



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

**Σχεδίαση και Ανάλυση Λειτουργίας Ηλεκτρικής Μηχανής  
Μονίμων Μαγνητών χρησιμοποιώντας Δισδιάστατη και  
Τρισδιάστατη Αναπαράσταση του Μαγνητικού Πεδίου και  
Πειραματική Επιβεβαίωση**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θεμιστοκλής Δ. Κεφάλας

Επιβλέπων : Αντώνιος Κλαδάς  
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος 2005





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

**Σχεδίαση και Ανάλυση Λειτουργίας Ηλεκτρικής Μηχανής  
Μονίμων Μαγνητών χρησιμοποιώντας Δισδιάστατη και  
Τρισδιάστατη Αναπαράσταση του Μαγνητικού Πεδίου και  
Πειραματική Επιβεβαίωση**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θεμιστοκλής Δ. Κεφάλας

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15<sup>η</sup> Μαρτίου 2005.

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

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

.....  
Σταύρος Παπαθανασίου  
Λέκτορας Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος 2005

.....  
Θεμιστοκλής Δ. Κεφάλας

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

Copyright © Θεμιστοκλής Δ. Κεφάλας, 2005

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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



## **Περίληψη**

Ο σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ήταν η τρισδιάστατη αριθμητική ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων μίας σύγχρονης πολυπολικής μηχανής μονίμων μαγνητών καθώς και η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου μέσω του οποίου είναι δυνατή η εύρεση της κατανομής πεδιακών μεγεθών δύο ανεξάρτητων μεταβλητών.

Η τρισδιάστατη αριθμητική ανάλυση, καθώς και η δισδιάστατη, υλοποιήθηκαν μέσω της έκτης έκδοσης του προγράμματος ANSYS και εφαρμόστηκαν σε μία σύγχρονη 24-πολική γεννήτρια μονίμων μαγνητών χωρίς κλίση αλλά και σε μία με κεκλιμένους μαγνήτες.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στα προβλήματα και στα πλεονεκτήματα που ανακύπτουν από μία τυπική τρισδιάστατη ανάλυση καθώς και στην ανάπτυξη του αλγορίθμου η εφαρμογή του οποίου επιτρέπει την αποτελεσματική σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τύπων αναλύσεων καθώς και ηλεκτρικών μηχανών με πολύπλοκη τοπολογία.

## **Λέξεις Κλειδιά**

3D–2D μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, μόνιμοι μαγνήτες, κεκλιμένοι μαγνήτες, σύγχρονη γεννήτρια, ANSYS.

## **Abstract**

The scope of this thesis was the three dimensional numerical analysis using the finite element method of a multipole synchronous permanent magnet machine as well as the development of an algorithm with which one can represent graphically the three dimensional field distribution.

The three dimensional numerical analysis, as well as the two dimensional, was performed by using the sixth edition of the program ANSYS and has been applied at a 24-pole, without skew, permanent magnet synchronous generator as well as at one with skew slots.

Emphasis has been given to the difficulties as well as the advantages that arise from a typical three - dimensional analysis and to the development of the specific algorithm, which once applied, would enable the sufficient comparison between different types of analysis and furthermore the comparison between electrical machines of complex topology.

## **Key Words**

3D-2D finite element method, permanent magnets, rotor skew, synchronous generators, ANSYS.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την αριθμητική ανάλυση, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, μίας σύγχρονης 24-πολικής μηχανής μόνιμων μαγνητών. Η αριθμητική ανάλυση της σύγχρονης μηχανής έγινε με την βοήθεια της έκτης έκδοσης του προγράμματος ANSYS και σκοπός αυτής είναι η εύρεση της κατανομής βασικών πεδιακών μεγεθών.

Στα πλαίσια του Ερευνητικού Προγράμματος «Σχεδίαση και Κατασκευή Ανεμογεννήτριας ισχύος 25kW», το οποίο χρηματοδοτήθηκε από την Γ.Γ.Ε.Τ και την εταιρία Flash PkP, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε δοκίμιο σύγχρονης 24-πολικής γεννήτριας με μόνιμους επιφανειακούς μαγνήτες χωρίς κλίση και ισχύος 2,5kW. Σκοπός του δοκιμίου ήταν η επιβεβαίωση της προκαταρκτικής σχεδίασης της ηλεκτρογεννήτριας των 25kW καθώς και η βελτιστοποίηση αυτής. Βάσει της γεωμετρίας και των υλικών κατασκευής του δοκιμίου σχεδιάστηκαν στο ANSYS ένα δισδιάστατο μοντέλο και δύο τρισδιάστατα εκ' των οποίων το πρώτο διαθέτει μόνιμους χωρίς κλίση μαγνήτες ενώ το άλλο κεκλιμένους μαγνήτες. Επιπροσθέτως και στα δύο τρισδιάστατα μοντέλα έχουν εισαχθεί περιοχές που τα περιβάλλουν προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του αέρα στην κατανομή της πυκνότητας ροής της μηχανής. Προσπάθεια καταβλήθηκε για την όσο το δυνατόν ακριβή απόδοση της γεωμετρίας και των ιδιοτήτων των διαφόρων υλικών του δοκιμίου.

Αντικείμενο του κυρίου κορμού της διπλωματικής είναι η τρισδιάστατη αριθμητική ανάλυση και αυτό επειδή ενδείκνυται για τη μελέτη μηχανών με πολύπλοκη τοπολογία, όπως σύγχρονων μηχανών με κεκλιμένους μαγνήτες, καθώς και για την μελέτη της επίδρασης του αέρα στην κατανομή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο της μηχανής. Η τρισδιάστατη ανάλυση όμως παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας της σύγχρονης μηχανής, των περιορισμών που θέτει το πρόγραμμα εξομοίωσης ANSYS καθώς και των αυξημένων αναγκών της συγκεκριμένης ανάλυσης σε υπολογιστικούς πόρους. Έτσι επιβάλλεται η αξιοποίηση των συμμετριών του προβλήματος για την ελαχιστοποίηση του μεγέθους του προβλήματος, η κατάλληλη σχεδίαση και πλεγματοποίηση του μοντέλου καθώς και η εφαρμογή συγκεκριμένων συνοριακών συνθηκών. Απαραίτητη δε είναι η υιοθέτηση συμβιβασμών σε κάθε βήμα της ανάλυσης, δεδομένου των περιορισμών που τίθενται από το ANSYS και τους υπολογιστικούς πόρους των προσωπικών υπολογιστών, προκειμένου να προκύψει μία ακριβής λύση στις περιοχές ενδιαφέροντος του τρισδιάστατου μοντέλου καθώς και για να αξιοποιηθούν στο έπακρο οι δυνατότητες του προγράμματος εξομοίωσης.

Η διπλωματική αρχίζει με την βασική διαστασιολόγηση της ηλεκτρογεννήτριας των 25kW η οποία αναλύεται στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Τα αποτελέσματα αυτής της προκαταρκτικής σχεδίασης αξιοποιούνται για την σχεδίαση και τον προσδιορισμό των υλικών κατασκευής του δοκιμίου στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Ακολουθεί μετά ο κύριος κορμός της διπλωματικής που αποτελείται από επτά κεφάλαια και αρχίζει με τον ορισμό του προβλήματος στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Στην συνέχεια και με δεδομένη την γεωμετρία του δοκιμίου υλοποιείται στο σχεδιαστικό περιβάλλον του προγράμματος εξομοίωσης το δισδιάστατο μοντέλο βάσει του οποίου προκύπτουν μετά τα τρισδιάστατα μοντέλα με μαγνήτες χωρίς κλίση και με κεκλιμένους μαγνήτες, 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Στο 5<sup>ο</sup> και στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο αντίστοιχα αποδίδονται τα υλικά στις επιμέρους περιοχές των μοντέλων και κατασκευάζεται το πλέγμα ενώ στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο εφαρμόζονται οι απαιτούμενες συνοριακές συνθήκες. Στην συνέχεια στο 8<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται η λύση του δισδιάστατου μοντέλου στην εν κενώ, στην υπό μηδενική διέγερση και στην υπό φορτίο λειτουργία καθώς και η λύση για την εν

κενώ λειτουργία των δύο τρισδιάστατων μοντέλων. Στο 9<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται η επεξεργασία των αποτελεσμάτων της λύσης τόσο για το δισδιάστατο όσο και για τα δύο τρισδιάστατα μοντέλα. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων γίνεται μέσω ενός αλγορίθμου, ο οποίος δίνεται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, σκοπός του οποίου είναι η γραφική αναπαράσταση πεδιακών μεγεθών δύο ανεξάρτητων μεταβλητών μέσω επιφανειών στο χώρο. Η διπλωματική ολοκληρώνεται με το 10<sup>ο</sup> κεφάλαιο όπου γίνεται η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την δισδιάστατη και την τρισδιάστατη ανάλυση καθώς και η σύγκριση μεταξύ των δύο τρισδιάστατων μοντέλων.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Γ. Καλοκύρη, υποψήφιο διδάκτορα του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου και τον κύριο Α. Κλαδά, Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου και υπεύθυνο της διπλωματικής, για την πολύτιμη βοήθεια τους.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b>	<b>Βασική διαστασιολόγηση ηλεκτρογεννήτριας 25kW</b>	<b>7</b>
1.1	Εισαγωγή	15
1.2	Βασικές προδιαγραφές του σχεδιασμού της σύγχρονης γεννήτριας	15
1.3	Βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης	17
1.4	Προκαταρκτική σχεδίαση της σύγχρονης γεννήτριας	19
1.4.1	Προσδιορισμός της επιφάνειας του διακένου	19
1.4.2	Προσδιορισμός της γεωμετρίας του στάτη	20
1.4.3	Προσδιορισμός της γεωμετρίας του δρομέα	21
1.4.4	Υπολογισμός ειδικών φορτίσεων	24
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b>	<b>Προκαταρκτική σχεδίαση δοκιμίου</b>	<b>25</b>
2.1	Εισαγωγή	27
2.2	Προκαταρκτική σχεδίαση του δοκιμίου της σύγχρονης γεννήτριας	27
2.2.1	Διαμόρφωση στάτη και δρομέα	27
2.2.2	Υπολογισμός ειδικών φορτίσεων του δοκιμίου	29
2.2.3	Τελική διαμόρφωση δοκιμίου	30
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b>	<b>Ορισμός του προβλήματος</b>	<b>31</b>
3.1	Εισαγωγή	33
3.2	Φιλτράρισμα των επιλογών.	33
3.3	Επιλογή του τύπου του στοιχείου (element type) από το οποίο θα αποτελείται το πλέγμα του μοντέλου	33
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b>	<b>Σχεδίαση του δισδιάστατου και των τρισδιάστατων μοντέλων</b>	<b>36</b>
4.1	Εισαγωγή	37
4.2	Επιλογή συστήματος συντεταγμένων	38
4.3	Επιλογή μονάδων γωνίας	38
4.4	Σημεία (Keypoints)	39
4.5	Γραμμές (Lines)	40
4.6	Καμπύλες (Arcs)	40
4.7	Περιοχές (Areas)	41
4.8	Όγκοι (Volumes)	47
4.9	Σχεδίαση του τρισδιάστατου μοντέλου με μαγνήτες με κλίση	51
4.10	Σχεδίαση του πλήρους τρισδιάστατου μοντέλου της σύγχρονης γεννήτριας	54
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</b>	<b>Απόδοση υλικών στο δισδιάστατο και στο τρισδιάστατο μοντέλο</b>	<b>57</b>
5.1	Εισαγωγή	59
5.2	Αέρας	59
5.3	Σίδηρος	61

5.4	Μαγνήτης	65
5.5	Ατσάλι	71
5.6	Υλικά στο δισδιάστατο μοντέλο	72
5.6.1	Χαλκός	72
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6</b>	<b>Πλεγματοποίηση του δισδιάστατου και του τρισδιάστατου μοντέλου</b>	<b>73</b>
6.1	Εισαγωγή	75
6.2	Διαφορές μεταξύ πραγματικού και φυσικού μοντέλου και πως η κατασκευή του πλέγματος καθορίζει την σχεδίαση του φυσικού μοντέλου	76
6.3	Επιλογή της μεθόδου ανάλυσης	77
6.4	Επιλογή του τύπου του στοιχείου (element type) από το οποίο θα αποτελείται το πλέγμα του φυσικού μοντέλου	78
6.4.1	Τύπος στοιχείου για το δισδιάστατο μοντέλο (PLANE 13)	79
6.4.2	Τύπος στοιχείου για το τρισδιάστατο μοντέλο (SOLID 96)	80
6.5	Κατασκευή του πλέγματος	82
6.5.1	Πλεγματοποίηση του τρισδιάστατου μοντέλου	82
6.5.2	Πλεγματοποίηση του δισδιάστατου μοντέλου	89
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7</b>	<b>Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών και φορτίων</b>	<b>93</b>
7.1	Εισαγωγή	95
7.2	Συμμετρίες του προβλήματος	95
7.3	Κατοπτρική περί το X-Z επίπεδο συμμετρία του πλέγματος	99
7.4	Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών στο τρισδιάστατο μοντέλο	101
7.5	Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών στο δισδιάστατο μοντέλο	104
7.6	Εφαρμογή φορτίων στο δισδιάστατο μοντέλο	106
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8</b>	<b>Λύση του δισδιάστατου και του τρισδιάστατου προβλήματος</b>	<b>111</b>
8.1	Εισαγωγή	113
8.2	Λύση του δισδιάστατου φυσικού μοντέλου	113
8.2.1	Λύση του δισδιάστατου μοντέλου στην εν κενώ λειτουργία	114
8.2.2	Λύση του δισδιάστατου μοντέλου με μηδενική διέγερση	117
8.2.3	Λύση του δισδιάστατου μοντέλου στην υπό φορτίο λειτουργία	119
8.2.4	Λύση του πλήρους δισδιάστατου μοντέλου στην εν κενώ λειτουργία	120
8.3	Λύση του τρισδιάστατου φυσικού μοντέλου	122
8.3.1	Λύση του τρισδιάστατου μοντέλου με μαγνήτες χωρίς κλίση	124
8.3.2	Λύση του τρισδιάστατου μοντέλου με μαγνήτες με κλίση	125
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9</b>	<b>Επεξεργασία των αποτελεσμάτων</b>	<b>127</b>
9.1	Εισαγωγή	129
9.2	Καθορισμός του τόξου και της επιφάνειας στο μέσον του διακένου του δισδιάστατου και του τρισδιάστατου μοντέλου αντίστοιχα	129
9.3	Εύρεση της χαρακτηριστικής πεδιακών μεγεθών συναρτήσει του μήκους του τόξου μοντέλου, μέσω του προγράμματος ANSYS	130

9.4	Εύρεση της χαρακτηριστικής πεδιακών μεγεθών συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας, στο μέσον του διακένου του δισδιάστατου μοντέλου, μέσω κατάλληλου αλγορίθμου	132
9.5	Εύρεση της χαρακτηριστικής του πλάτους της πυκνότητας ροής συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας και του αξονικού μήκους, στο διάκενο του τρισδιάστατου μοντέλου, μέσω κατάλληλου αλγορίθμου	140
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10</b>	<b>Συγκρίσεις και εξαγωγή συμπερασμάτων</b>	147
10.1	Εισαγωγή	149
10.2	Σύγκριση μεταξύ αποτελεσμάτων διάφορων δισδιάστατων αναλύσεων	149
10.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των δισδιάστατων και των τρισδιάστατων αναλύσεων	152
10.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των τρισδιάστατων μοντέλων με μαγνήτες χωρίς κλίση και με κεκλιμένους μαγνήτες	155
<b>Παράρτημα 1</b>	<b>Βιβλιογραφία</b>	159
<b>Παράρτημα 2</b>	<b>Συμβολισμοί</b>	161





# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

**ΒΑΣΙΚΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ  
ΗΛΕΚΤΡΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ 25kW**



### **1.1 Εισαγωγή.**

Στην παρούσα ενότητα θα πραγματοποιηθεί αρχικά η βασική διαστασιολόγηση της ηλεκτρικής γεννήτριας των 25kW. Η συγκεκριμένη γεννήτρια θα είναι σύγχρονη, πολυπολική, μονίμων μαγνητών και ο δρομέας της θα οδηγείται απευθείας από τον έλικα του ανεμοκινητήρα. Η έξοδος της γεννήτριας θα είναι συνδεδεμένη σε ένα μετατροπέα συχνότητας μέσω του οποίου θα συνδέεται η σύγχρονη γεννήτρια στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Στόχος είναι, μέσω της συγκεκριμένης σύγχρονης γεννήτριας σε συνθήκες μόνιμης λειτουργίας, να μετατραπεί η μηχανική ισχύς στην είσοδο της γεννήτριας, η μέγιστη τιμή της οποίας είναι 25kW, σε ηλεκτρική ισχύ στην έξοδο του μετατροπέα συχνότητας, η μέγιστη τιμή της οποίας θα είναι 20kW αν θεωρηθεί ότι ο συντελεστής απόδοσης της διάταξης γεννήτριας-μετατροπέα είναι 80%.

### **1.2 Βασικές προδιαγραφές του σχεδιασμού της σύγχρονης γεννήτριας.**

Οι βασικές προδιαγραφές, που πρέπει να ικανοποιούνται από την σύγχρονη γεννήτρια, προκύπτουν από τις χαρακτηριστικές μηχανικής ισχύος-ταχύτητας περιστροφής του αεροκινητήρα. Οι χαρακτηριστικές αυτές αφορούν τις δύο παρακάτω βασικές λειτουργικές καταστάσεις της ανεμογεννήτριας.

- Τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, στην οποία πρέπει να καταβληθεί προσπάθεια για να μεγιστοποιηθεί η παρεχόμενη ισχύς και για να επιτευχθεί θερμική ισορροπία.
- Τη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας, η οποία χαρακτηρίζεται από την μικρή χρονική διάρκεια αυτής. Η ανεμογεννήτρια επανέρχεται στην μόνιμη κατάσταση έπειτα από μια απότομη μεταβολή ενός μεγέθους, όπως την ταχύτητα του ανέμου. Στην συγκεκριμένη λειτουργία είναι επιτρεπτή η περιορισμένη υπερφόρτιση της σύγχρονης γεννήτριας και επιπροσθέτως μεταβάλλεται σημαντικά η θερμική κατάσταση αυτής.

Βασικός στόχος είναι να προσδιοριστεί η απαιτούμενη χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας περιστροφής του δρομέα στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, η οποία επιτρέπει την ομαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας για όλες τις θεωρούμενες ταχύτητες του ανέμου. Επίσης σε περίπτωση απότομης μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου πρέπει να εξασφαλιστεί η επαναφορά της σύγχρονης γεννήτριας στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας μετά από μια ελεγχόμενη υπερφόρτιση μικρής διάρκειας.

Για τον συγκεκριμένο αεροκινητήρα, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα,  $n$ , κυμαίνεται μεταξύ 100 ΣΑΛ και 120ΣΑΛ. Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής δίνεται από την πιο κάτω σχέση:

$$\omega_{rm} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \Rightarrow \omega_{rm} = 10,47 \frac{rad}{sec} \text{ για } n = 100\text{ΣΑΛ}, \quad \omega_{rm} = 12,57 \frac{rad}{sec} \text{ για } n = 120\text{ΣΑΛ}$$

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή του διακένου για μηχανική ισχύ,  $P_m$  ίση με 25kW, στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας είναι ίση με:

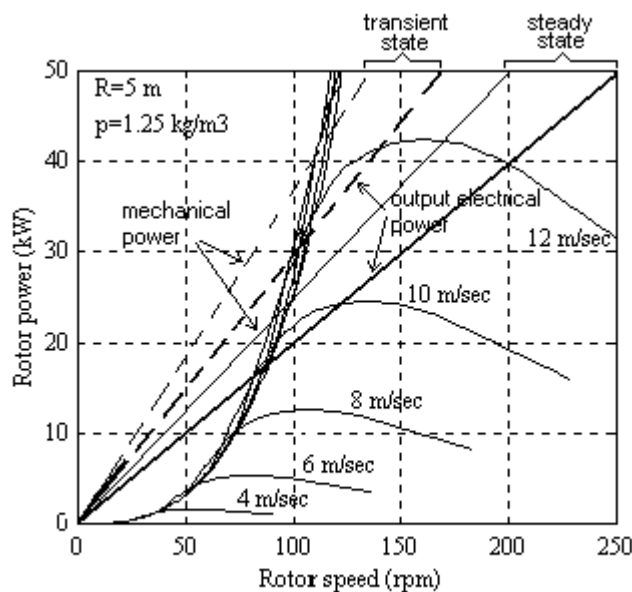
$$T_e = \frac{P_m}{\omega_{rm}} \Rightarrow T_e = 2,39kN \cdot m \text{ για } n = 100\text{ΣΑΛ}, \quad T_e = 1,99kN \cdot m \text{ για } n = 120\text{ΣΑΛ}$$

Στην μεταβατική κατάσταση λειτουργίας θεωρείται αποδεκτή μία υπερφόρτιση μέχρι και 50% παραπάνω από τα αντίστοιχα ονομαστικά μεγέθη προτού η διάταξη ελέγχου επέμβει και επαναφέρει το σύστημα στην κατάσταση της ονομαστικής λειτουργίας. Επειδή η γεννήτρια λειτουργεί υπό σταθερή διέγερση, λόγω των μόνιμων μαγνητών, η χαρακτηριστική μηχανικής ισχύος-ταχύτητας περιστροφής του δρομέα μπορεί να υποθεθεί ότι είναι γραμμική. Συνεπώς με μέγιστη στιγμιαία μηχανική ισχύ 37,5kW επιτυγχάνεται ικανοποιητική ηλεκτρική πέδηση για την αντιμετώπιση των απότομων μεταβολών της ταχύτητας του ανέμου. Η αντίστοιχη στιγμιαία ηλεκτρομαγνητική ροπή της σύγχρονης γεννήτριας θα είναι:

$$T_{e-στιγμιαία} = \frac{P_{m-στιγμιαία}}{\omega_m}$$

$$T_{e-στιγμιαία} = 3,6kN \cdot m \text{ για } n = 100\text{ΣΑΛ}, \quad T_{e-στιγμιαία} = 3kN \cdot m \text{ για } n = 120\text{ΣΑΛ}$$

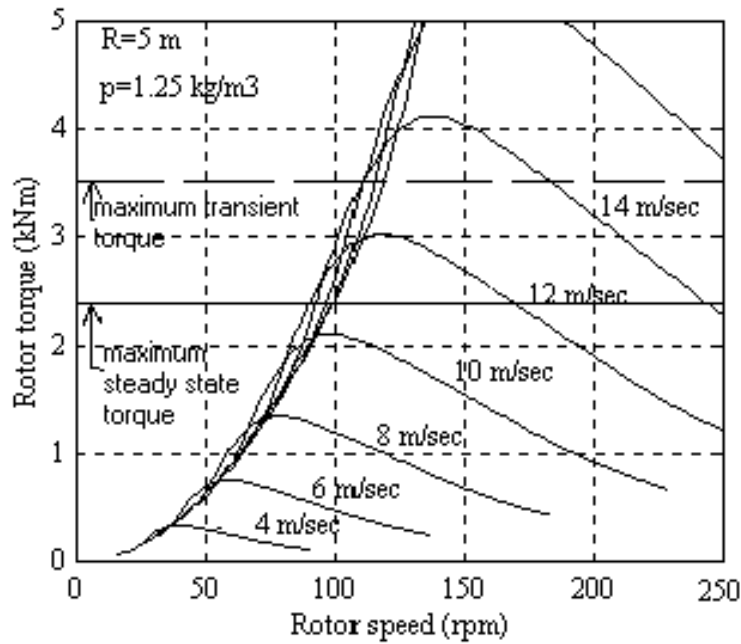
Συνεπώς η μέγιστη δυνατή ηλεκτρομαγνητική ροπή που εμφανίζεται στην σύγχρονη μηχανή είναι 2,39 kN·m στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και 3,6 kN·m κατά την διάρκεια της μεταβατικής κατάστασης λειτουργίας. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές της ισχύος εισόδου και εξόδου της σύγχρονης γεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του αεροκινητήρα, τόσο στην μόνιμη όσο και στην μεταβατική κατάσταση λειτουργίας.



**Γράφημα 1.2-1**

Χαρακτηριστικές της ισχύος εξόδου και εισόδου της σύγχρονης γεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του ανεμοκινητήρα, [11].

Στο γράφημα της επόμενης σελίδας απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας περιστροφής του ανεμοκινητήρα για διάφορες ταχύτητες του ανέμου. Επίσης φαίνονται και τα μέγιστα επίπεδα ροπής που μπορεί να αναπτύξει η σύγχρονη γεννήτρια κατά την μόνιμη και την μεταβατική κατάσταση λειτουργίας. Αυτά θα χρησιμοποιηθούν στην περαιτέρω διαστασιολόγηση της σύγχρονης μηχανής.



**Γράφημα 1.2-2**

Χαρακτηριστικές της ροπής του ανεμοκινητήρα συναρτήσεις της ταχύτητας περιστροφής του ανεμοκινητήρα για διάφορες ταχύτητες του ανέμου, [11].

### 1.3 Βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης.

Η διαστασιολόγηση της σύγχρονης γεννήτριας γίνεται παρακάτω κάνοντας χρήση ορισμένων τυπικών τιμών βασικών μαγνητικών, ηλεκτρικών και θερμικών μεγεθών.

- Ειδική μαγνητική φόρτιση,  $\bar{B}$ , η οποία συνδέει τον αριθμό των πόλων, P, με τη ροή ανά πόλο, Φ, και την επιφάνεια του διακένου, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\bar{B} = \frac{P \cdot \Phi}{\pi \cdot D \cdot L}$$

Όπου D είναι η διάμετρος του διακένου και L το μήκος του ενεργού τμήματος της μηχανής. Τυπικές τιμές της συγκεκριμένης παραμέτρου είναι μεταξύ 0,5 και 0,6 Tesla.

- Ειδική ηλεκτρική φόρτιση ac, η οποία προσδιορίζεται από την ενεργό τιμή των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο περιφέρειας του διακένου:

$$ac = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_s \cdot I}{\pi \cdot D}$$

Όπου  $N_s$  είναι ο συνολικός αριθμός ελιγμάτων ανά φάση και I το φασικό ρεύμα.

