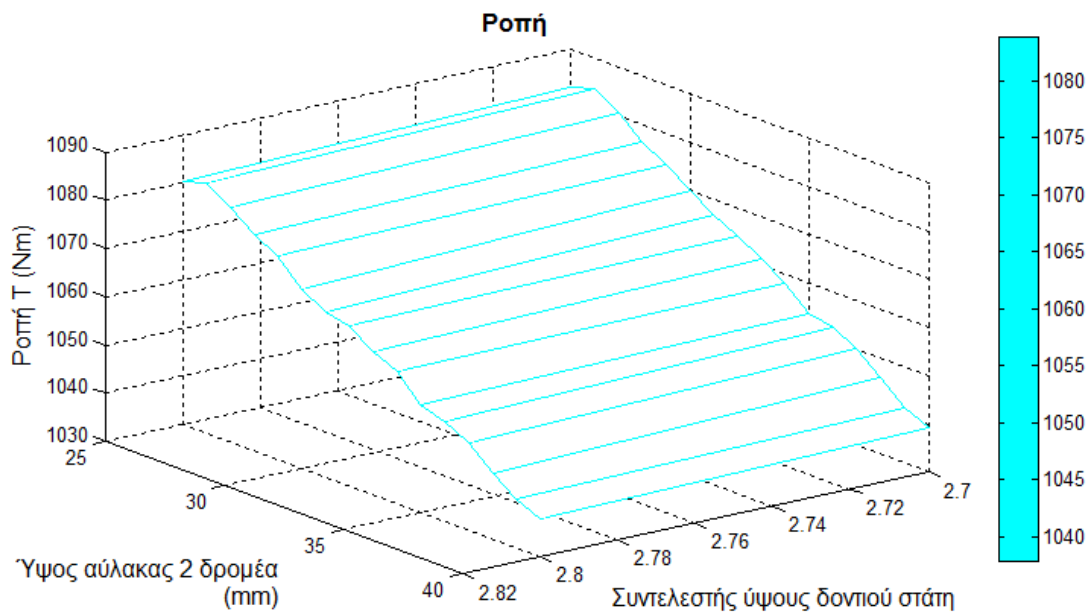
Διάγραμμα 5.75 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα στην περιοχή που αντιστοιχεί στην αύλακα 1 ως συνάρτηση του μήκους δοντιού δρομέα και του συντελεστή ύψους δοντιού του στάτη.



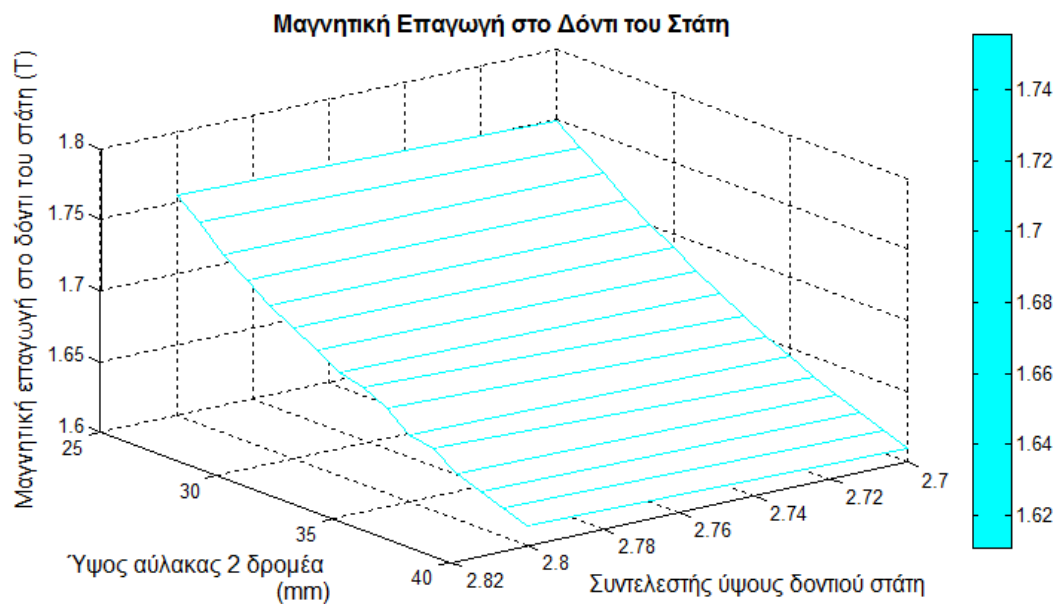
Διάγραμμα 5.76 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα στην περιοχή που αντιστοιχεί στην αύλακα 2 ως συνάρτηση του μήκους δοντιού δρομέα και του συντελεστή ύψους δοντιού του στάτη.



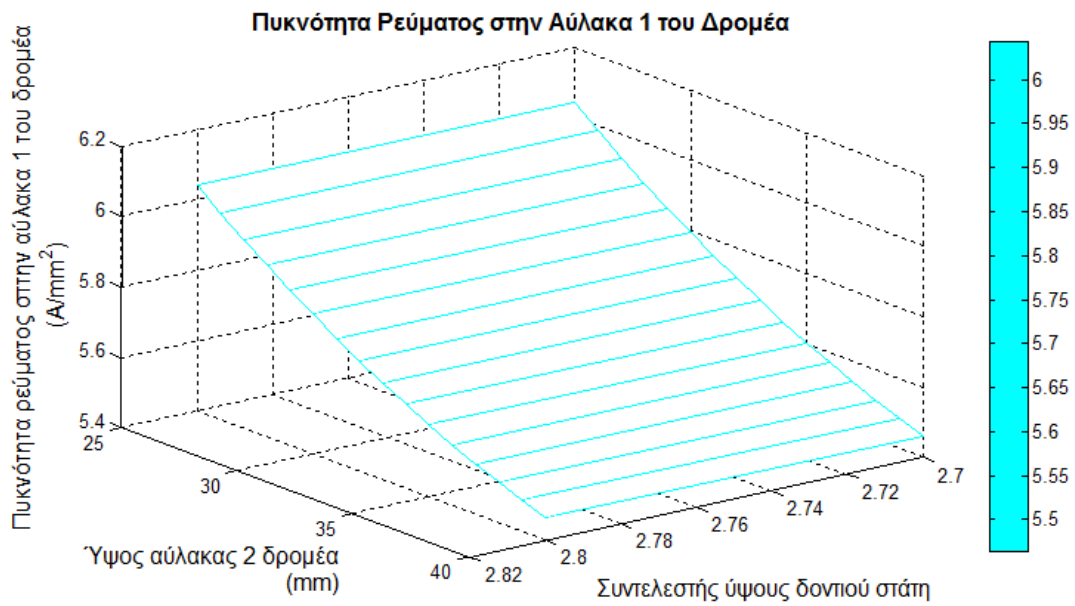
Διάγραμμα 5.77 Μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη ως συνάρτηση του μήκους δοντιού δρομέα και του συντελεστή ύψους δοντιού του στάτη.



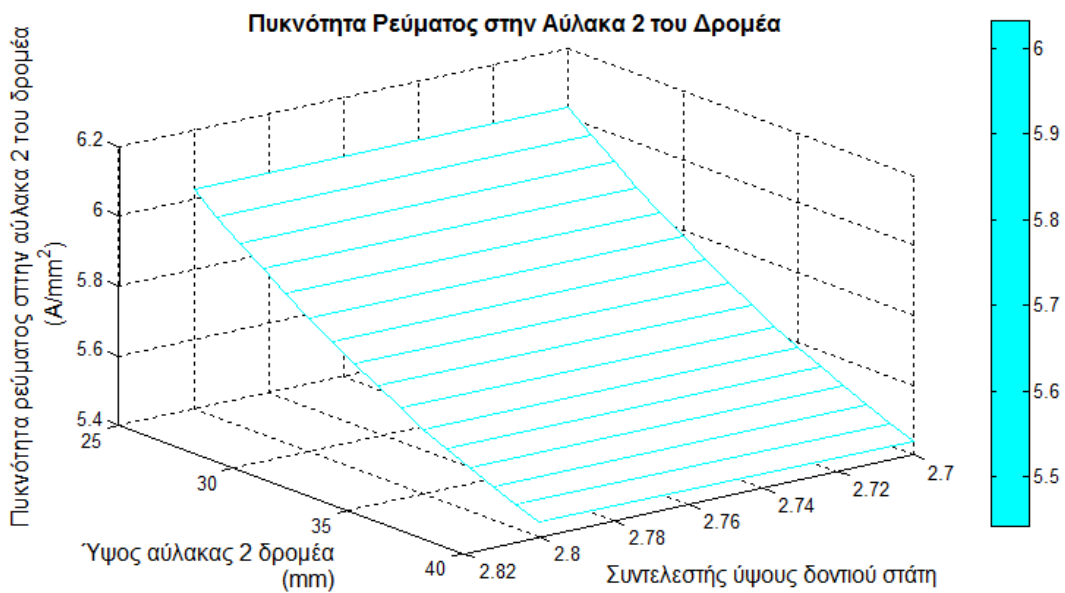
Διάγραμμα 5.78 Ροπή ως συνάρτηση του μήκους δοντιού δρομέα και του συντελεστή ύψους δοντιού του στάτη.



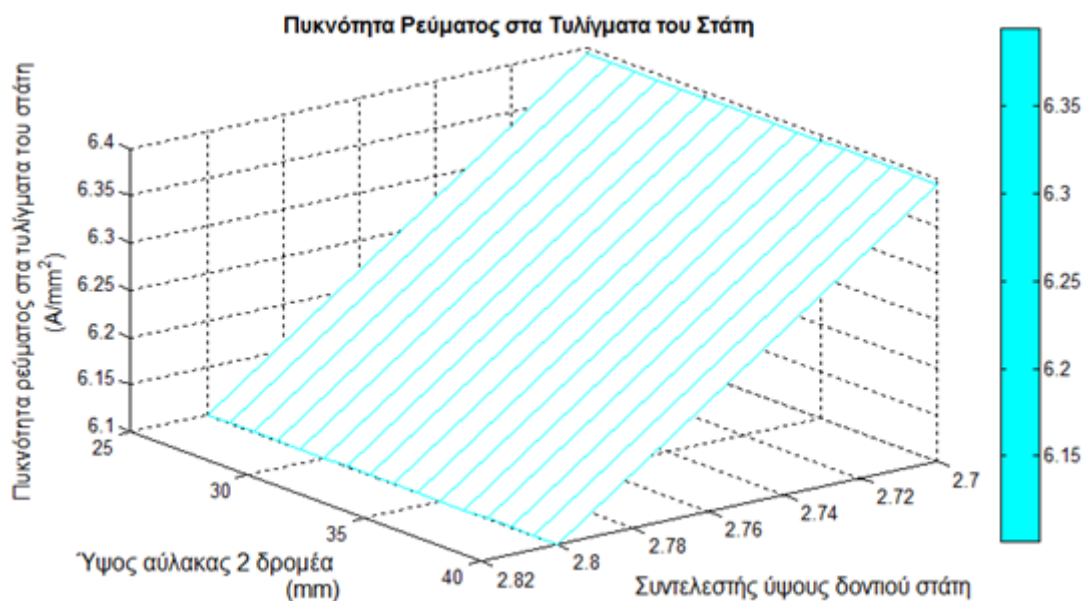
Διάγραμμα 5.79 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του στάτη ως συνάρτηση του μήκους δοντιού δρομέα και του συντελεστή ύψους δοντιού του στάτη.



Διάγραμμα 5.80 Πυκνότητα ρεύματος στην αύλακα 1 του δρομέα ως συνάρτηση του μήκους δοντιού δρομέα και του συντελεστή ύψους δοντιού του στάτη.



Διάγραμμα 5.81 Πυκνότητα ρεύματος στην αύλακα 2 του δρομέα ως συνάρτηση του μήκους δοντιού δρομέα και του συντελεστή ύψους δοντιού του στάτη



Διάγραμμα 5.82 Πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη ως συνάρτηση του μήκους δοντιού δρομέα και του συντελεστή ύψους δοντιού του στάτη

Οπότε όπως φαίνεται από τα *διαγράμματα 5.75-5.77* οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής στο δόντι του δρομέα και της μαγνητικής επαγωγής στο δόντι του στάτη διατηρούνται χαμηλές για συντελεστή ύψους δοντιού στάτη ίσο με 2.7 και μήκος αύλακας 2 δρομέα ανάμεσα σε 32 και 40mm. Από το διάγραμμα 5.82 παρατηρείται ότι η πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη δεν επηρεάζεται από το ύψος της αύλακας 2 του δρομέα.

Μετά από δοκιμές, οι τελικές διαστάσεις που επιλέχθηκαν είναι:

Πλάτος δοντιού στάτη= 23%  $\tau_p$ = 32 mm

Πλάτος δοντιού δρομέα στην περιοχή της αύλακας 2= 14%  $\tau_p$ = 19.49 mm

Διάμετρος αύλακας 1 δρομέα= 8% $\tau_p$ =11.14 mm

Συντελεστής ύψους δοντιού στάτη  $K=2,7 \Rightarrow$  Ύψος δοντιού στάτη = 45.24 mm

Μήκος αύλακας 2 δρομέα = 32mm

Η επιλογή έγινε με βάση την παραγόμενη ροπή και την ολίσθηση του κινητήρα καθώς η φόρτιση του κινητήρα διατηρείται σε φυσιολογικά επίπεδα.

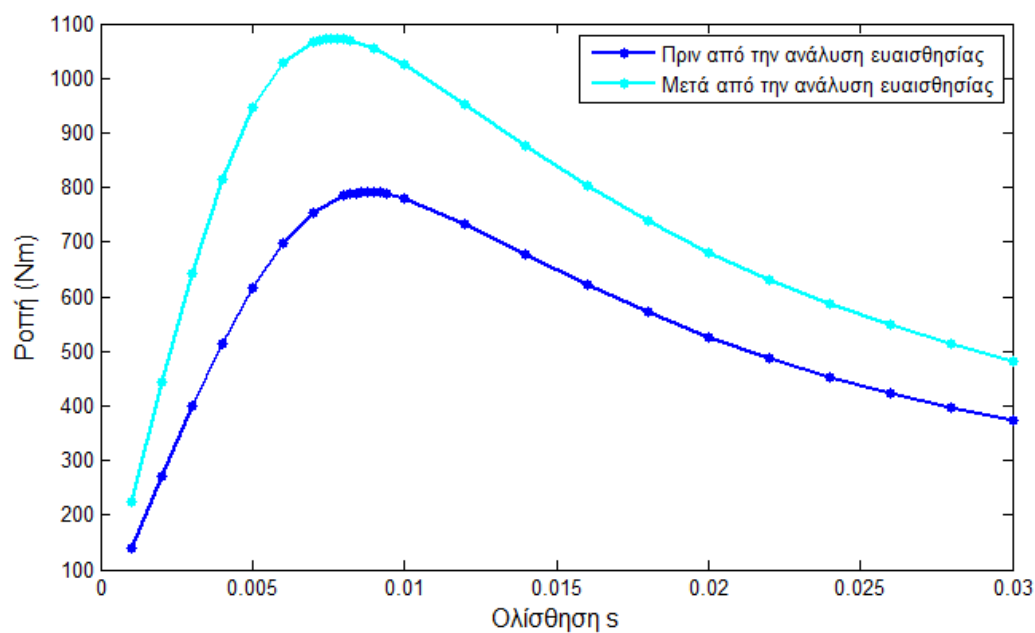
Οι βασικές γεωμετρικές παράμετροι και τα χαρακτηριστικά του κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης C πριν και μετά από την ανάλυση ευαισθησίας των γεωμετρικών παραμέτρων φαίνονται συγκεντρωτικά στον *πίνακα 5.8*:

## Κεφάλαιο 5

Γεωμετρικές Παράμετροι και Επίδοση	Αρχική Σχεδίαση	Τελική Σχεδίαση
Ονομαστική Ροπή	524 Nm	814 Nm
Μέγιστη Ροπή	792 Nm	1073 Nm
Ονομαστική Ολίσθηση	0.0044	0.0038
Ονομαστική Ταχύτητα	1493.4 rpm	1494.3 rpm
Πλάτος δοντιού σάτη	18.7 mm	32.0 mm
Ύψος δοντιού σάτη	59.4 mm	45.8 mm
Διάμετρος αύλακας 1 δρομέα	16.1 mm	11.1 mm
Πλάτος δοντιού δρομέα- αύλακα 2	19.3 mm	19.5 mm
Ύψος δοντιού δρομέα- αύλακα 2	34.6 mm	32 mm
Εξωτερική διάμετρος σάτη	299 mm	276 mm

Πίνακας 5.8 Χαρακτηριστικά του κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης C πριν και μετά από την ανάλυση ευαισθησίας.

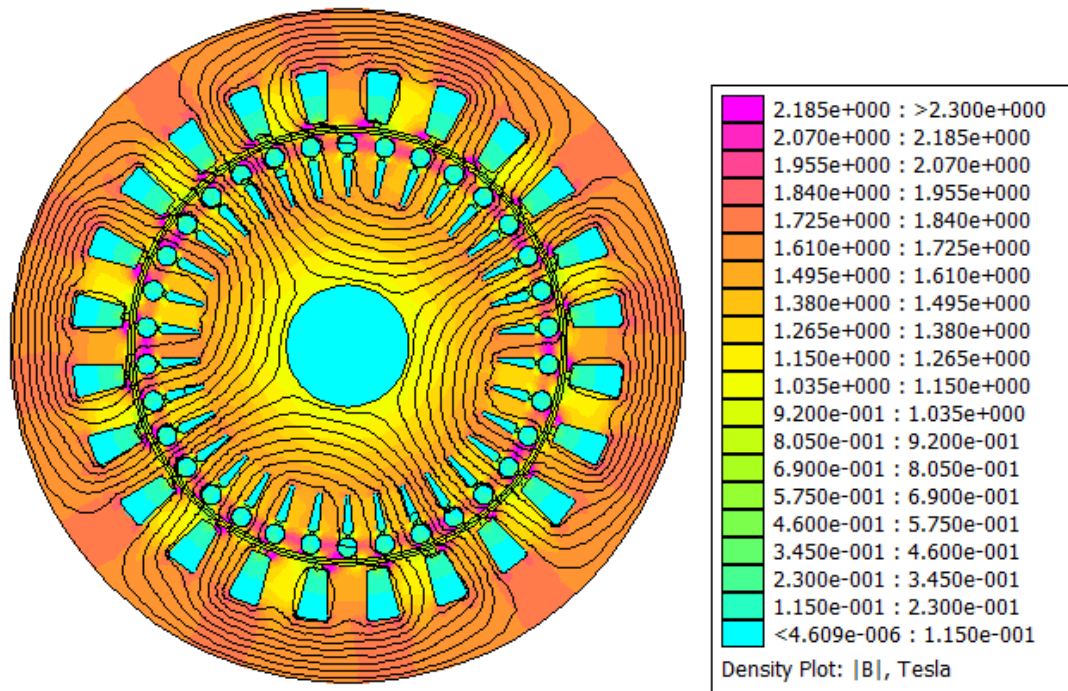
Από αυτές τις διαστάσεις η καμπύλη ροπής ολίσθησης που προκύπτει φαίνεται στο *διάγραμμα 5.83* συγκριτικά με την καμπύλη ροπής- ολίσθησης του κινητήρα πριν από την ανάλυση ευαισθησίας.



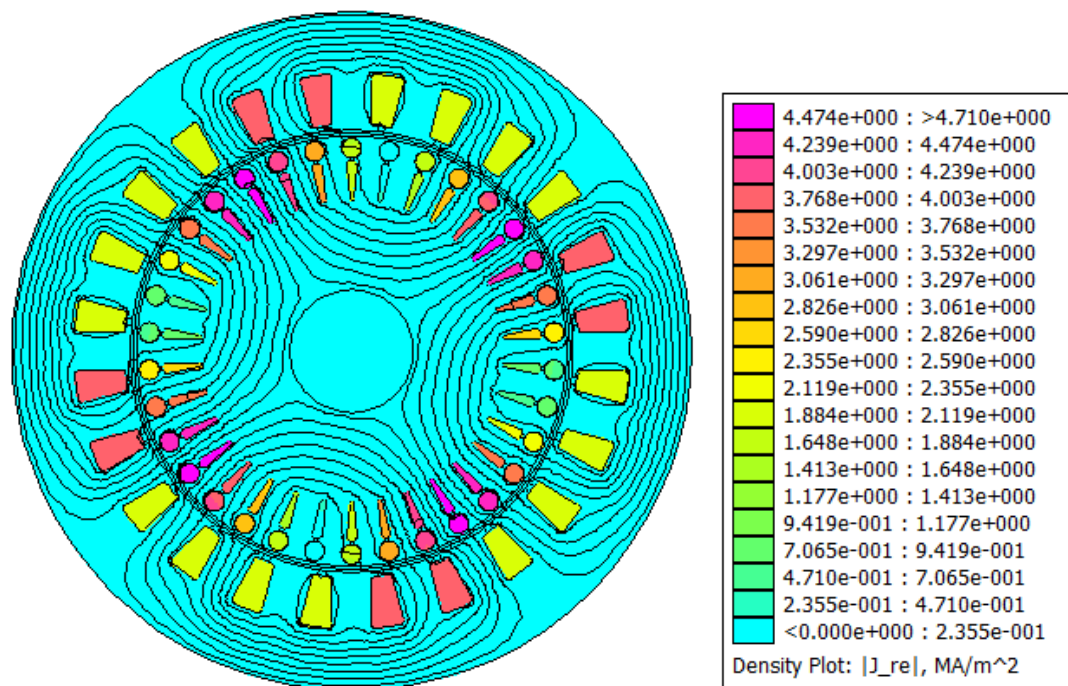
Διάγραμμα 5.83 Καμπύλη ροπής-ολίσθησης του κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης C πριν και μετά από την ανάλυση ευαισθησίας.

