



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

## Σχεδίαση και Βελτιστοποίηση Δρομέα Ηλεκτρικής Μηχανής Επαγωγής Ισχύος 2HP

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Άγγελος Α. Χριστοφή

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

Αθήνα, Ιούλιος 2010





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

## Σχεδίαση και Βελτιστοποίηση Δρομέα Ηλεκτρικής Μηχανής Επαγωγής Ισχύος 2HP

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Άγγελος Α. Χριστοφή

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τη 15<sup>η</sup> Ιουλίου 2010.

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

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

.....  
Στάυρος Παπαθανασίου  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2010

.....  
Άγγελος Α. Χριστοφή

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

Copyright © Άγγελος Α. Χριστοφή, 2010.

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.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

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. Ιδιαίτερος ευχαριστώ επίσης τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Μίνω Μπενιακάρ που πρόθυμα με στήριξε κατά τη διαδικασία της σχεδίασης.

Ευχαριστώ επίσης, το σύνολο του προσωπικού του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος για τη συνεργασία του στα πλαίσια εκπόνησης της εργασίας.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μελέτη βελτιστοποίησης της απόδοσης μέσω μεταβολής του δρομέα ασύγχρονης μηχανής ισχύος 2 HP του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Συγκεκριμένα η βελτιστοποίηση αφορά αναζήτηση βέλτιστης γεωμετρίας του δρομέα της μηχανής με ταυτόχρονη χρησιμοποίηση χαλκού αντί αλουμινίου στον κλωβό.

Σε ένα πρώτο βήμα η εργασία επιχειρεί μια λεπτομερή ανάλυση των μηχανών επαγωγής και της προσέγγισης τους με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Ακολούθως παρουσιάζεται η γεωμετρία της υπό μελέτη μηχανής και κατάλληλη προσομοίωσή της σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (femm) καθώς και πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων. Επιπλέον εφαρμόζονται οι προϋποθέσεις που υιοθετεί η κλασική μέθοδος σχεδίασης των μηχανών επαγωγής και συγκεκριμένα του δρομέα αυτών που αποτελεί το ιδιαίτερο αντικείμενο μελέτης, καθ' όλη την πορεία βελτιστοποίησης των παραμέτρων.

Επίσης προτείνεται ένας εναλλακτικός τρόπος προσέγγισης του προβλήματος σχεδίασης της γεωμετρίας του δρομέα της μηχανής και τέλος συγκρίνονται τα αποτελέσματα ανάδειξης της βέλτιστης γεωμετρίας.

### Λέξεις Κλειδιά

Κινητήρες επαγωγής, δρομέας κλωβού με χαλκό, απώλειες πυρήνα μηχανών επαγωγής, εύρεση βέλτιστης γεωμετρίας αυλάκων δρομέα.





## **ABSTRACT**

This dissertation undertakes a study on the optimisation of a 2 HP induction machine in the Electrical Machines and Power Electronics Laboratory of the National Technical University of Athens, through the modification of the machine's rotor. In particular, the optimisation is achieved by searching for the optimal geometry of the machine rotor while using copper instead of aluminium in the rotor cage.

In a first step, the study attempts a detailed analysis of induction machines and their representation by using the finite element method. Consequently, the geometry of the machine under study and its simulation through a finite element software (femm) is presented, along with experimental validation of the results. The preconditions adopted in the classical design methodology for induction machines are implemented, particularly concerning the rotor constituting the central point of study during the parameter optimisation procedure.

An alternative approach to the problem of designing the machine rotor geometry involving less constraints is also proposed; finally, the results leading to the optimal geometry are compared.

### **Keywords:**

Induction Machines, copper rotor cage, iron losses, rotor geometry optimization.



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βελτιστοποίηση του δρομέα μηχανής επαγωγής ισχύος 2HP του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η όλη ιδέα αφορά την αντικατάσταση του υπάρχοντος δρομέα κλωβού αλουμινίου, καθώς επίσης και τροποποιήσεις της γεωμετρίας των αυλάκων για την επίτευξη καλύτερης επίδοσης και απόδοσης.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται θεωρητική ανάλυση των μηχανών επαγωγής καθώς και της προκαταρκτικής μελέτης σχεδίασης τους. Περιγράφονται τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των μηχανών αυτών καθώς και η εξαγωγή και ανάλυση του ισοδύναμου κυκλώματος. Επεξηγείται η χαρακτηριστική ροπής – στροφών που αποτελεί κεντρικό στοιχείο μελέτης της εργασίας και δίνεται η κατάταξη των μηχανών κατά NEMA.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων που αποτελεί σημαντικό εργαλείο προσέγγισης και ανάλυσης των μηχανών επαγωγής, διατυπώνονται οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την επίλυση μαγνητοστατικών προβλημάτων και προβλημάτων αρμονικών χρονικών μεταβολών καθώς επίσης περιγράφονται οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η γεωμετρία της υπό βελτιστοποίηση μηχανής και η ανάπτυξη του τυλίγματος του στάτη, περιγράφεται η σχεδίαση της στο πρόγραμμα femm, καθώς και η επίλυση και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Ακολουθώς παρουσιάζονται οι δοκιμές κενού φορτίου και ακινητοποιημένου δρομέα, που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο για τον προσδιορισμό των απωλειών της μηχανής και την εύρεση της καμπύλης ροπής – ολίσθησης της και τέλος παρουσιάζεται η πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αρχικά διερευνάται η μεταβολή που επιφέρει στη συμπεριφορά της μηχανής η αλλαγή του υλικού των αυλάκων του δρομέα στην υφιστάμενη γεωμετρία και ακολούθως επιχειρείται βελτιστοποίηση της γεωμετρίας των αυλάκων. Ως παράμετροι βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται το ύψος των αυλάκων, το πλάτος των οδοντώσεων και ο συνολικός αριθμός των αυλάκων του δρομέα. Αναλύεται η επίδραση κάθε παραμέτρου μεταβολής ξεχωριστά στη ροπή και την ολίσθηση της μηχανής, και τέλος συνδυάζοντας τις προαναφερόμενες μεταβολές προκύπτει η βέλτιστη γεωμετρία.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένας νέος τρόπος εύρεσης της βέλτιστης γεωμετρίας χωρίς να επιβάλλεται σταθερό πλάτος οδοντώσεων δρομέα, ενώ υιοθετεί περισσότερες μεταβλητές βελτιστοποίησης. Επισημαίνονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής και προτείνεται διαδικασία εύρεσης βελτίστου και μεθοδολογία σχεδίασης.

Στο έκτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα της εργασίας, η συνεισφορά της στην προαγωγή της επιστήμης και τέλος προτείνονται εργασίες για περαιτέρω διερεύνηση.

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει τα ακόλουθα σημεία καινοτόμου συνεισφοράς:

- Διερευνά τη βέλτιστη γεωμετρία του δρομέα με κριτήρια την επίδοση και απόδοση στις ονομαστικές λειτουργικές συνθήκες των ασύγχρονων μηχανών ισχύος 2 HP του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος του ΕΜΠ, που αποτελεί μόνη επιδίωξη στην περίπτωση τροφοδοσίας από μετατροπέα.
- Εισάγει εναλλακτική μεθοδολογία βελτιστοποίησης γεωμετρίας με λιγότερες προϋποθέσεις από αυτές που θέτει η κλασική σχεδίαση, και αναδεικνύει πιθανή βέλτιστη γεωμετρία δρομέα χωρίς σταθερό πλάτος οδόντων.
- Αναπτύσσει μια γρήγορη, εύκολα εφαρμόσιμη, και ικανοποιητικά ακριβή μεθοδολογία υπολογισμού των απωλειών πυρήνα της μηχανής, μέσω κατάλληλου κώδικα που βασίζεται στην αλληλεπίδραση των προγραμμάτων MATLAB και FEMM.

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<u>Κεφάλαιο 1</u>	<u>ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ</u>	Σελίδα
1.1	Εισαγωγή	11
1.2	Ιστορική αναδρομή	11
1.3	Κατασκευαστικά στοιχεία	11
1.3.1	Στάτης	12
1.3.2	Δρομέας	13
1.4	Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας	14
1.4.1	Ταχύτητα Επαγωγικής Μηχανής	14
1.4.2	Στρεφόμενο Μαγνητικό Πεδίο	14
1.5	Εξαγωγή Ισοδυνάμου Κυκλώματος	17
1.5.1	Ανάλυση Ισοδυνάμου Κυκλώματος	21
1.6	Χαρακτηριστική Ροπής – Στροφών	23
1.7	Κατάταξη Κινητήρων επαγωγής	26
1.8	Κλασσική Σχεδίαση Μηχανών Επαγωγής	29
1.8.1	Βασική Διαστασιολόγηση	29
1.8.2	Τυλίγματα	31
1.8.3	Θέρμανση – ψύξη ηλεκτρικών μηχανών	32
<u>Κεφάλαιο 2</u>	<u>ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ</u>	
2.1	Εισαγωγή	33
2.2	Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων	33
2.3	Εξισώσεις Μαγνητικού Πεδίου	34
2.3.1	Μαγνητοστατικά Προβλήματα	34
2.3.2	Αρμονικά Προβλήματα	35
2.4	Οριακές Συνθήκες	36
2.4.1	Οριακή Συνθήκη Dirichlet	36
2.4.2	Οριακή Συνθήκη Neumann	36
2.4.3	Οριακή Συνθήκη Robin	36
2.4.4	Περιοδική και αντιπεριοδική οριακή συνθήκη	37

### **Κεφάλαιο 3**

### **ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ**

<b>3.1</b>	Εισαγωγή	<b>39</b>
<b>3.2</b>	Ασύγχρονος Τετραπολικός Κινητήρας Ισχύος 2HP	
3.2.1	<i>Ονομαστικά Χαρακτηριστικά</i>	<b>39</b>
3.2.2	<i>Γεωμετρία</i>	<b>39</b>
3.2.3	<i>Τύλιγμα Στάτη</i>	<b>41</b>
<b>3.3</b>	Σχεδίαση Κινητήρα Στο Πρόγραμμα femm	<b>42</b>
3.3.1	<i>Σχεδίαση Στάτη</i>	<b>43</b>
3.3.2	<i>Σχεδίαση Δρομέα</i>	<b>44</b>
3.3.3	<i>Σχεδίαση Διακένου</i>	<b>45</b>
3.3.4	<i>Ορισμός Οριακών Συνθηκών</i>	<b>46</b>
3.3.5	<i>Δημιουργία Πλέγματος</i>	<b>48</b>
<b>3.4</b>	Αποτελέσματα Προσομοίωσης	<b>49</b>
<b>3.5</b>	Πειραματικές Μετρήσεις	<b>53</b>
<b>3.6</b>	Πειραματική Επιβεβαίωση των Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης	<b>56</b>

### **Κεφάλαιο 4**

### **ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΡΟΜΕΑ ΜΗΧΑΝΗΣ**

<b>4.1</b>	Εισαγωγή – Σκοπός	<b>59</b>
<b>4.2</b>	Αλλαγή υλικού με την υπάρχουσα γεωμετρία	<b>59</b>
<b>4.3</b>	Σχεδίαση Παραμετροποιημένου Δρομέα	<b>62</b>
<b>4.4</b>	Διαδικασία Εύρεσης Βέλτιστης Γεωμετρίας	<b>63</b>
<b>4.5</b>	Επιλογή Βέλτιστης Γεωμετρίας	<b>78</b>
4.5.1	<i>Σύγκριση με Προσομοιωμένη Μηχανή Εργαστηρίου</i>	<b>80</b>

### **Κεφάλαιο 5**

### **ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟΣ ΤΡΟΠΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ**

<b>5.1</b>	Εισαγωγή – Σκοπός	<b>83</b>
<b>5.2</b>	Παραμετροποίηση Αύλακος Δρομέα	<b>83</b>
<b>5.3</b>	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	<b>85</b>
<b>5.4</b>	Μηχανική Ισχύς Επιλεχθεισών Γεωμετριών	<b>95</b>
<b>5.5</b>	Συμπεράσματα	<b>96</b>

**Κεφάλαιο 6****ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

<b>6.1</b>	Σύνοψη εργασίας	<b>97</b>
<b>6.2</b>	Κυριότερα Συμπεράσματα	<b>99</b>
<b>6.3</b>	Συνεισφορά στην Προαγωγή της Επιστήμης	<b>100</b>
<b>6.4</b>	Εργασίες για Περαιτέρω Διερεύνηση	<b>100</b>

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ****103****ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ**

<b>I</b>	Διαδικασία σχεδίασης παραμετροποιημένου δρομέα	<b>107</b>
<b>II</b>	Διαδικασία περιστροφής δρομέα και υπολογισμού ροπής – ολίσθησης	<b>115</b>
<b>III</b>	Διαδικασία υπολογισμού απωλειών πυρήνα	<b>119</b>





# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ**

### **1.1 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.

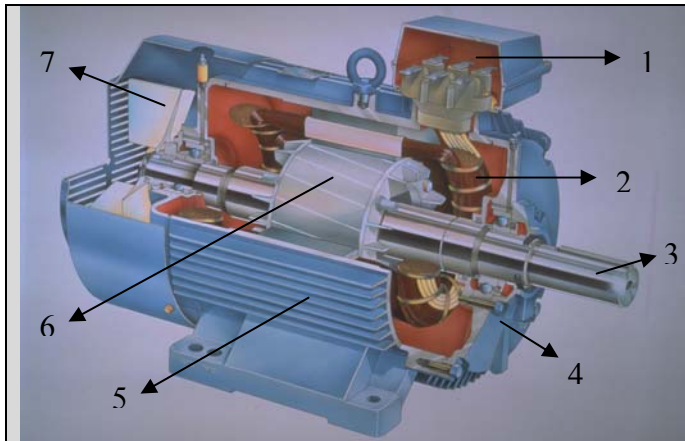
Στο εμπόριο διατίθενται διάφορα είδη επαγωγικών μηχανών καθένα για διαφορετική εφαρμογή. Αν και οι επαγωγικές μηχανές είναι εύκολες στο σχεδιασμό και την κατασκευή σε σχέση με τις μηχανές συνεχούς ρεύματος, ο έλεγχος της ροπής και της ταχύτητας που απαιτείται σε αρκετές εφαρμογές απαιτεί μεγαλύτερη κατανόηση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

### **1.2 Ιστορική Αναδρομή**

Η ιστορία της επαγωγικής μηχανής τοποθετείται στα τέλη της δεκαετίας του 1880 όπου δύο εφευρέτες που πειραματίζονταν ανεξάρτητα, με το εναλλασσόμενο ρεύμα, σε μια εποχή όπου κυριαρχούσε το συνεχές ρεύμα, ανακάλυψαν την έννοια του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Ο λόγος για τον Ιταλό Galileo Ferraris (1847 – 1897) ο οποίος κατά τη διάρκεια των πειραμάτων του ανακάλυψε ότι δύο εναλλασσόμενα ρεύματα ίδιας συχνότητας αλλά διαφορετικής αρχικής φάσης παράγουν στο χώρο ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο και για τον Nicola Tesla (1856 – 1943) ο οποίος όμως πειραματιζόταν με τρία εναλλασσόμενα ρεύματα και το 1891 εξέδωσε άρθρο όπου εξηγούσε θεωρητικά τη θεμελίωση του τρόπου λειτουργίας του επαγωγικού κινητήρα. Ο πρώτος επαγωγικός κινητήρας με ικανοποιητική συμπεριφορά κατασκευάστηκε από τον Ρώσο-Γερμανό Michael Dolivo-Dobrowolsky (1862 – 1919) το έτος 1889 ενώ πιστεύεται ότι το πρώτο επαγωγικό τύμπανο κατασκευάστηκε από τον Tesla ήδη από το 1883. Έκτοτε οι επαγωγικές μηχανές στηρίζονται στις θεωρίες του Faraday και του Tesla χωρίς καμιά ραγδαία εξέλιξη ως προς την δομή της κατασκευής τους παρά μόνο βελτιώσεις επιδόσεων, αποδόσεων και όγκου κατασκευής.

### **1.3 Κατασκευαστικά Στοιχεία**

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 προσεκτικά κατασκευασμένο διάκενο αέρος μεταξύ των δύο. Το σχήμα 1.3.1 είναι μια τομή της μηχανής όπου φαίνονται τα κύρια κατασκευαστικά στοιχεία της.



Σχήμα 1.3.1

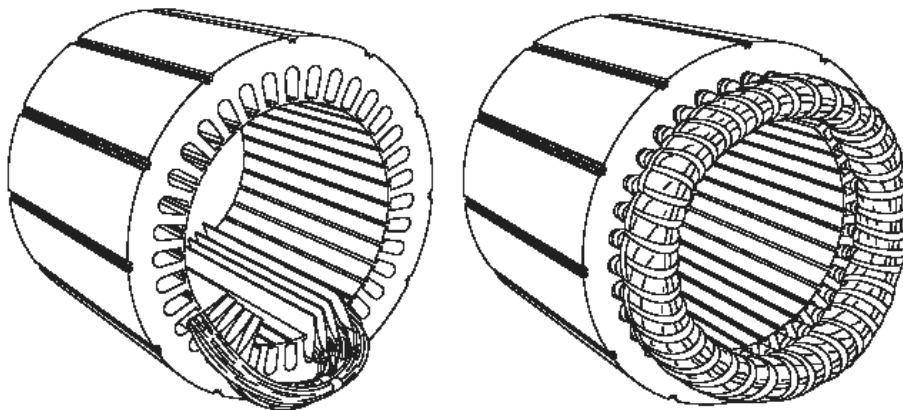
1. Κιβώτιο ακροδεκτών
2. Στάτης (πυρήνας και τυλίγματα)
3. Άξονας δρομέα
4. πλαίσιο συγκράτησης ρουλεμάν – άξονα
5. Περίβλημα μηχανής (πλαίσιο)
6. Δρομέας
7. Ανεμιστήρας ψύξεως

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.

### 1.3.1 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 1.3.1.1.



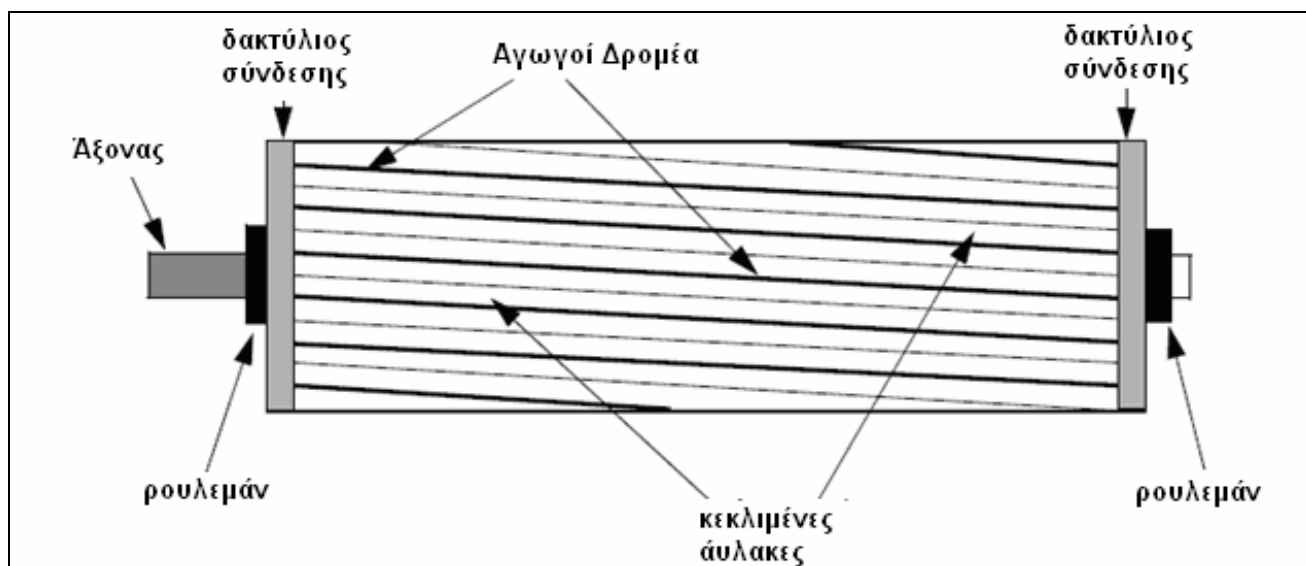
Σχήμα 1.3.1.1: Τυπικό Σχήμα Στάτη.

Στις αυλακώσεις αυτές εισάγονται πηνία από μονωμένα καλώδια. Κάθε ομάδα πηνίων μαζί με το κομμάτι του πυρήνα που περιτυλίγει, σχηματίζει έναν ηλεκτρομαγνήτη (ζεύγος πόλων) όταν εφαρμοστεί εναλλασσόμενη τροφοδοσία. Ο αριθμός των πόλων μιας επαγωγικής μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος εξαρτάται από την εσωτερική σύνδεση των τυλιγμάτων του στάτη. Τα

τυλίγματα του στάτη συνδέονται κατευθείαν στην τροφοδοσία και εσωτερικά συνδέονται ούτως ώστε κατά την εφαρμογή εναλλασσόμενης τροφοδοσίας να δημιουργείται στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

### 1.3.2 Δρομέας

Ο δρομέας είναι κατασκευασμένος από αρκετά, λεπτά φύλλα μετάλλου, με κατανομημένες ράβδους αλουμινίου ή χαλκού στην περιφέρεια του. Στον πιο διαδεδομένο τύπο δρομέα (δρομέας κλωβού) οι ράβδοι συνδέονται στις άκρες τους μηχανικά αλλά και ηλεκτρικά με τη χρήση δακτυλίων. Σχεδόν το 90% των επαγωγικών μηχανών έχουν δρομέα κλωβού λόγω της απλής και εύκολης κατασκευής του. Ο δρομέας αποτελείται από ένα κυλινδρικό πυρήνα από φύλλα μετάλλου με διαμήκειες παράλληλες αύλακες που φέρουν τους αγωγούς. Κάθε αύλακα φέρει ράβδο από αλουμίνιο, χαλκό ή κράμα. Οι ράβδοι είναι μονίμως βραχυκυκλωμένοι και στα δύο άκρα, μέσω των δακτυλίων όπως το σχήμα 1.3.2.1. Αυτή η απλή κατασκευή είναι ο κλωβός με κεκλιμένες ράβδους, που δίνει στο δρομέα το όνομα του.



Σχήμα 13.2.1 δρομέας κλωβού με κεκλιμένες ράβδους

Οι αύλακες του δρομέα δεν είναι ακριβώς παράλληλες με τον άξονα αλλά έχουν μια ελαφριά κλίση για δύο κυρίως λόγους. Ο πρώτος λόγος είναι να κάνει τη μηχανή να τρέχει πιο αθόρυβα μειώνοντας τον μαγνητικό θόρυβο και για να ελαττώσει τις αρμονικές αυλάκων. Ο δεύτερος λόγος είναι για να βοηθήσει την μείωση της τάσης «κλειδώματος» του δρομέα. Τα δόντια του δρομέα έχουν την τάση να ακινητοποιούνται κάτω από τα δόντια του στάτη όπου υπάρχει απευθείας μαγνητική έλξη μεταξύ τους. Αυτό συμβαίνει όταν ο αριθμός των οδοντώσεων του δρομέα είναι ίσος με τον αριθμό οδοντώσεων του στάτη.

Ο δρομέας προσάπτεται στο στέλεχος της μηχανής χρησιμοποιώντας ρουλεμάν στις δύο άκρες. Συνήθως η μια άκρη είναι μακρύτερη από την άλλη για να οδηγεί το φορτίο. Μεταξύ του στάτη και του δρομέα υπάρχει διάκενο αέρος, μέσω του οποίου μεταφέρεται ενέργεια από το στάτη στο δρομέα εξ επαγωγής. Η παραγόμενη ροπή αναγκάζει το δρομέα και το φορτίο να περιστραφούν. Ανεξάρτητα από τον τύπο δρομέα που θα χρησιμοποιηθεί, η αρχή λειτουργίας περιστροφής παραμένει η ίδια.

## 1.4 ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

### 1.4.1 Ταχύτητα της επαγωγικής μηχανής

Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται στο στάτη περιστρέφεται στη σύγχρονη ταχύτητα ( $N_s$ ).

$$N_s = 120 \cdot \frac{f}{p} \quad (1.4.1.1)$$

Όπου:  $N_s$  = η σύγχρονη ταχύτητα του μαγνητικού πεδίου του στάτη σε ΣΑΛ (στροφές ανά λεπτό)

$p$  = ο αριθμός των πόλων του στάτη

$f$  = η συχνότητα της πηγής σε Hz

Το μαγνητικό πεδίο που παράγεται στο δρομέα λόγω της επαγόμενης τάσης είναι εναλλασσόμενο εκ φύσεως. Για μείωση της σχετικής ταχύτητας, με αναφορά το στάτη, ο δρομέας αρχίζει να κινείται στην ίδια κατεύθυνση με την ροή του στάτη και προσπαθεί να ευθυγραμμιστεί με την στρεφόμενη ροή. Πρακτικά όμως ο δρομέας ποτέ δεν ευθυγραμμίζεται με το πεδίο του στάτη αλλά κινείται λίγο πιο αργά από την ταχύτητα του πεδίου του στάτη. Η ταχύτητα αυτή ονομάζεται ταχύτητα βάσης ( $N_b$ ). Η διαφορά μεταξύ της σύγχρονης ταχύτητας  $N_s$  και της ταχύτητας βάσης  $N_b$  ονομάζεται ολίσθηση. Η ολίσθηση αλλάζει ανάλογα με το φορτίο. Μια αύξηση στο φορτίο αναγκάζει τον δρομέα να κινηθεί πιο αργά ή αύξηση της ολίσθησης. Μια μείωση στο φορτίο κάνει το δρομέα να κινηθεί πιο γρήγορα οπότε η ολίσθηση μειώνεται. Η ολίσθηση εκφράζεται ως ποσοστό και μπορεί να προσδιοριστεί από την ακόλουθη εξίσωση.

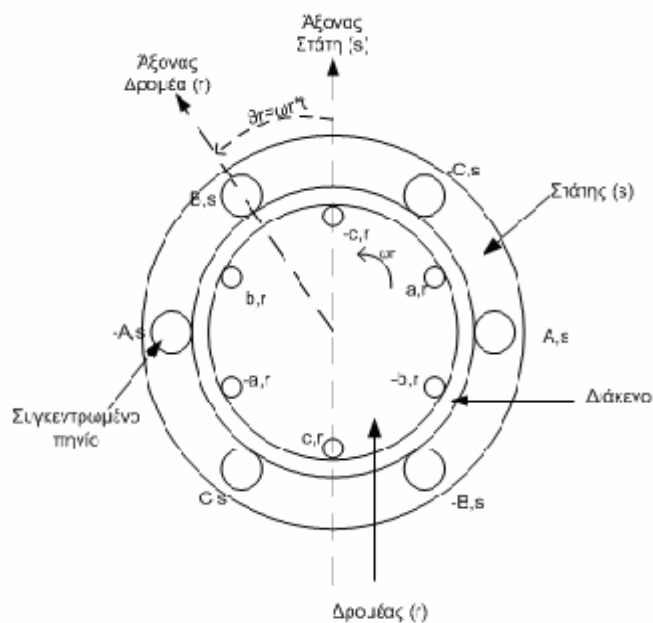
$$\%s = \frac{N_s - N_b}{N_s} \cdot 100 \quad (1.4.1.2)$$

Όπου:  $N_s$  = η σύγχρονη ταχύτητα σε ΣΑΛ

$N_b$  = η ταχύτητα βάσης σε ΣΑΛ

### 1.4.2 Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο

Το σχήμα (1.4.2.1) δείχνει τη θεμελιώδη τριφασική διπολική μηχανή επαγωγής, όπου το τύλιγμα κάθε φάσεως στο στάτη και στο δρομέα αντιπροσωπεύεται από ένα συγκεντρωμένο πηνίο.



Σχήμα 1.4.2.1 Θεμελιώδης τριφασική ασύγχρονη επαγωγική μηχανή

Τα τριφασικά τυλίγματα, σε συνδεσμολογία αστέρα ή τριγώνου, είναι ημιτονοειδώς κατανομημένα και τοποθετημένα σε αύλακες. Η μηχανή επαγωγής μπορεί να θεωρηθεί ως ένας τριφασικός μετασχηματιστής με στρεφόμενο και βραχυκυκλωμένο δευτερεύον τύλιγμα. Το διάκενο της μηχανής είναι πρακτικά ομοιόμορφο (απουσία εκτυπότητας). Αγνοώντας την επίδραση των αυλάκων και τις αρμονικές χώρου, λόγω της μη γραμμικής κατανομής του τυλίγματος στάτη, μπορεί να αποδειχθεί ότι η συμμετρική τριφασική τροφοδότηση του τυλίγματος δημιουργεί στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με τη σύγχρονη ταχύτητα. Η ανάλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί με γραφική ή και αναλυτική μέθοδο. Θεωρείται ένα σύστημα τριφασικών ημιτονοειδών ρευμάτων που ρέουν στο τριφασικό τύλιγμα του στάτη, ως εξής:

$$I_a = I_m \cos \omega_e t \quad (1.4.2.1)$$

$$I_b = I_m \cos(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}) \quad (1.4.2.2)$$

$$I_c = I_m \cos(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}) \quad (1.4.2.3)$$

Το τύλιγμα κάθε φάσεως, ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα τυλίγματα, θα παράγει ένα κύμα ΜΕΔ ημιτονοειδώς κατανομημένο και σφύζον περίξ των αντιστοίχων αξόνων. Το σχήμα (1.4.2.2) δείχνει τα κύματα ΜΕΔ τη χρονική στιγμή  $t=0$ . Τότε είναι:

$$i_a = I_m, i_b = -\frac{I_m}{2}, i_c = -\frac{I_m}{2} \quad (1.4.2.4)$$

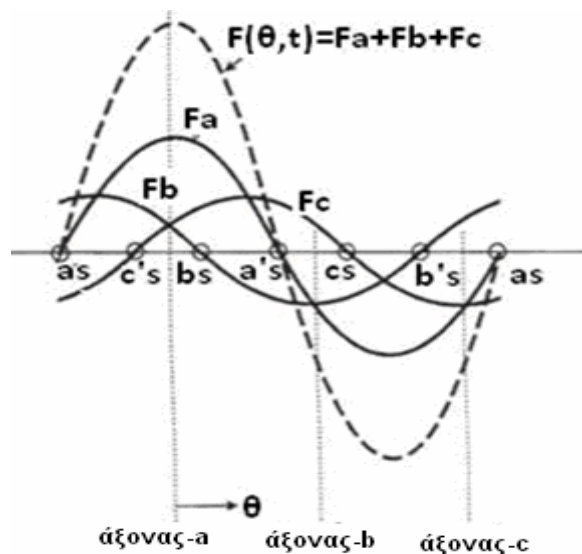
Σε χωρική γωνία  $\theta$ , οι εκφράσεις των ΜΕΔ δίνονται ως εξής:

$$F_a(\theta) = Ni_a \cos \theta \quad (1.4.2.5)$$

$$F_b(\theta) = Ni_b \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \quad (1.4.2.6)$$

$$F_c(\theta) = Ni_c \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \quad (1.4.2.7)$$

Όπου  $N$  ο αριθμός των ελιγμάτων ανά φάση.



Σχήμα 1.4.2.2 Κατανομή των κυμάτων ΜΕΔ σε τριφασικό τύλιγμα στάτη

Η συνιστάμενη ΜΕΔ στην ίδια γωνία θα είναι:

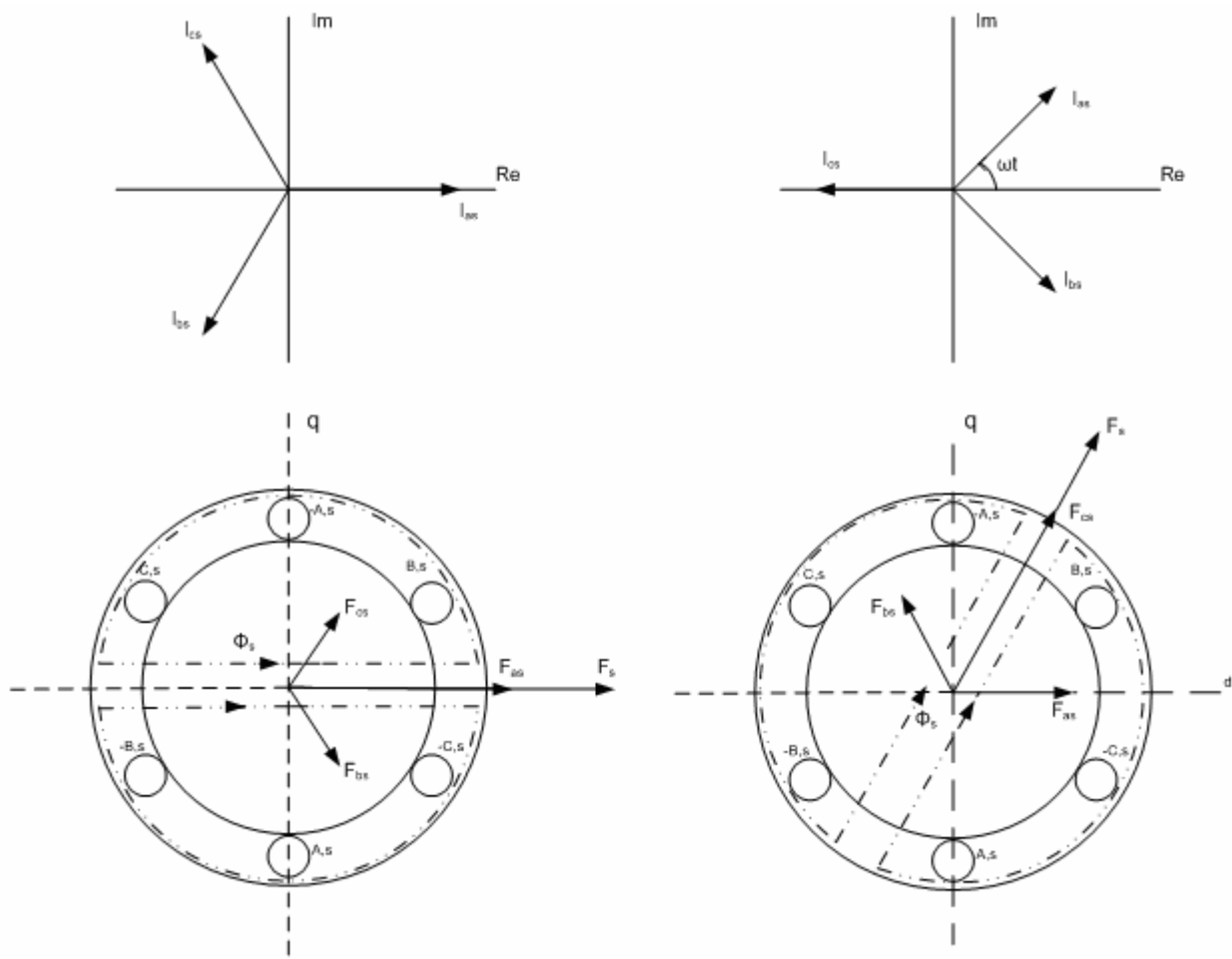
$$F(\theta) = F_a(\theta) + F_b(\theta) + F_c(\theta) \Rightarrow$$

$$F(\theta) = Ni_a \cos \theta + Ni_b \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + Ni_c \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \Rightarrow$$

$$F(\theta, t) = NI_m \left[ \cos \omega_e t \cos \theta + \cos\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right]$$

$$F(\theta, t) = \frac{3}{2} NI_m \cos(\omega_e t - \theta) \quad (1.4.2.8)$$

Η εξίσωση (1.4.2.8) αποδεικνύει ότι ένα ημιτονοειδώς κατανομημένο κύμα ΜΕΔ με πλάτος  $(3/2) \cdot N \cdot I_m$  στρέφεται στο διάκενο με τη σύγχρονη ταχύτητα ( $\omega_e$ ).



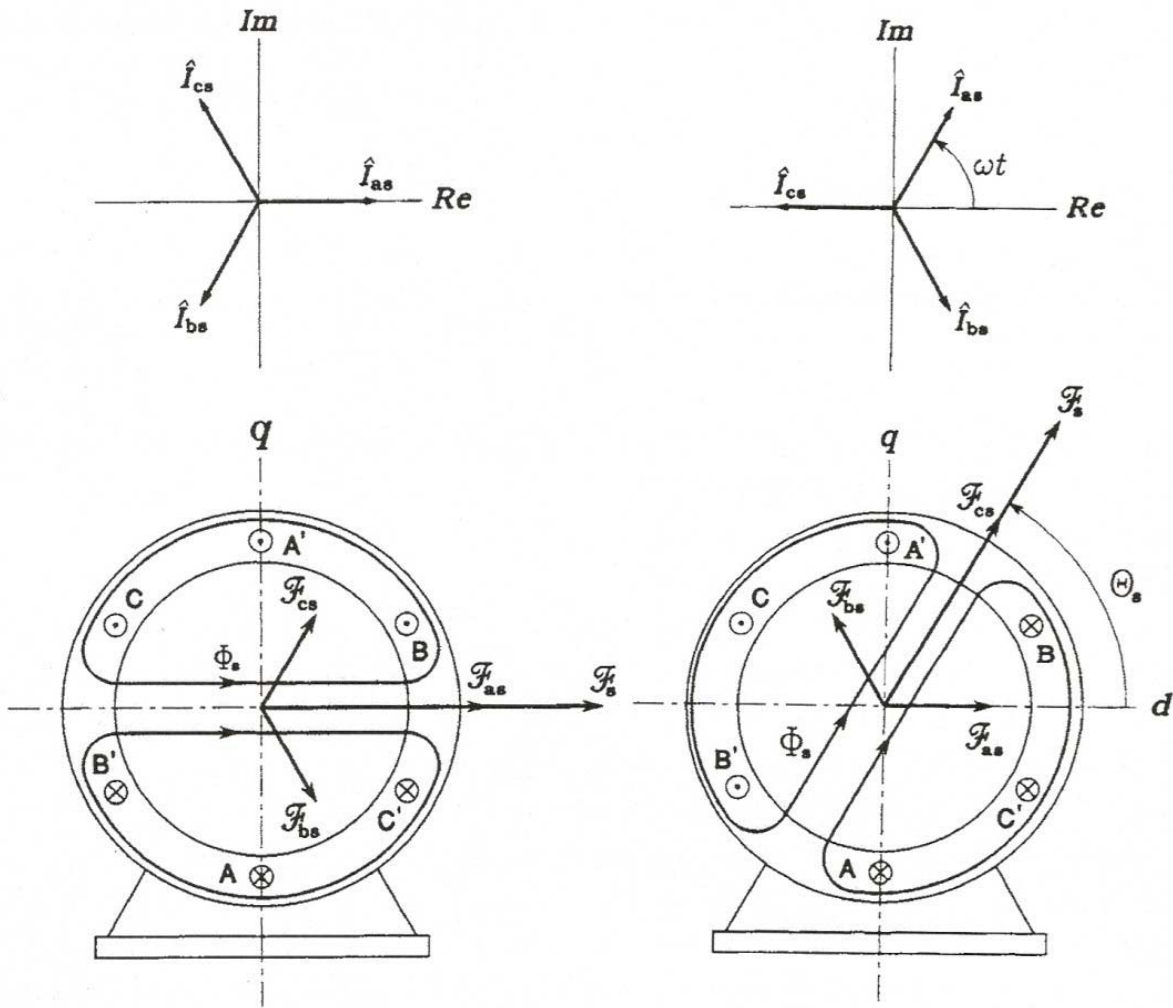
Σχήμα 1.4.2.3: Φασιοθέτες των ρευμάτων του στάτη και παραγόμενο μαγνητικό πεδίο για  $\omega t=0^\circ$  (αριστερά) και  $\omega t=60^\circ$  (δεξιά) σε διπολικό κινητήρα επαγωγής στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας

Σε μια διπολική μηχανή το κύμα ΜΕΔ κάνει μια περιστροφή σε μία περίοδο των τριφασικών ρευμάτων (σχήμα (1.4.2.3)).

Για τις πολυπολικές μηχανές της πράξεως (έστω μια Ρ-πολική μηχανή) η περιστροφική ταχύτητα του κύματος ΜΕΔ θα είναι:

$$N_e = \frac{120 f_e}{p} \quad (1.4.2.9)$$





Σχήμα 1.4.2.4: Φασιοθέτες των ρευμάτων του στάτη και παραγόμενο μαγνητικό πεδίο για  $\omega t=0^\circ$  (αριστερά) και  $\omega t=60^\circ$  (δεξιά) σε τετραπολικό κινητήρα επαγωγής στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας

### 1.5 Εξαγωγή Ισοδύναμου Κυκλώματος

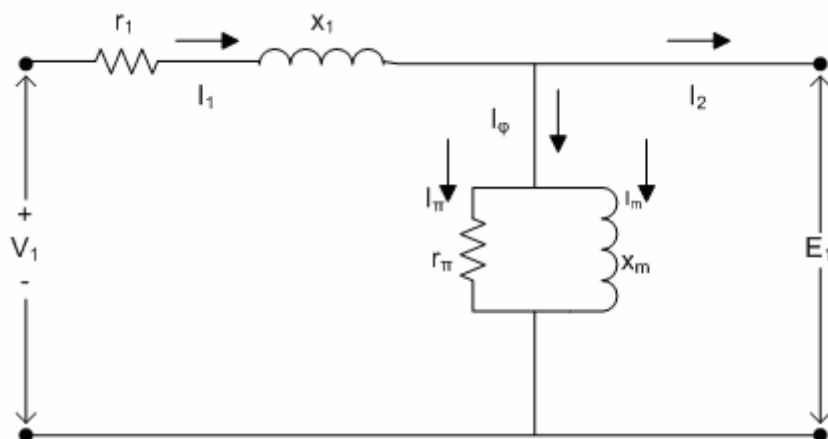
Η άνωθι μελέτη των κυμάτων ροής και ΜΕΔ στη θεμελιώδη διπολική μηχανή ευχερώς μπορεί να μεταφραστεί σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα μόνιμου καταστάσεως. Στην παραπέρα ανάλυση θεωρούνται ηλεκτρικές μηχανές επαγωγής που έχουν μόνο συμμετρικά τριφασικά τυλίγματα τα οποία διεγείρονται από συμμετρικές πολυφασικές τάσεις. Η μελέτη μπορεί να περιοριστεί μόνο σε μια φάση δεδομένου ότι η συμπεριφορά όλων των φάσεων σ' ένα συμμετρικό πολυφασικό σύστημα είναι η ίδια και η μόνη διάκριση μεταξύ τους είναι η χαρακτηριστική διαφορά φάσεως χρόνου. Για τριφασικές μηχανές θεωρείται ότι το τύλιγμα το στάτη είναι συνδεδεμένο κατά αστέρα. Η υπόθεση αυτή καθιστά τη μελέτη πιο εύκολη καθώς το ρεύμα γραμμής ταυτίζεται με το ρεύμα φάσεως της μηχανής ενώ η τάση της φάσεως έχει την τιμή της τάσεως της γραμμής προς τον ουδέτερο. Θεωρούνται επίσης ότι όλα τα ρεύματα και οι τάσεις έχουν ημιτονοειδή μορφή κύματος. Αγνοούνται δηλαδή οι επιδράσεις των αρμονικών χώρου στη διανομή της ροής εκτός όταν πρόκειται για τον υπολογισμό των αντιδράσεων σκεδάσεως στάτη και δρομέα.

Η μελέτη αρχίζει από το στάτη. Το κύμα ροής διακένου που περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, παράγει ισορροπημένες πολυφασικές αντιηλεκτρεγερτικές δυνάμεις (αντι-ΗΕΔ) στις

φάσεις του στάτη. Η τάση ακροδεκτών του τυλίγματος του στάτη  $V_1$  διαφέρει από την αντι-HEΔ,  $E_1$  κατά την πτώση τάσεως στη σύνθετη αντίσταση σκέδασης του στάτη, την  $z_1 = r_1 + jx_1$ . Έτσι είναι:

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + jx_1) \quad (1.5.1)$$

Όπου  $I_1$  το ρεύμα του στάτη. Οι φορές των ανωτέρω μεγεθών φαίνονται στο σχήμα 1.5.1. Η παραγόμενη ροή διακένου προκύπτει από τη συνδυασμένη δράση των ΜΕΔ των ρευμάτων στάτη και δρομέα. Όπως ακριβώς και στην περίπτωση του μετασχηματιστή, το ρεύμα του στάτη μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες: σε ρεύμα φορτίου και ρεύμα διέγερσης. Το ρεύμα φορτίου  $I_2$  παράγει ΜΕΔ που αντιστοιχεί στη ΜΕΔ των ρευμάτων του δρομέα. Το ρεύμα διέγερσης  $I_\phi$  είναι το επιπλέον ρεύμα στάτη που απαιτείται για την παραγωγή της επακόλουθης ροής διακένου και είναι μια συνάρτηση της ΗΕΔ  $E_1$ . Αυτό μπορεί να αναλυθεί σε ρεύμα απωλειών πυρήνα  $I_\pi$  σε φάση με την  $E_1$  και ρεύμα μαγνήτισης  $I_m$  που έπεται της  $E_1$  κατά  $90^\circ$ . Στο ισοδύναμο κύκλωμα, το ρεύμα διέγερσης μπορεί να ληφθεί υπ' όψη με έναν εγκάρσιο κλάδο, που συνίσταται σε μία αντίσταση απωλειών σιδήρου  $r_\pi$  και μια αντίδραση μαγνήτισης  $x_m$  εν παραλλήλω, συνδεδεμένο κατά μήκος της  $E_1$  (σχήμα (1.5.1)). Οι  $r_\pi$  και  $x_m$  υπολογίζονται συνήθως για ονομαστική συχνότητα στάτη και για μια τιμή της  $E_1$  κοντά στην αναμενόμενη τιμή υπό συνθήκες ονομαστικής λειτουργίας. Κατά προσέγγιση θεωρούνται αμετάβλητες στις μικρές μεταβολές της  $E_1$  κατά τη λειτουργία της μηχανής.



Σχήμα 1.5.1: Ισοδύναμο κύκλωμα στάτη πολυφασικού κινητήρα επαγωγής

Στη συνέχεια πρέπει να ληφθεί υπόψη η επίδραση του δρομέα. Από την οπτική γωνία του ισοδύναμου κυκλώματος του στάτη, ο δρομέας μπορεί να αναπαρασταθεί από μια ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση  $z_2 = E_2/I_2$  που αντιστοιχεί στη σύνθετη αντίσταση σκέδασης ενός σταθερού δευτερεύοντος. Για την ολοκλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος πρέπει τώρα να προσδιορίσουμε την  $z_2$  ανάγοντας τις ποσότητες στάτη και δρομέα (ρεύματα και τάσεις) σε ποσότητες του δρομέα ανηγμένες στο στάτη.

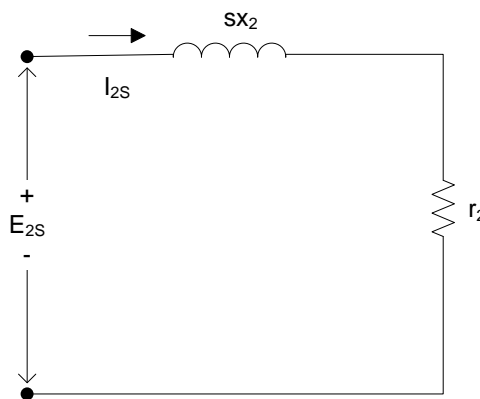
Στην ανάλυση των μετασχηματιστών, από την πλευρά του πρωτεύοντος, το δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή μπορεί να αντικατασταθεί από ένα ισοδύναμο δευτερεύον τύλιγμα που έχει τον ίδιο αριθμό ελιγμάτων με το πρωτεύον. Σε ένα μετασχηματιστή με λόγο ελιγμάτων και δευτερεύουσες παραμέτρους γνωστές, αυτό μπορεί να γίνει με αναγωγή των σύνθετων αντιστάσεων από το δευτερεύον στο πρωτεύον, πολλαπλασιάζοντας με το τετράγωνο του λόγου ελιγμάτων πρωτεύοντος προς δευτερεύον. Το συνεπαγόμενο ισοδύναμο κύκλωμα προκύπτει πλήρως ανηγμένο στην πλευρά του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή. 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 τυλίγματος δρομέα. Συνεπώς, η σχέση μεταξύ της σύνθετης αντίστασης σκέδασης του ισοδύναμου δρομέα στη συχνότητα ολισθήσεως ( $z_{2s}$ ) και της αντίστοιχης του πραγματικού δρομέα ( $z_{\text{rotor}}$ ) θα είναι:

$$z_{2s} = \frac{\hat{E}_{2s}}{\hat{I}_{2s}} = r_2 + jx_2 \quad (1.5.2)$$

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  $f_r = s \cdot f_e$ , 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 (1.5.2).



**Σχήμα 1.5.2:** Ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα δρομέα πολυφασικής επαγωγικής μηχανής στη συχνότητα ολισθήσεως

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:

$$\hat{I}_{2s} = \hat{I}_2 \quad (1.5.3)$$

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:

$$E_{2s} = sE_1 \quad (1.5.4)$$

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

$$\hat{E}_{2s} = s\hat{E}_1 \quad (1.5.5)$$

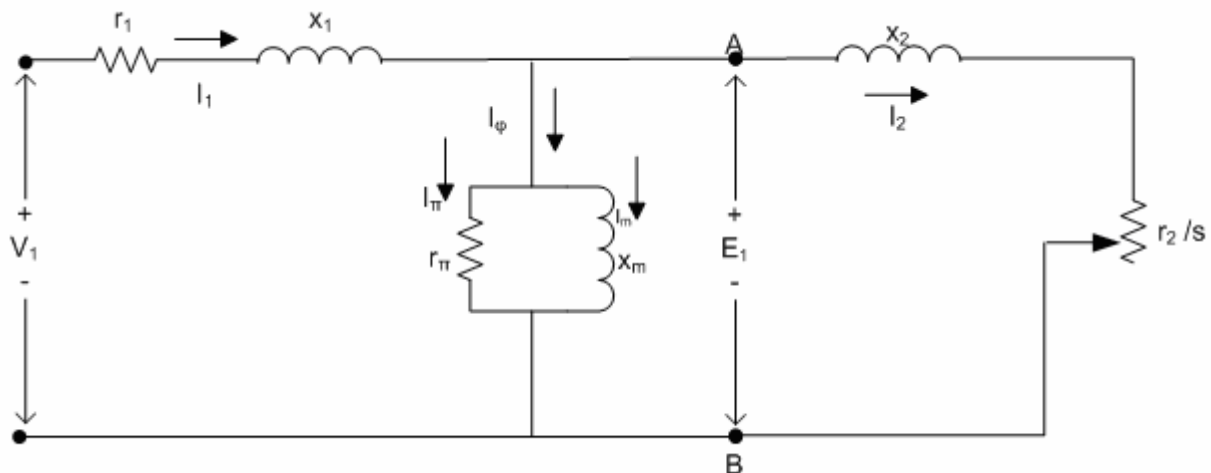
Αν διαιρεθεί η (1.5.5) με την (1.5.3) κατά μέλη και ληφθεί υπόψη η (1.5.2) τότε:

$$\frac{\hat{E}_{2s}}{\hat{I}_{2s}} = \frac{s\hat{E}_1}{\hat{I}_2} = z_{2s} = r_2 + jsx_2 \quad (1.5.6)$$

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

$$z_2 = \frac{\hat{E}_2}{\hat{I}_2} = \frac{r_2}{s} + jx_2 \quad (1.5.7)$$

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 (1.5.3). 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 1.5.3: Ισοδύναμο κύκλωμα πολυφασικού κινητήρα επαγωγής

### 1.5.1 Ανάλυση Ισοδύναμου Κυκλώματος

Από το κύκλωμα του σχήματος 1.5.3 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 ισοδύναμου κυκλώματος διαπιστώνεται ότι η ισχύς που προσδίδεται στο διάκενο από τα τυλίγματα του στάτη είναι

$$P_{g1} = m_1 E_1 I_2 \cos \phi_2 \quad (1.5.1.1)$$

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

$$T = \frac{1}{\omega_s} m_1 E_1 I_2 \cos \phi_2 = \frac{P_s}{4\pi f} m_1 E_1 I_2 \cos \phi_2 \quad N \cdot m \quad (1.5.1.2\alpha)$$

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:

$$T = \frac{1}{\omega_s} P_{g1} \quad (1.5.1.2\beta)$$

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:

$$P_{g1} = m_1 I_2^2 \frac{r_2}{s} \quad (1.5.1.3)$$

$$T = \frac{1}{\omega_s} m_1 I_2^2 \frac{r_2}{s} \quad (1.5.1.4)$$

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

$$P = (1-s)\omega_s T = (1-s)P_{g1} \quad (1.5.1.5)$$

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 ολισθήσεως είναι γι' αυτό:

$$P_{g2} = sP_{g1} \quad (1.5.1.6)$$

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.