- Η ενεργός τιμή της επαγόμενης τάσης δίνεται από την εξής σχέση:

$$E = 4,44 \cdot k_w \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi \quad (1.3-1)$$

Όπου  $k_w$  είναι ο συντελεστής τυλίγματος,  $f$  είναι η ηλεκτρική συχνότητα και  $\Phi$  είναι η θεμελιώδης αρμονική της ανά πόλου ροής.

- Η φαινόμενη ισχύς της μηχανής δίνεται από την σχέση:

$$S = 3 \cdot E \cdot I$$

- Η ηλεκτρική συχνότητα δίνεται από την σχέση:

$$f = \frac{P}{2} \cdot n$$

- Σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει η κάτωθι σχέση:

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

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

- Η οριακή τάση διακένου αποτελεί βασικό μέγεθος της μηχανικής αντοχής της γεννήτριας. Το μέγεθος αυτό προσδιορίζεται αν διαιρέσουμε τη φυγόκεντρο δύναμη,  $F$ , του δρομέα με το εμβαδόν του διακένου,  $A$ . Τα μεγέθη αυτά περιγράφονται αντίστοιχα από τις κάτωθι σχέσεις:

$$F = m \cdot \omega_{rm}^2 \cdot R$$

$$A = \pi \cdot D \cdot L$$

$$\text{Οριακή τάση διακένου} = \frac{F}{A}$$

Όπου  $m$  είναι η ισοδύναμη μάζα του δρομέα στην περιφέρεια του και  $R$  η ακτίνα του δρομέα.

- Η πυκνότητα ρεύματος του τυλίγματος αποτελεί βασικό ηλεκτρικό μέγεθος της μηχανής και σχετίζεται άμεσα με την θερμική ισορροπία αυτής. Αν η πυκνότητα του ρεύματος ξεπεράσει τα  $4 \text{ A/mm}^2$  είναι απαραίτητη η εξαναγκασμένη ψύξη της μηχανής. Στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας η θερμική ισορροπία εξαρτάται από τις δυνατότητες του αερισμού. Ο υπολογισμός της απαιτούμενης ποσότητας αέρα  $Q$  σε  $\text{m}^3/\text{sec}$  εξαρτάται από την ισχύ απωλειών  $P_{απ}$  σε μονάδες kW, από τη θερμοκρασιακή αύξηση της μηχανής  $\theta_{μχ}$  σε  $^{\circ}\text{C}$ , από τη θερμοκρασία της κρύας μηχανής  $\theta_{κρ}$  σε  $^{\circ}\text{C}$  και από την πίεση  $H$  σε mmHg σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q = 0,78 \cdot \frac{P_{απ}}{\theta_{μχ}} \cdot \frac{\theta_{κρ} + 273}{273} \cdot \frac{760}{H}$$

- Η αναλογία των διαστάσεων  $D$  και  $L$  διαφέρει ανάλογα με το μέγεθος της μηχανής. Συγκεκριμένα για μικρές μηχανές ισχύει  $D \cong L$ , ενώ για μεγάλες γεννήτριες, όπως μονάδες των 300MVA, ισχύει  $D \cong 1\text{m}$  και  $L \cong 10\text{m}$  για διπολικές και προκειμένου για τετραπολικές ισχύει  $D \cong 2\text{m}$  και  $L \cong 10\text{m}$ . Σε ειδικές κατασκευές μπορεί αυτό το κριτήριο να μην εφαρμοστεί.

## 1.4 Προκαταρκτική σχεδίαση της σύγχρονης γεννήτριας.

Η προκαταρκτική σχεδίαση της γεννήτριας αρχίζει με τον προσδιορισμό της επιφάνειας του διακένου. Ακολουθούν ο προσδιορισμός των διαμορφώσεων του στάτη και του δρομέα και τέλος γίνεται ο έλεγχος των μαγνητικών και ηλεκτρικών ειδικών φορτίσεων.

### 1.4.1 Προσδιορισμός της επιφάνειας του διακένου.

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή του διακένου μπορεί να υπολογιστεί με την βοήθεια της μέσης επαπτομενικής πίεσης των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο,  $P_t$ , και την επιφάνεια του διακένου σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned} F_t &= P_t \cdot A \\ T_e &= \frac{1}{2} \cdot D \cdot F_t \\ T_e &= \frac{\pi}{2} \cdot D^2 \cdot L \cdot P_t \end{aligned} \quad (1.4.1-1)$$

Επειδή η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι μικρή και επειδή η σύγχρονη γεννήτρια πρέπει να αναπτύσσει ροπή σημαντικού μεγέθους θα πρέπει συνεπακόλουθα να μεγιστοποιηθεί και η διάμετρος  $D$  εφόσον η ροπή είναι ανάλογη του τετραγώνου αυτής. Με τον τρόπο αυτό υιοθετείται η δισκοειδής δομή του ενεργού μέρους της σύγχρονης μηχανής. Μία τιμή διαμέτρου, που εξασφαλίζει και την ευκολία στην κατασκευή του δρομέα, είναι  $D \cong 0,7\text{m}$ .

Ένα σημαντικό διαστατικό μέγεθος του ενεργού μέρους της μηχανής είναι το μήκος  $L$  μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η επιθυμητή τιμή ροπής. Θεωρείται ότι η μέση επαγωγή διακένου είναι της τάξης των 0,6 Tesla και η βέλτιστη γωνία κατεύθυνσης σε όλο το διάκενο είναι  $45^\circ$ . Η μαγνητική δύναμη στο διάκενο δίνεται από την σχέση:

$$F_t = L \cdot \oint_c B_n \cdot H_t dc \Leftrightarrow F_t = \frac{L}{\mu_o} \cdot \oint_c B_n \cdot B_t dc$$

Όπου  $B_n$ ,  $B_t$  είναι αντίστοιχα η επαπτομενική και η κάθετη συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο. Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$P_t = \frac{1}{\pi \cdot D \cdot \mu_o} \cdot \oint_c B_n \cdot B_t dc$$

Λαμβάνεται ως μέση τιμή της επαπτομενικής και της κάθετης συνιστώσας η παρακάτω:

$$B_n = B_t = 0,6 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \text{ Tesla}$$

Η μέση τιμή της επαπτομενικής πίεσης των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο θα είναι ίση με:

$$P_t = 143 \frac{kN}{m^2}$$

Με βάση την σχέση (1.4.1-1) και προκειμένου να εξασφαλιστεί ροπή 3,6 kN·m απαιτείται αξονικό μήκος  $L = 0,033m$ . Αν ληφθεί υπόψη και η ανομοιομορφία της κατανομής στο διάκενο και η σκέδαση της μαγνητικής ροής, η προτεινόμενη τιμή του ενεργού μήκους της μηχανής είναι ίση με  $L = 0,05m$ . Το πλάτος του διακένου,  $L_\delta$ , επιλέγεται σύμφωνα με μία εμπειρική σχέση που ισχύει για μηχανές μεγάλης διαμέτρου.

$$L_\delta = 1,6 \cdot \sqrt{D} - 0,25 = 1,088mm \Rightarrow L_\delta \cong 1mm$$

### **1.4.2 Προσδιορισμός της γεωμετρίας του στάτη.**

Ο αριθμός των πόλων  $P$  προσδιορίζεται έτσι, ώστε να είναι δυνατή η απ' ευθείας ζεύξη της γεννήτριας στο δίκτυο για τη μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας της σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{P}{2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{\omega_m}$$

Αν θέσουμε μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας ίση με 120 ΣΑΛ και συχνότητα της παραγόμενης τάσης ίση με 50 Hz, τότε ο αριθμός των πόλων θα είναι ίσος με  $P = 50$ . Αν χρησιμοποιηθεί και ένας μετατροπέας συχνότητας, τότε η συχνότητα της παραγόμενης τάσης μπορεί να είναι μεταβλητή φθάνοντας σε επίπεδα διπλάσιας της συχνότητας του δικτύου. Ωστόσο θα πρέπει να έχουν επιλεγεί εκ των προτέρων σιδηρελάσματα χαμηλών απωλειών για την κατασκευή του στάτη.

Αν θεωρηθεί ότι το τυλίγμα της γεννήτριας είναι συνδεδεμένο κατά αστέρα, όλα τα πηνία είναι συνδεδεμένα εν σειρά και αντιστοιχεί μία αύλακα ανά πόλο και φάση, τότε η ενεργός τιμή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης ανά φάση δίνεται από τη σχέση (1.3-1). Η μαγνητική ροή ανά πόλο προκύπτει από τη μέση τιμή της επαγωγής του διακένου σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Phi = \frac{B \cdot A}{P} = \frac{\sqrt{B_n^2 + B_t^2} \cdot \pi \cdot D \cdot L}{P} = \frac{\sqrt{2 \cdot \left(0,6 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2} \cdot \pi \cdot 0,7 \cdot 0,05}{50} = 1,32 \cdot 10^{-3} Wb$$

Από την σχέση (1.3-1) και θεωρώντας συντελεστή τυλίγματος μονάδα και εφόσον είναι γνωστά η επαγόμενη τάση η συχνότητα και η ροή ανά πόλο υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός των εν σειρά συνδεδεμένων πηνίων να είναι ίσος με  $N_s = 750$ . Από την παρακάτω σχέση υπολογίζεται και ο αριθμός των σπειρών ανά πηνίο.

$$N_i = \frac{2 \cdot N_s}{P} = \frac{2 \cdot 750}{50} = 30 \text{ σπείρες ανά πηνίο}$$

Το ρεύμα του στάτη στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας δεδομένου ότι η ενεργός τιμή της φασικής τάσης είναι 220V, ο συντελεστής ισχύος είναι 0,8 και η ονομαστική ηλεκτρική ισχύς είναι 25 kW, δίνεται από την σχέση:



$$I = \frac{P_{el}}{3 \cdot V \cdot \cos \phi} = 47,3 \text{ A}$$

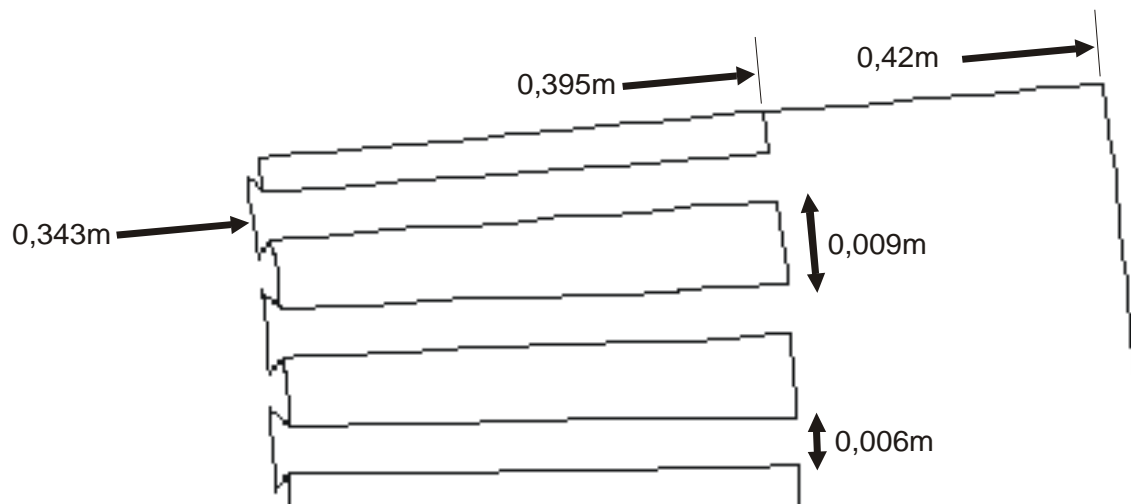
Η συνολική ενεργός μαγνητεγερτική δύναμη είναι ίση με:

$$ME\Delta = N_i \cdot I = 1420 \text{ AE}$$

Αν θεωρηθεί ότι η επιτρεπτή πυκνότητα ρεύματος,  $J$ , είναι ίση με  $5 \text{ A/mm}^2$ , λόγω της ύπαρξης του ανεμιστήρα που ευθύνεται για τη ψύξη της διάταξης, προκύπτει ότι η διατομή του χαλκού ανά αύλακα θα δίνεται από τη σχέση:

$$A_{Cu} = \frac{ME\Delta}{J} = 284 \text{ mm}^2, \text{ προτεινόμενη τιμή είναι } A_{\text{αύλακας}} = 350 \text{ mm}^2$$

Επίσης στις οδοντώσεις του στάτη η τιμή της μαγνητικής επαγωγής δεν πρέπει να ξεπερνά το  $1,5 \text{ Tesla}$  για λόγους αποφυγής του κορεσμού της λαμαρίνας, οπότε το πλάτος θα είναι  $0,006 \text{ m}$ .

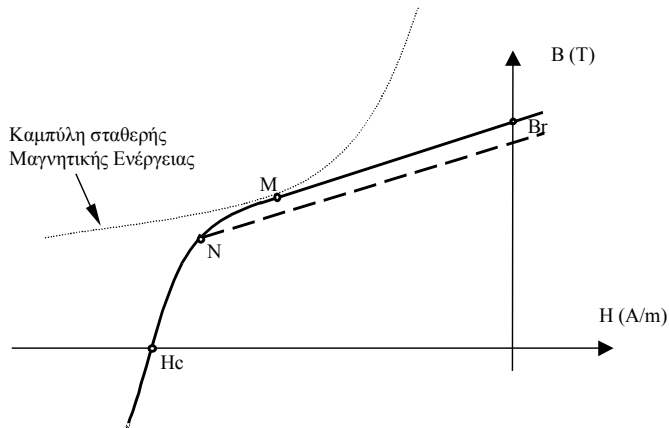


**Σχήμα 1.4.2-1**

Γεωμετρία του στάτη της σύγχρονης γεννήτριας των 25kW, [11].

### **1.4.3 Προσδιορισμός της γεωμετρίας του δρομέα.**

Το βασικό κριτήριο επιλογής του υλικού του μόνιμου μαγνήτη είναι ότι στη μέγιστη φόρτιση της μηχανής το υλικό δεν πρέπει να φτάσει κάτω από το γόνατο της χαρακτηριστικής απομαγνήτισης έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη μαγνητική ενέργεια, σημείο M της τυπικής χαρακτηριστικής του μόνιμου μαγνήτη. Αν κατά την λειτουργία το μαγνητικό υλικό οδηγηθεί σε χαμηλότερο σημείο της χαρακτηριστικής, για παράδειγμα στο σημείο N, τότε το υλικό απομαγνητίζεται, δηλαδή μετά την απομάκρυνση του εξωτερικού πεδίου θα προκύψει μία άλλη χαρακτηριστική καμπύλη κορεσμού. Τα παραπάνω φαίνονται στο γράφημα 1.4.3-1 της επόμενης σελίδας. Αν αλλάξει η καμπύλη απομαγνήτισης του μαγνητικού υλικού, τότε θα μεταβληθεί και η συμπεριφορά της σύγχρονης γεννήτριας λόγω της μεταβολής των αλληλεπαγωγών και των αυτεπαγωγών σκεδάσεως.

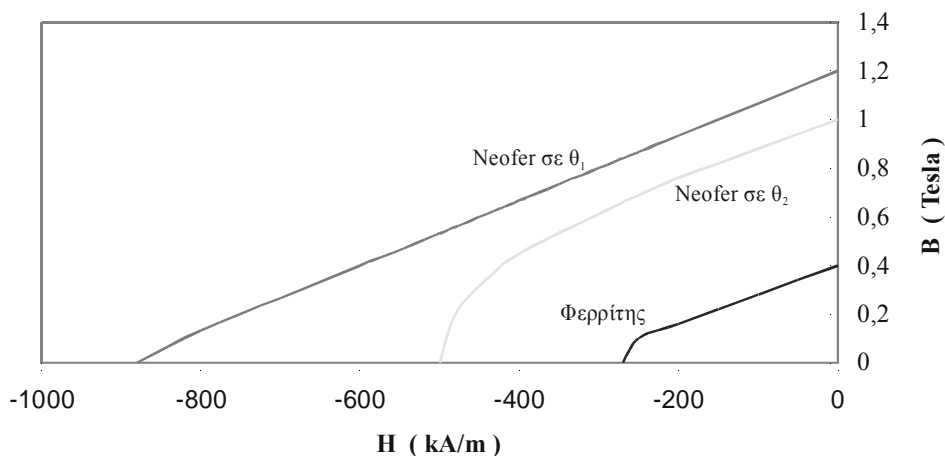
**Γράφημα 1.4.3-1**

Χαρακτηριστική απομαγνήτισης τυπικού μαγνητικού υλικού, [11].

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η αναγκαία μαγνητική ροή στο διάκενο θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν τα ακόλουθα μαγνητικά υλικά.

- Υλικά υψηλής μαγνήτισης, κράματα Νεοδυμίου – Σιδήρου – Βορίου, με επιφανειακή δομή πάνω στο δρομέα. Έχουν μεγάλη παραμένουσα μαγνήτιση, γύρω στο 1,2 Tesla, και υψηλή απομαγνητίζουσα δύναμη,  $-H_c = 1000 \text{ kA/m}$  στους  $20^\circ\text{C}$ . Παρουσιάζουν το μειονέκτημα της ευαισθησίας στη θερμοκρασία. Γι' αυτό πρέπει η θερμοκρασία να περιοριστεί σε μία τιμή κάτω από τους  $150^\circ\text{C}$ .
- Υλικά χαμηλής μαγνήτισης, φερρίτες, με εγκάρσια δομή στο δρομέα, με παραμένουσα μαγνήτιση 0,35 Tesla και απομαγνητίζουσα δύναμη  $-H_c = 150 \text{ kA/m}$  για το φερρίτη 22/15. Δεν είναι τόσο ευαίσθητοι στις μεταβολές της θερμοκρασίας.
- Επίσης υπάρχουν και οι μόνιμοι μαγνήτες τύπου Alnico που δεν επηρεάζονται από τη θερμοκρασία, με υψηλή παραμένουσα μαγνήτιση, αλλά πολύ χαμηλή απομαγνητίζουσα δύναμη. Επίσης η καμπύλη απομαγνήτισης είναι εξαιρετικά μη γραμμική και είναι αρκετά ακριβοί. Γι' αυτό αποκλείστηκε από την αρχή η χρήση τους στη συγκεκριμένη σύγχρονη γεννήτρια.

Από τις χαρακτηριστικές των κατασκευαστών, όπως φαίνεται και στο παρακάτω γράφημα, προκύπτει ότι το γόνατο της χαρακτηριστικής στο υλικό Neofer 230/80 είναι στα 0,4 T και στο φερρίτη 22/15 είναι στα 0,15 T. Γι' αυτό οι αντίστοιχες ονομαστικές συνθήκες είναι 0,85 T και 0,275 T.

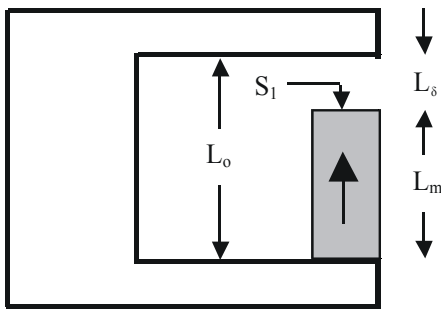
**Γράφημα 1.4.3-2**

Χαρακτηριστική απομαγνήτισης μόνιμων μαγνητών τύπου Neofer 230/80 για δύο διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας,  $\theta_1 = -40^\circ\text{C}$  και  $\theta_2 = 80^\circ\text{C}$ , και τύπου φερρίτη 22/15, [11].

Στην περίπτωση ενός επιφανειακού μόνιμου μαγνήτη που είναι σε άμεση επαφή με τον σιδηροπυρήνα, δηλαδή  $L_m = L_o$  από το σχήμα 1.4.3-1, η ροή θα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Phi_r = B_r \cdot S_1 = ME\Delta \cdot \frac{\mu \cdot S_1}{L_m}$$

Όπου  $L_m$  είναι η διάσταση του μόνιμου μαγνήτη κατά μήκος του διακένου,  $L_o$  είναι το μέγιστο μήκος του διακένου,  $B_r$  είναι η παραμένουσα μαγνήτιση του μόνιμου μαγνήτη και  $S_1$  το εμβαδόν αυτού.



**Σχήμα 1.4.3-1**

Απλοποιημένη γεωμετρία επιφανειακού μαγνήτη, [11].

Αν ισχύει  $L_o = L_m + L_\delta$ , όπως στο σχήμα 1.4.3-1, και αν θεωρηθεί ότι η μαγνητεγερτική δύναμη παραμένει σταθερή τότε η ροή θα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Phi_\delta = B_\delta \cdot S_1 = ME\Delta \cdot \frac{\mu \cdot S_1}{L_o}$$

Οπότε από τις δύο παραπάνω σχέσεις προκύπτει η επόμενη σχέση:

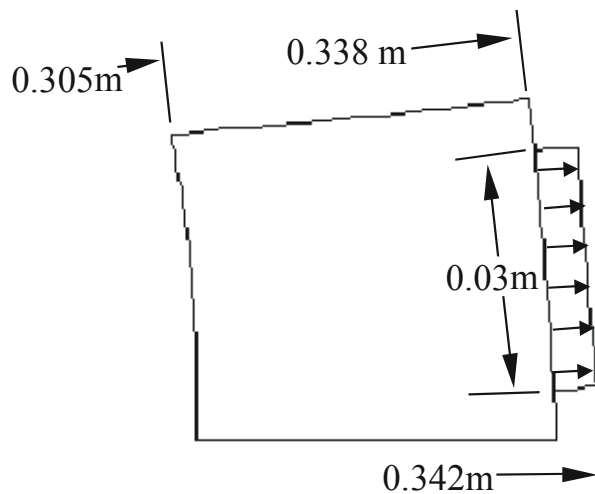
$$B_\delta = B_r \cdot \frac{L_m}{L_o}$$

Από την παραπάνω σχέση και λόγω του ότι  $L_o = L_m + L_\delta$  (από το σχήμα 1.4.3-1), προκύπτει ότι για να κυμαίνεται η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο στο 80% της παραμένουσας μαγνήτισης θα πρέπει να ισχύει  $L_m = 0,8 \cdot L_o$  και  $L_\delta = 0,2 \cdot L_o$ . Συνεπώς με μήκος διακένου  $L_\delta = 1\text{mm}$  προκύπτει ότι το πάχος των επιφανειακών μαγνητών είναι  $L_m = 4\text{mm}$ . Αν η ροή στο διάκενο είναι  $\Phi_\delta = 1,32\text{mWb}$  και η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο είναι  $B_\delta = 0,85\text{T}$ , τότε το περιφερειακό μήκος του μόνιμου μαγνήτη θα είναι ίσο με:

$$\Phi_\delta = B_\delta \cdot S_1 \Rightarrow S_1 = \frac{\Phi_\delta}{B_\delta} \Rightarrow L \cdot L_{\text{μαγνήτη}} = \frac{\Phi_\delta}{B_\delta} \Rightarrow L_{\text{μαγνήτη}} = \frac{\Phi_\delta}{B_\delta \cdot L} \Rightarrow$$

$$L_{\text{μαγνήτη}} = \frac{1,32 \cdot 10^{-3}}{0,85 \cdot 0,05} = 0,031\text{m}$$

Οι επιφανειακοί μαγνήτες συνεπώς καλύπτουν το 72% της συνολικής επιφάνειας του δρομέα. Στο σχήμα της επόμενης σελίδας παρουσιάζεται η γεωμετρία του δρομέα που εξασφαλίζει μαγνητική ροή ίση με 1,32mWb ανά πόλο.



**Σχήμα 1.4.3-2**

Γεωμετρία του δρομέα με επιφανειακούς μαγνήτες, [11].

Μία επιβεβαίωση της προκαταρκτικής σχεδίασης της σύγχρονης γεννήτριας με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (μεταπτυχιακή εργασία Γ.Ι. Τσεκούρα [11]), έδειξε ότι στην περίπτωση των επιφανειακών μαγνητών το μαγνητικό πεδίο στο διάκενο μεταβάλλεται πολύ λιγότερο από ότι στην περίπτωση των εγκάρσιων μαγνητών για διάφορες συνθήκες φόρτισης της σύγχρονης γεννήτριας. Αυτός είναι και ο λόγος που θα χρησιμοποιηθούν επιφανειακοί μόνιμοι μαγνήτες και όχι εγκάρσιοι. Επίσης η ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων έδειξε ότι η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο μεταβάλλεται πολύ λιγότερο κατά την μετάβαση από το κενό φορτίο σε υπερφόρτιση μέχρι και 50%, αν χρησιμοποιηθούν μαγνήτες Neofer 230/80 παρά αν χρησιμοποιηθούν φερρίτες 22/15. Επειδή και οι δύο τύποι των μαγνητών έχουν το ίδιο περίπου κόστος είναι σαφώς προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί το μαγνητικό υλικό Neofer 230/80.

#### **1.4.4 Υπολογισμός ειδικών φορτίσεων.**

Η ειδική μαγνητική φόρτιση δίνεται από την κάτωθι σχέση:

$$\bar{B} = \frac{P \cdot \Phi}{\pi \cdot D \cdot L} = \frac{50 \cdot 1,32 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 0,7 \cdot 0,05} \cong 0,6 \text{ Tesla}$$

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση, δηλαδή η ενεργός τιμή των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο περιφέρειας διακένου, κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας είναι ίση με:

$$ac = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_s \cdot I}{\pi \cdot D} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 750 \cdot 47,3}{\pi \cdot 0,7} \cong 96 \text{ kA/m}$$

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ  
ΔΟΚΙΜΙΟΥ



## 2.1 Εισαγωγή.

Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η σύγχρονη γεννήτρια των 25kW πρέπει να κατασκευαστεί και να γίνουν διάφορες τροποποιήσεις. Το κόστος όμως για να κατασκευαστεί είναι υψηλό και οι οποιεσδήποτε τροποποιήσεις αρκετά δύσκολες. Για τους παραπάνω λόγους είναι απαραίτητο να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα της προκαταρκτικής σχεδίασης υλοποιώντας ένα δοκίμιο, δηλαδή μία σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών μικρότερων διαστάσεων και συνεπακόλουθα μικρότερου κόστους. Με αυτόν τον τρόπο οι οποιεσδήποτε αλλαγές και η πρόβλεψη των χαρακτηριστικών της γεννήτριας των 25kW θα γίνουν πιο εύκολα. Σημαντικό είναι επίσης να σημειωθεί ότι η προκαταρκτική σχεδίαση του δοκιμίου θα γίνει βάσει των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων που προέκυψαν από την προκαταρκτική σχεδίαση της γεννήτριας των 25kW.