Η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής και της πυκνότητας ρεύματος στην ολίσθηση μέγιστης ροπής φαίνεται στο *σχήμα 5.9*.





(α)



(β)

Σχήμα 5.9 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης C στην ολίσθηση μέγιστης ροπής: (α) Μαγνητική επαγωγή και (β) πυκνότητα ρεύματος.

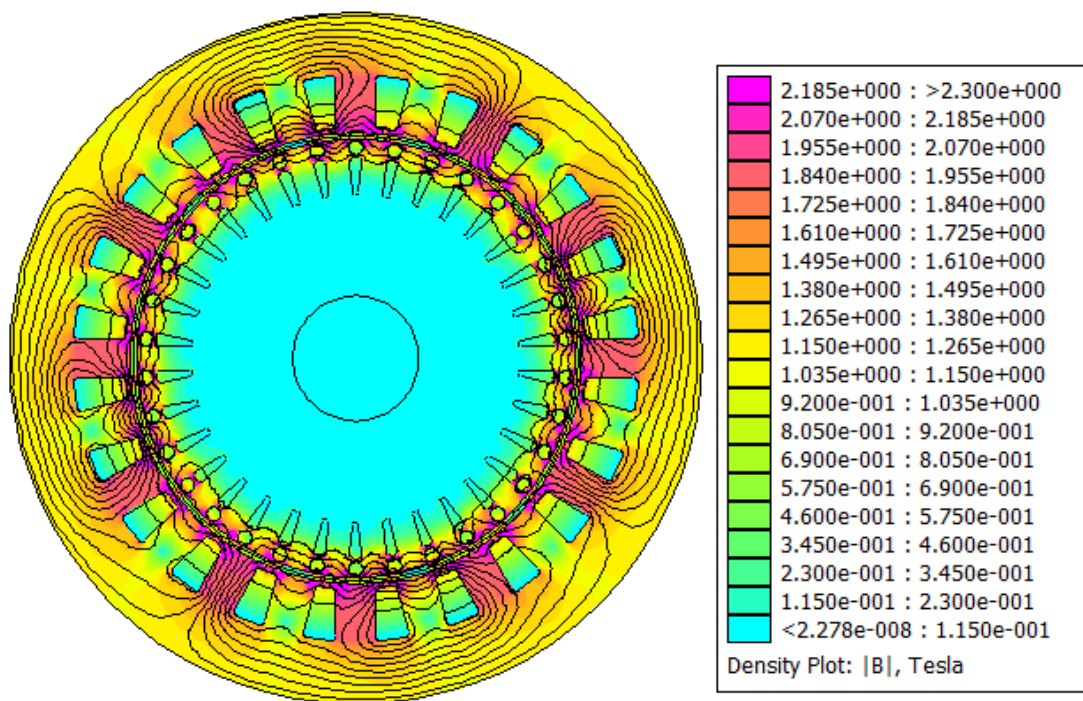
Μετά από τη γεωμετρική βελτιστοποίηση του κινητήρα η ολίσθηση μέγιστης ροπής μειώθηκε από 0.0088 σε 0.0076 και άρα η ονομαστική ολίσθηση μειώθηκε από 0.0044

## Κεφάλαιο 5

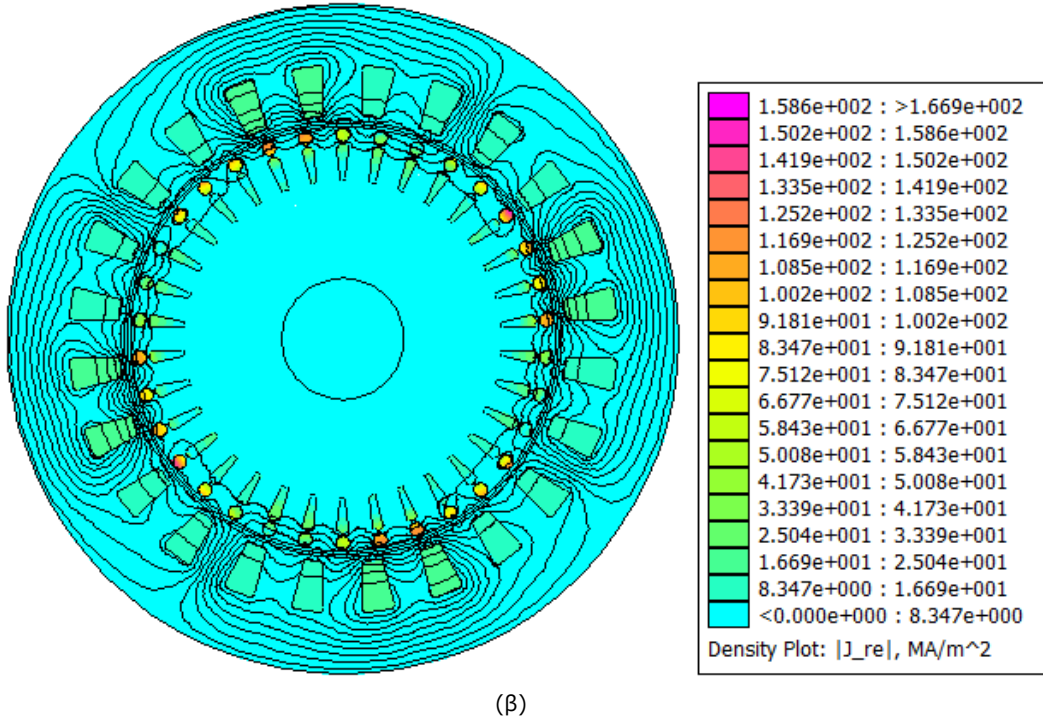
σε 0.0038. Επομένως η ονομαστική ταχύτητα του βελτιστοποιημένου κινητήρα είναι 1494rpm.

Επιπλέον γεωμετρική βελτισποίηση είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της μέγιστης ροπής του κινητήρα από 792 Nm σε 1073 Nm, δηλαδή κατά 26.2%, της ονομαστικής ροπής του κινητήρα από 565Nm σε 780Nm, δηλαδή κατά 27.6%.

Για να ελεγχθεί η ροπή εκκίνησης και η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής και της πυκνότητας ρεύματος του κινητήρα κατά την εκκίνηση, τίθεται η ολίσθηση ίση με 1 και το ρεύμα ίσο με το ρεύμα εκκίνησης δηλαδή πέντε φορές το ονομαστικό ρεύμα. Ο κινητήρας αναλύεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Η ροπή εκκίνησης του κινητήρα προέκυψε ίση με 773.27 Nm.



(a)



Σχήμα 5.10 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης C κατά την εκκίνηση: (α) Μαγνητική επαγωγή και (β) πυκνότητα ρεύματος.

### 5.2.2.2 Απώλειες και απόδοση τελικής γεωμετρίας κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης C

Στην ολίσθηση μέγιστης ροπής υπολογίζονται οι απώλειες του κινητήρα όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.4 και προκύπτει:

Απώλειες χαλκού στάτη  $P_{copper\_stator} = 2459.7 \text{ W}$

Απώλειες χαλκού δρομέα  $P_{copper\_rotor} = 1864 \text{ W}$

Απώλειες σιδήρου στάτη και δρομέα  $P_{fe} = 53.21 \text{ W}$

Για τις απώλειες τριβών ισχύει:

$$m_{rotor} = S_{rotor} L \rho_{iron} = 0,0774117 \text{ m}^3 0,2228 \text{ m} 7874 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 135.8 \text{ kg}$$

$$m_{slots} = S_{slots} L \rho_{aluminum} = 0,0103345 \text{ m}^3 0,2228 \text{ m} 2720 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 6.26 \text{ kg}$$

$$P_{\tau_{\rho\beta}} = \frac{K(m_{rotor} + m_{slots})n_r}{1000} = 635.75 \text{ W}$$

Για τις απώλειες ανεμισμού προκύπτει:

$$P_{ανεμισμού} = \frac{L n_r^3 (2 R_{rototout})^3}{10^6} = 31.69 \text{ W}$$

Υπολογίζοντας την ισχύ εξόδου του κινητήρα μέσω της παραγόμενης ροπής:

$$P_{out} = 167.9 \text{ kW}$$

Οπότε μπορεί να γίνει μια πρώτη εκτίμηση της απόδοσης του κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης C:

$$Efficiency(\%) = \frac{T \omega}{T \omega + P_{copper\_stator} + P_{copper\_rotor} + P_{fe} + P_{\tau\rho i\beta} + P_{ανεμισμού}} 100 = 97.08 \%$$

Οι απώλειες και η απόδοση του κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης C πριν και μετά από την ανάλυση ευαισθησίας συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

	Αρχική Σχεδίαση	Τελική Σχεδίαση
<b>Μέγιστη ισχύς εξόδου (<math>P_{out}</math>)</b>	123.8 kW	169.7 kW
<b>Απώλειες χαλκού στάτη</b>	1892.5 W	2459.7 W
<b>Απώλειες χαλκού δρομέα</b>	1624 W	1864 W
<b>Απώλειες σιδήρου</b>	55.89 W	53.21 W
<b>Απόδοση</b>	96.69%	97.08 %

Πίνακας 5.9 Απώλειες και απόδοση κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης C πριν και μετά από την ανάλυση ευαισθησίας.

### 5.2.3 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης D

Η ολίσθηση μέγιστης ροπής όπως φαίνεται στο *διάγραμμα 5.2* είναι ίση με 0.012. Η ανάλυση ευαισθησίας των γεωμετρικών παραμέτρων γίνεται σε αυτή την ολίσθηση.

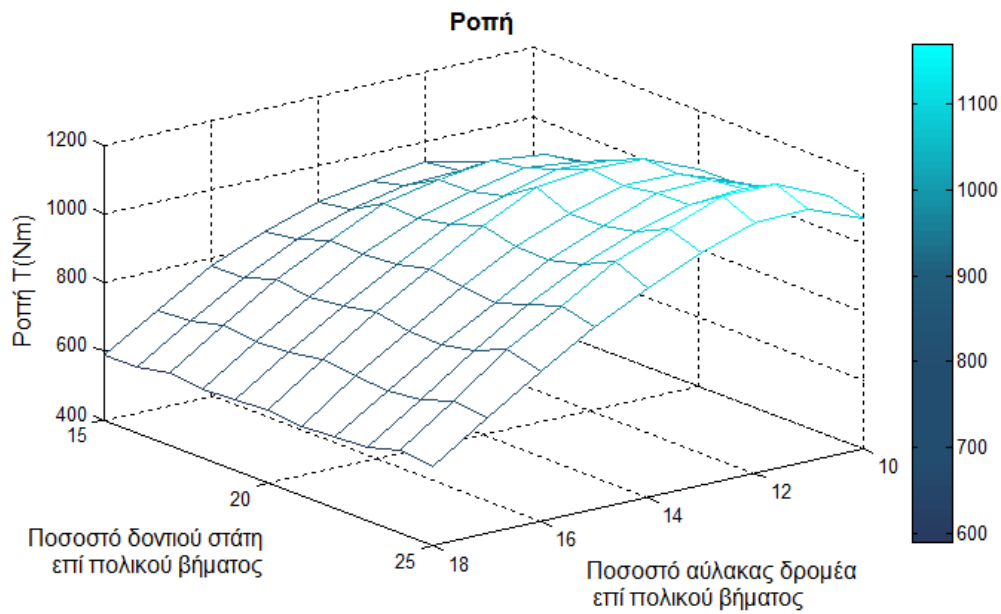
#### 5.2.3.1 Μεταβολή γεωμετρικών παραμέτρων κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης D

##### Πλάτος δοντιού στάτη και διάμετρος αύλακας δρομέα

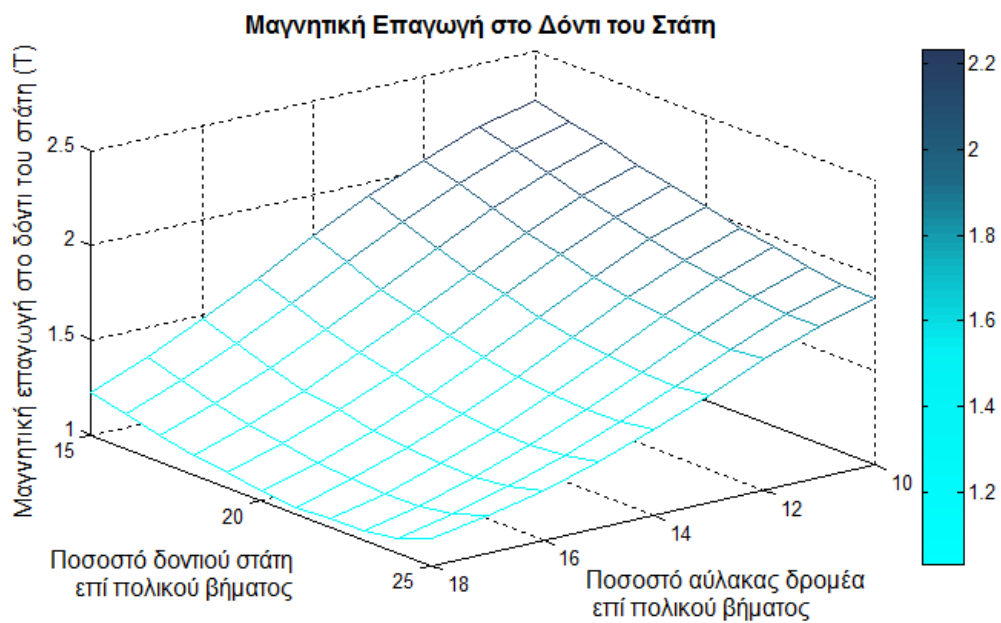
Αρχικά, μεταβάλλεται το πλάτος των δοντιών στάτη καθώς και η διάμετρος αύλακας του δρομέα ως ποσοστό του πολικού βήματος  $\tau_p$ . Το πλάτος δοντιού στάτη μεταβάλλεται από 15% έως 25% ενώ το πλάτος δοντιού δρομέα από 10% έως 18% του πολικού βήματος.

Οι προδιαγραφές που λαμβάνονται αρχικά υπόψιν για τον προσδιορισμό του βέλτιστου ποσοστού είναι η απαίτηση μέγιστης ροπής μεγαλύτερης από 1000Nm καθώς και οι περιορισμοί για την μαγνητική επαγωγή στα δόντια στάτη και δρομέα.

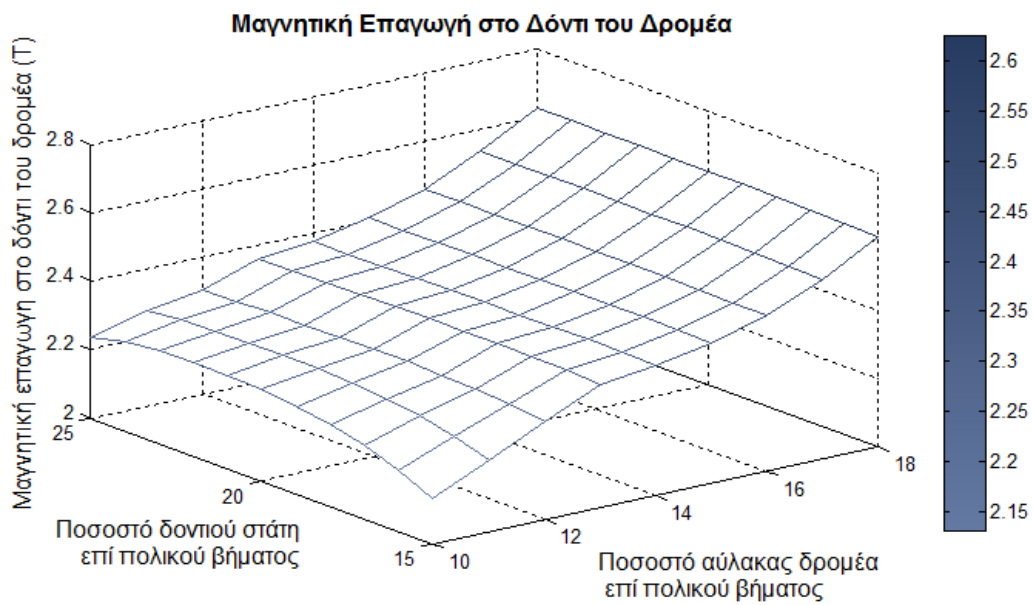
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συνοψίζονται στα *διαγράμματα 5.84-5.91*.



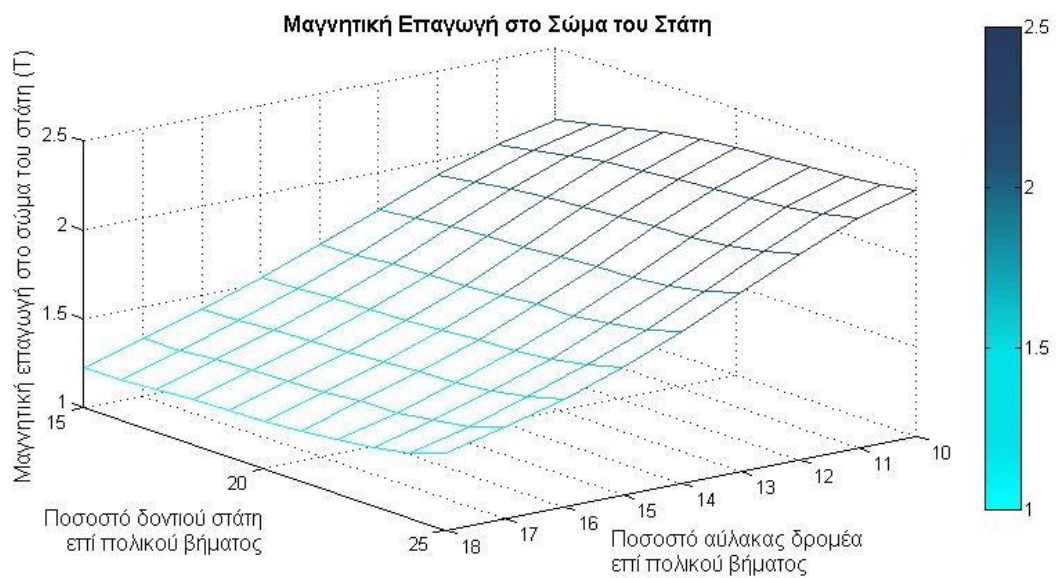
Διάγραμμα 5.84 Ροπή ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και διαμέτρου αύλακας δρομέα επί του πολικού βήματος.



Διάγραμμα 5.85 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του στάτη ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και διαμέτρου αύλακας δρομέα επί του πολικού βήματος.

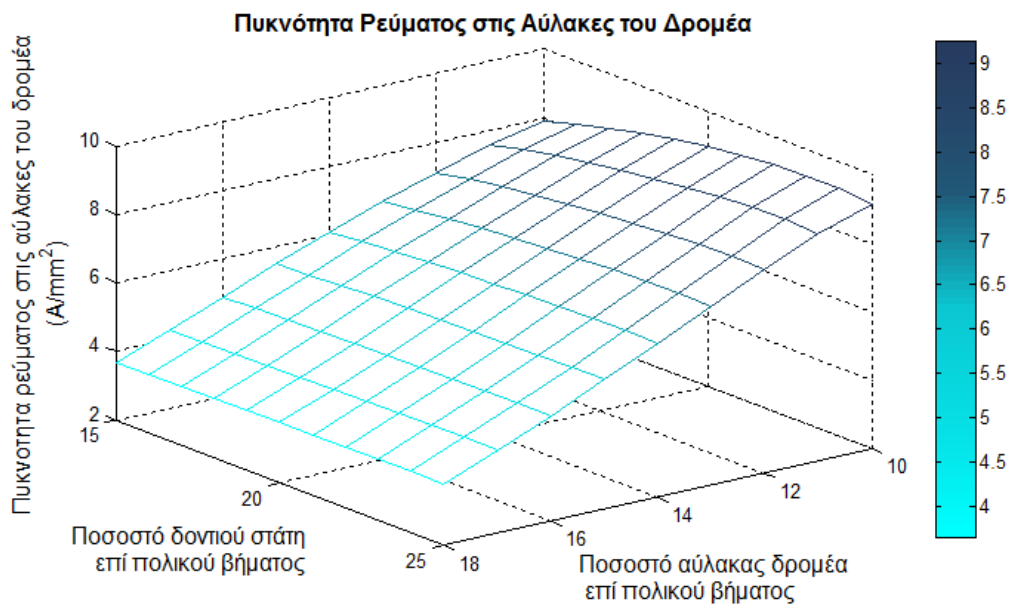


Διάγραμμα 5.86 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και διαμέτρου αύλακας δρομέα επί του πολικού βήματος.