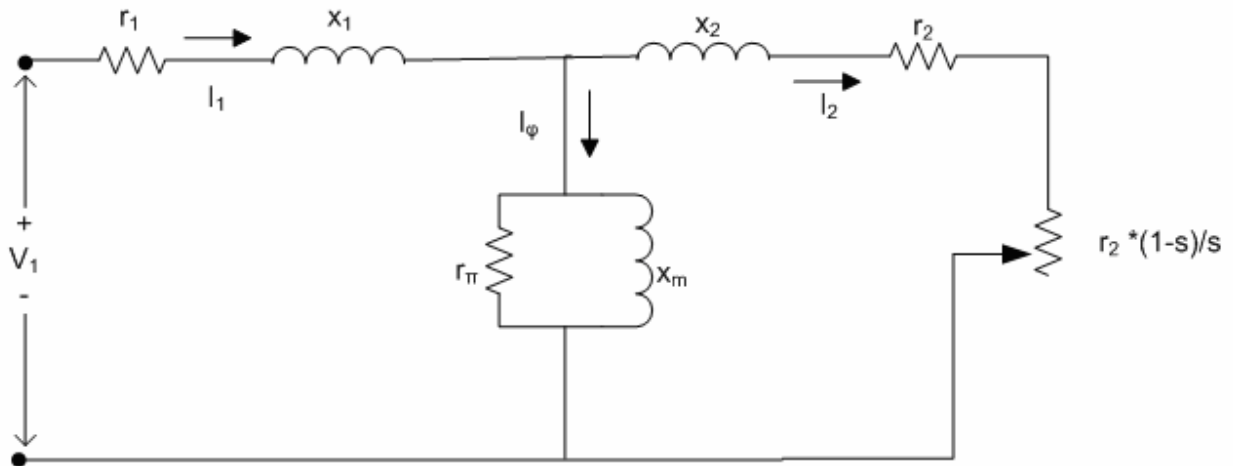
$$\text{απώλειες χαλκού δρομέα} = sP_{g1} = s\omega_s T \quad (1.5.1.7)$$

Συμπέρασμα που συμφωνεί με το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού της εξίσωσης 1.5.1.3 επί  $s$ . Μια μηχανή επαγωγής που λειτουργεί υπό υψηλή ολίσθηση είναι εγγενώς ένα μη αποδοτικό μέσο παραγωγής ροπής.

Αντικατάσταση της εξίσωσης 1.5.1.3 στην εξίσωση 1.5.1.5 δίνει για την εσωτερική μηχανική ισχύ

$$P = m_1 I_2^2 r_2 \frac{1-s}{s} \quad (1.5.1.8)$$

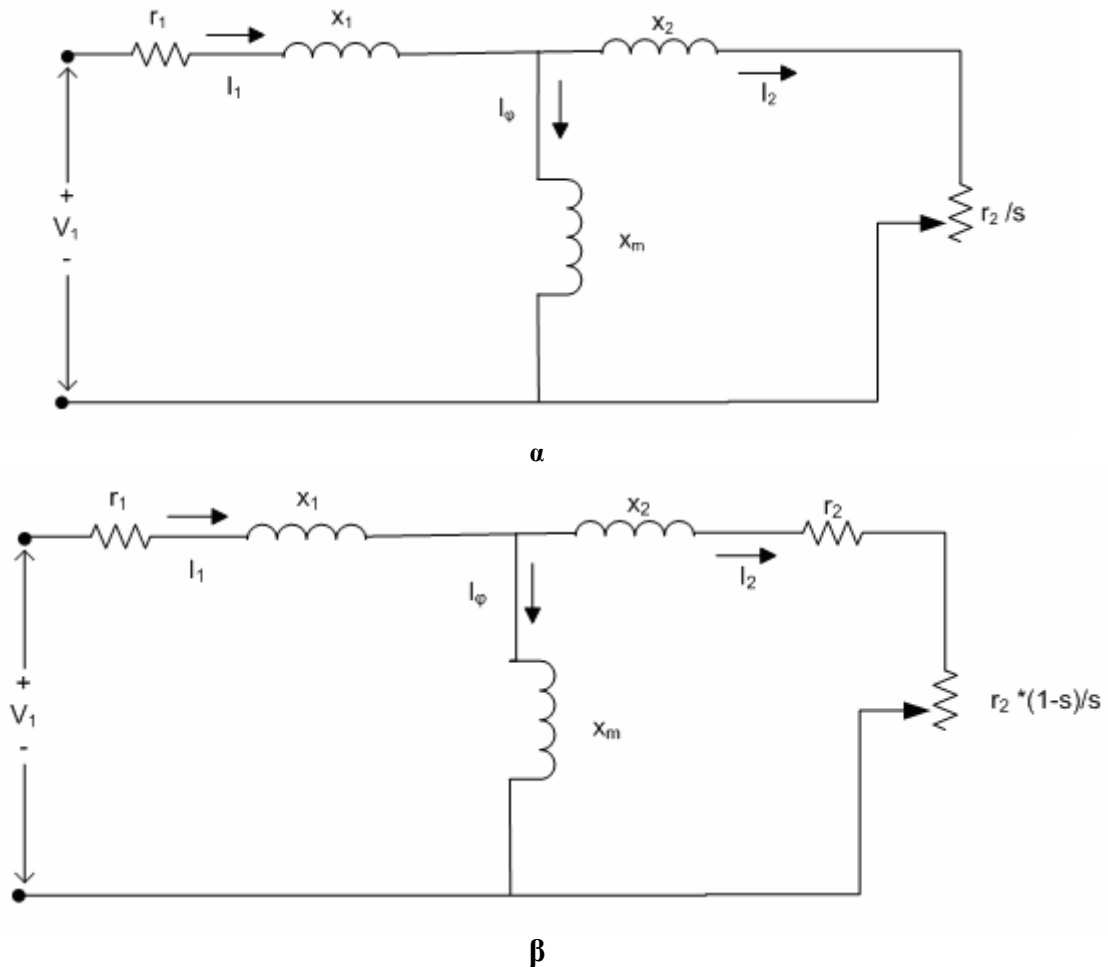
Όταν πρέπει να θεωρηθούν απόψεις ισχύος, το ισοδύναμο κύκλωμα σχεδιάζεται συχνά όπως το σχήμα 1.5.1.1. Η εσωτερική μηχανική ισχύς ανά φάση στάτη ισούται με την ισχύ που απορροφάται από την αντίσταση  $r_2 = (1-s)/s$ .



Σχήμα 1.5.1.1: Ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα μηχανής επαγωγής για προσδιορισμό ισχύος

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 ισοδύναμου κυκλώματος της μηχανής προκύπτει αν η παράλληλη αντίσταση  $r_\pi$  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 1.5.1.2α ή 1.5.1.2β 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 χωρισθεί τότε από την τριβή και τον ανεμισμό. Τα τελευταία αυτά κυκλώματα θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα κεφάλαια.



Σχήμα 1.5.1.2: Απλουστευμένα ισοδύναμα κυκλώματα. Η απώλεια πυρήνα συντίθεται με την τριβή και τον ανεμισμό

### 1.6 Χαρακτηριστική Ροπής – Στροφών

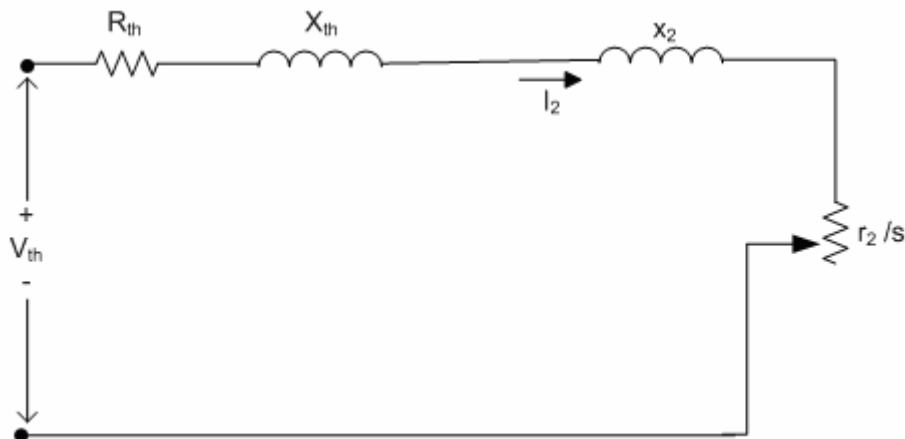
Για τον καθορισμό της ροπής και της ισχύος της μηχανής επαγωγής με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα χρησιμοποιείται το θεώρημα του Thevenin για την απλοποίηση του ισοδύναμου κυκλώματος. Με την ανάλυση αυτή η τάση του στάτη  $V_1$  στα κυκλώματα του σχήματος 1.5.1.2 αντικαθίσταται με την ισοδύναμη τάση  $V_{th}$  η οποία υπολογίζεται ως εξής.

$$\dot{V}_{th} = \dot{V}_1 \cdot \frac{jx_m}{r_1 + j(x_1 + x_m)} \quad (1.6.1)$$

Οι σύνθετες αντιστάσεις αντικαθίστανται με τις ισοδύναμες αντιστάσεις

$$\begin{aligned} Z_{th} &= (r_1 + jx_1) // jx_m \\ Z_{th} &= \frac{(r_1 + jx_1) \cdot jx_m}{(r_1 + jx_1 + jx_m)} \\ Z_{th} &= R_{th} + jX_{th} \end{aligned} \quad (1.6.2)$$

Έτσι προκύπτει το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.6.1



Σχήμα 1.6.1 Απλοποιημένο κατά thevenin ισοδύναμο κύκλωμα μηχανής επαγωγής

Από το παραπάνω σχήμα μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί το ρεύμα  $I_2$  το οποίο όταν αντικατασταθεί στην εξίσωση ροπής 1.5.1.4 δίνει την έκφραση της ροπής μέσω του ισοδυνάμου κυκλώματος.

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

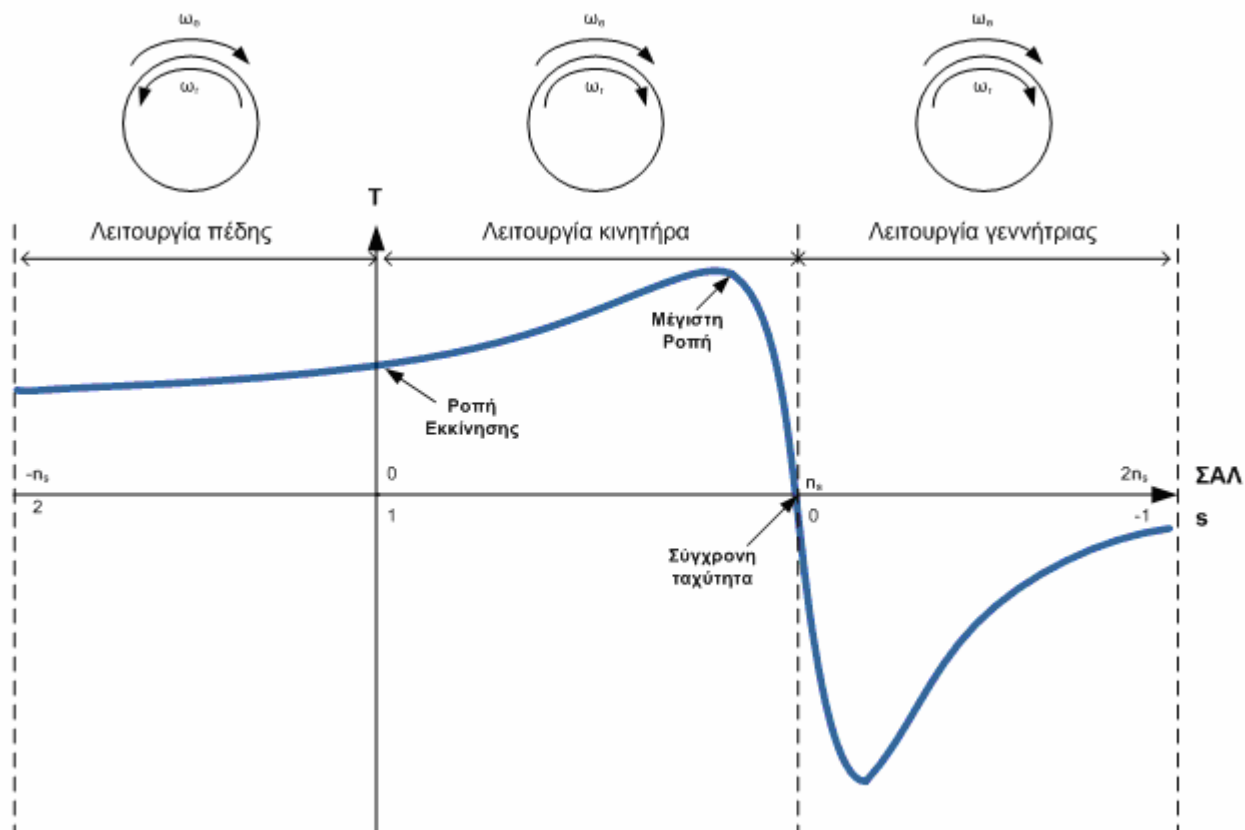
$$\text{και } I_2^2 = \frac{V_{th}^2}{\left(R_{th} + \frac{r_2}{s}\right)^2 + j(X_{th} + x_2)^2} \quad (1.6.3)$$

$$\stackrel{1.6.1.4}{\Rightarrow} T = m_1 \frac{p}{2} \frac{r_2}{s} \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{V_{th}^2}{\left(R_{th} + \frac{r_2}{s}\right)^2 + j(X_{th} + x_2)^2} \quad (1.6.4)$$

Από την εξίσωση 1.6.4 μπορεί να χαραχθεί η καμπύλη ροπής – ολισθήσεως που φαίνεται στο σχήμα 1.6.2

Από το σχήμα 1.6.2 διακρίνονται οι τρεις περιοχές λειτουργίας της επαγωγικής μηχανής. Ανάλογα με την ολίσθηση η μηχανή συμπεριφέρεται ως κινητήρας, ως γεννήτρια ή βρίσκεται σε κατάσταση πέδησης.

Η πρώτη περιοχή λειτουργίας που διακρίνεται είναι η λειτουργία πέδησης 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 οπότε 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 1.6.2: Καμπύλη Ροπής – Στροφών [T – n<sub>s</sub>] και Ροπής – Ολισθήσεως [T – s]

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 ολισθήσεως και για  $s=1$  βρίσκεται η ροπή εκκινήσεως. Αντικατάσταση του  $s$  την εξίσωση της ροπής (1.6.4) δίνει τη ροπή εκκίνησης.

$$T_{εκκ} = m_1 \frac{P}{2} \cdot \frac{r_2}{\omega_s} \cdot \frac{V_{th}^2}{(R_{th} + r_2)^2 + j(X_{th} + x_2)^2} \quad (1.6.5)$$

Η μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής προκύπτει αν από την εξίσωση της ροπής (1.5.1.4) 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:

$$\frac{r_2}{s_{maxT}} = \sqrt{R_{th} + (X_{th} + x_2)^2} \quad (1.6.6)$$

Η ολίσθηση τότε στη μέγιστη ροπή είναι:

$$s_{\max T} = \frac{r_2}{\sqrt{R_{th} + (X_{th} + x_2)^2}} \quad (1.6.7)$$

Οπότε η μέγιστη ροπή γίνεται:

$$T_{\max} = m_1 \frac{1}{2} \frac{p}{\omega_s} \frac{1}{R_{th} + \sqrt{R_{th} + (X_{th} + x_2)^2}} \frac{V_1^2}{R_{th} + \sqrt{R_{th} + (X_{th} + x_2)^2}} \quad (1.6.8)$$

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

$$P_{\varepsilon\sigma\sigma} = (1-s)P_g \quad (1.6.9)$$

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

### **1.7 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 Α:**

Οι κινητήρες κλάσης Α 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 Β 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 Α 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 Β. Τυπικές εφαρμογές αυτών των κινητήρων είναι η οδήγηση ανεμιστήρων, φουσερών, αντλιών, τόνων και άλλων εργαλειομηχανών.



### Κατασκευαστική Κλάση Β:

Οι κινητήρες κλάσεως Β είναι κινητήρες με κανονική ροπή εκκινήσεως, χαμηλό ρεύμα εκκινήσεως και χαμηλή ολίσθηση. Έχουν την ίδια περίπου ροπή εκκινήσεως με τις μηχανές κλάσης Α 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 Α. Το ρεύμα εκκινήσεως μειώνεται με κατάλληλο σχεδιασμό που αυξάνει την αντίδραση σκέδασης, ενώ η ροπή εκκινήσεως διατηρείται με χρήση δρομέα διπλού κλωβού ή βαθέων αυλάκων. Η ολίσθηση και η απόδοση πλήρους φορτίου είναι καλές, παρόμοιες με αυτές της κλάσης Α. 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.

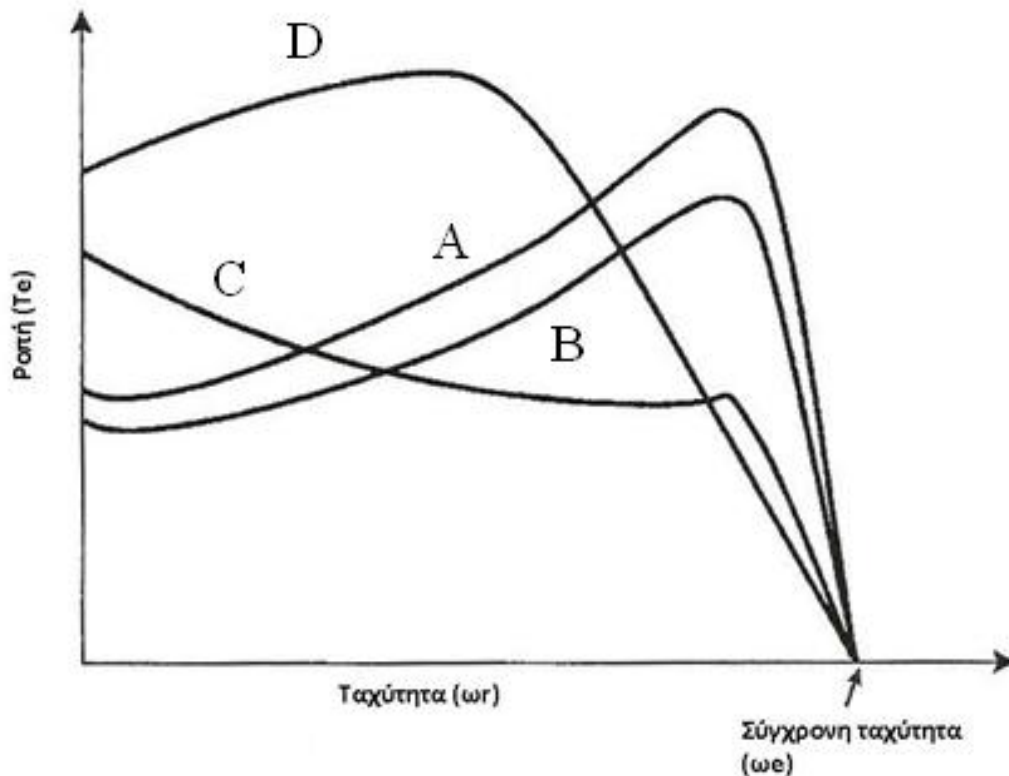
### Κατασκευαστική κλάση C:

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 Β. 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 Α και Β. Τυπικές εφαρμογές είναι οι συμπιεστές και οι ταινιόδρομοι.

### 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 Α, 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.

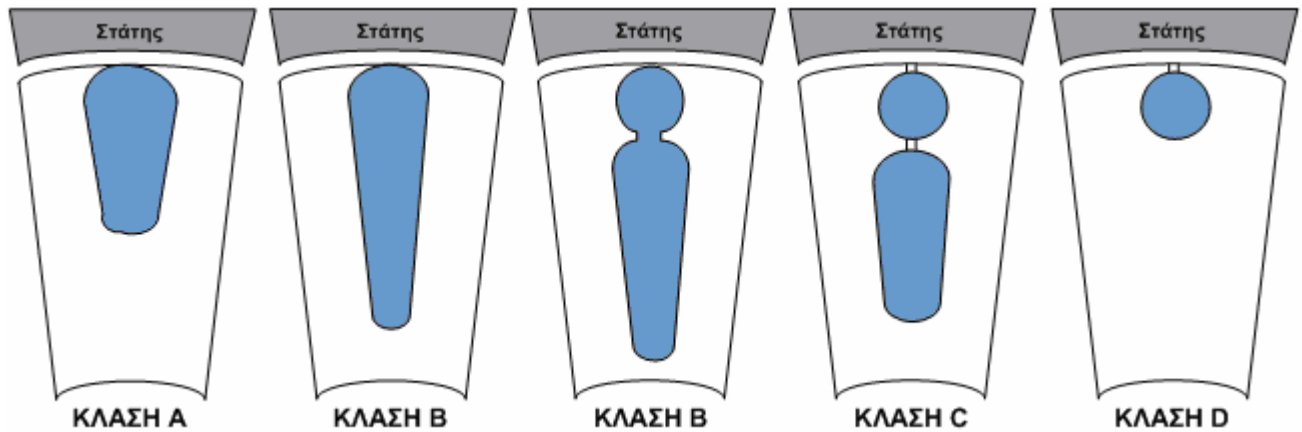
Στο σχήμα 1.8.1 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ροπής – στροφών των πιο πάνω κλάσεων κινητήρων, στο σχήμα 1.8.2 φαίνονται οι διαφοροποιήσεις στον κλωβό του δρομέα για την επίτευξη των χαρακτηριστικών κάθε κλάσης καθώς στον πίνακα 1.8.1 φαίνονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά κάθε κλάσης.



Σχήμα 1.7.1: Χαρακτηριστικές ροπές – στροφών των κλάσεων A,B,C και D κατά NEMA.

	<b>Κλάση A</b>	<b>Κλάση B</b>	<b>Κλάση C</b>	<b>Κλάση D</b>
<b>Τύπος</b>	Γενικής χρήσης	Γενικής χρήσης	Υψηλής ροπής εκκίνησης	Πολύ Υψηλής ροπής εκκίνησης
<b>Ροπή Εκκίνησης</b>	100% της ονομαστικής για μεγάλους κινητήρες, 200% της ονομαστικής για μικρούς	100% της ονομαστικής για μεγάλους κινητήρες, 200% της ονομαστικής για μικρούς	Περίπου 250% της ονομαστικής	>275% της ονομαστικής
<b>Ρεύμα Εκκίνησης</b>	800% του ονομαστικού	500%-600% του ονομαστικού		
<b>Μέγιστη Ροπή</b>	200%-300% της ονομαστικής	≥200% της ονομαστικής	Λίγο χαμηλότερη από την κλάση A	
<b>Μέγιστη Ολίσθηση</b>	<0.2	<0.2		Υψηλή, μπορεί να φτάσει το 1
<b>Ονομαστική Ολίσθηση</b>	<0.05 μικρότερη από ίδιου μεγέθους μηχανές κλάσεως B	Πρέπει να είναι <0.05 Συνήθως <0.03	<0.05, ψηλότερη από την κλάση B	Υψηλή, τυπικά 0.07 ως 0.11, μπορεί να φτάσει το 0.17
<b>Εφαρμογές</b>	Ανεμιστήρες, Φυσητήρες, αντλίες, εργαλειομηχανές	Ανεμιστήρες, Φυσητήρες, αντλίες, εργαλειομηχανές	Συμπιεστές, αντλίες, μάντες μεταφοράς	Εφαρμογές υψηλής αδράνειας. Π.χ μηχανικές διατρήσεις

Πίνακας 1.7.1: Συνοπτικά χαρακτηριστικά κάθε κλάσης



Σχήμα 1.7.2: Αύλακες Δρομέα των διαφόρων κλάσεων

### 1.8 Κλασική Σχεδίαση Μηχανών Επαγωγής

Οι ξεχωριστές απαιτήσεις κάθε εφαρμογής καθώς και η ποικιλότητα των εφαρμογών οδήγησαν στην ανάπτυξη κάποιων μεθόδων αναλυτικής ή μάλλον προκαταρκτικής σχεδίασης των μηχανών. Η ποικιλότητα αφορά την ισχύ κάθε μηχανής, τις στροφές της, την ονομαστική της ροπή και αρκετές άλλες παραμέτρους. Έτσι ο κλασικός ακολουθεί κάποια τυποποιημένα βήματα για την τελική κατασκευή της μηχανής. Αρχίζοντας από την βασική διαστασιολόγηση, περνά στην επιλογή των τυλιγμάτων, τη μελέτη του μαγνητικού κυκλώματος τον υπολογισμό των απωλειών και τη μελέτη θέρμανσης και ψύξης της μηχανής.

#### 1.8.1 Βασική Διαστασιολόγηση

Η προκαταρκτική σχεδίαση ξεκινά με την επιλογή των διαστάσεων της μηχανής η οποία αποφαινεται, μέσω των απαιτήσεων επιδόσεως της μηχανής. Συγκεκριμένα η όλη γεωμετρία περιστρέφεται γύρω από τις διαστάσεις του διακένου, τη διάμετρο  $D$  και το ενεργό μήκος  $L$ . Άλλα βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης μιας μηχανής είναι.

1. Ειδική μαγνητική φόρτιση  $B$ : που συνδέει τον αριθμό των πόλων  $p$  με τη ροή ανά πόλο  $\Phi$  και την επιφάνεια διακένου σύμφωνα με τη σχέση.

$$\bar{B} = \frac{p\Phi}{\pi DL} \quad (1.8.1.1)$$

Τυπικές τιμές αυτής της παραμέτρου είναι  $0.5T - 0.6T$ , οι οποίες περιορίζονται από το φαινόμενο του κορεσμού και τις σκεδάσεις των οδόντων.

2. Ειδική ηλεκτρική φόρτιση  $ac$ : προσδιορίζεται από την ενεργό τιμή των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο περιφέρειας διακένου, σύμφωνα με τη σχέση:

$$ac = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_s \cdot I}{\pi D} \quad (1.8.1.2)$$

Τυπικές τιμές είναι 15000 ως 45000 AE/m.

Αν λάβουμε υπόψη ότι:

- Η ενεργός τιμή της επαγόμενης τάσης  $E$  δίνεται από τη σχέση

$$E = 4.44 \cdot k_w \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi \quad (1.8.1.3)$$

με  $k_w$  ο συντελεστής τυλίγματος,  $f$  η ηλεκτρική συχνότητα,  $N_s$  ο συνολικός αριθμός ελιγμάτων ανά φάση,  $\Phi$  η θεμελιώδης ροή ανά πόλο.

- Η φαινόμενη ισχύς της μηχανής δίνεται από

$$S = 3E \cdot I \quad (1.8.1.4)$$

με  $I$  το ρεύμα φάσης

- Η ηλεκτρική συχνότητα  $f$  συνδέεται με τη μηχανική συχνότητα περιστροφής  $n$  (σε ΣΑΛ) με τη σχέση

$$f = \frac{p}{2} \cdot n \quad (1.8.1.5)$$

Τότε η φαινόμενη ισχύς της μηχανής γίνεται:

$$S = 1.11 \cdot k_w \cdot \pi^2 \cdot \bar{B} \cdot ac \cdot D^2 L \cdot n \quad (1.8.1.6)$$

Η παραπάνω σχέση συνδέει τα δύο βασικά μεγέθη της διαστασιολόγησης, την ειδική ηλεκτρική φόρτιση και την ειδική μαγνητική φόρτιση, με την ονομαστική φαινόμενη ισχύ της μηχανής.

3. Οριακή τάση διακένου: Το μέγεθος αυτό προσδιορίζεται αν διαιρεθεί η φυγόκεντρος δύναμη του δρομέα με το εμβαδόν του διακένου:

$$F = m \cdot \omega_{rm}^2 \cdot R \quad (1.8.1.7)$$

$$A = \pi DL \quad (1.8.1.8)$$

$$\text{οριακή τάση διακένου} = \frac{F}{A} \quad (1.8.1.9)$$

Με  $m$  την ισοδύναμη μάζα του δρομέα στην περιφέρεια του,  $R$  την ακτίνα του και  $\omega_{rm}$  η μηχανική γωνιακή ταχύτητα.

4. Πυκνότητα ρεύματος τυλίγματος: Αποτελεί βασικό ηλεκτρικό μέγεθος της μηχανής που σχετίζεται άμεσα με τη θερμική ισορροπία, καθώς από την πυκνότητα ρεύματος εξαρτώνται άμεσα οι απώλειες των τυλιγμάτων, οι οποίες προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας των μονώσεων και των λοιπών υλικών. Αν ξεπεραστεί ένα δεδομένο όριο θερμοκρασίας, μπορεί να μειωθεί η διηλεκτρική αντοχή των μονώσεων ή ακόμη και να επέλθει τήξη κάποιων υλικών. Αν η πυκνότητα ρεύματος ξεπεράσει τα  $3,5 - 4 \text{ A/mm}^2$ , χρειάζεται εξαναγκασμένη ψύξη η οποία μπορεί να είναι τεχνητός αερισμός, κλειστό κύκλωμα νερού στο στάτη ή υγρού υδρογόνου στο δρομέα για μεγάλες ισχύεις.

5. Αναλογία διαστάσεων  $D$  και  $L$ : Για μικρές μηχανές ισχύει ότι  $D \approx L$  ενώ για μεγαλύτερες μηχανές αυτό δεν ισχύει. Αν πρόκειται να κατασκευαστεί αργόστροφη μηχανή τότε το  $D$  μπορεί να είναι 10πλάσιο του  $L$ .

Η ροπή  $T_e$  που αναπτύσσεται στο διάκενο υπολογίζεται με βάση τη μέση εφαπτομενική πίεση των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο  $P_t$  και την επιφάνεια διακένου  $A$  σύμφωνα με τις πιο κάτω σχέσεις.

$$F_t = P_t \cdot A \quad (1.8.1.10)$$

$$T_e = \frac{1}{2} D \cdot F_t \quad (1.8.1.11)$$

$$T_e = \frac{\pi}{2} D^2 \cdot L \cdot P_t \quad (1.8.1.12)$$

Συνδέοντας έτσι τις διαστάσεις του διακένου με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της μηχανής και εισάγοντας τις απαιτήσεις της μηχανής καθώς και τους περιορισμούς φόρτισης που προκύπτουν από τη σχέση 1.8.1.13 βρίσκεται η διάμετρος του διακένου

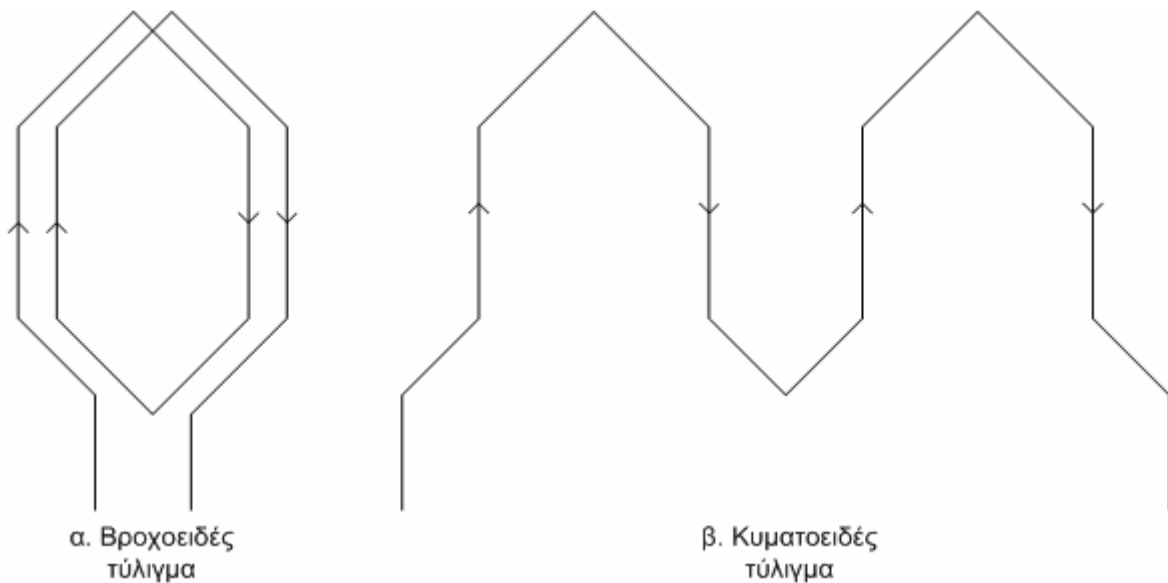
$$P_t = \frac{1}{\pi D \mu_o} \int \bar{B}_n \cdot \bar{B}_t \cdot dc \quad (1.8.1.13)$$

Για το μήκος της μηχανής ισχύει η εμπειρική σχέση (το  $D$  σε m)

$$L_s = 1.6 \cdot \sqrt{D} - 0.25 \quad (1.8.1.14)$$

### 1.8.2 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 τυλίγμα (σχήμα 1.8.2.1α) που συναντάται συνήθως σε μηχανές με μικρό αριθμό πόλων, κινητήρες πολλών στροφών ή γεννήτριες θερμικών σταθμών και το κυματοειδές (σχήμα 1.8.2.1β) που συναντάται σε κινητήρες χαμηλών στροφών ή γεννήτριες υδροηλεκτρικών σταθμών.



Σχήμα 1.8.2.1: Είδη τυλιγμάτων στάτη

Επίσης για την εξομάλυνση της μορφής της ΜΕΔ που προκαλείται και την όσο καλύτερη προσέγγιση της ημιτονοειδούς μορφής που είναι η ιδανική χρησιμοποιούνται τυλίγματα δύο ή περισσότερων στρώσεως κατανεμημένα σε πυκνότερα αυλάκια για τη μείωση του βήματος πράγμα που μειώνει το πλάτος των αρμονικών αλλά παράλληλα μειώνει και το πλάτος της θεμελειώδους συνιστώσας. Στο σχήμα 1.8.2.2 φαίνεται η κατανομή του τυλίγματος στις αυλάκες σε απλή και σε διπλή στρώση.



α. Τύλιγμα απλής στρώσης

β. Τύλιγμα διπλής στρώσης  
Κλασματικού βήματος 5/6Σχήμα 1.8.2.2: Κατανομή τυλιγμάτων στις αυλάκες  
α. απλή στρώση  
β. διπλή στρώση

### 1.8.3 Θέρμανση – Ψύξη ηλεκτρικών μηχανών

Όλες οι μηχανές σχεδιάζονται για λειτουργία σε θερμοκρασία μικρότερη των 100°C. Ανάλογα με την ισχύ της μηχανής επιλέγεται ο τύπος ψύξης ώστε να διασφαλίζεται η ασφάλεια της μόνωσης των τυλιγμάτων και γενικά των υλικών της μηχανής. Ο πίνακας 1.8.3.1 δείχνει τον διαχωρισμό αυτό ενώ στον πίνακα 1.8.3.2 φαίνονται οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες στη μηχανή ανάλογα με την κλάση μόνωσης.

Ισχύς Ηλεκτρικής Μηχανής	Τύπος Ψύξης
$P_m < H_p$	Φυσική ψύξη
$H_p < P_m < 10^3 H_p$	Εξαναγκασμένη ψύξη αέρα (περωτή)
$10^3 H_p < P_m < 10^5 H_p$	Υδροψυκτα τυλίγματα
$10^5 H_p < P_m$	Κυκλοφορία υγρού υδρογόνου

Πίνακας 1.8.3.1: Ψύξη μηχανών ανάλογα με την ισχύ

Κλάση μόνωσης	Αύξηση Θερμοκρασίας (°C)	Τελική θερμοκρασία (°C)
A	60	100
E	70	110
B	80	120
F	100	140
H	125	165

Πίνακας 1.8.3.2: Αύξηση θερμοκρασίας ανάλογα με την κλάση μόνωσης

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

### **ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

#### **2.1 Εισαγωγή**

Οι αναλυτικές τεχνικές επίλυσης προβλημάτων απαιτούσαν, και απαιτούν, επίλυση συνεχών διαφορικών εξισώσεων για την ανάλυση των προβλημάτων. Η απαίτηση αυτή έχει συνέπεια τη δυνατότητα ανάλυσης απλών γεωμετριών που επιλύονται γραμμικά. Η ανάγκη επίλυσης πολύπλοκων γεωμετριών, όπως οι μηχανές, οδήγησε στην ανάπτυξη των αριθμητικών μεθόδων επίλυσης προβλημάτων οι οποίες διακριτοποιούν το πρόβλημα το συνεχών διαφορικών εξισώσεων καθιστώντας εφικτή την ανάλυση τους. Η διακριτοποίηση αυτή έχει κόστος στην ακρίβεια επίλυσης, η οποία όμως γίνεται ικανοποιητική με τη σωστή χρήση των μεθόδων.

Με την βοήθεια των αριθμητικών μεθόδων οι διαφορικές εξισώσεις μετατρέπονται σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων με αγνώστους, τις τιμές του δυναμικού στους κόμβους που επελέγησαν. Η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων παρέχει την προσεγγιστική λύση. Η τιμή του δυναμικού για τα υπόλοιπα σημεία του χώρου ανάγεται με την βοήθεια κατάλληλων συναρτήσεων παρεμβολής. Επομένως η επιλογή της διακριτότητας κατά την αριθμητική επίλυση ενός προβλήματος αποτελεί τον συμβιβασμό μεταξύ δύο αντιμαχόμενων παραγόντων:

1. Την εκλογή αρκετών κόμβων ώστε το διακριτό πρόβλημα να προσεγγίζει αρκετά το αντίστοιχο συνεχές και τα αποτελέσματα να έχουν την επιδιωκόμενη ακρίβεια και

2. Την εκλογή λίγων κόμβων ώστε το σύστημα εξισώσεων που θα προκύψει να επιλυθεί σε "λογικό" χρόνο από τον διατιθέμενο ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Το σφάλμα προσεγγίσεως δεν εξαρτάται μόνο από την διακριτότητα αλλά είναι στενά συνυφασμένο και με το είδος της χρησιμοποιούμενης μεθόδου. Οι σημαντικότερες αριθμητικές μέθοδοι μπορούν να καταταχθούν σε τρεις οικογένειες: την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και την μέθοδο των οριακών στοιχείων. Η κατάταξη αυτή αναφέρεται στον τρόπο διακριτοποίησης του χώρου επειδή η διακριτότητα του χρόνου γίνεται με όμοιο τρόπο σε όλες τις μεθόδους και εξαρτάται από το υπό εξέταση φαινόμενο (αρμονικό, περιοδικό, μεταβατικό). Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

#### **2.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων**

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόζεται για πρώτη φορά στην επίλυση προβλημάτων του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από τον Silvester, το 1969. Ακολουθεί η δουλειά άλλων ερευνητών με την επίλυση κυρίως δισδιάστατων προβλημάτων, λόγω της αυξημένης υπολογιστικής επιβάρυνσης που απαιτούσε η εφαρμογή του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού σε προβλήματα τριών διαστάσεων, δυσκολία η οποία άρχισε να γεφυρώνεται με την εισαγωγή του

βαθμωτού μαγνητικού δυναμικού, η οποία παρουσιάστηκε αρχικά από τον Zienkiewicz το 1970, και επεκτάθηκε από τους Simkin και Trowbridge το 1980.

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, το εξεταζόμενο πεδίο αναπαρίσταται από μια ομάδα πεπερασμένων στοιχείων. Η διακριτοποίηση του χώρου πραγματοποιείται με τρίγωνα ή τετράεδρα, εάν το πρόβλημα είναι δισδιάστατο ή τρισδιάστατο, αντίστοιχα. Έτσι, ένα συνεχές φυσικό πρόβλημα μετατρέπεται σε διακριτό πρόβλημα πεπερασμένων στοιχείων με άγνωστες τιμές πεδίου στους κόμβους των κορυφών τους. Η επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος ανάγεται σε ένα αλγεβρικό σύστημα εξισώσεων και οι τιμές του πεδίου στο εσωτερικό των στοιχείων μπορούν να ανακτηθούν με τη χρήση των υπολογισμένων τιμών των κορυφών τους.

Στα τρίγωνα ή τετράεδρα της διακριτοποίησης θεωρείται ότι το διανυσματικό δυναμικό μεταβάλλεται γραμμικά σε αυτήν την περιοχή. Όσο πιο μικρά είναι τα στοιχεία, όσο πιο πυκνό πλέγμα κατασκευασθεί, τόσο η προσέγγιση της πραγματικής λύσης είναι ακριβέστερη. Με τον τρόπο αυτό το αρχικό σύστημα των λίγων διαφορικών εξισώσεων μετατράπηκε σε ένα πρόβλημα αλγεβρικών εξισώσεων με χιλιάδες ή δεκάδες χιλιάδες, όμως αγνώστους. Ωστόσο εξελιγμένες τεχνικές επίλυσης αλγεβρικών συστημάτων, γραμμικών και μη γραμμικών, καθώς και η αύξηση της ταχύτητας επεξεργασίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών επιτρέπουν την λύση αυτών των τεράστιων συστημάτων εξισώσεων σε μικρό χρονικό διάστημα.

### **2.3 Εξισώσεις Μαγνητικού Πεδίου**

Ανάλογα με το προς λύση πρόβλημα κατασκευάζονται οι κατάλληλες εξισώσεις για την επίλυση του. Τα προβλήματα μπορεί να είναι μαγνητοστατικά ή ηλεκτροστατικά όπου το αντίστοιχο πεδίο είναι χρονικά σταθερό και αρμονικά όπου οι ποσότητες είναι χρονικά μεταβαλλόμενες και θεωρούνται ημιτονοειδής για την επίλυση.

#### **2.3.1 Μαγνητοστατικά Προβλήματα**

Στην περίπτωση των μαγνητοστατικών προβλημάτων που είναι χρονικά αμετάβλητα η ένταση του μαγνητικού πεδίου ( $H$ ) και η μαγνητική επαγωγή ( $B$ ) δίνονται από τις εξισώσεις του Maxwell:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (2.3.1.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.3.1.2)$$

Όπου η σχέση μεταξύ τους για κάθε υλικό είναι:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.3.1.3)$$

Με  $\mu$  την μαγνητική διαπερατότητα του υλικού και αν το υλικό είναι μη γραμμικό ισχύει η σχέση

$$\mu = \frac{\vec{B}}{\vec{H}(\vec{B})} \quad (2.3.1.4)$$

Η επίλυση των εξισώσεων (2.3.1.1) και (2.3.1.2) στις δύο διαστάσεις γίνεται με χρήση του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού  $A$  το οποίο ορίζεται ως

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2.3.1.5)$$



Και η 2.3.1.1 γίνεται

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu(\bar{B})} \nabla \times \bar{A} \right) = \bar{J} \quad (2.3.1.6)$$

Για ένα γραμμικό ιστροπικό υλικό και λαμβάνοντας υπόψη την συνθήκη του Coulomb

$$\nabla \times \bar{A} = 0 \quad (2.3.1.7)$$

Η σχέση (2.3.1.6) μετατρέπεται στην εξίσωση Poisson :

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \times \bar{A} = \bar{J} \quad (2.3.1.8)$$

Το πλεονέκτημα της χρήσης της εξίσωσης του διανυσματικού δυναμικού είναι ότι όλες οι συνθήκες που ικανοποιούνται έχουν συνδυαστεί σε μια μόνο εξίσωση. Εάν βρεθεί το A, τότε το B και το H μπορούν να υπολογιστούν από το A. Η εξίσωση Laplace προκύπτει από την (2.3.1.6) μηδενίζοντας τον όρο J, οπότε έχουμε :

$$\nabla^2 \bar{A} = 0 \quad (2.3.1.9)$$

### 2.3.2 Αρμονικά Προβλήματα

Στα χρονικά μεταβαλλόμενα πεδία, δημιουργούνται δινορεύματα σε υλικά που έχουν μη μηδενική αγωγιμότητα. Στην περίπτωση αυτή οι εξισώσεις του Maxwell που σχετίζονται με την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου πρέπει να καθορισθούν. Δηλώνοντας την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σαν E και την πυκνότητα ρεύματος σαν J, η σχέση ανάμεσα τους είναι ( νόμος του Ohm ) :

$$\bar{J} = \sigma \bar{E} \quad (2.3.2.1)$$

Το εξ επαγωγής προκαλούμενο ηλεκτρικό πεδίο τότε διέπεται από την σχέση :

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{d\bar{B}}{dt} \quad (2.3.2.2)$$

Αντικαθιστώντας το διανυσματικό δυναμικό στην θέση του B στην (2.3.2.2) γίνεται :

$$\nabla \times \bar{E} = -\nabla \times \dot{\bar{A}} \quad (2.3.2.3)$$

Στην περίπτωση των προβλημάτων δύο διαστάσεων το διανυσματικό δυναμικό μπορεί να εκφραστεί μόνο με μια συνιστώσα  $A_z$  και ολοκληρώνοντας την εξίσωση (2.3.2.3) γίνεται :

$$\bar{E} = -\dot{\bar{A}} - \nabla V \quad (2.3.2.4)$$

Εισάγοντας την σχέση (2.3.2.1) στην σχέση (2.3.2.4) προκύπτει :

$$\bar{J} = -\sigma \dot{\bar{A}} - \sigma \nabla V \quad (2.3.2.5)$$

Και αντικαθιστώντας την σχέση (2.3.1.8) στην σχέση (2.3.2.5) προκύπτει :

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \bar{A} = \sigma \dot{\bar{A}} - \bar{J}_{src} - \sigma \nabla V \quad (2.3.2.6)$$

όπου το  $J_{src}$  αναπαριστά τις εφαρμοζόμενες πηγές ρεύματος. Ο όρος  $\nabla V$  είναι ένα πρόσθετο βαθμωτό διάνυσμα τάσης το οποίο εκφράζει τις τερματικές συνθήκες των αγωγών. Οπότε αν  $\nabla V = 0$  προκύπτει η εξίσωση διάχυσης του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού :

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \bar{A} - \sigma \dot{\bar{A}} = -\bar{J}_{src} \quad (2.3.2.7)$$

## 2.4 Οριακές Συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες τίθενται στο εκάστοτε πρόβλημα για δύο κυρίως λόγους:

- Τη σωστή επίλυση του προβλήματος και
  - Τη μείωση της επιφάνειας επίλυσης άρα και τη μείωση του χρόνου
- Χωρίζονται σε 4 κατηγορίες οι οποίες αναλύονται παρακάτω.

### 2.4.1 Οριακή συνθήκη Dirichlet

Η συνθήκη αυτή τίθεται στα όρια του προβλήματος όπου το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό  $A$  έχει σταθερή τιμή. Η ροή εφάπτεται του ορίου αυτού και δεν το διαπερνά. Συνήθως χρησιμοποιείται η ομογενοποιημένη συνθήκη Dirichlet στα εξωτερικά όρια του προβλήματος η οποία θέτει το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό  $A_z=0$ . Θέτοντας τη συνθήκη αυτή είναι ισοδύναμο με τη θεώρηση ενός εξωτερικού υλικού με μηδενική μαγνητική διαπερατότητα. Ένα μονωτικό υλικό.

### 2.4.2 Οριακή συνθήκη Neumann

Η συνθήκη αυτή τίθεται στα όρια του προβλήματος όπου η παράγωγος του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού  $\partial A / \partial n$  έχει σταθερή τιμή. Δηλαδή οι γραμμές της ροής έχουν σταθερή κλίση με το όριο. Η σύνηθες μορφή χρησιμοποίησης είναι τα σημεία του προβλήματος όπου  $\partial A / \partial n = 0$  δηλαδή όπου οι γραμμές της ροής είναι κάθετες στο όριο. Όταν εφαρμοστεί σ' ένα μαγνητικό πεδίο περιορίζει τη μαγνητική επαγωγή  $B$  να έχει μόνο συνιστώσες στη γραμμή του ορίου. Η εφαρμογή της είναι ισοδύναμη με την ύπαρξη εξωτερικού υλικού το οποίο έχει άπειρη μαγνητική διαπερατότητα.

### 2.4.3 Οριακή συνθήκη Robin

Αυτό το είδος οριακής συνθήκης είναι συνδυασμός των οριακών συνθηκών Dirichlet και Neumann, ορίζοντας μια σχέση ανάμεσα στην τιμή του  $A$  και στην κάθετη παράγωγο του ορίου. Έν γένει η οριακή συνθήκη Robin γράφεται :

$$\frac{\partial A}{\partial n} + c_1 A = c_2$$

Αυτή η οριακή συνθήκη χρησιμοποιείται συχνά στα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων σε προβλήματα με ρεύματα εξ' επαγωγής (δινορρεύματα).

#### 2.4.4 Περιοδική και Αντιπεριοδική Οριακή συνθήκη

Η περιοδική συνθήκη αυτή εφαρμόζεται σε δύο ή περισσότερες γραμμές του ορίου. Με την εφαρμογή της τίθεται το μαγνητικό δυναμικό των δύο γραμμών ίσο και χρησιμοποιείται στα σημεία του προβλήματος όπου το μαγνητικό πεδίο επαναλαμβάνεται. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται αρκετά ο χρόνος επίλυσης των προβλημάτων. Η αντιπεριοδική συνθήκη συμπεριφέρεται όπως ακριβώς η περιοδική με τη μόνη διαφορά ότι στα δύο σημεία που εφαρμόζεται θέτει μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό ίσο αλλά με αντίθετο πρόσημο.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ

#### 3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται εκτενώς ο επαγωγικός κινητήρας 2HP του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος του οποίου η βελτιστοποίηση αποτελεί τον σκοπό της εργασίας. Αναφέρονται τα ονομαστικά χαρακτηριστικά και παρουσιάζεται η γεωμετρία του κινητήρα καθώς επίσης περιγράφεται η σχεδίαση στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων femm, οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Τέλος παρουσιάζεται η πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων.

#### 3.2 Ασύγχρονος Τετραπολικός Κινητήρας Ισχύος 2HP

##### 3.2.1 Ονομαστικά Χαρακτηριστικά

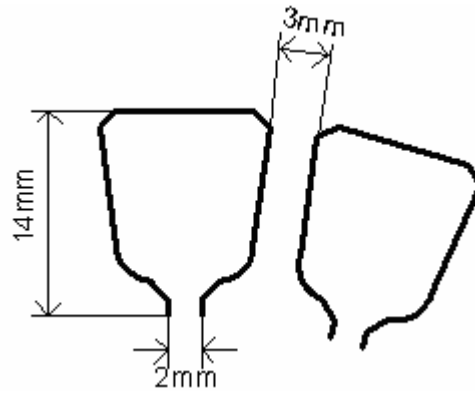
Ο πίνακας 3.2.1.1 παρουσιάζει τα ονομαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα που θα μελετηθεί στο κεφάλαιο αυτό.

ΤΑΣΗ	$V = 230/400V$
ΕΝΤΑΣΗ	$I = 3.6 A$
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ	$\text{Cos}\phi = 0.79$
ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ	$f = 50\text{Hz}$
ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ	1410 ΣΑΛ
ΠΟΛΟΙ	4
ΟΛΙΣΘΗΣΗ	$S = (1500-1410)/1500=6\%$
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΙΣΧΥΣ	$P_{\eta\lambda}=\sqrt{3} * 400 * 3.6 * 0.79 = 1970W$
ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΙΣΧΥΣ	$P_{\mu\eta\chi} = 2hp = 1492W$
ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΙΣΧΥΟΣ	$P_{\alpha\pi} = P_{\eta\lambda} - P_{\mu\eta\chi} = 1970-1492 = 478W$

**Πίνακας 3.2.1.1: Ονομαστικά χαρακτηριστικά κινητήρα εργαστηρίου**

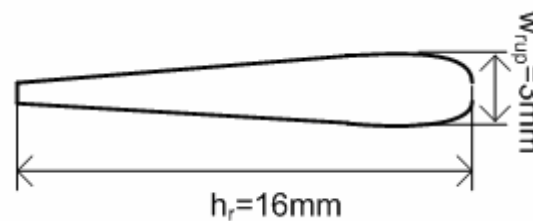
##### 3.2.2 Γεωμετρία

Ο κινητήρας αποτελείται από στάτη εξωτερικής διαμέτρου  $D_{\text{out}} = 136 \text{ mm}$  και εσωτερικής  $D_{\text{sin}} = 85 \text{ mm}$ . Ο στάτης φέρει 24 οδοντώσεις ύψους  $h_s = 14 \text{ mm}$  και πλάτους  $W_s = 3 \text{ mm}$ . Οι αύλακες του στάτη είναι ημίκλειστες, με άνοιγμα προς το διάκενο  $2 \text{ mm}$ . Λεπτομέρεια του σχήματος του δοντιού του στάτη φαίνεται στο σχήμα 3.2.2.1 καθώς και η συνολική γεωμετρία στο σχήμα 3.2.2.3.



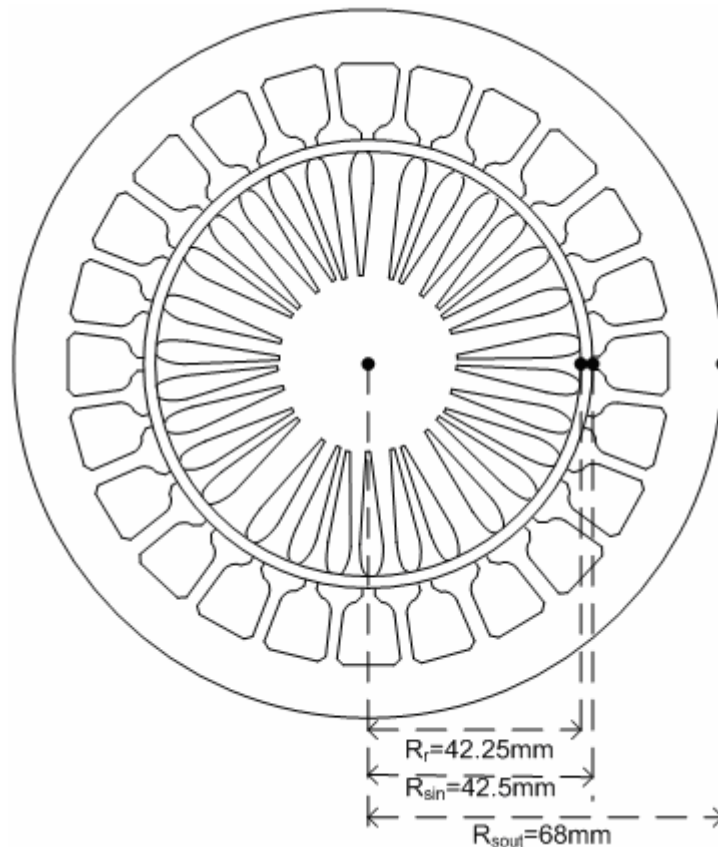
Σχήμα 3.2.2.1: Λεπτομέρεια Οδοντώσεως στάτη

Ο δρομέας έχει διάμετρο  $D_r = 84.5$  mm και φέρει 30 αυλάκια σφηνοειδούς τύπου. Κάθε αυλάκι έχει ύψος  $h_r = 16$  mm και πλάτος επάνω πλευράς  $w_{rup} = 3$  mm. Η γεωμετρία φαίνεται στο σχήμα 3.2.2.2.