## 2.2 Προκαταρκτική σχεδίαση του δοκιμίου της σύγχρονης γεννήτριας.

Από την προκαταρκτική σχεδίαση της γεννήτριας των 25kW προέκυψαν δύο σημαντικά συμπεράσματα. Ο δρομέας της μηχανής θα πρέπει να έχει μαγνήτες επιφανειακούς και όχι εγκάρσιους. Επίσης οι μόνιμοι μαγνήτες θα είναι τύπου Neofer 230/80. Συνεπώς και το δοκίμιο θα έχει τα δύο παραπάνω χαρακτηριστικά. Το δοκίμιο θα έχει ισχύ 2,5kW.

Κατ' αναλογία με την σύγχρονη γεννήτρια των 25kW, η προκαταρκτική σχεδίαση του δοκιμίου αρχίζει με τον προσδιορισμό των διαμορφώσεων του στάτη και του δρομέα και τέλος γίνεται ο έλεγχος των μαγνητικών και ηλεκτρικών ειδικών φορτίσεων.

### 2.2.1 Διαμόρφωση στάτη και δρομέα.

Το δοκίμιο των 2,5 kW έχει την ίδια δομή με την σύγχρονη γεννήτρια των 25kW, δηλαδή είναι μία πολυπολική, μονίμων μαγνητών σύγχρονη μηχανή και έχει τα παρακάτω ονομαστικά χαρακτηριστικά.

$$P_{ov} = 2.500W$$

$$V_{ov-πολικό} = 380V$$

$$\cos \phi = 0,8$$

Επίσης η συνδεσμολογία των τυλιγμάτων είναι κατά αστέρα. Το δοκίμιο θα σχεδιαστεί με την προϋπόθεση ότι μπορεί να συμβούν υπερφορτίσεις, μικρής διάρκειας, της τάξης του 50%. Συνεπώς η μέγιστη ισχύς που θα πρέπει να παράγει η γεννήτρια θα είναι:

$$P_{max} = 1,5 \cdot 2.500W = 3.750W$$

Από την επόμενη σχέση προκύπτει η μέγιστη ενεργός τιμή του φασικού ρεύματος,  $I_{max}$ , και η αντίστοιχη κορυφή πλάτους,  $I_{max-p}$ , σε συνθήκες υπερφόρτισης 50%.

$$P_{max} = \sqrt{3} \cdot V_{ov-πολικό} \cdot I_{max} \cdot \cos \phi \Rightarrow I_{max} = \frac{P_{max}}{\sqrt{3} \cdot V_{ov-πολικό} \cdot \cos \phi} = \frac{3.750}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,8} = 7,1A$$

$$I_{max-p} = \sqrt{2} \cdot I_{max} = \sqrt{2} \cdot 7,1 = 10,04A$$

Αν θεωρηθεί ότι η μέση επαγωγή του διακένου είναι 0,6 Tesla και η βέλτιστη γωνία είναι  $45^\circ$ , τότε προκύπτει ότι η μέση εφαπτομενική πίεση των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο είναι περίπου ίδια και στις δύο περιπτώσεις, στο δοκίμιο και στη γεννήτρια των 25 kW, και είναι ίση με:

$$P_t = 143 \frac{kN}{m^2}$$

Στο δοκίμιο θα διατηρηθεί η δισκοειδής μορφή της γεννήτριας οπότε το ενεργό μήκος,  $L$ , θα παραμείνει λίγα εκατοστά και η ηλεκτρομαγνητική δύναμη,  $F_t$ , θα μειωθεί σε σχέση με το αντίστοιχο μέγεθος της γεννήτριας των 25 kW. Αυτό σημαίνει ότι η επιφάνεια του διακένου θα μειωθεί αρκετά. Επιλέχθηκε για το δοκίμιο, βάση τυποποιήσεων, στάτης με εσωτερική διάμετρο  $D_{\text{δοκίμιου}} = 0,25m$ .

Αν θεωρηθεί ότι η γραμμική ταχύτητα του δρομέα του δοκίμιου είναι ίση με την ταχύτητα της γεννήτριας των 25 kW και η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας των 25 kW είναι 120ΣΑΛ, τότε η ταχύτητα περιστροφής του δοκίμιου θα είναι ίση με:

$$n_{\text{δοκίμιου}} = n \cdot \frac{D}{D_{\text{δοκίμιου}}} = 120 \cdot \frac{0,7}{0,25} = 336 \Sigma \text{ΑΛ}$$

Επειδή το δοκίμιο θα λειτουργεί σε συνεργασία με μετατροπέα συχνότητας επιλέγεται μέγιστη ταχύτητα περιστροφής 400ΣΑΛ που αντιστοιχεί σε συχνότητα 80Hz.

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή διακένου θα είναι:

$$T_e = \frac{P_{\max}}{\omega_{\text{δοκίμιου}}} \Rightarrow T_e = \frac{P_{\max}}{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{δοκίμιου}}} \Rightarrow T_e = \frac{3750 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 400} \Rightarrow T_e = 89,52 N \cdot m$$

Το ενεργό μήκος του δοκίμιου είναι ίσο με:

$$T_e = \frac{\pi}{2} \cdot D_{\text{δοκίμιου}}^2 \cdot L_{\text{δοκίμιου}} \cdot P_t \Rightarrow L_{\text{δοκίμιου}} = \frac{2 \cdot T_e}{\pi \cdot D_{\text{δοκίμιου}}^2 \cdot P_t} = \frac{2 \cdot 89,52}{\pi \cdot 0,25^2 \cdot 143} = 0,0063m$$

Βάσει αποτελεσμάτων από την πεδιακή ανάλυση (μεταπτυχιακή εργασία Γ.Ι. Τσεκούρα [11]), προκύπτει ότι το ενεργό μήκος του δοκίμιου πρέπει να είναι 0,03m. Συνεπώς το ενεργό μήκος που δόθηκε παραπάνω είναι πολύ μικρό. Επίσης από την συγκεκριμένη ανάλυση προκύπτει ότι ο συνολικός αριθμός των εν σειρά συνδεδεμένων πηνίων είναι ίσος με  $N_s = 1200$  και από την παρακάτω σχέση υπολογίζεται και ο αριθμός των σπειρών ανά πηνίο.

$$N_i = \frac{2 \cdot N_s}{P} = \frac{2 \cdot 1200}{24} = 100 \text{ σπείρες ανά πηνίο}$$

Επίσης ο επιλεγμένος στάτης δύναται να φέρει το πολύ 72 αύλακες για κατασκευαστικούς λόγους. Οπότε ο αριθμός των αυλακών ανά φάση είναι 24 και είναι ίσος με τον μέγιστο αριθμό πόλων που μπορεί να τοποθετηθεί στον δρομέα. Αν ληφθεί υπόψη η δομή της ανεμογεννήτριας τότε θα αντιστοιχεί και μία αύλακα ανά

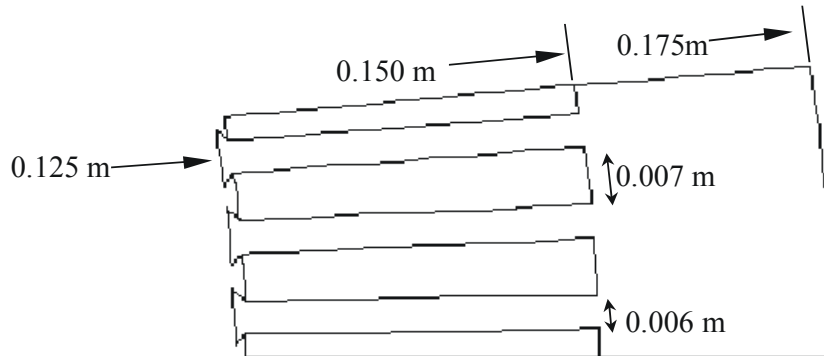


πόλο και ανά φάση. Συνεπώς ο αριθμός των πόλων είναι 24. Το δοκίμιο δηλαδή είναι μία 24-πολική σύγχρονη μηχανή.

Το μήκος του διακένου δίνεται από την πιο κάτω εμπειρική σχέση:

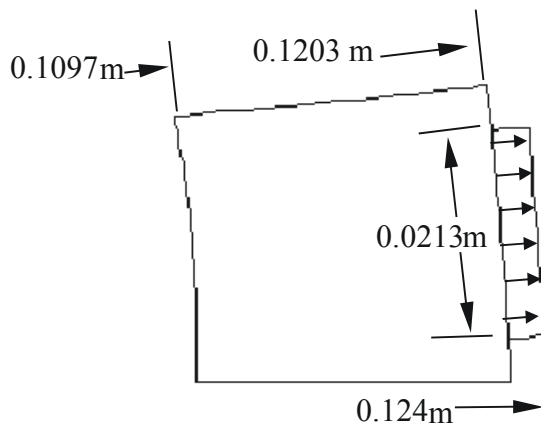
$$L_{\delta} = 1,6 \cdot \sqrt{D} - 0,25 = 0,626 \text{ mm} \Rightarrow L_{\delta} \cong 1 \text{ mm}$$

Στα δύο επόμενα σχήματα δίνεται η γεωμετρία του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα, δεδομένου ότι οι μαγνήτες είναι επιφανειακοί τύπου Neoferr 230/80 και κάθε ένας από αυτούς καλύπτει τα 2/3 ενός πολικού βήματος.



**Σχήμα 2.2.1-1**

Προκαταρκτική γεωμετρία του στάτη του δοκιμίου, [11].



**Σχήμα 2.2.1-2**

Προκαταρκτική γεωμετρία του δρομέα του δοκιμίου, [11].

### **2.2.2 Υπολογισμός ειδικών φορτίσεων του δοκιμίου.**

Η ειδική μαγνητική φόρτιση δίνεται από την κάτωθι σχέση:

$$\bar{B} = \frac{P \cdot \Phi}{\pi \cdot D \cdot L} = \frac{24 \cdot 4,95 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 0,3 \cdot 0,03} \cong 0,42 \text{ Tesla}$$

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση, δηλαδή η ενεργός τιμή των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο περιφέρειας διακένου, κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας είναι ίση με:

$$ac = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_s \cdot I}{\pi \cdot D} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 1200 \cdot 4,73}{\pi \cdot 0,3} \cong 36 \text{ kA/m}$$

### 2.2.3 Τελική διαμόρφωση του δοκιμίου.

Το δοκίμιο είναι μία σύγχρονη πολυπολική γεννήτρια μονίμων μαγνητών η οποία έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά.

$$P_{ov} = 2500W$$

$$V_{ov-πολικό} = 380V$$

$$\cos \phi = 0,8$$

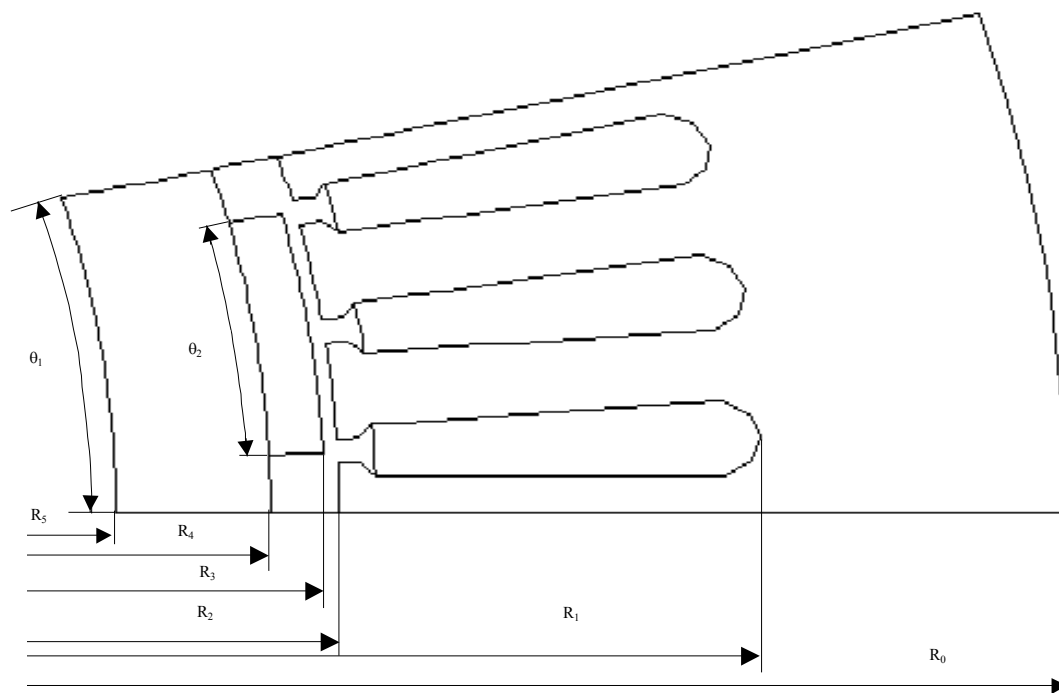
$$N_i = 100 \text{ σπείρες ανά πηνίο}$$

$$P = 24$$

$$f = 80Hz$$

$$n_{δοκιμίου} = 400$$

Οι μόνιμοι μαγνήτες που θα τοποθετηθούν είναι τύπου Neofer 230/80. Τα τυλίγματα της γεννήτριας είναι συνδεδεμένα κατά αστέρα, ενώ τα πηνία που τα σχηματίζουν είναι κυματοειδή και συνδεδεμένα σε σειρά. Επίσης σε κάθε πόλο και φάση αντιστοιχεί μία αύλακα, η οποία έχει μία στρώση τυλιγμάτων.



**Σχήμα 2.2.3-1**

Τελική γεωμετρία του δοκιμίου, [11].

$$R_0 = 0,1750 \text{ m}$$

$$R_2 = 0,1250 \text{ m}$$

$$R_4 = 0,1203 \text{ m}$$

$$\theta_1 = 15,000^\circ$$

$$R_1 = 0,1550 \text{ m}$$

$$R_3 = 0,1240 \text{ m}$$

$$R_5 = 0,1097 \text{ m}$$

$$\theta_2 = 10,0025^\circ$$

$$\text{Αξονικό μήκος γεννήτριας} = 0,03 \text{ m}$$

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ



### **3.1 Εισαγωγή.**

Ο ορισμός του προβλήματος στο ANSYS συνίσταται στο φιλτράρισμα των επιλογών που προσφέρει το πρόγραμμα για την επίλυση των διαφόρων προβλημάτων (ακουστικής, δυναμικής των ρευστών, μηχανικής κ.τ.λ) καθώς και στην επιλογή του κατάλληλου τύπου του στοιχείου (element type) από το οποίο θα αποτελείται το πλέγμα του μοντέλου.

### **3.2 Φιλτράρισμα των επιλογών.**

Το κύριο μενού επιλογών (Main Menu) του ANSYS περιλαμβάνει πολλές επιλογές που αφορούν όλα τα προβλήματα τα οποία μπορεί να επιλύσει το συγκεκριμένο πρόγραμμα. Είναι δυνατόν όμως αυτές οι επιπλέον επιλογές να μην εμφανίζονται αλλά να εμφανίζονται μόνο οι επιλογές για το πρόβλημα το οποίο μας ενδιαφέρει. Για το αποτελεσματικό φιλτράρισμα των επιλογών του κυρίου μενού πρέπει να οριστεί το πρόβλημα το οποίο θέλουμε να επιλύσουμε. Αν και αυτό το φιλτράρισμα γίνεται μερικώς με την επιλογή του κατάλληλου τύπου του στοιχείου, από το οποίο θα αποτελείται το πλέγμα, για το πρόβλημα που θέλουμε να επιλύσουμε, οι επιπλέον επιλογές πάλι θα εμφανίζονται απλώς θα είναι γραμμοσκιασμένες και απενεργοποιημένες. Οπότε στην περίπτωση που θέλουμε να μην εμφανίζονται καθόλου αυτές οι επιλογές θα πρέπει να οριστεί το πρόβλημα μέσω του Preferences dialog box.

Το φιλτράρισμα των επιλογών στο ANSYS γίνεται ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preferences.
- Μετά από το παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε Electromagnetic και Magnetic-nodal.

Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, στο Main Menu του ANSYS θα εμφανίζονται μόνο οι επιλογές που αφορούν ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα.

### **3.3 Επιλογή του τύπου του στοιχείου (element type) από το οποίο θα αποτελείται το πλέγμα.**

Στην συνέχεια θα πρέπει να επιλεγεί ο τύπος του στοιχείου από το οποίο θα αποτελείται το πλέγμα του μοντέλου. Τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται το πλέγμα του μοντέλου είναι συγκεκριμένου τύπου και επιλέγονται ανάλογα με το είδος του προβλήματος (δισδιάστατο ή τρισδιάστατο, μαγνητοστατικό ή ηλεκτρομαγνητικό υψηλής συχνότητας κ.τ.λ). Επίσης είναι δυνατόν το πλέγμα ενός μοντέλου να αποτελείται από στοιχεία διαφορετικού τύπου. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, το οποίο είναι μαγνητοστατικό, το πλέγμα του μοντέλου θα αποτελείται από στοιχεία ενός τύπου. Επίσης το δοκίμιο της σύγχρονης 24-πολικής μηχανής θα εξομοιωθεί από δισδιάστατο αλλά και από τρισδιάστατο μοντέλο και αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να επιλεγθούν διαφορετικού τύπου στοιχεία για αυτά τα μοντέλα.

Η επιλογή του τύπου του στοιχείου από το οποίο θα αποτελείται το πλέγμα του τρισδιάστατου μοντέλου στο ANSYS γίνεται ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Element Type.
- Επιλέγουμε Add/Edit/Delete.
- Από το παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε Add.

- Από το παράθυρο που προκύπτει επιλέγουμε Magnetic-Scalar και μετά επιλέγουμε Scalar Brick 96.

Προκειμένου για το δισδιάστατο μοντέλο η επιλογή του τύπου του στοιχείου στο ANSYS γίνεται ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία η οποία είναι ακριβώς όμοια με την προηγούμενη και απλώς αλλάζει το τελευταίο βήμα.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Element Type.
- Επιλέγουμε Add/Edit/Delete.
- Από το παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε Add.
- Τέλος επιλέγουμε Magnetic-Vector και μετά επιλέγουμε Vect Quad 4nod13.

Η παραπάνω επιλογή των τύπων των στοιχείων από τα οποία θα αποτελείται το πλέγμα του τρισδιάστατου και του δισδιάστατου μοντέλου αναλύεται στο κεφάλαιο που αναφέρεται στην κατασκευή του πλέγματος (6<sup>ο</sup> κεφάλαιο) αλλά η διαδικασία της επιλογής πρέπει να γίνει πριν σχεδιαστεί το μοντέλο και κατασκευαστεί το πλέγμα.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ  
ΚΑΙ ΤΩΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ  
ΜΟΝΤΕΛΩΝ





## **4.1 Εισαγωγή.**

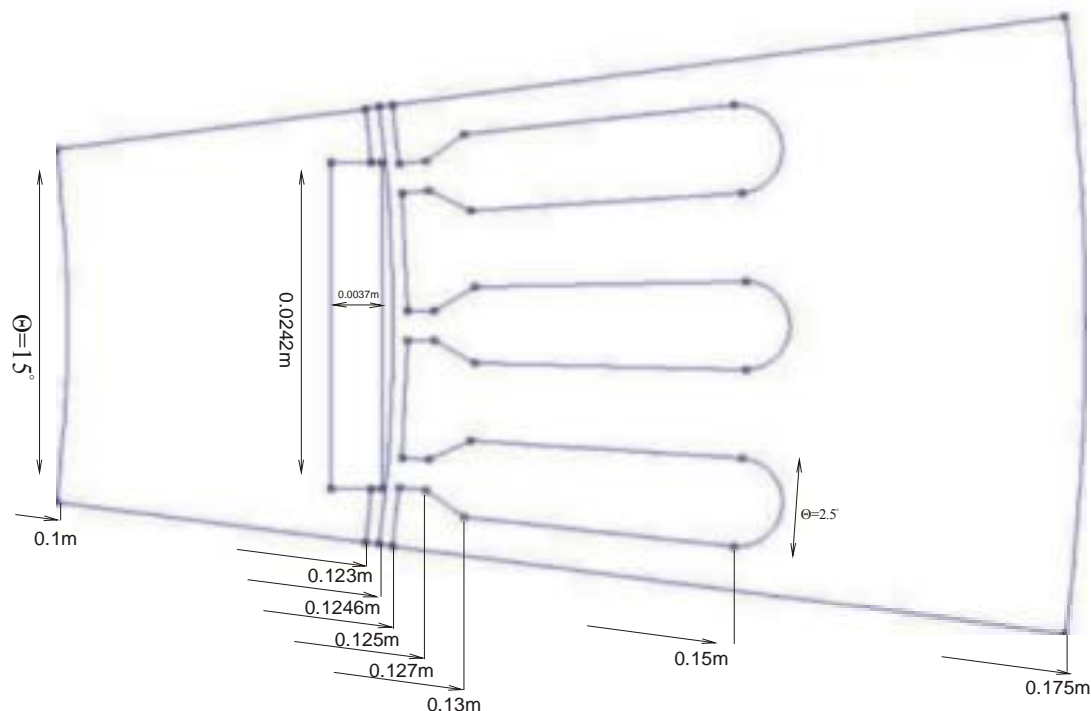
Ένα από τα πιο σημαντικά στάδια της εξομοίωσης της σύγχρονης μηχανής, είναι η κατασκευή στον υπολογιστή του φυσικού μοντέλου. Η κατασκευή του φυσικού μοντέλου του δοκιμίου της σύγχρονης 24-πολικής μηχανής γίνεται μέσω του περιβάλλοντος σχεδίασης του ANSYS, το οποίο προσφέρει πολλές δυνατότητες για σχεδίαση και επεξεργασία τόσο τρισδιάστατων όσο και δισδιάστατων μοντέλων.

Είναι ευνόητο ότι το φυσικό μοντέλο της σύγχρονης μηχανής θα πρέπει να είναι ένα πιστό αντίγραφο (όσον αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις) του πραγματικού μοντέλου, δηλαδή του δοκιμίου της σύγχρονης 24-πολικής μηχανής. Όμως το φυσικό μοντέλο θα είναι σε μερικά σημεία διαφορετικό από το πραγματικό μοντέλο και αυτό είναι αναγκαίο για την σωστή επίλυση του προβλήματος καθώς και λόγω των περιορισμών που τίθενται από το πρόγραμμα ANSYS και από τους υπολογιστικούς πόρους των προσωπικών υπολογιστών.

Οι περιορισμοί που επιβάλλονται από το ANSYS είναι οι εξής. Η συγκεκριμένη έκδοση του ANSYS (University high option) μπορεί να λύσει προβλήματα, το πλέγμα των οποίων έχει περιορισμένο αριθμό στοιχείων (περίπου 32.000 elements) και κόμβων (nodes). Αυτό σημαίνει ότι το φυσικό μοντέλο το οποίο θα κατασκευαστεί, θα πρέπει να είναι ένα τμήμα του πραγματικού μοντέλου και συγκεκριμένα θα είναι για έναν μόνο πόλο και όχι για 24 πόλους. Επίσης περιοχές οι οποίες δεν μας ενδιαφέρουν για την μελέτη της μηχανής, όπως οι περιοχές από ατσάλι, δεν θα περιληφθούν στο φυσικό μοντέλο. Τα παραπάνω είναι αποτέλεσμα των περιορισμών που τίθενται από το ANSYS στον αριθμό των στοιχείων (elements) και κόμβων (nodes). Το πλέγμα του φυσικού μοντέλου, που θα αντιστοιχούσε στο πραγματικό μοντέλο, θα ήταν πολύ αραιό με αποτέλεσμα η λύση του προβλήματος να μην ήταν ακριβής, κάτι το οποίο θα οδηγούσε σε λάθος εκτιμήσεις και συμπεράσματα. Στην περίπτωση όμως του φυσικού μοντέλου που είναι τμήμα της πραγματικής σύγχρονης μηχανής (για ένα μόνο πόλο), το πλέγμα το οποίο θα προκύψει θα είναι πολύ πιο πυκνό και η λύση του προβλήματος πιο ακριβής. Επιπροσθέτως, για ένα φυσικό μοντέλο της σύγχρονης μηχανής με 24-πόλους, ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος θα ήταν πολύ μεγαλύτερος και επίσης θα παρουσιάζονταν προβλήματα μνήμης λόγω των περιορισμών σε υπολογιστικούς πόρους των προσωπικών υπολογιστών. Συνεπώς καταλήγουμε στο ότι το φυσικό μοντέλο του δοκιμίου της σύγχρονης 24-πολικής μηχανής στο ANSYS θα είναι για ένα μόνο πόλο και επίσης δεν θα περιλαμβάνονται οι περιοχές που αντιστοιχούν στο ατσάλι. Στο πραγματικό μοντέλο οι περιοχές που αντιστοιχούν στα διάφορα υλικά, όπως ο σιδηροπυρήνας ή ο αέρας, είναι φυσικά ενιαίες. Στο φυσικό μοντέλο όμως κάποιες τέτοιες περιοχές θα αποτελούνται από άλλες επιμέρους περιοχές που θα έχουν τις ίδιες ιδιότητες. Αυτό γίνεται προκειμένου το πλέγμα, στις περιοχές που μας ενδιαφέρουν, να είναι πιο πυκνό για να προκύψουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Τα παραπάνω θα αναλυθούν διεξοδικά στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο που αναφέρεται στην πλεγματοποίηση του φυσικού μοντέλου.

Στο σχήμα 4.1-1 απεικονίζεται μια τομή της σύγχρονης γεννήτριας για ένα πόλο. Με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις αυτού του σχήματος, σχεδιάζονται στο ANSYS τόσο το δισδιάστατο όσο και το τρισδιάστατο μοντέλο. Επίσης στο τρισδιάστατο μοντέλο θα σχεδιαστούν και οι όγκοι αέρα που περικλείουν την μηχανή, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του αέρα, που περιβάλλει την σύγχρονη γεννήτρια, στην μαγνητική επαγωγή του διακένου. Το αξονικό μήκος των όγκων του αέρα θα είναι 0,015m (1,5cm) γιατί τόσο περίπου εξέχουν τα τυλίγματα χαλκού από την μηχανή. Στο σχήμα 2.2.3-1 αναφέρεται ότι το αξονικό μήκος της μηχανής είναι 0,03m. Εντούτοις το αξονικό μήκος της μηχανής επιλέχθηκε να είναι

ίσο με 0,035m εφόσον η συγκεκριμένη τιμή χρησιμοποιήθηκε σε προηγούμενες δισδιάστατες αναλύσεις, [10] και [11].