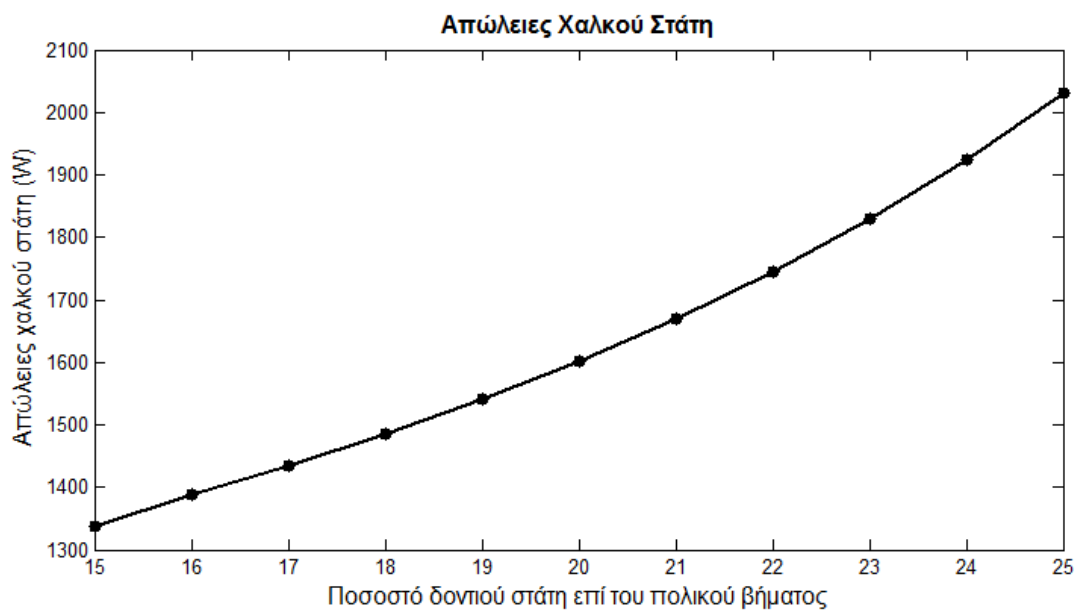


Διάγραμμα 5.87 Μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και διαμέτρου αύλακας δρομέα επί του πολικού βήματος.

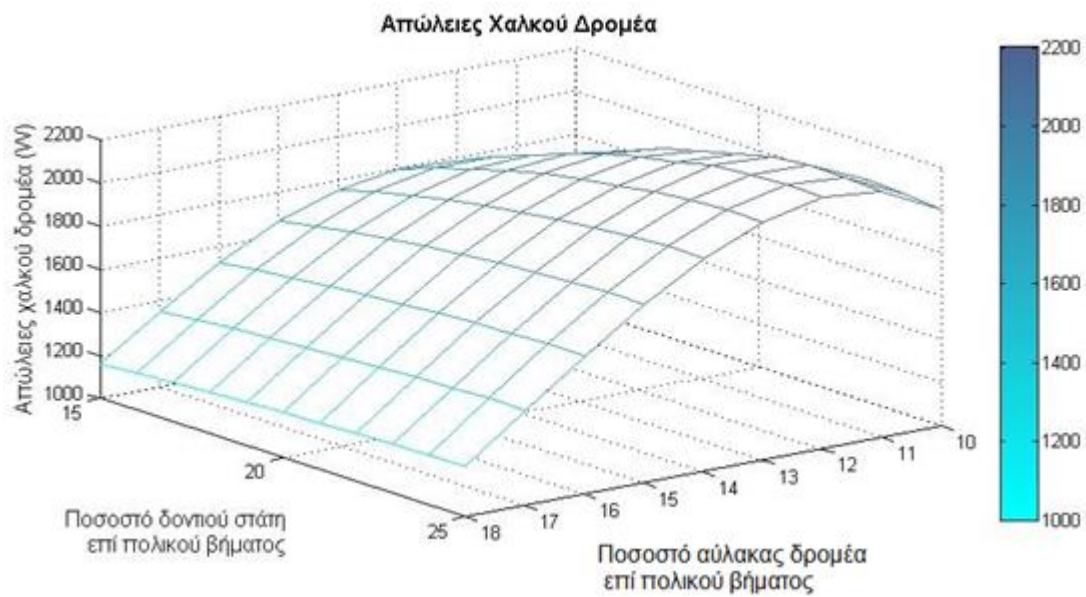




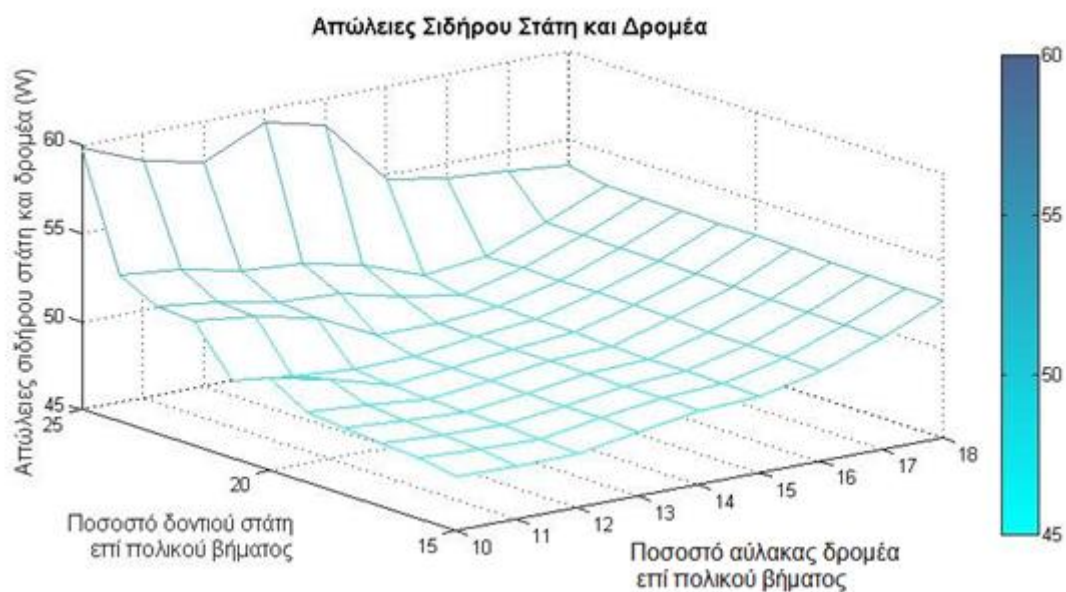
Διάγραμμα 5.88 Πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες του δρομέα ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και διαμέτρου αύλακας δρομέα επί του πολικού βήματος.



Διάγραμμα 5.89 Απώλειες χαλκού στάτη ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και διαμέτρου αύλακας δρομέα επί του πολικού βήματος.



Διάγραμμα 5.90 Απώλειες χαλκού δρομέα ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και διαμέτρου αύλακας δρομέα επί του πολικού βήματος.



Διάγραμμα 5.91 Απώλειες σιδήρου στάτη και δρομέα ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και διαμέτρου αύλακας δρομέα επί του πολικού βήματος.

Οι τιμές ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και διαμέτρου αύλακας δρομέα που ικανοποιούν τον περιορισμό της απαιτούμενης ροπής και δεν οδηγούν σε αυξημένη μαγνητική επαγωγή στο δόντι του στάτη και πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες του δρομέα συνοψίζονται στον *πίνακα 5.10*.



Ποσοστό(%) Δοντιού/Αύλακας	$B_{st}$ (T)	$J_{rt}$ (A/mm <sup>2</sup> )	Ροπή (Nm)
		14	
20	1.4878	6.3968	935.9
23	1.4176	6.4903	933.5
24	1.4218	6.5001	980.9
25	1.4539	6.4937	937.6

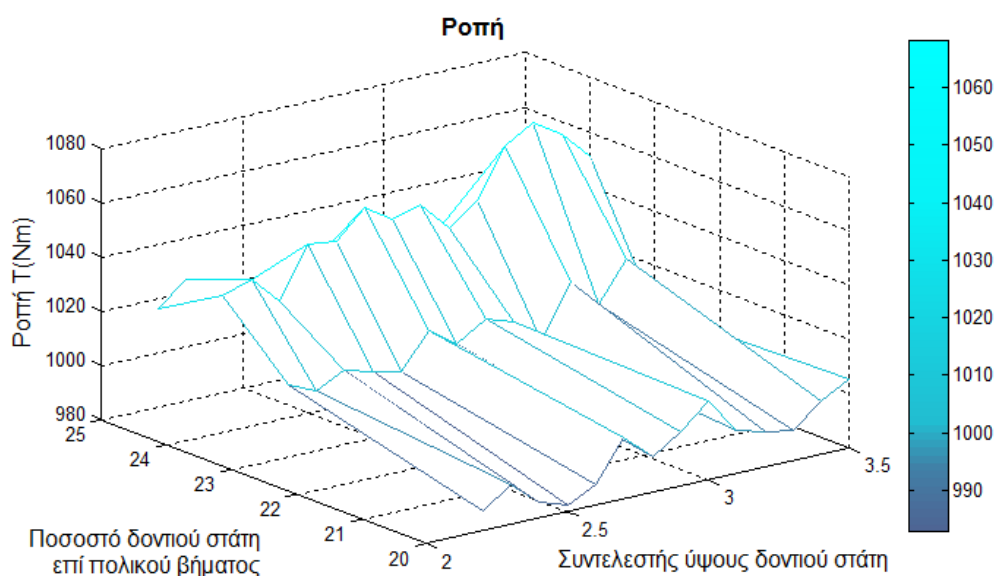
Πίνακας 5.10 Περιοχή τιμών ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη και διαμέτρου αύλακας δρομέα επί του πολικού βήματος για διατήρηση της μαγνητικής επαγωγής στο δόντι του στάτη και της πυκνότητας ρεύματος στις αύλακες του δρομέα σε χαμηλά επίπεδα.

όπου  $B_{st}$  είναι η μαγνητική επαγωγή στο δόντι του στάτη και  $J_{rt}$  είναι η πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες του δρομέα.

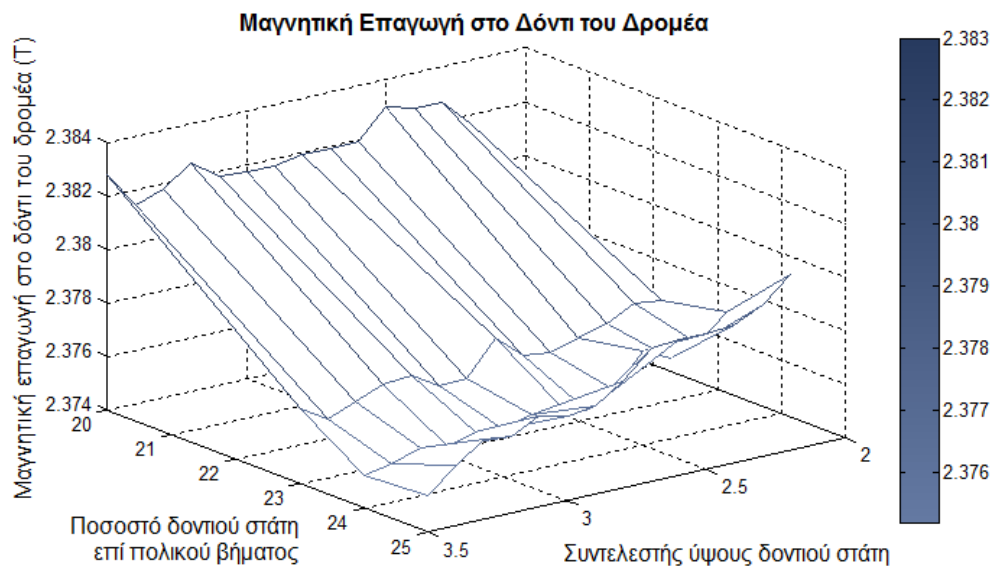
Σε όλη τη διάρκεια των προσομοιώσεων, η πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη παραμένει χαμηλή. Η μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη είναι ελαφρώς αυξημένη ωστόσο εκτιμάται ότι θα μειωθεί με τη μείωση του ύψους δοντιού του στάτη. Η μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα είναι αρκετά αυξημένη, αυτό απεικονίζεται και στις απώλειες σιδήρου στάτη και δρομέα όπως φαίνεται στο *διάγραμμα 5.91*. Ωστόσο οι απώλειες παραμένουν χαμηλές και έτσι αυτές οι τιμές γίνονται αποδεκτές.

### Ύψος δοντιού στάτη

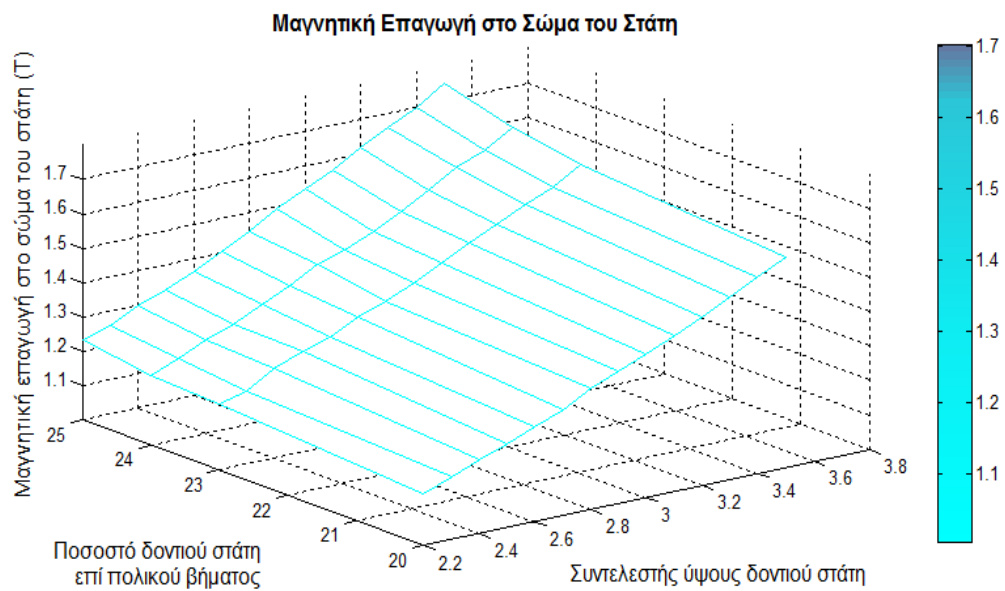
Για τις τιμές του *πίνακα 5.10* μεταβάλλεται ο συντελεστής ύψους δοντιού στάτη από 2.2 έως 3.5 και καταγράφονται τα αποτελέσματα:



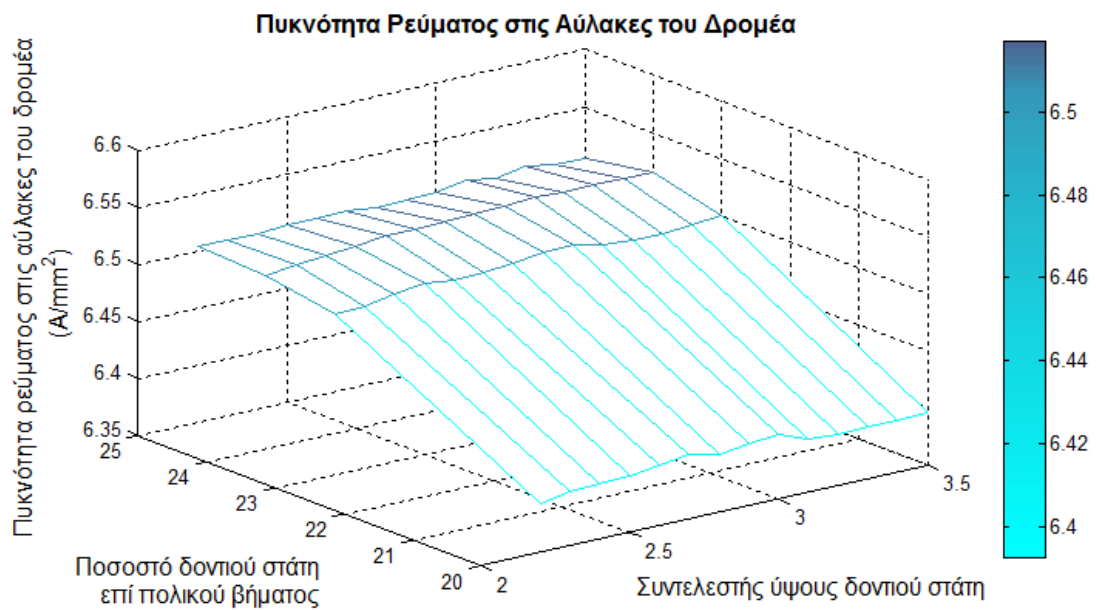
Διάγραμμα 5.92 Ροπή ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη επί του πολικού βήματος και τον συντελεστή ύψους δοντιού του στάτη



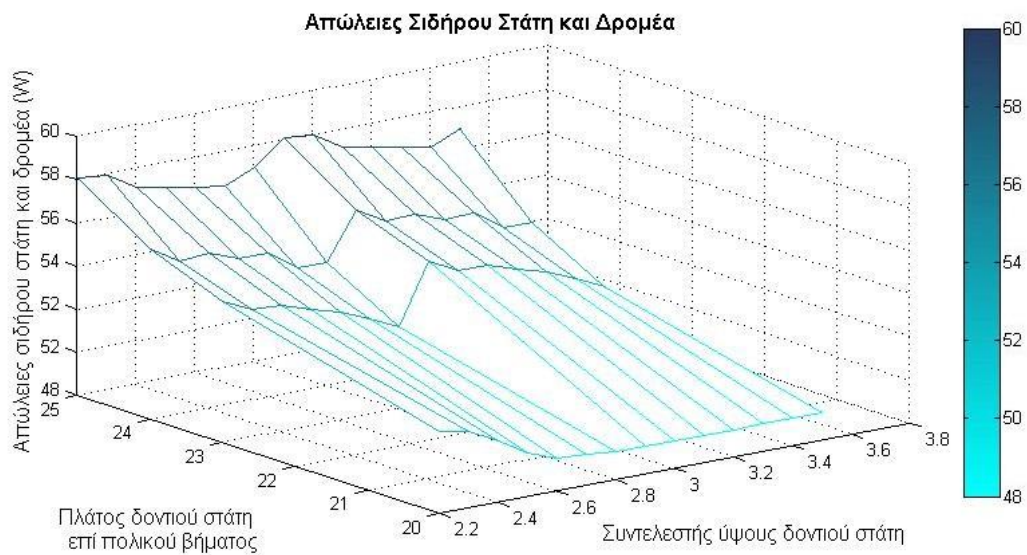
Διάγραμμα 5.93 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη επί του πολικού βήματος και τον συντελεστή ύψους δοντιού του στάτη



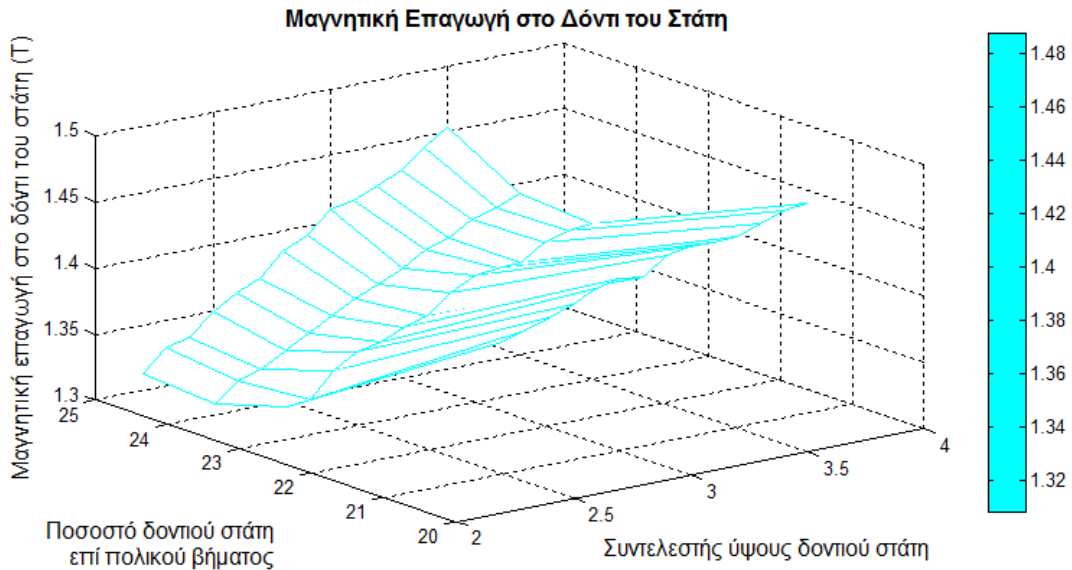
Διάγραμμα 5.94 Μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη επί του πολικού βήματος και τον συντελεστή ύψους δοντιού του στάτη



Διάγραμμα 5.95 Πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες του δρομέα ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη επί του πολικού βήματος και τον συντελεστή ύψους δοντιού του στάτη



Διάγραμμα 5.96 Απώλειες σιδήρου στάτη και δρομέα ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη επί του πολικού βήματος και τον συντελεστή ύψους δοντιού του στάτη.