Σχήμα 3.2.2.2: Σφηνοειδής Αύλακα Δρομέα

Το διάκενο του κινητήρα έχει πλάτος 0.25 mm. Το ενεργό μήκος της μηχανής είναι  $L = 110$  mm. Στο σχήμα 3.2.2.3 φαίνεται η κάθετη τομή του κινητήρα.



Σχήμα 3.2.2.3: Τομή κινητήρα Εργαστηρίου

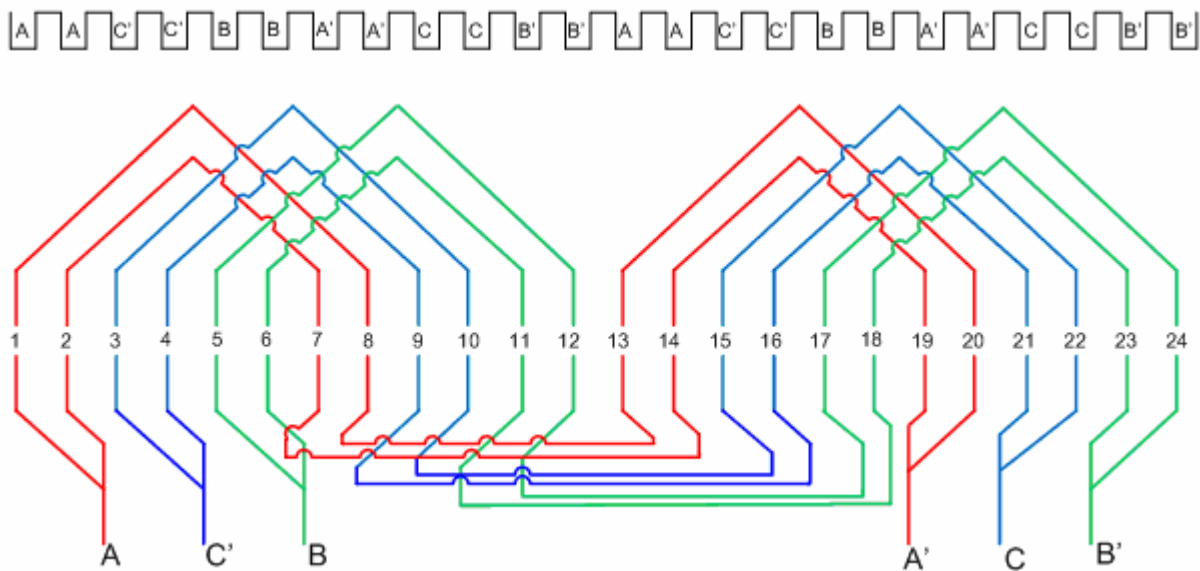
### 3.2.3 Τύλιγμα Στάτη

Ο στάτης του κινητήρα φέρει τύλιγμα κυματοειδούς μορφής, απλής στρώσεως με παράλληλη συνδεσμολογία πηνίων 135 σπειρών. Ο κινητήρας είναι τετραπολικός άρα έχει δυο ζεύγη πόλων. Ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και φάση είναι

$$q = \frac{Q}{m \cdot P} = \frac{24}{3 \cdot 4} = 2$$

Συνολικά υπάρχουν

3 φάσεις x 2 ζεύγη πόλων x 2 πηνία ανά ζεύγος πόλων x 2 αύλακες ανά πηνίο = 24 αύλακες. Η γραφική αναπαράσταση του τυλίγματος φαίνεται στο σχήμα 3.2.3.1.

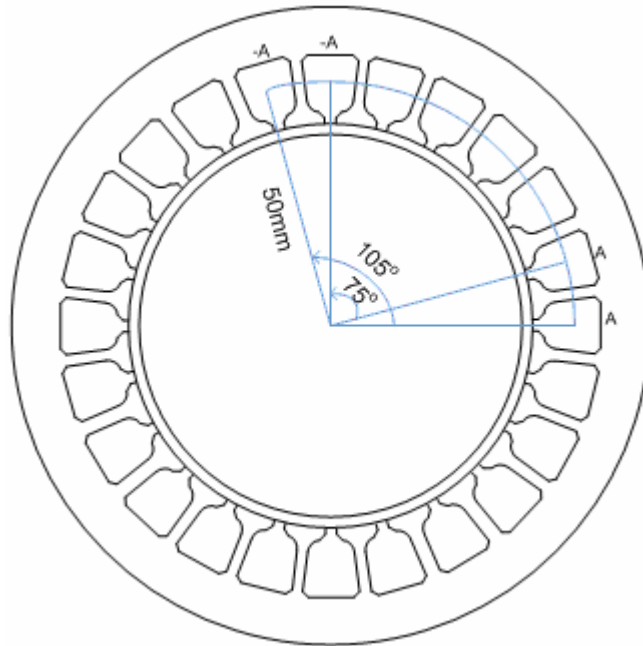


Σχήμα 3.2.3.1: Γραφική αναπαράσταση του τυλίγματος του στάτη

Για τον υπολογισμό της αντιστάσεως κάθε φάσης παρατηρείται ότι το εσωτερικό πηνίο του πρώτου ζεύγους πόλων συνδέεται με το εσωτερικό του άλλου, το εξωτερικό του πρώτου με το εξωτερικό του δεύτερου και μεταξύ τους συνδέονται παράλληλα. Το μήκος κάθε αυλακιού είναι 110mm όπως αναφέρθηκε καθώς και τα μήκη σύνδεσης εξωτερικού και εσωτερικού πηνίου όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.3.2 είναι:

$$\text{εξωτερικό: } 2 \cdot \frac{105^\circ \cdot \pi}{180} \cdot R = 2 \cdot 1.8326 \cdot 50 = 183.26 \text{mm}$$

$$\text{εσωτερικό: } 2 \cdot \frac{75^\circ \cdot \pi}{180} \cdot R = 2 \cdot 1.309 \cdot 50 = 130.9 \text{mm}$$



Σχήμα 3.2.3.2: εσωτερική και εξωτερική σύνδεση πηνίων

Εξωτερικό πηνίο:

$2 \times 110\text{mm}$  (μήκος αυλακιού) +  $183.26\text{ mm}$  (οπίσθια σύνδεση) +  $183.26$  (μετωπική σύνδεση) = **586.52mm.**

Εσωτερικό πηνίο:

$2 \times 110\text{mm}$  (μήκος αυλακιού) +  $130.9\text{ mm}$  (οπίσθια σύνδεση) +  $130.9$  (μετωπική σύνδεση) = **481.8mm.**

Οπότεν το συνολικό μήκος αγωγού μιας φάσης είναι:

$586.52 + 481.8 = 1068.32\text{mm} \times 135$  σπείρες =  $144.22\text{m}$

Η διάμετρος του χαλκού είναι  $\delta = 0.5\text{mm} = 5 \times 10^{-4}\text{m}$  και η αγωγιμότητα του  $\sigma = 5.7 \cdot 10^7$

Άρα η αντίσταση του αγωγού μιας φάσης είναι

$$R = \frac{L}{\sigma \cdot S} = \frac{144.22}{5.7 \cdot 10^7 \cdot \pi \cdot (5 \cdot 10^{-4})^2} = 3.22 \Omega$$

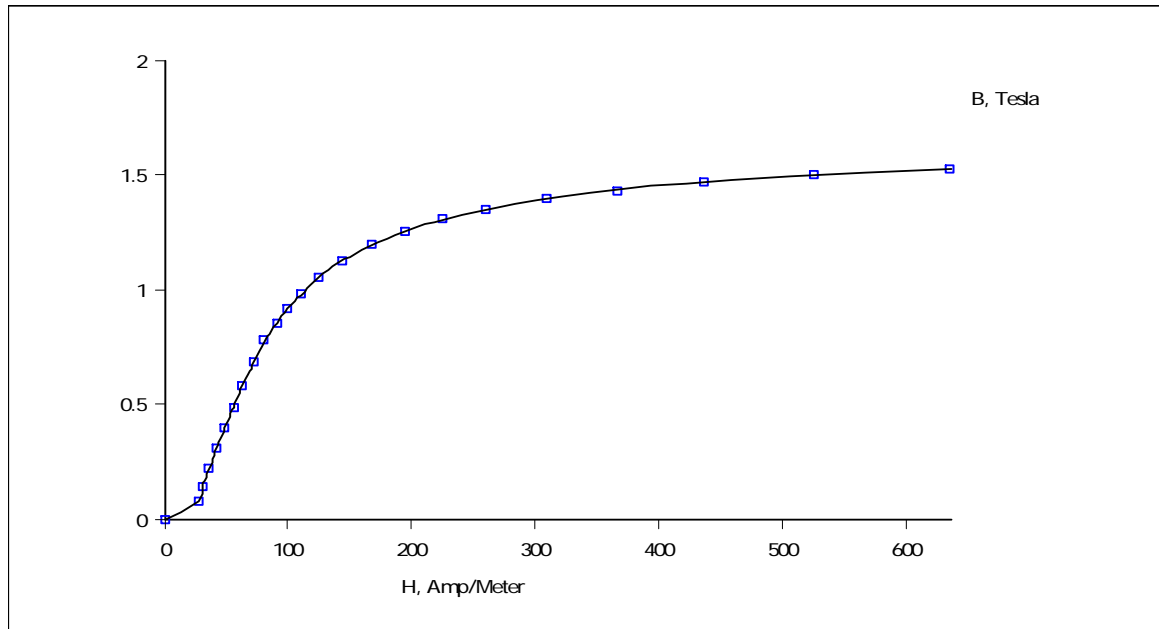
### 3.3 Σχεδίαση Κινητήρα στο Πρόγραμμα femm

Για τη βελτιστοποίηση του κινητήρα κρίθηκε απαραίτητη η σχεδίαση και ανάλυση του υπάρχοντος κινητήρα ούτως ώστε να πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ προσομοιωμένων γεωμετριών. Ο κινητήρας είναι τετραπολικός οπότεν εκμεταλλευομένης της συμμετρίας, σχεδιάστηκε το  $\frac{1}{4}$  της μηχανής, ένας δηλαδή πόλος με τις κατάλληλες οριακές συνθήκες που θα παρουσιαστούν πιο κάτω. Ο δρομέας, όπως προαναφέρθηκε, φέρει 30 αύλακες στη περιμέτρο του δεδομένο που αποτελεί εμπόδιο στη σχεδίαση του ενός πόλου. Για την υπερπήδηση του εμποδίου αυτού, η μηχανή προσομοιώθηκε ώστε να φέρει στο δρομέα 28 και 32 αύλακες, ούτως ώστε με τη μέση τιμή των αποτελεσμάτων των δύο αυτών προσομοιώσεων, να υπάρξει μια καλύτερη προσέγγιση της υπάρχουσας μηχανής.



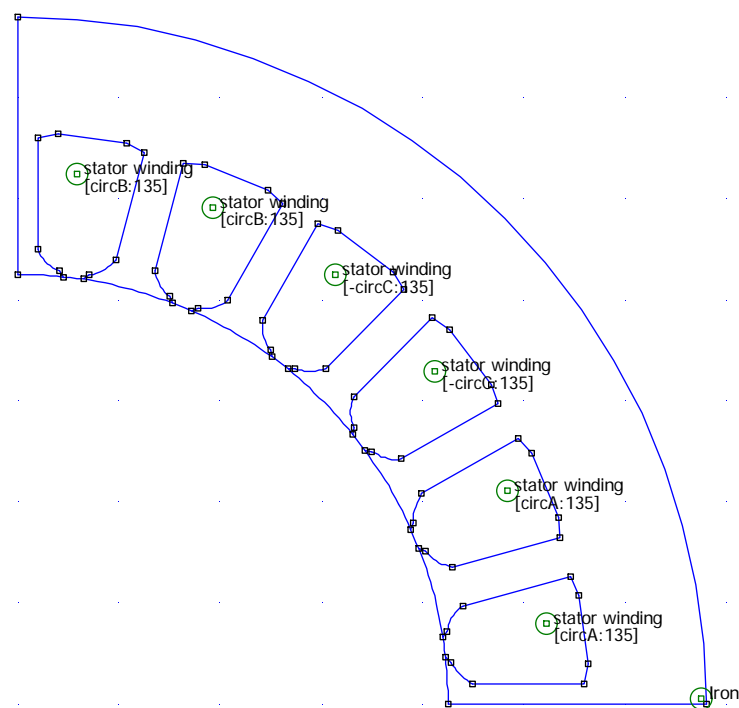
### 3.3.1 Σχεδίαση Στάτη

Ο στάτης σε κάθε πόλο φέρει 6 οδοντώσεις και 6 αύλακες. Στο σώμα του στάτη έχει χρησιμοποιηθεί ο υπάρχων σίδηρος στη μηχανή με ηλεκτρική αγωγιμότητα  $\sigma=2.1 \text{ MS/m}$ , λαμαρίνα πάχους 0.5mm και συντελεστή πληρότητας 0.98. Η καμπύλη μαγνητικής επαγωγής – μαγνητικού φάσματος ( $B - H$ ) φαίνεται στο σχήμα 3.3.1.1



Σχήμα 3.3.1.1: Καμπύλη  $B - H$  σώματος Στάτη

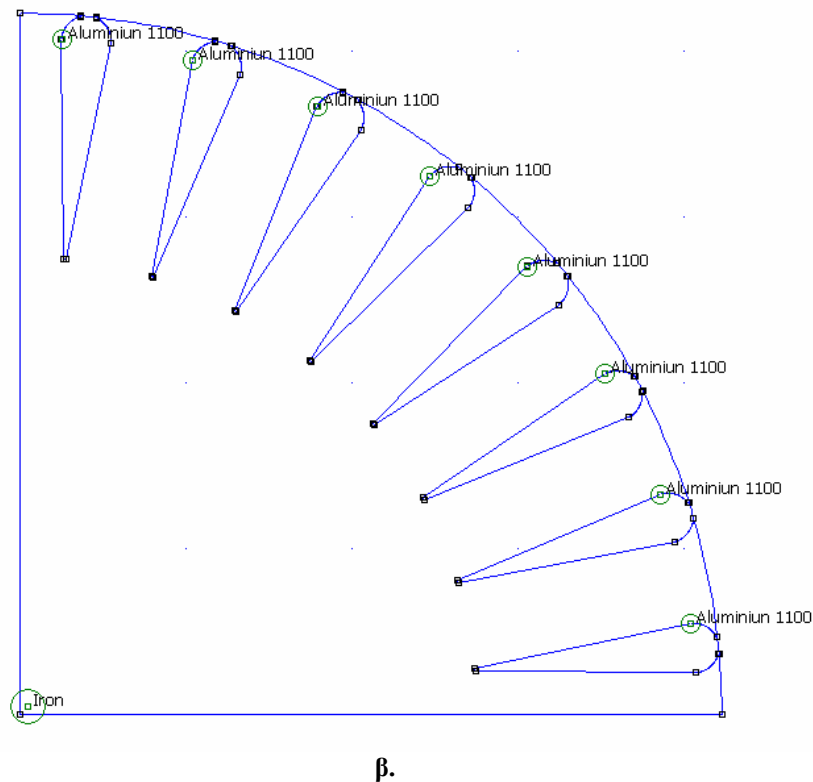
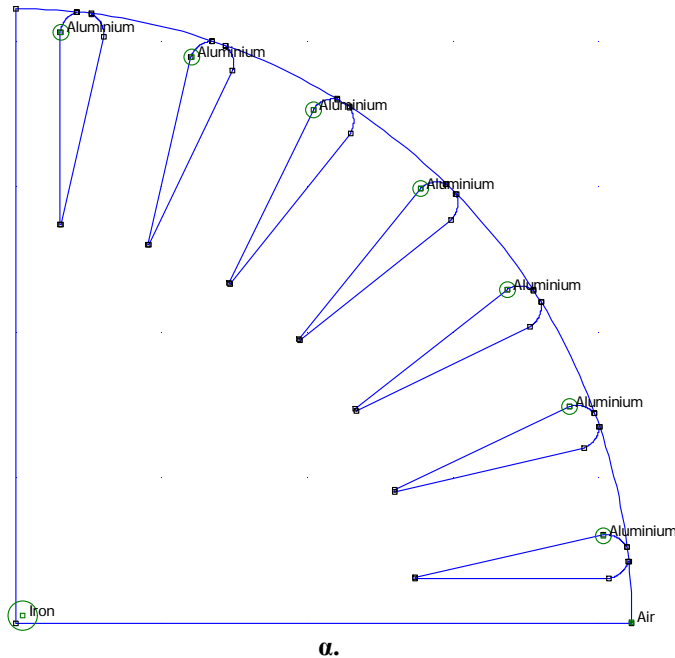
Οι αύλακες του στάτη έχουν τραπεζοειδές σχήμα, είναι ημίκλειστες και έχουν ύψος  $h_s = 14\text{mm}$ . Το άνοιγμα προς το διάκενο είναι  $w_o = 2\text{mm}$  και το πλάτος του επάνω μέρους είναι  $w_s = 10\text{mm}$ . Το ολικό εμβαδόν κάθε αύλακας είναι  $118\text{mm}^2$ . Η γεωμετρία φαίνεται στο σχήμα 3.3.1.2



Σχήμα 3.3.1.2: Γεωμετρία στάτη μηχανής εργαστηρίου

### 3.3.2 Σχεδίαση δρομέα

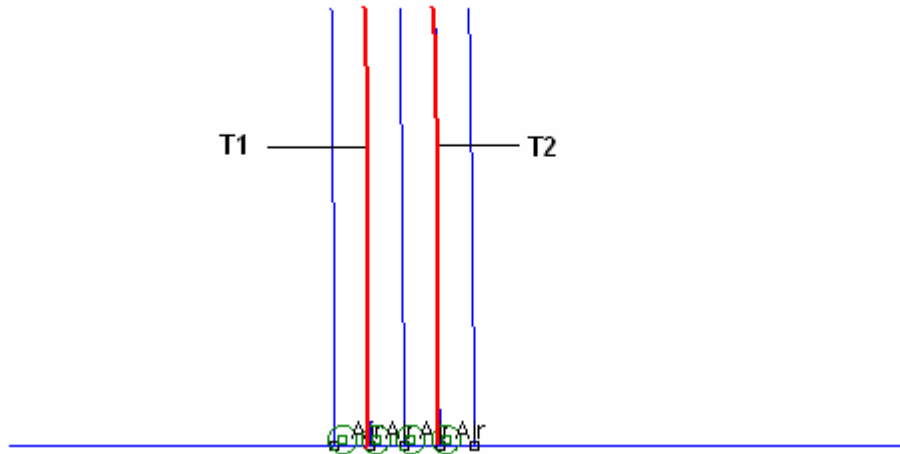
Ο δρομέας φέρει στο σώμα του το ίδιο υλικό με το στάτη (βλ. σχήμα 3.3.1.1) και στις αύλακες του, αλουμίνιο αγωγιμότητας  $\sigma = 34.45 \text{ MS/m}$ . Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω σε κάθε πόλο φέρει εφτά ή οχτώ αύλακες ύψους  $h_f = 16 \text{ mm}$  και πλάτους επάνω πλευράς  $w_{\text{top}} = 3 \text{ mm}$ . Η γεωμετρία φαίνεται στο σχήμα 3.3.2.1.



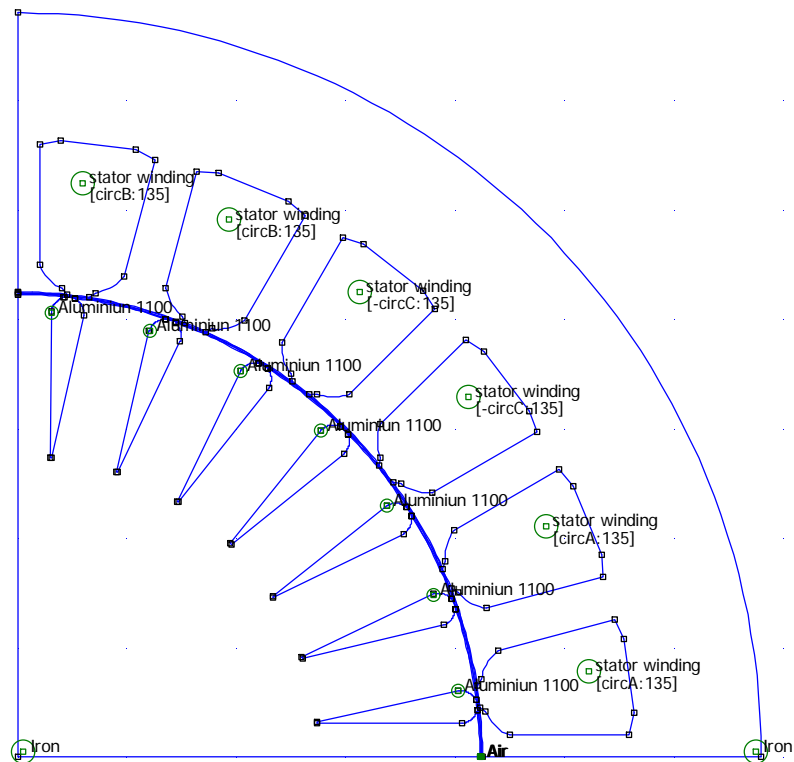
β.  
Σχήμα 3.3.2.1: Γεωμετρία δρομέα μηχανής εργαστηρίου  
α. Με 28 αύλακες δρομέα  
β. με 32 αύλακες δρομέα

### 3.3.3 Σχεδίαση Διακένου

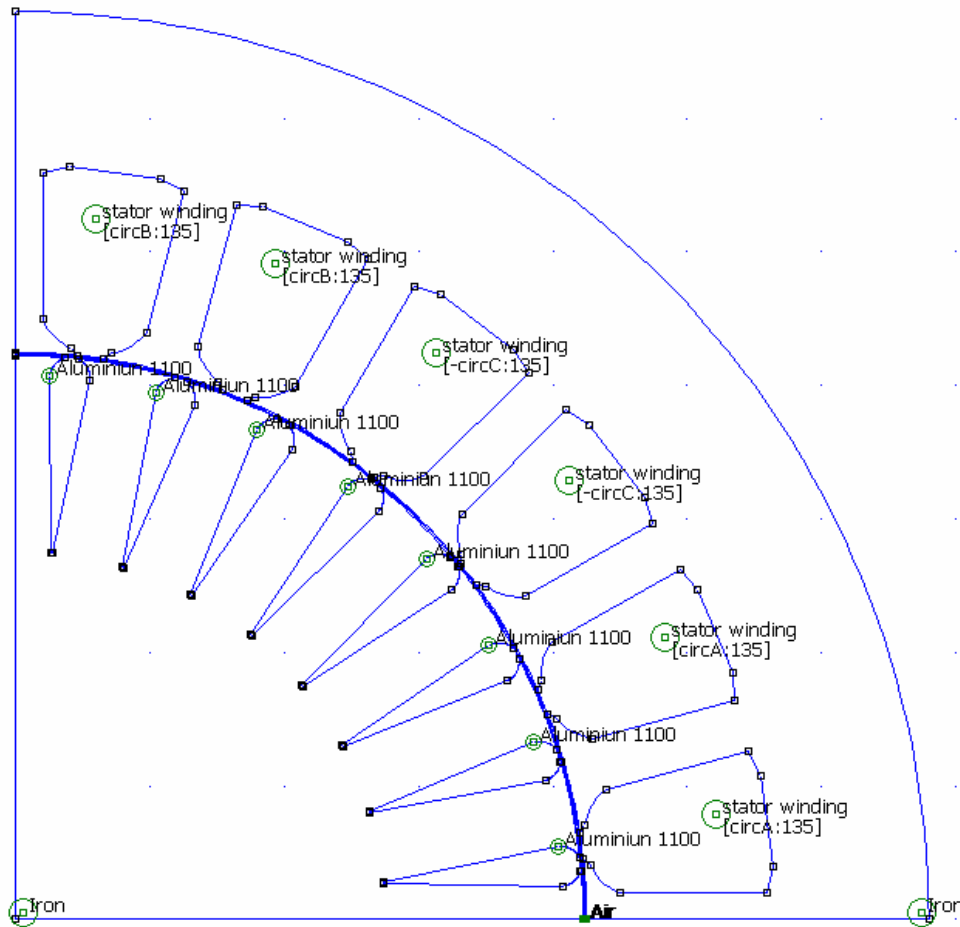
Το διάκενο έχει πλάτος 0.25mm. Λόγω του ότι αποτελεί το σημείο μέτρησης της ροπής σχεδιάστηκε έτσι ώστε να δίνει όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια. Χωρίστηκε σε 4 ίσα μέρη ώστε να σχηματιστεί πολύ μικρό πλέγμα στην περιοχή αυτή και λήφθηκαν τιμές ροπής σε δύο σημεία του διακένου. Ένα κοντά στο στάτη (σημείο μέτρησης T2) και ένα κοντά στο δρομέα (σημείο μέτρησης T1). Το σχήμα 3.3.3.1 δείχνει λεπτομέρεια της σχεδίασης του διακένου και τα σχήματα 3.3.3.2 α και β δείχνουν τις ολοκληρωμένες γεωμετρίες για 28 και 32 αύλακες δρομέα όπου έγιναν οι προσομοιώσεις.



Σχήμα 3.3.3.1: Λεπτομέρεια Σχεδίασης Διακένου



α.



β.

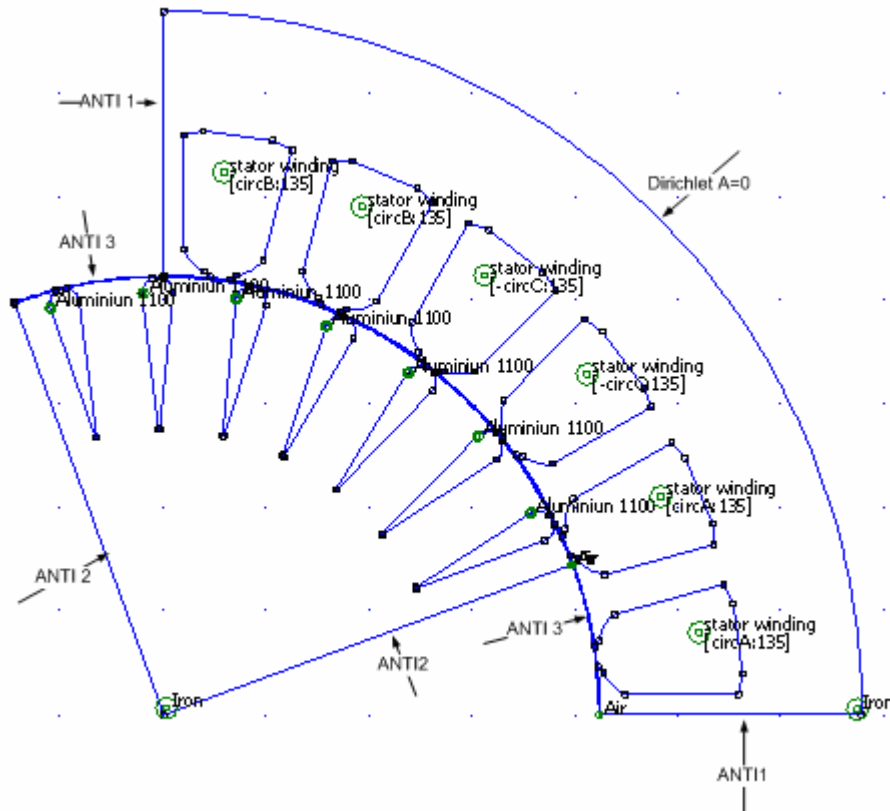
Σχήμα 3.3.3.2: Πλήρης Γεωμετρία μηχανής εργαστηρίου  
 α. με 28 αύλακες δρομέα  
 β. με 32 αύλακες δρομέα

### 3.3.4 Ορισμός Οριακών Συνθηκών

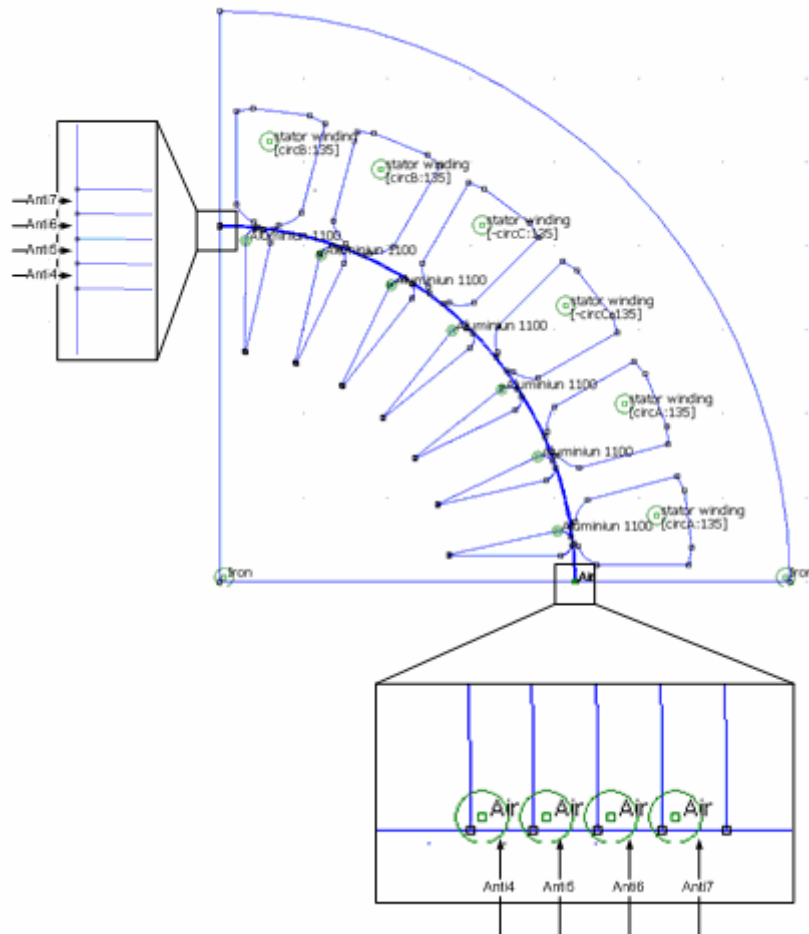
Αφού σχεδιάστηκε η γεωμετρία, για να έχει το πρόβλημα μοναδική λύση πρέπει να τεθούν οριακές συνθήκες όπως αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 2.4. Επίσης για ολοκληρωμένη εικόνα των τεκταινομένων κατά την περιστροφή της μηχανής, δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα MATLAB διαδικασία αλλαγής της θέσεως του δρομέα για να διαπιστωθεί κατά πόσο επηρεάζει η θέση του δρομέα ως προς το στάτη.

Αρχικά τέθηκε οριακή συνθήκη Dirichet με  $A = 0$  στο τόξο της περιφέρειας του στάτη. Στις ακτίνες δεξιά και αριστερά που συμπληρώνουν τα όρια της γεωμετρίας τέθηκαν αντιπεριοδικές συνθήκες, δηλαδή το δυναμικό στις δύο αυτές πλευρές είναι ίσο και αντίθετο. Λόγω του ότι η μηχανή είναι τετραπολική και έστω ότι ο σχεδιαζόμενος πόλος είναι βόρειος τότε δεξιά και αριστερά του αυτού πόλου θα υπάρχουν νότιοι πόλοι. Άρα το διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό που θα συναντάται στις δύο αυτές πλευρές θα είναι ίσο και αντίθετο.

Ακολουθώντας κατά την περιστροφή του δρομέα κατά 'ν' μοίρες ως προς το στάτη το μέρος του δρομέα, το οποίο δεν «καλύπτεται» από στάτη, (σχήμα 3.3.4.1 πάνω αριστερά) θα έχει ίσο και αντίθετο μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό με το μέρος του δρομέα που «υπολείπεται» από το στάτη (σχήμα 3.3.4.1 κάτω δεξιά). Στιγμιότυπο της περιστροφής του δρομέα, φαίνεται στο σχήμα 3.3.4.1 με τις κατάλληλες οριακές συνθήκες. Το σχήμα 3.3.4.2 παρουσιάζει τη γεωμετρία με λεπτομέρεια στα σημεία του διακένου όπου τίθενται οι αντιπεριοδικές συνθήκες.



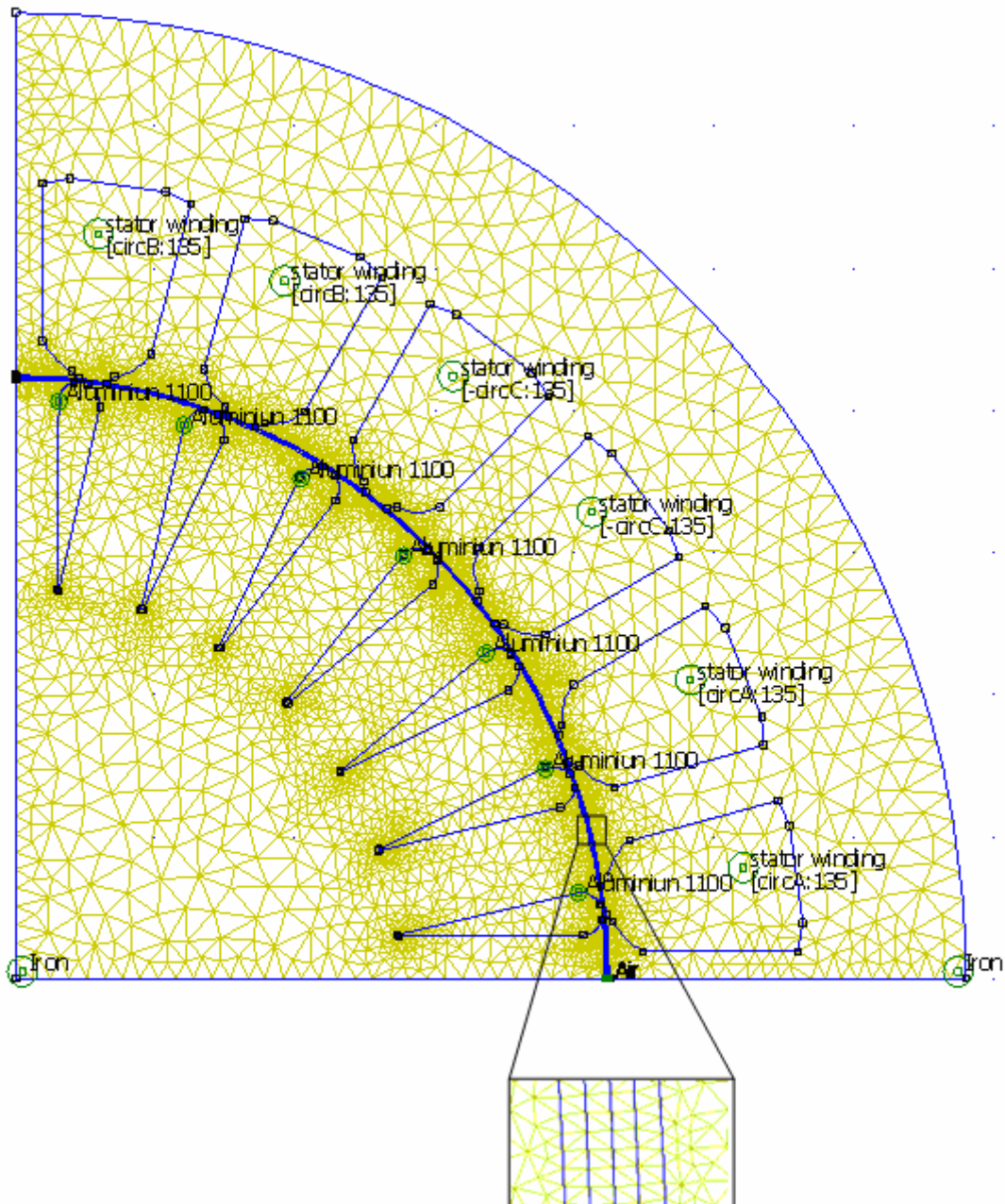
Σχήμα 3.3.4.1: Στιγμιότυπο περοστροφής δρομέα κατά 20° με αντιπεριοδικές συνθήκες



Σχήμα 3.3.4.2: Αντιπεριοδικές συνθήκες Διακένου Μηχανής Εργαστηρίου

### 3.3.5 Δημιουργία Πλέγματος

Μετά την ολοκλήρωση της γεωμετρίας και τον ορισμό των οριακών συνθηκών δημιουργείται το πλέγμα. Δηλαδή τα μικρά τρίγωνα όπου θα γίνει επίλυση των εξισώσεων που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 2.3.2. Στο σχήμα 3.3.5 φαίνεται η δημιουργία του πλέγματος από το πρόγραμμα femm, συνολικά 26187 στοιχείων. Παρατηρείται ότι στο διαχωρισμένο διάκενο που επιζητείται περισσότερη ακρίβεια το πλέγμα είναι αρκετά πιο μικρό απ' ό,τι στο σώμα του δρομέα και του στάτη.



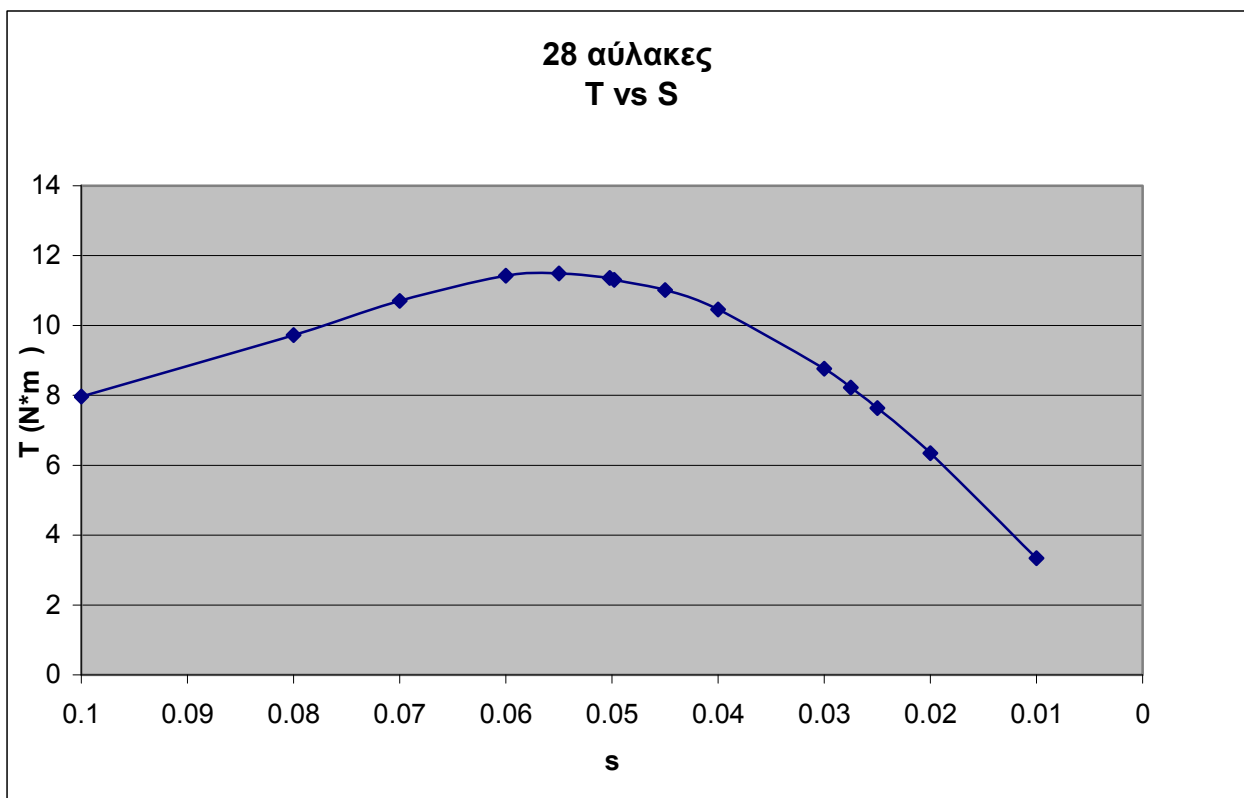
Σχήμα 3.3.5.1: Πλέγμα μηχανής εργαστηρίου και λεπτομέρεια διακένου

### 3.4 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

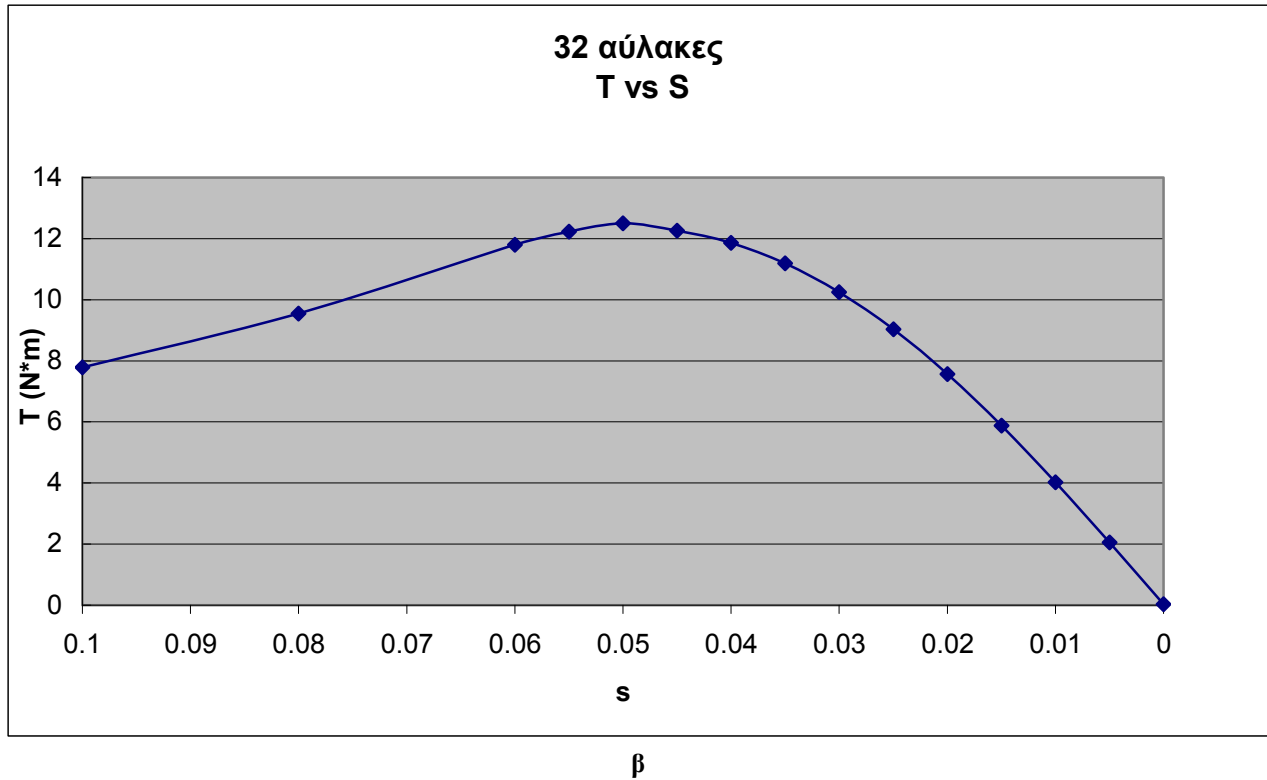
Για την εύρεση της ολίσθησης όπου η μηχανή παρουσιάζει τη μέγιστη ροπή δημιουργήθηκε διαδικασία στο πρόγραμμα matlab η οποία καλούσε το πρόγραμμα femm και προσομοίωνε τη μηχανή για ολίσθηση από 0 ως 0.08 και μετρούσε τη ροπή στα δύο σημεία του διακένου που προαναφέρθηκαν. Η προσομοίωση έγινε για μηχανή με 28 αύλακες δρομέα και για μηχανή με 32 αύλακες δρομέα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 3.4.1 και οι καμπύλες ροπής – ολίσθησης στο σχήμα 3.4.1 α και β.

Μηχανή Εργαστηρίου (αύλακες αλουμινίου)					
28 αύλακες			32 αύλακες		
S	T1	T2	s	T1	T2
0.01	3.343072	3.336385	0	0.036236	0.025679
0.02	6.343517	6.339257	0.005	2.056908	2.043239
0.025	7.6384	7.6348	0.01	4.028757	4.000104
0.0275	8.2224	8.2188	0.015	5.883765	5.840726
0.03	8.761541	8.7581	0.02	7.568422	7.51247
0.04	10.45618	10.45262	0.025	9.03425	8.966205
0.045	11.01203	11.00731	0.03	10.24597	10.16617
0.0498	11.306	11.3	0.035	11.19494	11.10421
0.0502	11.366	11.3596	0.04	11.86642	11.76653
0.055	11.49089	11.48258	0.045	12.25608	12.14952
0.06	11.43162	11.42111	0.05	13.67099	13.41562
0.07	10.7069	10.69333	0.055	12.22572	12.11257
0.08	9.725	9.710599	0.06	11.7961	11.68302

Πίνακας 3.4.1: Αποτελέσματα ρουτίνας εύρεσης ολίσθησης μέγιστης ροπής



α.



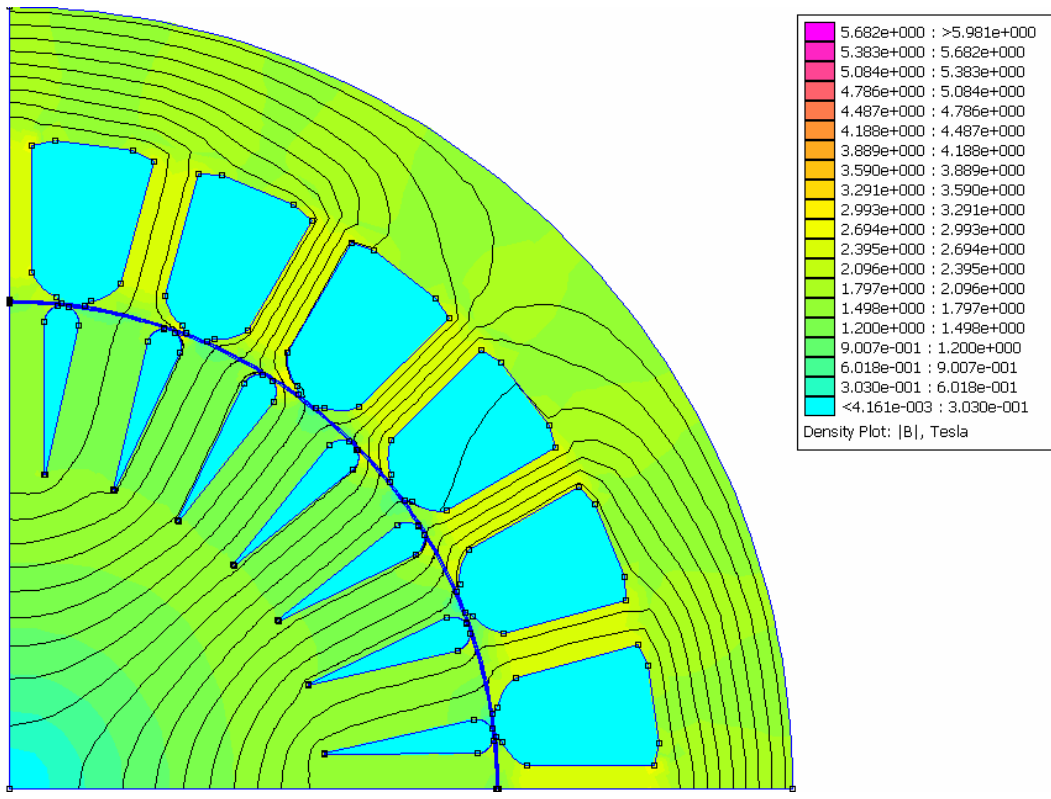
Σχήμα 3.4.1: Καμπύλη ροπής – ολίσθησης  
α. 28 άυλακες  
β. 32 άυλακες

Όπως φαίνεται από τα πιο πάνω σχήματα η μηχανή έχει μέγιστη ροπή με 28 άυλακες για ολίσθηση  $s = 0.055$  και με 32 άυλακες για ολίσθηση  $s = 0.05$ . Επιλέχθηκε ως ονομαστική ολίσθηση το  $\frac{1}{2}$  της ολίσθησης όπου η μηχανή έχει μέγιστη ροπή. Δηλαδή

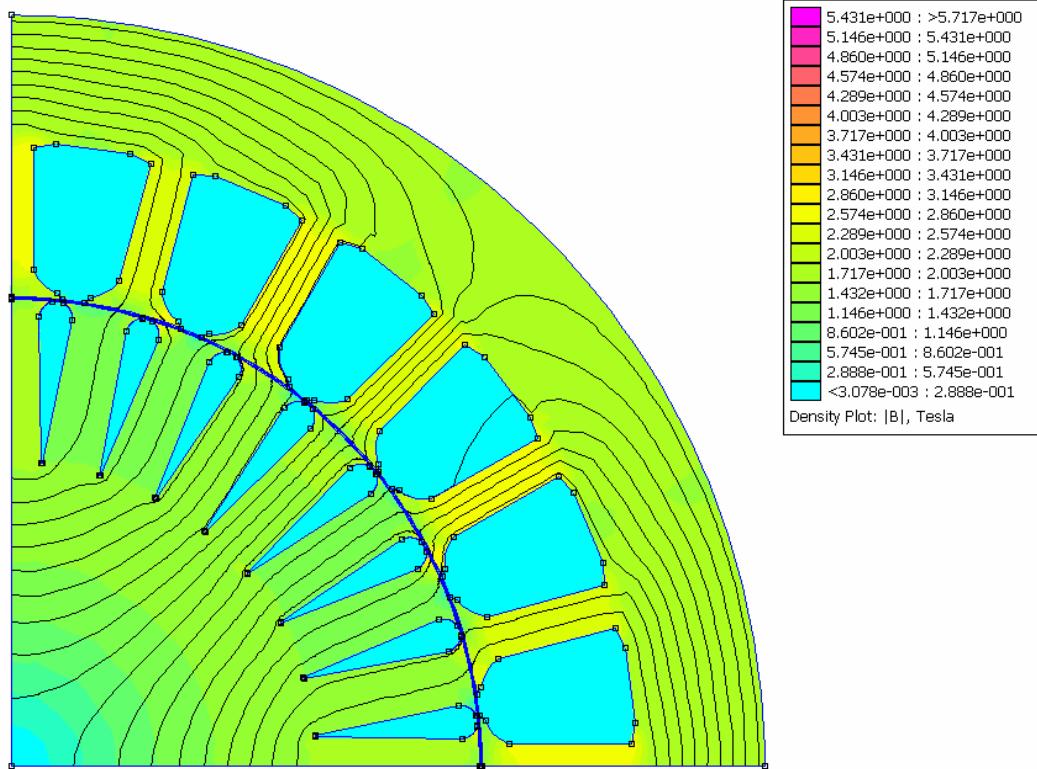
$$s_n = \frac{1}{2} s_{T_{\max}} \quad (3.4.1)$$

Άρα για τη μηχανή με 28 άυλακες δρομέα η ονομαστική ολίσθηση είναι στα  $s_n = 0.0275$  με ονομαστική ροπή  $T_n = 8.22 \text{ N}\cdot\text{m}$  ενώ για τη μηχανή με 32 άυλακες δρομέα  $s_n = 0.025$  με ονομαστική ροπή  $T_n = 9.001 \text{ N}\cdot\text{m}$ . Για τα ονομαστικά αυτά μεγέθη φαίνονται στο σχήμα 3.4.2 το πεδίο των δύο προσομοιώσεων.