Αξονικό μήκος γεννήτριας = 0.035m

**Σχήμα 4.1-1**

Τομή του δοκιμίου της σύγχρονης 24-πολικής μηχανής. Απεικονίζεται μόνο ο ένας πόλος ενώ δεν συμπεριλαμβάνεται η περιοχή που αντιστοιχεί στο ατσάλι.

Στις επόμενες παραγράφους αναλύεται σταδιακά το πώς έγινε η σχεδίαση του δισδιάστατου μοντέλου της σύγχρονης μηχανής καθώς και των τρισδιάστατων μοντέλων της σύγχρονης μηχανής με μαγνήτες χωρίς κλίση και με μαγνήτες με κλίση.

## **4.2 Επιλογή συστήματος συντεταγμένων.**

Μέσω του ANSYS μπορούμε να επιλέξουμε μεταξύ διαφόρων συστημάτων συντεταγμένων. Η αλλαγή από ένα σύστημα συντεταγμένων στο άλλο μπορεί να γίνει ανά πάσα στιγμή, ανεξάρτητα σε πιο στάδιο της σχεδίασης είμαστε. Η επιλογή του συστήματος συντεταγμένων μπορεί να γίνει ακολουθώντας την πιο κάτω πορεία.

- Από το High Utility Menu του ANSYS επιλέγουμε Workplane.
- Μετά επιλέγουμε Change Active CS to.
- Έπειτα επιλέγουμε ένα από τα συστήματα συντεταγμένων, Global Cartesian ή Global Cylindrical ή Global Cylindrical Y ή Global Spherical.

Τα συστήματα συντεταγμένων που απαιτούνται για την κατασκευή των συγκεκριμένων μοντέλων είναι τα Global Cartesian και Global Cylindrical.

## **4.3 Επιλογή μονάδων γωνίας.**

Η επιλογή των μονάδων γωνίας, δηλαδή ακτίνια ή μοίρες γίνεται ακολουθώντας την παρακάτω πορεία.

- Από το High Utility Menu του ANSYS επιλέγουμε Parameters.
- Μετά επιλέγουμε Angular units.
- Έπειτα επιλέγουμε radians (ακτίνια) ή degrees (μοίρες).

Για την σχεδίαση των φυσικών μοντέλων της σύγχρονης μηχανής πρέπει να επιλέξουμε degrees.

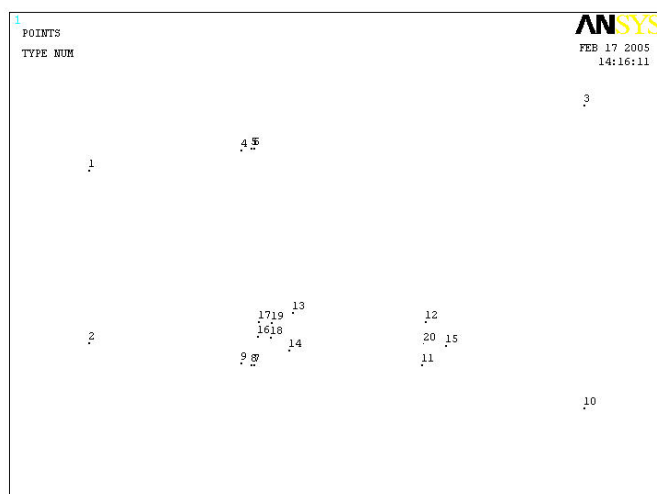
#### **4.4 Σημεία (Keypoints).**

Τα σημεία είναι βασικό στοιχείο της σχεδίασης ενός μοντέλου και μέσω αυτών μπορούμε να σχεδιάσουμε τις γραμμές. Για να εισάγουμε ένα σημείο στο σχεδιαστικό περιβάλλον του ANSYS ακολουθούμε την παρακάτω πορεία.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Modelling και Create.
- Επιλέγουμε keypoints.
- Επιλέγουμε In Active CS.
- Τέλος, από το παράθυρο που θα προκύψει, θέτουμε τον αριθμό του keypoint και τις συντεταγμένες X, Y, Z.

Όσον αφορά τα σημεία (keypoints) σημαντικά είναι τα εξής. Πρέπει να εισάγουμε διαφορετικό αριθμό κάθε φορά για κάθε καινούργιο σημείο. Άμα δεν γίνει αυτό, τότε το ANSYS αντικαθιστά το προηγούμενο σημείο με το καινούργιο με αποτέλεσμα το προηγούμενο σημείο να χαθεί. Προτιμότερο έτσι είναι, όταν εισάγουμε ένα σημείο να δίνουμε έναν αριθμό για το σημείο αυτό τον οποίο να μην τον έχουμε αναθέσει σε άλλο σημείο (να δίνουμε αριθμούς με αύξουσα σειρά είναι μια καλή λύση). Επίσης όταν επιλέξουμε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων το μενού για τα keypoints παραμένει το ίδιο αλλά τώρα το X αντιστοιχεί στην ακτίνα  $r$ , το Y στην γωνία  $\varphi$  και το Z είναι το ίδιο όπως στις καρτεσιανές συντεταγμένες.

Για την σχεδίαση του δισδιάστατου μοντέλου αρχικά επιλέγουμε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων και μονάδα γωνίας τις μοίρες. Εισάγουμε τα σημεία, σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία, τα οποία φαίνονται στην παρακάτω εικόνα. Αυτά τα σημεία είναι και τα απολύτως απαραίτητα για την κατασκευή του δισδιάστατου μοντέλου.



**Εικόνα 4.4-1**

Σημεία (keypoints) που απαιτούνται για την σχεδίαση του δισδιάστατου μοντέλου.

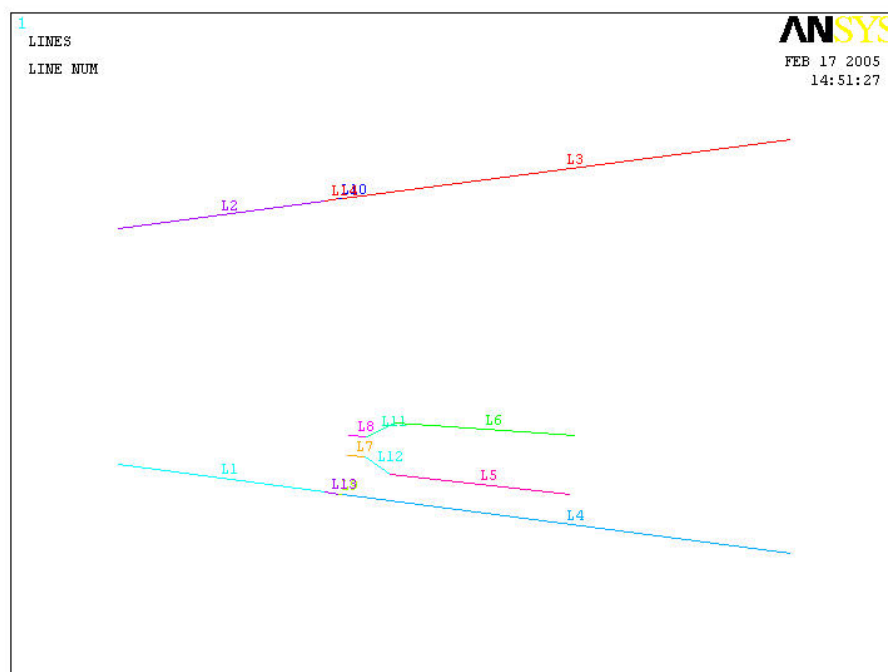
## **4.5 Γραμμές (Lines).**

Προκειμένου να κατασκευάσουμε ευθείες γραμμές πρέπει να υπάρχουν σημεία και επιλέγοντας δύο από αυτά μπορούμε να τα ενώσουμε με μια ευθεία γραμμή. Η επιλογή των σημείων αυτών γίνεται είτε με το mouse είτε πληκτρολογώντας τους αριθμούς των δύο σημείων στην γραμμή εντολών του ANSYS. Η διαδικασία με την οποία κατασκευάζουμε ευθείες γραμμές στο ANSYS έχει ως εξής.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Modeling και Create.
- Επιλέγουμε lines.
- Επιλέγουμε straight line.
- Τέλος επιλέγουμε τα δύο σημεία που θέλουμε.

Το ANSYS αναθέτει μόνο του στις γραμμές έναν αριθμό (σε αντίθεση με τα keypoints).

Τα παραπάνω εφαρμόζονται στα υπάρχοντα keypoints και στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι ευθείες γραμμές στο δισδιάστατο μοντέλο.



**Εικόνα 4.5-1**

Γραμμές που προέκυψαν από τα σημεία που απεικονίζονται στην εικόνα 4.4.1.

## **4.6 Καμπύλες (Arcs).**

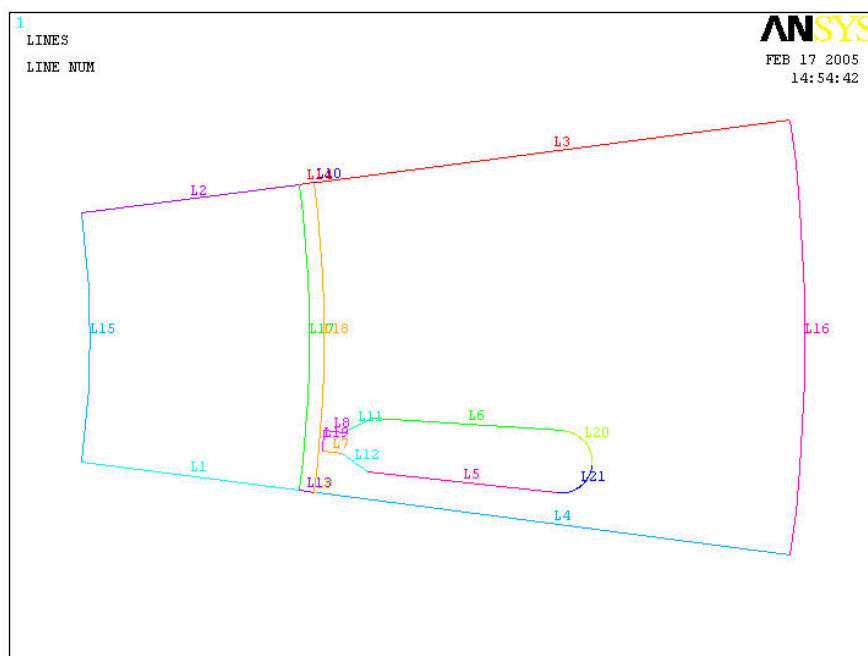
Εκτός από ευθείες γραμμές μπορούμε να σχεδιάσουμε και καμπύλες. Η διαδικασία όμως σχεδίασης των καμπύλων δεν είναι τόσο εύκολη όσο για τις ευθείες γραμμές. Συνολικά χρειάζονται τρία σημεία για τον σχεδιασμό της καμπύλης. Τα δύο σημεία είναι η αρχή και το τέλος της καμπύλης ενώ το τρίτο σημείο είναι το κέντρο της καμπύλης. Το ANSYS θεωρεί ότι η καμπύλη είναι ένα τμήμα του κύκλου που έχει κέντρο το τρίτο σημείο. Οπότε το τρίτο σημείο πρέπει να το εισάγουμε εμείς σαν βοηθητικό σημείο. Η διαδικασία με την οποία σχεδιάζουμε μια καμπύλη είναι η εξής.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Modeling και Create.

- Επιλέγουμε Arcs.
- Επιλέγουμε By End kPs & Rad.
- Από το παράθυρο το οποίο θα εμφανιστεί επιλέγουμε τα δύο πρώτα σημεία και επιλέγουμε OK.
- Από το δεύτερο παράθυρο που θα εμφανιστεί επιλέγουμε το τρίτο σημείο και επιλέγουμε OK.
- Τέλος, από το τελευταίο παράθυρο που θα εμφανιστεί εισάγουμε την ακτίνα του κύκλου (δηλαδή την απόσταση των δύο σημείων από το τρίτο) και επιλέγουμε πάλι OK.

Προκειμένου να σχεδιάσω τις καμπύλες αυτές ήταν αναγκαίο να ορίσω δύο βοηθητικά σημεία. Το ένα ήταν στην αρχή των αξόνων και το άλλο είναι το σημείο 20 όπως φαίνεται στην εικόνα 4.4-1.

Εφαρμόζοντας τα παραπάνω, το δισδιάστατο μοντέλο θα έχει την πιο κάτω μορφή.



**Εικόνα 4.6-1**

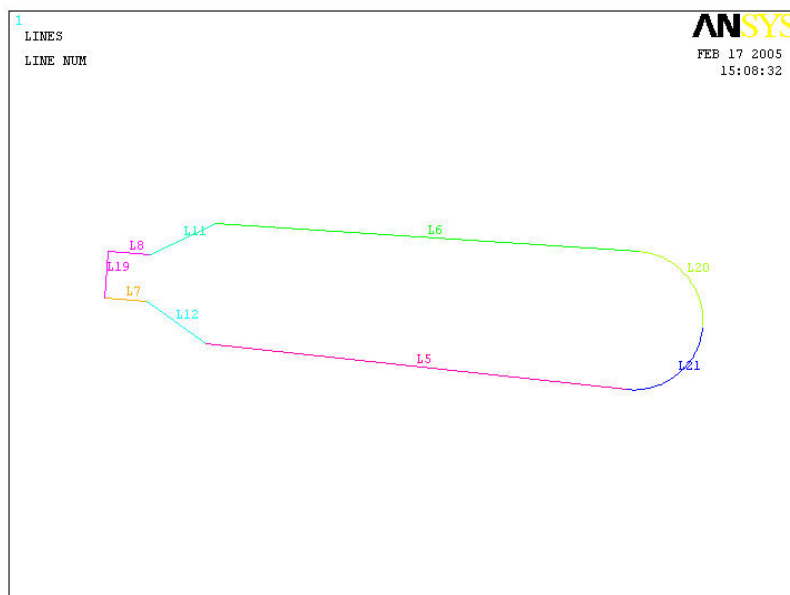
Καμπύλες (arcs) που προέκυψαν από τα σημεία που απεικονίζονται στην εικόνα 4.4-1.

#### **4.7 Περιοχές (Areas).**

Το ANSYS προσφέρει επίσης αρκετές επιλογές για την δημιουργία επίπεδων επιφανειών (areas) και για την επεξεργασία αυτών. Μπορούμε να δημιουργήσουμε μια επιφάνεια επιλέγοντας τις γραμμές που την περικλείουν. Αυτό γίνεται ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Modeling και Create.
- Επιλέγουμε Areas.
- Επιλέγουμε Arbitrary και by lines.
- Από το παράθυρο το οποίο θα εμφανιστεί επιλέγουμε με το mouse τις γραμμές που μας ενδιαφέρουν και επιλέγουμε OK.

Την διαδικασία αυτή την εφαρμόζω παρακάτω όπως φαίνονται στις δύο επόμενες εικόνες.

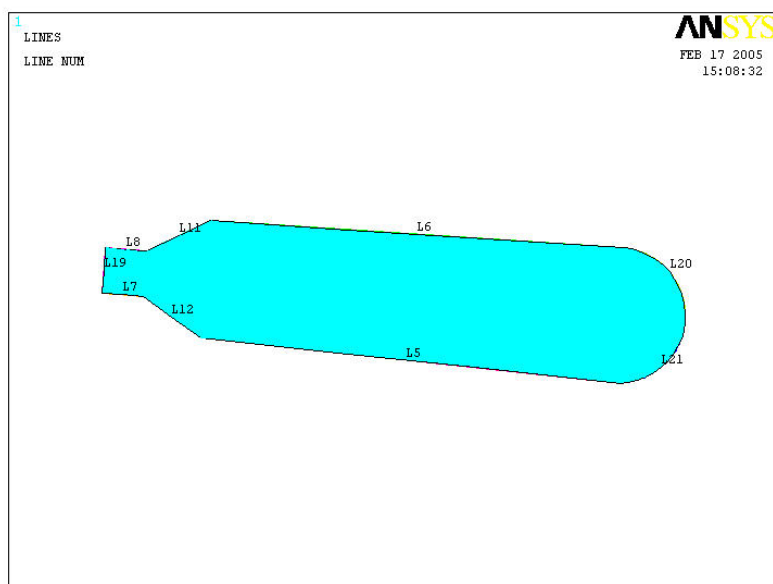


**Εικόνα 4.7-1**

Γραμμές από τις οποίες αποτελείται η περιοχή μίας αύλακας του στάτη.

Επιλέγοντας τις γραμμές που απεικονίζονται στο παραπάνω σχήμα σχεδιάζουμε την παρακάτω περιοχή, που φαίνεται στην εικόνα 4.7-2, στο X-Y επίπεδο. Αυτό μπορεί να γίνει ακολουθώντας την διαδικασία για την δημιουργία περιοχών μέσω επιλογής των γραμμών που περικλείουν αυτή την περιοχή (δηλαδή create areas arbitrary by lines).

Η περιοχή αυτή αντιστοιχεί στον αέρα που βρίσκεται μεταξύ δύο διαδοχικών οδοντώσεων του στάτη στο δισδιάστατο μοντέλο.



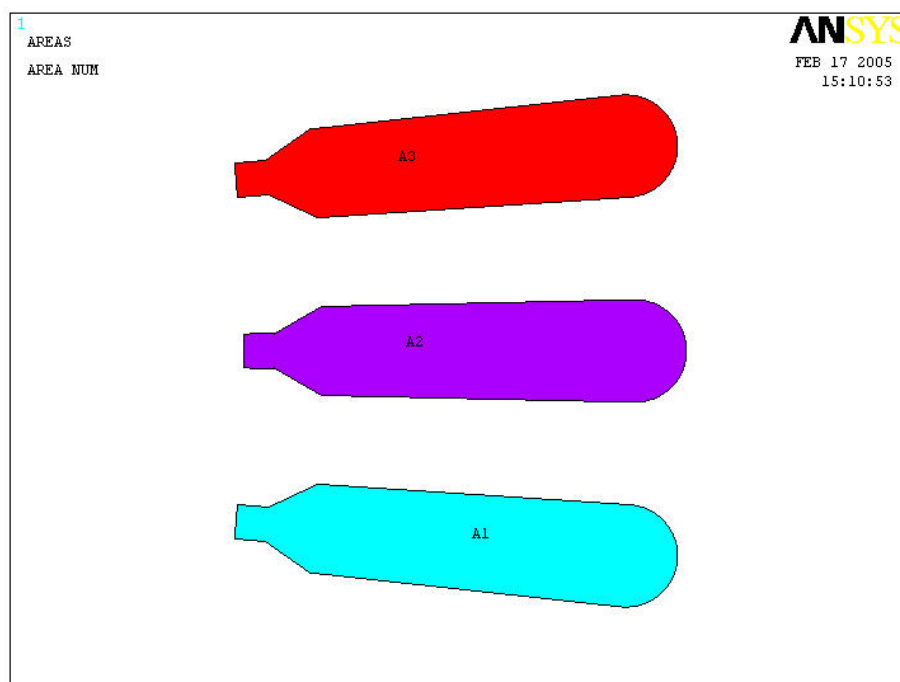
**Εικόνα 4.7-2**

Περιοχή που προκύπτει μετά την επιλογή των γραμμών που απεικονίζονται στην εικόνα 4.7-1.

Μέσω της εντολής copy μπορούμε να σχεδιάσουμε και τις δύο άλλες περιοχές του αέρα που βρίσκονται μεταξύ των οδοντώσεων του στάτη, χωρίς να χρειαστεί να επαναλάβουμε την παραπάνω διαδικασία. Έτσι αποφεύγουμε να εισάγουμε και άλλα keypoints κάτι το οποίο θα ήταν ιδιαίτερα χρονοβόρο. Η πορεία που ακολουθείται για να εφαρμόσει κάποιος την εντολή copy είναι η εξής.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Modeling και Copy.
- Επιλέγουμε Areas.
- Με το mouse επιλέγουμε την περιοχή που μας ενδιαφέρει και επιλέγοντας OK στο υπάρχον παράθυρο εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο. Εφόσον δουλεύουμε στο κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων θα θέσουμε στο πεδίο Y του ενεργού παραθύρου την τιμή  $5^\circ$ , δηλαδή μετατοπίζω την νέα περιοχή κατά  $5^\circ$  χωρίς καμιά μεταβολή στην ακτίνα R και στην παράμετρο Z.

Την διαδικασία αυτή την εφαρμόζω δύο φορές στην περιοχή A1, που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, και δημιουργούνται οι δύο νέες επιφάνειες που απεικονίζονται στο πιο κάτω σχήμα.

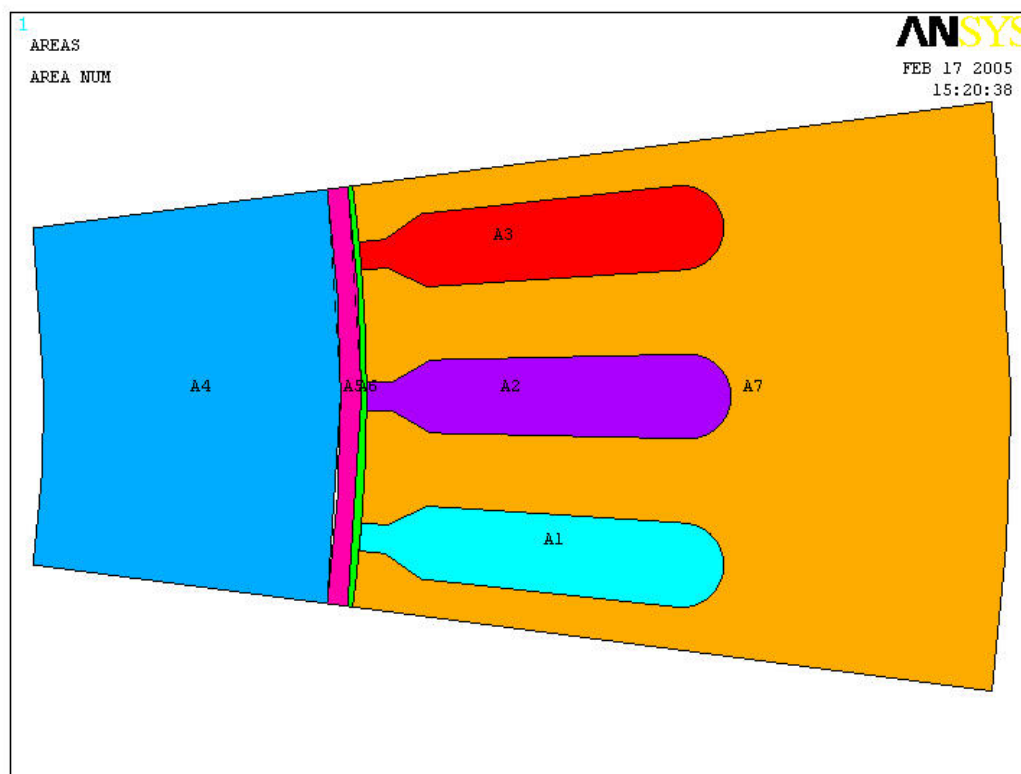


**Εικόνα 4.7-3**

Περιοχές των αυλακών του στάτη.

Το επόμενο στάδιο στην σχεδίαση του δισδιάστατου μοντέλου είναι να εφαρμόσω ξανά την δημιουργία περιοχών μέσω επιλογής γραμμών (arbitrary by lines) για τις υπόλοιπες περιοχές του δισδιάστατου μοντέλου. Όπως φαίνεται λοιπόν από την εικόνα 4.6-1, επιλέγω τις κατάλληλες γραμμές, προκειμένου να δημιουργήσω τις περιοχές του διακένου, του στάτη και του δρομέα. Έτσι προκύπτει το σχήμα της επόμενης σελίδας (εικόνα 4.7-4) το οποίο απεικονίζει το ημιτελές δισδιάστατο μοντέλο. Από την εικόνα 4.7-4 της επόμενης σελίδας, παρατηρούμε ότι το διάκενο αποτελείται από δύο ξεχωριστές περιοχές, τις περιοχές A5 και A6. Επίσης το διάκενο καθώς και οι περιοχές που βρίσκονται ανάμεσα στα δόντια του στάτη δεν είναι ενωμένες και δεν αποτελούν μια ενιαία περιοχή όπως στο πραγματικό μοντέλο. Οι περιοχές αυτές όμως έχουν τις ίδιες ιδιότητες εφόσον αντιστοιχούν στον αέρα.

Η σχεδίαση αυτή, όπως θα φανεί στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο, θα βοηθήσει στην κατασκευή ενός πλέγματος το οποίο θα είναι πυκνό στην περιοχή του διακένου. Αυτό θα έχει ως συνέπεια την αύξηση της ακρίβειας της λύσης στο διάκενο, κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό εφόσον μας ενδιαφέρει η εύρεση της κατανομής της πυκνότητας ροής, συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας, στο διάκενο.