Διάγραμμα 5.97 Μαγνητική επαγωγή στο δόντι του στάτη ως συνάρτηση του ποσοστού πλάτους δοντιού στάτη επί του πολικού βήματος και τον συντελεστή ύψους δοντιού του στάτη.

Επομένως η μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη και η πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του δρομέα διατηρούνται σε αρκετά χαμηλά επίπεδα και οι απαιτήσεις ροπής ικανοποιούνται για πλάτος δοντιού ίσο με 23% του πολικού βήματος και για συντελεστή ύψους δοντιού στάτη ίσο με 2.2 έως 3.4 όπως φαίνεται στα διαγράμματα 5.92, 5.94, 5.95.

Σε όλο το εύρος των τιμών η μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα παραμένει υψηλή (διάγραμμα 5.93). Μείωσή της θα μπορούσε να επιτευχθεί μειώνοντας τη διάμετρο αύλακας του δρομέα. Κάτι τέτοιο όμως δεν είναι εφικτό όπως φαίνεται από τις τιμές που λαμβάνει η πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες του δρομέα. Οι τιμές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών γίνονται ωστόσο αποδεκτές καθώς όπως φαίνεται από το διάγραμμα 5.96 οι απώλειες σιδήρου στάτη και δρομέα παραμένουν χαμηλές.

Έπειτα από δοκιμές επιλέγονται οι ακόλουθες τιμές για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα:

$$\text{Πλάτος δοντιού στάτη} = 23\%T_p = 32 \text{ mm}$$

$$\text{Διάμετρος αύλακας δρομέα} = 14\%T_p = 19.49 \text{ mm}$$

$$\text{Συντελεστής ύψους δοντιού στάτη} = 2,7 \Rightarrow \text{Ύψος δοντιού στάτη} = 45.8 \text{ mm}$$

Οι βασικές γεωμετρικές παράμετροι και τα χαρακτηριστικά του κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης D πριν και μετά από την ανάλυση ευαισθησίας των γεωμετρικών παραμέτρων φαίνονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 5.11:

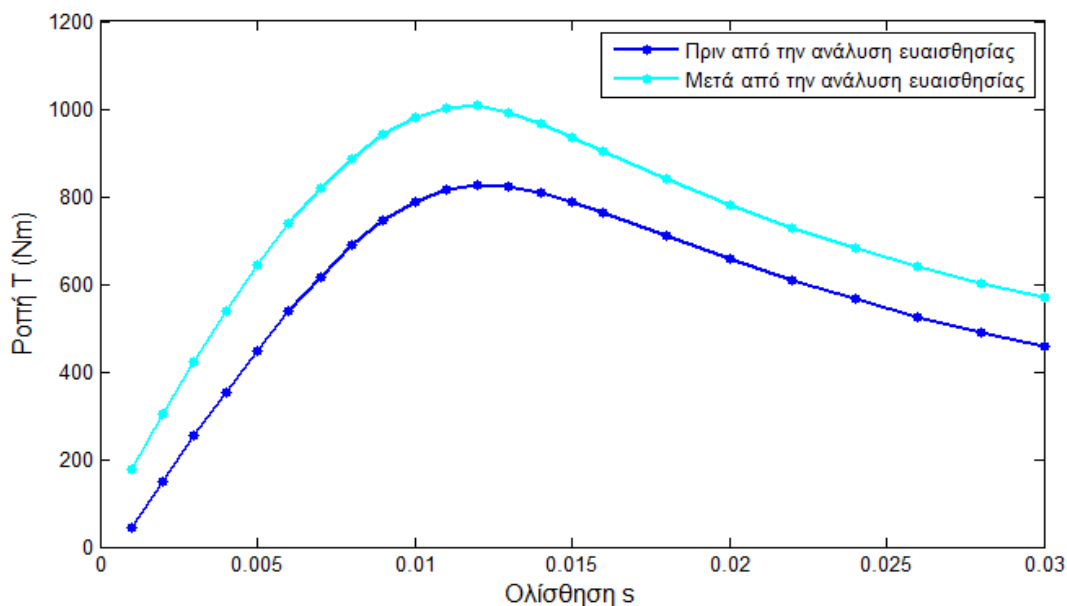
## Κεφάλαιο 5

Γεωμετρικές Παράμετροι και Επίδοση	Αρχική Σχεδίαση	Τελική Σχεδίαση
Ονομαστική Ροπή	537 Nm	737Nm
Μέγιστη Ροπή	826 Nm	1007Nm
Ονομαστική Ολίσθηση	0.006	0.006
Ονομαστική Ταχύτητα	1491 rpm	1491 rpm
Πλάτος δοντιού σάτη	18.7 mm	32.0 mm
Ύψος δοντιού σάτη	59.4 mm	45.8 mm
Διάμετρος αύλακας δρομέα	19.2 mm	19.5 mm
Εξωτερική διάμετρος σάτη	299 mm	270 mm

Πίνακας 5.11 Χαρακτηριστικά του κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης D πριν και μετά από την ανάλυση ευαισθησίας.

Αυτή η επιλογή των γεωμετρικών παραμέτρων έγινε με σκοπό τη μείωση της μαγνητικής επαγωγής στο σώμα του σάτη ώστε να μειωθούν όσο γίνεται οι απώλειες σιδήρου στο σάτη χωρίς όμως να αυξηθεί η πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του δρομέα.

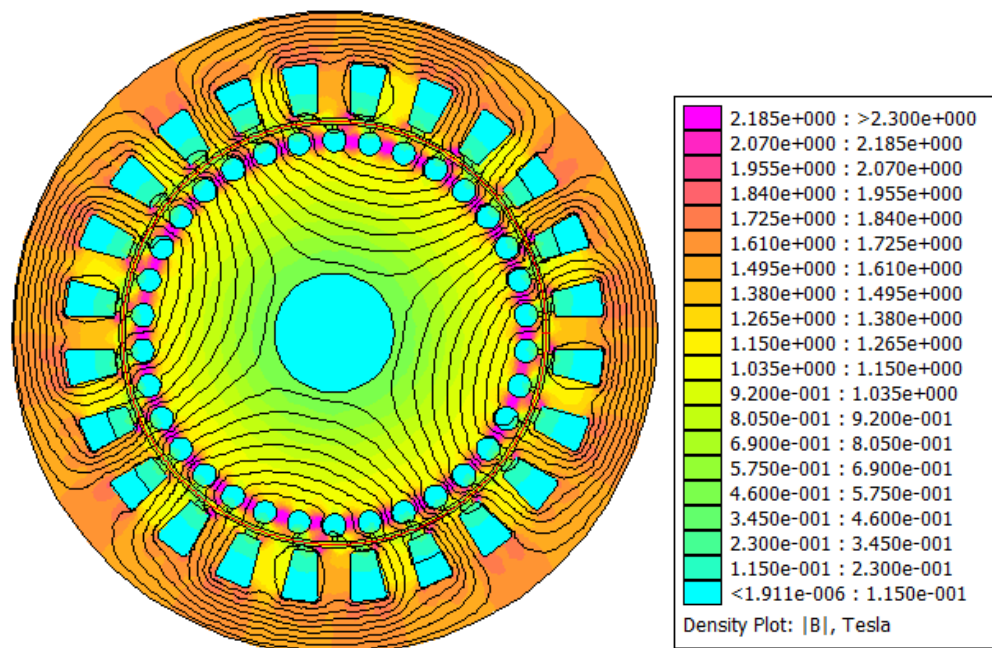
Η καμπύλες ροπής – ολίσθησης του κινητήρα πριν και μετά την ανάλυση ευαισθησίας παρουσιάζονται συγκριτικά στο διάγραμμα 5.98.



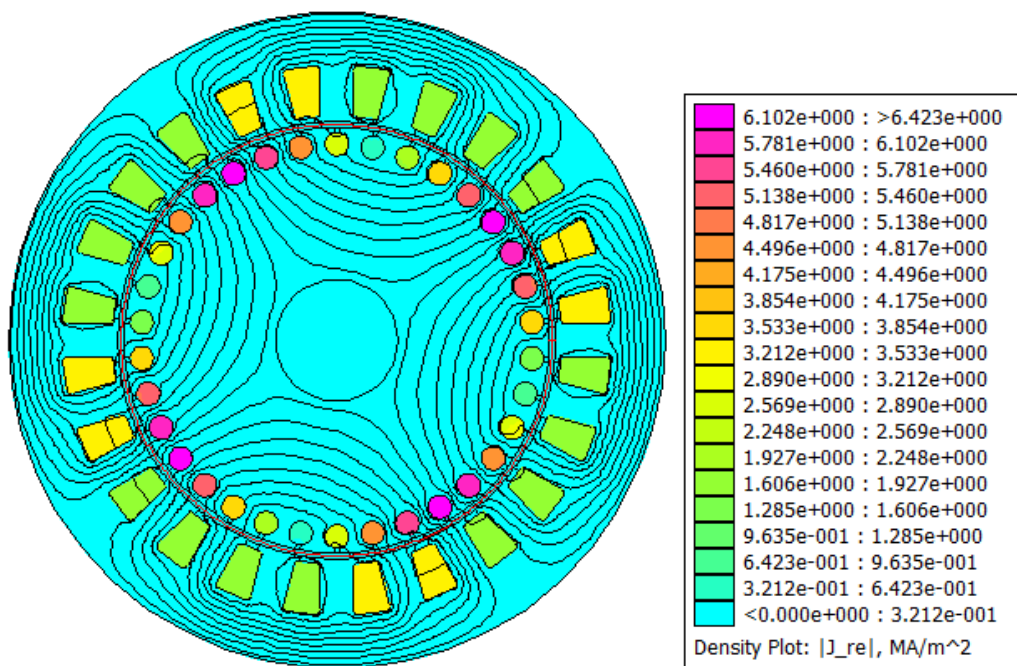
Διάγραμμα 5.98 Καμπύλη ροπής-ολίσθησης του κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης D πριν και μετά από την ανάλυση ευαισθησίας.

Με την ανάλυση ευαισθησίας η μέγιστη ροπή αυξήθηκε από 825.6 Nm σε 1007 Nm, δηλαδή κατά 18% ενώ η ολίσθηση μέγιστης ροπής παρέμεινε ίση με 0.012. Η ονομαστική ροπή αυξήθηκε από 537 σε 837 Nm, δηλαδή κατά 27.1%. Με την ολίσθηση αυτή επιτυγχάνεται η επιθυμητή ονομαστική ταχύτητα του κινητήρα. Η

κατανομή της μαγνητικής επαγωγής και της πυκνότητας ρεύματος του κινητήρα στην ολίσθηση μέγιστης ροπής φαίνεται στο *σχήμα 5.9*.



(a)



(β)

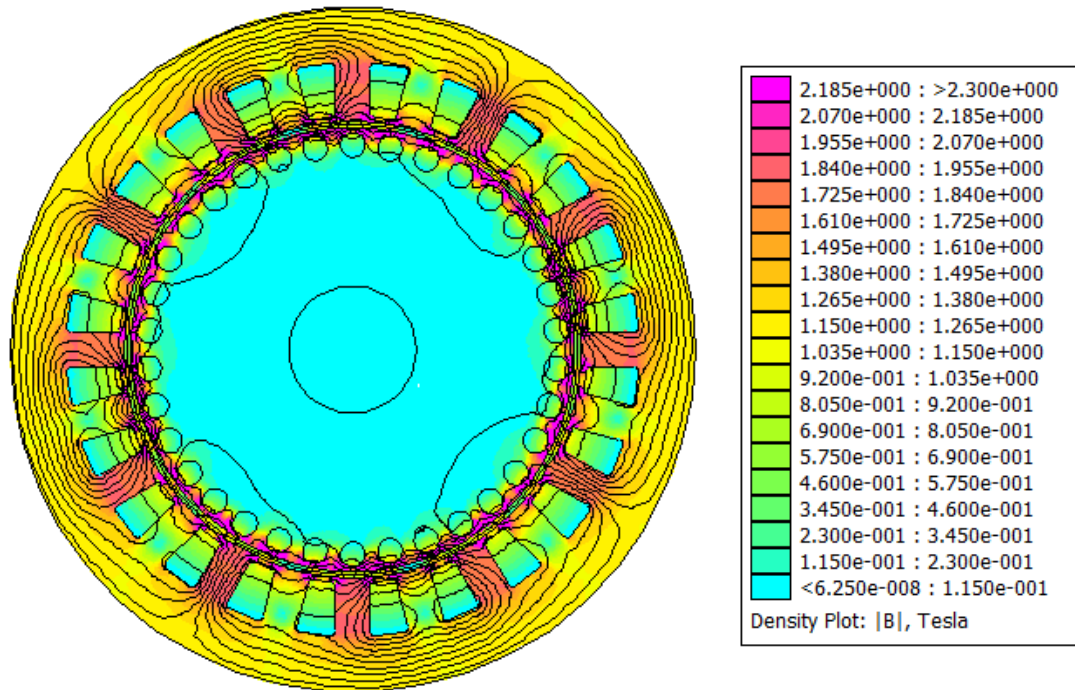
*Σχήμα 5.11 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης D στην ολίσθηση μέγιστης ροπής: (α) Μαγνητική επαγωγή και (β) πυκνότητα ρεύματος.*

Για να ελεγχθεί η ροπή εκκίνησης του κινητήρα και η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής και της πυκνότητας ρεύματος του κινητήρα κατά την εκκίνηση, τίθεται η

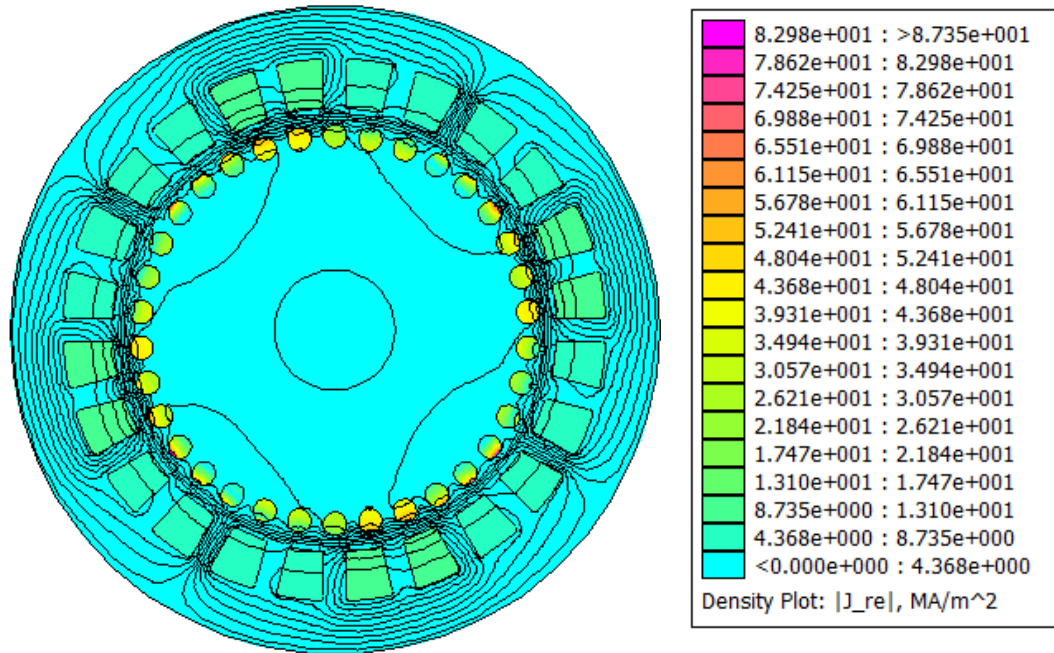


## Κεφάλαιο 5

ολίσθηση ίση με 1 και το ρεύμα ίσο με το ρεύμα εκκίνησης δηλαδή πέντε φορές το ονομαστικό ρεύμα. Ο κινητήρας αναλύεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και τα αποτελέσματα φαίνονται στο *σχήμα 5.12*. Η ροπή εκκίνησης του κινητήρα προέκυψε ίση με 797 Nm.



(a)



(β)

Σχήμα 5.12 Κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης D κατά την εκκίνηση: (α) Μαγνητική επαγωγή και (α) πυκνότητα ρεύματος .

### 5.2.3.2 Απώλειες και απόδοση τελικής γεωμετρίας κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης D

Στην ολίσθηση μέγιστης ροπής υπολογίζονται οι απώλειες του κινητήρα όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.4 και προκύπτει:

Απώλειες χαλκού στάτη  $P_{copperstator} = 2324.5 W$

Απώλειες χαλκού δρομέα  $P_{copperrotor} = 1984.9 W$

Απώλειες σιδήρου στάτη και δρομέα  $P_{fe} = 54.17 W$

Για τις απώλειες τριβών ισχύει:

$$m_{rotor} = S_{rotor} L \rho_{iron} = 0,0773527 m^3 0,2228 m 7874 \frac{kg}{m^3} = 135.7 kg$$

$$m_{slots} = S_{slots} L \rho_{aluminum} = 0,0100786 m^3 0,2228 m 2720 \frac{kg}{m^3} = 6.108 kg$$

$$P_{τριβ} = \frac{K(m_{rotor} + m_{slots})n_r}{1000} = 632.65 W$$

Για τις απώλειες ανεμισμού προκύπτει:

$$P_{ανεμισμού} = \frac{L n_r^3 (2 R_{rototout})^3}{10^6} = 31.69 W$$

Υπολογίζοντας την ισχύ εξόδου του κινητήρα μέσω της παραγόμενης ροπής:



$$P_{out} = 159.1 \text{ kW},$$

η απόδοση της τελικής γεωμετρίας του κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης D μπορεί να εκτιμηθεί:

$$Efficiency(\%) = \frac{T \omega}{T \omega + P_{copper\,stator} + P_{copper\,rotor} + P_{fe} + P_{τριβ} + P_{ανεμισμού}} 100 = 95.94 \%$$

οπότε συνοπτικά πριν και μετά από την ανάλυση ευαισθησίας:

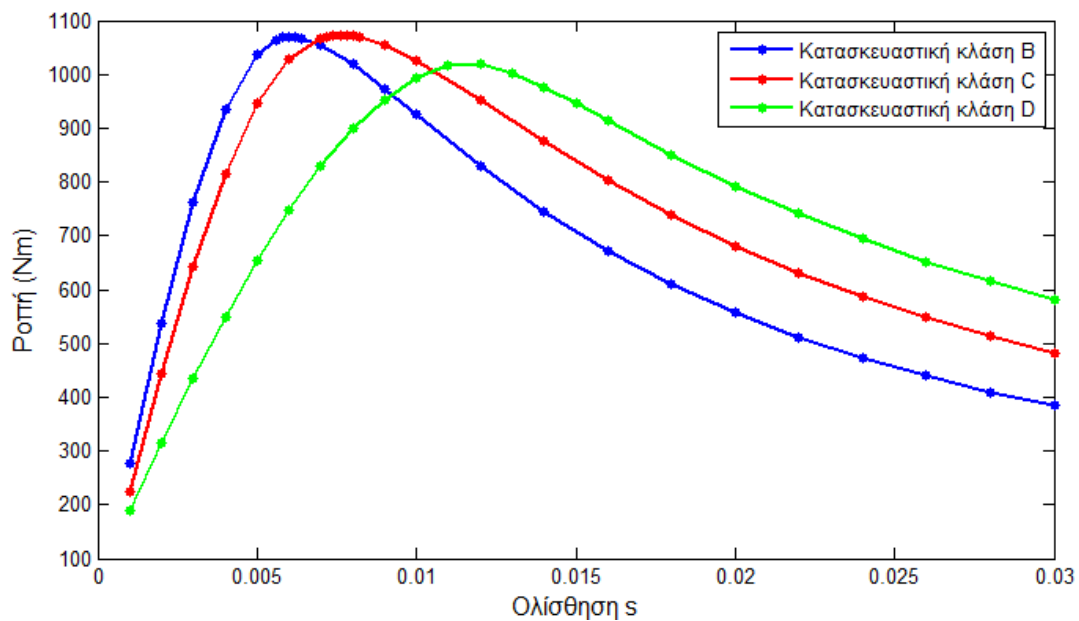
	Αρχική Σχεδίαση	Τελική Σχεδίαση
<b>Μέγιστη ισχύς εξόδου (<math>P_{out}</math>)</b>	128.9 kW	159.1 kW
<b>Απώλειες χαλκού στάτη</b>	1902.4 W	2324.5 W
<b>Απώλειες χαλκού δρομέα</b>	1958,1 W	1984.9 W
<b>Απώλειες σιδήρου</b>	56.26 W	54.17 W
<b>Απόδοση</b>	95.57%	95.94 %

Πίνακας 5.12 Απώλειες και απόδοση κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης D πριν και μετά από την ανάλυση ευαισθησίας.