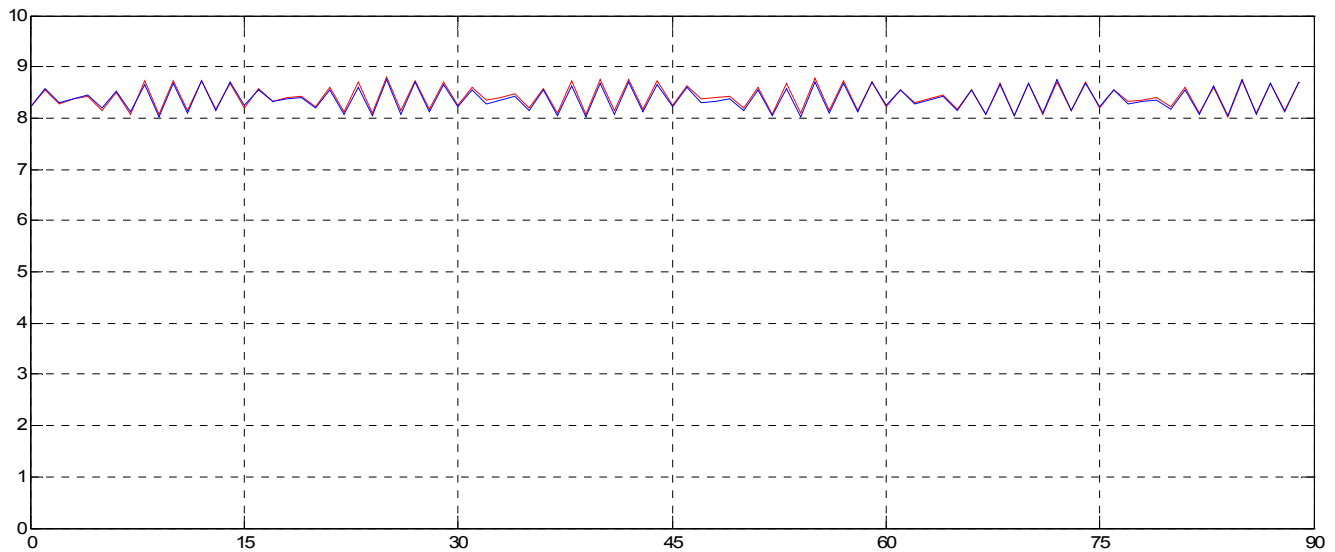
α



β

Σχήμα 3.4.2: Πεδίο και μαγνητικές γραμμές μηχανής εργαστηρίου.  
 α. με 28 πόλους  
 β. με 32 πόλους

Στη συνέχεια μέσω της διαδικασίας αλλαγής θέσεως δρομέα ως προς το στάτη έγινε προσομοίωση για αλλαγή γωνίας από  $0^\circ$  ως  $89^\circ$  για να διαπιστωθεί κατά πόσο επιδρά στη ροπή της μηχανής η εκάστοτε θέση του δρομέα. Στο σχήμα 3.4.3 φαίνεται η καμπύλη ροπής – γωνίας δρομέα.



Σχήμα 3.4.3: Καμπύλη ροπής συναρτήσει γωνίας δρομέα-στάτη

Όπως φαίνεται από το πιο πάνω σχήμα η θέση του δρομέα ως προς το στάτη επηρεάζει τη ροπή με μια περιοδικότητα  $15^\circ$  στην οποία η ροπή μεταβάλλεται κατά  $\pm 0.2 \text{ N}\cdot\text{m}$  από τη μέση ροπή που υπολογίστηκε στα  $T = 8.39 \text{ N}\cdot\text{m}$ .

Για την μελέτη απόδοσης της μηχανής καθορίστηκαν τρόποι υπολογισμού των απωλειών της. Συγκεκριμένα στη μηχανή μετρήθηκαν μέσω της προσομοίωσης οι απώλειες τυλίγματος δρομέα, μέσω της καμπύλης απωλειών πυρήνα συναρτήσει της μαγνητικής ροής της λαμαρίνας οι απώλειες πυρήνα και μέσω της αντίστασης του τυλίγματος του στάτη η απώλειες χαλκού στάτη.

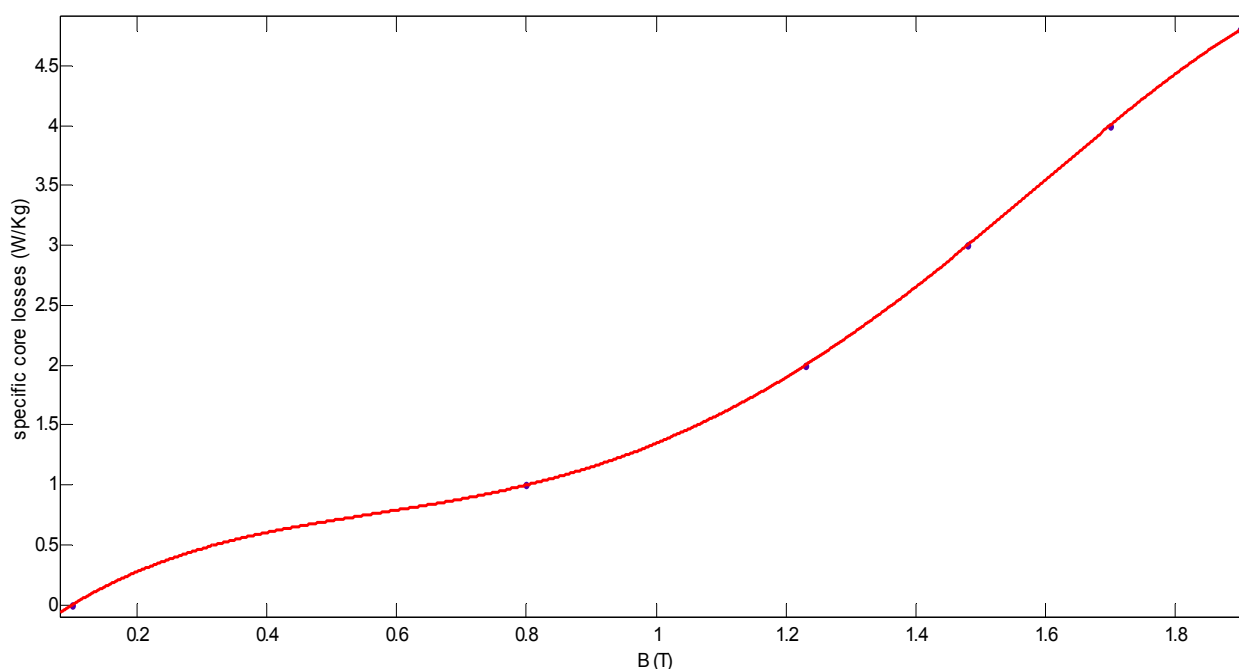
Το πρόγραμμα femm δίνει μια σωστή εικόνα για της απώλειες τυλίγματος του δρομέα οι οποίες φαίνονται στον πίνακα 3.4.2. Για τις απώλειες πυρήνα δημιουργήθηκε διαδικασία στο πρόγραμμα matlab η οποία για κάθε στοιχείο του πλέγματος αποθήκευε το μέτρο της πυκνότητας της μαγνητικής ροής στο σημείο αυτό και μέσω ενός πολυωνύμου  $5^{\text{ου}}$  βαθμού το οποίο προσέγγιζε την καμπύλη απωλειών πυρήνα συναρτήσει της μαγνητικής επαγωγής που φαίνεται στο σχήμα 3.4.4 υπολόγιζε τις απώλειες σε  $\text{W}/\text{Kg}$  του συγκεκριμένου σημείου. Ακολούθως γινόταν άθροιση των απωλειών και πολλαπλασιασμός με τη μάζα του πυρήνα. Δηλαδή

$$P_{\text{πυρήνα}} (\text{W}) = \sum_{i=0}^{\text{num of elm}} \text{απώλειες}_{\text{σημείο-}i} \left( \frac{\text{W}}{\text{Kg}} \right) \cdot \text{επιφάνεια}_{\text{σημείο-}i} (\text{mm}^2) \cdot \frac{\text{ενεργό}}{\text{μήκος}} (\text{mm}) \cdot \frac{\text{πυκνότητα}}{\text{υλικού}} \left( \frac{\text{Kg}}{\text{mm}^3} \right)$$

Τέλος οι απώλειες χαλκού στάτη υπολογίστηκαν μέσω της σχέσεως

$$P_{\text{χαλκού στάτη}} = 3 \cdot I_{\text{ον}}^2 \cdot R_s \quad (3.4.2)$$

Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 3.4.2.



Σχήμα 3.4.4: Καμπύλη ειδικών απωλειών πυρήνα – μαγνητικής επαγωγής

	28 αύλακες δρομέα	32 αύλακες δρομέα
Απώλειες τυλίγματος δρομέα (W)	36.59	34.1061
Απώλειες πυρήνα (W)	62.7729	63.637
Απώλειες χαλκού στάτη (W)	125.1936	125.1936

### 3.5 Πειραματικές Μετρήσεις

Στο σημείο αυτό κρίθηκε αναγκαία η πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων μέσω των δοκιμών κενού φορτίου και ακινητοποιημένου δρομέα στη μηχανή του εργαστηρίου. Για τη μελέτη της συμπεριφοράς της μηχανής στη μόνιμη κατάσταση, η μηχανή ευθυγραμμίστηκε με μια μονοφασική γεννήτρια συνεχούς ρεύματος στην οποία υπήρχε δυνατότητα μέτρησης, των στροφών μέσω ταχογεννήτριας, της τάσης και του ρεύματος τυμπάνου. Στον κινητήρα πραγματοποιείται μέτρηση της τριφασικής ισχύος, του συντελεστή ισχύος ( $\cos\phi$ ), της τάσης και του ρεύματος τροφοδοσίας. Αρχικά για σταθερή τάση τροφοδοσίας, την ονομαστική (380V), μεταβαλλόταν το φορτίο μέσω προσθήκης εξωτερικών αντιστάσεων και καταμετρείτο η τριφασική ισχύς του κινητήρα, η ταχύτητα, ο συντελεστής ισχύος, και η τάση και το ρεύμα τυμπάνου της DC γεννήτριας. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 3.5.1

Ακολούθως πραγματοποιήθηκε η δοκιμή κενού φορτίου για προσδιορισμό των απωλειών πυρήνα και των απωλειών τριβών και ανεμισμού. Λήφθηκαν μετρήσεις ρεύματος, ταχύτητας και τριφασικής ισχύος σε κενό φορτίο για μεταβολή της τάσεως τροφοδοσίας από 50V μέχρι 380V με βήμα 50V. Ο πίνακας 3.5.2 παρουσιάζει τις μετρήσεις αυτές. Στο τέλος του πειράματος μετρήθηκε η αντίσταση χαλκού δρομέα.

V1 (V)	P1 (W)	I1 (A)	n (ΣΑΛ)	cosφ	Va (V)	Ia (A)	Pdc (W)	Ra (Ω)	I <sub>a</sub> <sup>2</sup> *R <sub>a</sub>
380	792	2.1	1480	0.572	74.4	7.41	551.304	1.6	87.85296
380	900	2.2	1475	0.619	72.1	8.67	625.107	1.6	120.2702
380	985	2.3	1470	0.656	70.3	9.64	677.692	1.6	148.6874
380	1085	2.4	1465	0.688	68.4	10.72	733.248	1.6	183.8694
380	1163	2.5	1461.667	0.71	66.9	11.57	774.033	1.6	214.1838
380	1238	2.6	1460	0.728	65.6	12.42	814.752	1.6	246.8102
380	1312	2.7	1456.667	0.739	64.3	13.22	850.046	1.6	279.6294
380	1384	2.8	1453.333	0.752	63.1	13.9	877.09	1.6	309.136
380	1466	2.9	1448.333	0.765	61.6	14.75	908.6	1.6	348.1
380	1526	3	1446.667	0.773	60.6	15.35	930.21	1.6	376.996
380	1592	3.1	1445	0.783	59.6	16.02	954.792	1.6	410.6246
380	1654	3.2	1441.667	0.792	59	16.65	982.35	1.6	443.556
380	1719	3.3	1440	0.796	58.7	17.35	1018.445	1.6	481.636
380	1824	3.5	1433.333	0.804	58.5	18	1053	1.6	518.4

Πίνακας 3.5.1: Πειραματικές μετρήσεις για μελέτη επίδοσης

V1 (V)	I1 (A)	n (ΣΑΛ)	P1 (W)	Ra (Ω)	I <sub>1</sub> <sup>2</sup> *R (W)	P1 - I <sub>1</sub> <sup>2</sup> *R
50	0.746	1343.333	54.7	4.4	7.346011	47.35399
100	0.471	1475	49.1	4.4	2.928301	46.1717
150	0.557	1491.667	53.5	4.4	4.095287	49.40471
200	0.73	1496.667	58.7	4.4	7.03428	51.66572
250	0.939	1498.333	66	4.4	11.63872	54.36128
300	1.166	1500	81	4.4	17.94614	63.05386
350	1.47	1500	124	4.4	28.52388	95.47612
380	1.7	1500	147	4.4	38.148	108.852

Πίνακας 3.5.2: Μετρήσεις κενού φορτίου

Αφαιρουμένης της ισχύος απωλειών χαλκού δρομέα από τη μετρηθείσα ισχύ απομένει η ισχύς απωλειών πυρήνα και οι μηχανικές απώλειες ή αλλιώς απώλειες τριβών – ανεμισμού.

$$P_{\text{κενού φορτίου}} = 3 \cdot I^2 \cdot R_S + P_{\text{απ. πυρήνα}} + P_{\text{απ. τριβών ανεμισμού}} \quad (3.5.1)$$

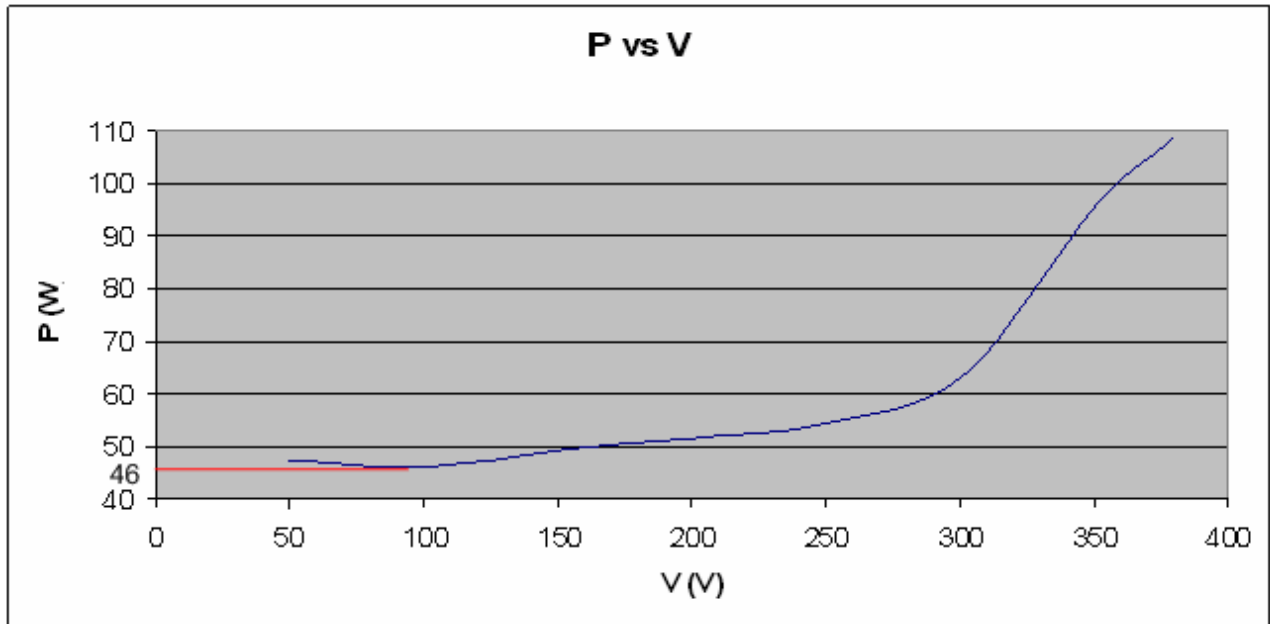
Για τον προσδιορισμό των απωλειών τριβών ανεμισμού κατασκευάστηκε η καμπύλη Ισχύος – τάσεως (σχήμα 3.5.1) και στο σημείο όπου η καμπύλη είχε ελάχιστο ακρότατο λήφθηκε η τιμή της ισχύος η οποία αντιπροσωπεύει τις απώλειες τριβών – ανεμισμού.

Έτσι οι απώλειες πυρήνα υπολογίστηκαν:

$$P_{\text{απ. πυρήνα}} = P_{\text{κενού φορτίου}} - 3 \cdot I^2 \cdot R_S - P_{\text{απ. τριβών ανεμισμού}}$$

$$P_{\text{απ. πυρήνα}} = 108.852 - 46$$

$$P_{\text{απ. πυρήνα}} = 62.582W \quad (3.5.2)$$



Σχήμα 3.5.1: Καμπύλη ισχύος-τάσεως δοκιμής κενού φορτίου

Τέλος πραγματοποιήθηκε η δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα για τον προσδιορισμό των απωλειών τυλίγματος του δρομέα. Ο άξονας της μηχανής κρατήθηκε ακίνητος και μετρήθηκαν για ονομαστικό ρεύμα  $I_{ov} = 3.6A$  η τάση τροφοδοσίας  $V_1 = 102.5V$  και η ισχύς  $P_1 = 341W$ . Οι απώλειες τυλίγματος δρομέα είναι:

$$P_{\text{τυλίγματος δρομέα}} = P_{\text{ακ. δρομέα}} - 3I^2 R_s - P_{\text{απ. πυρήνα}} \quad (3.5.3)$$

$$P_{\text{τυλίγματος δρομέα}} = 341 - 3 \cdot 3.6^2 \cdot 4.4 - 62.852$$

$$P_{\text{τυλίγματος δρομέα}} = 107.076W$$

Οπότε από τον πίνακα 3.5.1 μπορούν να υπολογιστούν η ισχύς και η ροπή στον άξονα της μηχανής βάσει των παρακάτω σχέσεων:

$$P_{o,ac} = P_{o,dc} + P_{cu,dc} + P_{\text{τριβων,dc}} \quad (3.5.4)$$

$$\Rightarrow P_{o,ac} = V_a \cdot I_a + I_a^2 R_a + P_{\text{τριβων,dc}}$$

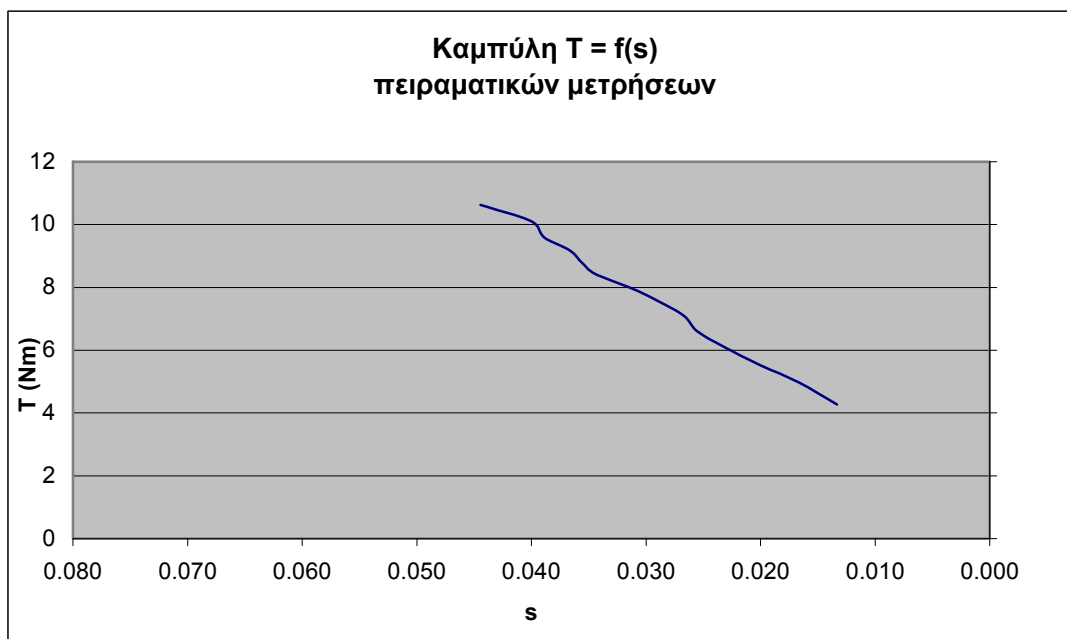
$$T = \frac{P_{o,ac}}{\omega} = \frac{60 \cdot P_{o,ac}}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad (3.5.5)$$

Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 3.5.3.

Λόγω του ότι η μηχανή έχει ονομαστικό ρεύμα στα 3.6 A οι μετρήσεις δεν έγιναν για ρεύματα μεγαλύτερα του λόγω κίνδυνου υπερθέρμανσης της μηχανής και των οργάνων μέτρησης. Έτσι η μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής δεν προσεγγίστηκε γι' αυτό και η καμπύλη ροπής – ολίσθησης του σχήματος 3.5.2 έχει τη μορφή αυτή.

S	P1 (W)	Pdc (W)	$I_a^2 \cdot R_a$ (W)	Po,ac (W)	T (N*m)
0.013	792	551.304	87.85296	662.157	4.272387
0.017	900	625.107	120.2702	768.3772	4.974551
0.020	985	677.692	148.6874	849.3794	5.51767
0.023	1085	733.248	183.8694	940.1174	6.127959
0.026	1163	774.033	214.1838	1011.217	6.606438
0.027	1238	814.752	246.8102	1084.562	7.093703
0.029	1312	850.046	279.6294	1152.675	7.556458
0.031	1384	877.09	309.136	1209.226	7.945361
0.034	1466	908.6	348.1	1279.7	8.437447
0.036	1526	930.21	376.996	1330.206	8.780552
0.037	1592	954.792	410.6246	1388.417	9.175365
0.039	1654	982.35	443.556	1448.906	9.597249
0.040	1719	1018.445	481.636	1523.081	10.10024
0.044	1824	1053	518.4	1594.4	10.62237

Πίνακας 3.5.3: Πειραματικά Αποτελέσματα επιδόσεως μηχανής εργαστηρίου

Σχήμα 3.5.2: Καμπύλη  $T = f(s)$  πειραματικών μετρήσεων

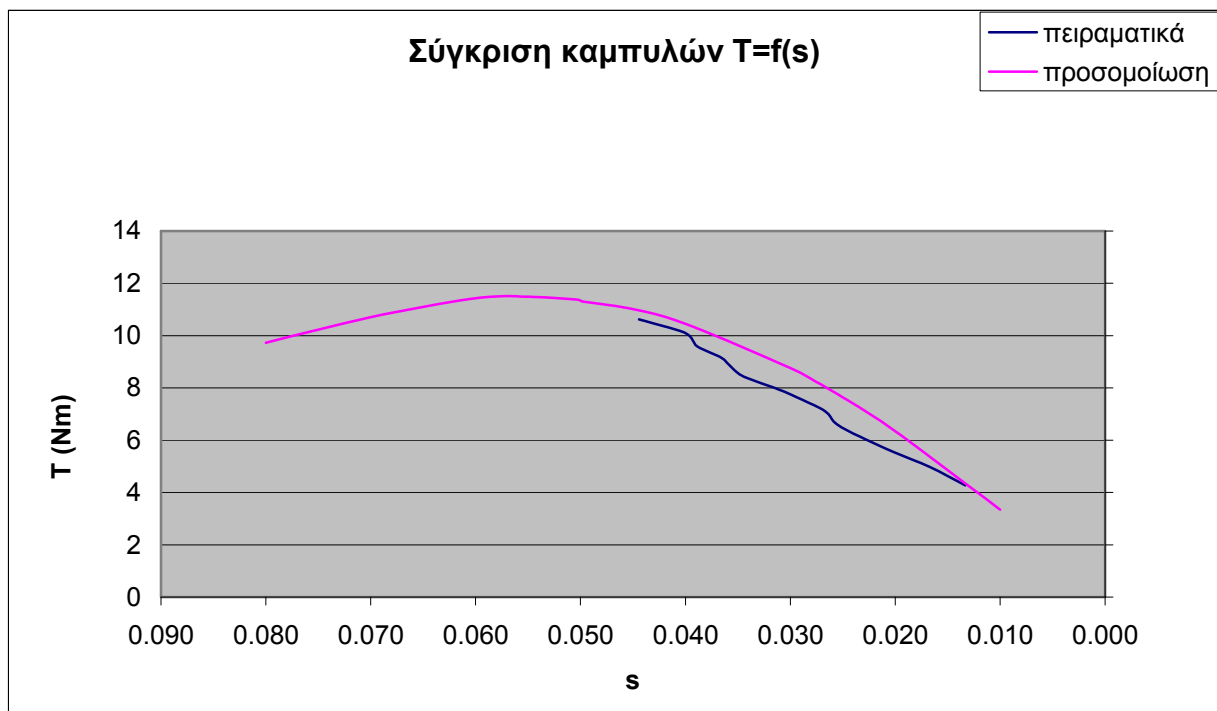
### 3.6 Πειραματική Επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Συγκρίνοντας τα πειραματικά αποτελέσματα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της παραγράφου 3.4 παρατηρείται ότι η καμπύλες ροπής – ολίσθησης των προσομοιώσεων είναι αρκετά κοντά στην καμπύλη ροπής – ολίσθησης των πειραματικών μετρήσεων ειδικά αν ληφθεί υπόψη ότι οι προσομοιώσεις έγιναν για 28 και 32 αύλακες δρομέα. Παρατηρείται ελαφρά αυξημένη η ροπή που υπολογίστηκε στις προσομοιώσεις σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις γεγονός που τεκμηριώνεται αν ληφθεί υπόψη ότι στη δοκιμή κενού φορτίου όπου έγινε ο υπολογισμός των απωλειών τριβών και ανεμισμού, οι απώλειες των δύο μηχανών (κινητήρα και dc γεννήτριας) θεωρήθηκαν ίσες ενώ στην πραγματικότητα η γεννήτρια έχει μεγαλύτερες απώλειες τριβών. Το σχήμα 3.6.1 παρουσιάζει τη σύγκριση των δύο καμπυλών ροπής – ολίσθησης.

Οι απώλειες χαλκού δρομέα στις προσομοιώσεις υπολογίστηκαν βάσει της αντίστασης δρομέα που βρέθηκε  $R_s=3.22 \Omega$  έναντι των  $4.4 \Omega$  που μετρήθηκαν στο εργαστήριο. Η αύξηση αυτή της αντίστασης οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας η οποία επηρεάζει την αγωγιμότητα κάθε υλικού και στο θεωρητικό υπολογισμό του μήκους του τυλίγματος του στάτη που αγνοεί την αύξηση του μήκους περιέλιξης κάθε σπείρας.

Οι απώλειες τυλίγματος δρομέα στις προσομοιώσεις υπολογίστηκαν  $36.59W$  ενώ στην δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα υπολογίστηκαν στα  $107.076W$ . Η μεγάλη αυτή διαφορά πιθανότατα οφείλεται στο ότι κατά την προσομοίωση δεν λήφθηκε υπόψη η αντίσταση που φέρουν οι δακτύλιοι σύνδεσης των ράβδων του κλωβού οι οποίοι έχουν σημαντική επίδραση στις απώλειες.

Τέλος οι απώλειες πυρήνα υπολογίστηκαν με ικανοποιητική ακρίβεια από την καμπύλη απωλειών πυρήνα όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.5.



Σχήμα 3.6.1: Καμπύλες ροπής – ολίσθησης πειραματικών και προσομοιωτικών μετρήσεων.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΡΟΜΕΑ ΜΗΧΑΝΗΣ

#### 4.1 Εισαγωγή – Σκοπός

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η βελτιστοποίηση του δρομέα της μηχανής για καλύτερη επίδοση και απόδοση. Η βελτιστοποίηση έχει δύο κύριες παραμέτρους. Πρώτον την αντικατάσταση του υλικού του κλωβού της μηχανής από αλουμίνιο σε χαλκό το οποίο είναι μεν ακριβότερο υλικό αλλά έχει μεγαλύτερη αγωγιμότητα από το αλουμίνιο (αγωγιμότητα χαλκού  $5.8 \cdot 10^{-7}$  S/m – αγωγιμότητα αλουμινίου  $3.78 \cdot 10^{-7}$  S/m) πράγμα το οποίο αναμένεται να δώσει πολύ μικρότερες απώλειες τυλίγματος δρομέα και τη μέγιστη και ονομαστική ροπή της μηχανής σε χαμηλότερη ολίσθηση. Δεύτερον την τροποποίηση της γεωμετρίας των αυλάκων του δρομέα για να διαπιστωθεί κατά πόσο αυτή επηρεάζει στην επίδοση και στη απόδοση της μηχανής.

#### 4.2 Αλλαγή υλικού με την υπάρχουσα γεωμετρία

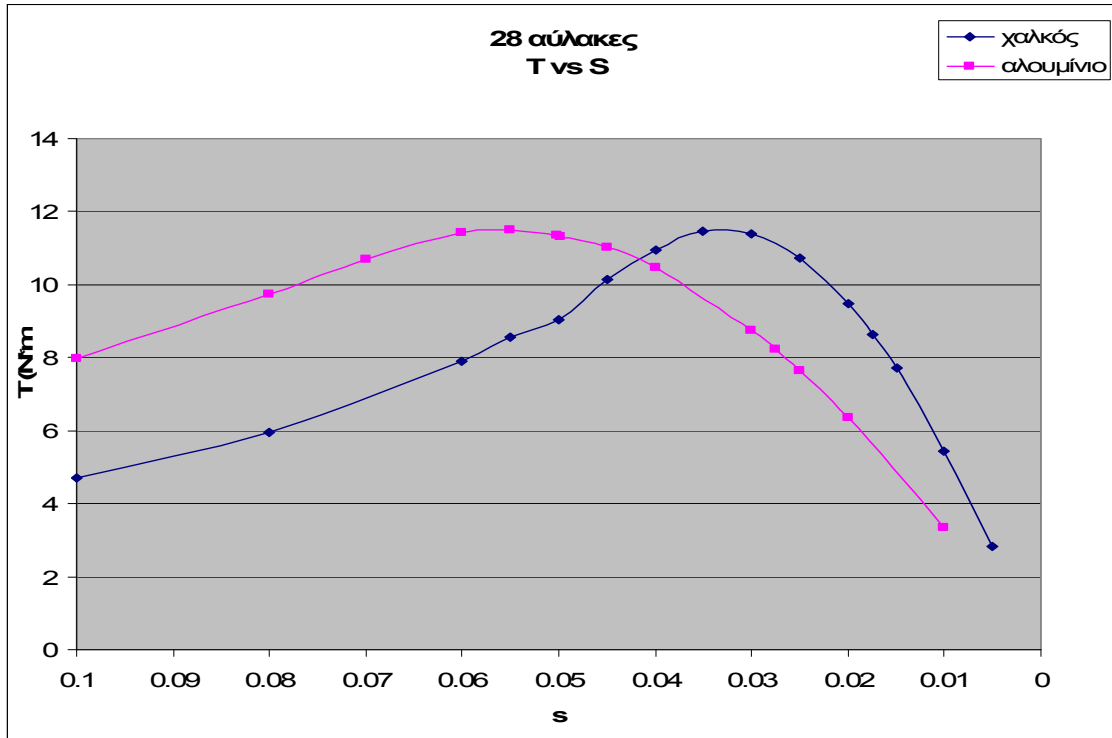
Αρχικά για να διαπιστωθεί κατά πόσο η αλλαγή του υλικού από αλουμίνιο σε χαλκό όντως επηρεάζει τους παράγοντες που αναφέρθηκαν πιο πάνω, επιχειρήθηκε αλλαγή του υλικού στην υπάρχουσα γεωμετρία του κλωβού και προσομοιώθηκαν, όπως και στο κεφάλαιο 3, ο κινητήρας με 28 αύλακες δρομέα και ο κινητήρας με 32 αύλακες δρομέα. Στον πίνακα 4.2.1 φαίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τη ροπή και την ολίσθηση της μηχανής, στον πίνακα 4.2.2 οι μετρηθείσες απώλειες όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 3.4 καθώς και στο σχήμα 4.2.1 α και β φαίνονται οι καμπύλες ροπής – ολίσθησης συγκρινόμενες με τις καμπύλες ροπής – ολίσθησης της μηχανής με αλουμίνιο.

Μηχανή Εργαστηρίου (αύλακες χαλκού)					
28 αύλακες			32 αύλακες		
S	T1	T2	s	T1	T2
0.005	2.832283	2.824909	0	0	0
0.01	5.445521	5.440883	0.005	3.414817	3.390877
0.015	7.699854	7.696154	0.01	6.524856	6.476934
0.0175	8.6496	8.646	0.015	9.102125	9.033471
0.02	9.470178	9.466898	0.02	10.9701	10.88211
0.025	10.71347	10.70952	0.025	12.06392	11.96093
0.03	11.37975	11.3732	0.03	12.37922	12.268
0.035	11.46386	11.45385	0.035	11.90317	11.78989
0.04	10.95014	10.93693	0.04	10.97977	10.8701
0.045	10.14569	10.13194	0.045	10.00172	9.898237
0.05	9.026234	8.96	0.05	8.963197	8.797273
0.08	5.936	5.9232	0.08	5.76155	5.698993
0.1	4.7192	4.7072	0.1	4.516152	4.468128

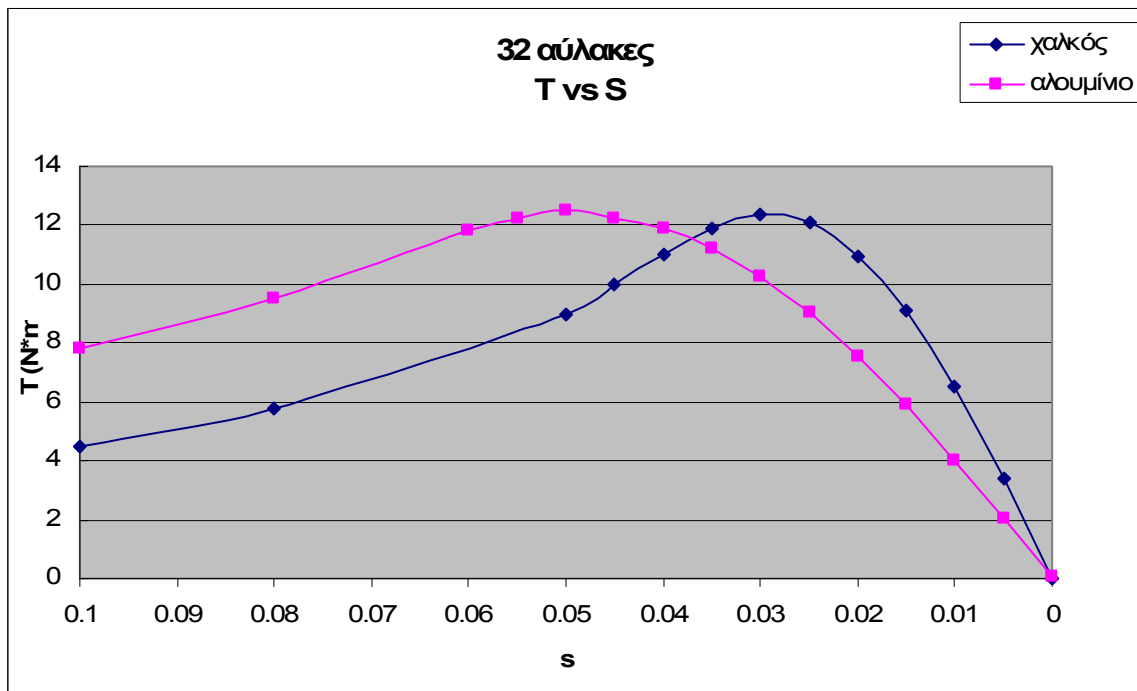
Πίνακας 4.2.1: Αποτελέσματα προσομοίωσης μηχανής εργαστηρίου με χαλκό στο δρομέα

	28 αύλακες	32 αύλακες
Απώλειες τυλίγματος δρομέα	24.5143 (W)	20.6196 (W)
Απώλειες πυρήνα	61.5419 (W)	61.864 (W)
Απώλειες χαλκού στάτη	125.1936 (W)	125.1936 (W)

Πίνακας 4.2.2: Απώλειες προσομοίωσης μηχανής εργαστηρίου με χαλκό στο δρομέα



α.



β.

Σχήμα 4.2.1: Καμπύλες ροπής – ολίσθησης με χαλκό και αλουμίνιο.  
 α. 28 αύλακες δρομέα  
 β. 32 αύλακες δρομέα

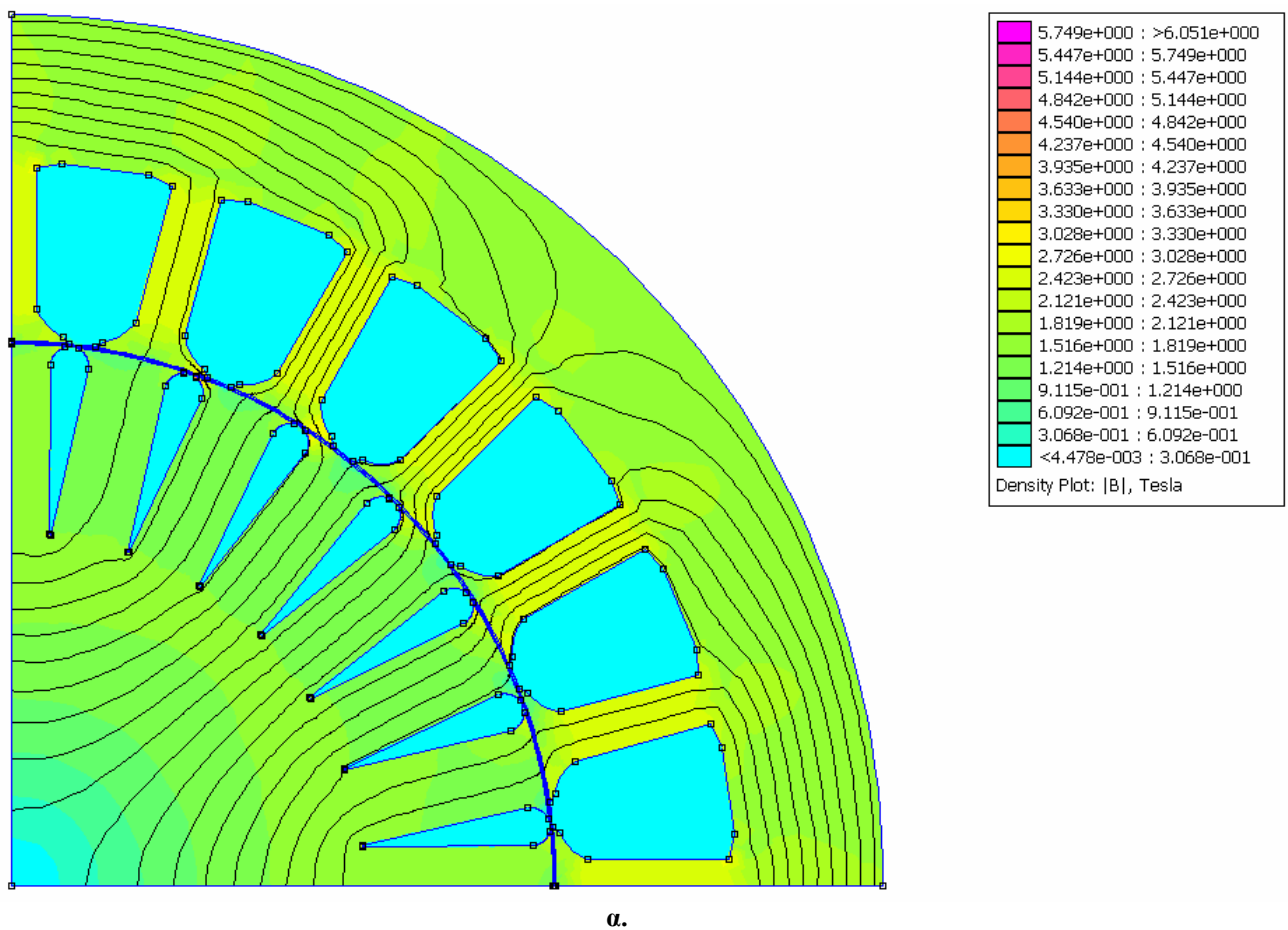
Όπως παρατηρείται οι αναμενόμενες μεταβολές στη συμπεριφορά της μηχανής που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.1 επαληθεύονται. Δηλαδή έχουν μειωθεί οι απώλειες τυλίγματος δρομέα στο 67% για 28 αύλακες δρομέα και στο 60% για 32 αύλακες δρομέα, ενώ οι απώλειες πυρήνα έχουν μειωθεί κατά ένα μικρό ποσοστό. Επίσης η ροπή ανατροπής καθώς και η ονομαστική ροπή της μηχανής εμφανίζονται σε πολύ μικρότερες ολισθήσεις στις αύλακες με χαλκό σε σχέση με τις αύλακες με αλουμίνιο. Στον πίνακα 4.2.3 φαίνεται η βελτίωση μηχανικής ισχύος, η αύξηση δηλαδή της αποδόσεως του κινητήρα από την αντικατάσταση του αλουμινίου με χαλκό, όπως υπολογίζεται από τη σχέση 4.2.1, με την μείωση της ολισθήσεως.

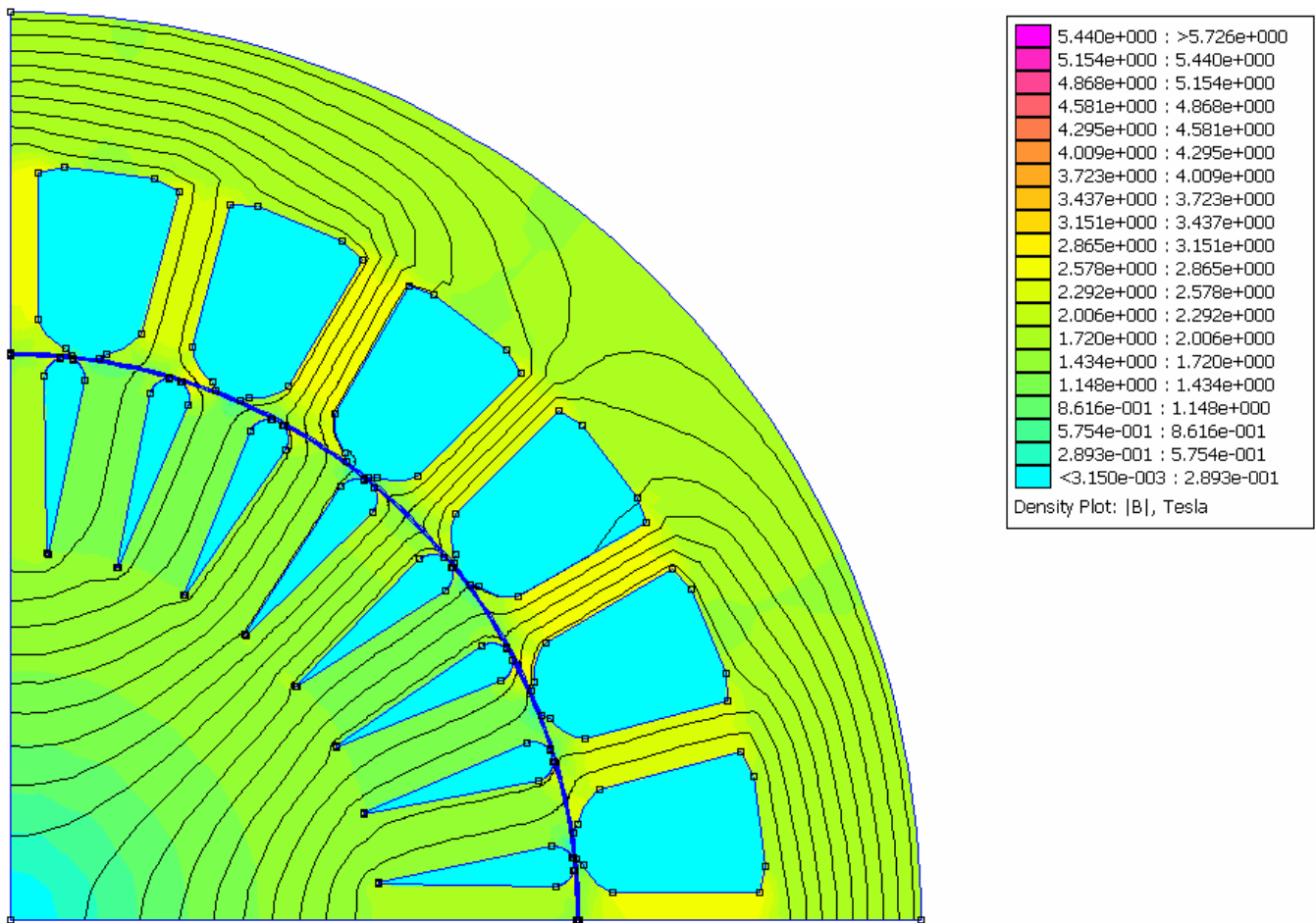
$$P_{μηχ} = (1 - s)\omega_s T \quad (4.2.1)$$

	28 αύλακες		32 αύλακες	
	αλουμίνιο	χαλκός	αλουμίνιο	Χαλκός
<b>P<sub>μηχ</sub> (ονομαστική) (W)</b>	1256.056	1334.9	1383.622	1408.315
<b>P<sub>μηχ</sub> (μέγιστη) (W)</b>	1705.715	1737.717	1865.325	1886.192

Πίνακας 4.2.3: Σύγκριση μηχανικής Ισχύος των διαφόρων περιπτώσεων

Στο σχήμα 4.2.2 α και β φαίνονται τα πεδία των δύο προσομοιώσεων με χαλκό για 28 και 32 αύλακες αντίστοιχα.

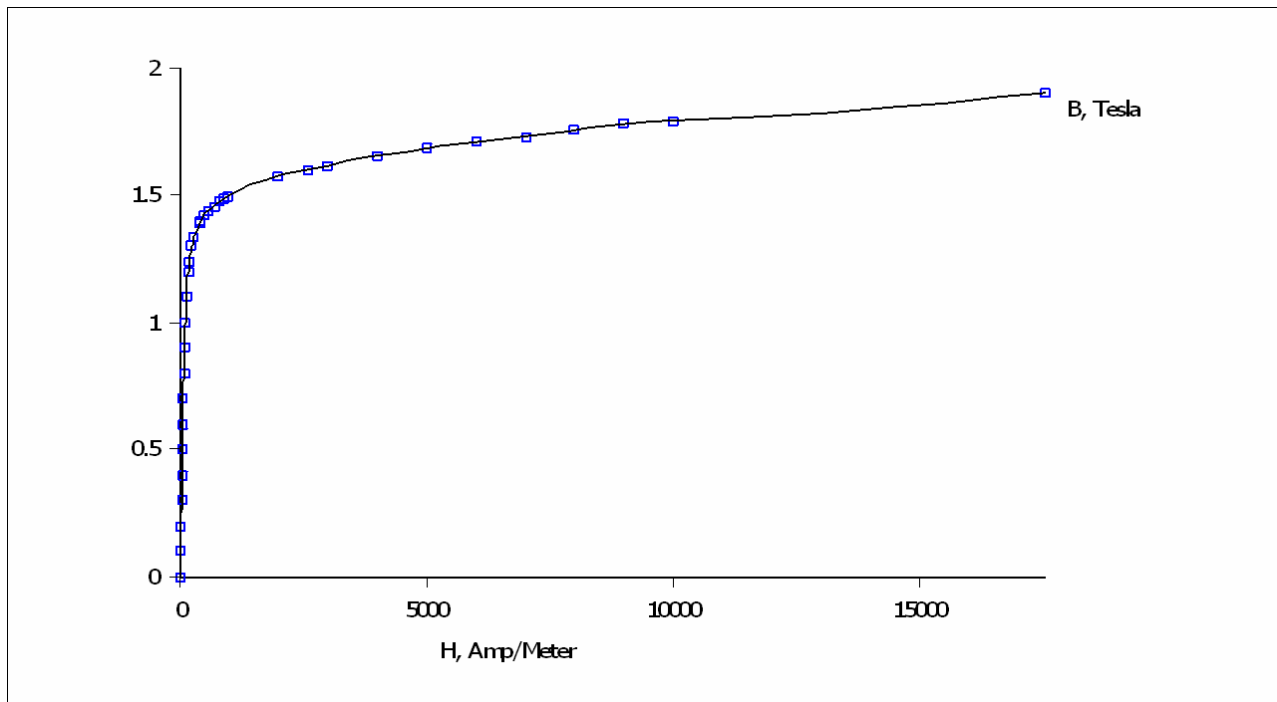




β.  
 Σχήμα 4.2.2: Πεδίο και μαγνητικές γραμμές μηχανής εργαστηρίου με χαλκό στο δρομέα  
 α. με 28 αύλακες  
 β. με 32 αύλακες

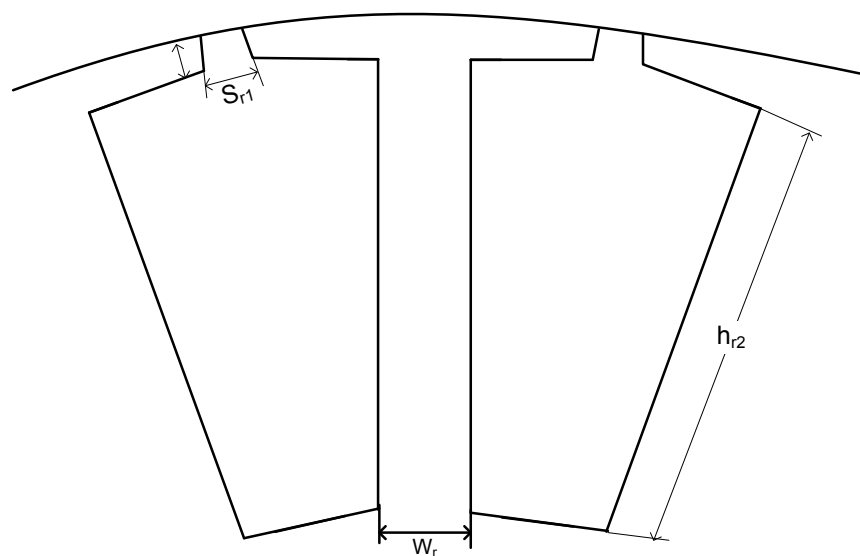
### 4.3 Σχεδίαση Παραμετροποιημένου Δρομέα

Το πρώτο στάδιο της βελτιστοποίησης με την αντικατάσταση του υλικού επετεύχθη και όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου το επόμενο στάδιο της βελτιστοποίησης αποτελεί η διαμόρφωση της γεωμετρίας του δρομέα. Η ταχύτερη και αποτελεσματικότερη σχεδίαση της γεωμετρίας, με τη χρήση του προγράμματος matlab οδήγησε στην δημιουργία διαδικασίας παραμετροποιημένης σχεδίασης. Δεδομένα στη διαδικασία αυτή αποτελούσαν η γεωμετρία του στάτη και του διακένου άρα και η διάμετρος του δρομέα. Επίσης μία εκ των προϋποθέσεων που θέτει κλασσική σχεδίαση των μηχανών επαγωγής αποτελεί το σταθερό πλάτος οδοντώσεων δρομέα. Έτσι παραμετροποιήθηκαν το ύψος των αυλάκων ( $h_{r2}$ ), το πλάτος των οδοντώσεων ( $w_r$ ) και το ύψος και πλάτος σύνδεσης αύλακος – διακένου. Η διαδικασία σχεδίασης παρατίθεται στο παράρτημα Ι της παρούσης εργασίας. Στο σώμα του δρομέα τοποθετήθηκε λαμαρίνα thyssen πάχους 0.5mm με χαρακτηριστική B – H του σχήματος 4.3.1.



Σχήμα 4.3.1: Καμπύλη B – H σιδήρου σώματος δρομέα

Στο σχήμα 4.3.2 φαίνονται τα προαναφερθέντα μεγέθη τα οποία μπορούν να μεταβληθούν στη διαδικασία. Ακόμη μεταβλητή αποτελεί και ο αριθμός των αυλάκων του δρομέα.



Σχήμα 4.3.2: Μεγέθη παραμετροποιημένης σχεδίασης δρομέα

#### 4.4 Διαδικασία εύρεσης βέλτιστης Γεωμετρίας

Για να αποκτηθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα του κατά πόσον και πως, οι διαστάσεις που παραμετροποιήθηκαν, επηρεάζουν τη συμπεριφορά της μηχανής, σε κάθε βήμα μεταβαλλόταν μόνο μία παράμετρος. Το ύψος μεταβλήθηκε από 13mm μέχρι 16mm με βήμα 1mm και για κάθε ύψος το πλάτος οδόντα από 3mm μέχρι 5mm με βήμα 1mm. Στους πίνακες 4.4.1 μέχρι 4.4.3 φαίνονται τα αποτελέσματα ροπής – ολίσθησης για κάθε γεωμετρία με 28 αυλάκες στο δρομέα και με 32 αυλάκες στο δρομέα.