**Εικόνα 4.7-4**

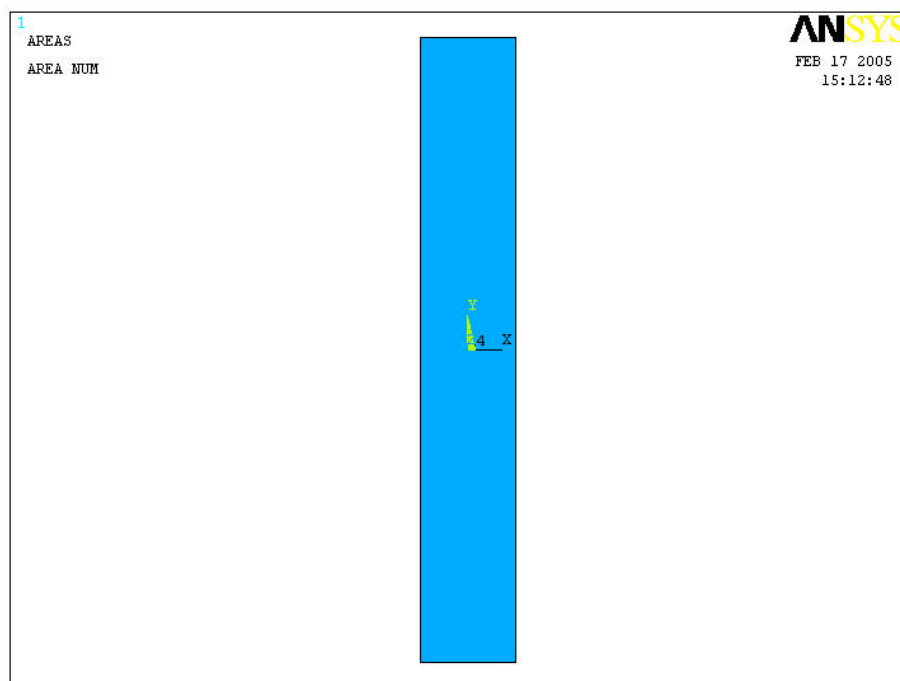
Απεικονίζονται οι περιοχές που δημιουργήθηκαν μέσω της επιλογής γραμμών.

Το δισδιάστατο μοντέλο προκειμένου να ολοκληρωθεί πρέπει να περιλαμβάνει και την περιοχή που αντιστοιχεί στον μαγνήτη. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.1-1, η εγκάρσια τομή του μαγνήτη είναι ένα ορθογώνιο. Μέσω του ANSYS μπορεί κάποιος να δημιουργήσει κατευθείαν μία περιοχή η οποία έχει σχήμα ορθογωνίου, ακολουθώντας την παρακάτω πορεία.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Modeling και Create.
- Επιλέγουμε Areas.
- Επιλέγουμε Rectangle.
- Επιλέγουμε By Centr & Corn.
- Από το παράθυρο το οποίο θα εμφανιστεί συμπληρώνουμε τα πεδία X, Y με τις συντεταγμένες του κέντρου του ορθογωνίου, όπου αυτές είναι η αρχή των αξόνων δηλαδή το σημείο (0,0), ενώ στα πεδία Width, Height βάζουμε τις τιμές του μήκους και του ύψους (0,0037m και 0,0242m αντίστοιχα) του ορθογωνίου και επιλέγουμε OK.

Επομένως ο μαγνήτης στο δισδιάστατο μοντέλο, που είναι μια εγκάρσια τομή τόσο του μαγνήτη χωρίς κλίση όσο και του κεκλιμένου μαγνήτη, φαίνεται στην εικόνα 4.7-5 της επόμενης σελίδας.





**Εικόνα 4.7-5**

Περιοχή που αντιστοιχεί στον μαγνήτη στο δισδιάστατο μοντέλο.

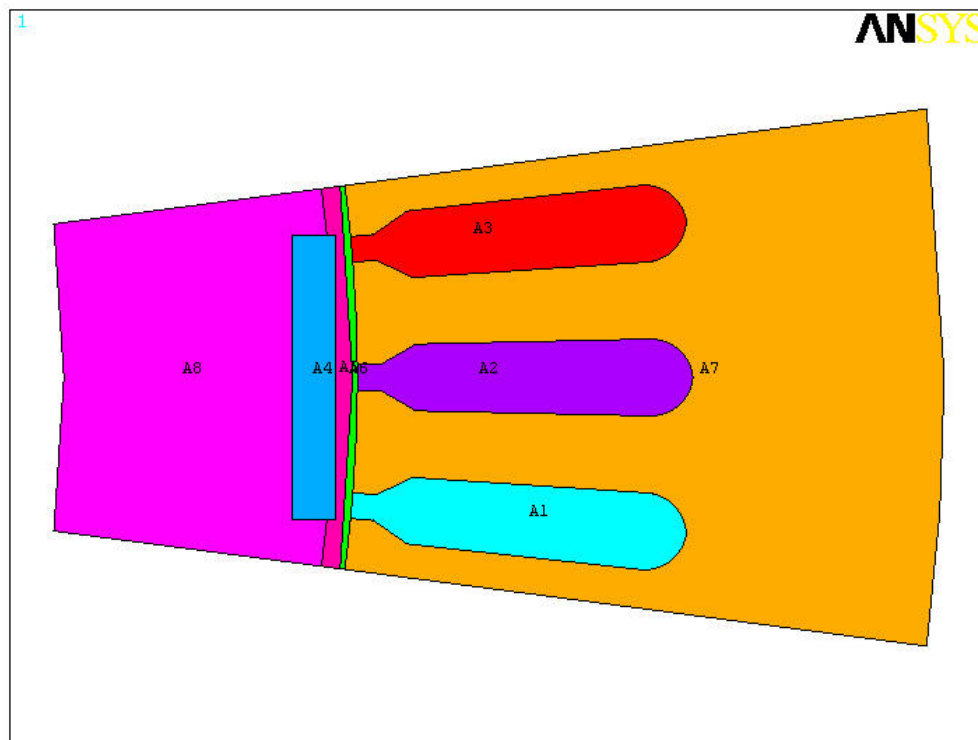
Ο μαγνήτης έχει τοποθετηθεί στην αρχή των αξόνων, δηλαδή το κέντρο του ορθογωνίου είναι η αρχή των αξόνων. Συνεπώς θα πρέπει η παραπάνω περιοχή να μετακινηθεί και να τοποθετηθεί στην σωστή θέση στο δισδιάστατο μοντέλο. Η διαδικασία με την οποία γίνεται η μετακίνηση περιοχών (και όχι μόνο) είναι η παρακάτω.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Modeling και Move.
- Επιλέγουμε Areas.
- Με το mouse επιλέγουμε την περιοχή που μας ενδιαφέρει και επιλέγοντας OK στο υπάρχον παράθυρο εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο. Εφόσον δουλεύουμε στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων θα θέσουμε στο πεδίο X του ενεργού παραθύρου την τιμή 0,121275, δηλαδή μετατοπίζω το ορθογώνιο κατά 0,121275m κατά μήκος του άξονα X.

Στο συγκεκριμένο στάδιο όμως της σχεδίασης παρουσιάζεται ένα πρόβλημα και αυτό είναι η αλληλοεπικάλυψη περιοχών, εφόσον η περιοχή που αντιπροσωπεύει τον μαγνήτη πέφτει πάνω στην περιοχή του δρομέα και του διακένου. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα πρέπει να γίνει χρήση της λογικής πράξης της αφαίρεσης. Το ANSYS έχει την δυνατότητα να κάνει αρκετές λογικές πράξεις μεταξύ περιοχών και όγκων. Η διαδικασία για την αφαίρεση μιας περιοχής από άλλες αναλύεται πιο κάτω.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Modeling και Operate.
- Επιλέγουμε Subtract.
- Επιλέγουμε Areas.
- Επιλέγουμε αρχικά τις περιοχές από τις οποίες θέλουμε να αφαιρέσουμε την περιοχή που μας ενδιαφέρει και επιλέγουμε OK.
- Κατόπιν επιλέγουμε την περιοχή που θέλουμε να αφαιρέσουμε και επιλέγουμε OK.

Εφαρμόζοντας τα παραπάνω προκύπτει το ολοκληρωμένο δισδιάστατο μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας που φαίνεται στην εικόνα 4.7-6.



**Εικόνα 4.7-6**

Δισδιάστατο μοντέλο της σύγχρονης 24-πολικής γεννήτριας.

Προκειμένου να γίνει η εξομοίωση και η επίλυση του δισδιάστατου προβλήματος σωστά πρέπει να γίνει χρήση της εντολής Glue του ANSYS. Η πορεία που πρέπει να ακολουθηθεί είναι η εξής.

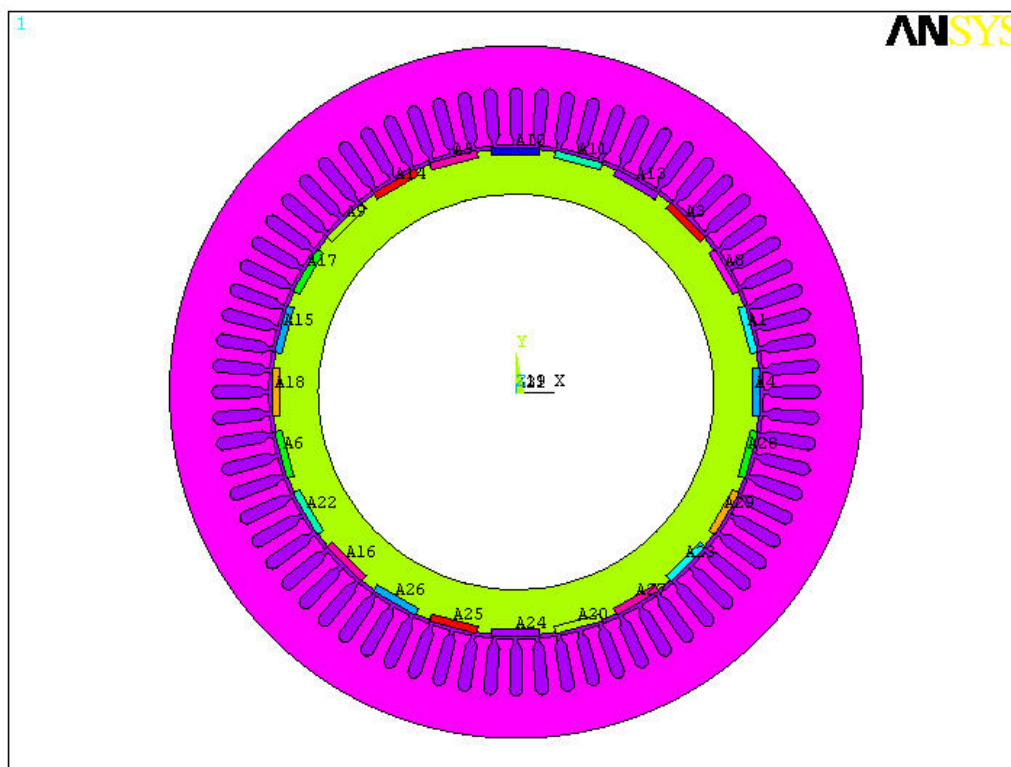
- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Modeling και Operate.
- Επιλέγουμε Glue.
- Επιλέγουμε Areas.
- Επιλέγουμε από το παράθυρο που προκύπτει, pick all, δηλαδή επιλογή όλων των περιοχών και επιλέγουμε OK.

Με τα παραπάνω ολοκληρώνεται η σχεδίαση του δισδιάστατου μοντέλου. Μπορούμε πλέον στο μοντέλο αυτό να αναθέσουμε υλικά και συνοριακές συνθήκες, να κατασκευάσουμε το πλέγμα και κατόπιν να λύσουμε το πρόβλημα. Επίσης από το παραπάνω δισδιάστατο μοντέλο μπορούμε να σχεδιάσουμε τα αντίστοιχα τρισδιάστατα μοντέλα.

Με την βοήθεια των εντολών Copy και Add μπορούμε να κατασκευάσουμε ολόκληρο το δισδιάστατο μοντέλο. Η λογική εντολή Add μπορεί να πραγματοποιηθεί εφαρμόζοντας την παρακάτω διαδικασία.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Modeling και Operate.
- Επιλέγουμε Add.
- Επιλέγουμε Areas.
- Επιλέγουμε τις περιοχές που θέλουμε να προσθέσουμε (αυτές οι περιοχές πρέπει να αλληλεπικαλύπτονται ή να έχουν κοινά σύνορα) και επιλέγουμε OK.

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται το πλήρες δισδιάστατο μοντέλο για την σύγχρονη 24-πολική γεννήτρια (δεν περιλαμβάνονται οι περιοχές που αντιστοιχούν στο ατσάλι).



**Εικόνα 4.7-7**

Πλήρες δισδιάστατο μοντέλο για την σύγχρονη 24-πολική γεννήτρια.

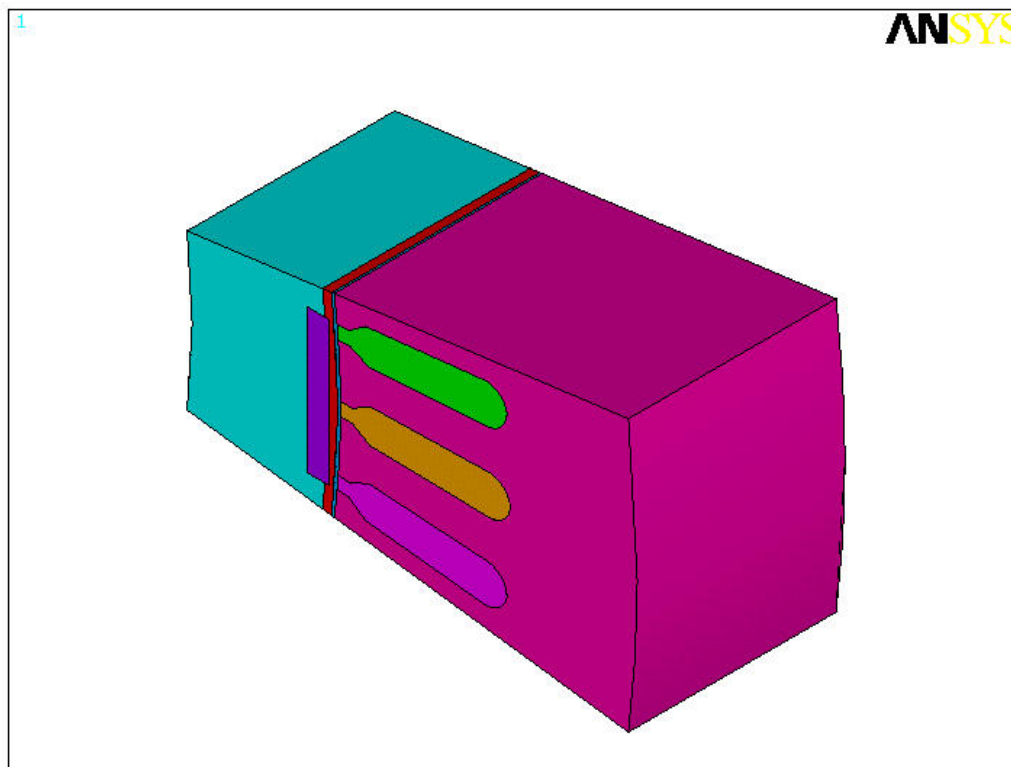
#### **4.8 Όγκοι (Volumes).**

Μέσω του δισδιάστατου μοντέλου μπορούμε να σχεδιάσουμε εύκολα τα αντίστοιχα τρισδιάστατα μοντέλα τόσο για μαγνήτες με κλίση όσο και για μαγνήτες χωρίς κλίση. Μέσω της εντολής extrude του ANSYS μπορούμε να δημιουργήσουμε όγκους από περιοχές, επεκτείνοντας τις περιοχές αυτές κατά μήκος ενός άξονα. Εφόσον το δισδιάστατο μοντέλο είναι σχεδιασμένο στο X-Y επίπεδο, η επέκταση της κάθε περιοχής θα γίνει κατά τον άξονα Z. Η διαδικασία για την εφαρμογή της εντολής extrude αναλύεται παρακάτω.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Modeling και Operate.
- Επιλέγουμε Extrude.
- Επιλέγουμε Areas και μετά Along Normal.
- Επιλέγουμε την περιοχή που θέλουμε (μόνο μία περιοχή μπορούμε να επιλέξουμε κάθε φορά) και επιλέγουμε OK στο ενεργό παράθυρο.
- Μετά στο παράθυρο το οποίο θα εμφανιστεί συμπληρώνουμε το πεδίο DIST με την επιθυμητή τιμή.

Επειδή το αξονικό μήκος της γεννήτριας είναι 0,035m είναι ευνόητο ότι και το μήκος της επέκτασης της επιφάνειας θα είναι αντίστοιχα 0,035m. Εφαρμόζοντας την λειτουργία extrude σε όλες τις περιοχές του δισδιάστατου μοντέλου προκύπτει το παρακάτω τρισδιάστατο μοντέλο, το οποίο αντιστοιχεί για ένα πόλο του δοκιμίου της

σύγχρονης 24-πολικής μηχανής. Στο μοντέλο αυτό δεν περιλαμβάνονται οι όγκοι αέρα που περιβάλλουν την μηχανή. Έτσι η λύση που θα προκύψει από το μοντέλο αυτό δεν θα περιλαμβάνει την επίδραση που έχει ο αέρας, που περιβάλλει την μηχανή, στην μαγνητική επαγωγή του διακένου.



**Εικόνα 4.8-1**

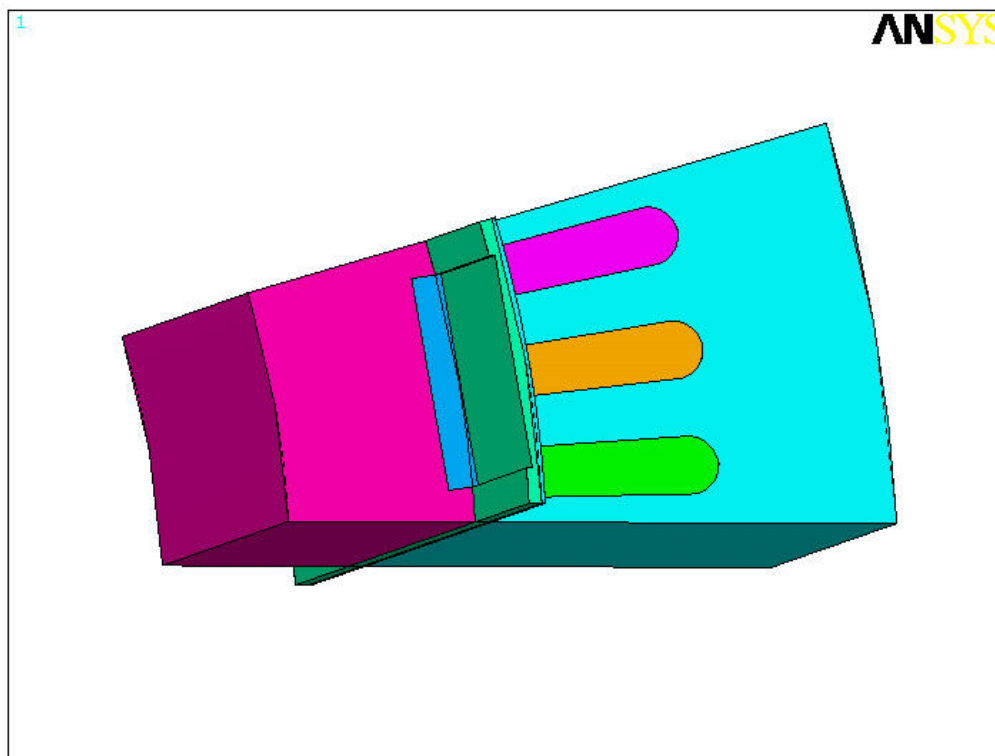
Τρισδιάστατο μοντέλο της σύγχρονης μηχανής με μαγνήτη χωρίς κλίση.

Πάλι για να ολοκληρωθεί η σχεδίαση του παραπάνω τρισδιάστατου μοντέλου πρέπει να γίνει χρήση της εντολής *Glue*, όπου θα πρέπει να επιλεγούν όλοι οι όγκοι από τους οποίους απαρτίζεται το παραπάνω μοντέλο.

Προκειμένου να κατασκευαστεί το φυσικό μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας με τους όγκους αέρα που την περιβάλλουν, θα πρέπει να γίνουν ορισμένες αλλαγές στο παραπάνω τρισδιάστατο μοντέλο. Το αξονικό μήκος των όγκων του στάτη, του δρομέα και του μαγνήτη θα παραμείνει το ίδιο δηλαδή 0,035m. Το αξονικό μήκος όμως του διακένου θα είναι μεγαλύτερο και μάλιστα προσαυξημένο κατά 0,015m σε κάθε μεριά. Αυτό είναι αναγκαίο γιατί το διάκενο πρέπει να είναι ενιαίο για να είναι το πλέγμα ομοιόμορφο στο διάκενο. Το συνολικό αξονικό μήκος συνεπώς του διακένου θα είναι:

$$\text{Αξονικό μήκος διακένου} = 0,035m + 2 \cdot 0,015 = 0,065m$$

Χρησιμοποιώντας πάλι την εντολή *extrude* του ANSYS θα προκύψει το μοντέλο που φαίνεται στην εικόνα της επόμενης σελίδας. Υπενθυμίζεται ότι, για τον στάτη, τον δρομέα, τον μαγνήτη και για τις περιοχές που αντιστοιχούν στον αέρα ανάμεσα στις οδοντώσεις του στάτη, στο πεδίο *DIST*, της εντολής *extrude*, θα αποδίδεται η τιμή 0,035 ενώ για τις δύο περιοχές που αντιστοιχούν στο διάκενο, στο πεδίο *DIST* θα αποδίδεται η τιμή 0,065.



**Εικόνα 4.8-2**

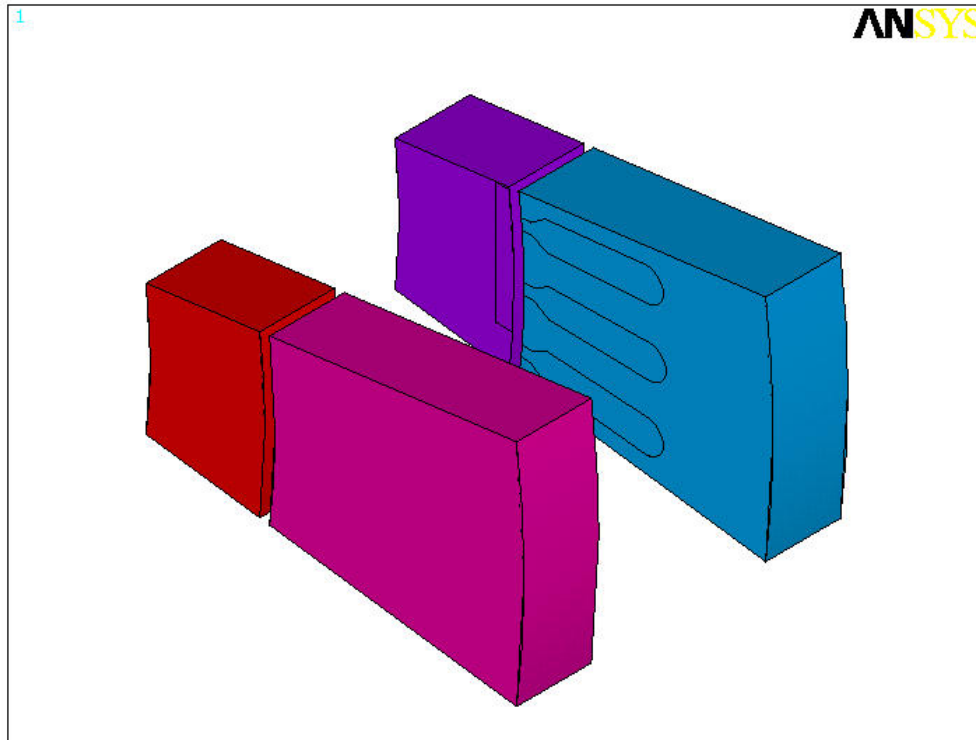
Ημιτελές τρισδιάστατο μοντέλο της σύγχρονης μηχανής με μαγνήτες χωρίς κλίση.

Προκειμένου να συμπληρωθεί το παραπάνω μοντέλο πρέπει να προσθέσουμε και τους όγκους αέρα που περιβάλλουν την σύγχρονη γεννήτρια και οι οποίοι είναι απαραίτητοι για να παρατηρήσουμε πως επηρεάζεται η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο της μηχανής. Το αξονικό μήκος των όγκων αυτών είναι 0,015m και είναι κυλινδρικοί τομείς. Μέσω του ANSYS μπορούμε να σχεδιάσουμε τους κυλινδρικούς αυτούς τομείς και η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Modeling και Create.
- Επιλέγουμε Volumes.
- Επιλέγουμε Cylinder.
- Επιλέγουμε Partial Cylinder.
- Στο παράθυρο που θα εμφανιστεί συμπληρώνουμε τα πεδία X, Y, Theta-1, Theta-2, Rad-1, Rad-2 και Depth με τις επιθυμητές τιμές.

Οι όγκοι που αντιπροσωπεύουν τον αέρα που περιβάλλει το μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας είναι συνολικά τέσσερις και το αξονικό μήκος αυτών είναι 0,015m. Εκτείνονται από τις  $7,5^\circ$  έως τις  $-7,5^\circ$  και ο πρώτος όγκος εκτείνεται από ακτίνα 0,1 έως 0,123 ενώ ο δεύτερος όγκος εκτείνεται από ακτίνα 0,125 έως 0,175. Συνεπώς και για τους δύο όγκους στα πεδία Theta-1, Theta-2 εισάγουμε τις τιμές 7,5 και  $-7,5$  ενώ στο πεδίο Depth εισάγουμε το αξονικό μήκος των όγκων δηλαδή 0,015. Στα πεδία Rad-1, Rad-2 για τον πρώτο όγκο εισάγουμε τις τιμές 0,1 και 0,123 ενώ οι αντίστοιχες τιμές για τον δεύτερο όγκο θα είναι 0,125 και 0,175. Το κέντρο αυτών των κυλινδρικών τομέων είναι το σημείο στην αρχή των αξόνων άρα στα πεδία X,Y δεν θα αναθέσουμε καμία τιμή. Τους δύο άλλους όγκους τους δημιουργούμε κάνοντας χρήση της εντολής copy του ANSYS με ταυτόχρονη μετακίνηση στον άξονα Z κατά  $0,035 + 0,015 = 0,05m$ .