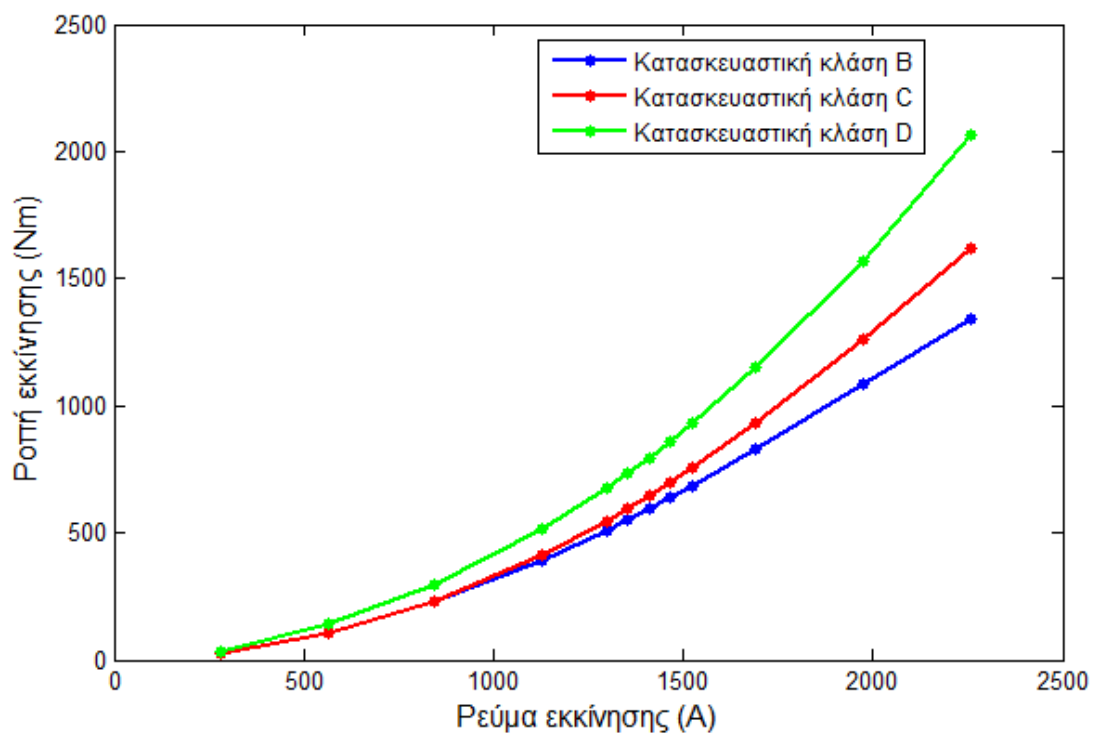
### 5.3 Επιλογή γεωμετρίας κινητήρα

Συγκεντρωτικά, η καμπύλη ροπής – ολίσθησης για τους κινητήρες κατασκευαστικής κλάσης B, C και D μετά από την ανάλυση ευαισθησίας φαίνεται στο *διάγραμμα 5.99*. Ο κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης C είναι ικανός να παράγει μεγαλύτερη ροπή από τους άλλους δυο. Ο κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης D είναι αυτός που εμφανίζει μέγιστη ροπή στη μεγαλύτερη ολίσθηση. Και οι τρεις γεωμετρίες είναι ικανές να παράγουν την επιθυμητή μέγιστη και ονομαστική ροπή που έχουν από τις προδιαγραφές.

## Κεφάλαιο 5



Διάγραμμα 5.99 Καμπύλη ροπής ολίσθησης κινητήρων κατασκευαστικής κλάσης B, D και C μετά από την ανάλυση ευαισθησίας.



Διάγραμμα 5.100 Ροπή εκκίνησης κινητήρων κατασκευαστικής κλάσης B, C και D για διαφορετικές τιμές ρεύματος εκκίνησης.

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται συγκριτικά οι επιθυμητές προδιαγραφές που έχουν τεθεί και τα χαρακτηριστικά των κινητήρων κατασκευαστικής κλάσης B, C και D.

## Κεφάλαιο 5

---

	Προδιαγραφές	Κλάση Β	Κλάση C	Κλάση D
<b>Ονομαστική Ροπή</b>	720 ±2% Nm	763 Nm	814 Nm	737 Nm
<b>Μέγιστη Ροπή</b>	1008 Nm	1070 Nm	1073 Nm	1007Nm
<b>Ροπή Εκκίνησης</b>	792 Nm	595 Nm	646.75 Nm	795.25 Nm
<b>Ονομαστική Ολίσθηση</b>	0.006	0.003	0.0038	0.006
<b>Ονομαστική Ταχύτητα</b>	1491 rpm	1495.5 rpm	1494.3 rpm	1491 rpm

*Πίνακας 5.13 Προδιαγραφές και αποτελέσματα των προς σύγκριση τοπολογιών.*

Από τα συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά του πίνακα καθώς και από το διάγραμμα 5.100 φαίνεται ένα συνολικό μικρό προβάδισμα του κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης D. Προσεγγίζει καλύτερα τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί από τις άλλες δυο τοπολογίες και είναι ο μόνος ικανός να παράγει την επιθυμητή ροπή εκκίνησης.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

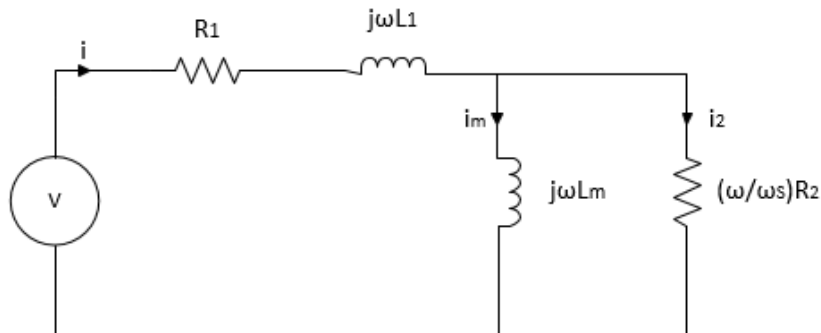
### ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η εξαγωγή ενός ισοδύναμου κυκλώματος μόνιμης κατάστασης για την επιλεγείσα γεωμετρία κινητήρα.

#### 6.1 Υπολογισμός παραμέτρων ισοδύναμου κυκλώματος

##### 6.1.1 Απλοποιημένο Ισοδύναμο κύκλωμα.

Το μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος που χρησιμοποιείται είναι αυτό του σχήματος 5.1. Σκοπός είναι μέσω αυτού του μοντέλου να αναπαρασταθεί μια φάση του κινητήρα επαγωγής σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας. Στο μοντέλο αυτό, η επαγωγή είναι ανηγμένη στην πλευρά του στάτη μέσω της αυτεπαγωγής  $L_1$ . Η σύζευξη με το δρομέα και το ρεύμα του δρομέα παριστάνεται από τον εγκάρσιο κλάδο και την αυτεπαγωγή μαγνήτισης  $L_m$ . Στο κύκλωμα αυτό η τάση  $V$  είναι η RMS τιμή της φασικής τάσης και το ρεύμα  $i = I_l / \sqrt{3}$  είναι η RMS τιμή του ρεύματος φάσης, όπου  $I_l$  είναι το ρεύμα γραμμής, αφού ο κινητήρας είναι συνδεσμοποιημένος σε τρίγωνο.



Σχήμα 6.1 Απλοποιημένο ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα μόνιμης κατάστασης του κινητήρα.

Στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 6.1,  $\omega$  είναι η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής σε μηχανικά ακτίνια ανά δευτερόλεπτο (rad/sec) και ο όρος  $\omega_s$  αντιπροσωπεύει τη διαφορά μεταξύ της μηχανικής συχνότητας του δρομέα και της ηλεκτρικής συχνότητας. Αν ο κινητήρας αποτελείται από  $p$  ζεύγη πόλων, τότε ορίζεται η ταχύτητα ολίσθησης:

$$\omega_s = \omega - p\omega_r \quad (6.1)$$

Μέσω αυτού του μοντέλου ισοδυνάμου κυκλώματος η συνολική αντίσταση του κινητήρα μπορεί να αναπαρασταθεί από τη σχέση 6.2:

$$Z = R_1 + j\omega \left( L_1 + L_m \left( \frac{1}{1+j\tau\omega_s} \right) \right) \quad (6.2)$$

Όπου τα είναι η σταθερά χρόνου του δρομέα,  $M/R_r$

Ο δεύτερος όρος σε αυτή την έκφραση της αντίστασης είναι πολλαπλασιασμένος με  $j\omega$ . Αυτός ο όρος αντιστοιχεί στην συνεισφορά της τάσης που οφείλεται στην μεταβολή της μαγνητικής ροής σε σχέση με τη συχνότητα. Η μαγνητική ροή ανά φάση είναι:

$$\Phi = \left( L_1 + L_m \left( \frac{1}{1+j\tau\omega} \right) \right) i \quad (6.3)$$

Διαιρώντας με το ρεύμα προκύπτει η αυτεπαγωγή ως συνάρτηση της ταχύτητας ολίσθησης:

$$L(\omega_s) = \left( L_1 + \frac{L_m}{1+(\tau\omega_s)^2} \right) - j \left( \frac{\tau\omega_s L_m}{1+(\tau\omega_s)^2} \right) \quad (6.4)$$

Αυτή η εξάρτηση της αυτεπαγωγής από την ταχύτητα ολίσθησης παρέχει έναν μηχανισμό για τον υπολογισμό των παραμέτρων του ισοδυνάμου κυκλώματος. Η μαγνητική ροή υπολογίζεται με ακρίβεια μέσω της αναπαράστασης του κινητήρα στο FEMM. Επομένως η σύγκριση των υπολογισμών της μαγνητικής ροής καθώς η συχνότητα μεταβάλλεται με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη σχέση 6.4 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του κυκλώματος του σχήματος 6.1.

### 6.1.2 Αναγνώριση των παραμέτρων του ισοδυνάμου κυκλώματος μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων

Η ωμική αντίσταση ανά φάση του τυλίγματος του στάτη υπολογίζεται όπως περιεγράφηκε στη παράγραφο 4.4.1 και είναι:

$$R_1 = 0.032 \Omega$$

Για τον υπολογισμό των υπόλοιπων παραμέτρων του απλοποιημένου ισοδυνάμου κυκλώματος πραγματοποιούνται τα ακόλουθα:

- Εφαρμόζονται τα ρεύματα των τριών φάσεων στα τυλίγματα του στάτη και γίνεται ανάλυση του κινητήρα σε ηδιαφορετικές συχνότητες.
- Για την ανάλυση που αντιστοιχεί σε κάθε συχνότητα υπολογίζεται η μαγνητική ροή μιας φάσης.

## Κεφάλαιο 6

---

- Πραγματοποιείται ανάλυση παλινδρόμησης για την εκτίμηση των παραμέτρων.

Υπολογίζεται η αυτεπαγωγή όπως αυτή προκύπτει από την ανάλυση του κινητήρα στο FEMM. Το φανταστικό μέρος της αυτεπαγωγής είναι:

$$Im(L) = L_i = -\left(\frac{\tau L_m \omega_s}{1+(\tau \omega_s)^2}\right) \quad (6.5)$$

Ορίζεται:

$$\begin{aligned} c_1 &= \tau L_m \\ c_2 &= \tau^2 \end{aligned} \quad (6.6)$$

και προκύπτει:

$$(\omega_s)c_1 + (L_i \omega_s^2)c_2 = -L_i \quad (6.7)$$

Αυτή η εξίσωση είναι γραμμική ως προς τους συντελεστές  $c_1$  και  $c_2$ . Στον πίνακα  $m$ , σε κάθε γραμμή προσδιορίζονται τα  $\omega_s$  και  $L_i$  και διαμορφώνουν συνολικά  $n$  εξισώσεις για τους δυο άγνωστους συντελεστές. Μέσω της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων επιλέγονται οι τιμές των συντελεστών που ικανοποιούν βέλτιστα τις  $n$  εξισώσεις.

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων κατασκευάζεται ο πίνακας  $m$  και το διάνυσμα  $b$ :

$$m = \begin{bmatrix} \omega_{s,1} L_{i,1} \omega_{s,1}^2 \\ \omega_{s,2} L_{i,2} \omega_{s,2}^2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \omega_{s,n} L_{i,n} \omega_{s,n}^2 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{Bmatrix} -L_{i,1} \\ -L_{i,2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ -L_{i,n} \end{Bmatrix}$$

Η λύση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων προκύπτει:

$$\begin{Bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{Bmatrix} = (m^T m)^{-1} m^T b$$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μέσω αυτής της μεθόδου είναι  $c_1 = 0,002942767$  και  $c_2 = 0,24895049$ . Και από τις σχέσεις 6.6 συνεπάγεται:

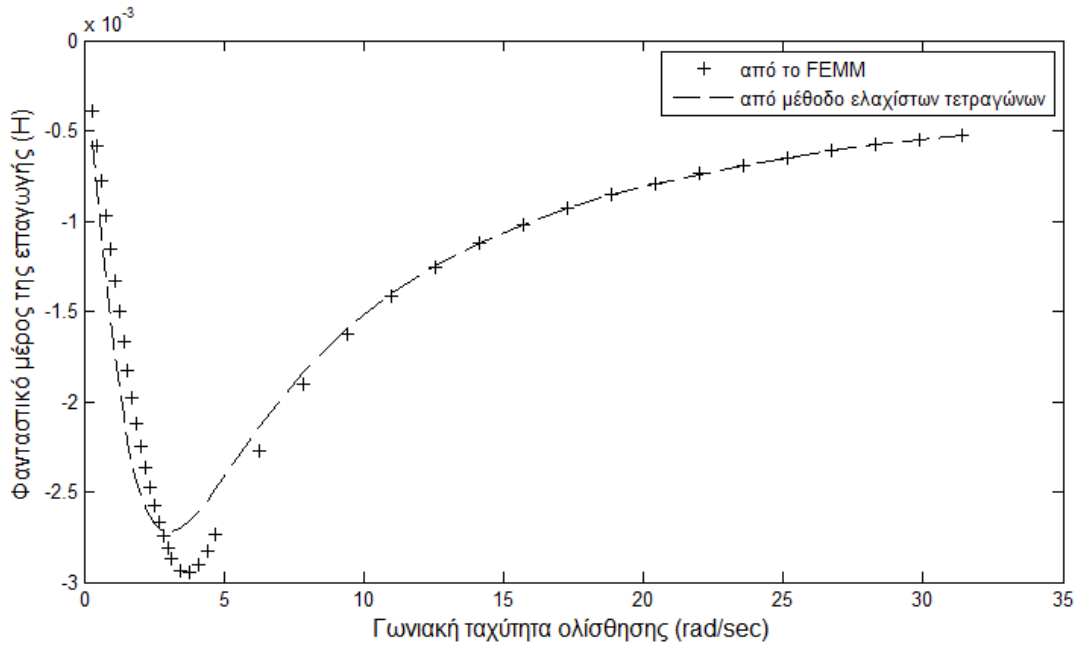
$$L_m = 0.0054459 \text{ H}$$

$$\tau = 0.32856023 \text{ sec.}$$

$$R_2 = 0.01657504 \text{ } \Omega$$

Στο *διάγραμμα 6.1* φαίνεται το φανταστικό μέρος της αυτεπαγωγής όπως προέκυψε από το FEMM και την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Η προσέγγιση είναι αρκετά καλή

οπότε το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα που θεωρήθηκε για τον κινητήρα είναι ικανοποιητικό.



Διάγραμμα 6.1 Φανταστικό μέρος της αυτεπαγωγής όπως προέκυψε από την προσέγγιση των υπολογισμών από το FEMM μέσω της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων.

Η συνολική αυτεπαγωγή στάτη και δρομέα  $L_1$  μπορεί να προσδιοριστεί ακολουθώντας παρόμοια τακτική και κάνοντας χρήση του πραγματικού μέρους της αυτεπαγωγής που προκύπτει από το FEMM. Το πραγματικό μέρος της αυτεπαγωγής, είναι:

$$L_i = \left( L_1 + \frac{L_m}{1+(\tau\omega_s)^2} \right) \quad (6.8)$$

Ωστόσο έχουν ήδη υπολογιστεί οι τιμές των  $L_m$ ,  $\omega_s$  και  $L_i$ . Μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων για την εύρεση της αυτεπαγωγής  $L_1$ . Ωστόσο η καλύτερη προσέγγιση τώρα είναι απλά η μέση τιμή των τιμών που προκύπτουν από τη σχέση 6.9.

$$L_1 = L_{i,k} - \frac{L_m}{1+(\tau\omega_s)^2} \quad (6.9)$$

Με τον τρόπο αυτό προέκυψε  $L_1 = 0.00151579 H$

### 6.2 Εξαγωγή καμπύλης ροπής-ολίσθησης

Εφόσον έχουν προσδιοριστεί οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος του σχήματος 6.1, θα υπολογιστεί η ροπή. Η ισχύς που καταναλώνεται στην αντίσταση του δρομέα, είναι:

$$P = 3 \frac{\omega}{\omega_s} R_2 i_2^2 \quad (6.10)$$



όπου  $i_2$  είναι η RMS τιμή του ρεύματος στο δρομέα. Η ισχύς του δρομέα αποτελείται από τη μηχανική ισχύ και τις απώλειες Joule του δρομέα:

$$P = 3 \frac{\omega - \omega_s}{\omega_s} R_2 i_2^2 + 3 R_2 i_2^2 \quad (6.11)$$

όπου ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει την μηχανική ισχύ και ο δεύτερος τις απώλειες του δρομέα. Η μηχανική ισχύς ως συνάρτηση της ταχύτητας του δρομέα και της ταχύτητας ολίσθησης όπως αυτή ορίστηκε στη σχέση 6.1, είναι:

$$P_{mech} = 3 \frac{p \omega_r}{\omega_s} R_2 i_2^2 \quad (6.12)$$

Διαιρώντας την 6.12 με την ταχύτητα του δρομέα  $\omega_r$  προκύπτει η ροπή:

$$T = 3 \frac{p}{\omega_s} R_2 i_2^2 \quad (6.13)$$

Αυτή η έκφραση της ροπής είναι συνάρτηση του ρεύματος δρομέα και όχι του ρεύματος φάσης. Από το νόμο τάσεων του Kirchhoff στο δρομέα προκύπτει:

$$\frac{\omega}{\omega_s} R_2 i_2 = j \omega L_m i_m \quad (6.14)$$

και λύνοντας ως προς το ρεύμα δρομέα:

$$i_2 = j \tau \omega_s i_m \quad (6.15)$$

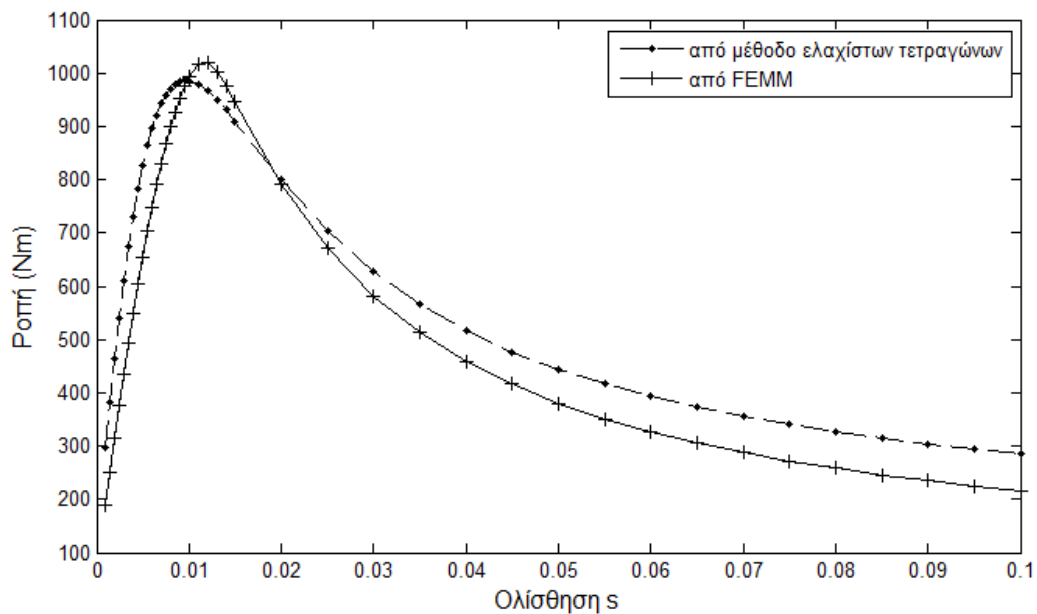
Το συνολικό ρεύμα είναι το άθροισμα του ρεύματος μαγνήτισης και το ρεύματος δρομέα:

$$i = i_2 + i_m$$

οπότε τελικά η ροπή προκύπτει:

$$T = 3 p L_m i^2 \left( \frac{\tau \omega_s}{1 + (\tau \omega_s)^2} \right) \quad (6.16)$$

Τροφοδοτείται ο κινητήρας με σταθερό ρεύμα και μεταβάλλεται η ολίσθηση οπότε υπολογίζεται η ροπή μέσω της σχέσης 6.16. Στο διάγραμμα 6.2 φαίνεται η ροπή που υπολογίζεται μέσω του ισοδύναμου κυκλώματος σε σύγκριση με τη ροπή που υπολογίζεται μέσω του FEMM.