ΥΨΟΣ ΑΥΛΑΚΩΝ $h_{r1} = 13\text{mm}$								
28 ΑΥΛΑΚΕΣ ΔΡΟΜΕΑ								
Πλάτος δοντιού $w_r = 3\text{mm}$			Πλάτος δοντιού $w_r = 4\text{mm}$			Πλάτος δοντιού $w_r = 5\text{mm}$		
S	T1	T2	S	T1	T2	S	T1	T2
0.005	6.853167	6.793332	0.005	5.615386	5.566132	0.005	4.249324	4.209657
0.01	10.75271	10.66206	0.01	6.9888	6.9756	0.01	7.7296	7.664276
0.015	10.10111	10.07499	0.015	9.565587	9.485646	0.015	10.07547	10.03349
0.02	8.923232	8.850465	0.02	11.04085	11.00637	0.02	11.26665	11.17417
0.025	7.342178	7.311839	0.025	10.65123	10.56461	0.025	11.14982	11.09366
0.03	6.095177	6.068327	0.03	9.068404	9.02501	0.03	10.04267	9.987198
0.035	5.192679	5.16903	0.035	7.673767	7.633613	0.035	8.847046	8.794222
0.04	4.551887	4.520323	0.04	6.603267	6.567761	0.04	7.810664	7.748779
32 ΑΥΛΑΚΕΣ ΔΡΟΜΕΑ								
Πλάτος δοντιού $w_r = 3\text{mm}$			Πλάτος δοντιού $w_r = 4\text{mm}$			Πλάτος δοντιού $w_r = 5\text{mm}$		
S	T1	T2	S	T1	T2	S	T1	T2
0.005	7.013437	6.804345	0.005	5.358856	5.196791	0.005	3.554594	3.451739
0.01	8.253977	8.094987	0.01	9.538829	9.249923	0.01	6.695545	6.497456
0.015	11.51846	11.16644	0.015	12.35416	12.06035	0.015	9.347013	9.098191
0.02	12.80762	12.53113	0.02	12.78821	12.39011	0.02	11.21276	10.87176
0.025	11.09102	10.73669	0.025	11.94224	11.62225	0.025	12.46816	12.12588
0.03	9.393705	9.14505	0.03	10.40665	10.11498	0.03	12.87881	12.51844
0.035	7.926572	7.70934	0.035	9.097181	8.834408	0.035	12.51505	12.15664
0.04	6.801836	6.611445	0.04	7.93023	7.88332	0.04	11.52948	11.16349

Πίνακας 4.4.1: Αποτελέσματα προσομοίωσης ύψους  $h_{r1}=13\text{mm}$ 

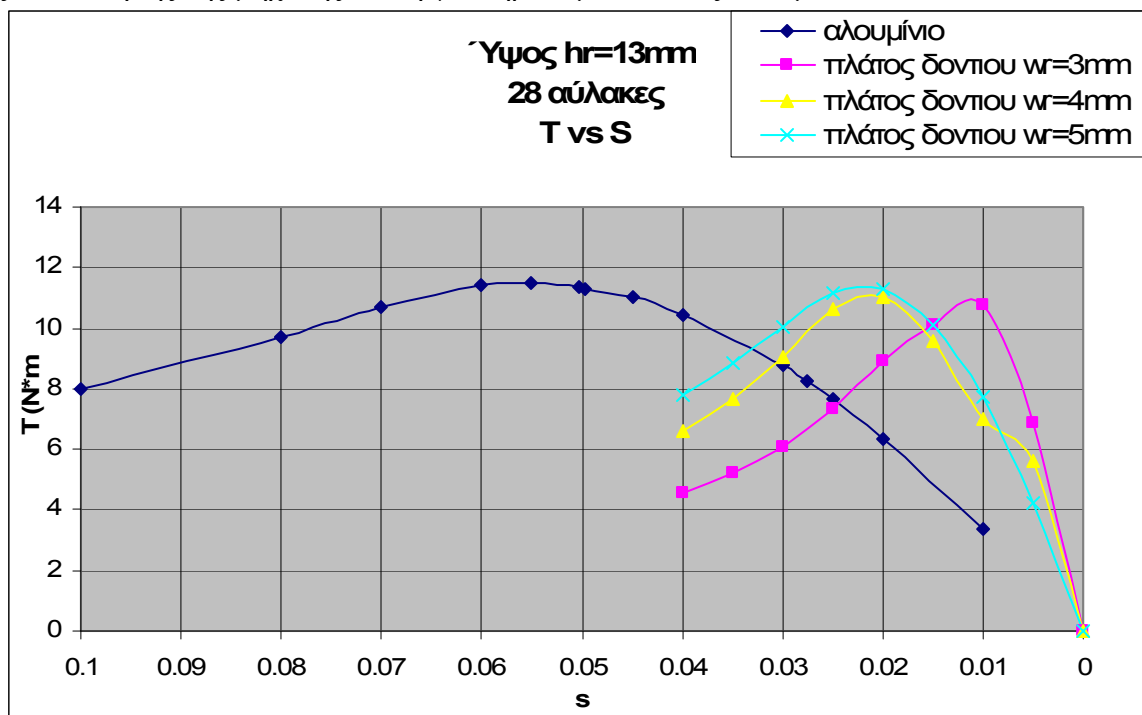
ΥΨΟΣ ΑΥΛΑΚΩΝ $h_{r1} = 14\text{mm}$								
28 ΑΥΛΑΚΕΣ ΔΡΟΜΕΑ								
Πλάτος δοντιού $w_r = 3\text{mm}$			Πλάτος δοντιού $w_r = 4\text{mm}$			Πλάτος δοντιού $w_r = 5\text{mm}$		
S	T1	T2	s	T1	T2	S	T1	T2
0.005	7.128299	7.064665	0.005	5.829757	5.776677	0.005	4.376851	4.331249
0.01	10.9322	10.8386	0.0075	7.2172	7.2024	0.01	7.917325	7.844385
0.015	10.06916	10.03881	0.01	9.804164	9.720171	0.015	10.235	10.18501
0.02	8.532871	8.462066	0.015	11.12836	11.09087	0.02	11.3064	11.20651
0.025	6.97873	6.948027	0.02	10.36308	10.27737	0.025	10.99041	10.92714
0.03	5.786727	5.759799	0.025	8.722503	8.67852	0.03	9.788027	9.726059
0.035	4.926903	4.903252	0.03	7.356203	7.316307	0.035	8.58297	8.524817
	0	0	0.035	6.321072	6.28593	0.035	7.569437	7.504124
32 ΑΥΛΑΚΕΣ ΔΡΟΜΕΑ								
Πλάτος δοντιού $w_r = 3\text{mm}$			Πλάτος δοντιού $w_r = 4\text{mm}$			Πλάτος δοντιού $w_r = 5\text{mm}$		
S	T1	T2	s	T1	T2	S	T1	T2
0.005	7.297671	7.081637	0.005	5.546664	5.378731	0.005	3.617866	3.512549
0.0075	8.532	4.3688	0.01	9.791643	9.494529	0.01	6.801649	6.599825
0.01	11.77399	11.41548	0.015	12.53064	12.22989	0.015	9.467051	9.21427
0.015	12.74949	12.4703	0.02	12.7177	12.32072	0.02	11.31917	10.97424
0.02	10.67453	10.33316	0.025	11.63575	11.32045	0.025	12.53327	12.18809
0.025	8.999953	8.760316	0.03	10.06492	9.780024	0.03	12.87567	12.51415
0.03	7.561502	7.353409	0.035	8.78284	8.527158	0.035	12.41006	12.05308
0.035	6.47728	6.295728		0	0	0.04	11.38473	11.02272

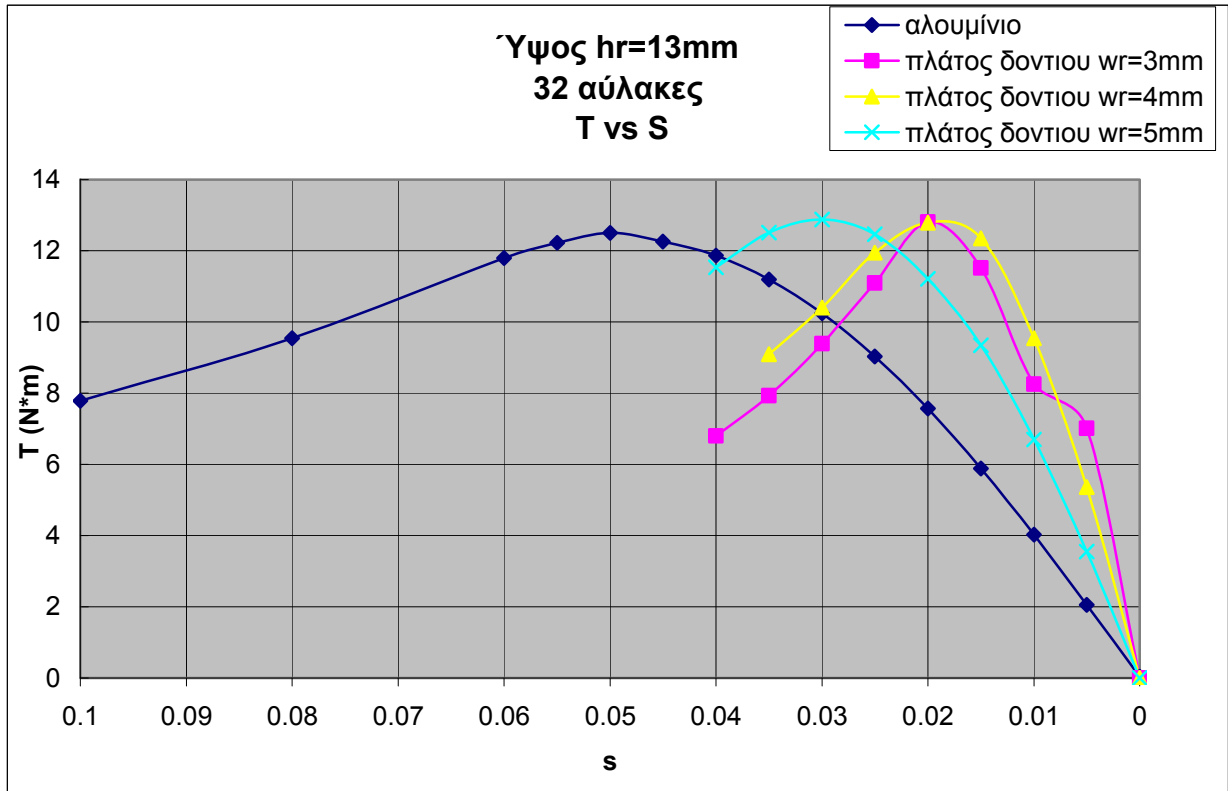
Πίνακας 4.4.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης ύψους  $h_{r1}=14\text{mm}$

ΥΨΟΣ ΑΥΛΑΚΩΝ $h_{r1} = 15\text{mm}$								
28 ΑΥΛΑΚΕΣ ΔΡΟΜΕΑ								
Πλάτος δοντιού $w_r = 3\text{mm}$			Πλάτος δοντιού $w_r = 4\text{mm}$			Πλάτος δοντιού $w_r = 5\text{mm}$		
S	T1	T2	s	T1	T2	S	T1	T2
0.005	7.376147	7.310728	0.005	6.01863	5.96621	0.005	4.481395	4.438531
0.01	11.05739	10.96319	0.0075	7.4244	7.4104	0.01	8.066324	7.996289
0.015	9.985615	9.953431	0.01	10.00202	9.91868	0.015	10.36141	10.3153
0.02	8.194264	8.126373	0.015	11.1736	11.13601	0.02	11.32298	11.22798
0.025	6.673722	6.644104	0.02	10.0945	10.01293	0.025	10.84967	10.79133
0.03	5.528687	5.502892	0.025	8.430413	8.388123	0.03	9.58653	9.529704
0.035	4.703978	4.681507	0.03	7.092522	7.054782	0.035	8.366053	8.297513
0.04	4.133356	4.104531	0.035	6.085708	6.05254	0.04	7.382062	7.322704
32 ΑΥΛΑΚΕΣ ΔΡΟΜΕΑ								
Πλάτος δοντιού $w_r = 3\text{mm}$			Πλάτος δοντιού $w_r = 4\text{mm}$			Πλάτος δοντιού $w_r = 5\text{mm}$		
S	T1	T2	s	T1	T2	S	T1	T2
0.005	7.551243	7.326449	0.005	5.710145	5.535332	0.005	3.654962	3.542784
0.0075	8.7844	8.6148	0.0075	8.328	7.9336	0.01	6.860469	6.652963
0.01	11.98423	11.61745	0.01	10.00203	9.696662	0.015	9.530746	9.273458
0.015	12.61953	12.33668	0.015	12.64875	12.34236	0.02	11.37488	11.0263
0.02	10.30792	9.976662	0.02	12.6101	12.21459	0.025	12.56276	12.215
0.025	8.654683	8.422063	0.025	11.36943	11.05836	0.03	12.86871	12.50539
0.03	7.251846	7.050979	0.03	9.781468	9.502334	0.035	12.24405	11.85642
0.035	6.153454	6.063422	0.035	8.998734	8.903422	0.04	11.30029	10.9381

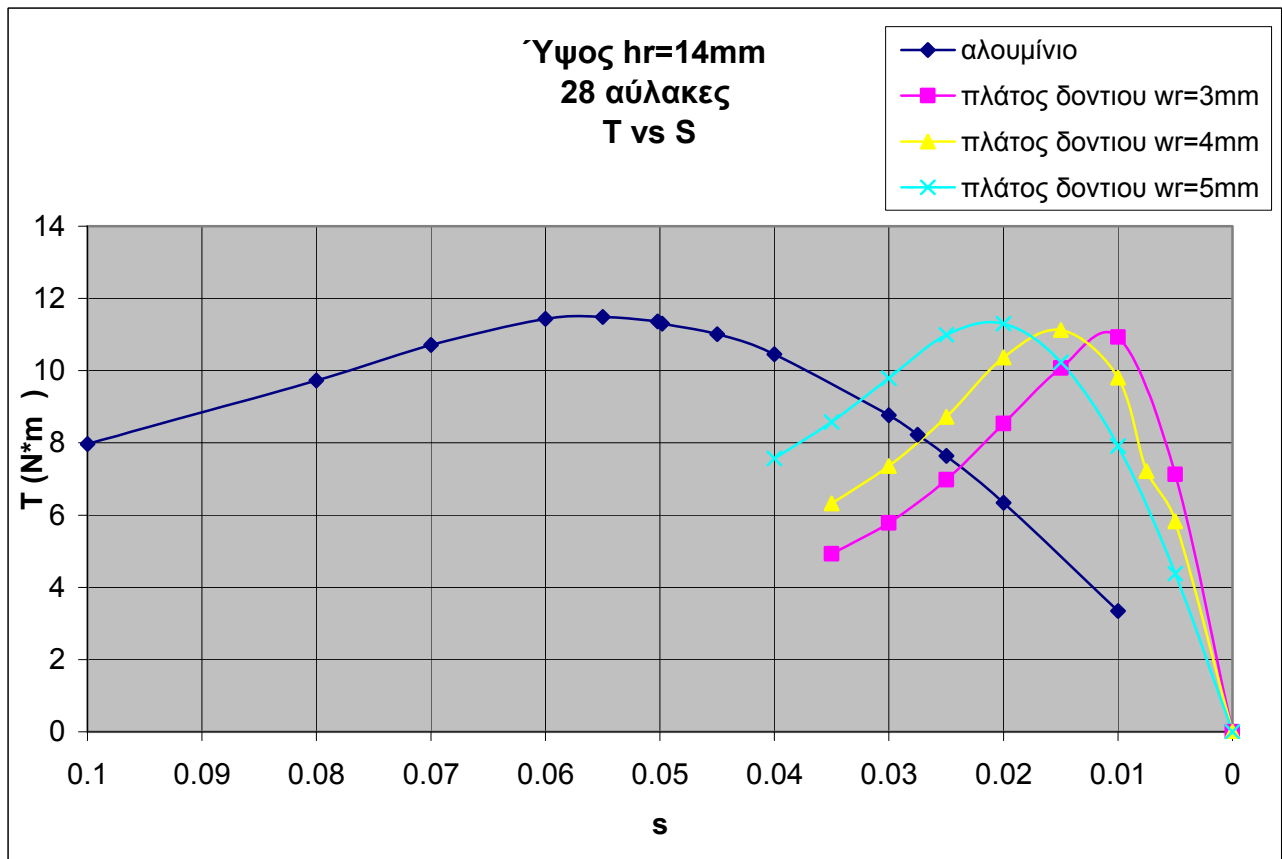
Πίνακας 4.4.3: Αποτελέσματα προσομοίωσης ύψους  $h_{r1}=15\text{mm}$ 

Για κάθε ύψος αύλακος παρουσιάζονται, για τα διάφορα πλάτη δοντιού, στα σχήματα 4.4.1 μέχρι 4.4.6 οι καμπύλες ροπής – ολίσθησης  $[T - s]$  σε δύο διαγράμματα. Ένα για 28 αύλακες δρομέα και ένα για 32 αύλακες δρομέα. Επίσης σε κάθε διάγραμμα φαίνεται η αντίστοιχη καμπύλη ροπής – ολίσθησης της μηχανής του εργαστηρίου με αύλακες αλουμινίου.

Σχήμα 4.4.1: Καμπύλες ροπής – ολίσθησης  $h_r = 13\text{mm}$ , 28 αύλακες Δρομέα

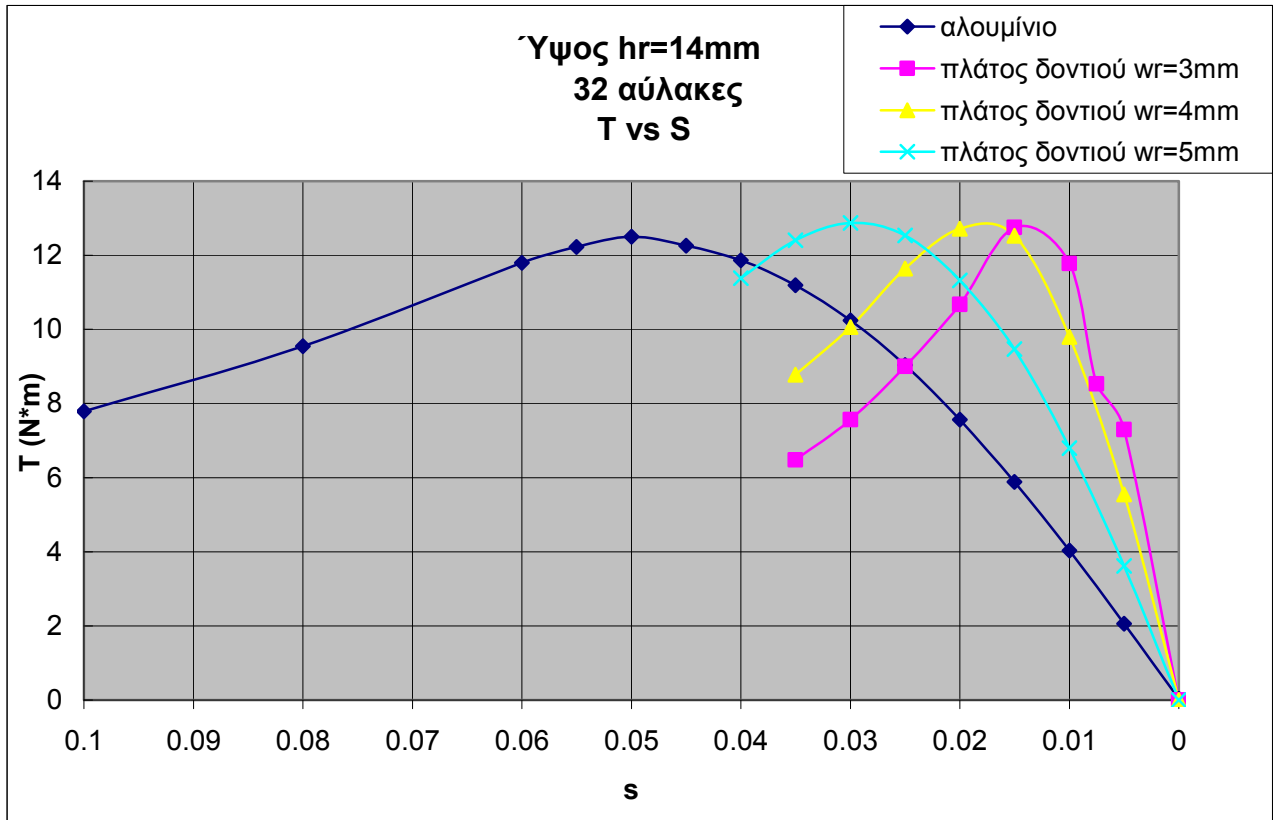


Σχήμα 4.4.2: Καμπύλες ροπής – ολίσθησης  $h_r = 13\text{mm}$ , 32 αύλακες Δρομέα

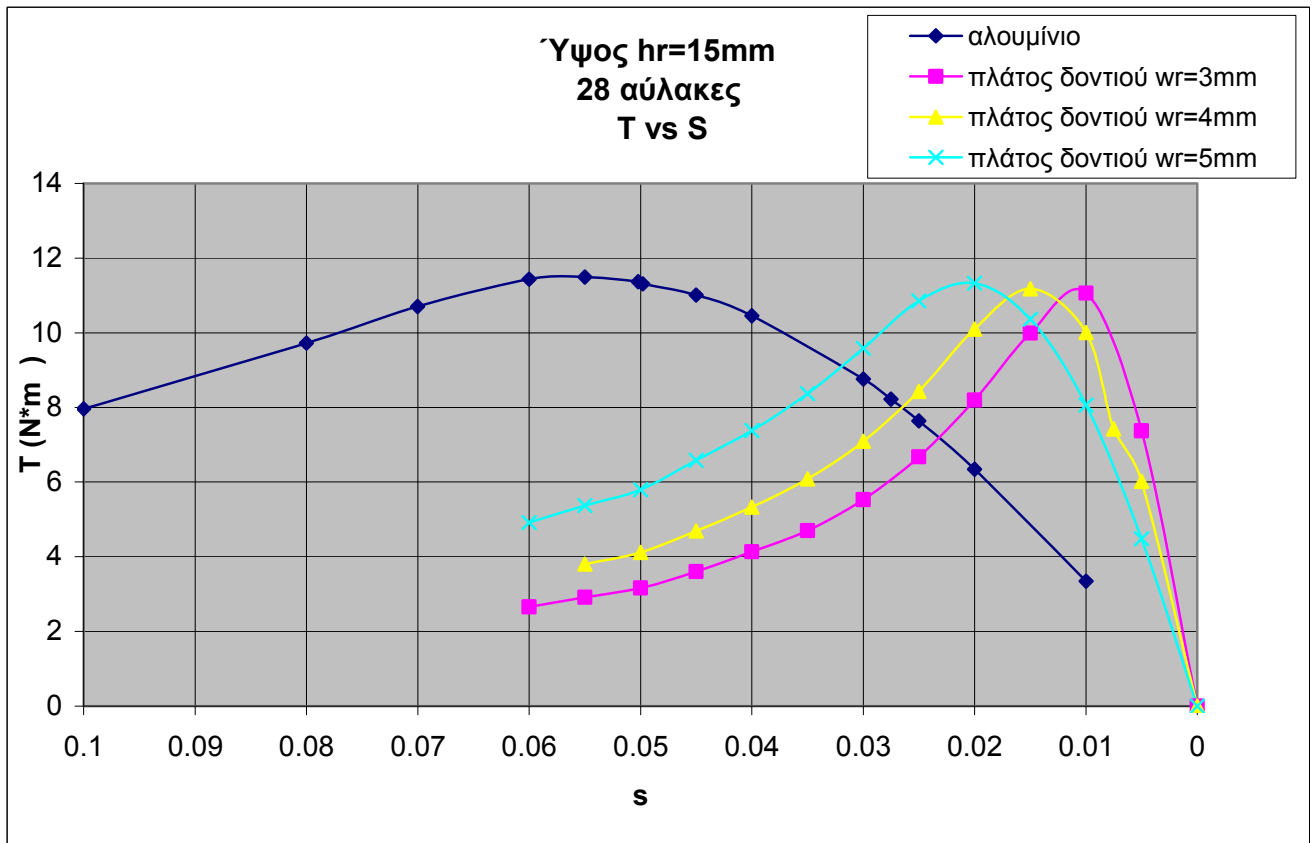


Σχήμα 4.4.3: Καμπύλες ροπής – ολίσθησης  $h_r = 14\text{mm}$ , 28 αύλακες Δρομέα

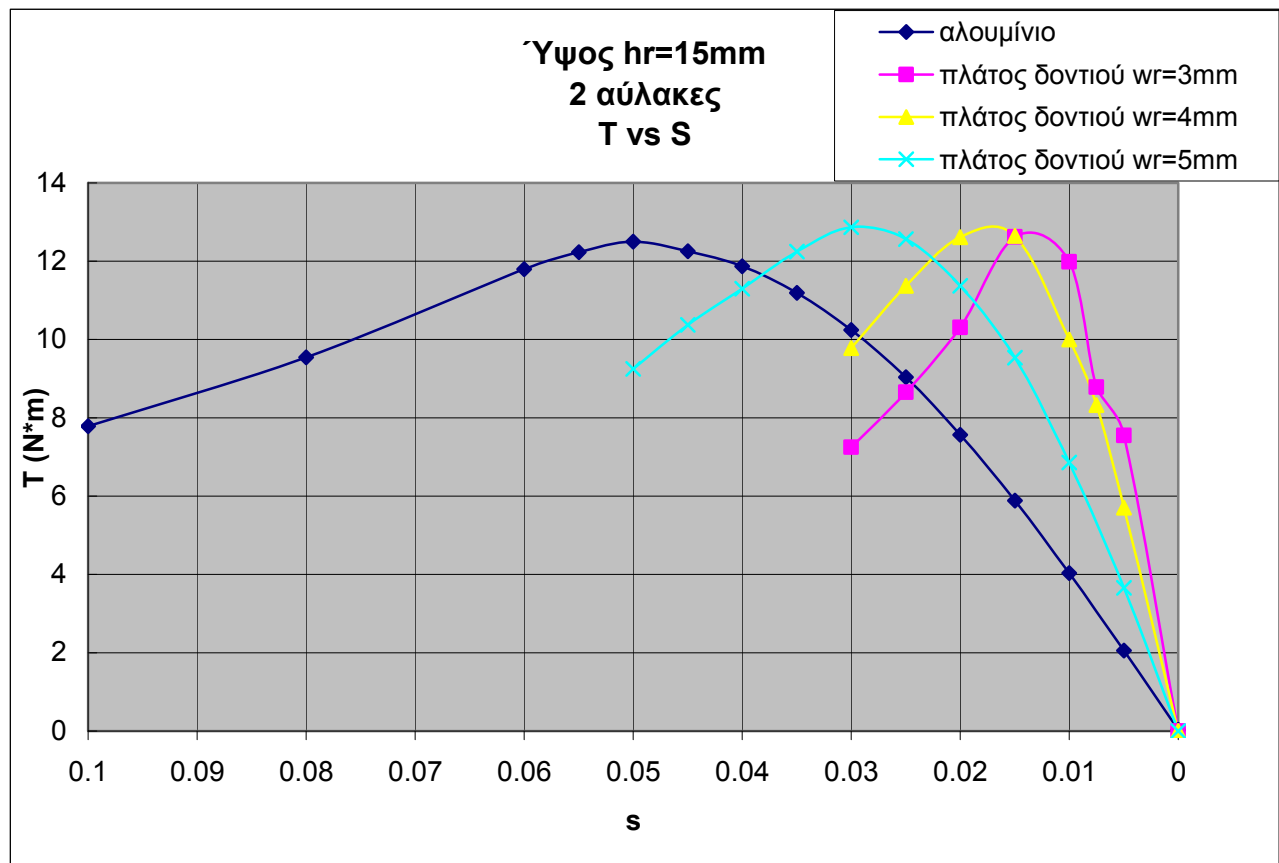




Σχήμα 4.4.4: Καμπύλες ροπής – ολίσθησης  $h_r = 14\text{mm}$ , 32 αύλακες Δρομέα



Σχήμα 4.4.5: Καμπύλες ροπής – ολίσθησης  $h_r = 15\text{mm}$ , 28 αύλακες Δρομέα



Σχήμα 4.4.6: Καμπύλες ροπής – ολίσθησης  $h_r = 15\text{mm}$ , 32 αύλακες Δρομέα

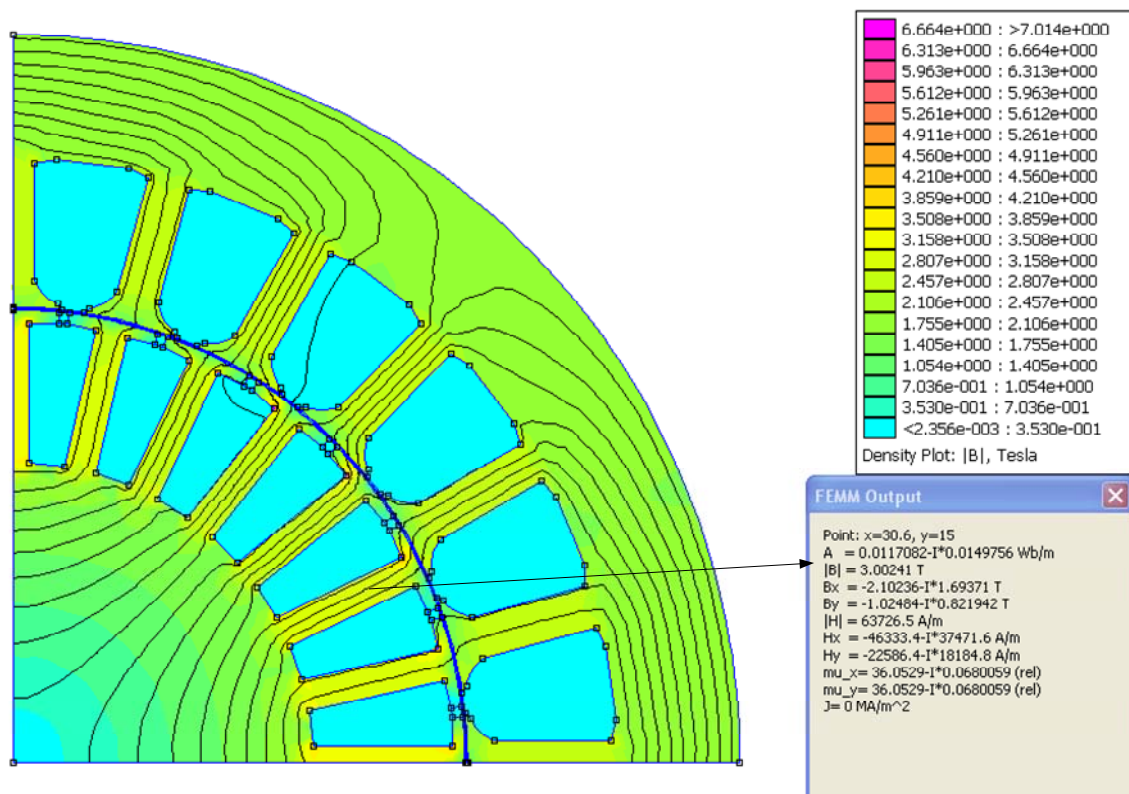
Όσον αφορά τις απώλειες, αφού ο στάτης είναι ο ίδιος οι απώλειες χαλκού του στάτη θα παραμείνουν οι ίδιες και έτσι μελετήθηκαν οι απώλειες χαλκού δρομέα και οι απώλειες πυρήνα. Στον πίνακα 4.4.4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι απώλειες για κάθε γεωμετρία.

		28 αύλακες		32 αύλακες	
		Απώλειες Χαλκού δρομέα (W)	Απώλειες πυρήνα (W)	Απώλειες Χαλκού δρομέα (W)	Απώλειες πυρήνα (W)
$h_{r2}=13\text{mm}$	$w_r = 3\text{mm}$	5.4178	129.89	8.28	53.5908
	$w_r = 4\text{mm}$	8.4511	60.444	13.7682	66.3707
	$w_r = 5\text{mm}$	12.3377	94.9073	20.2487	61.9666
$h_{r2}=14\text{mm}$	$w_r = 3\text{mm}$	5.6367	132.0424	8.5627	53.4356
	$w_r = 4\text{mm}$	8.7316	88.193	14.1307	69.1741
	$w_r = 5\text{mm}$	12.6386	68.5073	20.5022	62.3059
$h_{r2}=15\text{mm}$	$w_r = 3\text{mm}$	5.8339	135.1477	8.8115	53.588
	$w_r = 4\text{mm}$	8.9769	60.7037	8.365	66.1525
	$w_r = 5\text{mm}$	12.8749	69.779	20.6319	62.83

Πίνακας 4.4.4: Απώλειες χαλκού δρομέα και πυρήνα των γεωμετριών των πινάκων 4.4.1 – 4.4.3

Προτού σχολιαστούν οι καμπύλες ροπής – ολίσθησης κρίνεται αναγκαίος ο σχολιασμός των απωλειών. Από τον πίνακα 4.4.4 παρατηρείται ότι για κάποιες γεωμετρίες οι απώλειες πυρήνα υπολογίστηκαν πολύ υψηλές σε σχέση με τις απώλειες πυρήνα της μηχανής του εργαστηρίου. Αυτό οφείλεται στο μικρό πλάτος δοντιού του δρομέα σε σχέση με το πλάτος αύλακος. Το μικρό πλάτος δοντιού αποτελεί το μοναδικό μονοπάτι για τη μαγνητική ροή οπότε πυκνώνουν οι μαγνητικές

γραμμές άρα το μέτρο της ροής αυξάνει στο σημείο αυτό. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3 οι απώλειες πυρήνα είναι άμεσα συνδεδεμένες με το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής κάθε σημείου (καμπύλη ειδικών απωλειών πυρήνα – μαγνητική επαγωγή) γι' αυτό και η μεγάλη αύξηση στην τιμή των απωλειών. Επίσης από τους κανόνες κλασσικού σχεδιασμού μιας ασύγχρονης μηχανής είναι γνωστό ότι το μέτρο της μαγνητικής ροής στα δόντια του δρομέα δεν μπορεί να ξεπερνά το 1,8T – 1,9 T γιατί η μηχανή θα υπερθερμαίνεται. Ο περιορισμός αυτός καθιστά κάποιες γεωμετρίες ακατάλληλες πριν τη μελέτη των καμπύλων ροπής – ολίσθησης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της περίπτωσης αυτής φαίνεται στο σχήμα 4.4.7 το οποίο παρουσιάζει το πεδίο της γεωμετρίας με 28 αύλακες δρομέα ύψος  $h_r=13\text{mm}$  και  $w_r=3\text{mm}$ . Στο σχήμα φαίνεται το δόντι που έχει την απαγορευτική τιμή της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο στιγμιότυπο αυτό στα 3T.

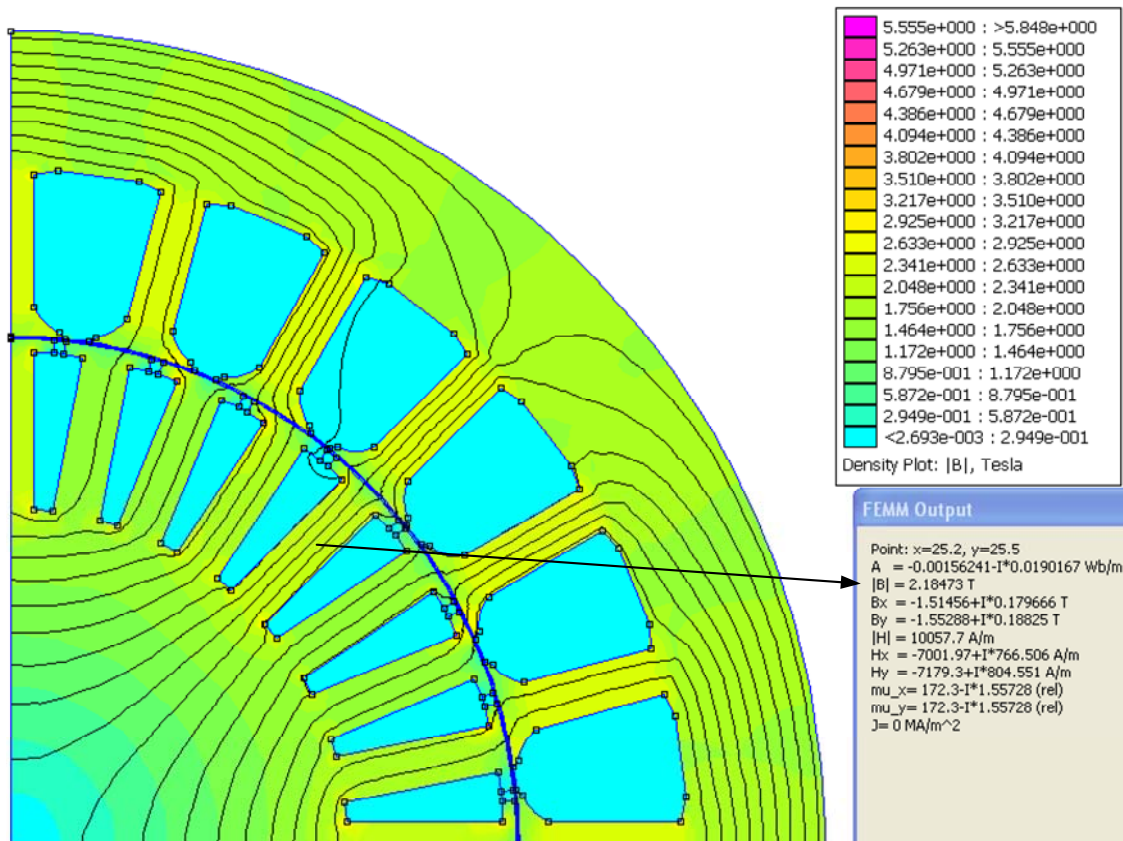


Σχήμα 4.4.7: Πεδίο γεωμετρίας 28 αυλάκων, ύψος  $h_{r2}=13\text{mm}$  και πλάτος δοντιού  $w_r=3\text{mm}$

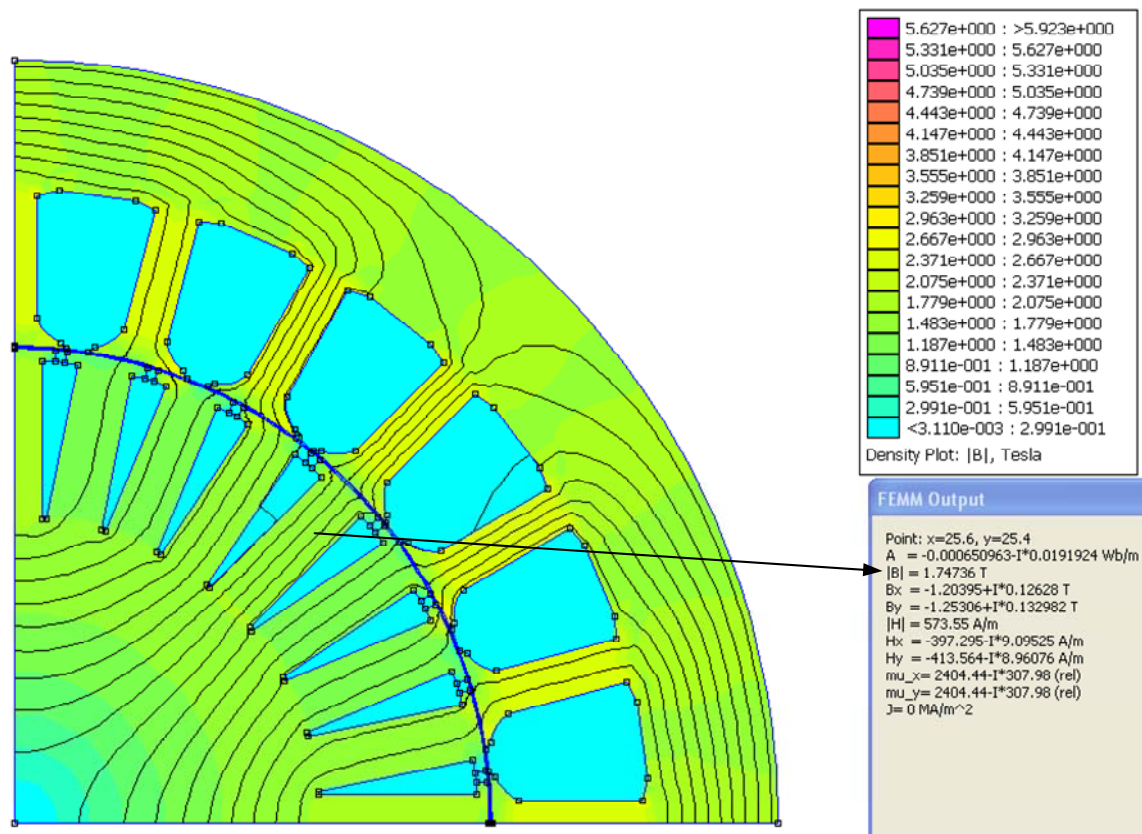
Από τις καμπύλες ροπής – ολίσθησης των σχημάτων 4.4.1 – 4.4.6 παρατηρείται ότι σε όλες τις γεωμετρίες η μέγιστη ροπή εμφανίζεται σε πολύ μικρότερες ολισθήσεις οπότεν έχει επιτευχθεί η βελτιστοποίηση ως προς την απόδοση της μηχανής σύμφωνα με τον τύπο 4.2.1. Επίσης σε κάποιες γεωμετρίες η μέγιστη ροπή είναι λίγο μικρότερη από τη μέγιστη ροπή της μηχανής με αλουμίνιο το οποίο δεν ήταν αναμενόμενο, είναι όμως λογικό, λόγω της μεγάλης αλλαγής στο εμβαδό των τυλιγμάτων του δρομέα.

Από το σύνολο των γεωμετριών που προσομοιώθηκαν αφού όλες αποδίδουν μέγιστη και ονομαστική ροπή σε μικρότερη ολίσθηση, και αφού κάποιες απορρίπτονται λόγω των τεράστιων απωλειών πυρήνα επιλέγονται για περαιτέρω μελέτη αυτές που δίνουν μεγαλύτερη ή τουλάχιστον ίση ονομαστική και μέγιστη ροπή. Έτσι τα σχήματα 4.4.8, 4.4.9, 4.4.10 παρουσιάζουν το πεδίο και τις μαγνητικές γραμμές των γεωμετριών:

- 32 αύλακες δρομέα,  $h_{r2} = 13\text{mm}$ ,  $w_r = 4\text{mm}$
  - 32 αύλακες δρομέα,  $h_{r2} = 14\text{mm}$ ,  $w_r = 5\text{mm}$
  - 32 αύλακες δρομέα,  $h_{r2} = 15\text{mm}$ ,  $w_r = 5\text{mm}$
- αντίστοιχα.

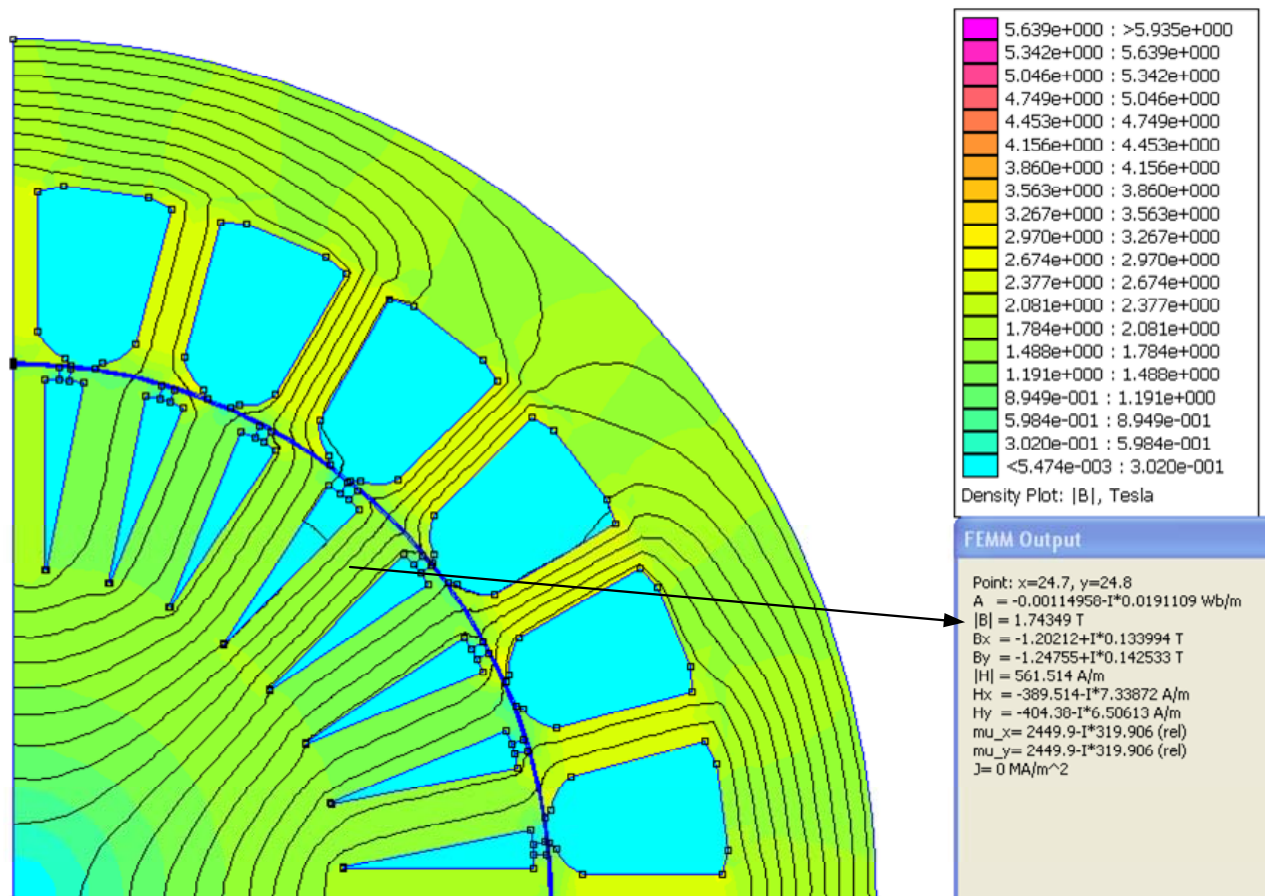


Σχήμα 4.4.8: Πεδίο και μαγνητικές γραμμές γεωμετρίας 32 αύλακες δρομέα,  $h_{r2} = 13\text{mm}$ ,  $w_r = 4\text{mm}$



Σχήμα 4.4.9: Πεδίο και μαγνητικές γραμμές γεωμετρίας 32 αύλακες δρομέα,  $h_{r2} = 14\text{mm}$ ,  $w_r = 5\text{mm}$





Σχήμα 4.4.10: Πεδίο και μαγνητικές γραμμές γεωμετρίας 32 αύλακες δρομέα,  $h_{r2} = 15\text{mm}$ ,  $w_r = 5\text{mm}$

Παρατηρείται ότι η πρώτη γεωμετρία έχει απαγορευτική τιμή πυκνότητας μαγνητικής ροής στα δόντια του στάτη οπότεν απορρίπτεται. Οι άλλες δύο γεωμετρίες έχουν ικανοποιητικές τιμές απωλειών και πυκνότητας μαγνητικής ροής και δίνουν ονομαστική και μέγιστη ροπή μεγαλύτερη από τη μηχανή του εργαστηρίου με αλουμίνιο και σε πολύ μικρότερη ολίσθηση. Έτσι με εφαρμογή της εξίσωσης 4.2.1 υπολογίζεται η εσωτερική μηχανική ισχύς των γεωμετριών αυτών στον πίνακα 4.4.5.

	32 αύλακες δρομέα Ύψος $h_{r2} = 14\text{mm}$ Πλάτος δοντιών $w_r = 5\text{mm}$	32 αύλακες δρομέα Ύψος $h_{r2} = 15\text{mm}$ Πλάτος δοντιών $w_r = 5\text{mm}$
Ρμχ (ονομαστική) (W)	1463.68	1473.51
Ρμχ (μέγιστη) (W)	1961.824	1960.77
αύξηση στην ονομαστική μηχ. ισχύ της μηχανής του εργαστηρίου	105.6%	106.5%
αύξηση στη μέγιστη μηχ. ισχύ της μηχανής του εργαστηρίου	105.1%	105.1%

Πίνακας 4.4.5: Μέγιστη και ονομαστική μηχανική ισχύς γεωμετριών

- 32 αύλακες δρομέα, ύψος  $h_{r2} = 14\text{mm}$ , πλάτος δοντιού  $w_r = 5\text{mm}$
- 32 αύλακες δρομέα, ύψος  $h_{r2} = 15\text{mm}$ , πλάτος δοντιού  $w_r = 5\text{mm}$

**Παρατηρήσεις:**

Βάση της πορείας που ακολουθήθηκε φαίνεται ότι

- σε σταθερό ύψος και αριθμό αυλάκων καθώς αυξάνεται το πλάτος των οδοντώσεων του δρομέα αυξάνεται η μέγιστη ροπή και η ολίσθηση που αυτή συναντάται.
- **Μεγαλώνοντας το ύψος** με σταθερό αριθμό αυλάκων η **μέγιστη ροπή μικραίνει αλλά η ονομαστική ροπή** που θεωρήθηκε στο  $\frac{1}{2}$  της ολίσθησης για  $T_{max}$  **αυξάνεται**.
- Αυξανόμενου του αριθμού αυλάκων σε σταθερό ύψος η ροπή αυξάνεται πράγμα λογικό αφού αυξάνεται ο χαλκός και δημιουργείται ισχυρότερο πεδίο, αυξάνεται όμως και η ολίσθηση μέγιστης ροπής.

Έτσι για να ευρεθεί γεωμετρία με μεγαλύτερη ονομαστική ροπή ακολούθησαν προσομοιώσεις με μεγαλύτερο ύψος αυλάκων, μέγιστο πλάτος οδοντώσεων που επέτρεπε η γεωμετρία και μεγαλύτερο αριθμό αυλάκων δρομέα.

Προσομοιώθηκαν γεωμετρίες με ύψος  $h_{r2}=16\text{mm}$  και  $h_{r2}=17\text{mm}$  αφού μεγαλύτερο ύψος από αυτό θα περιόριζε πολύ το σώμα του δρομέα. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με 32 αύλακες δρομέα και για κάθε γεωμετρία το μέγιστο πλάτος οδοντώσεων που επιτρεπόταν.

Στον πίνακα 4.4.6 φαίνονται τα αποτελέσματα ροπής – ολίσθησης. Και στο σχήμα 4.4.11 φαίνονται οι καμπύλες ροπής – ολίσθησης των δύο γεωμετριών συγκρινόμενες με τη καμπύλη ροπής – ολίσθησης της προσομοιωμένης μηχανής του εργαστηρίου με αλουμίνιο για 32 αύλακες δρομέα.

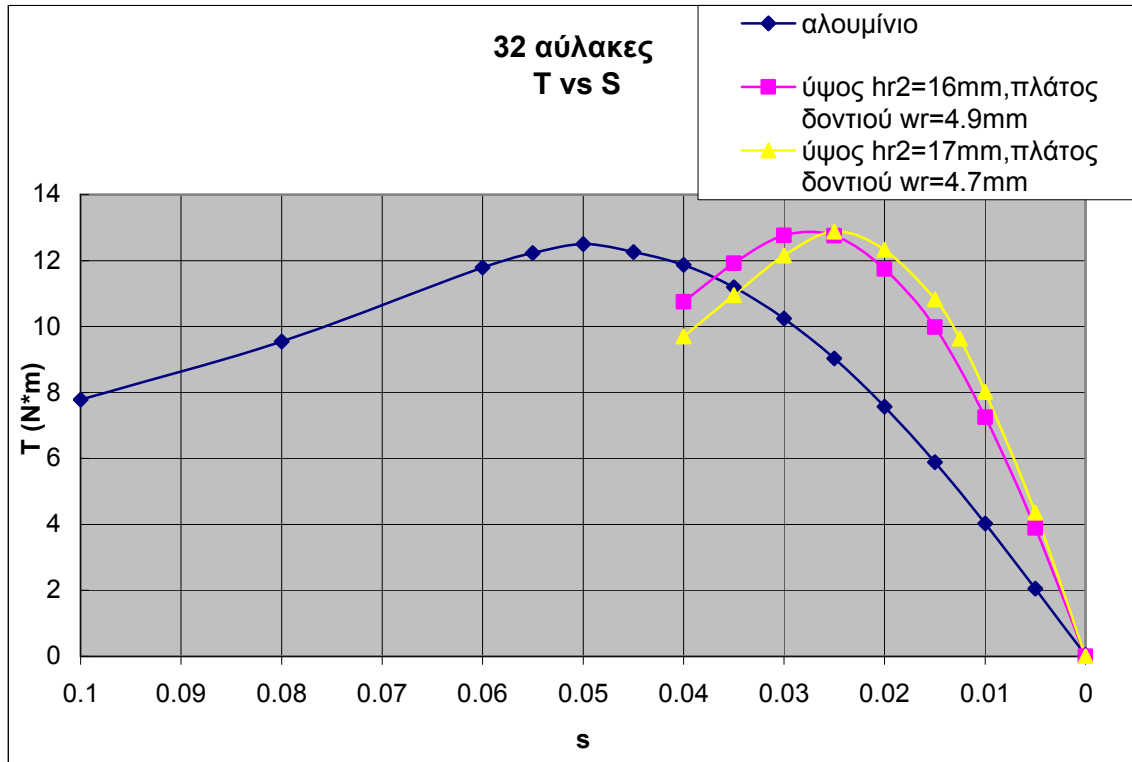
32 ΑΥΛΑΚΕΣ					
Ύψος $h_{r1}=16\text{mm}$			Ύψος $h_{r1}=17\text{mm}$		
Πλάτος δοντιού $W_r=4.9\text{mm}$			Πλάτος δοντιού $W_r=4.7\text{mm}$		
s	T1	T2	S	T1	T2
0.005	3.887404	3.767714	0.005	4.355188	4.219617
0.01	7.253733	7.033771	0.01	8.015741	7.772065
0.015	9.984809	9.718186	0.0125	9.6376	9.3864
0.02	11.74725	11.38579	0.015	10.82235	10.53825
0.025	12.75544	12.40331	0.02	12.32983	11.94912
0.03	12.7638	12.40305	0.025	12.87491	12.52061
0.035	11.91603	11.56864	0.03	12.14792	11.80179
0.04	10.74263	10.39529	0.035	10.94583	10.62272
			0.04	9.697432	9.380926

Πίνακας 4.4.6: Αποτελέσματα ροπής – ολίσθησης για τις γεωμετρίες με ύψη  $h_{r2}=16\text{mm}$  και  $h_{r2}=17\text{mm}$

Οι απώλειες πυρήνα και χαλκού δρομέα κάθε γεωμετρίας και το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής στα δόντια του δρομέα φαίνονται στον πίνακα 4.4.7 και στο σχήμα 4.4.12 α και β φαίνεται το πεδίο τους.