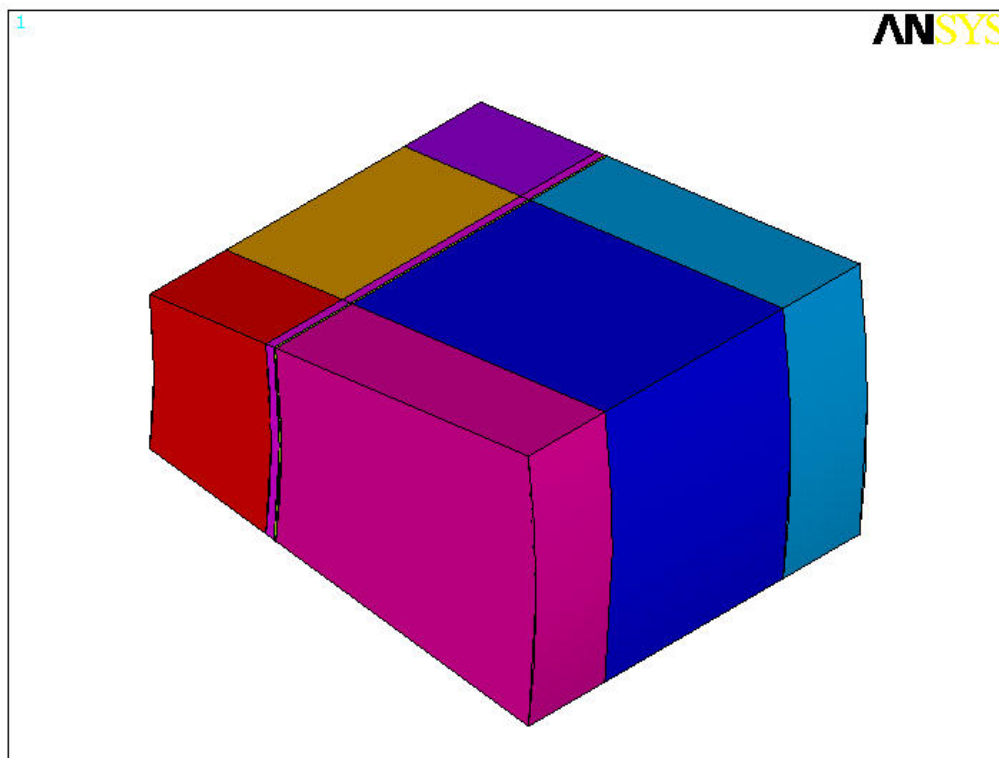
Στην επόμενη σελίδα απεικονίζονται οι τέσσερις αυτοί όγκοι.



**Εικόνα 4.8-3**

Τέσσερις όγκοι αέρα που περιβάλλουν την σύγχρονη γεννήτρια.

Το ολοκληρωμένο τρισδιάστατο μοντέλο για την σύγχρονη γεννήτρια με μαγνήτες χωρίς κλίση φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



**Εικόνα 4.8-4**

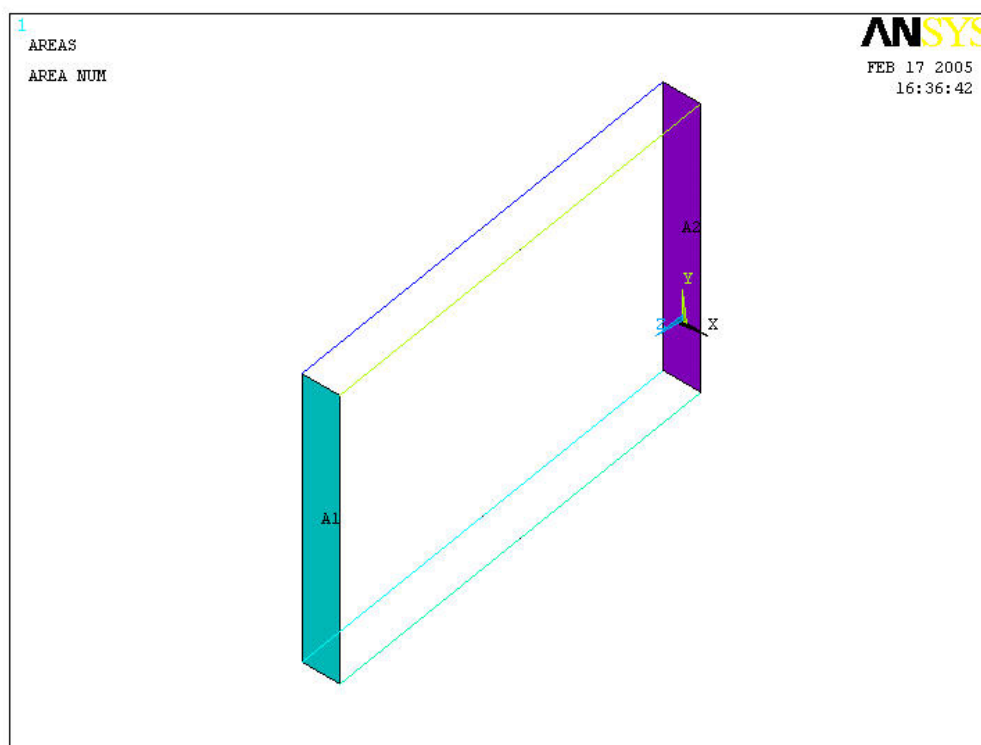
Ολοκληρωμένο τρισδιάστατο μοντέλο της σύγχρονης γεννήτρας με μόνιμους χωρίς κλίση μαγνήτες.

Τέλος είναι σημαντικό να σημειωθεί πως θα πρέπει να γίνει χρήση και της εντολής Glue επιλέγοντας όλους τους όγκους από τους οποίους αποτελείται το τρισδιάστατο μοντέλο. Αν δεν γίνει αυτό τότε το ANSYS δεν θα μπορεί να κάνει την πλεγματοποίηση του μοντέλου και να λύσει το πρόβλημα

#### **4.9 Σχεδίαση του τρισδιάστατου μοντέλου με μαγνήτες με κλίση.**

Το τρισδιάστατο μοντέλο με μαγνήτες με κλίση παρουσιάζει κάποιες ιδιομορφίες και θα πρέπει να ακολουθηθεί διαφορετική πορεία προκειμένου να σχεδιαστεί.

Αρχικά σχεδιάζεται ο κεκλιμένος μαγνήτης. Ο μαγνήτης αυτός δεν θα είναι ένα απλό ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο το οποίο θα μπορούσε να σχεδιαστεί κάνοντας χρήση της εντολής Block του ANSYS. Θα πρέπει αρχικά να σχεδιάσουμε μία επιφάνεια με τις ακριβείς διαστάσεις του μαγνήτη στο δισδιάστατο μοντέλο. Η περιοχή αυτή φαίνεται στην εικόνα 4.7-5. Αυτήν την περιοχή την μετακινούμε κατά 0,0035m κατά τον άξονα Y κάνοντας χρήση της εντολής move. Μετά κάνοντας χρήση της εντολής copy δημιουργούμε μια καινούργια περιοχή την οποία μετακινούμε στον άξονα Z κατά 0,035m και κατά -0,007m στον άξονα Y. Κατόπιν ενώνουμε με γραμμές τις αντίστοιχες κορυφές των δύο περιοχών, δηλαδή των δύο ορθογωνίων. Τα παραπάνω απεικονίζονται στην επόμενη εικόνα, 4.9-1.

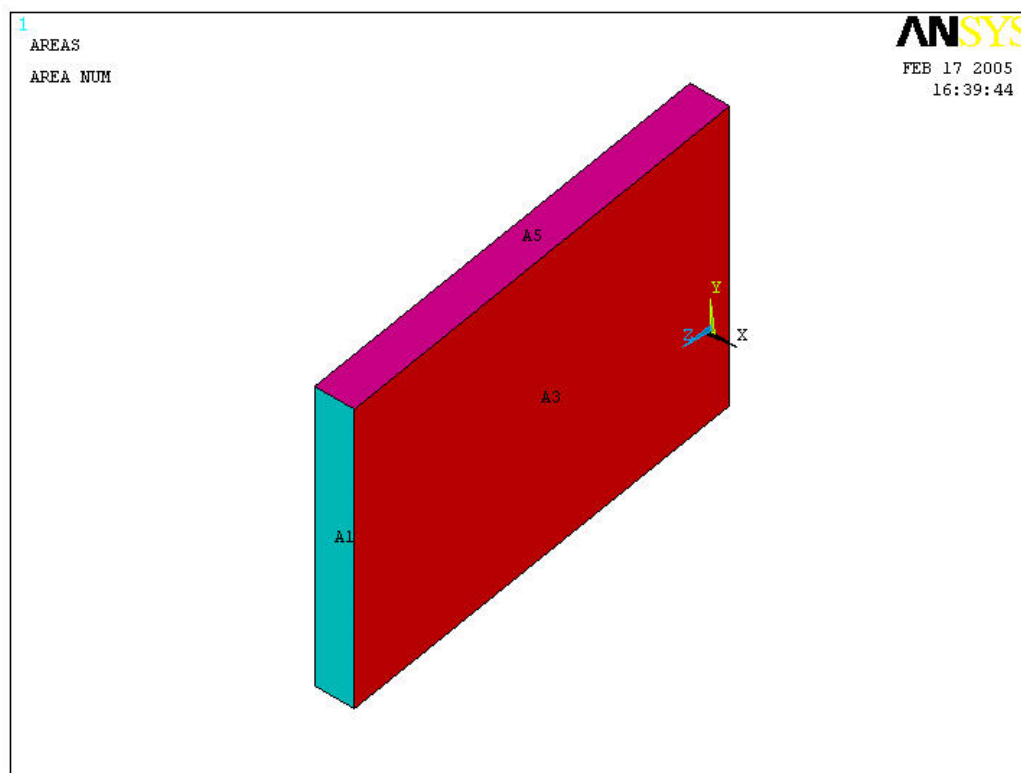


**Εικόνα 4.9-1**

Ημιτελής κεκλιμένος μαγνήτης.

Κατόπιν δημιουργούμε και τις υπόλοιπες περιοχές, δηλαδή τις υπόλοιπες έδρες που αποτελούν τα όρια του κεκλιμένου μαγνήτη, επιλέγοντας τις κατάλληλες γραμμές. Ακολουθούμε έτσι πάλι, την διαδικασία δημιουργίας περιοχών μέσω της επιλογής των γραμμών που περιβάλλουν την επιφάνεια (arbitrary by lines). Έτσι ο μαγνήτης με κλίση παίρνει την μορφή που παρουσιάζεται στην εικόνα της επόμενης σελίδας.





**Εικόνα 4.9-2**

Μαγνήτης με κλίση όπου φαίνονται όλες οι περιοχές από τις οποίες αποτελείται.

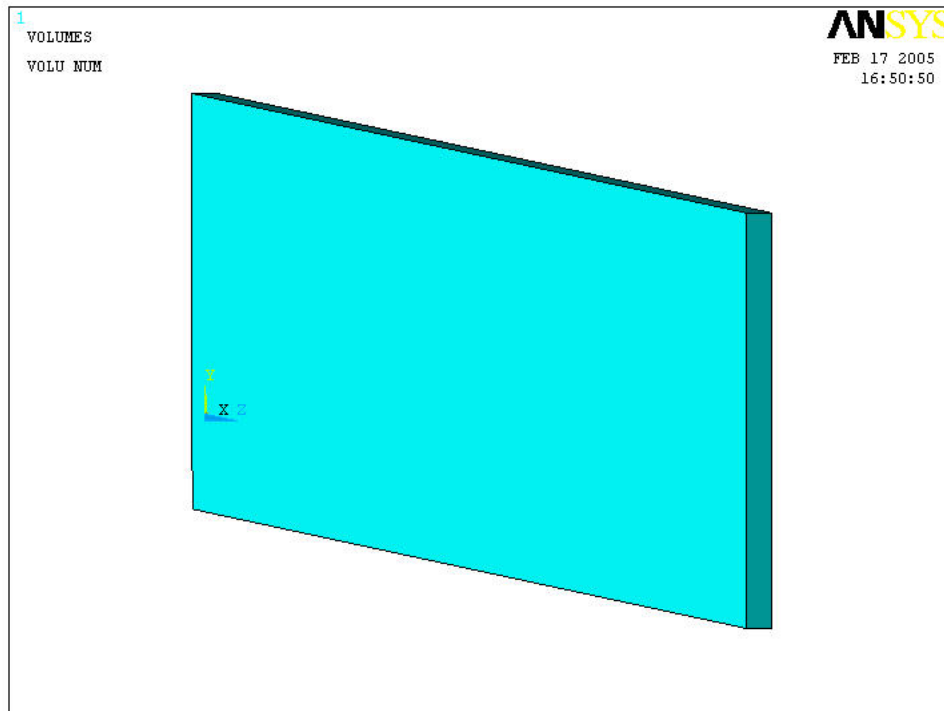
Οι περιοχές που φαίνονται στην παραπάνω εικόνα περικλείουν έναν όγκο ο οποίος όμως πρέπει να οριστεί, εφόσον το ANSYS στο συγκεκριμένο στάδιο θεωρεί ότι μεταξύ των περιοχών αυτών δεν υπάρχει τίποτα. Η διαδικασία μέσω της οποίας γίνεται να δημιουργηθεί ο όγκος αυτός παρουσιάζεται παρακάτω και είναι ανάλογη της διαδικασίας δημιουργίας επιφανειών, μέσω της επιλογής των γραμμών που αποτελούν τα όρια της συγκεκριμένης επιφάνειας.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Modeling και Create.
- Επιλέγουμε Volumes.
- Επιλέγουμε Arbitrary και by areas.
- Από το παράθυρο το οποίο θα εμφανιστεί επιλέγουμε με το mouse όλες τις περιοχές και επιλέγουμε OK, έτσι δημιουργείται ο όγκος, που φαίνεται στην εικόνα της επόμενης σελίδας (εικόνα 4.9-3) και ο οποίος παριστάνει τον κεκλιμένο μαγνήτη.

Μέσω της παραπάνω διαδικασίας δημιουργήθηκε η περιοχή, όγκος, του κεκλιμένου μαγνήτη με την επιλογή των επιφανειών που είναι τα όρια της συγκεκριμένης περιοχής.

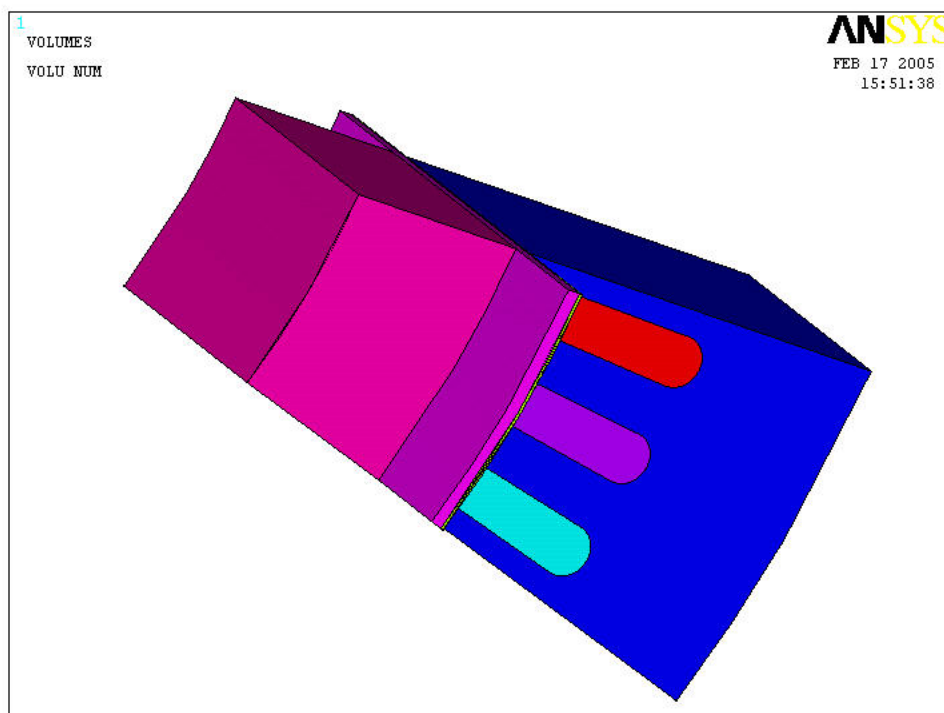
Από την εικόνα 4.9-3 μπορεί κάποιος να παρατηρήσει την κλίση του μαγνήτη, η οποία αντιστοιχεί σε ένα πολικό βήμα.





**Εικόνα 4.9-3**  
Μαγνήτης με κλίση.

Από το δισδιάστατο μοντέλο το οποίο παρουσιάζεται στην εικόνα 4.7-4, κάνουμε χρήση της εντολή *extrude* και σχηματίζεται το παρακάτω τρισδιάστατο μοντέλο. Το αξονικό μήκος του δρομέα, του στάτη και του αέρα ανάμεσα στις οδοντώσεις του στάτη είναι 0,035m ενώ το αξονικό μήκος του διακένου είναι 0,065m.

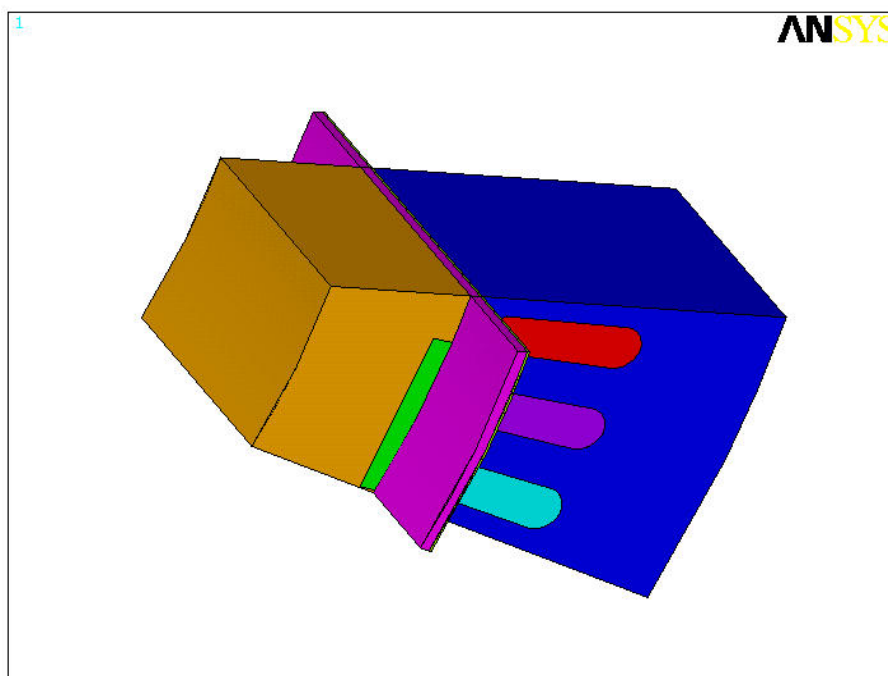


**Εικόνα 4.9-4**  
Ημιτελές τρισδιάστατο μοντέλο.

Έπειτα μετακινούμε τον μαγνήτη με κλίση, κάνοντας χρήση της εντολής move, 0,121275m κατά τον άξονα X. Μετά όπως έγινε και στο δισδιάστατο μοντέλο θα πρέπει να αφαιρέσουμε τον όγκο του μαγνήτη με κλίση από τους όγκους με τους οποίους συμπίπτει, δηλαδή από τον δρομέα και το διάκενο. Τα παραπάνω γίνονται κάνοντας χρήση της εντολής subtract του ANSYS. Η διαδικασία της αφαίρεσης για όγκους παρουσιάζεται παρακάτω.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Modeling και Operate.
- Επιλέγουμε Subtract.
- Επιλέγουμε Volumes.
- Επιλέγουμε αρχικά τους όγκους από τους οποίους θέλουμε να αφαιρέσουμε τον όγκο που μας ενδιαφέρει και επιλέγουμε OK.
- Κατόπιν επιλέγουμε τον όγκο που θέλουμε να αφαιρέσουμε και επιλέγουμε OK.

Εφαρμόζοντας τα παραπάνω προκύπτει το παρακάτω τρισδιάστατο μοντέλο όπου φαίνεται και ο μαγνήτης με κλίση.



**Εικόνα 4.9-5**

Τρισδιάστατο μοντέλο με μαγνήτες με κλίση. Στο μοντέλο αυτό έχει εισαχθεί ο κεκλιμένος μαγνήτης ο οποίος φαίνεται καθαρά με πράσινο χρώμα.

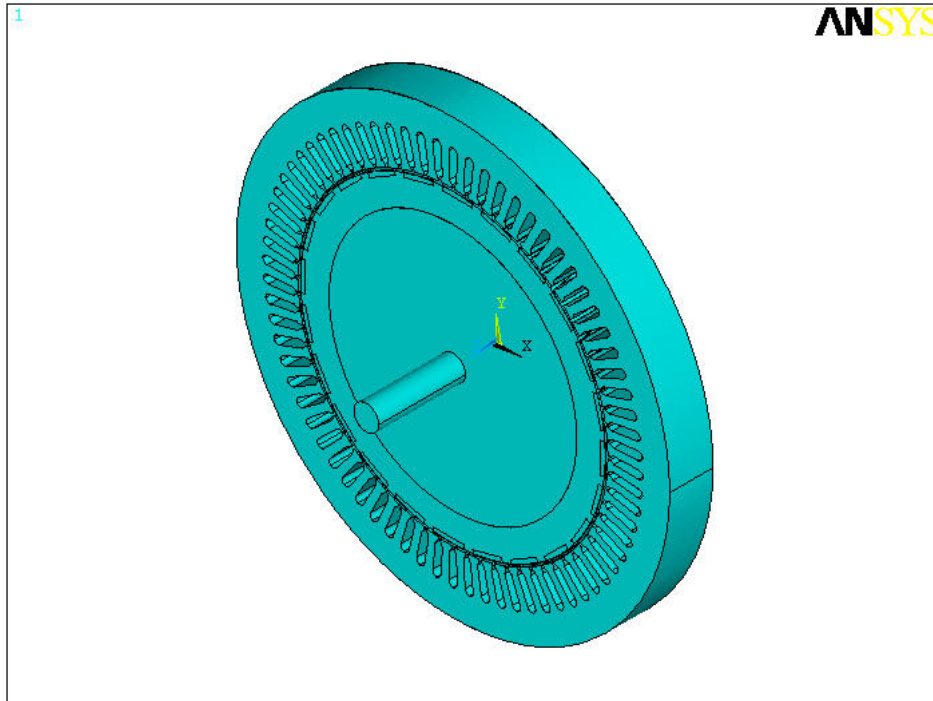
Για να ολοκληρωθεί το παραπάνω τρισδιάστατο μοντέλο θα πρέπει να προστεθούν και οι όγκοι του αέρα που περιβάλλουν την μηχανή και τέλος θα πρέπει να γίνει πάλι χρήση της εντολής Glue προκειμένου να είναι έτοιμο το τρισδιάστατο μοντέλο.

Το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο με κεκλιμένους μαγνήτες είναι ακριβώς όμοιο με το τρισδιάστατο μοντέλο με μαγνήτες χωρίς κλίση όπως φαίνεται στην εικόνα 4.8-4.

#### **4.10 Σχεδίαση του πλήρους τρισδιάστατου μοντέλου της σύγχρονης μηχανής.**

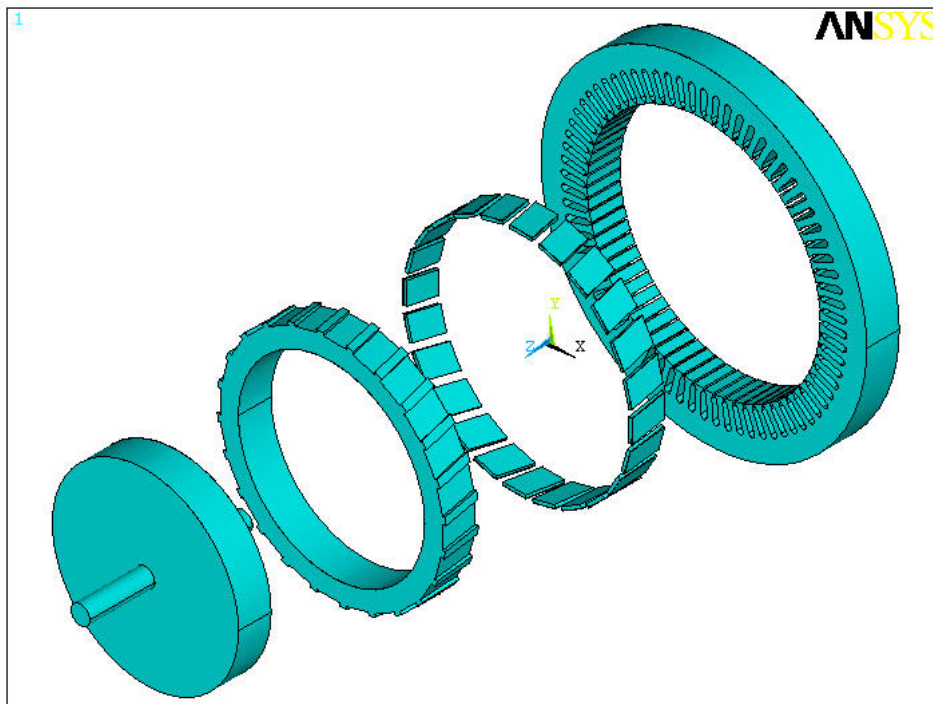
Κάνοντας χρήση της εντολής copy και επιλέγοντας το κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων μπορούμε να σχεδιάσουμε ολόκληρο το τρισδιάστατο μοντέλο του

δοκιμίου της σύγχρονης 24-πολικής γεννήτριας με μαγνήτες με κλίση. Στο τρισδιάστατο αυτό μοντέλο που φαίνεται στις δύο παρακάτω εικόνες δεν περιλαμβάνονται οι όγκοι αέρα που περικλείουν την μηχανή καθώς και οι όγκοι αέρα που υπάρχουν ανάμεσα στις οδοντώσεις του στάτη.



**Εικόνα 4.10-1**

Πλήρες τρισδιάστατο μοντέλο της σύγχρονης 24-πολικής μηχανής.



**Εικόνα 4.10-2**

Τρισδιάστατο μοντέλο της σύγχρονης μηχανής όπου διακρίνονται τα τμήματα από τα οποία αποτελείται η σύγχρονη μηχανή.

Το παραπάνω μοντέλο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξομοίωση της σύγχρονης μηχανής εφόσον για να πάρουμε μια αξιόπιστη λύση το πλέγμα θα πρέπει να είναι πυκνό κάτι το οποίο θα οδηγήσει σε πλέγμα με πολλά elements (παραπάνω από 32.000 elements) ενώ το ANSYS έχει περιορισμένες δυνατότητες όσον αφορά τον μέγιστο αριθμό των στοιχείων. Επίσης η επίλυση του παραπάνω μοντέλου θα ήταν ιδιαίτερα χρονοβόρα και απαιτητική σε υπολογιστικούς πόρους.