Διάγραμμα 6.2 Χαρακτηριστική ροπής ολίσθησης του κινητήρα όπως προέκυψε από το ισοδύναμο κύκλωμα και το FEMM.

Η απόκλιση που φαίνεται στο διάγραμμα οφείλεται στη χρήση απλοποιημένου ισοδύναμου κυκλώματος το οποίο δεν λαμβάνει υπόψιν την κλίση των αυλάκων του δρομέα, τις συνδέσεις τυλιγμάτων του στάτη και την επίδραση των δακτυλίων βραχυκύκλωσης του δρομέα καθώς επίσης και στην προσέγγιση που έγινε μέσω της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

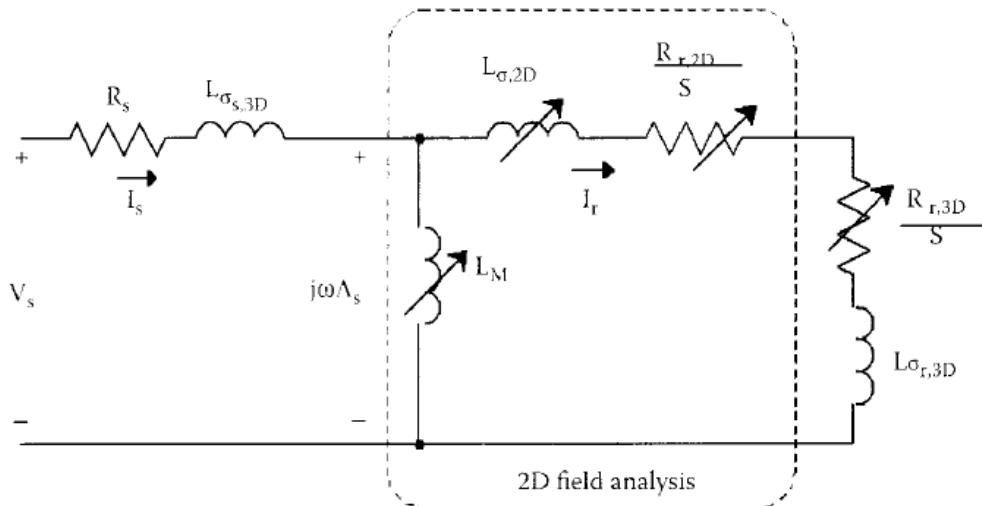
### ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η εξαγωγή των χαρακτηριστικών λειτουργίας του κινητήρα. Κατασκευάζεται ένα ισοδύναμο κύκλωμα μεταβλητών παραμέτρων που κρίνεται ικανοποιητικό για την ανάλυση του κινητήρα. Οι παράμετροι υπολογίζονται με αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους και οι καμπύλες ρεύματος και τάσης ως προς την ολίσθηση χαράσσονται.

#### 7.1 Υπολογισμός παραμέτρων ισοδύναμου κυκλώματος μεταβλητών παραμέτρων.

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων σε δυο διαστάσεις, αφήνει εκτός ανάλυσης πολλά φαινόμενα που οφείλονται στην τρισδιάστατη φύση της γεωμετρίας. Για το λόγο αυτό προκειμένου να βγουν ασφαλή συμπεράσματα για τη λειτουργία του κινητήρα τα τρισδιάστατα φαινόμενα πρέπει να συμπεριληφθούν στην ανάλυση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με ανάλυση μέσω ισοδύναμου κυκλώματος.

Θεωρείται το ισοδύναμο κύκλωμα μεταβλητών παραμέτρων του σχήματος 7.1.



Σχήμα 7.1 Ισοδύναμο κύκλωμα μεταβλητών παραμέτρων τριφασικού κινητήρα επαγωγής. Επισημαίνονται οι παράμετροι που προσδιορίζονται από τη 2-διάστατη ανάλυση. [6]

Οι παράμετροι που βρίσκονται εντός του πλαισίου αντιστοιχούν στη 2-διάστατη ανάλυση και δεν είναι σταθερές. Η αντίδραση μαγνήτισης  $L_M$  είναι συνάρτηση της πεπλεγμένης ροής του στάτη  $\Lambda_s$ , δεδομένου του κορεσμού, αν και αποδίδεται μόνο στον κορεσμό. Η συνολική αντίδραση σκέδασης  $L_{\sigma,2D}$  και η αντίστατη του δρομέα  $R_{r,2D}$  είναι συναρτήσεις της συχνότητας του δρομέα  $f_r$ , η οποία είναι ανάλογη της ολίσθησης

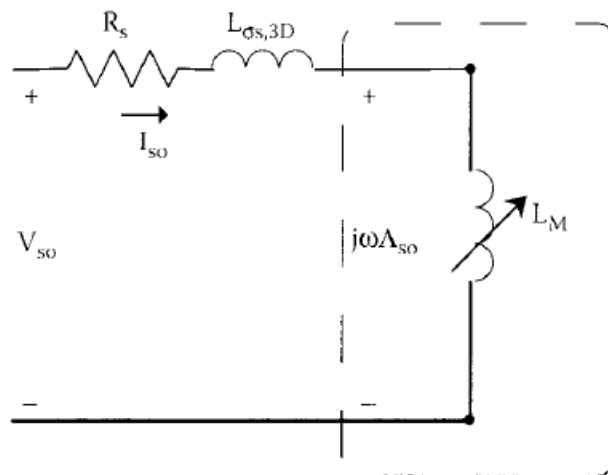
$s$  του δρομέα αν ληφθεί υπόψιν η επίδραση της κατανομής των ρευμάτων στις μπάρες του δρομέα.

Αντίθετα οι παράμετροι που αντιστοιχούν στα 3-διάστατα φαινόμενα θεωρούνται σταθερές. Η αντίσταση τυλίγματος του στάτη  $R_s$  και η αντίδραση σκέδασης  $L_{\sigma s, 3D}$  θεωρούνται ανεξάρτητες από την ανομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος. Παρόμοια και οι αντίστοιχες παράμετροι του δρομέα  $R_{r, 3D}$  και  $L_{\sigma, 3D}$  θεωρούνται σταθερές. Λαμβάνουν υπόψιν τους δακτυλίους βραχυκύκλωσης (end-rings) του δρομέα και την κλίση των αυλακιών (skewing). Υπολογίζονται αναλυτικά και χρησιμοποιούνται στο ισοδύναμο κύκλωμα. Οι απώλειες σιδήρου δεν περιλαμβάνονται στο ισοδύναμο κύκλωμα.

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος μια σειρά από προσομοιώσεις είναι απαραίτητη. Πρακτικά πραγματοποιούνται η δοκιμή κενού φορτίου για τον προσδιορισμό της αντίδρασης μαγνήτισης  $L_M$  και η δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα για τις υπόλοιπες 2D παραμέτρους.

### 7.1.1 Δοκιμή κενού φορτίου

Σκοπός της δοκιμής κενού φορτίου είναι ο προσδιορισμός της μη γραμμικής αντίδρασης μαγνήτισης  $L_M$ . Θεωρώντας τις αρμονικές πεδίου αμελητέες και την ταχύτητα του δρομέα σύγχρονη με το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το τυλίγμα του στάτη (ολίσθηση  $s=0$ ), τότε δεν επάγονται ρεύματα στις μπάρες του δρομέα. Ο δρομέας είναι απλά ένα μέρος του μονοπατιού της μαγνητικής ροής. Έτσι μια μαγνητοστατική λύση είναι εφικτή. Το πεδιακό πρόβλημα είναι μη γραμμικό και περιγράφεται από χρονομεταβλητές ποσότητες. Για τη δοκιμή κενού φορτίου αντιστοιχεί το κύκλωμα του σχήματος 7.2.



Σχήμα 7.2 Ισοδύναμο κύκλωμα κατά τη δοκιμή κενού φορτίου. [6]

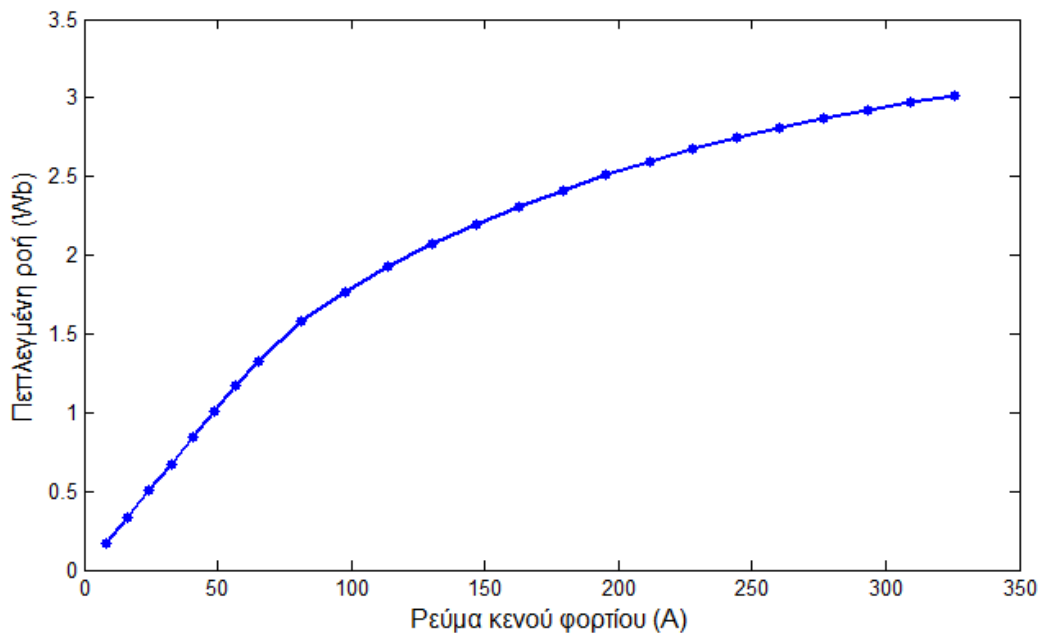
Το FEMM δίνει τη δυνατότητα απευθείας υπολογισμού πεπλεγμένης ροής ανά φάση μέσω των κυκλωματικών υπολογισμών που κάνει. Μετράται η πεπλεγμένη ροή σε κάθε φάση του κινητήρα και υπολογίζεται η RMS τιμή της πεπλεγμένης ροής κενού φορτίου:

$$\Lambda_{s0} = \frac{2}{3} \left( \Lambda_a + \frac{\Lambda_b}{2} - \frac{\Lambda_c}{2} \right) \quad (7.1)$$

Οπότε μεταβάλλοντας το ρεύμα από μηδέν έως και 130% του ονομαστικού και καταγράφοντας κάθε φορά την πεπλεγμένη ροή, προκύπτει η τιμή της αντίδρασης μαγνήτισης :

$$L_M(\Lambda_{s0}) = \frac{\Lambda_{s0}}{I_{s0}} \quad (7.2)$$

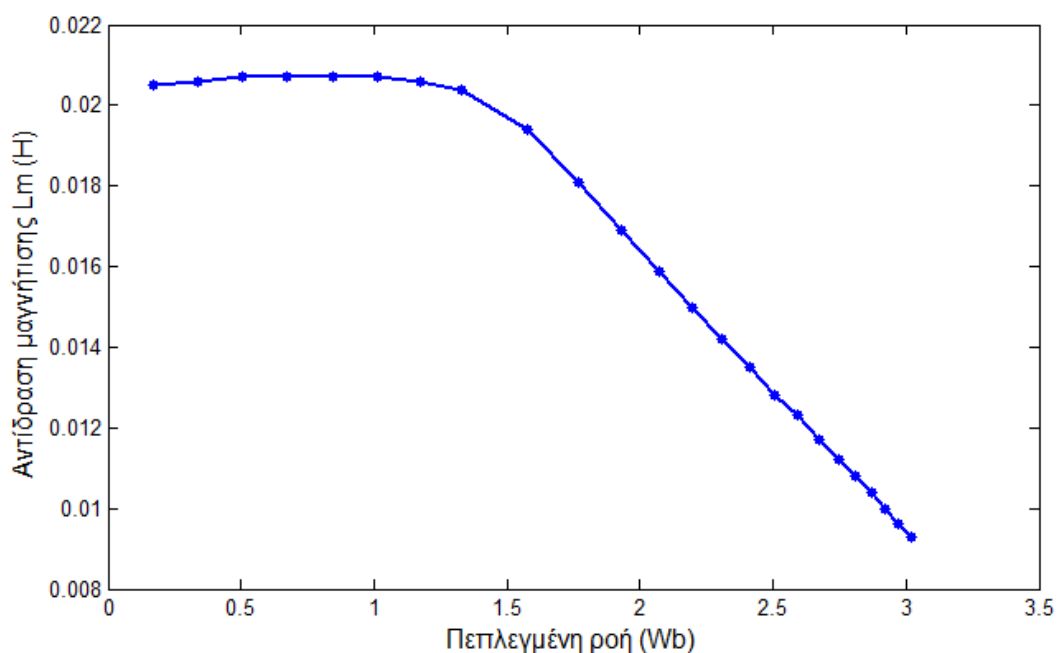
Από την προσομοίωση προκύπτει το *διάγραμμα 7.1* που δίνει την πεπλεγμένη ροή σε συνάρτηση με την RMS τιμή του ρεύματος φάσης.



Διάγραμμα 7.1 Πεπλεγμένη ροή σε συνάρτηση με το ρεύμα φάσης.

Στο διάγραμμα φαίνεται ξεκάθαρα ο κορεσμός του μαγνητικού κυκλώματος της μηχανής που ξεκινά μετά από το γραμμικό τμήμα της καμπύλης.

Σύμφωνα με τη σχέση 7.2, η κλίση της καμπύλης δίνει τη μεταβλητή τιμή της αντίδρασης μαγνήτισης  $L_M$ . Η τιμή της αντίδρασης μαγνήτισης ως συνάρτηση της πεπλεγμένης ροής δίνεται στο *διάγραμμα 7.2*.



Διάγραμμα 7.2 Αντίδραση μαγνήτισης  $L_M$  ως συνάρτηση της πεπλεγμένης ροής.

Η σταθερή τιμή της αντίδρασης μαγνήτισης που αντιστοιχεί στο γραμμικό τμήμα της καμπύλης του *διαγράμματος 7.2* είναι  $L_M = 0.0224 H$ .

Για να είναι τα αποτελέσματα χρήσιμα γίνεται η θεώρηση ότι η εξάρτηση της  $L_M$  από τον κορεσμό είναι ίδια τόσο στην περίπτωση κενού φορτίου όσο και στη λειτουργία υπό φορτίο, δηλαδή:

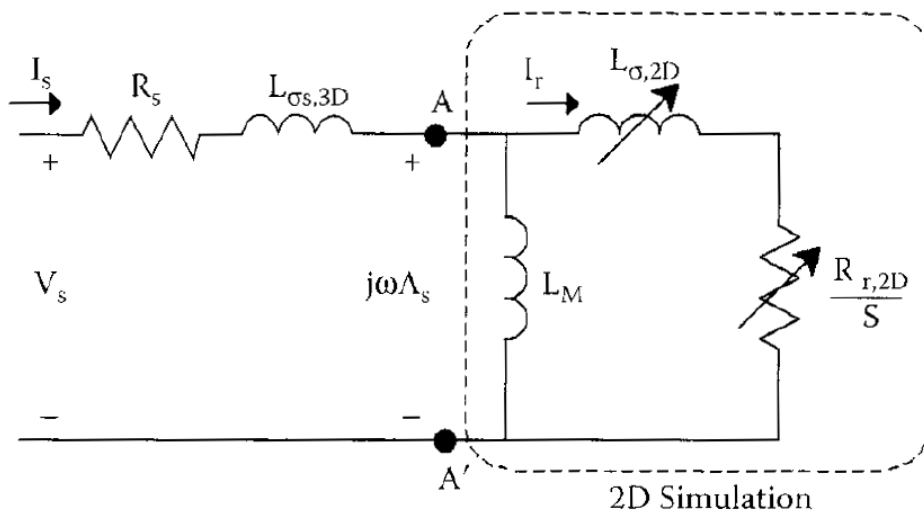
$$L_M(A_{s0}) = L_M(A_s)$$

### 7.1.2 Δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής ο δρομέας είναι ακινητοποιημένος σε μια θέση και τριφασικά ημιτονοειδή ρεύματα εξαναγκάζονται στα τυλίγματα του στάτη. Η εξάρτηση των παραμέτρων  $R_{r,2D}$  και  $L_{\sigma,2D}$  του *σχήματος 7.2* από τη συχνότητα του δρομέα  $f_r$ , μπορεί να εξακριβωθεί αλλάζοντας τη συχνότητα του προβλήματος, λόγω του ακινητοποιημένου δρομέα.

Στη δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα, το ονομαστικό ρεύμα αντιστοιχεί σε σχετικά χαμηλές συχνότητες, επομένως και χαμηλές μαγνητική ροές. Συνεπώς τα μαγνητικά υλικά του προβλήματος μπορούν να θεωρηθούν γραμμικά. Το πεδιακό πρόβλημα είναι πλέον γραμμικό και χαρακτηρίζεται από πεδιακές ποσότητες που μεταβάλλονται ημιτονοειδώς στην ορισμένη συχνότητα.

Το ισοδύναμο κύκλωμα για τη δοκιμή απεικονίζεται στο *Σχήμα 7.2*.

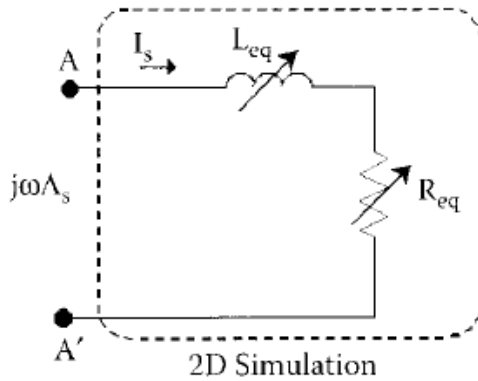


Σχήμα 7.2 Ισοδύναμο κύκλωμα για τη δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα [6]

Όπως φαίνεται, τα 3D φαινόμενα δεν λαμβάνονται υπόψη στην πεδιακή ανάλυση. Θα υπολογιστούν αναλυτικά και θα προστεθούν στο ισοδύναμο κύκλωμα αργότερα. Δηλαδή οι παράμετροι που υπολογίζονται από τη δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα

είναι οι  $R_{r,2D}$  και  $L_{\sigma,2D}$ . Θεωρώντας το πρόβλημα γραμμικό, η αντίδραση μαγνήτισης  $L_M$  υποτίθεται ότι έχει σταθερή τιμή, αυτή που υπολογίστηκε από τη δοκιμή κενού φορτίου. Η ανάλυση επικεντρώνεται στις παραμέτρους του δρομέα. Από τη δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα, που διεξάγεται σε διάφορες συχνότητες, μπορεί να εξακριβωθεί η εξάρτηση των  $R_{r,2D}$  και  $L_{\sigma,2D}$  από τη συχνότητα, που οφείλεται στη μη ομοιογενή κατανομή ρευμάτων στις ράβδους του δρομέα σε διάφορες ταχύτητες.

Με την υπόθεση στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, ημιτονοειδώς κατανεμημένου, οι απώλειες Joule του δρομέα  $P_{Jr}$ , και η τιμή της μαγνητικής ενέργειας του μαγνητικού υλικού  $W_m$ , είναι χρονικά σταθερά. Οι  $R_{r,2D}$ ,  $L_{\sigma,2D}$  και  $L_M$  του κυκλώματος του σχήματος 7.2 αντιστοιχούν στην ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση  $R_{eq} + j\omega_r L_{eq}$  του σχήματος 7.3.