	32 ΑΥΛΑΚΕΣ	
	Ύψος $h_{r2}=16\text{mm}$ Πλάτος δοντιού $w_r = 4.9\text{mm}$	Ύψος $h_{r2}=17\text{mm}$ Πλάτος δοντιού $w_r = 4.7\text{mm}$
Απώλειες πυρήνα (W)	62.3859	64.7219
Απώλειες χαλκού δρομέα (W)	21.9657	17.3342

Πίνακας 4.4.7: Απώλειες χαλκού δρομέα και απώλειες πυρήνα των γεωμετριών του πίνακα 4.4.5



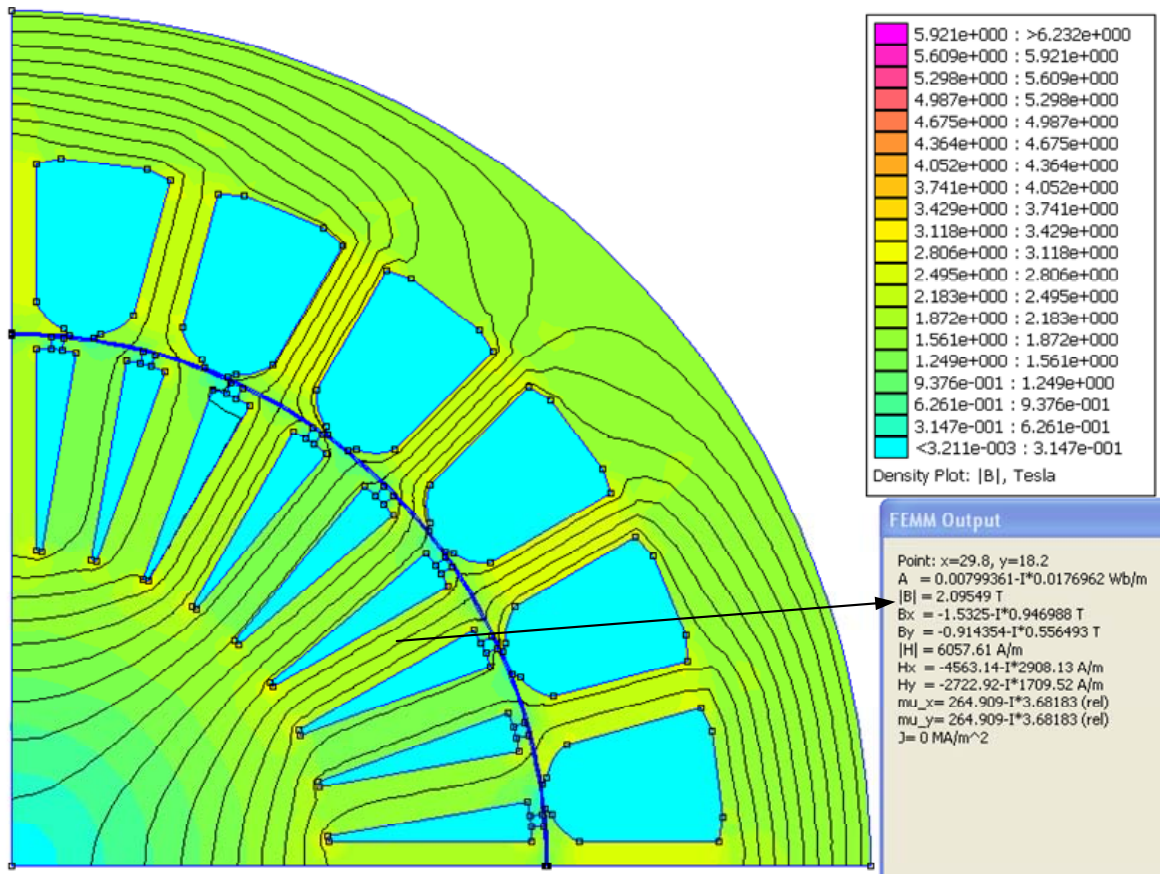
Σχήμα 4.4.11: Καμπύλες ροπής – ολίσθησης για τις γεωμετρίες με ύψη  $h_{r2}=16\text{mm}$  και  $h_{r2}=17\text{mm}$

Η βελτίωση που απαιτήθηκε στην ονομαστική ροπή επετεύχθη και με τις δύο γεωμετρίες με μια αύξηση του 11% για ύψος  $h_{r2}=16\text{mm}$  και 7% για ύψος  $h_{r2}=17\text{mm}$  καθώς επίσης και αύξηση στην μέγιστη ροπή. Η μηχανική ισχύς του κινητήρα παρουσιάζει αύξηση στην ονομαστική ισχύ της τάξεως του 11.65% και του 8% για  $h_{r2}=16\text{mm}$  και για  $h_{r2}=17\text{mm}$  αντίστοιχα και στη μέγιστη ισχύ της τάξεως του 4.2% για  $h_{r2}=16\text{mm}$  και του 5.7% για  $h_{r2}=17\text{mm}$ . Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 4.4.8.

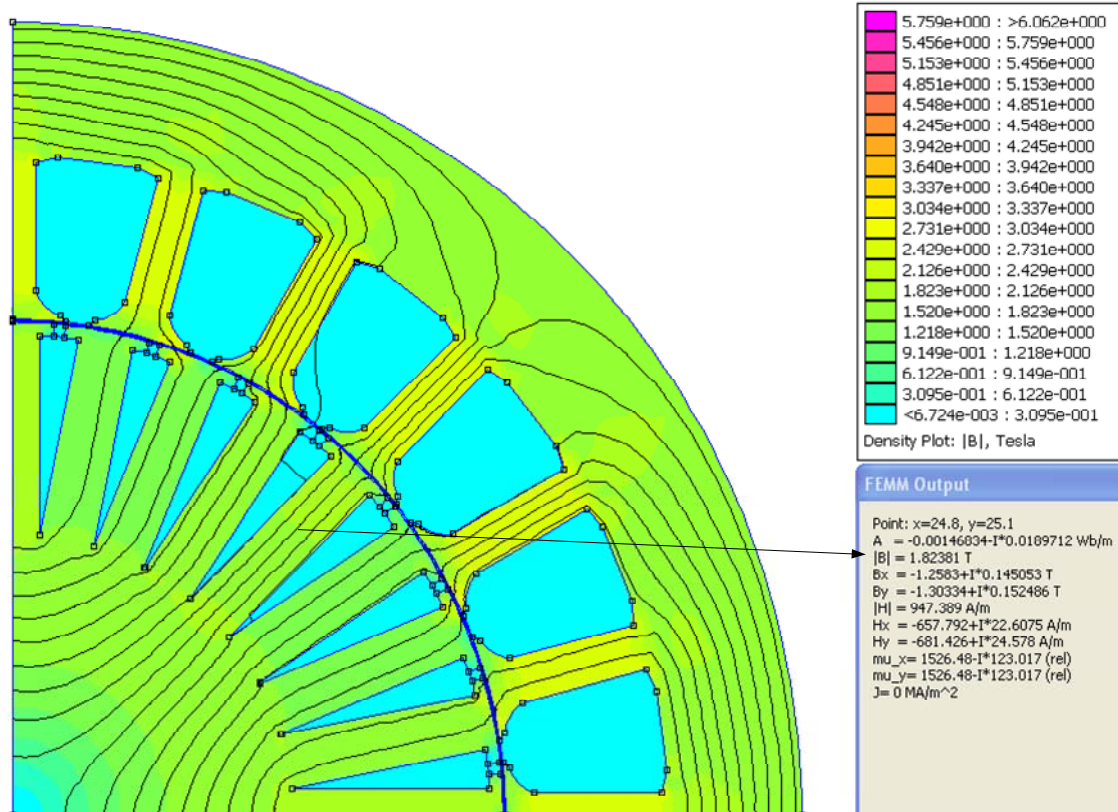
	32 άυλακες δρομέα Ύψος $h_{r2}=16\text{mm}$ Πλάτος δοντιού $w_r$ = 4.9mm	32 άυλακες δρομέα Ύψος $h_{r2}=17\text{mm}$ Πλάτος δοντιού $w_r$ = 4.7mm
<b>Ρμηχ (ονομαστική) (W)</b>	1544.81	1494.31
<b>Ρμηχ (μέγιστη) (W)</b>	1943.66	1971.648
<b>αύξηση ονομαστικής μηχ. ισχύος της μηχανής του εργαστηρίου</b>	111.65%	108%
<b>αύξηση μέγιστης μηχ. Ισχύος της μηχανής του εργαστηρίου</b>	104.2%	105.7%

Πίνακας 4.4.7: Μέγιστη και ονομαστική μηχανική ισχύς γεωμετριών

- 32 άυλακες δρομέα, ύψος  $h_{r2} = 16\text{mm}$ , πλάτος δοντιού  $w_r = 4.9\text{mm}$
- 32 άυλακες δρομέα, ύψος  $h_{r2} = 17\text{mm}$ , πλάτος δοντιού  $w_r = 4.7\text{mm}$



α.



β.

Σχήμα 4.4.12: Πεδίο και μαγνητικές γραμμές  
 α. Ύψος  $h_{r2}=16\text{mm}$ , πλάτος δοντιού  $w_r=4.9\text{mm}$   
 β. Ύψος  $h_{r2}=17\text{mm}$ , πλάτος δοντιού  $w_r=4.7\text{mm}$



Οι δύο γεωμετρίες έχουν αποδεχτές απώλειες πυρήνα και χαλκού δρομέα αλλά όπως φαίνεται από το σχήμα 4.4.12α για ύψος  $h_{r2}=16\text{mm}$ , και πλάτος δοντιού  $w_r=4.9\text{mm}$ , το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής στα δόντια του δρομέα ξεπερνά τα όρια των κανόνων σχεδίασης οπότε η μηχανή θα υπερθερμαίνεται. Για ύψος  $h_{r2}=17\text{mm}$ , και πλάτος οδόντα  $w_r=4.7\text{mm}$  το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής είναι εντός ορίων οπότε η γεωμετρία αυτή ικανοποιεί όλες τις προϋποθέσεις βελτιστοποίησης.

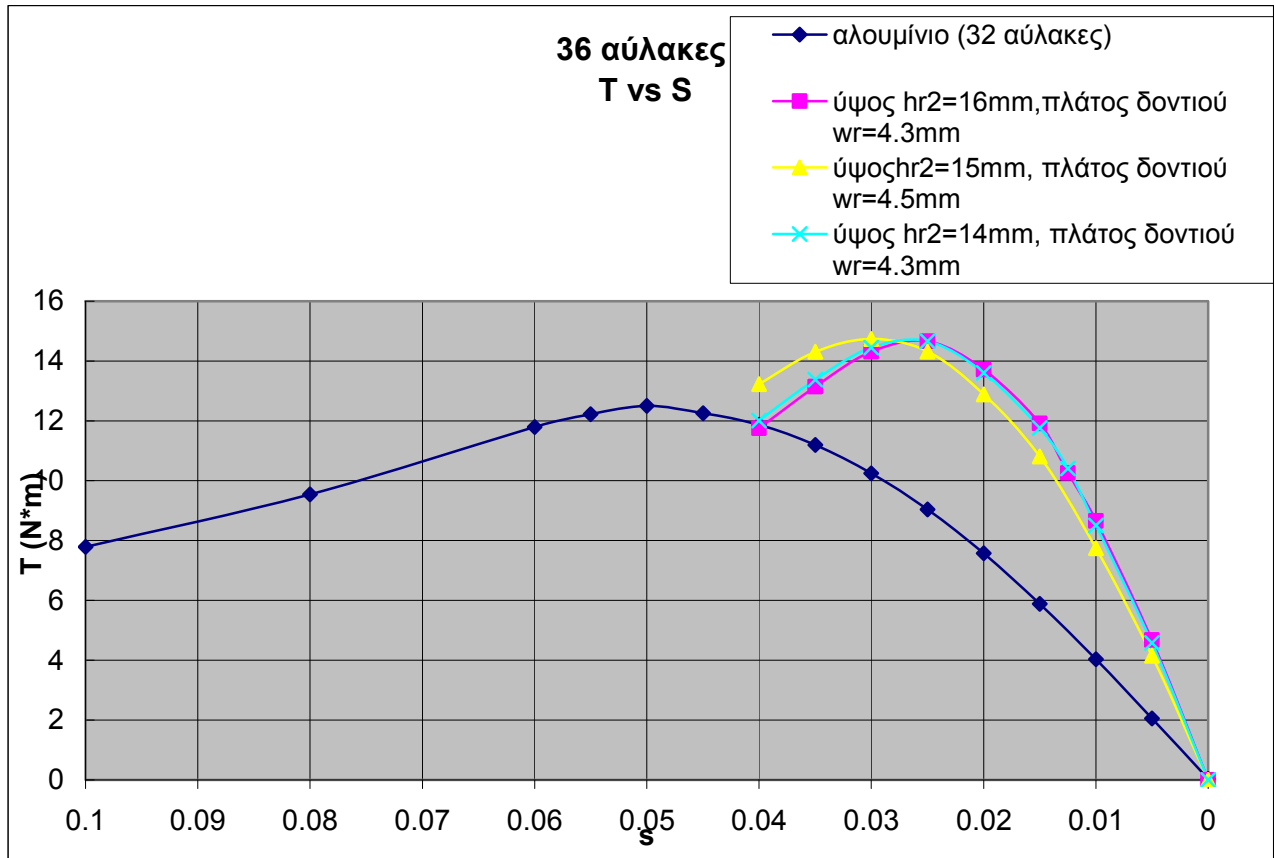
Τέλος βάση της 3<sup>ης</sup> παρατήρησης ότι αυξανόμενων των αυλάκων αυξάνεται η ροπή, έγιναν προσομοιώσεις με μεγαλύτερο αριθμό αυλάκων. Ο περιορισμός όμως της διαμέτρου του δρομέα επιτρέπει μόνο προσομοιώσεις για 36 αυλάκες δρομέα. Έτσι στον πίνακα 4.4.9 φαίνονται τα αποτελέσματα ροπής – ολίσθησης για γεωμετρίες με 36 αυλάκες δρομέα, ύψος  $h_{r2}=14\text{mm}$ ,  $15\text{mm}$  και  $16\text{mm}$  καθώς και το μέγιστο επιτρεπόμενο πλάτος δοντιού  $w_r$  για κάθε γεωμετρία. Στο σχήμα 4.4.13 φαίνονται οι καμπύλες ροπής – ολίσθησης των γεωμετριών συγκρινόμενες με την καμπύλη ροπής – ολίσθησης της προσομοιωμένης μηχανής του εργαστηρίου για 32 αυλάκες αλουμινίου και στον πίνακα 4.4.10 φαίνονται οι απώλειες χαλκού και απώλειες πυρήνα των γεωμετριών. Ακολουθώντας στο σχήμα 4.4.14 α, β και γ παρουσιάζονται τα πεδία και οι μαγνητικές γραμμές των γεωμετριών αντίστοιχα.

36 ΑΥΛΑΚΕΣ								
Ύψος $h_{r1}=14\text{mm}$			Ύψος $h_{r1}=15\text{mm}$			Ύψος $h_{r1}=16\text{mm}$		
Πλάτος δοντιού $W_r=4.3\text{mm}$			Πλάτος δοντιού $W_r=4.5\text{mm}$			Πλάτος δοντιού $W_r=4\text{mm}$		
s	T1	T2	s	T1	T2	s	T1	T2
0.005	4.581279	4.335815	0.005	4.153142	3.873378	0.005	4.673731	4.431883
0.01	8.505369	8.077598	0.01	7.744387	7.291622	0.01	8.65409	8.229089
0.0125	10.4044	9.918	0.015	10.81173	10.2457	0.0125	10.5536	10.0704
0.015	11.76643	11.22049	0.02	12.88267	12.17873	0.015	11.9136	11.37091
0.02	13.60352	12.93223	0.025	14.31809	13.5936	0.02	13.70957	13.04546
0.025	14.65898	13.98159	0.03	14.73486	13.99015	0.025	14.6636	13.99628
0.03	14.45117	13.77691	0.035	14.3137	13.58406	0.03	14.31483	13.65589
0.035	13.37986	12.74252	0.04	13.22579	12.50373	0.035	13.14822	12.5304
0.04	12.00552	11.39806				0.04	11.7566	11.17271

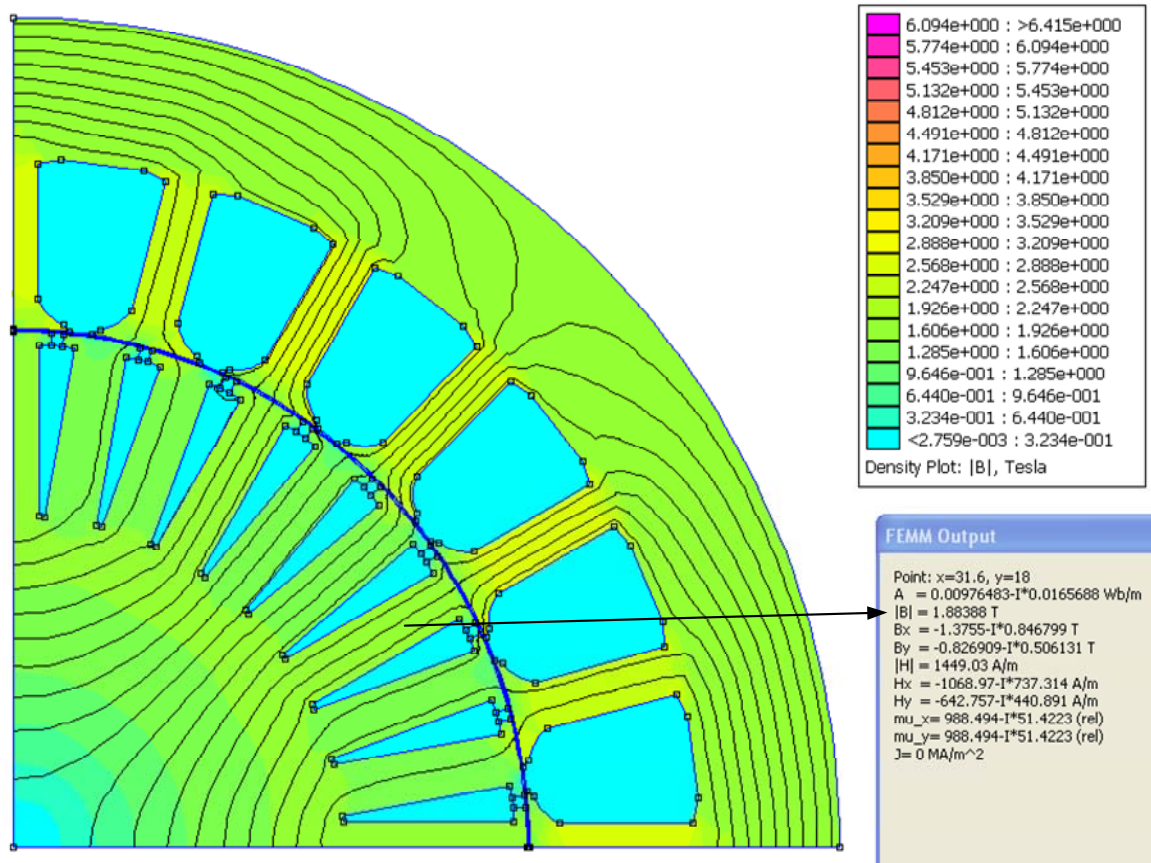
Πίνακας 4.4.9: Αποτελέσματα ροπής – ολίσθησης για τις γεωμετρίες 36 αυλάκες,  $h_{r2}=14\text{mm}$ ,  $15\text{mm}$  και  $16\text{mm}$

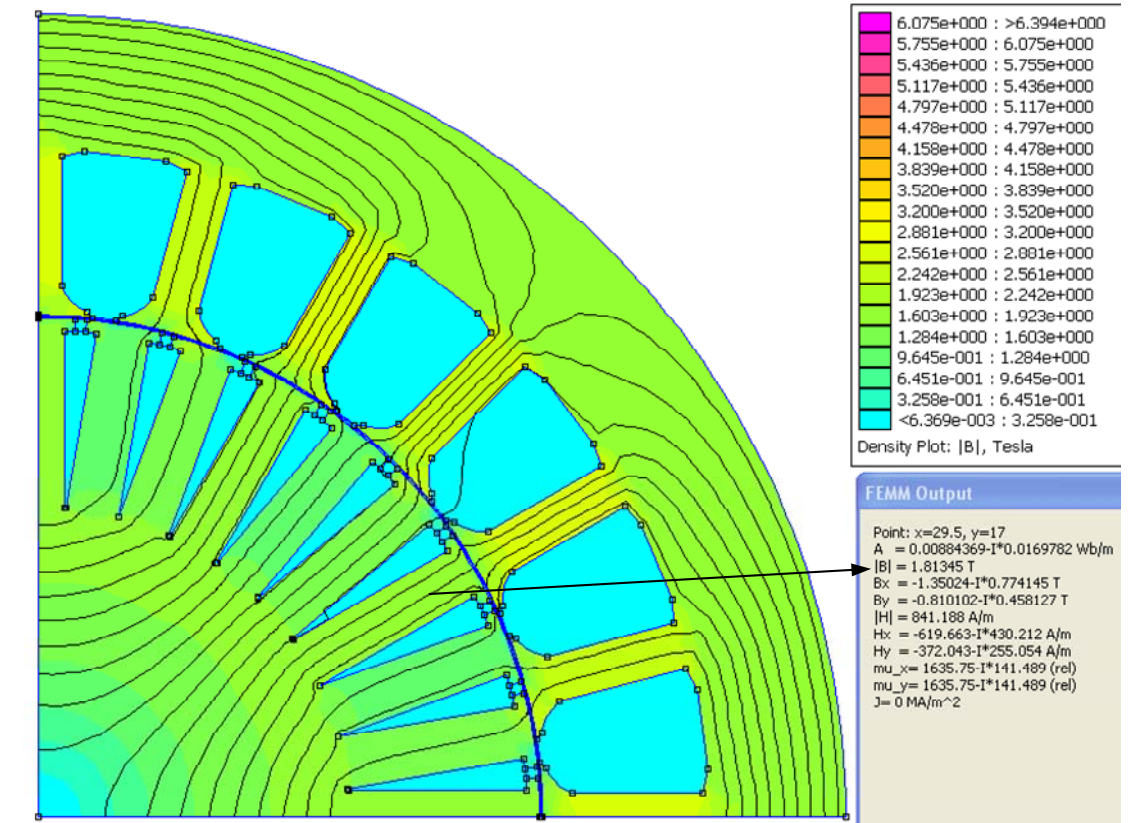
	36 ΑΥΛΑΚΕΣ		
	Ύψος $h_{r2}=14\text{mm}$ Πλάτος δοντιού $w_r = 4.3\text{mm}$	Ύψος $h_{r2}=15\text{mm}$ Πλάτος δοντιού $w_r = 4.5\text{mm}$	Ύψος $h_{r2}=16\text{mm}$ Πλάτος δοντιού $w_r = 4\text{mm}$
Απώλειες πυρήνα (W)	63.7544	63.43	65.0773
Απώλειες χαλκού δρομέα (W)	16.0649	20.0201	16.3071

Πίνακας 4.4.10: Απώλειες χαλκού δρομέα και απώλειες πυρήνα των γεωμετριών του πίνακα 4.4.7

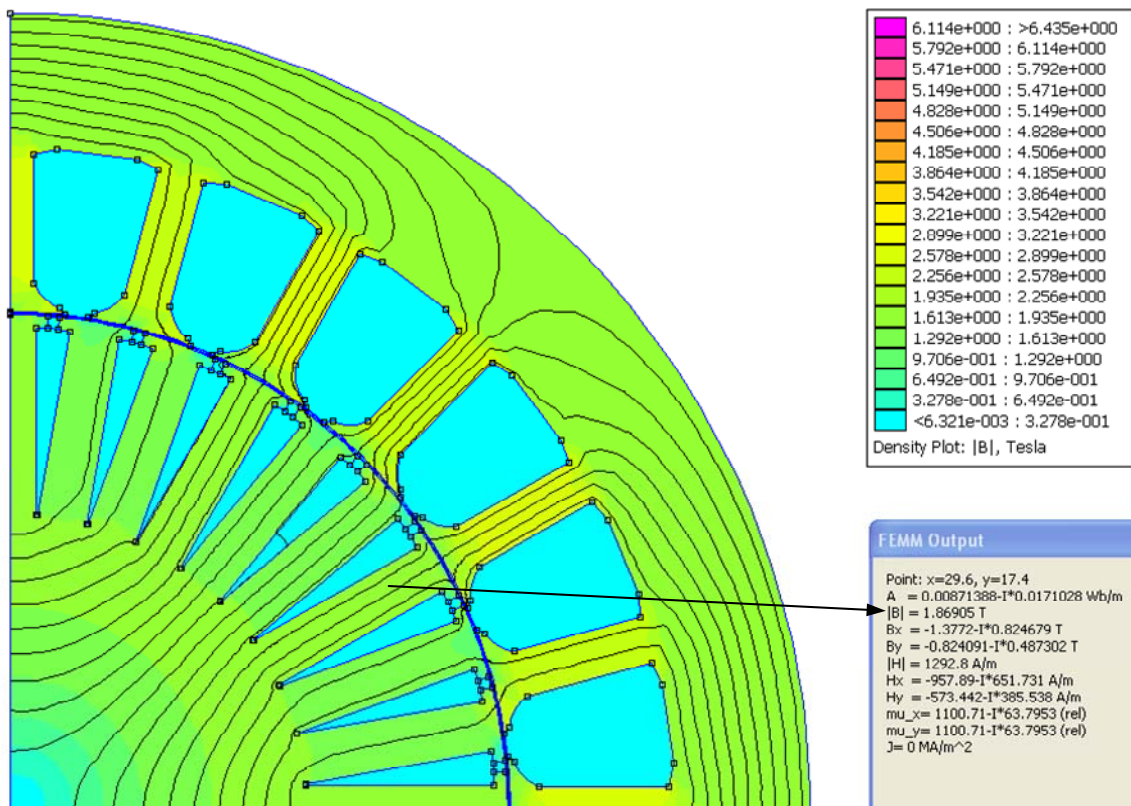


Σχήμα 4.4.13: Καμπύλες ροπής – ολίσθησης για τις γεωμετρίες του πίνακα 4.4.7





β.



γ.

Σχήμα 4.4.14: Πεδίο και μαγνητικές γραμμές για 36 άλakes δρομέα  
 α. Ύψος  $h_{r2}=14\text{mm}$ , πλάτος δοντιού  $w_r=4.3\text{mm}$   
 β. Ύψος  $h_{r2}=15\text{mm}$ , πλάτος δοντιού  $w_r=4.5\text{mm}$   
 γ. Ύψος  $h_{r2}=16\text{mm}$ , πλάτος δοντιού  $w_r=4\text{mm}$

Όπως παρατηρείται από τις καμπύλες ροπής – ολίσθησης του σχήματος 4.4.13 οι γεωμετρίες με 36 αύλακες χαλκού δρομέα, παρουσιάζουν σαφέστατα βελτιωμένη και ονομαστική και μέγιστη ροπή. Η βελτίωση στη μέγιστη ροπή είναι περίπου 17% και στην ονομαστική 15% με 18% συγκρινόμενη με τη μέγιστη και ονομαστική ροπή της μηχανής με 32 αύλακες αλουμινίου αντίστοιχα. Στο πίνακα 4.4.11 φαίνεται η μηχανική ισχύς κάθε γεωμετρίας όπως υπολογίζεται από την εξίσωση 4.2.1

	<b>36 αύλακες δρομέα</b> Ύψος $h_{r2}=14\text{mm}$ Πλάτος δοντιού $w_r = 4.3\text{mm}$	<b>36 αύλακες δρομέα</b> Ύψος $h_{r2}=15\text{mm}$ Πλάτος δοντιού $w_r = 4.5\text{mm}$	<b>36 αύλακες δρομέα</b> Ύψος $h_{r2}=16\text{mm}$ Πλάτος δοντιού $w_r = 4\text{mm}$
<b>Ρμχ (ονομαστική) (W)</b>	1613.89	1672.72	1637
<b>Ρμχ (μέγιστη) (W)</b>	2245	2245.11	2245.57
<b>αύξηση ονομαστικής μηχ. ισχύος της μηχανής του εργαστηρίου</b>	116.4%	120.9%	118.3%
<b>αύξηση μέγιστης μηχ. Ισχύος της μηχανής του εργαστηρίου</b>	120.3%	120.3%	120.3%

Πίνακας 4.4.11: Μέγιστη και ονομαστική μηχανική ισχύς γεωμετριών

- 36 αύλακες δρομέα, ύψος  $h_{r2} = 14\text{mm}$ , πλάτος δοντιού  $w_r = 4.3\text{mm}$
- 36 αύλακες δρομέα, ύψος  $h_{r2} = 15\text{mm}$ , πλάτος δοντιού  $w_r = 4.5\text{mm}$
- 36 αύλακες δρομέα, ύψος  $h_{r2} = 16\text{mm}$ , πλάτος δοντιού  $w_r = 4\text{mm}$

Το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής στα δόντια του δρομέα και στις τρεις γεωμετρίες έχει αποδεχτή τιμή εντός ορίων όπως φαίνεται στα σχήματα 4.4.12 με 4.4.14.

Οι απώλειες χαλκού δρομέα είναι μειωμένες στο 60% για τη γεωμετρία με ύψος  $h_{r2}=15\text{mm}$  και στο 47% για τις άλλες δύο γεωμετρίες σε σχέση με τις απώλειες της μηχανής του εργαστηρίου με 32 αύλακες δρομέα.

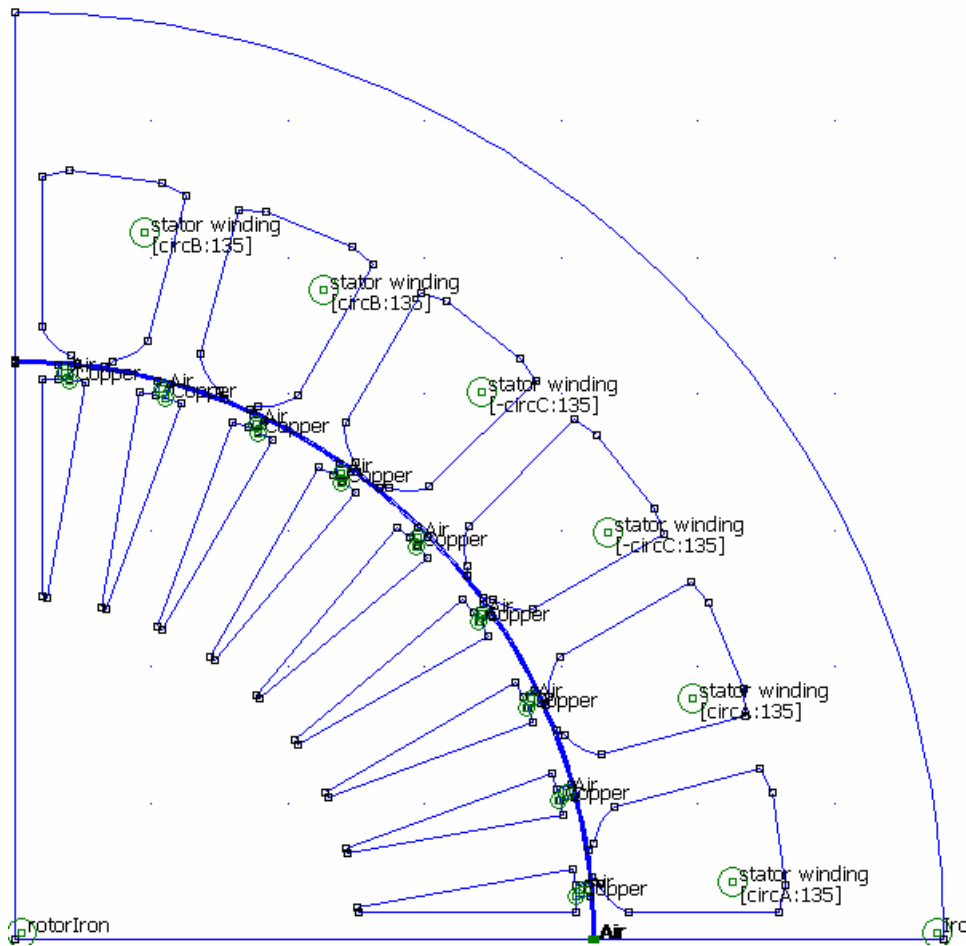
Τέλος οι απώλειες πυρήνα κινούνται στα ίδια επίπεδα τόσο για τις τρεις προαναφερθείσες γεωμετρίες όσο και για την μηχανή του εργαστηρίου. ( $\approx 60 - 65\text{W}$ ).

#### 4.5 Επιλογή Βέλτιστης Γεωμετρίας

Η τελική γεωμετρία επιλέγεται από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του υποκεφαλαίου 4.4 και από τις απαιτήσεις που τέθηκαν στην αρχή του κεφαλαίου. Έτσι η επιλεχθείσα μηχανή πρέπει να παρουσιάζει:

1. Μέγιστη και ονομαστική μηχανική ισχύ μεγαλύτερη από την μέγιστη και ονομαστική ισχύ της μηχανής του εργαστηρίου
2. Μέγιστη και ονομαστική ροπή μεγαλύτερη από τη μέγιστη και ονομαστική ροπή της μηχανής του εργαστηρίου
3. Μικρότερες απώλειες τυλίγματος δρομέα από τη μηχανή του εργαστηρίου.
4. Συγκρίσιμες απώλειες πυρήνα με τη μηχανή του εργαστηρίου

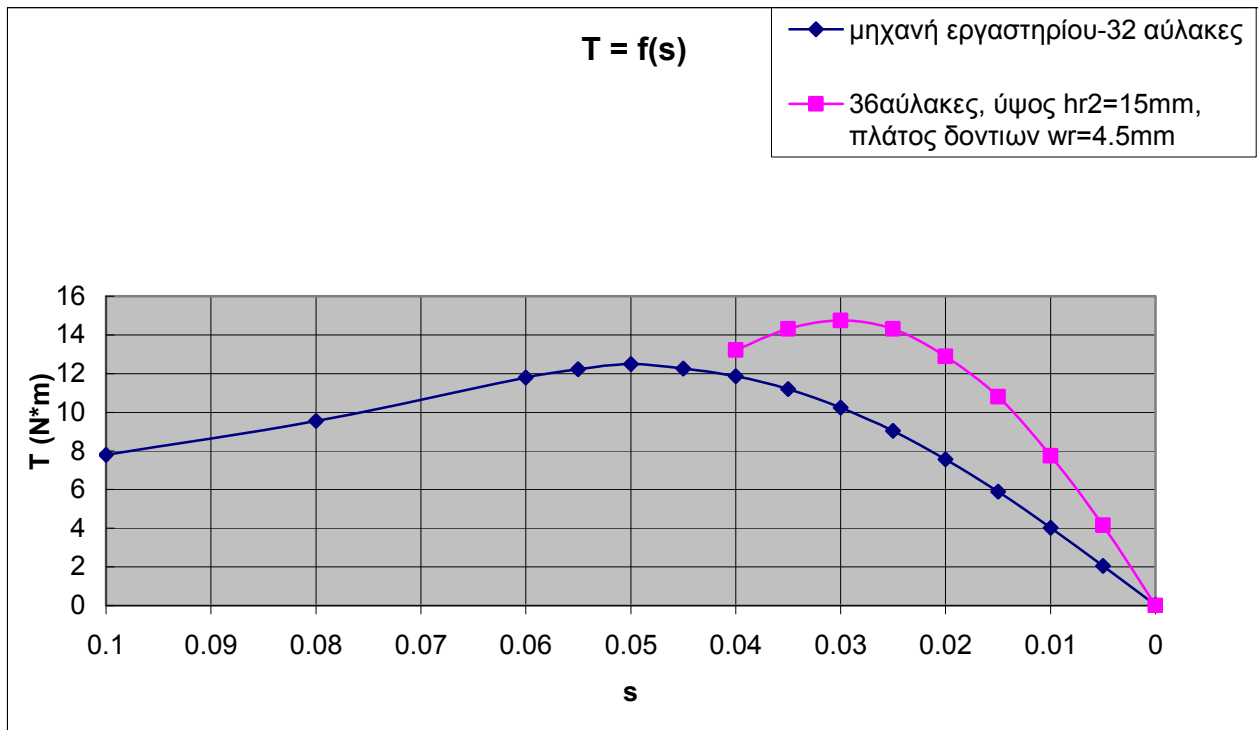
Βάση των απαιτήσεων αυτών και των αποτελεσμάτων του κεφαλαίου 4 επιλέγεται η γεωμετρία με 36 αύλακες δρομέα, ύψος  $h_{r2} = 15\text{mm}$  και πλάτος οδοντώσεων  $w_r = 4.5\text{mm}$ . Η γεωμετρία αυτή επιλέχθηκε έναντι της γεωμετρίας με 36 αύλακες δρομέα, ύψος  $h_{r2} = 16\text{mm}$  και πλάτος οδοντώσεων  $w_r = 4\text{mm}$  γιατί παρουσιάζει μεγαλύτερη ονομαστική μηχανική ισχύ αν και οι απώλειες χαλκού δρομέα είναι μεγαλύτερες και γιατί η μαγνητική επαγωγή στα δόντια του δρομέα είναι μικρότερη. Η επιλεγθείσα γεωμετρία φαίνεται στο σχήμα 6.2.1



Σχήμα 4.5.1: Επιλεγθείσα γεωμετρία μηχανής

#### 4.5.1 Σύγκριση με Προσομοιωμένη Μηχανή Εργαστηρίου

Στο σχήμα 6.2.1.1 φαίνονται οι καμπύλες ροπής – ολίσθησης της επιλεχθείσας γεωμετρίας και της μηχανής του εργαστηρίου με 32 αύλακες.



Σχήμα 4.5.1.1: Καμπύλες ροπής ολίσθησης επιλεχθείσας γεωμετρίας – μηχανής εργαστηρίου

Όπως φαίνεται από το σχήμα 4.5.1.1 η επιλεχθείσα γεωμετρία παρουσιάζει μέγιστη και ονομαστική ροπή σε πολύ μικρότερη ολίσθηση και μεγαλύτερη ροπή. Συγκεκριμένα

$$\begin{aligned} T_{\max} &= 14.73 Nm \quad \text{σε } s = 0.015 \\ T_n &= 10.81 Nm \quad \text{σε } s = 0.03 \end{aligned} \quad (4.5.1.1)$$

Έναντι:

$$\begin{aligned} T_{\max} &= 12.53 Nm \quad \text{σε } s = 0.05 \\ T_n &= 9 Nm \quad \text{σε } s = 0.025 \end{aligned} \quad (4.5.1.2)$$

Άρα η μέγιστη ροπή βελτιστοποιείται κατά 17.56% και η ονομαστική κατά 20.1%.

Η μέγιστη και ονομαστική μηχανική ισχύς βελτιστοποιείται κατά 20.3% και 20.9% αντίστοιχα πράγμα που καθιστά τη επιλεχθείσα μηχανή κατά 0.38HP ικανότερη από την ήδη υπάρχουσα μηχανή.

Από πλευράς απωλειών οι δύο μηχανές παρουσιάζουν τις ίδιες απώλειες χαλκού στάτη και

	Μηχανή Εργαστηρίου	Επιλεχθείσα Μηχανή
Απώλειες πυρήνα (W)	62.77	63.43
Απώλειες τυλίγματος δρομέα (W)	34.01	20.02

Πίνακας 4.5.1.1: Απώλειες χαλκού δρομέα και απώλειες πυρήνα

Οπότεν οι απώλειες πυρήνα αυξάνονται κατά 1% ενώ οι απώλειες τυλίγματος δρομέα μειώνονται στο 58.8%. Τέλος το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής στα δόντια του δρομέα στη μηχανή το εργαστηρίου ήταν στα  $|B| = 1.72\text{T}$  ενώ στην επιλεχθείσα γεωμετρία αυξήθηκε στα  $|B| = 1.81\text{T}$  πράγμα που ίσως κοστίζει στις θερμικές απώλειες τις μηχανής.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

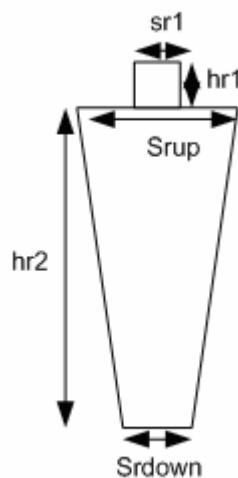
### ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟΣ ΤΡΟΠΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

#### 5.1 Εισαγωγή – Σκοπός

Όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4, ο κλασικός τρόπος σχεδίασης προϋποθέτει σταθερό πλάτος οδοντώσεων δρομέα κατά τη σχεδίαση της μηχανής. Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται ένας εναλλακτικός τρόπος σχεδίασης, ο οποίος δεν επιβάλλει σταθερό πλάτος οδοντώσεων δρομέα, με σκοπό και πάλι τη βελτιστοποίηση της μηχανής του εργαστηρίου.

#### 5.2 Παραμετροποίηση Αύλακος Δρομέα

Η σχεδίαση του δρομέα στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιήθηκε με πλήρη παραμετροποίηση των αυλάκων του δρομέα, χωρίς δηλαδή την εποπτεία των οδοντώσεων. Η παραμετροποίηση έγινε μέσω διαδικασίας στο πρόγραμμα matlab. Στη γεωμετρία των αυλάκων μεταβλητές αποτελούσαν το ύψος, το πλάτος της πάνω και κάτω πλευράς και το ύψος και πλάτος σύνδεσης των αυλακιών με το διάκενο. Οι μεταβλητές διαστάσεις της γεωμετρίας της αύλακος του δρομέα φαίνονται στο σχήμα 5.2.1.



Σχήμα 5.2.1: Μεταβλητές διαστάσεις αύλακος δρομέα

Κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, όσο περισσότερες μεταβλητές χρησιμοποιούνται τόσο μεγαλύτερος χρόνος απαιτείται για την εύρεση βελτίστου. Λόγω του περιορισμένου χρόνου

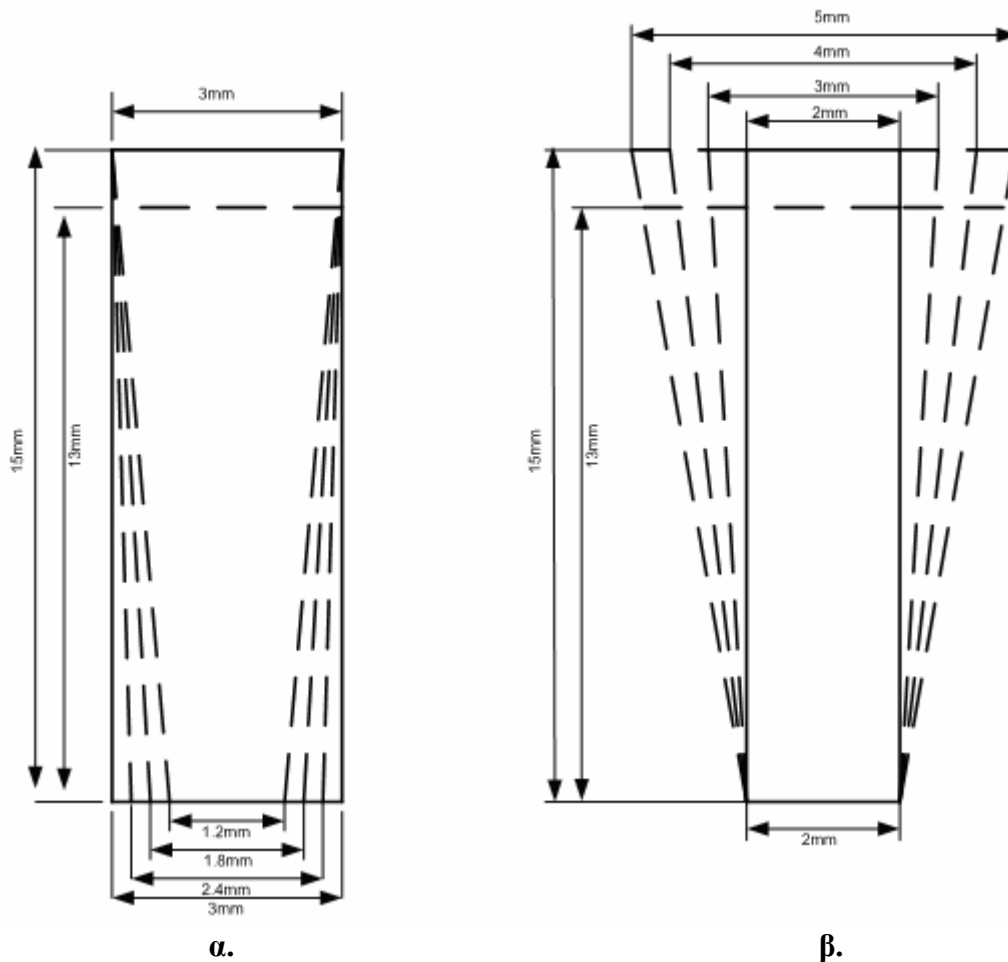
εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας αποφασίστηκε ο περιορισμός των μεταβλητών. Για το λόγο αυτό, προσομοιώθηκαν γεωμετρίες με 28 και 32 αύλακες στο δρομέα, για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση με τη μηχανή του εργαστηρίου όπως προέκυψε από το κεφάλαιο 3.

Επιπλέον το ύψος των αυλάκων, αφού μελετήθηκε η επίδραση του στη συμπεριφορά της μηχανής στο κεφάλαιο 4, διατηρήθηκε σταθερό στο ύψος της βέλτιστης γεωμετρίας που προέκυψε από το κεφάλαιο 4,  $h_{r2}=15\text{mm}$ , και πραγματοποιήθηκε μελέτη για ακόμη ένα, μικρότερο ύψος,  $h_{r2}=13.5\text{mm}$ , που αποτελεί το 90% του βέλτιστου ύψους.

Έτσι με τη μείωση των μεταβλητών αυτών πραγματοποιήθηκε μελέτη της συμπεριφοράς της μηχανής στις αυξομειώσεις του πλάτους της πάνω και κάτω πλευράς των αυλάκων του δρομέα, που αποτελούν τις νεοεισαχθείσες παραμέτρους στη σχεδίαση.

Σε ένα πρώτο στάδιο δοκιμών, διατηρήθηκε το πλάτος της πάνω πλευράς των αυλάκων του δρομέα σταθερό στο  $S_{rup}=3\text{mm}$ , το οποίο είναι και το πλάτος της πάνω πλευράς της μηχανής του εργαστηρίου, και μεταβαλλόταν το πλάτος της κάτω πλευράς για να διαπιστωθεί η επίδραση του στην απόδοση και στην επίδοση της μηχανής. Το πλάτος της κάτω πλευράς μεταβλήθηκε ως ποσοστό του πλάτους της πάνω πλευράς της αύλακος από  $k=0.4$  μέχρι  $k=1$  με βήμα 0.2.

Στο δεύτερο στάδιο διατηρήθηκε το πλάτος της κάτω πλευράς των αυλάκων σταθερό στο  $S_{rdown}=2\text{mm}$  και μεταβλήθηκε το πλάτος της πάνω πλευράς από  $S_{rup}=2\text{mm}$  μέχρι  $S_{rup}=5\text{mm}$  με βήμα 1mm. Το σχήμα 5.3.3 δείχνει τις μεταβολές που έγιναν κατά τις προσομοιώσεις στη γεωμετρία των αυλάκων.



α.

β.

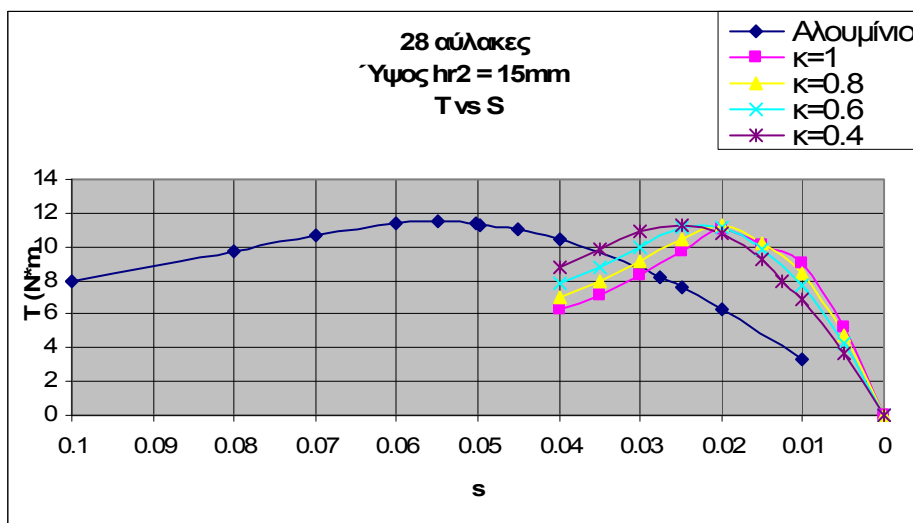
Σχήμα 5.2.3: Μεταβολές στη γεωμετρία των αυλάκων  
 α. Σταθερό πλάτος επάνω πλευράς 3mm  
 β. Σταθερό πλάτος κάτω πλευράς 2mm

**5.3 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων**

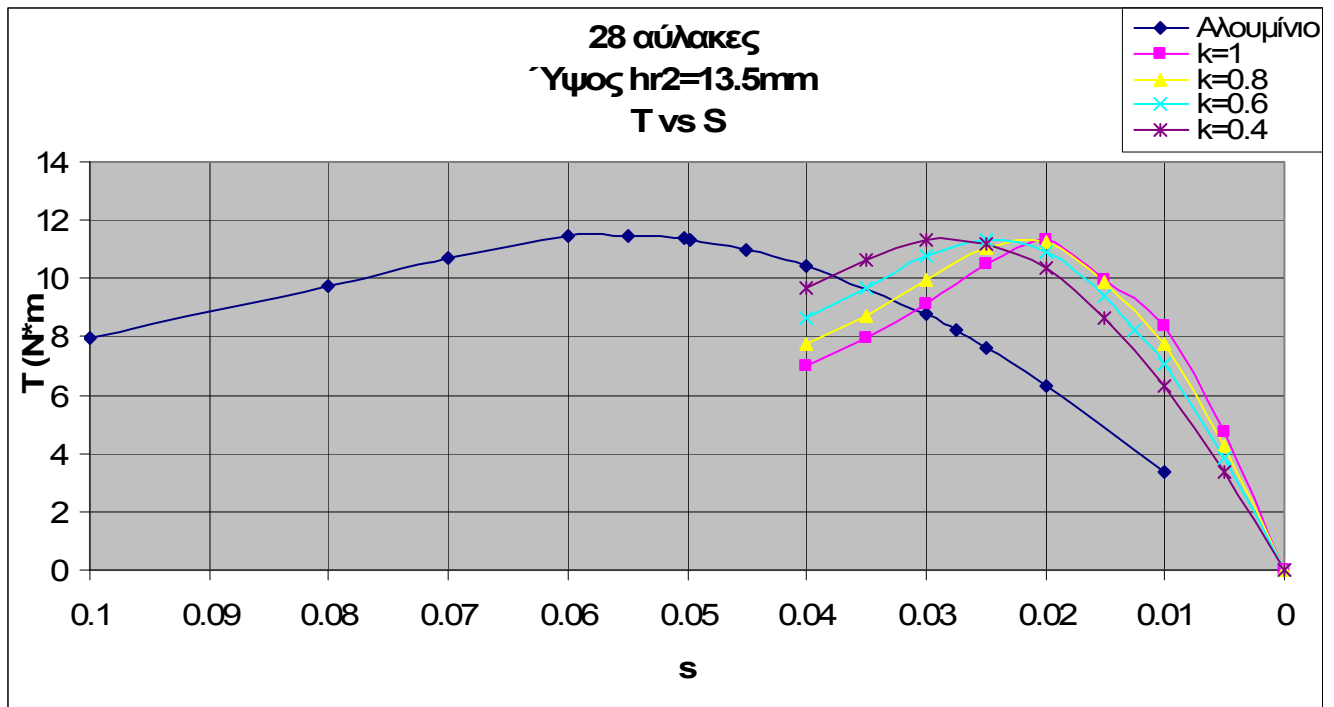
Στους πίνακες 5.3.1 και 5.3.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ροπής – ολίσθησης των γεωμετριών με σταθερό το πλάτος της επάνω πλευράς της αύλακος του δρομέα για 28 και 32 αύλακες αντίστοιχα. Στα σχήματα 5.3.1 μέχρι 5.3.4 φαίνονται οι καμπύλες ροπής - ολίσθησης συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες καμπύλες της προσομοιωμένης μηχανής του εργαστηρίου.