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

ΑΠΟΔΟΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΟ  
ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΚΑΙ ΣΤΟ  
ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ



## **5.1 Εισαγωγή.**

Εφόσον ολοκληρωθεί η κατασκευή του φυσικού μοντέλου και πριν προχωρήσουμε στην εφαρμογή των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών και την κατασκευή του πλέγματος, θα πρέπει να οριστούν τα διάφορα υλικά (materials) του μοντέλου της σύγχρονης μηχανής και κατόπιν να γίνει η ανάθεση στις κατάλληλες περιοχές (στις επιφάνειες του δισδιάστατου και στους όγκους του τρισδιάστατου μοντέλου).

Όπως η πραγματική σύγχρονη μηχανή αποτελείται από διάφορα υλικά (χαλκός, σίδηρο, ατσάλι, μαγνήτες, μονωτές και τον αέρα που τα περιβάλλει) που το καθένα έχει κατάλληλη γεωμετρία και μορφή, έτσι και στο μοντέλο που κατασκευάζεται στον υπολογιστή οι διάφορες περιοχές του έχουν διαφορετικές ιδιότητες οι οποίες θα πρέπει να αντιστοιχούν σε αυτές της πραγματικής σύγχρονης μηχανής.

Το ANSYS καθορίζει τα υλικά ανάλογα με τις ιδιότητες τους και το πρόβλημα που επιλέγουμε να επιλύσουμε (ακουστικό, ηλεκτρομαγνητικό, θερμοδυναμικής ή ακόμα και συνδυασμένο). Το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι ηλεκτρομαγνητικό και συγκεκριμένα μαγνητοστατικό. Συνεπώς τα υλικά θα καθορίζονται από την μαγνητική τους διαπερατότητα, την αγωγιμότητα, την χαρακτηριστική B-H (μαγνητική επαγωγή συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου) δηλαδή ιδιότητες των υλικών που χαρακτηρίζουν ένα μαγνητοστατικό πρόβλημα και όχι άλλες που θα καθόριζαν την συμπεριφορά του υλικού σε μηχανικές καταπονήσεις (στην προκειμένη περίπτωση ένα structural πρόβλημα).

Βέβαια το ANSYS έχει την δυνατότητα να λύσει και συνδυασμένα προβλήματα (coupled field analysis) και αυτό δίνει την δυνατότητα να ληφθεί μία ρεαλιστική λύση του προβλήματος. Για παράδειγμα στην πραγματική σύγχρονη μηχανή λαμβάνουν χώρα πολλά φαινόμενα ταυτόχρονα (θερμαίνεται ο κινητήρας, υπάρχουν μηχανικές καταπονήσεις) έτσι μια συνδυασμένη ανάλυση προσφέρει την δυνατότητα να αναλυθεί η μηχανή με μεγαλύτερη ακρίβεια και πιο ρεαλιστικά και να μην περιοριστεί η μοντελοποίηση μόνο στην ηλεκτρομαγνητική άποψη του προβλήματος.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα περιοριστούμε μόνο στο μαγνητοστατικό πρόβλημα οπότε τα υλικά θα συμπεριφέρονται σαν να βρίσκονται μέσα σε ένα στατικό μαγνητικό πεδίο χωρίς να επιδρούν σε αυτά άλλα πεδία με αποτέλεσμα μόνο οι μαγνητικές ιδιότητες των υλικών αυτών να υφίστανται.

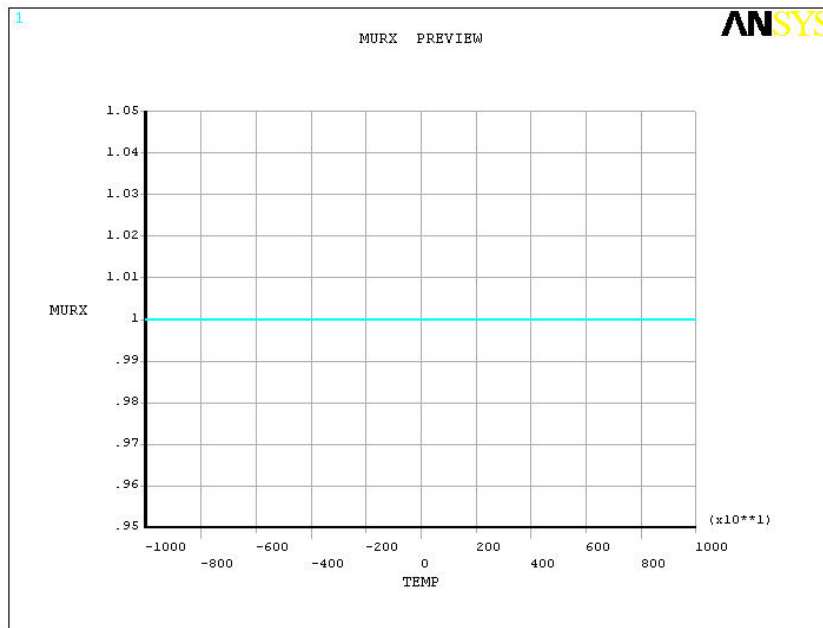
## **5.2 Αέρας.**

Σύμφωνα με τα παραπάνω ο αέρας εξομοιώνεται απλώς ορίζοντας ένα υλικό με σχετική μαγνητική διαπερατότητα που είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας, σταθερή και ίση με την μονάδα.

Ο ορισμός του υλικού αυτού στο ANSYS γίνεται ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Material Properties.
- Επιλέγουμε Material Models.
- Επιλέγουμε Electromagnetics.
- Επιλέγουμε Relative Permeability.
- Τέλος επιλέγουμε Constant και θέτουμε στο αντίστοιχο πεδίο (το πεδίο MURX εφόσον ο αέρας θεωρείται ισοτροπικό μέσο) την τιμή 1 (δηλαδή μονάδα, που είναι η τιμή της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας του αέρα).

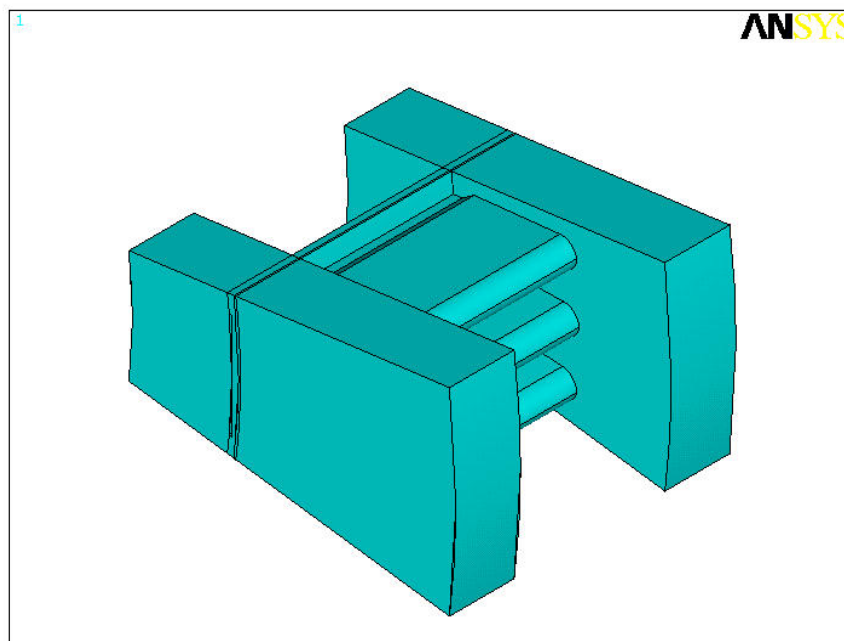
Στο επόμενο γράφημα φαίνεται η χαρακτηριστική  $\mu_r$ -T της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας, του υλικού που προσομοιώνει τον αέρα.



**Γράφημα 5.2-1**

Χαρακτηριστική  $\mu_r$ -T της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Το υλικό αυτό ανατίθεται στους αντίστοιχους όγκους όπου υπάρχει αέρας στο πραγματικό μοντέλο της σύγχρονης μηχανής. Οι εννέα συνολικά όγκοι αέρα του μοντέλου φαίνονται στην πιο κάτω εικόνα.



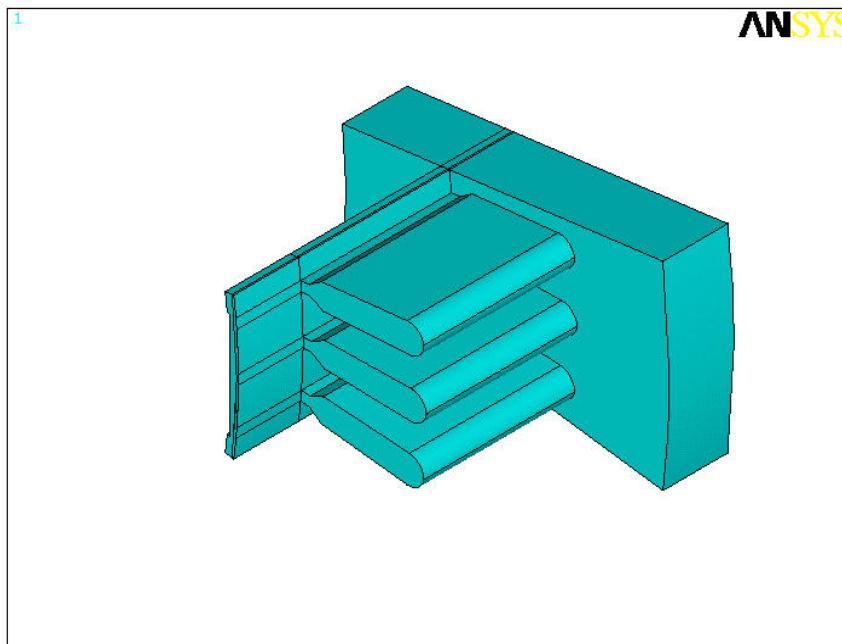
**Εικόνα 5.2-1**

Περιοχές του αέρα στο μοντέλο της σύγχρονης μηχανής.



Αυτές οι περιοχές είναι το διάκενο που υπάρχει μεταξύ του στάτη και του δρομέα, επίσης είναι οι περιοχές που βρίσκονται μεταξύ των οδοντώσεων του στάτη καθώς και όγκοι με μορφή κυλινδρικού τομέα που βρίσκονται εξωτερικά της μηχανής και εφάπτονται σε αυτήν (εφόσον θέλουμε να εξομοιώσουμε την επίδραση που έχει ο αέρας που βρίσκεται εξωτερικά της μηχανής και να παρατηρήσουμε την αντίστοιχη μείωση της μαγνητικής επαγωγής  $B$  στο διάκενο και την σκέδαση).

Οι περιοχές αυτές απεικονίζονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην πιο κάτω εικόνα.



**Εικόνα 5.2-2**

Περιοχές του αέρα στο μοντέλο της σύγχρονης μηχανής. Απεικονίζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια το διάκενο καθώς και οι αύλακες του στάτη.

### **5.3 Σίδηρος.**

Ο σίδηρος μπορεί να προσομοιωθεί ορίζοντας ένα υλικό όχι με σταθερή μαγνητική διαπερατότητα όπως του αέρα, που αυτό θα σήμαινε μια γραμμική χαρακτηριστική  $B-H$ , αλλά με μία μαγνητική διαπερατότητα που μεταβάλλεται με την ένταση του μαγνητικού πεδίου  $H$ . Συνεπώς το υλικό θα οριστεί σύμφωνα με μια μη γραμμική χαρακτηριστική  $B-H$  καθώς είναι μη γραμμικό, μαλακό, μαγνητικό υλικό.

Ο ορισμός του σιδηροπυρήνα στο ANSYS γίνεται ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Material Properties.
- Επιλέγουμε Material Models.
- Επιλέγουμε Electromagnetics.
- Επιλέγουμε B-H Curve.
- Τέλος εισάγουμε τις τιμές της μαγνητικής επαγωγής  $B$  και της έντασης του μαγνητικού πεδίου  $H$  στα αντίστοιχα πεδία δημιουργώντας τον αντίστοιχο πίνακα.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται μια τυπική  $B-H$  χαρακτηριστική για τον σιδηροπυρήνα. Οι τιμές του πίνακα αυτού χρησιμοποιήθηκαν στο ANSYS. Από τα

δεδομένα του πίνακα μπορεί κάποιος εύκολα να διαπιστώσει τον κορεσμό του σιδηροπυρήνα όταν η ένταση του μαγνητικού πεδίου  $H$  αυξάνει σημαντικά.

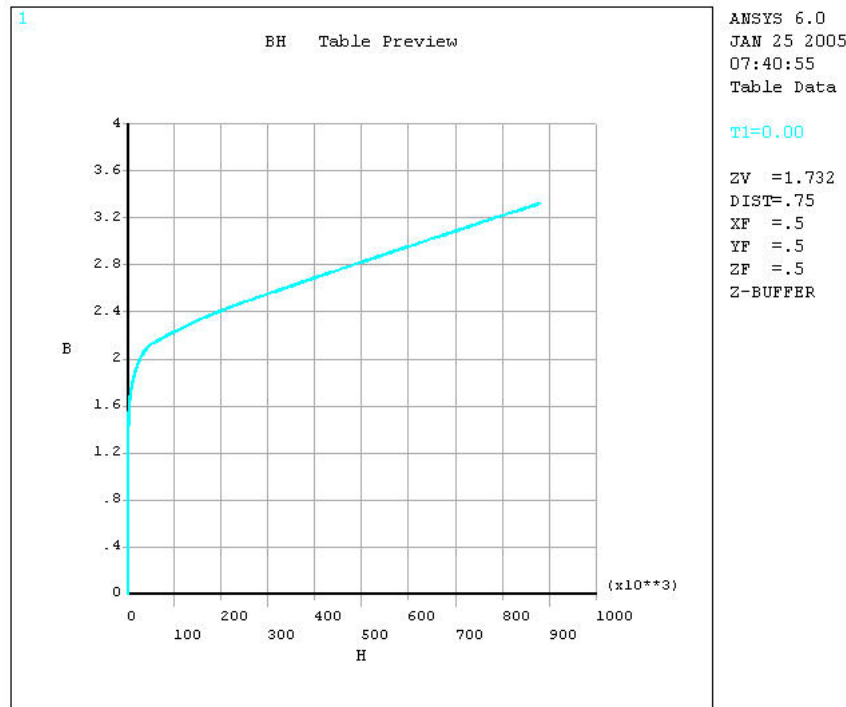
A/A	H (Ampere/meter)	B (Tesla)
1	355	0,70
2	405	0,80
3	470	0,90
4	555	1,00
5	673	1,10
6	836	1,20
7	1.065	1,30
8	1.220	1,35
9	1.420	1,40
10	1.720	1,45
11	2.130	1,50
12	2.670	1,55
13	3.480	1,60
14	4.500	1,65
15	5.950	1,70
16	7.650	1,75
17	10.100	1,80
18	13.000	1,85
19	15.900	1,90
20	21.100	1,95
21	26.300	2,00
22	32.900	2,05
23	42.700	2,10
24	61.700	2,15
25	84.300	2,20
26	110.000	2,25
27	135.000	2,30
28	200.000	2,41
29	400.000	2,69
30	800.000	3,22

**Πίνακας 5.3-1**

B-H χαρακτηριστική του σιδηροπυρήνα.

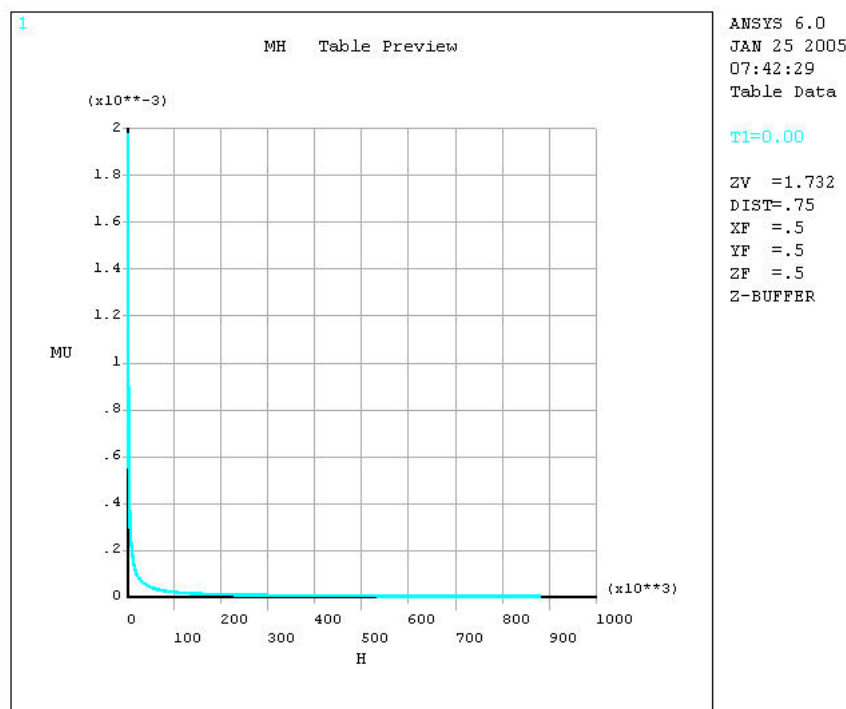
Τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα εισάγονται στο ANSYS. Θα πρέπει όμως τα δεδομένα αυτά να ικανοποιούν κάποιες προϋποθέσεις, προκειμένου το υλικό να προσομοιώνει με ακρίβεια τον σιδήροπυρήνα, και αυτές είναι οι εξής. Θα πρέπει οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής  $B$  να είναι μοναδικές για κάθε τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου  $H$ , η τιμή της μαγνητικής επαγωγής  $B$  να αυξάνεται μονότονα με την αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου καθώς και η καμπύλη B-H να περνάει από την αρχή των αξόνων.

Στις επόμενες γραφικές παραστάσεις φαίνονται αντίστοιχα οι χαρακτηριστικές, για το υλικό που ορίστηκε παραπάνω, B-H (μαγνητική επαγωγή  $B$  συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου  $H$ ),  $\mu$ -H (μαγνητική διαπερατότητα του σιδήρου  $\mu$  συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου  $H$ ) και τέλος  $\nu$ - $B^2$  (ειδική μαγνητική αντίσταση,  $\nu$ , συναρτήσει του τετραγώνου της μαγνητικής επαγωγής  $B^2$ ).

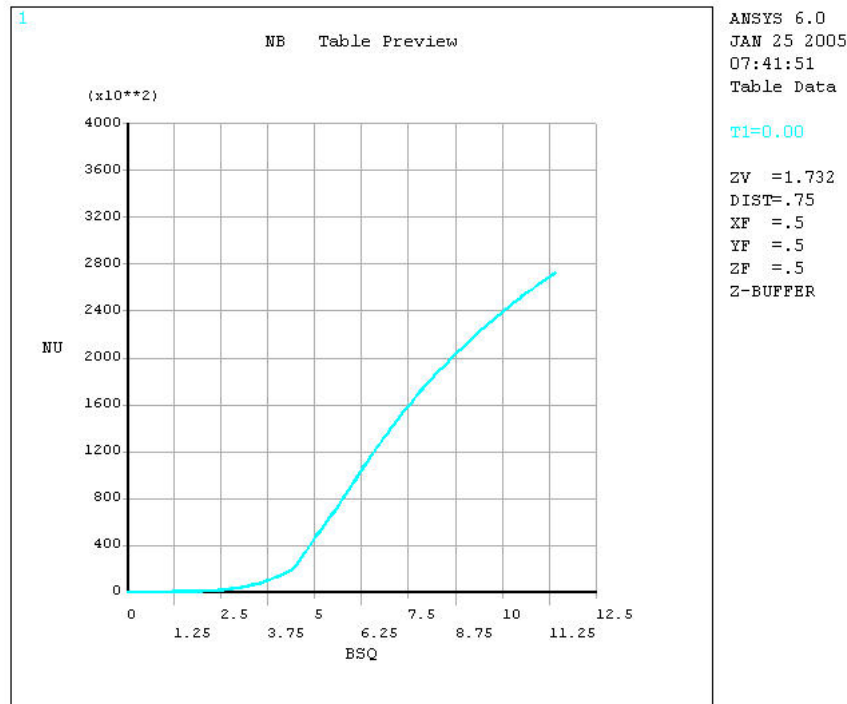


**Γράφημα 5.3-1**  
 Χαρακτηριστική B-H του σιδηροπυρήνα.

Η χαρακτηριστική  $\mu$ -H υπολογίζεται από το ANSYS και από το παρακάτω γράφημα παρατηρούμε την έντονη μείωση της μαγνητικής διαπερατότητας του σιδηροπυρήνα καθώς αυξάνεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου.

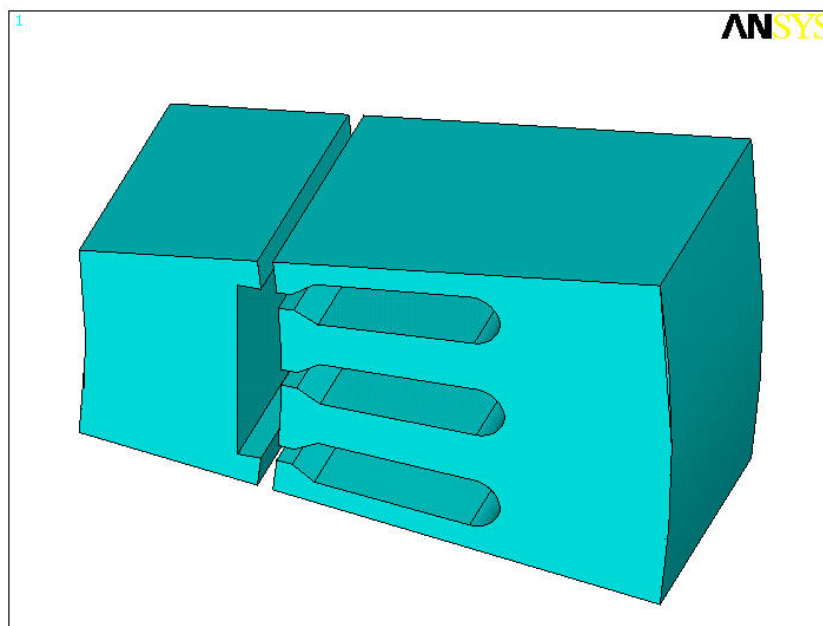


**Γράφημα 5.3-2**  
 Χαρακτηριστική  $\mu$ -H του σιδηροπυρήνα.

**Γράφημα 5.3-3**

Χαρακτηριστική  $\nu$ - $B^2$  (ειδική μαγνητική αντίσταση,  $\nu$ , συναρτήσει του τετραγώνου της μαγνητικής επαγωγής  $B^2$ ) του σιδηροπυρήνα.

Από το παραπάνω γράφημα, το οποίο και αυτό προκύπτει από το ANSYS, παρατηρούμε ότι η καμπύλη είναι συνεχής και ομαλή. Αυτό σημαίνει ότι το υλικό έχει οριστεί σωστά. Τέλος το υλικό αυτό ανατίθεται στους όγκους του στάτη και του δρομέα, που φαίνονται στην πιο κάτω εικόνα, του τρισδιάστατου μοντέλου που κατασκευάστηκε στο ANSYS.

**Εικόνα 5.3-1**

Περιοχές του στάτη και του δρομέα του μοντέλου της σύγχρονης μηχανής.

### 5.4 Μαγνήτης.

Στο δοκίμιο της σύγχρονης 24-πολικής μηχανής, οι μαγνήτες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τύπου Neofer 230/120. Η χαρακτηριστική B-H του συγκεκριμένου μαγνήτη καθορίστηκε πειραματικά. Οι πειραματικές μετρήσεις δίνονται στον κάτωθι πίνακα.

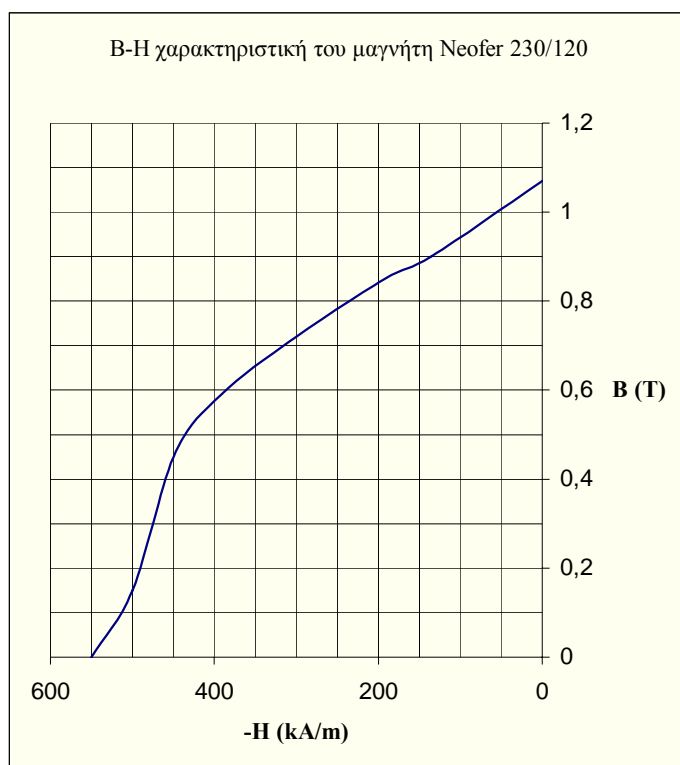
A/A	-H (Ampere/meter)	B (Tesla)
1	550.000	0,000
2	500.000	0,150
3	450.000	0,450
4	400.000	0,575
5	315.000	0,700
6	192.000	0,850
7	135.000	0,900
8	0	1,070

**Πίνακας 5.4-1**

B-H χαρακτηριστική του μαγνήτη τύπου Neofer 230/120.

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου στον πίνακα παρουσιάζεται με αρνητικό πρόσημο εφόσον εφαρμόστηκε στον μαγνήτη ένα αντίθετο μαγνητικό πεδίο προκειμένου να υπολογιστεί η ένταση του μαγνητικού πεδίου, H, που αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη τιμή μαγνητικής επαγωγής B. Από τα παραπάνω βγαίνει το συμπέρασμα ότι η χαρακτηριστική μαγνήτισης B-H του μαγνήτη βρίσκεται στο δεύτερο τεταρτημόριο, και όχι στο πρώτο όπως ισχύει για ένα τυπικό σιδηρομαγνητικό υλικό.