Σχήμα 7.3 Παράμετροι που αντιστοιχούν στη δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα [6]

Οι τιμές  $R_{eq}$  και  $L_{eq}$  δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$R_{eq} = \frac{P_{Jr}}{3I_s^2} \quad (7.3)$$

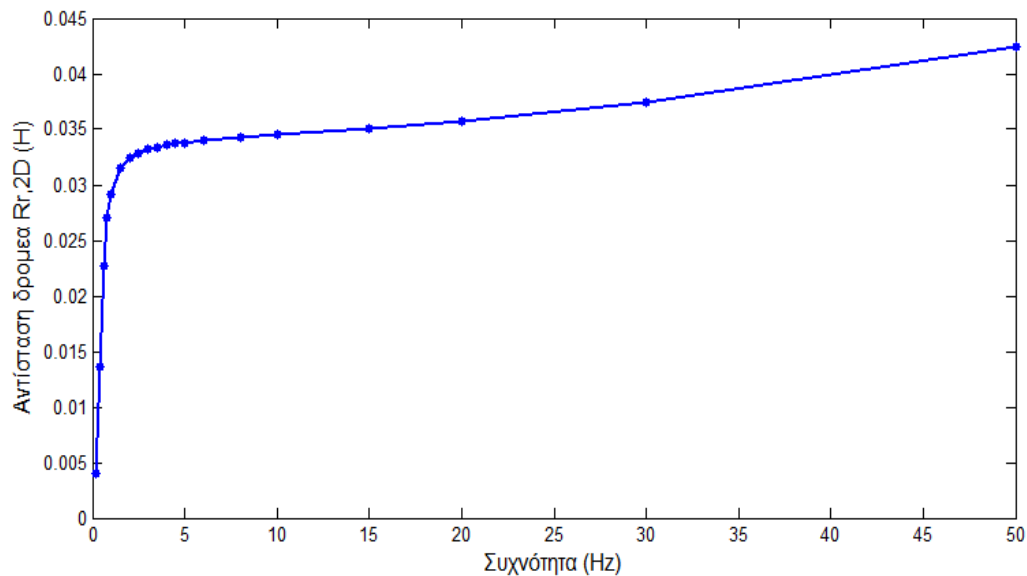
$$L_{eq} = \frac{2W_m}{3I_s^2} \quad (7.4)$$

όπου  $I_s$  η RMS του ρεύματος που χρησιμοποιείται στη δοκιμή. Αφού η αντίδραση μαγνήτισης είναι γνωστή και ίση με την ακόρεστη τιμή από τη δοκιμή κενού φορτίου, μπορούν να υπολογιστούν οι συναρτήσεις  $R_{r,2D}(f_r)$ , και  $L_{r,2D}(f_r)$  του κυκλώματος του σχήματος 7.2.

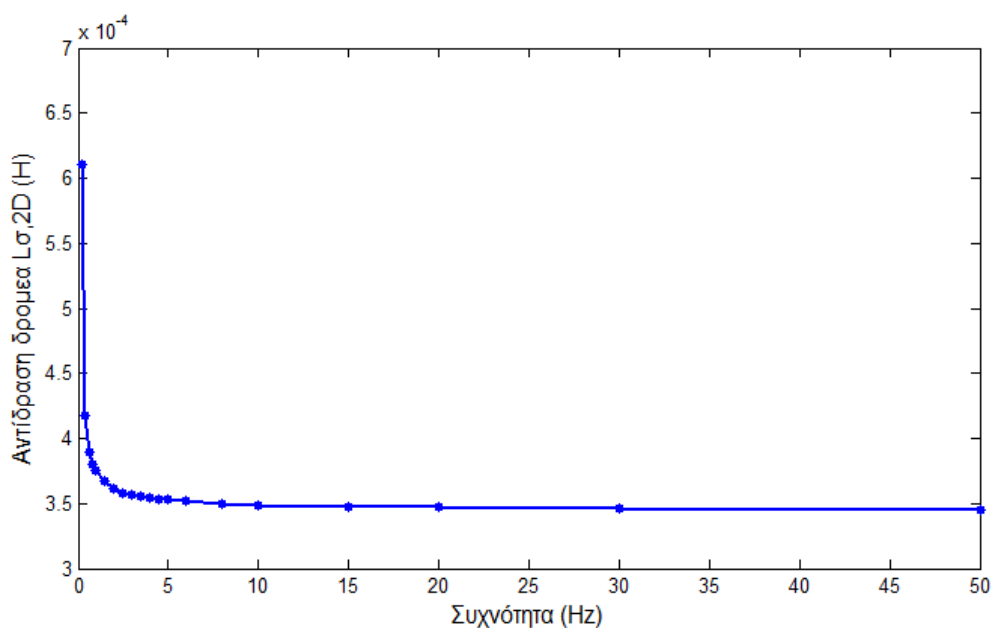
Αφού προσδιοριστούν με προσομοίωση οι τιμές των  $R_{eq}$  και  $L_{eq}$  για διάφορες τιμές της συχνότητας, πρέπει να υπολογιστούν στη συνέχεια τα  $R_{r,2D}$  και  $L_{\sigma,2D}$ . Αυτό γίνεται με λύση του συστήματος μη γραμμικών εξισώσεων που προκύπτει.

Στο διάγραμμα 7.4 φαίνεται η συνάρτηση  $R_{r,2D}(f_r)$ , και στο διάγραμμα 7.5 η συνάρτηση  $L_{r,2D}(f_r)$ .





Διάγραμμα 7.4 Μεταβολή της αντίστασης  $R_{r,2D}$  με τη συχνότητα του δρομέα.



Διάγραμμα 7.5 Μεταβολή της αντίδρασης  $L_{\sigma,2D}$  με τη συχνότητα του δρομέα.

### 7.1.3 Υπολογισμός παραμέτρων 3D φαινομένων

Για την ολοκλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος, οι παράμετροι που αντιστοιχούν στις συνδέσεις των τυλιγμάτων του στάτη  $L_{\sigma,ew}$ , στην κλίση των αυλακιών του δρομέα  $L_{\sigma,sk}$ , και στην επίδραση των δακτυλίων βραχυκύκλωσης του δρομέα  $R_{r,3D}$ , πρέπει να προσδιοριστούν.

Η αντίδραση σκέδασης  $L_{\sigma,3D}$  περιλαμβάνει την αντίδραση που οφείλεται στις συνδέσεις τυλιγμάτων του στάτη ( $L_{\sigma,ew}$ ) και την κλίση των αυλακιών του δρομέα ( $L_{\sigma,sk}$ ).

## Κεφάλαιο 7

---

Μια εκτίμηση της  $L_{\sigma_s,ew}$  (end-winding leakage) δίνεται από τη σχέση

$$L_{\sigma_s,ew} = \mu_0 \frac{N^2}{2p} L_{ew} \lambda_{ew} \quad (7.5)$$

όπου,  $\lambda_{ew}$  είναι ο ειδικός συντελεστής επιδεκτικότητας (οι τιμές του κυμαίνονται από 0.35 έως 0.55 ανάλογα με τον τύπο του τυλίγματος),  $N=2N_s$  είναι το πλήθος αγωγών ανά φάση και το ενεργό μήκος των συνδέσεων των τυλιγμάτων του στάτη, είναι:

$$L_{ew} = (0.083p + 1.217) \frac{pD + y}{2p} + 0.02 = 0.220 \text{ m} = 220 \text{ mm}$$

όπου  $p=2$  τα ζεύγη πόλων του κινητήρα και  $y$  το συνολικό ύψος της αύλακας του στάτη.

Οπότε  $L_{\sigma_s,ew} = 0.0004479 \text{ H}$

Η αντίδραση που οφείλεται στην κλίση των αυλακιών του δρομέα  $L_{\sigma_s,sk}$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$L_{\sigma_s,sk} = L_M (1 - k_{sk}^2) \quad (7.6)$$

με

$$k_{sk} = 1 - \frac{1}{6} \left( \frac{s \pi}{\tau_p} \right)$$

όπου  $s$  είναι το τόξο στο οποίο βαίνει η γωνία κλίσης των αυλάκων. Εκτιμάται ότι ο συντελεστής κλίσης των αυλάκων θα συμβάλει αποτελεσματικά στη μείωση των αρμονικών που οφείλονται στις αύλακες, αν το μήκος τόξου είναι ίσο με ένα βήμα αύλακας:

$$s = \tau_u = \frac{\pi D}{Q} = 23.2 \text{ mm} = 0.0232 \text{ m}$$

οπότε  $k_{sk} = 0.956$

και  $L_{\sigma_s,sk} = 0.0017815 \text{ H}$

Οπότε τελικά η αντίδραση σκέδασης είναι:

$$L_{\sigma_s,3D} = L_{\sigma_s,sk} + L_{ew} = 0.0022294 \text{ H}$$

Η ωμική αντίσταση ανά φάση του τυλίγματος του στάτη υπολογίζεται όπως περιεγράφηκε στη παράγραφο 4.4.1 και είναι:

$$R_s = 0.032 \Omega$$

Για την αντίσταση των δακτυλίων του δρομέα υπολογίζεται το εμβαδό των δακτυλίων:

$$S_{ring} = \frac{\pi}{4} d_r^2 \frac{1}{2 \sin\left(\frac{\pi p}{Q_r}\right)} = 0.0462 \text{ m}$$

όπου  $d_r$  είναι η διάμετρος αύλακας του δρομέα και  $p$  τα ζεύγη πόλων.

Οπότε

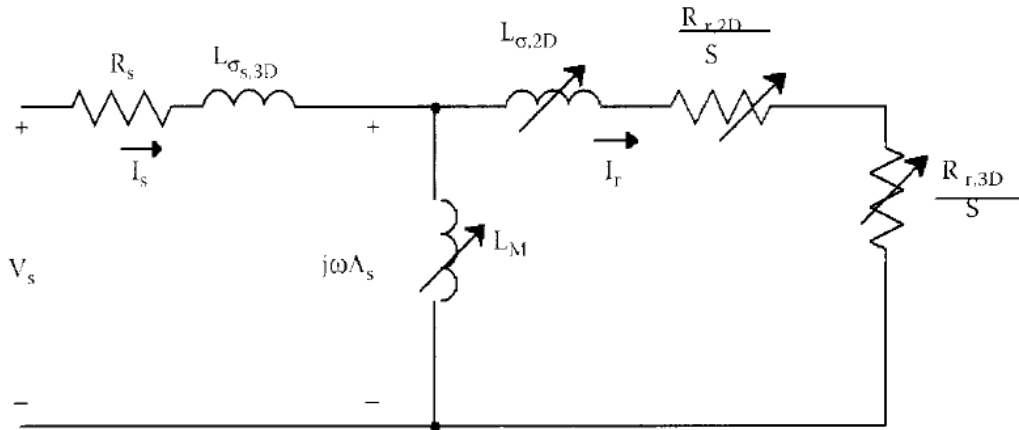
$$R_{r,3D} = \rho \frac{3(k_w Q_r)^2}{2 \pi R r t^2 S_{ring}} = 0.00982 \ \Omega$$

όπου  $k_w$  είναι ο συντελεστής τυλίγματος ο οποίος έχει θεωρηθεί ίσος με 0.95,  $R$  είναι η ακτίνα του δρομέα και  $\rho$  η ειδική αντίσταση του αλουμινίου που χρησιμοποιείται,  $2.78 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}$ .

Έχοντας προσδιορίσει τις παραμέτρους του ισοδύναμου κυκλώματος, η επίδοση της μηχανής σε διάφορες συνθήκες μπορεί να προβλεφθεί.

#### 7.1.4 Το ισοδύναμο κύκλωμα

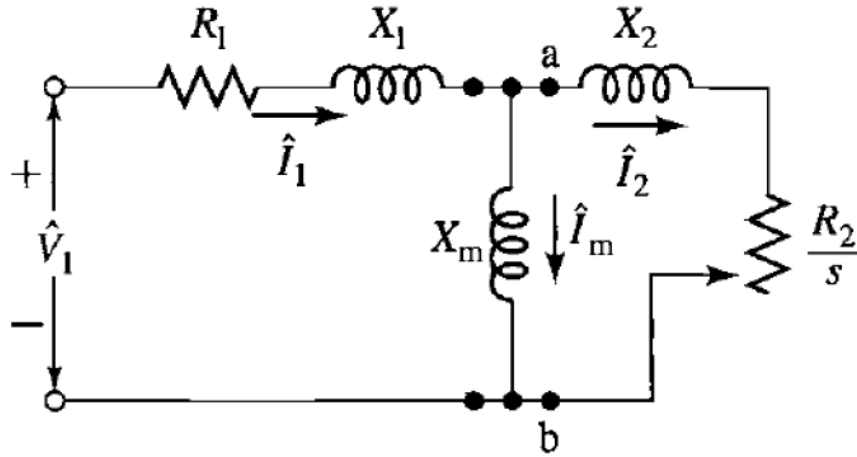
Τελικά το ισοδύναμο κύκλωμα μεταβλητών παραμέτρων που υπολογίστηκε φαίνεται στο σχήμα:



Σχήμα 7.4 Ισοδύναμο κύκλωμα μεταβλητών παραμέτρων τριφασικού κινητήρα επαγωγής. [6]

Στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 7.4 φαίνονται οι παράμετροι που προσδιορίστηκαν. Από αυτές οι  $R_{r,3D}$ ,  $R_s$  και  $L_{\sigma s,3D}$  υπολογίστηκαν με αναυτικό τρόπο ενώ οι  $R_{r,2D}(f_r)$ ,  $L_{r,2D}(f_r)$  και  $L_M(\Lambda_s)$  υπολογίστην μέσω των δοκιμών ακινητοποιημένου δρομέα και κενού φορτίου αντίστοιχα, που προσομοιώθηκαν.

Για ευκολία στην περαιτέρω ανάλυση, οι παράμετροι που προσδιορίστηκαν αντιστοιχίζονται στις παραμέτρους του κλασσικού ισοδύναμου κυκλώματος του σχήματος 7.5:



Σχήμα 7.5 Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα επαγωγής. [3]

Από την αντιστοίχιση προκύπτει:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= R_s \\
 X_1 &= \omega L_{\sigma s,3D} \\
 X_m(\Lambda_s) &= \omega L_M(\Lambda_s) \\
 R_2(f_r) &= R_{r,3D} + R_{r,2D}(f_r) \\
 X_2(f_r) &= \omega L_{\sigma,2D}(f_r)
 \end{aligned}$$

Υπενθυμίζεται ότι οι παράμετροι  $R_{r,2D}(f_r)$ ,  $L_{r,2D}(f_r)$  και  $L_M(\Lambda_s)$  είναι μεταβλητές και εξαρτώνται από το ρεύμα και τη συχνότητα του δρομέα. Κατ'επέκταση και οι  $X_m(\Lambda_s)$ ,  $R_2(f_r)$  και  $X_2(f_r)$  θα είναι μεταβλητές. Προκειμένου να γίνεται εύκολη χρήση τους σε εξισώσεις προσεγγίζονται από κατάλληλα πολυώνυμα ή άλλου τύπου συναρτήσεις.

Επειδή  $f_r = s f_e$ , τα μεγέθη που εξαρτώνται από τη συχνότητα  $f_r$  ουσιαστικά εξαρτώνται από την ολίσθηση  $s$  για αφού η συχνότητα τροφοδοσίας είναι σταθερή. [6]

## 7.2 Υπολογισμός χαρακτηριστικών επίδοσης κινητήρα

### 7.2.1 Καμπύλη ρεύματος – ολίσθησης

Από τα σχήματα 7.4 και 7.5 προκύπτει:

$$j\omega \Lambda_s = \widehat{V}_1 \frac{jX_m // (R_s/s + jX_2)}{R_1 + jX_1 + (jX_m // (R_s/s + jX_2))} \quad (7.7)$$

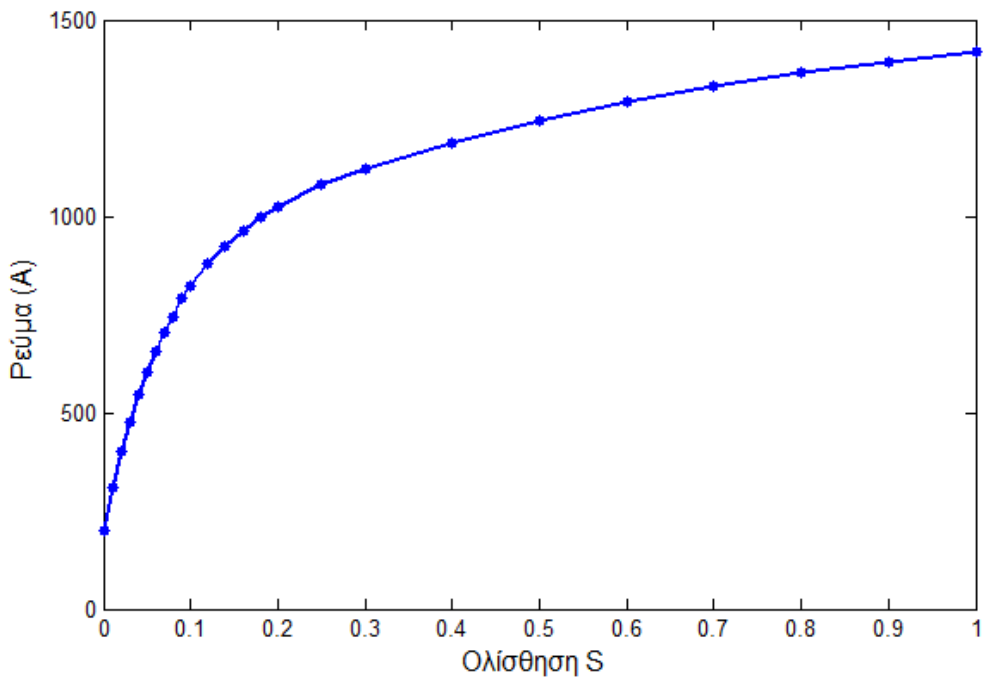
Ωστόσο  $X_m(\Lambda_s) = \omega L_M(\Lambda_s)$  οπότε για κάθε τιμή της ολίσθησης  $s$  υπάρχει μια γραμμική εξίσωση με άγνωστο το  $\Lambda_s$ .

Λύνοντας με επαναληπτικό τρόπο την εξίσωση για διάφορες τιμές ολίσθησης, λαμβάνεται η πεπλεγμένη ροή ως συνάρτηση της ολίσθησης  $\Lambda_s(s)$ . Κατ' επέκταση υπολογίζονται οι τιμές της αντίδρασης μαγνήτισης ως συνάρτηση της ολίσθησης  $X_m(s)$ .

Από την ανάλυση του σχήματος (7.5) προκύπτει το ρεύμα γραμμής από τη σχέση:

$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{V}_1}{R_1 + jX_1 + \left( jX_m // \left( \frac{R_s}{s} + jX_2 \right) \right)} \quad (7.8)$$

Στη σχέση αυτή όμως, όλες οι μεταβλητές παράμετροι μπορούν να εκφραστούν ως συναρτήσεις της ολίσθησης. Επομένως προσεγγίζοντας τη λύση της εξίσωσης για διάφορες τιμές της ολίσθησης κατασκευάζεται η χαρακτηριστική ρεύματος ολίσθησης του διαγράμματος 7.6.



Διάγραμμα 7.6 Καμπύλη ρεύματος ολίσθησης

Παρατηρώντας την καμπύλη μερικά χρήσιμα συμπεράσματα μπορούν να βγουν. Αρχικά φαίνεται ότι το ρεύμα εκκίνησης είναι περίπου  $I_{εκκ} = 1420 A$  δηλαδή περίπου πέντε φορές το ρεύμα κανονικής λειτουργίας. Αυτό συμβαίνει διότι η ωμική αντίσταση του τυλίγματος σου στάτη είναι σχετικά μικρή.

Επιπλέον το ρεύμα κανονικής λειτουργίας εμφανίζεται σε πολύ μικρή ολίσθηση (περίπου 0,6%) επομένως ο κινητήρας θα λειτουργεί πολύ κοντά στη σύγχρονη Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του ισοδυνάμου κυκλώματος με εκείνα που προέκυψαν από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων προκύπτει ότι οι δυο αναλύσεις καταλήγουν σε παρόμοια συμπεράσματα.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο επιχειρείται σύντομη ανασκοπήση της εργασίας και συγκεντρώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν. Ακόμη εντοπίζονται τα κυριότερα σημεία στα οποία κρίνεται ότι η εργασία αυτή συνεισφέρει στην προαγωγή της επιστήμης και επισημαίνονται θέματα που αναδείχθηκαν κατά την εκπόνησή της ότι χρειάζονται περαιτέρω διερεύνηση.

### 8.1 Ανακεφαλαίωση

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε αρχικά η προκαταρκτική σχεδίαση ενός κινητήρα επαγωγής ισχύος 112 kW ακολουθώντας τις κλασσικές αρχές σχεδίασης. Με βάση τις κύριες διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά που προέκυψαν για τις τρεις τοπολογίες κινητήρων οι οποίες αντιστοιχούν σε κατασκευαστικές κλάσεις B, C και D, αντίστοιχα, πραγματοποιήθηκε η οριστική σχεδίαση μέσω αριθμητικής ανάλυσης των εξισώσεων του μαγνητικού πεδίου με χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων. Εφαρμόζοντας την τεχνική ανάλυσης ευαισθησίας των γεωμετρικών παραμέτρων των κινητήρων, προέκυψαν οι βέλτιστες γεωμετρίες για κάθε κατασκευαστική κλάση κινητήρα, από τις οποίες επιλέχθηκε ο κινητήρας κλάσεως D καθώς εμφάνιζε συγκριτικό πλεονέκτημα στη ροπή εκκίνησης για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Για κάθε τοπολογία υπολογίστηκαν επίσης οι απώλειες χαλκού και σιδήρου με κατάλληλη επεξεργασία των αποτελεσμάτων από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.