ΣΤΑΘΕΡΗ ΠΑΝΩ ΠΛΕΥΡΑ $S_{rup} = 3mm$											
28 ΑΥΛΑΚΕΣ											
ΥΨΟΣ $h_{r2} = 15mm$											
k=1			k=0.8			k=0.6			k=0.4		
S	T1	T2	s	T1	T2	S	T1	T2	s	T1	T2
0.005	5.175	5.124	0.005	4.709	4.661	0.005	4.227	4.186	0.005	3.737	3.697
0.010	8.996	8.915	0.010	8.376	8.300	0.010	7.678	7.611	0.010	6.910	6.847
0.015	10.064	10.007	0.015	10.224	10.163	0.015	9.894	9.835	0.0125	7.930	7.880
0.020	11.042	10.948	0.020	11.282	11.184	0.020	11.196	11.101	0.015	9.243	9.184
0.025	9.740	9.669	0.025	10.480	10.406	0.025	11.103	11.030	0.020	10.797	10.702
0.030	8.324	8.261	0.030	9.124	9.055	0.030	10.018	9.948	0.025	11.317	11.241
0.035	7.175	7.119	0.035	7.924	7.862	0.035	8.828	8.763	0.030	10.875	10.799
0.040	6.296	6.246	0.040	6.977	6.920	0.040	7.810	7.747	0.035	9.858	9.786
									0.040	8.830	8.756
ΥΨΟΣ $h_{r2} = 13.5mm$											
k=1			k=0.8			k=0.6			k=0.4		
S	T1	T2	s	T1	T2	s	T1	T2	s	T1	T2
0.005	4.708	4.664	0.005	4.276	4.232	0.005	3.835	3.794	0.005	3.386	3.347
0.010	8.385	8.311	0.010	7.758	7.687	0.010	7.074	7.009	0.010	6.336	6.275
0.015	9.973	9.918	0.015	9.875	9.816	0.0125	8.229	8.177	0.015	8.664	8.608
0.020	11.305	11.210	0.020	11.241	11.143	0.015	9.397	9.338	0.020	10.335	10.242
0.025	10.496	10.424	0.025	11.067	10.991	0.020	10.923	10.826	0.025	11.216	11.141
0.030	9.154	9.087	0.030	9.943	9.871	0.025	11.340	11.263	0.030	11.306	11.229
0.035	7.945	7.885	0.035	8.742	8.675	0.030	10.742	10.666	0.035	10.629	10.553
0.040	6.988	6.933	0.040	7.732	7.668	0.035	9.666	9.594	0.040	9.663	9.580
						0.040	8.623	8.551			

Πίνακας 5.3.1: Αποτελέσματα ροπής – ολίσθησης γεωμετριών με σταθερή την πάνω πλευρά των αυλάκων, για 28 αύλακες δρομέα



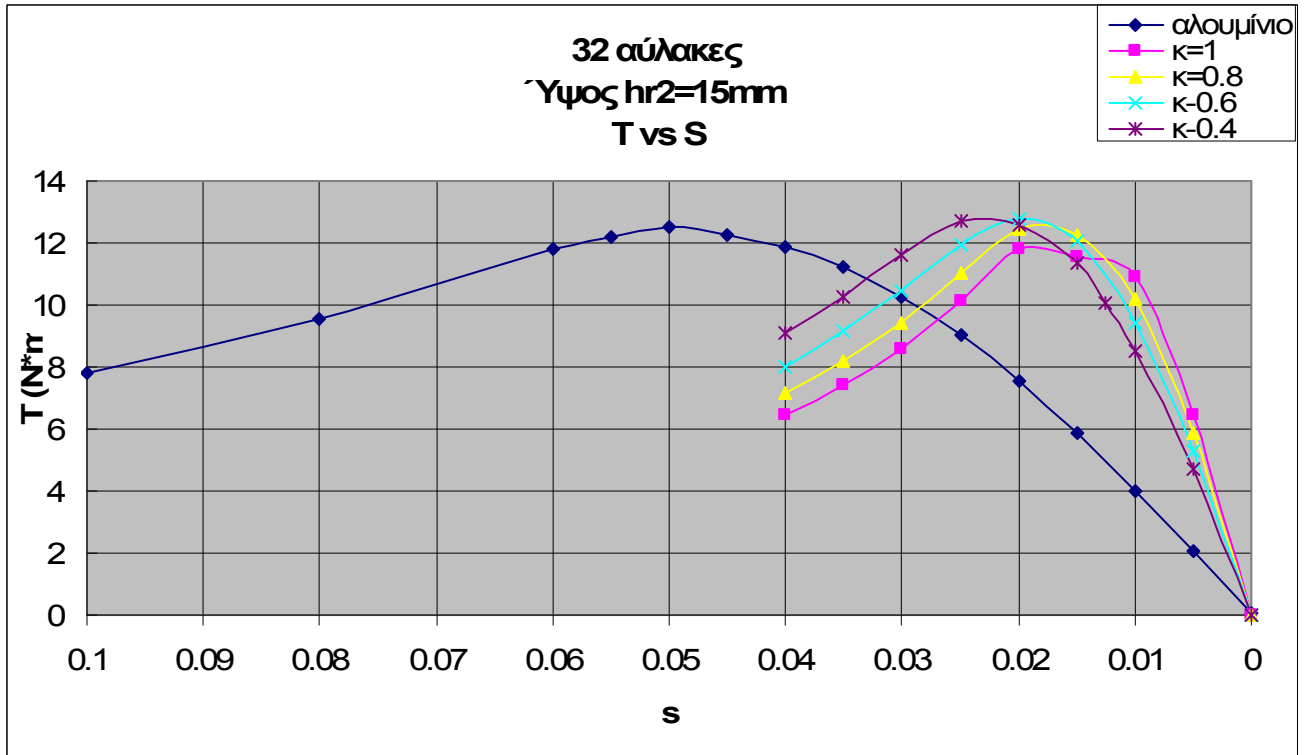
Σχήμα 5.3.1: Καμπύλες ροπής – ολίσθησης γεωμετριων με πλάτος επάνω πλευράς  $S_{rup}=3mm$ , ύψος  $h_{r2}=15mm$  και 28 αύλακες δρομέα



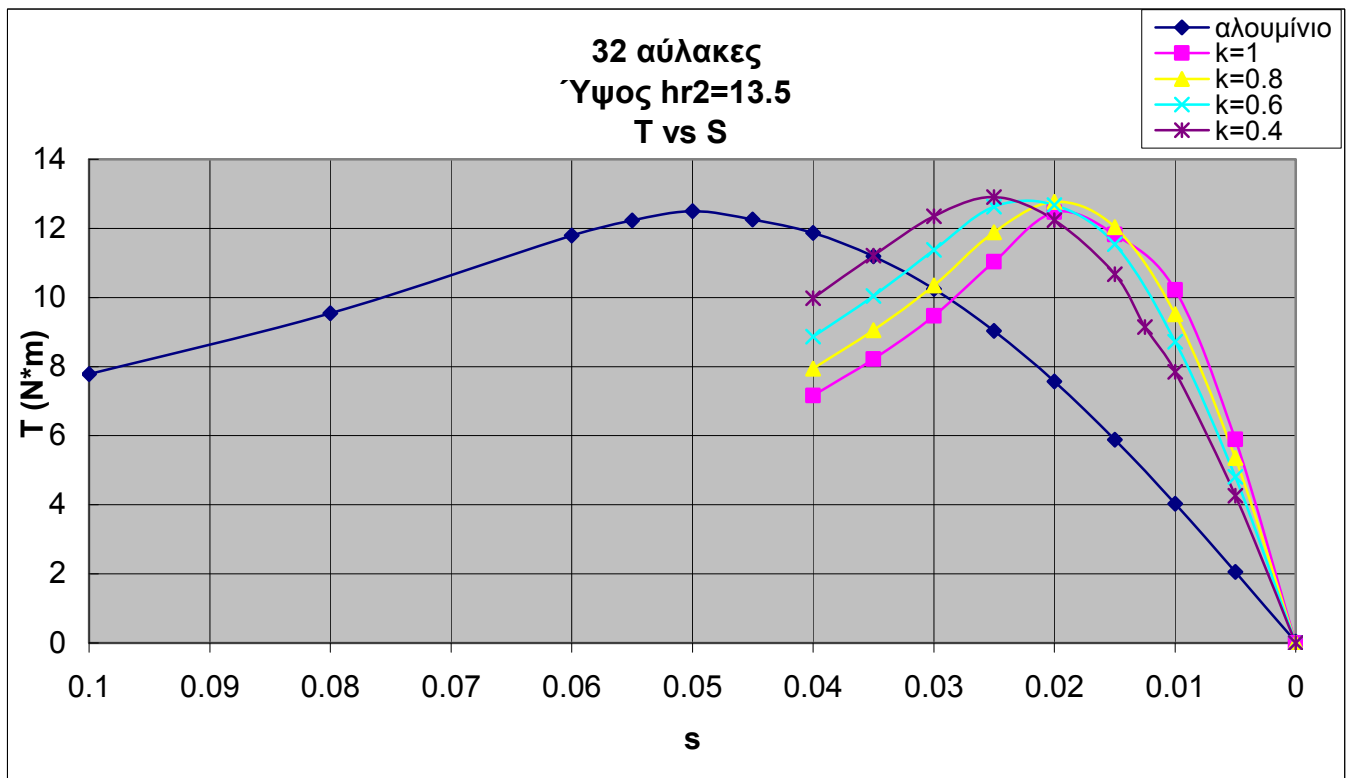
Σχήμα 5.3.2: Καμπύλες ροπής – ολίσθησης γεωμετριών με πλάτος επάνω πλευράς  $S_{rup}=3mm$ , ύψος  $h_{r2}=13.5mm$  και 28 αύλακες δρομέα

ΣΤΑΘΕΡΗ ΠΑΝΩ ΠΛΕΥΡΑ $S_{rup} = 3mm$											
32 ΑΥΛΑΚΕΣ											
ΥΨΟΣ $h_{r2} = 15mm$											
k=1			k=0.8			K=0.6			k=0.4		
S	T1	T2	s	T1	T2	S	T1	T2	s	T1	T2
0.005	6.456243	6.235387	0.005	5.886743	5.686215	0.005	5.296719	5.112126	0.005	4.691597	4.526714
0.010	10.88753	10.52363	0.010	10.2091	9.869519	0.010	9.420845	9.104785	0.010	8.530794	8.24427
0.015	11.56422	11.24261	0.015	12.27188	11.93563	0.015	12.08473	11.74625	0.0125	10.07066	9.784962
0.020	11.79898	11.39855	0.020	12.44526	12.02624	0.020	12.75305	12.32439	0.015	11.34789	11.02379
0.025	10.11353	9.79277	0.025	11.00556	10.66176	0.025	11.95385	11.58688	0.020	12.59514	12.17322
0.030	8.601185	8.318535	0.030	9.433302	9.128004	0.030	10.44217	10.1093	0.025	12.71915	12.3373
0.035	7.42057	7.172277	0.035	8.191321	7.921112	0.035	9.135202	8.837302	0.030	11.58658	11.22678
0.040	6.432914	6.20769	0.040	7.150814	6.901222	0.040	8.021402	7.742028	0.035	10.27402	9.945516
									0.040	9.083852	8.769321
ΥΨΟΣ $h_{r2} = 13.5mm$											
k=1			k=0.8			K=0.6			k=0.4		
s	T1	T2	s	T1	T2	S	T1	T2	s	T1	T2
0.005	5.889389	5.688916	0.005	5.359126	5.172477	0.005	4.81294	4.643469	0.005	4.258675	4.108744
0.010	10.21834	9.878664	0.010	9.514335	9.195182	0.010	8.723219	8.429695	0.010	7.852308	7.588631
0.015	11.82406	11.50225	0.015	12.04017	11.70924	0.015	11.54739	11.22137	0.0125	9.144486	8.8829
0.020	12.46825	12.04857	0.020	12.76986	12.34043	0.020	12.67726	12.25165	0.015	10.67298	10.36688
0.025	11.03685	10.69511	0.025	11.88646	11.52223	0.025	12.62964	12.2492	0.020	12.23609	11.82719
0.030	9.465174	9.159583	0.030	10.34921	10.01884	0.030	11.38094	11.02572	0.025	12.90291	12.52041
0.035	8.218047	7.946988	0.035	9.049581	8.754122	0.035	10.04225	9.719593	0.030	12.35345	11.9775
0.040	7.161959	6.911898	0.040	7.938807	7.662098	0.040	8.871598	8.563828	0.035	11.21542	10.86414
									0.040	9.976226	9.632151

Πίνακας 5.3.2: Αποτελέσματα ροπής – ολίσθησης γεωμετριών με σταθερή την πάνω πλευρά των αυλάκων, για 32 αύλακες δρομέα



Σχήμα 5.3.4: Καμπύλες ροπής – ολίσθησης γεωμετρίας με πλάτος επάνω πλευράς  $S_{rup}=3\text{mm}$ , ύψος  $h_{r2}=15\text{mm}$  και 32 αύλακες δρομέα



Σχήμα 5.3.5: Καμπύλες ροπής – ολίσθησης γεωμετριών με πλάτος επάνω πλευράς  $S_{rup}=3\text{mm}$ , ύψος  $h_{r2}=13.5\text{mm}$  και 32 αύλακες δρομέα

Όπως φαίνεται από τις καμπύλες ροπής – ολίσθησης όλες οι γεωμετρίες ικανοποιούν την απαίτηση βελτίωσης της απόδοσης μέσω της μείωσης ολίσθησεως μετά την αντικατάσταση του υλικού των αυλάκων του δρομέα. Παρατηρείται όμως ότι στις περισσότερες γεωμετρίες η μέγιστη ροπή είναι μικρότερη της μέγιστης ροπής της μηχανής με αύλακες αλουμινίου, ιδιαίτερα στις γεωμετρίες με 28 αύλακες δρομέα. Γεγονός που παρατηρήθηκε και στο κεφάλαιο 4, στη σχεδίαση με τις προϋποθέσεις της κλασικής σχεδίασης. Με κριτήριο την μέγιστη και την ονομαστική ροπή που παρουσιάζουν, καθώς και την ολίσθηση για τη ροπή αυτή, επιλέγονται οι τρεις καλύτερες γεωμετρίες για περαιτέρω μελέτη. Δηλαδή για διερεύνηση των απωλειών χαλκού, των απωλειών πυρήνα καθώς επίσης και του πεδίου.

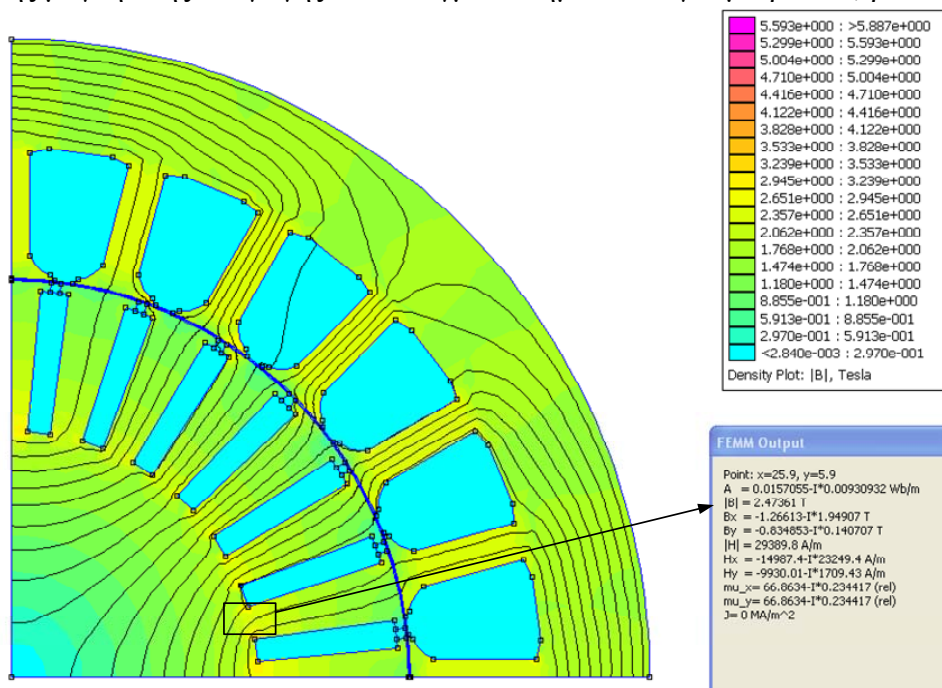
Στην μέθοδο σχεδίασης που δεν επιβάλλει σταθερό πλάτος οδοντώσεων δρομέα η μελέτη του πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής στο δρομέα είναι εξέχουσας σημασίας γιατί η σχεδίαση δεν εγγυάται σταθερό μέτρο μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος του δοντιού του δρομέα. Έτσι υπάρχει πιθανότητα εμφάνισης σημείων με αυξημένη μαγνητική επαγωγή η οποία δεν εκτείνεται κατά μήκος του δοντιού. Στον πίνακα 5.3.3 παρουσιάζονται οι απώλειες χαλκού δρομέα και οι απώλειες πυρήνα για τις γεωμετρίες με σταθερό πλάτος επάνω πλευράς της αύλακος με:

- α. 28 αύλακες δρομέα, ύψος  $h_{r2}=15\text{mm}$ , και  $k=0.8$
- β. 28 αύλακες δρομέα, ύψος  $h_{r2}=13.5\text{mm}$ , και  $k=0.4$
- γ. 32 αύλακες δρομέα, ύψος  $h_{r2}=15\text{mm}$ , και  $k=0.6$

	Απώλειες πυρήνα (W)	Απώλειες χαλκού δρομέα (W)
Γεωμετρία α	74.763	13.37
Γεωμετρία β	61.66	20.95
Γεωμετρία γ	72.05	13.55

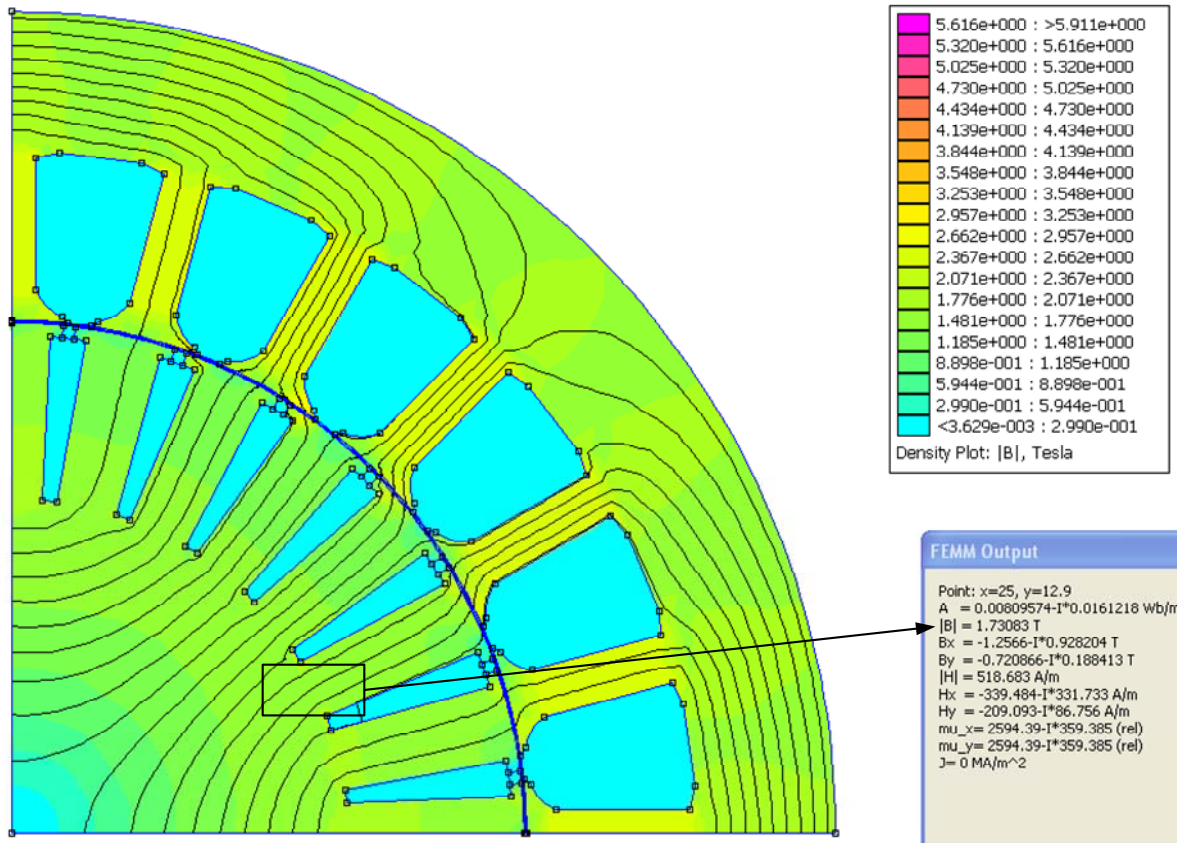
Πίνακας 5.3.3: Απώλειες χαλκού δρομέα και απώλειες πυρήνα των γεωμετριών α, β και γ.

Οι απώλειες χαλκού δρομέα συγκρινόμενες με τις απώλειες τυλίγματος δρομέα της μηχανής του εργαστηρίου έχουν μειωθεί όπως ήταν αναμενόμενο. Οι απώλειες πυρήνα όμως στις γεωμετρίες α και γ έχουν μια αύξηση της τάξεως του 20% πράγμα που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν σημεία με πολύ υψηλή μαγνητική επαγωγή. Στα σχήματα 5.3.3, 5.3.4 και 5.3.5 φαίνεται το πεδίο και το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής σε επιλεγμένα σημεία των γεωμετριών α, β και γ αντίστοιχα.

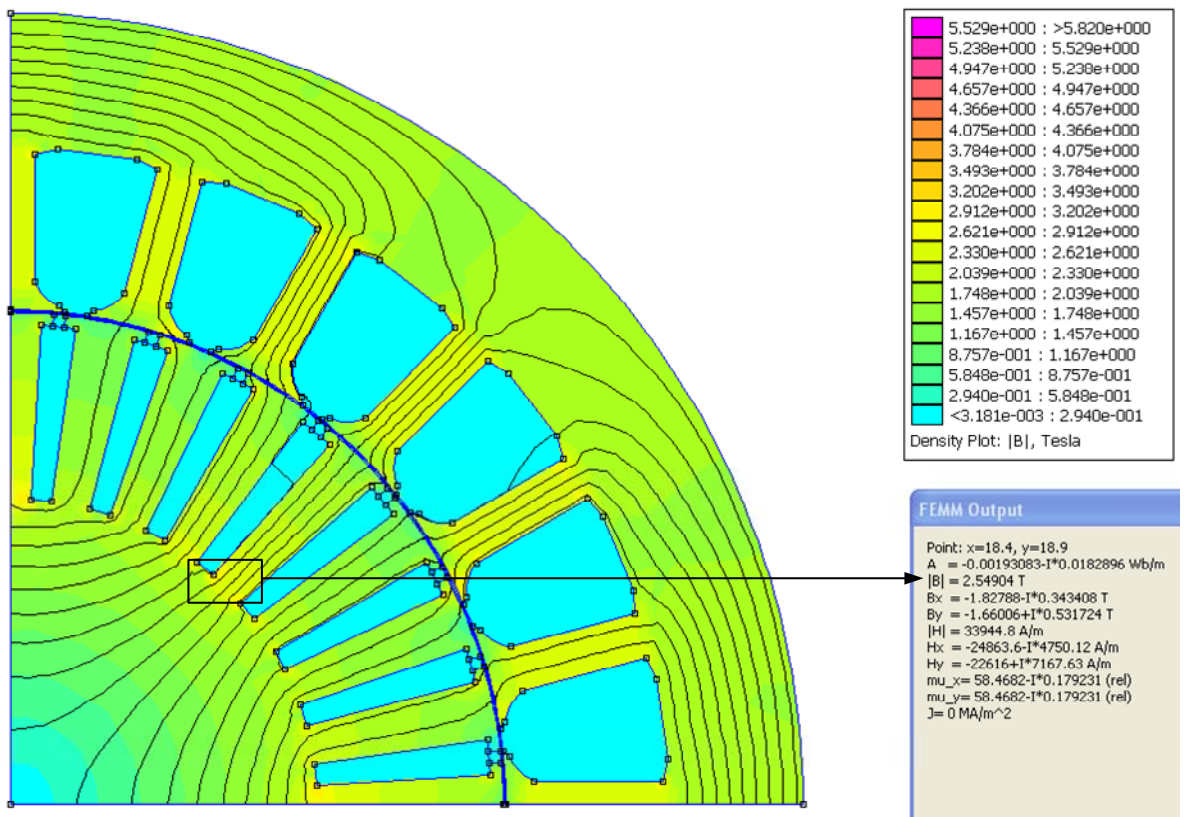


Σχήμα 5.3.3: Μαγνητικό πεδίο γεωμετρίας α





Σχήμα 5.3.4: Μαγνητικό Πεδίο γεωμετρίας β



Σχήμα 5.3.5: Μαγνητικό πεδίο γεωμετρίας γ

Από τα σχήματα 5.3.3 και 5.3.5 φαίνεται ότι η τιμή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής είναι απαγορευτική βάση των περιορισμών της προκαταρκτικής σχεδίασης ( $\max |B| = 1.9T$ ). Η τιμή

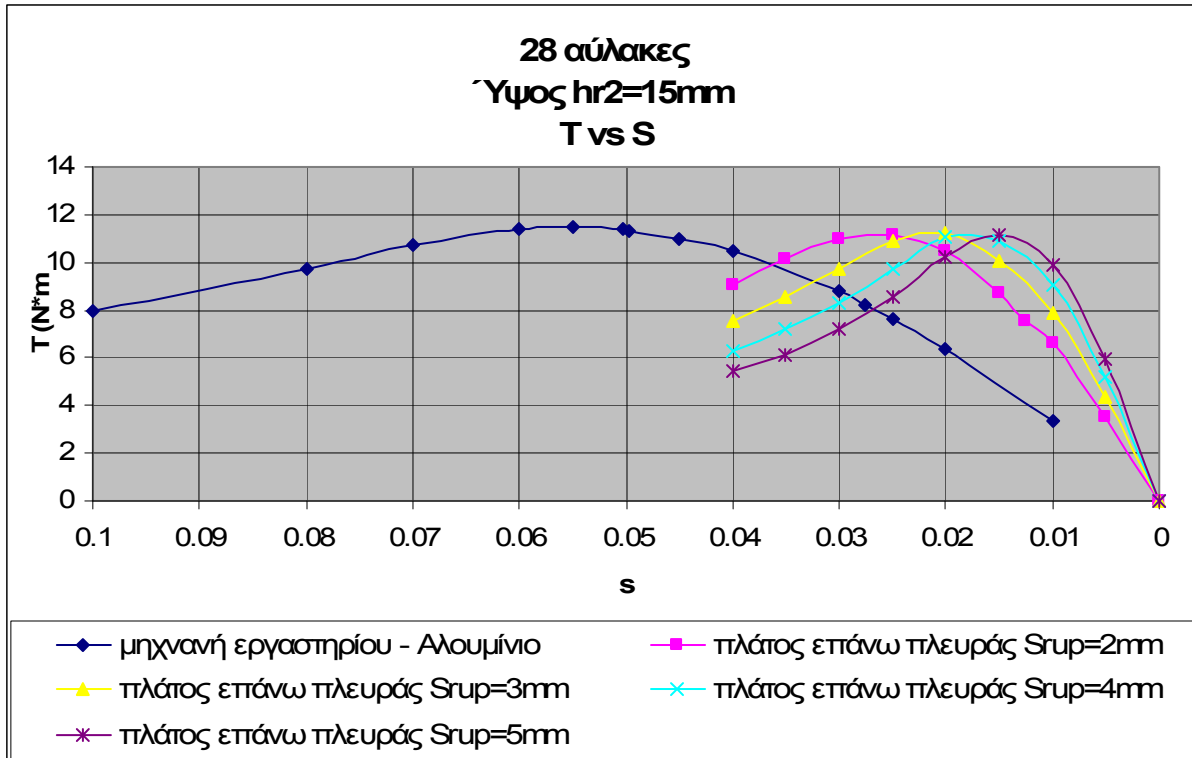
αυτή εμφανίζεται στο κάτω άκρο του δοντιού του δρομέα όπου ο σίδηρος του πυρήνα έχει περιοριστεί από την αύλακα, και οι μαγνητικές γραμμές αναγκάζονται να πυκνώσουν. Η τιμή αυτή είναι τοπική και δεν εκτείνεται κατά μήκος του δοντιού πράγμα που η κλασική σχεδίαση δεν προβλέπει. Έτσι σε κάποιες περιπτώσεις η τιμή αυτή μπορεί να επιτραπεί. Το σχήμα 5.3.4 δείχνει ότι το πεδίο στον δρομέα διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα, δίνοντας όμως την απαιτούμενη επίδοση στη μηχανή, γεγονός που επιτρέπει την περαιτέρω μελέτη του νέου τρόπου σχεδίασης.

Στους πίνακες 5.3.4 και 5.3.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ροπής – ολίσθησης των γεωμετριών με σταθερό το πλάτος της κάτω πλευράς της αύλακος του δρομέα για 28 και 32 αύλακες αντίστοιχα. Στα σχήματα 5.3.6 μέχρι 5.3.9 φαίνονται οι καμπύλες ροπής - ολίσθησης συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες καμπύλες της προσομοιωμένης μηχανής του εργαστηρίου.

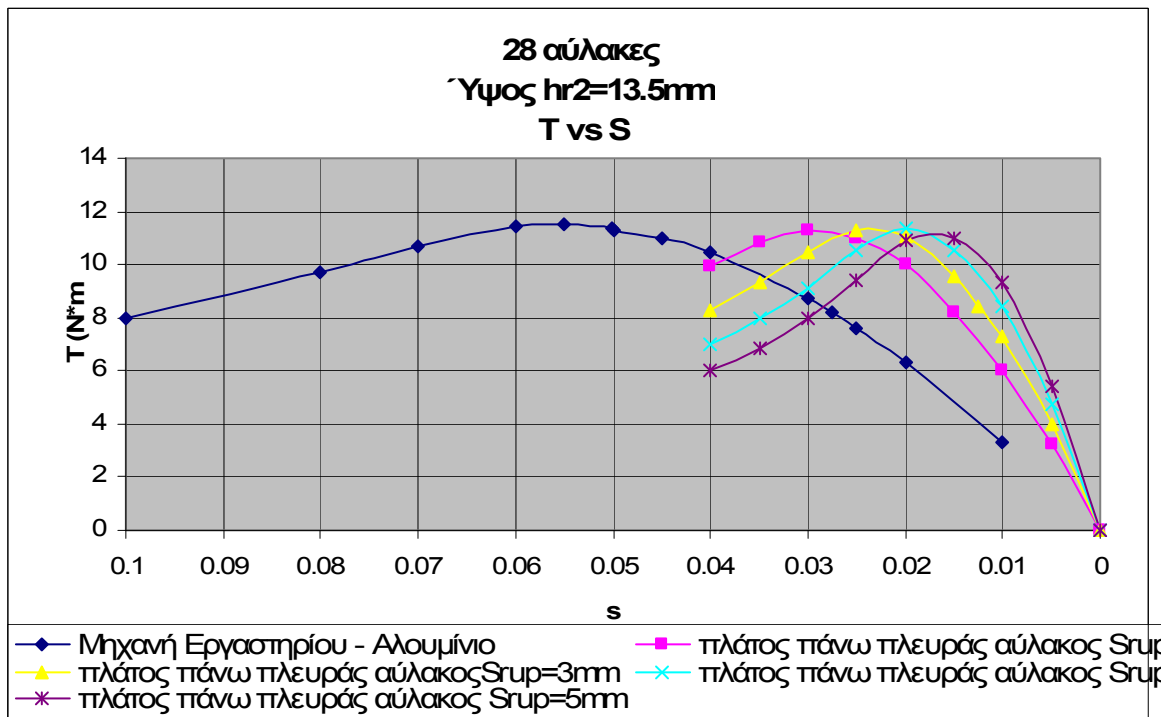
ΣΤΑΘΕΡΗ ΚΑΤΩ ΠΛΕΥΡΑ $S_{rdown} = 2mm$											
28 ΑΥΛΑΚΕΣ											
ΥΨΟΣ $h_{r2} = 15mm$											
Πλάτος επάνω πλευράς $S_{rup}=2mm$			Πλάτος επάνω πλευράς $S_{rup}=3mm$			Πλάτος επάνω πλευράς $S_{rup}=4mm$			Πλάτος επάνω πλευράς $S_{rup}=5mm$		
S	T1	T2	s	T1	T2	S	T1	T2	S	T1	T2
0.005	3.559956	3.528588	0.005	4.386852	4.34432	0.005	5.177967	5.128846	0.005	5.931391	5.874803
0.01	6.605266	6.557163	0.01	7.916411	7.846926	0.01	9.019888	8.941016	0.01	9.916705	9.828982
0.0125	7.53	7.4912	0.015	10.0397	9.980718	0.015	10.85817	10.81212	0.015	11.12922	11.09593
0.015	8.709446	8.664185	0.02	11.25545	11.16066	0.02	11.10188	11.0091	0.02	10.23728	10.15129
0.02	10.48712	10.41559	0.025	10.92262	10.84938	0.025	9.730571	9.675953	0.025	8.537461	8.496682
0.025	11.16581	11.10385	0.03	9.716711	9.647207	0.03	8.306482	8.255855	0.03	7.181726	7.144152
0.03	11.01505	10.95193	0.035	8.511192	8.4477	0.035	7.170492	7.124898	0.035	6.158278	6.124599
0.035	10.13887	10.08001	0.04	7.514923	7.454569	0.04	6.323976	6.275045	0.04	5.42946	5.388668
0.04	9.094283	9.036187									
ΥΨΟΣ $h_{r2} = 13.5mm$											
Πλάτος επάνω πλευράς $S_{rup}=2mm$			Πλάτος επάνω πλευράς $S_{rup}=3mm$			Πλάτος επάνω πλευράς $S_{rup}=4mm$			Πλάτος επάνω πλευράς $S_{rup}=5mm$		
S	T1	T2	s	T1	T2	s	T1	T2	S	T1	T2
0.005	3.227702	3.20039	0.005	3.981722	3.941848	0.005	4.710934	4.66549	0.005	5.413043	5.359608
0.01	6.0569	6.014304	0.01	7.307092	7.242223	0.01	8.401505	8.327827	0.01	9.327752	9.244112
0.015	8.21608	8.173684	0.0125	8.4032	8.352	0.015	10.52379	10.48034	0.015	10.98605	10.95514
0.02	10.00818	9.941898	0.015	9.592889	9.535324	0.02	11.3542	11.25924	0.02	10.91621	10.82343
0.025	10.98768	10.9291	0.02	11.05632	10.962	0.025	10.5008	10.44512	0.025	9.371669	9.329782
0.03	11.27227	11.21109	0.025	11.29975	11.22564	0.03	9.14167	9.088668	0.03	7.960397	7.920104
0.035	10.82576	10.76543	0.03	10.48715	10.41433	0.035	7.949209	7.900038	0.035	6.853472	6.816812
0.04	9.909991	9.848181	0.035	9.350469	9.282157	0.04	7.018252	6.962804	0.04	6.043239	5.996205
			0.04	8.311288	8.243454						

Πίνακας 5.3.4: Αποτελέσματα ροπής – ολίσθησης γεωμετριών με σταθερή την κάτω πλευρά των αυλάκων, για 28 αύλακες δρομέα





Σχήμα 5.3.6: Καμπύλες ροπής – ολίσθησης γεωμετριών με πλάτος κάτω πλευράς  $S_{rdown}=2\text{mm}$ , ύψος  $h_{r2}=15\text{mm}$  και 28 αύλακες δρομέα



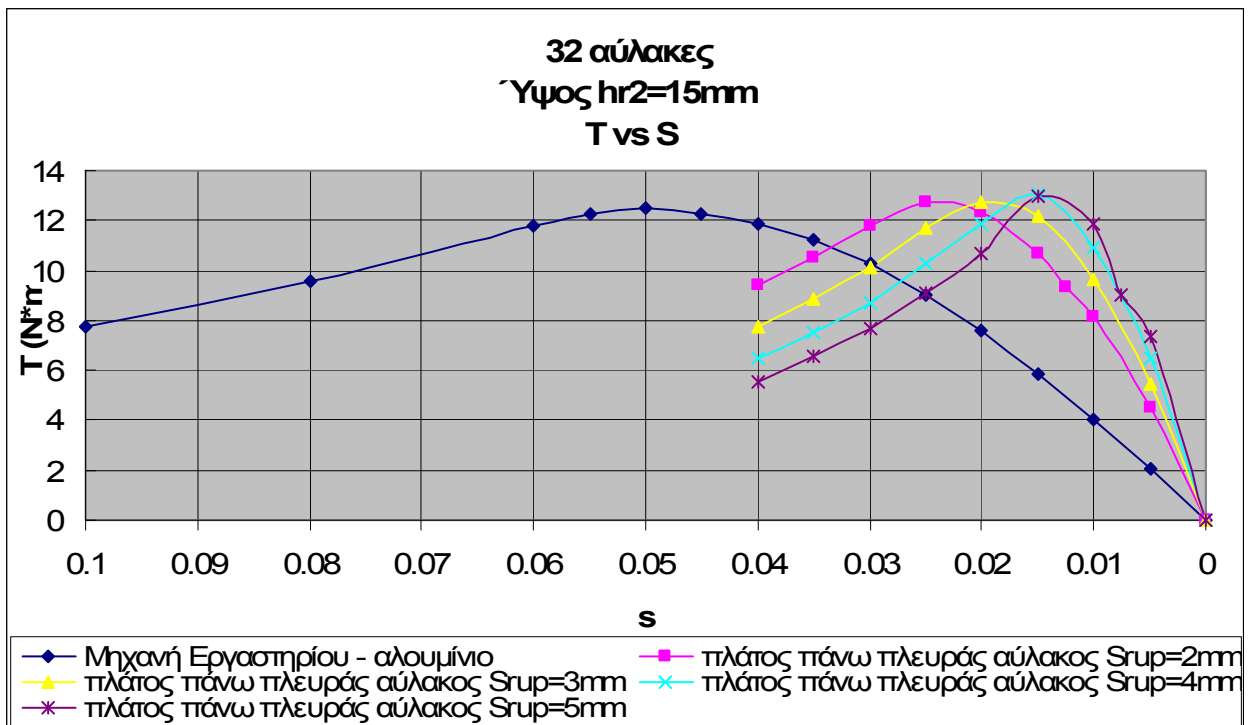
Σχήμα 5.3.7: Καμπύλες ροπής – ολίσθησης γεωμετριών με πλάτος κάτω πλευράς  $S_{rdown}=2\text{mm}$ , ύψος  $h_{r2}=13.5\text{mm}$  και 28 αύλακες

ΣΤΑΘΕΡΗ ΚΑΤΩ ΠΛΕΥΡΑ $S_{rdown} = 2mm$											
32 ΑΥΛΑΚΕΣ											
ΥΨΟΣ $h_{r2} = 15mm$											
Πλάτος επάνω πλευράς $S_{rup}=2mm$			Πλάτος επάνω πλευράς $S_{rup}=3mm$			Πλάτος επάνω πλευράς $S_{rup}=4mm$			Πλάτος επάνω πλευράς $S_{rup}=5mm$		
S	T1	T2	s	T1	T2	S	T1	T2	s	T1	T2
0.005	4.479269	4.32322	0.005	5.476457	5.286261	0.005	6.460347	6.239679	0.005	7.373108	7.119689
0.01	8.180841	7.909897	0.01	9.669611	9.345478	0.01	10.91616	10.55219	0.0075	9.0428	8.8564
0.0125	9.3488	9.0784	0.015	12.21999	11.88037	0.015	13.0623	12.73718	0.01	11.84186	11.44719
0.015	10.70939	10.3993	0.02	12.71818	12.29032	0.02	11.85897	11.45747	0.015	12.99995	12.70883
0.02	12.3434	11.93726	0.025	11.67765	11.317	0.025	10.25147	9.955467	0.02	10.63978	10.27577
0.025	12.72291	12.33386	0.03	10.12175	9.797221	0.03	8.727088	8.467291	0.025	9.103766	8.864503
0.03	11.7948	11.42033	0.035	8.840392	8.551024	0.035	7.523677	7.294857	0.03	7.65723	7.45002
0.035	10.54669	10.20284	0.04	7.741527	7.471556	0.04	6.460187	6.234358	0.035	6.567621	6.386594
0.04	9.379475	9.06136							0.04	5.518496	5.323373

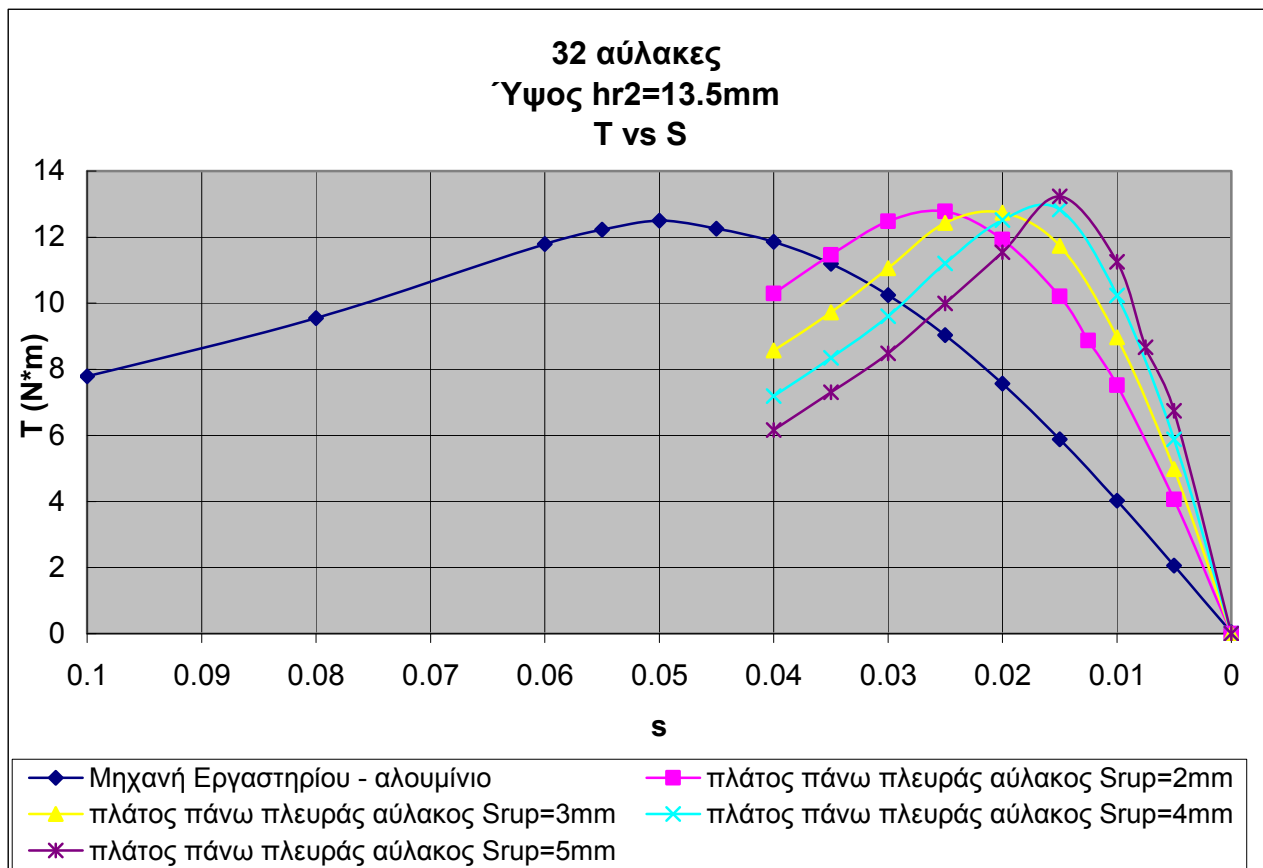
  

ΥΨΟΣ $h_{r2} = 13.5mm$											
Πλάτος επάνω πλευράς $S_{rup}=2mm$			Πλάτος επάνω πλευράς $S_{rup}=3mm$			Πλάτος επάνω πλευράς $S_{rup}=4mm$			Πλάτος επάνω πλευράς $S_{rup}=5mm$		
S	T1	T2	s	T1	T2	S	T1	T2	s	T1	T2
0.005	4.063633	3.920356	0.005	4.979058	4.80428	0.005	5.883375	5.68538	0.005	6.747807	6.511363
0.01	7.52127	7.270779	0.01	8.969689	8.66812	0.01	10.23378	9.895764	0.0075	8.67	8.4908
0.0125	8.8756	8.6148	0.015	11.73908	11.41032	0.015	12.84147	12.52638	0.01	11.24744	10.86996
0.015	10.20976	9.909643	0.02	12.7379	12.31	0.02	12.51969	12.09958	0.015	13.23157	12.94386
0.02	11.92667	11.53434	0.025	12.43039	12.0539	0.025	11.20064	10.8847	0.02	11.5391	11.14695
0.025	12.78128	12.39113	0.03	11.06352	10.71531	0.03	9.605001	9.323433	0.025	9.996986	9.73828
0.03	12.48159	12.09043	0.035	9.723605	9.409364	0.035	8.347471	8.096786	0.03	8.486455	8.259855
0.035	11.46113	11.09308	0.04	8.575177	8.277239	0.04	7.190355	6.938912	0.035	7.30743	7.107906
0.04	10.29524	9.947404							0.04	6.166677	5.948552

Πίνακας 5.3.5: Αποτελέσματα ροπής – ολίσθησης γεωμετριών με σταθερό πλάτος κάτω πλευράς αύλακος, για 32 αύλακες δρομέα



Σχήμα 5.3.8: Καμπύλες ροπής – ολίσθησης γεωμετριών με πλάτος κάτω πλευράς  $S_{rdown}=2mm$ , ύψος  $h_{r2}=15mm$  και 32 αύλακες δρομέα



Σχήμα 5.3.9: Καμπύλες ροπής – ολίσθησης γεωμετριών με πλάτος κάτω πλευράς  $S_{rdown}=2\text{mm}$ , ύψος  $h_{r2}=13.5\text{mm}$  και 32 αύλακες δρομέα

Όπως φαίνεται από τις καμπύλες ροπής – ολίσθησης όλες οι γεωμετρίες παρουσιάζουν μειωμένη ολίσθηση με την αλλαγή του υλικού αλλά κάποιες παρουσιάζουν μειωμένη ροπή σε σχέση με τη μηχανή του εργαστηρίου.. Με κριτήριο την μέγιστη και την ονομαστική ροπή σε σύγκριση με τη μηχανή του εργαστηρίου επιλέγονται οι τρεις καλύτερες γεωμετρίες για περαιτέρω μελέτη.

Στον πίνακα 5.3.6 παρουσιάζονται οι απώλειες χαλκού δρομέα και οι απώλειες πυρήνα για τις γεωμετρίες με σταθερή την κάτω πλευρά της αύλακος με:

δ. 28 αύλακες δρομέα, ύψος  $h_{r2}=13.5\text{mm}$ , και πλάτος πάνω πλευράς  $S_{rup}=4$

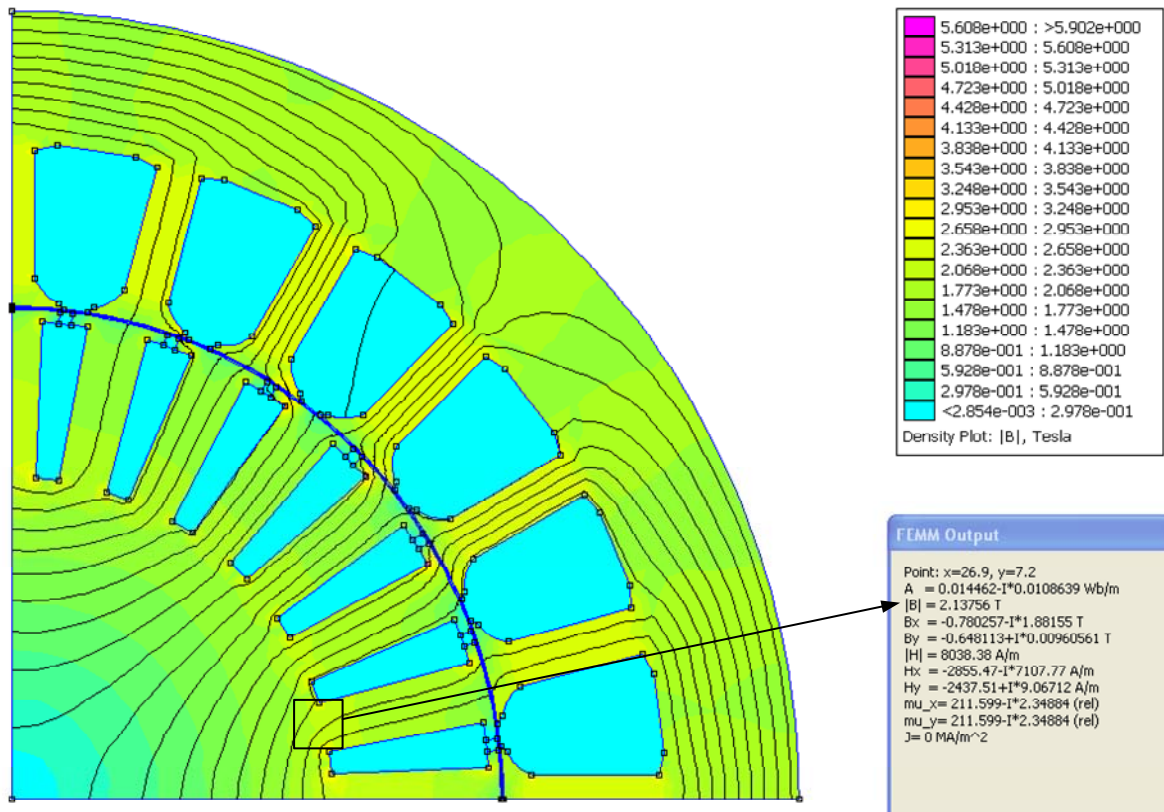
ε. 32 αύλακες δρομέα, ύψος  $h_{r2}=13.5\text{mm}$ , και πλάτος πάνω πλευράς  $S_{rup}=4$

στ. 32 αύλακες δρομέα, ύψος  $h_{r2}=15\text{mm}$ , και πλάτος πάνω πλευράς  $S_{rup}=2$

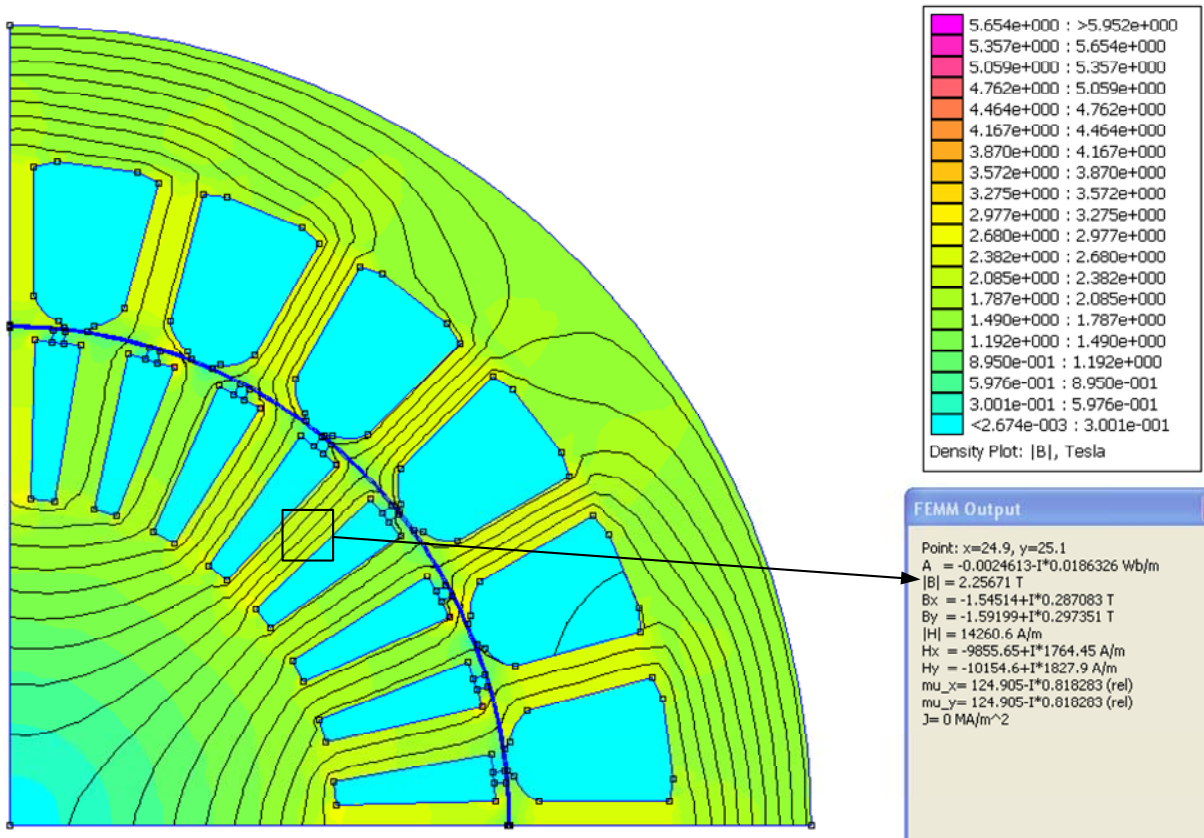
	Απώλειες πυρήνα (W)	Απώλειες χαλκού δρομέα (W)
Γεωμετρία δ	67.97	13.42
Γεωμετρία ε	67.32	13.55
Γεωμετρία στ	60.52	16.32

Πίνακας 5.3.6: Απώλειες χαλκού δρομέα και απώλειες πυρήνα των γεωμετριών δ, ε και στ

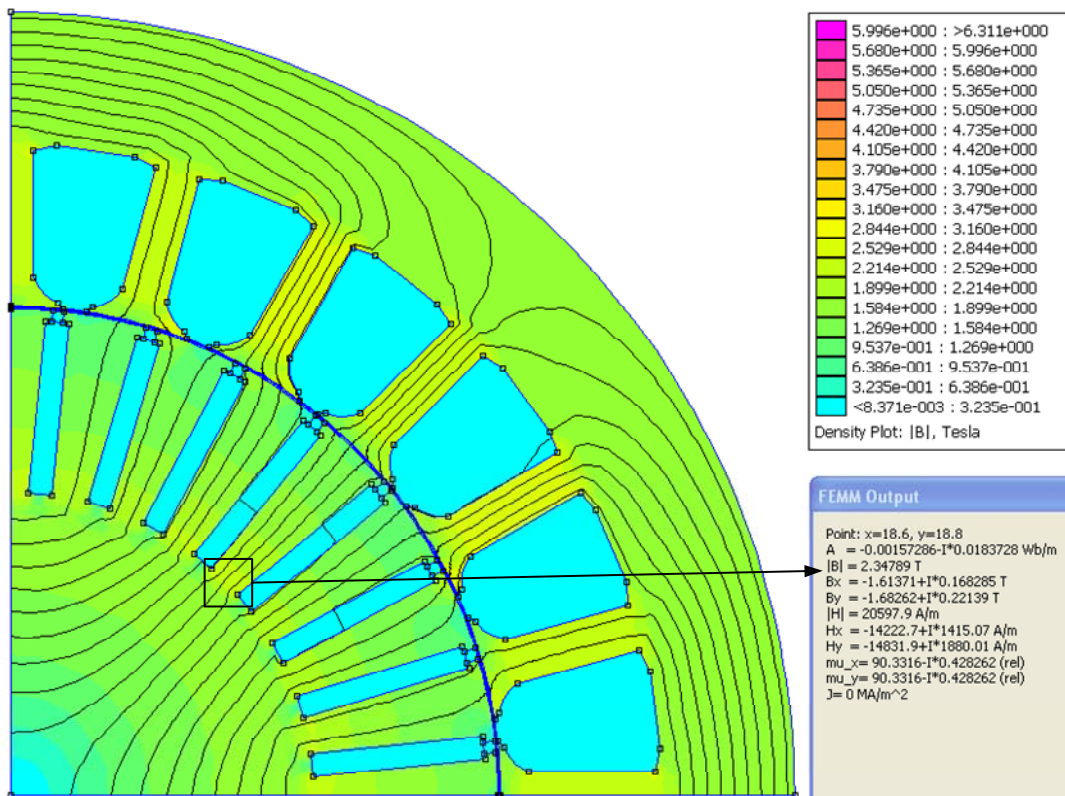
Οι απώλειες χαλκού δρομέα συγκρινόμενες με τις απώλειες τυλίγματος δρομέα της μηχανής του εργαστηρίου έχουν μειωθεί όπως ήταν αναμενόμενο. Οι απώλειες πυρήνα όμως στις γεωμετρίες δ και ε παρουσιάζουν αύξηση 11% πράγμα που δείχνει ότι μάλλον υπάρχουν σημεία με αυξημένη τιμή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής. Στα σχήματα 5.3.10, 5.3.11 και 5.3.12 φαίνεται το μαγνητικό πεδίο των γεωμετριών δ, ε και στ αντίστοιχα.