Έχοντας προσδιορίσει την κλάση του κινητήρα και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που ικανοποιούν τις προδιαγραφές σχεδίασης, διατηρώντας τις φορτίσεις του κινητήρα σε επιθυμητά επίπεδα, προσδιορίστηκε το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα μόνιμης κατάστασης του κινητήρα. Οι παράμετροι του κυκλώματος προσεγγίστηκαν με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων και ως αποτέλεσμα υπολογίστηκε η χαρακτηριστική ροπής ολίσθησης του κινητήρα η οποία έδωσε σαφή εικόνα της προβλεπόμενης συνολικής συμπεριφοράς του.

Στη συνέχεια, επιχειρήθηκε ακριβέστερη πρόβλεψη της επίδοσης του κινητήρα υπό διαφορετικές φορτίσεις και καταστάσεις λειτουργίας. Για τον λόγο αυτόν αναπτύχθηκε κατάλληλη διαδικασία κατασκευής ενός ισοδύναμου κυκλώματος με μεταβλητές παραμέτρους. Οι παράμετροι υπολογίστηκαν από μια σειρά αριθμητικών δοκιμών που

προσομοιώθηκαν με τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Ως αποτέλεσμα κατέστη δυνατή η ακριβέστερη ανάλυση της προβλεπόμενης συμπεριφοράς του στην περιοχή της εκκίνησης.

### 8.2 Κυριότερα Συμπεράσματα

Από την προκαταρκτική σχεδίαση που βασίζεται σε κλασσικές αρχές προσδιορίζονται προσεγγιστικά τα κυριότερα επιμέρους γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα. Με επιπλέον θεωρήσεις μπορούν να προκύψουν όλες οι διαστάσεις του κινητήρα. Ο κινητήρας που προκύπτει από την προκαταρκτική σχεδίαση παρουσιάζει ορισμένα εμφανή προβλήματα όπως η δυσανάλογη κατανομή των μαγνητικών φορτίσεων στα δόντια του στάτη και του δρομέα, τα οποία επιβεβαιώνονται με την ανάλυση της μηχανής με βάση τα πεπερασμένα στοιχεία. Για τον λόγο αυτόν κρίνεται απαραίτητο να πραγματοποιηθεί μία φάση οριστικής σχεδίασης ακολουθώντας διαδικασία βελτιστοποίησης των γεωμετρικών παραμέτρων μέσω της τεχνικής ανάλυσης ευαισθησίας. Μετά την ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων παρατηρείται σημαντική βελτίωση των επιδόσεων της μηχανής.

Συγκεκριμένα στην παρούσα εφαρμογή η μέγιστη ροπή μετά από την ανάλυση ευαισθησίας αυξήθηκε κατά 22.8%, 26.2% και 18% στις τρεις περιπτώσεις κινητήρων κατασκευαστικής κλάσης B, C και D, αντίστοιχα, σε σχέση με την προκαταρκτική σχεδίαση.

Ενώ στην τελική γεωμετρία του κινητήρα κατασκευαστικής κλάσης D οι απώλειες του κινητήρα είναι ελαφρώς αυξημένες σε σχέση με τις άλλες γεωμετρίες, αυτό δεν αποτελεί απαγορευτική επιβάρυνση καθώς η απόδοση του κινητήρα διατηρήθηκε σε όλες τις λειτουργίες μεγαλύτερη του 95% ενώ η ροπή εκκίνησής του είναι αυξημένη κατά 20% τουλάχιστον έναντι των άλλων τοπολογιών.

Κατά τη διαδικασία προσδιορισμού της επίδοσης του κινητήρα χρησιμοποιώντας πεδιακή ανάλυση, αναδείχθηκε ότι προκειμένου να μειωθούν τα σημαντικά σφάλματα που εμφανίζει το ισοδύναμο κύκλωμα στην εκτίμηση της ροπής εκκίνησης, είναι σκόπιμη η ανάπτυξη ενός ισοδυνάμου κυκλώματος μεταβλητών παραμέτρων.



### 8.3 Σημεία επιστημονικής συνεισφοράς

Στην παρούσα εργασία προτείνεται και παρουσιάζεται ένας ολοκληρωμένος τρόπος για τη σχεδίαση και την ανάλυση κινητήρα επαγωγής. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του κινητήρα είναι η απαίτηση εμφάνισης της ονομαστικής ροπής σε υψηλή ολίσθηση.

Κατά τη σχεδίαση του κινητήρα οι κυριότερες πρακτικές που αναπτύχθηκαν ήταν οι ακόλουθες:

- Η παραμετροποιημένη σχεδίαση του κινητήρα σε λογισμικό Matlab, μέσω σχέσεων που λαμβάνουν υπόψη τα όρια των μαγνητικών φορτίσεων στο σώμα του στάτη και του δρομέα. Με την παραμετροποιημένη σχεδίαση εξασφαλίζεται ότι κάθε φορά που αλλάζουν ορισμένες από τις βασικές διαστάσεις στο πρόγραμμα Matlab, ο κινητήρας που σχεδιάζεται στο Femm τηρεί όλες τις απαραίτητες σχεδιαστικές προδιαγραφές.
- Η ανάλυση ευαισθησίας με σκοπό τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του στάτη και του δρομέα. Κατά τη διαδικασία αυτή επιχειρείται η μεγιστοποίηση της ροπής και η διατήρηση των φορτίσεων του κινητήρα σε φυσιολογικά επίπεδα. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυξάνεται λόγω της παραμετροποιημένη σχεδίασης.
- Η κατασκευή απλοποιημένου ισοδύναμου κυκλώματος προσφέρει μια ικανοποιητική προσέγγιση της επίδοσης του κινητήρα, ενώ λόγω της μειωμένης υπολογιστικής πολυπλοκότητας που απαιτείται για την επίλυση του μειώνει σημαντικά τους χρόνους βελτιστοποίησης.

### 8.4 Εργασίες για περαιτέρω διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής αναδείχθηκαν τα παρακάτω σημεία που χρειάζονται περαιτέρω διερεύνηση:

- Πειραματική επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών του κινητήρα που υπολογίστηκαν.
- Επέκταση της μεθοδολογίας βελτιστοποίησης εστιάζοντας σε μεθόδους αναζήτησης ολικού βέλτιστου.



## Βιβλιογραφία

### Βιβλιογραφία

- [1] Ι.Α. Τεγόπουλος, *Ηλεκτρικές Μηχανές Μέρος Β΄*, Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, 1991
- [2] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, 2001, Ε.Μ.Π.*
- [3] *Electric Machinery*, A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr., Stephen Umans
- [4] Stephen J. Chapman, *Ηλεκτρικές Μηχανές, 3<sup>η</sup> Έκδοση*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.
- [5] Juha Pyhonen, Tapani Jokinen, Valeria Hrabovcova, *Design of Rotating Electrical Machines*, John Wiley & Sons
- [6] Nicola Bianchi, *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements*, CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2005.
- [7] Hamdi, E. S. *Design of small electrical machines*, Chichester: 1998(1994), John Wiley & Sons.
- [8] Ion Boldea, Syed A. Nasar, *The Induction Machines Design Handbook, Second Edition*, CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2010.
- [9] D. Dolinar, R. De Weerd, R. Belmans, E.M.Freeman, "Calculation of two-axis induction motor model parameters using finite elements, Energy Conversion", IEEE Transactions on (Volume:12 , Issue: 2 )
- [10] V. Fireteanu, T.Tudorache, Q.A. Turcaun, "Optimal design of rotor slot geometry of squirrel cage type induction motors", in Proc. of IEMDC'07, pp. 537-542.
- [11] Χατζηλάου Ι.Κ, Γύπαρης Ι.Κ. (2001): "Ηλεκτροπρόωση Πολεμικών Πλοίων", Μονογραφία ΣΝΔ, Πειραιάς, Μάρτιος.
- [12] Χατζηλάου Ι.Κ, Γαλάνης Γ., Περτζινίδης Ν.(2006): "Συστήματα ηλεκτροπρόωσης υποβρυχίων του Π.Ν. ", Διήμερο ΤΕΕ: «ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΑ ΜΕΣΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ-ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ», 12-13 Ιανουαρίου 2006.
- [13] Hodge G. G., Mattick D. J. (1997), "The Electric Warship II", *Trans IMarE*, Vol. 109, Part 2, pp. 127-144.
- [14] Hodge G. G., Mattick D. J. (1998), "The Electric Warship III", *Trans IMarE*, Vol. 110, Part 2, pp.119-134.

## Βιβλιογραφία

- [15] Holström P. (1993), "Selection of Propeller for Diesel Electric Machinery," in PROPULSION '93: *Marine Main Propulsion and Auxiliary Power Conference and Trade Show*, New Orleans, November 7-9.
- [16] John Carlton, *Marine propellers and propulsion*, Second Edition 2007
- [17] Gaggero Stefano, Savio Luca, Brizzolara Stefano, Viviani Michele, Ferrando Marco, Conti Francesco, "Comparison of experimental measurements and numerical calculations for a propeller in axial cylinder", First International Symposium on Marine Propulsors smp'09, Trondheim, Norway, June 2009.
- [18] William R. Finley, Mark M., Hodowane C., "Selection of Copper vs. Aluminium Rotors for Induction Motors", Petroleum and Chemical Industry Conference, 2000
- [19] M.G Say, *Alternating current machines*, Essex 1986, Longman Scientific & Technical
- [20] Carlos A. Hernandez-Aramburo, Tim C. Green, Alexander C. Smith, "Estimating rotational iron losses in an induction machine", IEEE transactions on magnetics, Vol. 39, No. 6, Nov. 2003
- [21] "Finite Element Method Magnetics, User's Manual", David Meeker, Μάιος 2008.
- [22] Dianhai Zhang, Chang Soon Park, Chang SeopKoh, "A New Optimal Design Method of Rotor Slot of Three-Phase Squirrel Cage Induction Motor for NEMA Class D Speed-Torque Characteristic Using Multi-Objective Optimization Algorithm", IEEE Transactions on Magnetics, Volume: 48 , Issue: 2
- [23] Appelbaum J., Fuchs E.F., White J.C., "Optimization of Three-Phase Induction Motor Design Part I: Formulation of the Optimization Technique", IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume: EC-2 , Issue: 3
- [24] AppelbaumJ., Khan I.A., Fuchs E.F., White J.C., "Optimization of Three-Phase Induction Motor Design Part II: The Efficiency and Cost of an Optimal Design", IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume: EC-2 , Issue: 3
- [25] Feyzi M.R., Kalankesh H.V., "Optimization of induction motor design by using the finite element method", Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2001. Volume: 2

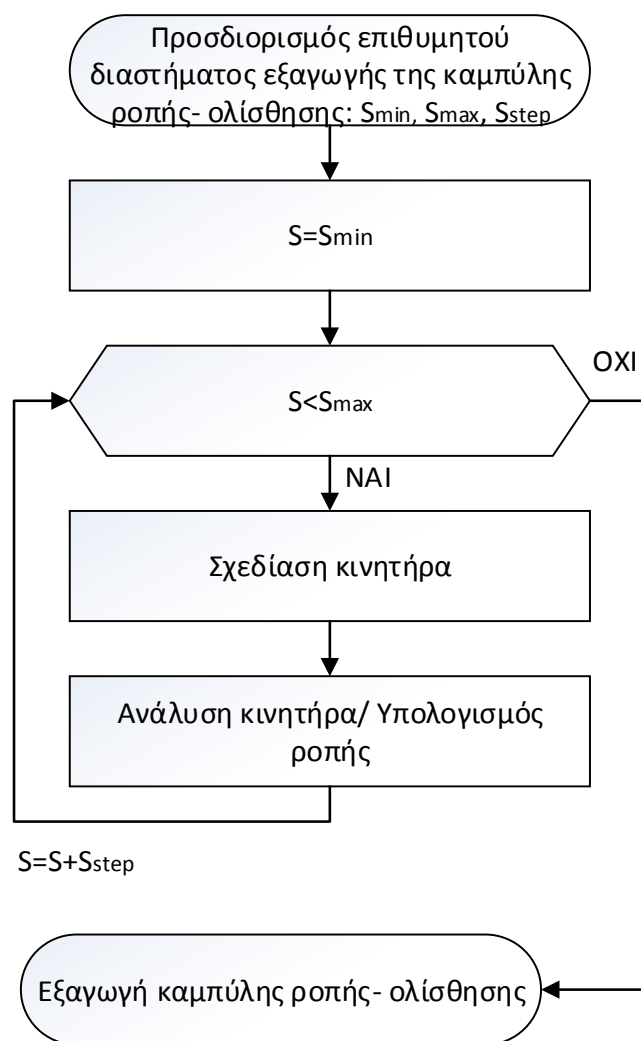
## Βιβλιογραφία

- [26] Boglietti A., Cavagnino A., Lazzari M., *“Geometrical Approach to Induction Motor Design”*, 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007.
- [27] Γεώργιος Ι. Τσεκούρας, *Μελέτη κατασκευής, Ανάλυση κυκλωματικής και πεδιακής συμπεριφοράς δοκιμίου 2,5kW και ανεμογεννήτριας 25kW*, Μεταπτυχιακή εργασία, Αθήνα 2000, Ε.Μ.Π.
- [28] Sobhani S., Yaghoobi H., Samakoosh M. , *“Optimize efficiency and torque in the single-phase induction motor by adjusting the design parameters”*, 12th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2013
- [29] Gyeorye Lee, Seungjae Min, Jung-Pyo Hong, *“Optimal Shape Design of Rotor Slot in Squirrel-Cage Induction Motor Considering Torque Characteristics”*, IEEE transactions on magnetics, Vol. 49, No. 5 May. 2013
- [30] Kwangsoo Kim, Seung-Bin Lim, Ju Lee , *“Design of rotor slot of single phase induction motor with copper die-cast rotor cage for high efficiency”*, 31st International Telecommunications Energy Conference, 2009. INTELEC 2009.
- [31] ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ ΠΛΟΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΖΗΤΗΜΑΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΤΟ ΠΛΗΡΩΣ ΕΞΗΛΕΚΤΡΙΣΜΕΝΟ ΠΛΟΙΟ, Δρ. Κ. Χατζηλάου, Καθ/τής ΣΝΔ, Ι. Μ. Προυσαλίδης, Επ. Καθ/τής ΕΜΠ, Δρ Γ. Αντωνόπουλος, ΔΕΣΜΗΕΑΕ, Πλωτάρχης (Μ) Ι. Κ. Γύπαρης ΠΝ, MSc MESE, Π. Βαλλιανάτος, HM - ROTECH Engineering Ltd.
- [32] *“Ηλεκτροπρόωση Πολεμικών Πλοίων”*, Χατζηλάου Ι.Κ, Γύπαρης Ι.Κ. Μονογραφία ΣΝΔ, Πειραιάς.
- [33] *“Συστήματα ηλεκτροπρόωσης υποβρυχίων του Πολεμικού Ναυτικού”*, Διήμερο ΤΕΕ, Χατζηλάου Ι.Κ, Γαλάνης Γ. , Περτζινίδης Ν.
- [34] <http://www.dockingbycontrol.com/bow-thruster-guide.html>
- [35] <http://www.europeanmarine.co.uk/>

## Παράρτημα Α: Δομικό διάγραμμα υπολογισμού παραμέτρων επίδοσης

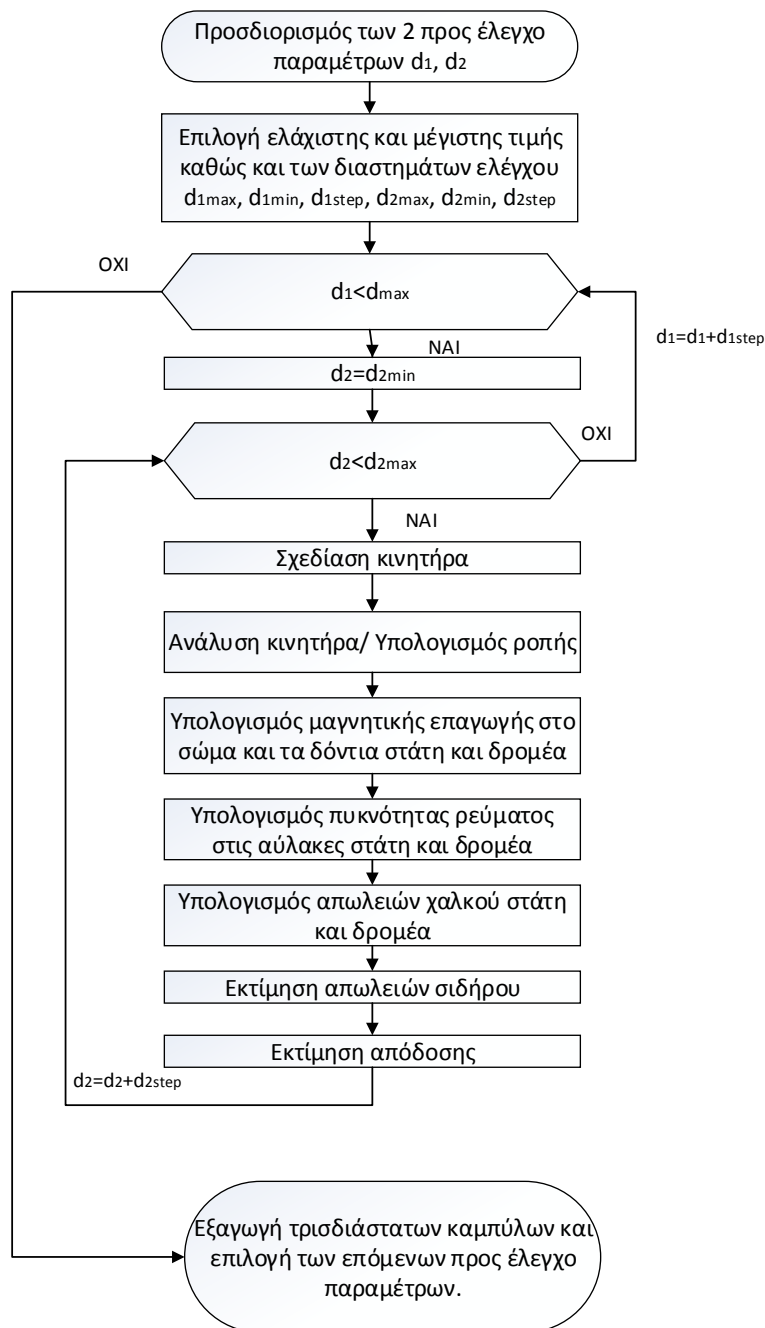
Στο σημείο αυτό περιγράφονται οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για την βελτιστοποίηση του κινητήρα και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων που περιεγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

Η εξαγωγή της καμπύλης ροπής ολίσθησης αποτέλεσε βασικό στοιχείο στην επιλογή γεωμετρίας κινητήρα για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Για κάθε γεωμετρία κινητήρα, αφότου οι βασικές διαστάσεις και τα υλικά έχουν επιλεγεί, ακολουθείται η ακόλουθη διαδικασία για την κατασκευή της καμπύλης:



Διάγραμμα Ροής 1. Σχεδίαση και ανάλυση του κινητήρα, εξαγωγή καμπύλης ροπής-ολίσθησης.

## Παράρτημα Β: Δομικό διάγραμμα τεχνικής βελτιστοποίησης



Διάγραμμα Ροής 2. Ανάλυση ευαισθησίας ως προς 2 γεωμετρικές παραμέτρους και υπολογισμός της ηλεκτρικής και μαγνητικής φόρτισης και των απωλειών του κινητήρα για την περιοχή τιμών που ελέγχεται.

Για τη βελτιστοποίηση του κινητήρα πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 5. Κατά την ανάλυση ευαισθησίας μεταβάλλονται κάθε φορά δυο βασικές γεωμετρικές παράμετροι του κινητήρα και τα αποτελέσματα που

## Παραρτήματα

---

αφορούν τη φόρτιση, την επίδοση και την απόδοση του κινητήρα καταγράφονται σε αντίστοιχα διαγράμματα. Η διαδικασία πραγματοποίησης ανάλυσης ευαισθησίας ως προς δυο γεωμετρικές παραμέτρους περιγράφεται στο ακόλουθο διάγραμμα ροής. Πριν από την έναρξη της διαδικασίας καθορίζεται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή για τις δυο παραμέτρους που ελέγχονται με βάση τους κατασκευαστικούς περιορισμούς και τα ήδη υπάρχοντα αποτελέσματα.