Σχήμα 5.3.10: Μαγνητικό πεδίο γεωμετρίας δ



Σχήμα 5.3.11: Μαγνητικό πεδίο γεωμετρίας ε



Σχήμα 5.3.12: Μαγνητικό πεδίο γεωμετρίας στ

Το σχήμα 5.3.11 παρουσιάζει αυξημένη τιμή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής  $\sigma'$  όλο το μήκος του δοντιού οπότεν απορρίπτεται ως γεωμετρία. Τα σχήματα όμως 5.3.10 και 5.3.12 δείχνουν ότι υπάρχουν μόνο τοπικά σημεία αυξημένης μαγνητικής επαγωγής οπότεν οι γεωμετρίες δ και στ μπορούν να γίνουν αποδεχτές αφού δίνουν περισσότερη ροπή σε μικρότερη ολίσθηση από τη μηχανή του εργαστηρίου.

### 5.4 Μηχανική Ισχύς Επιλεγθεισών Γεωμετριών

Στον πίνακα 5.4.1 παρουσιάζεται η μέγιστη και ονομαστική μηχανική ισχύς των γεωμετριών α, β, γ, δ και στ για να διαπιστωθεί κατά πόσο επετεύχθη η βελτιστοποίηση της μηχανής ως προς την απόδοση με τον νέο τρόπο που προτάθηκε στο κεφάλαιο αυτό.

	Ονομαστική Μηχανική Ισχύς (W)	% αύξηση στην ισχύ της μηχανής του εργαστηρίου	Μέγιστη Μηχανική Ισχύς (W)	% αύξηση στην ισχύ της μηχανής του εργαστηρίου
Γεωμετρία α	1302.5	3.7	1736.7	1.8
Γεωμετρία β	1340.5	6.7	1721.75	0.9
Γεωμετρία γ	1464.89	5.8	1963.17	5.2
Γεωμετρία δ	1306.37	3.9	1747.8	2.4
Γεωμετρία στ	1450.1	4.8	1948.5	4.4

Πίνακας 5.4.1: Ονομαστική και μέγιστη μηχανική ισχύς γεωμετριών α, β, γ, δ και στ

Από τον πίνακα 5.4.1 φαίνεται ότι σε όλες τις επιλεγθείσες γεωμετρίες η ονομαστική και μέγιστη μηχανική ισχύς της μηχανής έχει αυξηθεί σε σχέση με την ισχύ της μηχανής του εργαστηρίου.

### **5.5 Συμπεράσματα**

Μέσω των αποτελεσμάτων των παραγράφων 5.3 και 5.4 αποδεικνύεται ότι:

A. Ο νέος τρόπος σχεδίασης που δεν επιβάλλει σταθερό πλάτος οδοντώσεων δρομέα αναδεικνύει γεωμετρίες με:

- Μεγαλύτερη μηχανική ισχύ από την μηχανική ισχύ της μηχανής του εργαστηρίου.
- Μεγαλύτερη ονομαστική και μέγιστη ροπή από τη μηχανή του εργαστηρίου.
- Μικρότερες απώλειες τυλίγματος δρομέα
- Μεγαλύτερες όμως απώλειες πυρήνα

B. Η σχεδίαση χωρίς σταθερό πλάτος οδοντώσεων απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή κατά τη μελέτη της μαγνητικής επαγωγής στα δόντια του στάτη και μάλλον κρίνεται αναγκαία η θερμική ανάλυση της μηχανής.

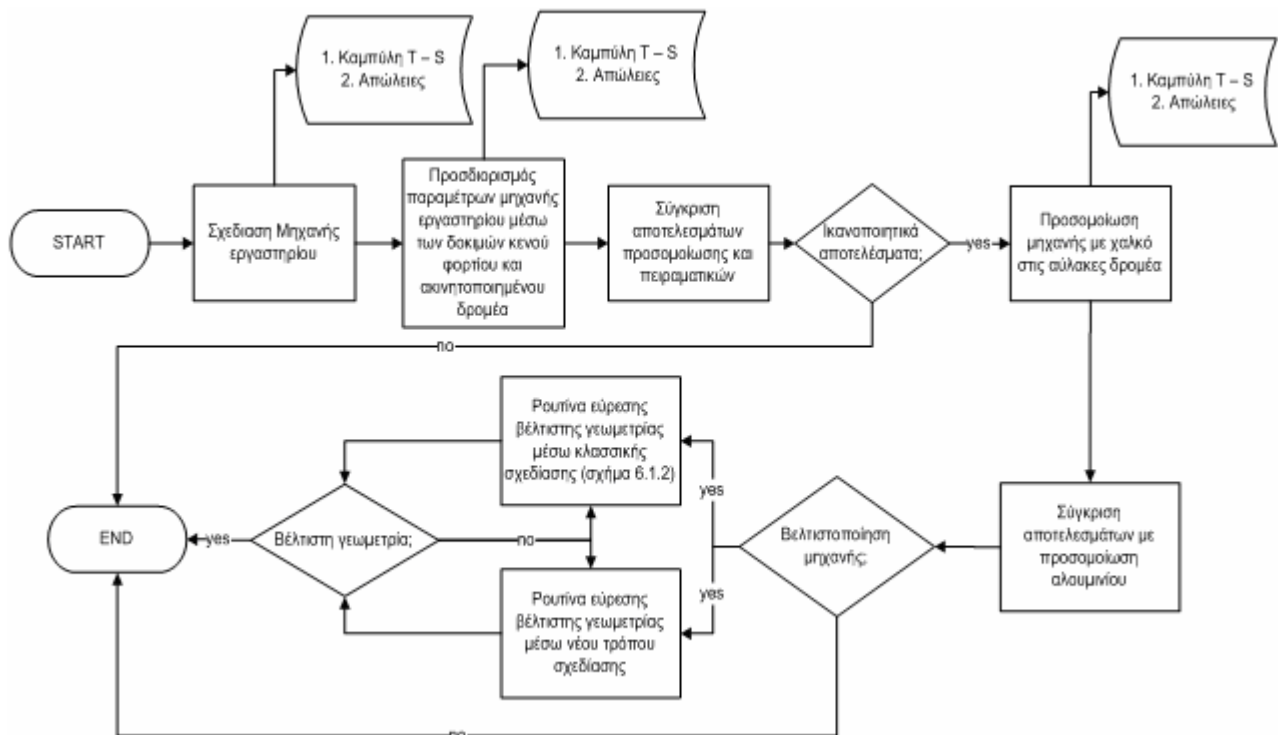


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

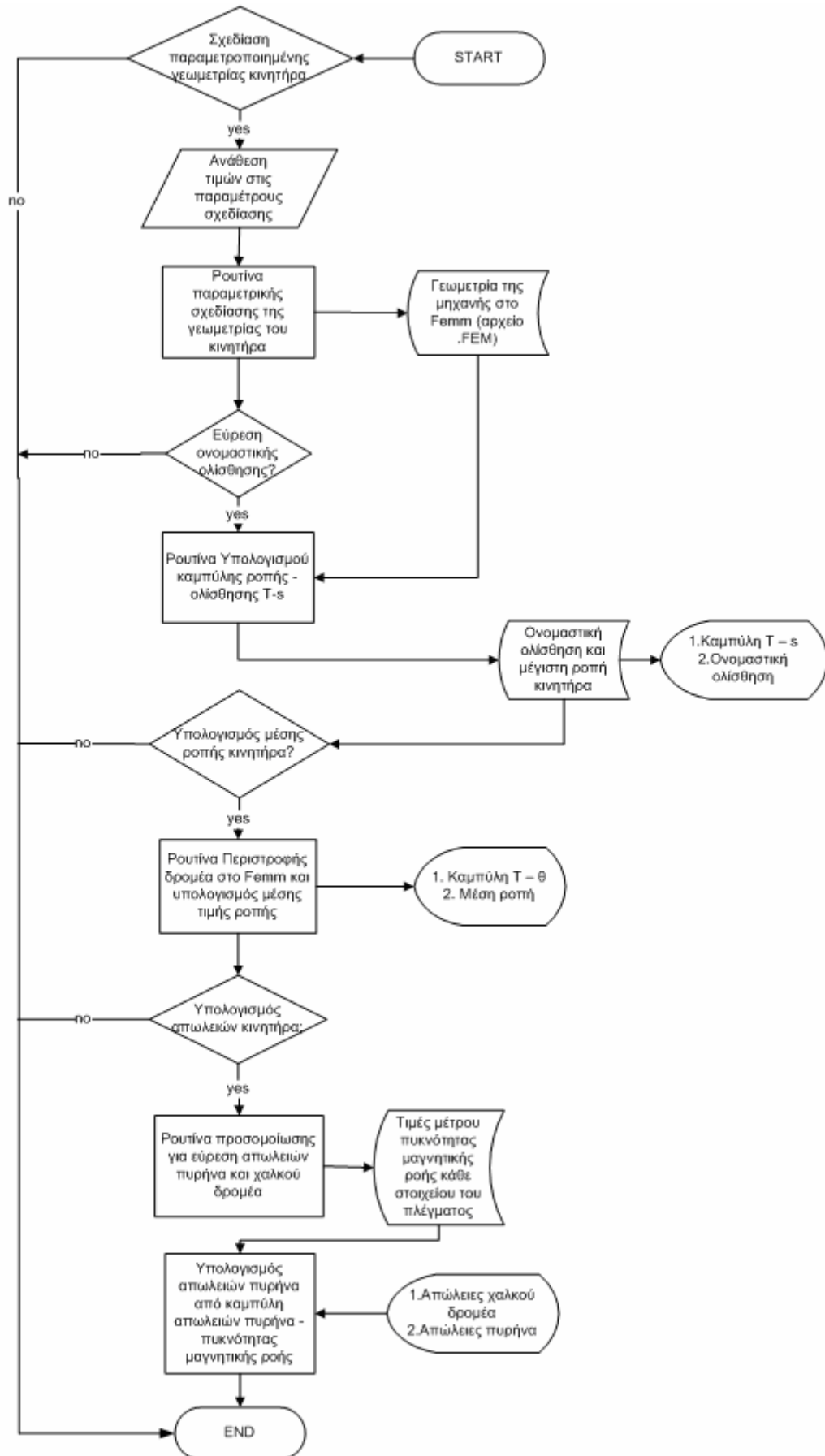
#### 6.1 Σύνοψη Εργασίας

Η παρούσα εργασία είχε σκοπό τη βελτιστοποίηση μηχανής ισχύος 2HP του εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η βελτιστοποίηση αφορούσε αλλαγή του δρομέα της μηχανής με τον ίδιο σtάτη. Η βελτίωση θα υλοποιείτο με αλλαγή του υλικού του κλωβού από αλουμίνιο σε χαλκό ο οποίος έχει μεγαλύτερη αγωγιμότητα. Η παρέμβαση αυτή δημιούργησε την ανάγκη βελτιστοποίησης της γεωμετρίας των αυλάκων. Έτσι στην εργασία αυτή προσομοιώθηκε αρχικά η υπάρχουσα μηχανή με κλωβό αλουμινίου και επιβεβαιώθηκε πειραματικά το μοντέλο. Ακολούθως διερευνήθηκαν μέσω προσομοίωσης οι επιπτώσεις της αλλαγής του υλικού από αλουμίνιο σε χαλκό. Επιπλέον προτάθηκε διαδικασία αναζήτησης της βέλτιστης γεωμετρίας που υιοθετεί τις γεωμετρικές προϋποθέσεις της κλασσικής σχεδίασης. Στο κεφάλαιο 5 διερευνήθηκε η αναζήτηση βέλτιστης γεωμετρίας δρομέα χωρίς τις προϋποθέσεις που θέτουν οι κλασσικές μέθοδοι. Η πορεία της εργασίας συνοψίζεται στο διάγραμμα του σχήματος 6.1.1 ενώ στο σχήμα 6.1.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής εύρεσης βέλτιστης γεωμετρίας.



χήμα 6.1.1: Διάγραμμα ροής εργασίας

Σ



Σχήμα 6.1.2: Διάγραμμα ροής εύρεσης βέλτιστης γεωμετρίας



## **6. 2 Κυριότερα Συμπεράσματα**

Από τη μελέτη της μηχανής του εργαστηρίου στο κεφάλαιο 3 τόσο πειραματικά όσο και μέσω προσομοιώσεων με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων συμπεραίνονται τα εξής:

Η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε γεωμετρία δύο διαστάσεων όπως αυτή που υιοθετεί το πρόγραμμα femm:

1. Μπορεί να αναπαραστήσει με αρκετά καλή προσέγγιση τις καμπύλες ροπής - ολίσθησης μιας μηχανής
2. Δεν επιτρέπει με απλό τρόπο να προσδιορισθούν οι απώλειες τριβών και ανεμισμού
3. Δεν επιτρέπει με απλό τρόπο να προσδιορίζονται οι απώλειες στα τυλίγματα του δρομέα που προέρχονται από τους δακτυλίους βραχυκύκλωσης των ράβδων
4. Προσομοιώνει με σχετικά καλή προσέγγιση τις απώλειες πυρήνα μέσω κατάλληλης μετεπεξεργασίας.

Η κλασσική σχεδίαση μιας μηχανής που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4 επιτρέπει:

1. Την εύρεση ενός τοπικού βέλτιστου όταν υπάρχουν συγκεκριμένες παράμετροι βελτιστοποίησης
2. Την επίτευξη ομοιογενούς κατανομής της μαγνητικής επαγωγής στα δόντια του στάτη
3. Τη θεώρηση τραπεζοειδούς γεωμετρίας των αυλάκων δρομέα.

Η βελτιστοποίηση του δρομέα της μηχανής που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 5 χωρίς τη θεώρηση σταθερού πάχους δοντιών:

1. Απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή κατά την μελέτη της μαγνητικής επαγωγής στα δόντια του δρομέα
2. Εισάγει πολλές παραμέτρους βελτιστοποίησης επομένως απαιτείται σημαντικά μεγαλύτερος χρόνος υπολογισμού.

Γενικά Συμπεράσματα:

1. Η αλλαγή του τυλίγματος του δρομέα από αλουμίνιο σε χαλκό επιτρέπει τη βελτίωση τόσο σε επίδοση όσο και σε απόδοση.
2. Η γεωμετρία των αυλάκων του δρομέα παίζει σημαντικότερο ρόλο στη σχεδίαση αφού επηρεάζει τη μέγιστη και ονομαστική ολίσθηση, τις απώλειες τυλίγματος του δρομέα αλλά και τις απώλειες πυρήνα.
3. Βεβαίως η χρησιμοποίηση χαλκού στον κλωβό του δρομέα μειώνει τη ροπή εκκίνησης αλλά αυτό δεν αποτελεί σοβαρό πρόβλημα σε περιπτώσεις τροφοδοσίας της μηχανής από μετατροπέα.

### **6. 3 Συνεισφορά στην Προαγωγή της Επιστήμης**

Η παρούσα εργασία:

Αποτελεί έρευνα στη μεταβολή της επίδοσης και απόδοσης της ασύγχρονης μηχανής ισχύος 2 HP του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος του ΕΜΠ, που επιφέρει η αλλαγή του δρομέα κλωβού αλουμινίου, με δρομέα κλωβού με χαλκό. Αποδεικνύει ότι η γεωμετρία των αυλάκων του δρομέα είναι παράμετρος εξέχουσας σημασίας για την επίδοση της μηχανής, καθώς αναλύει την κάθε διάσταση ξεχωριστά και την επίδραση αυτής, στην επίδοση.

Εξετάζει εναλλακτικό τρόπο σχεδίασης που δεν διατηρεί σταθερό πάχος στις αύλακες του δρομέα, κάτι που είναι αντίθετο με τις προϋποθέσεις που θέτει η κλασσική σχεδίαση, αναδεικνύει όμως κάποιες γεωμετρίες με πολύ καλά χαρακτηριστικά λειτουργίας και αποτελεί αντικείμενο άξιο διερεύνησης.

Εισάγει μια γρήγορη, εύκολα εφαρμόσιμη, και ικανοποιητικά ακριβή μεθοδολογία υπολογισμού των απωλειών πυρήνα της μηχανής, μέσω συνεργασίας των προγραμμάτων MATLAB και FEMM που περιγράφεται στο κεφάλαιο 3. Τα προγράμματα που αναπτύχθηκαν σε περιβάλλον Matlab, η εκτέλεση των οποίων αναλαμβάνει την ανίχνευση της γεωμετρίας της μηχανής με εντοπισμό του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση από αρχεία Femm και στη συνέχεια τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα ως κατανομή στο σώμα της μηχανής και στο σύνολό τους, παρατίθενται στο Παράρτημα ΙΙΙ.

### **6. 4 Εργασίες για Περαιτέρω Διερεύνηση**

Η εργασία αυτή ανέδειξε ορισμένα σημεία που χρήζουν περαιτέρω συμπληρωματικής διερεύνησης. Προτείνεται μελλοντική εργασία στα παρακάτω θέματα:

- Κατασκευή της βελτιστοποιημένης μηχανής και διεξοδική μέτρηση των χαρακτηριστικών της για επικαιροποίηση της βελτιστοποίησης λαμβάνοντας υπ' όψιν τις κατασκευαστικές ατέλειες και τις επιπτώσεις των μηχανικών απωλειών.
- Προσαρμογή της μεθόδου υπολογισμού απωλειών που αναπτύχθηκε μέσω της καμπύλης ειδικών απωλειών σε μαγνητικά κυκλώματα απλής γεωμετρίας και εκτενής αξιολόγησή της σε υψηλές επαγωγές μέσω πειράματος. Η ενσωμάτωση ακριβέστερων δεδομένων ειδικών απωλειών αναμένεται να δώσει πιο ακριβή αποτελέσματα.
- Ανάπτυξη μεθοδολογίας υπολογισμού απωλειών δακτυλίων βραχυκύκλωσης του δρομέα κλωβού που θα λαμβάνει υπόψη το υλικό κατασκευής και την συχνότητα των ρευμάτων που τον διαρρέουν για ακριβέστερο προσδιορισμό της απόδοσης της μηχανής.
- Βελτιστοποίηση ολόκληρης της μηχανής και όχι μόνο του δρομέα, δηλαδή να συμπεριληφθούν στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης και οι μεταβλητές σχεδίασης του στάτη για την εύρεση ολικού βελτίστου.
- Ανάπτυξη δυναμικού μοντέλου της καινούριας βέλτιστης μηχανής και προσομοίωση τεχνικών ελέγχου στο πρόγραμμα matlab
- Επέκταση της μεθοδολογίας βελτιστοποίησης που προτείνεται χωρίς θεώρηση σταθερού πάχους δοντιών για την εξακρίβωση της αποτελεσματικότητάς της, στη βελτίωση της επιδόσεως των μηχανών.





## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Ελληνική Βιβλιογραφία:**

- [1] Ι. Α. Τεγόπουλος, **Ηλεκτρικές μηχανές Μέρος Β: Μόνιμη κατάσταση**, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991
- [2] Κ.Βουρνάς, Γ.Κονταξής, **Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας**, Πρώτη Έκδοση, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.,1997 (επανεκδοση 2001)
- [3] Μ. Π. Παπαδόπουλος, **Ηλεκτρομηχανική Μετατροπή Ηλεκτρικής Ενέργειας** Πρώτη Έκδοση, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1995
- [4] Γ.Δάσιος, Κ.Κυριάκη, **Μερικές Διαφορικές Εξισώσεις**, Πρώτη Έκδοση, Αθήνα 1994
- [5] Α. Κλαδάς, Π. Γιαννοπούλου - Λασκαράτου, **Εργαστηριακές Ασκήσεις Μαθήματος Ηλεκτρικές Μηχανές Ι**, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [6] Π. Γιαννοπούλου – Λασκαράτου, **Θεωρία και Ασκήσεις στις Μηχανές Ι**, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [7] Α. Κλαδάς, **Υποδειγματική Προκαταρκτική Σχεδίαση Γεννήτριας Μονίμων Μαγνητών Ισχύος 25kW**, σημειώσεις μαθήματος «Κατασκευή Ηλεκτρικών Μηχανών», Αθήνα, Νοέμβριος 2009

### **Ξένη Βιβλιογραφία:**

- [8] M.G Say, **Alternating Current Machines**, Fifth Edition, Longman Scientific and Technical, 1988
- [9] S.Chapman, **Electical Machines DC-AC**, second edition, McGraw-Hill, 1991
- [10] N. Bianchi, **Electrical Machine Analysis Using Finite Elements**, CRC Press Taylor and Francis group, 2005
- [11] Ion Boldea, Syed A. Nasar, **Induction Machines Handbook**, CRC Press LLC, 2002
- [12] David Meeker, **Finite Element Method Magnetics User's manual**, version 4.2, February 5, 2009
- [13] David Meeker, **Finite Element Method Magnetics OctaveFEMM**, version 1.2, March 25, 2009

### Άρθρα, Διπλωματικές Εργασίες και Διδακτορικές Διατριβές

- [14] Rakesh Parekh, **AC Induction Motor Fundamentals**, Microchip Technology Inc. 2003
- [15] M. Herranz Gracia, E. Lange, K. Hameyer, **Numerical Calculation of Iron Losses in Electrical Machines with a Modified Post-Processing Formula**, Institute of Electrical Machines, RWTH Aachen University 2007
- [16] JJ Germishuizen, A Jöckel, MJ Kamper, **Numerical Calculation of Iron -and Pulsation Losses on Induction Machines with Open Stator Slots**, 2007
- [17] James L. Kirtley Jr., **Designing Squirrel Cage Rotor Slots with High Conductivity**, Massachusetts Institute of Technology
- [18] 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, November 2003
- [19] Γεώργιος Δ. Καλοκύρης, **Καινοτομικά Υλικά Για Συστήματα Κίνησης Μηδενικής Εκπομπής Ρύπων**, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, Φεβρουάριος 2006
- [20] Μαρίνα Α. Τσίλη, **Ανάπτυξη Μεικτών Αριθμητικών Τεχνικών Πεπερασμένων Στοιχείων – Οριακών Στοιχείων Για Τη Σχεδίαση Μετασχηματιστών Ισχύος**, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, Ιούνιος 2005
- [21] Άγγελος Π. Μοσχούδης, **Μελέτη και Σχεδίαση Γεννήτριας Έκτυπων Πόλων**, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Δεκέμβριος 2008
- [22] Ευάγγελος Μ. Τσαμπούρης, **Έλεγχος κινητήρων επαγωγής με κριτήρια ελαχιστοποίησης Απωλειών**, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Οκτώβριος 2008
- [23] Μίνως Η. Μπενιακάρ, **Συγκριτική Μελέτη Τεχνικών Ελέγχου Σύγχρονων Κινητήρων Μαγνητικής Αντίστασης**, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2008
- [24] Αναστάσιος Γ. Βήχος, **Σχεδίαση και Βελτιστοποίηση Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών για Εφαρμογή Ηλεκτροκίνησης**, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Ιούνιος 2009







## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

### Διαδικασία Σχεδίασης Παραμετροποιημένου Δρομέα

```

Dsout=136;    %ε3oteriki diametros stati
Dsin=85;     %esoteriki diametros stati
Dr=84.5;    %diametros dromea
Li=110;     %vathos mixanis

%avlakes stati (tipou (semi-closed))

hs=14;     %ipsos avlakon stati
ws=3.989;  %platos ODONTOSEON stati
wo=2;     %anoigma pros to diakeno avlakon stati se moires

%avlakia dromea
SR_num=36; %arithmos avlakon dromea
hr1=1;    %ipsos sindesis avlakiou - diakenou
sr1=1;    %anoigma se moires sindesis avlakiou _ diakenou
hr2=16;   %ipsos avlakon dromea (15 kanonika)
wr=4.3;   %platos odontoseon dromea
SrperP_num=SR_num/4; %arithmos avlakon dromea ana polo
S_angle=90/SrperP_num; %gonia meta3i 2 avlakon dromea

%revmata stati
Ia=1.8*(2^0.5);
Ib=Ia*cos(120*pi/180)-Ia*i*sin(120*pi/180);
Ic=Ia*cos(120*pi/180)+Ia*i*sin(120*pi/180);

%sixnotita kinisis sinistamenou pediou
sf=0;

openfemm;
  newdocument(0);
  mi_probdef(sf, 'millimeters', 'planar', 1.e-8, Li, 30);

%dilosi ilikon kai oriakon sin8ikon
  mi_addmaterial('Air', 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0);

  mi_addmaterial('Iron', 7000, 7000, 0, 0, 2.1, 0.5, 20, 0.98, 0, 0, 0, 0);
  bhcurve = [.....,.....]';
  mi_addbhpnts('Iron', bhcurve);

  mi_addmaterial('rotorIron', 7000, 7000, 0, 0, 2.1, 0.5, 20, 0.98, 0, 0, 0, 0);
  rotorBHcurve = [.....,.....]'; %thyssen 0.5
  mi_addbhpnts('rotorIron', rotorBHcurve);

  mi_addmaterial('Copper', 1, 1, 0, 0, 58, 0, 0, 1, 0, 0, 0);

  mi_addmaterial('stator winding', 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0);

  mi_addboundprop('A=0', 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0);

```

```

mi_addboundprop('Anti1', 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 5);
mi_addboundprop('Anti2', 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 5);
mi_addboundprop('Anti3', 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 5);
mi_addboundprop('Anti4', 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 5);
mi_addboundprop('Anti5', 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 5);
mi_addboundprop('Anti6', 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 5);
mi_addboundprop('Anti7', 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 5);
mi_addboundprop('Anti8', 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 5);

mi_addcircprop('circA',Ia,1);
mi_addcircprop('circB',Ib,1);
mi_addcircprop('-circC',-Ic,1);

%sxediasi avlakon stati

s=7.5*pi/180; %metatropi se aktinia tis gonias
%του κεντρου tis avlakos
an_av_s=((wo/2)/(Dsin/2)); %ipologismos gonias simeiou avlakos
%stati stin essoteriki perimetro tou
stati
x_do=(Dsin/2)*cos(s-an_av_s); %x simeiou avlakos stati pano stin
%essoteriki perimetro tou stati
y_do=(Dsin/2)*sin(s-an_av_s); %y to idio ola me simeio anaforas tis
7.5 %moires pou einai to kentriko simeio
%του lou avlakiou

mi_addnode(x_do,y_do);

mi_drawline(x_do,y_do,((Dsin/2)+0.5)*cos(s-an_av_s-(0.5/((Dsin/2)+0.5))),
((Dsin/2)+0.5)*sin(s-an_av_s-(0.5/((Dsin/2)+0.5))));
%ipsos h3=0.5 tou semi closed avlaka
mi_drawarc(((Dsin/2)+0.5)*cos(s-an_av_s-0.5/((Dsin/2)+0.5)),
((Dsin/2)+0.5)*sin(s-an_av_s-0.5/((Dsin/2)+0.5)),
((Dsin/2)+2.5)*cos(atan(ws/Dsin)),ws/2,45,5); %ipsos h2=2mm
mi_drawline(((Dsin/2)+2.5)*cos(atan(ws/Dsin)),ws/2,((Dsin/2)+2.5)
*cos(atan(ws/Dsin))+hs-3,ws/2);
mi_drawline(((Dsin/2)+2.5)*cos(atan(ws/Dsin))+hs-3,ws/2,
((Dsin/2)+hs)*cos(atan((ws/2+1)/(Dsin/2))),
((Dsin/2)+hs)*sin(atan((ws/2+1)/(Dsin/2))));

x_up=(Dsin/2)*cos(-s+an_av_s); %x simeiou avlakos stati pano
stin %essoteriki perimetro tou stati
y_up=(Dsin/2)*sin(-s+an_av_s); %y to idio ola me simeio
%anaforas tis 7.5 moires
%που einai to kentriko
%simeio tou lou avlakiou

mi_addnode(x_up,y_up);

%ipsos h3=0.5 tou semi closed avlaka (sxima 2.28c tou vivliou)
mi_drawline(x_up,y_up,((Dsin/2)+0.5)*cos(-s+an_av_s+(0.5/((Dsin/2)+0.5))),
((Dsin/2)+0.5)*sin(-s+an_av_s+(0.5/((Dsin/2)+0.5))));

mi_drawarc(((Dsin/2)+2.5)*cos(atan(ws/Dsin)),-ws/2,
((Dsin/2)+0.5)*cos(-s+an_av_s+(0.5/((Dsin/2)+0.5))),

```

```

        ((Dsin/2)+0.5)*sin(-s+an_av_s+(0.5/((Dsin/2)+0.5))),45,5);
%ipsos h2=2mm
mi_drawline(((Dsin/2)+2.5)*cos(atan(ws/Dsin)),-ws/2,
            ((Dsin/2)+2.5)*cos(atan(ws/Dsin))+hs-3,-ws/2);
mi_drawline(((Dsin/2)+2.5)*cos(atan(ws/Dsin))+hs-3,-ws/2,
            ((Dsin/2)+hs)*cos(atan((ws/2+1)/(Dsin/2))),
            -((Dsin/2)+hs)*sin(atan((ws/2+1)/(Dsin/2))));

%pollaplasiasmos avlakon

mi_selectsegment(x_up,y_up);
mi_selectarcsegment(((Dsin/2)+2.5)*cos(atan(ws/Dsin)),-ws/2);
mi_selectsegment(((Dsin/2)+2.5)*cos(atan(ws/Dsin)),-ws/2);
mi_selectsegment(((Dsin/2)+hs)*cos(atan((ws/2+1)/(Dsin/2))),
                -((Dsin/2)+hs)*sin(atan((ws/2+1)/(Dsin/2))));
mi_seteditmode('group');
mi_moverotate(0,0,15);
mi_drawline(((Dsin/2)+hs)*cos(atan((ws/2+1)/(Dsin/2))),
            ((Dsin/2)+hs)*sin(atan((ws/2+1)/(Dsin/2))),
            ((Dsin/2)+hs)*cos(-atan((ws/2+1)/(Dsin/2))+0.2618),
            ((Dsin/2)+hs)*sin(-atan((ws/2+1)/(Dsin/2))+0.2618));
mi_selectgroup(0);
mi_copyrotate(0,0,15,5);

%sxediasi avlakon dromea

r=((360/SR_num)/2)*pi/180);
an_av_d=((srl/2)/(Dr/2));
%ipologismos gonias simeiou avlakos
%dromea stin e3oteriki perimetro
%tou dromea me anoigma srl

x_do=(Dr/2)*cos(r-an_av_d);
y_do=(Dr/2)*sin(r-an_av_d);
mi_addnode(x_do,y_do);

%sxediasi kato merous avlakiou (pano meros dontiou)
mi_drawline(x_do,y_do,(Dr/2-hr1)*cos(atan(y_do/(Dr/2-hr1))),
            (Dr/2-hr1)*sin(atan(y_do/(Dr/2-hr1))));
mi_drawline((Dr/2-hr1)*cos(atan(y_do/(Dr/2-hr1))),
            (Dr/2-hr1)*sin(atan(y_do/(Dr/2-hr1))),
            (Dr/2-hr1)*cos(atan(y_do/(Dr/2-hr1))),wr/2);
mi_drawline((Dr/2-hr1)*cos(atan(y_do/(Dr/2-hr1))),wr/2,
            (Dr/2-hr1)*cos(atan(y_do/(Dr/2-hr1)))-hr2,wr/2);
mi_selectsegment(x_do,y_do);
mi_selectsegment((Dr/2-hr1)*cos(atan(y_do/(Dr/2-hr1))),wr/2);
mi_selectsegment((Dr/2-hr1)*cos(atan(y_do/(Dr/2-hr1)))-hr2,wr/2);
mi_seteditmode('group');
mi_setsegmentprop('none',0,0,0,1);
mi_clearselected;

%sxediasi pano merous avlakiou (kato meros dontiou)
x_up=(Dr/2)*cos(-r+an_av_d);
y_up=(Dr/2)*sin(-r+an_av_d);
mi_addnode(x_up,y_up);

mi_drawline(x_up,y_up,(Dr/2-hr1)*cos(atan(y_up/(Dr/2-hr1))),

```

```

        (Dr/2-hr1)*sin(atan(y_up/(Dr/2-hr1))));
mi_drawline((Dr/2-hr1)*cos(atan(y_up/(Dr/2-hr1))),
            (Dr/2-hr1)*sin(atan(y_up/(Dr/2-hr1))),
            (Dr/2-hr1)*cos(atan(y_up/(Dr/2-hr1))),-wr/2);
mi_drawline((Dr/2-hr1)*cos(atan(y_up/(Dr/2-hr1))),
            -wr/2,(Dr/2-hr1)*cos(atan(y_up/(Dr/2-hr1)))-hr2,-wr/2);

%ola ta simeia tou dromea sto group 1
mi_selectnode(x_up,y_up);
mi_selectnode((Dr/2-hr1)*cos(atan(y_do/(Dr/2-hr1))),
            (Dr/2-hr1)*sin(atan(y_do/(Dr/2-hr1))));
mi_selectnode((Dr/2-hr1)*cos(atan(y_do/(Dr/2-hr1))),wr/2);
mi_selectnode(x_do,y_do);
mi_selectnode((Dr/2-hr1)*cos(atan(y_do/(Dr/2-hr1)))-hr2,wr/2);
mi_selectnode((Dr/2-hr1)*cos(atan(y_up/(Dr/2-hr1))),
            (Dr/2-hr1)*sin(atan(y_up/(Dr/2-hr1))));
mi_selectnode((Dr/2-hr1)*cos(atan(y_up/(Dr/2-hr1))),-wr/2);
mi_selectnode((Dr/2-hr1)*cos(atan(y_up/(Dr/2-hr1)))-hr2,-wr/2);
mi_seteditmode('group');
mi_setnodeprop('none',1);
mi_clearselected;

%pollaplasiasmos avlakon dromea
mi_selectsegment(x_up,y_up);
mi_selectsegment((Dr/2-hr1)*cos(atan(y_up/(Dr/2-hr1))),-wr/2);
mi_selectsegment((Dr/2-hr1)*cos(atan(y_up/(Dr/2-hr1)))-hr2,-wr/2);
mi_seteditmode('group');
mi_setsegmentprop('none',0,0,0,1);
mi_moverotate(0,0,360/SR_num);
x=(Dr/2-hr1)*cos(atan(y_up/(Dr/2-hr1)))-hr2;
y=-wr/2;
sqr=((x^2+y^2)^0.5);
ang=-atan(y/x);
mi_drawline((Dr/2-hr1)*cos(atan(y_do/(Dr/2-hr1)))-hr2,wr/2,
            sqr*cos(2*r-ang),sqr*sin(2*r-ang));
mi_selectsegment(sqr*cos(r),sqr*sin(r));
mi_seteditmode('group');
mi_setsegmentprop('none',0,0,0,1);
mi_clearselected;

%iliko avlakon dromea
mi_addblocklabel((Dr/2-hr1-hr1/10)*cos(atan(y_do/(Dr/2-hr1-hr1/10))),
            (Dr/2-hr1-hr1/10)*sin(atan(y_do/(Dr/2-hr1-hr1/10))));
mi_selectlabel((Dr/2-hr1-hr1/10)*cos(atan(y_do/(Dr/2-hr1-hr1/10))),
            (Dr/2-hr1-hr1/10)*sin(atan(y_do/(Dr/2-hr1-hr1/10))));
mi_setblockprop('Copper',0,1,0,0,1,0);
mi_clearselected;

mi_drawline((Dr/2-hr1)*cos(atan(y_do/(Dr/2-hr1))),
            (Dr/2-hr1)*sin(atan(y_do/(Dr/2-hr1))),
            (Dr/2-hr1)*cos(2*r+atan(y_up/(Dr/2-hr1))),
            (Dr/2-hr1)*sin(2*r+atan(y_up/(Dr/2-hr1))));
mi_selectsegment((Dr/2-hr1)*cos(r),(Dr/2-hr1)*sin(r));
mi_seteditmode('group');
mi_setsegmentprop('none',0,0,0,1);
mi_clearselected;

```

```

%aeras enosis dromea diakenou
mi_addblocklabel((Dr/2-hr1/2)*cos(r),(Dr/2-hr1/2)*sin(r));
mi_selectlabel((Dr/2-hr1/2)*cos(r),(Dr/2-hr1/2)*sin(r));
mi_setblockprop('Air',0,1,0,0,1,0);
mi_setsegmentprop('none',0,0,0,1);
mi_clearselected;

%topothetisi provlmatos meta3i gonion 0 kai 90 moiron
mi_selectgroup(1);
mi_copyrotate(0,0,S_angle,SrperP_num-1);

%Sxediasi diakenou (me 4 tmimata oste na dimiourgithe i sosto plegma)
mi_setgrid(10,'polar');
mi_addnode(0,0);
mi_drawarc(Dsout/2,0,0,Dsout/2,90,1);
mi_drawarc(Dsin/2,0,0,Dsin/2,90,1);
mi_drawarc(Dr/2,0,0,Dr/2,90,1);
mi_drawarc(((Dsin/2-Dr/2)*1/4)+Dr/2,0,0,((Dsin/2-Dr/2)*1/4)+Dr/2,90,1);
mi_drawarc(((Dsin/2-Dr/2)*2/4)+Dr/2,0,0,((Dsin/2-Dr/2)*2/4)+Dr/2,90,1);
mi_drawarc(((Dsin/2-Dr/2)*3/4)+Dr/2,0,0,((Dsin/2-Dr/2)*3/4)+Dr/2,90,1);
mi_addsegment(0,0,0,Dsout/2);
mi_addsegment(0,0,Dsout/2,0);

%aeras sto diakeno
mi_addblocklabel(Dr/2+0.0125,0.0125);
mi_addblocklabel(((Dsin/2-Dr/2)*1/4)+Dr/2+0.0125,0.0125);
mi_addblocklabel(((Dsin/2-Dr/2)*2/4)+Dr/2+0.0125,0.0125);
mi_addblocklabel(((Dsin/2-Dr/2)*3/4)+Dr/2+0.0125,0.0125);

mi_selectlabel(Dr/2+0.0125,0.0125);
mi_selectlabel(((Dsin/2-Dr/2)*1/4)+Dr/2+0.0125,0.0125);
mi_setblockprop('Air',0,0.05,0,0,1,0);
mi_clearselected;

mi_selectlabel(((Dsin/2-Dr/2)*3/4)+Dr/2+0.0125,0.0125);
mi_selectlabel(((Dsin/2-Dr/2)*2/4)+Dr/2+0.0125,0.0125);
mi_setblockprop('Air',0,0.05,0,0,0,0);
mi_clearselected;

%tiligmata stous avlakes tou stati

mi_addblocklabel(x_up+hs-3.5,y_up+ws/2-1.5);      %avlakas 1
mi_selectlabel(x_up+hs-3.5,y_up+ws/2-1.5);
mi_setblockprop('stator winding',0,2,'circA',0,0,135);      %revma ia
mi_moverotate(0,0,7.5);

mi_addblocklabel(x_up+hs-3.5,y_up+ws/2-1.5);      %avlakas 2
mi_selectlabel(x_up+hs-3.5,y_up+ws/2-1.5);
mi_setblockprop('stator winding',0,2,'circA',0,0,135);      %revma ia
mi_moverotate(0,0,22.5);

mi_addblocklabel(x_up+hs-3.5,y_up+ws/2-1.5);      %avlakas 3
mi_selectlabel(x_up+hs-3.5,y_up+ws/2-1.5);
mi_setblockprop('stator winding',0,2,'-circC',0,0,135);      %revma -
ic
mi_moverotate(0,0,37.5);

```

```

mi_addblocklabel(x_up+hs-3.5,y_up+ws/2-1.5);    %avlakas 4
mi_selectlabel(x_up+hs-3.5,y_up+ws/2-1.5);
mi_setblockprop('stator winding',0,2,'-circC',0,0,135);    %revma -
ic
mi_moverotate(0,0,52.5);

mi_addblocklabel(x_up+hs-3.5,y_up+ws/2-1.5);    %avlakas 5
mi_selectlabel(x_up+hs-3.5,y_up+ws/2-1.5);
mi_setblockprop('stator winding',0,2,'circB',0,0,135);    %revma ib
mi_moverotate(0,0,67.5);

mi_addblocklabel(x_up+hs-3.5,y_up+ws/2-1.5);    %avlakas 6
mi_selectlabel(x_up+hs-3.5,y_up+ws/2-1.5);
mi_setblockprop('stator winding',0,2,'circB',0,0,135);    %revma ib
mi_moverotate(0,0,82.5);

%sideiros ston stati kai sto dromea
mi_addblocklabel(Dsout/2-0.5,0.5);
mi_addblocklabel(0.5,0.5);
mi_selectlabel(Dsout/2-0.5,0.5);
mi_setblockprop('Iron',0,2,0,0,0,0);
mi_clearselected;

mi_selectlabel(0.5,0.5);
mi_setblockprop('rotorIron',0,2,0,0,1,0);
mi_clearselected;

%oriakes sinthikes

mi_seteditmode('arcsegments');
mi_selectarcsegment(Dsout/2,0);    %e3oteriki aktina stati
mi_setarcsegmentprop(5,'A=0',0,0);    %A=0
mi_clearselected;

mi_seteditmode('segments');
mi_selectsegment(Dsout/2-0.5,0);    %oria stati
mi_selectsegment(0,Dsout/2-0.5);
mi_setsegmentprop('Anti1',0,0,0,0);    %Anti1
mi_clearselected;

mi_selectsegment(((Dsin/2-Dr/2)*4/4)+Dr/2,0);    %oria diakenou
mi_selectsegment(0,((Dsin/2-Dr/2)*4/4)+Dr/2);
mi_setsegmentprop('Anti2',0,0,0,0);    %Anti2
mi_clearselected;

mi_selectsegment(((Dsin/2-Dr/2)*3/4)+Dr/2,0);    %oria diakenou
mi_selectsegment(0,((Dsin/2-Dr/2)*3/4)+Dr/2);
mi_setsegmentprop('Anti3',0,0,0,0);    %Anti3
mi_clearselected;

mi_selectsegment(((Dsin/2-Dr/2)*2/4)+Dr/2,0);    %oria diakenou
mi_selectsegment(0,((Dsin/2-Dr/2)*2/4)+Dr/2);
mi_setsegmentprop('Anti4',0,0,0,2);    %Anti4
mi_clearselected;

```

```
mi_selectsegment(((Dsin/2-Dr/2)*1/4)+Dr/2,0);           %oria diakenou
mi_selectsegment(0,((Dsin/2-Dr/2)*1/4)+Dr/2);
mi_setsegmentprop('Anti5',0,0,0,1);                   %Anti5
mi_clearselected;

mi_selectsegment(Dr/2-0.0125,0);                       %oria dromea
mi_selectsegment(0,Dr/2-0.0125);
mi_setsegmentprop('Anti6',0,0,0,1);                   %Anti6
mi_clearselected;
mi_zoomnatural;

%dromeas sto group 1
mi_seteditmode('arcsegments');
mi_selectarcsegment(Dr/2,0);
mi_selectarcsegment(((Dsin/2-Dr/2)*1/4)+Dr/2,0);
mi_setarcsegmentprop(1,'none',0,1);
mi_clearselected;
mi_saveas('asigxroni_4poliki_cu_rotor.fem');
```





**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II****Διαδικασία Περιστροφής Δρομέα και Υπολογισμού Ροπής - Ολίσθησης**

```

%EPANALIPTIKI DIADIKASIA EVRESIS MEGISTIS ROPIS KAI ONOMASTIKIS OLIS8ISIS
Li=110;
f=50;
Smax=0.04;
Sstep=0.05;
rot_step=1;
rot_max=15;
j=1;
i=1;
A=0;
B=0;
C=0;
D=0;
T=0;

%loop gia af3isi tis olisthisis apo 0 eos Smax
for S=0.0126:Sstep:Smax
    Sf=S*f;
    openfemm;
    opendocument('asigxroni_4poliki_cu_rotor.fem');
    mi_probdef(Sf, 'millimeters', 'planar', 1.e-8, Li, 30);
    A(i)=S;
    mi_saveas('temp.fem');
    closefemm;
    %gia kathe olisthisi ginetai peristrofi tou dromea
    %apo 0 eos 90 moires
    %kai ipologizete i mesi timi tis Ropis
    %gia oles tis theseis tou dromea

    for rot=0:rot_step:rot_max
        openfemm;
        opendocument('temp.fem');
        radius_rot_step=rot_step*pi/180;
        radius_rot=rot*pi/180;
        B(i,j)=rot;
        %peristrofi dromea kata rot moires
        if (rot>0)

            mi_seteditmode('group');
            mi_selectgroup(2); %diagرافي orion peristrefomenou diakenou
            mi_deleteselecte;
            mi_selectgroup(1); %peristrofi dromea kata rot moires
            mi_moverotate(0,0,rot);

        %sxediashi diagrafenton orion diakenou

        x1=((Dsin/2-Dr/2)*1/4)+Dr/2)*cos(radius_rot);

```

```

y1=(( (Dsin/2-Dr/2)*1/4)+Dr/2)*sin(radius_rot);
x2=(( (Dsin/2-Dr/2)*2/4)+Dr/2)*cos(radius_rot);
y2=(( (Dsin/2-Dr/2)*2/4)+Dr/2)*sin(radius_rot);
mi_drawline(x1,y1,x2,y2);
x3=(( (Dsin/2-Dr/2)*1/4)+Dr/2)*cos(radius_rot+pi/2);
y3=(( (Dsin/2-Dr/2)*1/4)+Dr/2)*sin(radius_rot+pi/2);
x4=(( (Dsin/2-Dr/2)*2/4)+Dr/2)*cos(radius_rot+pi/2);
y4=(( (Dsin/2-Dr/2)*2/4)+Dr/2)*sin(radius_rot+pi/2);
mi_drawline(x3,y3,x4,y4);
mi_addarc(0,(( (Dsin/2-Dr/2)*2/4)+Dr/2),x4,y4,rot,1);

%orismos sin8ikon
mi_seteditmode('segments');
mi_selectsegment((( (Dsin/2-Dr/2)*1/4)+Dr/2+0.0125)*cos(radius_rot),
                (( (Dsin/2-Dr/2)*1/4)+Dr/2+0.00125)*sin(radius_rot));
mi_selectsegment((( (Dsin/2-
Dr/2)*1/4)+Dr/2+0.0125)*cos(radius_rot+pi/2),
                (( (Dsin/2-
Dr/2)*1/4)+Dr/2+0.00125)*sin(radius_rot+pi/2));
mi_setsegmentprop('Anti4',0,0,0,2);           %Anti4
mi_clearselected;

mi_seteditmode('arcsegments');
mi_selectarcsegment((( (Dsin/2-Dr/2)*2/4)+Dr/2),0);
mi_setarcsegmentprop(1,'Anti8',0,0);         %Anti8
mi_clearselected;
mi_selectarcsegment(x4,y4);
mi_setarcsegmentprop(1,'Anti8',0,1);         %Anti8
mi_clearselected;
end

%IPOLOGISMOS ROPIS
mi_saveas('templ.fem');

mi_analyze(0);
mi_loadsolution;

%ropi sto meso tou diakenou pano apo to dromea
mo_seteditmode('contour');
mo_selectpoint((( (Dsin/2-Dr/2)*1/4)+Dr/2)*cos(radius_rot+pi/2),
               (( (Dsin/2-Dr/2)*1/4)+Dr/2)*sin(radius_rot+pi/2));
mo_selectpoint((( (Dsin/2-Dr/2)*1/4)+Dr/2)*cos(radius_rot),
               (( (Dsin/2-Dr/2)*1/4)+Dr/2)*sin(radius_rot));
T1=mo_lineintegral(4);
C(i,j)=T1(1,1);
mo_clearcontour;

%ropi sto meso tou diakenou kato apo to stati
mo_seteditmode('contour');
mo_selectpoint(0,(( (Dsin/2-Dr/2)*3/4)+Dr/2);
mo_selectpoint((( (Dsin/2-Dr/2)*3/4)+Dr/2),0);
T2=mo_lineintegral(4);
D(i,j)=T2(1,1);
mo_clearcontour;

%apoleies xalkou dromea

```

```
mo_groupselectblock(1);
mo_selectblock(0,0);
P_jr=4*mo_blockintegral(4);
mo_clearblock;

%apoleies sidirou
mo_selectblock(0,0);
P_Fe_r=4*mo_blockintegral(3);
mo_clearblock;

mo_selectblock(0,67);
P_Fe_s=4*mo_blockintegral(3);
mo_clearblock;

mi_saveas('temp1.fem');
closefemm;
%delete('temp1.fem');
j=j+1;

end

i=i+1;
j=1;
%delete('temp.fem');

end
```



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ III

### Διαδικασία Υπολογισμού Απωλειών Πυρήνα

```

%% Perform a series of finite element analyses

openfemm;
opendocument('36avlakes_wr_4.3.fem');
%mi_saveas('temp2.fem');
%mi_createmesh(); % this command creates and shows mesh!DONT show mesh.
%mi_purgemesh()

mi_loadsolution;

mo_zoomnatural;
mo_hidemesh();
nn = mo_numelements;
b = zeros(1,nn); %matrix that will hold the flux density info of rotor
c=zeros(1,nn); % matrix that will hold the flux density info of stator

for m = 1:nn
    elm = mo_getelement(m);
    z(m) = elm(4) + j*elm(5);
    % element area in the length units used to draw the geometry
    a(m) = elm(6);
    % group number associated with the element
    g(m) = elm(7);
end

for m = 1:nn
    % element is on the rotor
    if(g(m) == 1)
        p = z(m);
        b(1,m) = (mo_getb(real(p),imag(p))*[1;j]);
    end
    if (g(m)==0)
        q=z(m);
        c(1,m)=(mo_getb(real(q),imag(q))*[1;j]);
    end
end

bs=abs(b);
cs=abs(c);

rotor.losses=max(2.965.*bs.^5-18.24.*bs.^4+40.34.*bs.^3-
    36.39.*bs.^2+14.44.*bs-1.119,0);
stator.losses=max(2.965.*cs.^5-18.24.*cs.^4+40.34.*cs.^3-
    36.39.*cs.^2+14.44.*cs-1.119,0);

```

```
% Compute the volume of each element in units of meter^3
h = 110; %Length of the machine in the into-the-page direction
v = a*h;
density=7.7e-6; %kg/mm^3
weight=density.*v;
losses_wr=rotor.losses.*weight;
losses_ws=stator.losses.*weight;

totalr=0;
totals=0;

for m = 1:nn
    totalr=totalr+losses_wr(m);
    totals=totals+losses_ws(m);
end
total_ironrotor_losses=4*totalr;
total_ironstator_losses=4*totals;
closefemm;
```