Η χαρακτηριστική μαγνήτισης του μαγνήτη όπως προέκυψε από τις μετρήσεις του πειράματος παρατίθεται στο πιο κάτω γράφημα.



**Γράφημα 5.4-1**

Χαρακτηριστική B-H του μαγνήτη τύπου Neofer 230/120.

Το σημείο τομής της καμπύλης μαγνήτισης με τον οριζόντιο άξονα, δηλαδή τον άξονα της έντασης του μαγνητικού πεδίου δίνει την απομαγνητίζουσα δύναμη  $H_C$  (Coercive Force), ενώ το σημείο τομής της καμπύλης μαγνήτισης με τον κάθετο άξονα, δηλαδή τον άξονα την μαγνητικής επαγωγής, δίνει τον παραμένον μαγνητισμό  $B_r$  (Residual Induction). Συνεπώς σύμφωνα με τον πίνακα μετρήσεων ή από την χαρακτηριστική απομαγνήτισης B-H του μαγνήτη θα είναι αντίστοιχα:

$$H_C = 550.000 \frac{A}{m}$$

$$B_r = 1,07 \text{ Tesla}$$

Το γεγονός ότι η καμπύλη μαγνήτισης του μαγνήτη βρίσκεται στο δεύτερο τεταρτημόριο κάνει δύσκολη την προσομοίωση του μαγνήτη από ένα υλικό στο ANSYS εφόσον το πρόγραμμα δεν μπορεί να παραστήσει ένα υλικό με χαρακτηριστική B-H στο δεύτερο τεταρτημόριο. Το ANSYS όμως δίνει την δυνατότητα να προσομοιώσει ένα μαγνήτη μέσω δύο παραμέτρων, της απομαγνητίζουσας δύναμης  $H_C$  και μιας καμπύλης B-H, που βρίσκεται φυσικά στο πρώτο τεταρτημόριο.

Αυτή η καμπύλη B-H προκύπτει με μια ολίσθηση της χαρακτηριστικής B-H του μαγνήτη. Έτσι αν B, H είναι η μαγνητική επαγωγή και η ένταση μαγνητικού πεδίου της χαρακτηριστικής μαγνήτισης του μαγνήτη και B', H' είναι η μαγνητική επαγωγή και η ένταση του μαγνητικού πεδίου αντίστοιχα της καμπύλης που θα εισαχθεί στο ANSYS, τότε θα είναι:

$$B' = B$$

$$H' = H_C - |H| \Rightarrow H' = 550.000 - |H|$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ο κάτωθι πίνακας που θα χρησιμοποιηθεί στο ANSYS και πραγματοποιείται έτσι η ολίσθηση της χαρακτηριστικής απομαγνήτισης του μαγνήτη από το δεύτερο τεταρτημόριο στο πρώτο τεταρτημόριο.

A/A	H (Ampere/meter)	B (Tesla)
1	0	0,000
2	50.000	0,150
3	100.000	0,450
4	150.000	0,575
5	235.000	0,700
6	358.000	0,850
7	415.000	0,900
8	550.000	1,070

**Πίνακας 5.4-2**

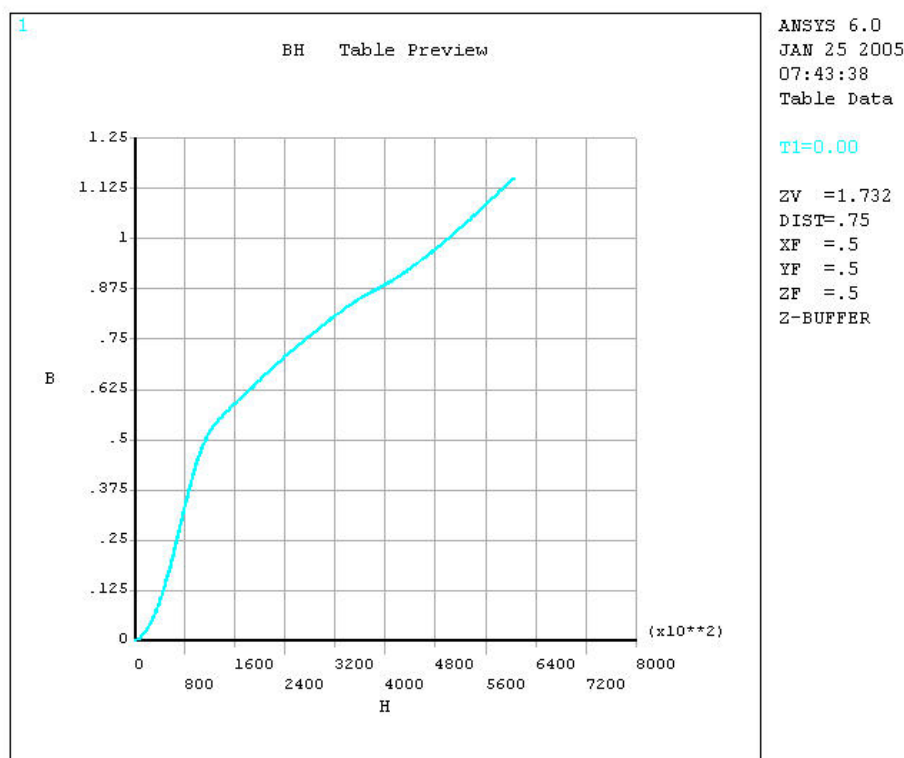
B-H χαρακτηριστική του μαγνήτη Neofer 230/120 όπως χρησιμοποιήθηκε στο ANSYS 6.0.

Η κατασκευή της τροποποιημένης χαρακτηριστικής B-H στο ANSYS γίνεται ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία.

- Αρχικά από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.

- Μετά επιλέγουμε Material Properties.
- Επιλέγουμε Material Models.
- Επιλέγουμε Electromagnetics.
- Επιλέγουμε B-H Curve.
- Εισάγουμε τις τιμές της μαγνητικής επαγωγής B και της έντασης του μαγνητικού πεδίου H στα αντίστοιχα πεδία δημιουργώντας τον αντίστοιχο πίνακα.

Στις επόμενες γραφικές παραστάσεις φαίνονται διαδοχικά οι χαρακτηριστικές, που προκύπτουν από την τροποποιημένη χαρακτηριστική απομαγνήτισης του μαγνήτη, B-H (μαγνητική επαγωγή, B, συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου H),  $\mu$ -H (μαγνητική διαπερατότητα του σιδήρου,  $\mu$ , συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου H) και τέλος  $\nu$ -B<sup>2</sup> (ειδική μαγνητική αντίσταση,  $\nu$ , συναρτήσει του τετραγώνου της μαγνητικής επαγωγής B<sup>2</sup>).



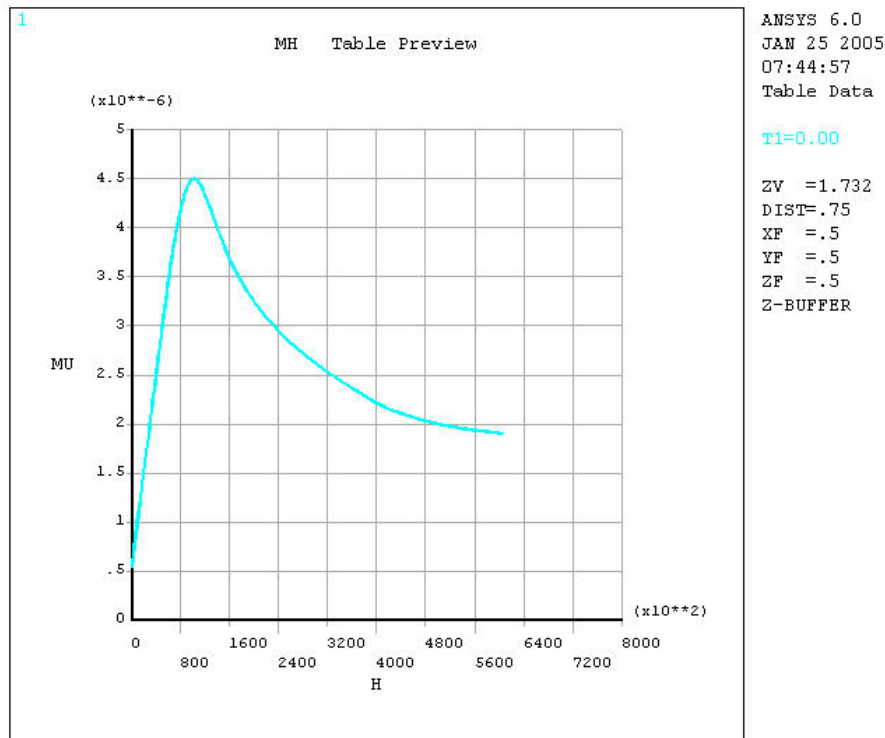
**Γράφημα 5.4-2**

Τροποποιημένη χαρακτηριστική B-H του μαγνήτη Neofer 230/120.

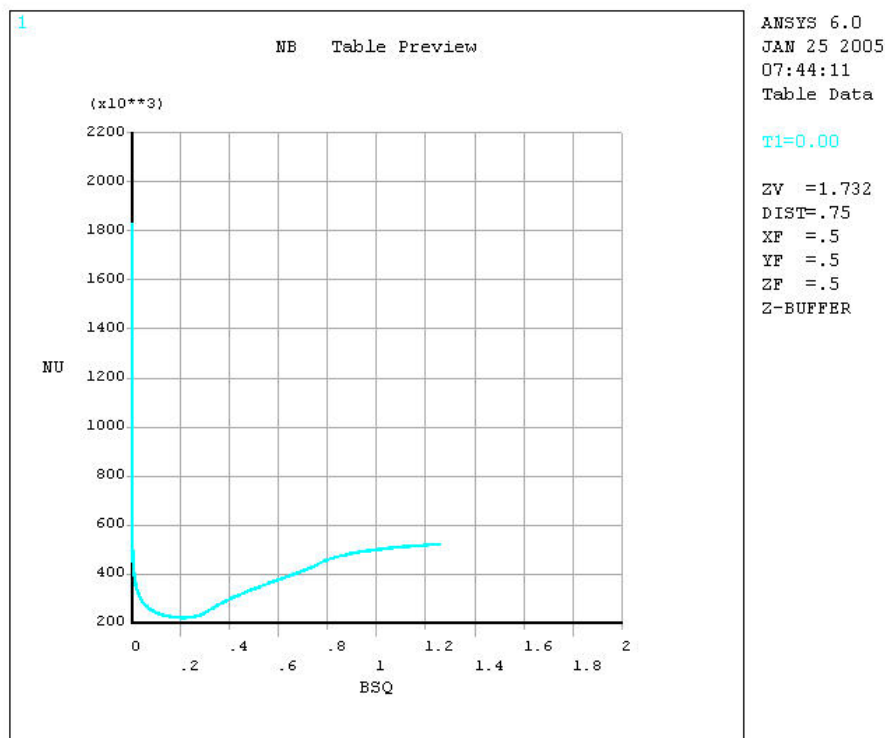
Παρατηρούμε από το παραπάνω γράφημα (το οποίο προέκυψε από το ANSYS) την ολίσθηση της χαρακτηριστικής απομαγνήτισης από το δεύτερο τεταρτημόριο στο πρώτο. Η μορφή όμως της καμπύλης παρουσιάζει διαφορές με την αντίστοιχη χαρακτηριστική B-H του σιδηροπυρήνα, εφόσον δεν παρουσιάζει έντονο κορεσμό και η μορφή της είναι περισσότερο γραμμική.

Στο γράφημα  $\mu$ -H της επόμενης σελίδας είναι πάλι εμφανές ότι η μαγνητική διαπερατότητα του μαγνήτη ελαττώνεται καθώς αυξάνει η ένταση του μαγνητικού πεδίου H. Αρχικά όμως η μαγνητική διαπερατότητα αυξάνει με την αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Επίσης η μαγνητική διαπερατότητα είναι σημαντικά μειωμένη σε σχέση με αυτή του σιδήρου και η τιμή της είναι κοντά στην τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας στο κενό ( $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ ).

Τόσο η καμπύλη  $\mu$ -H όσο και η χαρακτηριστική  $\nu$ -B<sup>2</sup> του μαγνήτη παρουσιάζουν διαφορές σε σχέση με αυτές του σιδήρου.



**Γράφημα 5.4-3**  
Χαρακτηριστική μ-H του μαγνήτη Neofer 230/120.



**Γράφημα 5.4-4**  
Χαρακτηριστική ν-B<sup>2</sup> του μαγνήτη Neofer 230/120.

Στην παραπάνω καμπύλη επίσης, παρατηρούμε ότι δεν περνάει από την αρχή των αξόνων όπως συνέβαινε στην αντίστοιχη χαρακτηριστική ν-B<sup>2</sup> για το σίδηρο.



Η δεύτερη παράμετρος που απαιτείται για να οριστεί το υλικό στο ANSYS που θα εξομοιώσει τον μαγνήτη Neofer 230/120, είναι η απομαγνητίζουσα δύναμη. Η απομαγνητίζουσα δύναμη όμως στο ANSYS θεωρείται σαν ένα διάνυσμα, κατάλληλου μέτρου και διεύθυνσεως, το οποίο είναι το άθροισμα τριών κάθετων μεταξύ τους διανυσμάτων. Τα διανύσματα αυτά αντιστοιχούν στα τρία μοναδιαία διανύσματα του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων το καθένα από τα οποία έχει πολλαπλασιαστεί με κατάλληλο μέτρο. Τα μέτρα των τριών αυτών διανυσμάτων συμβολίζονται στο ANSYS με τα εξής σύμβολα, MGXX, MGY, MGZZ που αντιστοιχούν στους άξονες X, Y, Z. Έτσι η απομαγνητίζουσα δύναμη  $H_C$  θα δίνεται από την κάτωθι σχέση.

$$H_C = MGXX \cdot \vec{i}_x + MGY \cdot \vec{i}_y + MGZZ \cdot \vec{i}_z$$

Από την παραπάνω σχέση συμπεραίνουμε ότι το μέτρο της απομαγνητίζουσας δύναμης  $H_C$  θα δίνεται από την πιο κάτω σχέση.

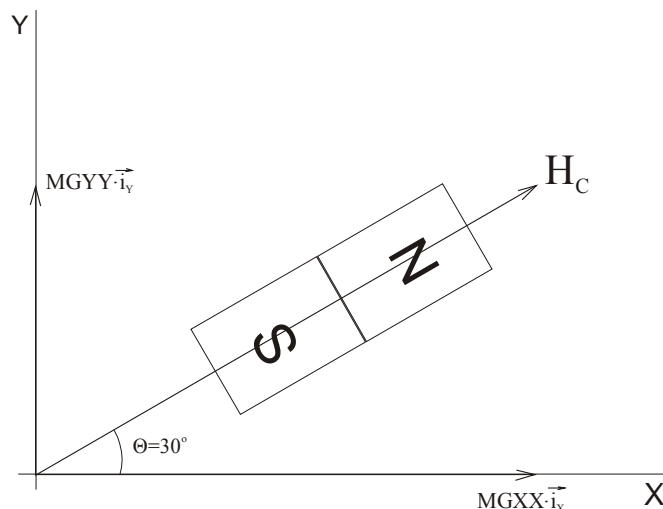
$$|H_C| = \sqrt{MGXX^2 + MGY^2 + MGZZ^2}$$

Δίνοντας έτσι κατάλληλες τιμές στις παραμέτρους MGXX, MGY και MGZZ μπορεί να καθοριστεί και το μέτρο της απομαγνητίζουσας δύναμης αλλά και ο προσανατολισμός του μαγνήτη. Για παράδειγμα στον μαγνήτη του σχήματος 5.4-1, που έχει τιμή απομαγνητίζουσας δύναμης  $H_C = 100.000 \text{ A/m}$  και κλίση  $30^\circ$  μοιρών όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα θα ισχύουν οι εξής σχέσεις:

$$H_C = |H_C| \cdot \cos 30^\circ \cdot \vec{i}_x + |H_C| \cdot \sin 30^\circ \cdot \vec{i}_y$$

$$MGXX = |H_C| \cdot \cos 30^\circ = 100.000 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$MGY = |H_C| \cdot \sin 30^\circ = 100.000 \cdot \frac{1}{2}$$



**Σχήμα 5.4-1**

Μαγνήτης με προσανατολισμό  $30^\circ$ .

Στο μοντέλο της σύγχρονης μηχανής που υλοποιήθηκε στο ANSYS, ο άξονας X περνάει κάθετα από το γεωμετρικό κέντρο του μαγνήτη, τόσο στο μοντέλο της σύγχρονης μηχανής με μαγνήτες χωρίς κλίση όσο και στο μοντέλο με μαγνήτες με κλίση. Ο μαγνήτης δηλαδή είναι παράλληλος προς τον Z άξονα και η γωνία που σχηματίζει ως προς το X-Z επίπεδο είναι μηδέν. Αυτό έγινε για λόγους ευκολίας γιατί με αυτόν τον τρόπο θα ισχύουν τα εξής.

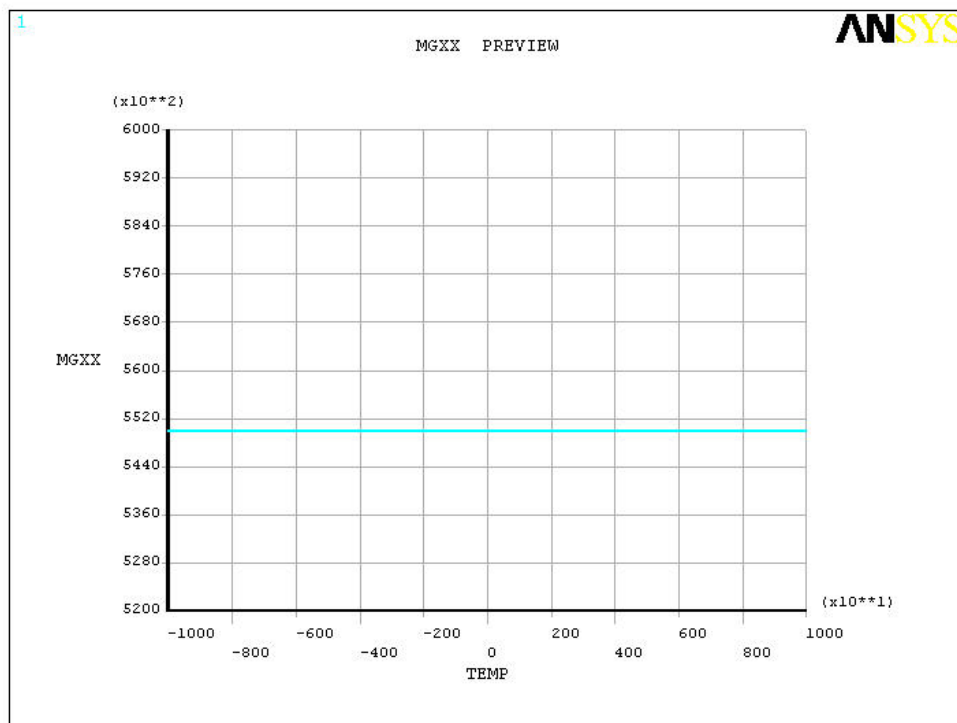
$$MGYY = MGZZ = 0$$

$$|H_c| = \sqrt{MGXX^2 + MGYY^2 + MGZZ^2} = \sqrt{MGXX^2 + 0 + 0} = MGXX \Rightarrow 550.000 = MGXX$$

Για να θέσουμε την παραπάνω τιμή στην παράμετρο MGXX στο ANSYS ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία.

- Αρχικά από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Material Properties.
- Επιλέγουμε Material Models.
- Επιλέγουμε Electromagnetics.
- Επιλέγουμε Coercive Force.
- Τέλος επιλέγουμε Constant.
- Εισάγουμε την τιμή 550.000 στο πεδίο MGXX.

Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται η απομαγνητίζουσα δύναμη του υλικού συναρτήσει της θερμοκρασίας. Παρατηρούμε ότι είναι σταθερή και ανεξάρτητη της θερμοκρασίας.



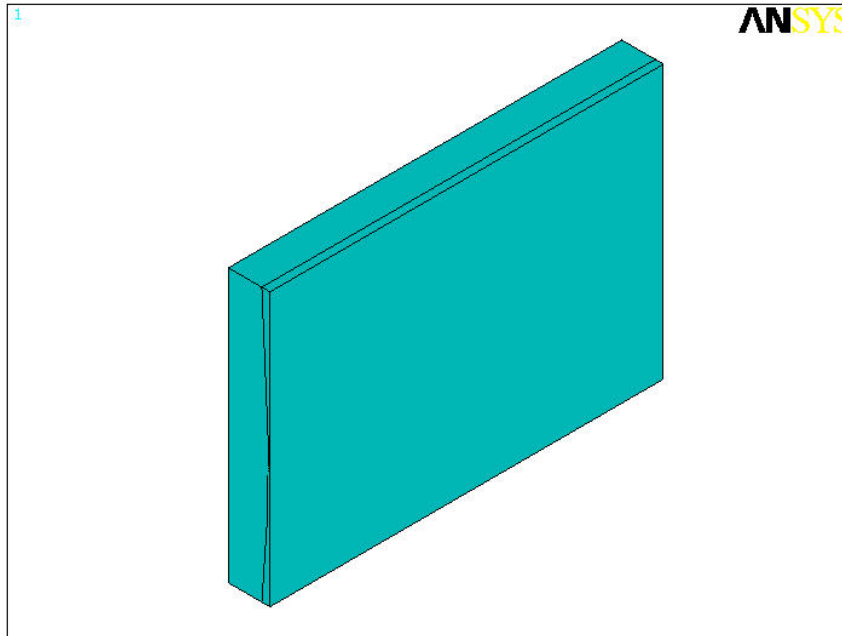
**Γράφημα 5.4-5**

Απομαγνητίζουσα δύναμη  $H_c$  συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Μετά τον ορισμό του υλικού που θα εξομοιώσει τον μαγνήτη ακολουθεί η ανάθεση του υλικού στην κατάλληλη περιοχή του μοντέλου (τόσο για το μοντέλο με

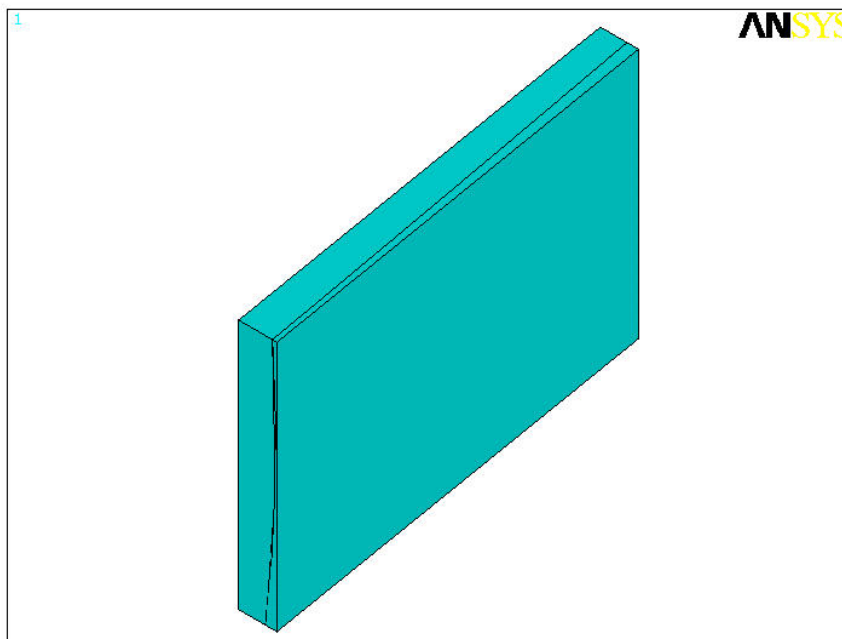
μαγνήτες χωρίς κλίση όσο και στο μοντέλο της σύγχρονης μηχανής με κεκλιμένους μαγνήτες).

Στις δύο παρακάτω εικόνες φαίνονται οι όγκοι του μαγνήτη χωρίς κλίση και του κεκλιμένου μαγνήτη για το μοντέλο της σύγχρονης μηχανής.



**Εικόνα 5.4-1**

Όγκος του χωρίς κλίση μαγνήτη.



**Εικόνα 5.4-2**

Όγκος του κεκλιμένου μαγνήτη.

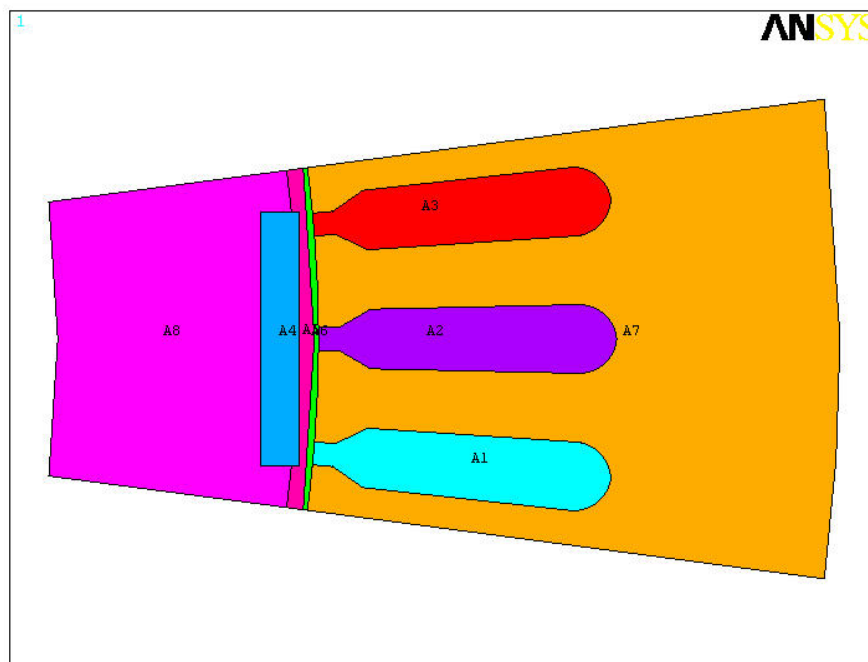
## **5.5 Ατσάλι.**

Το μοντέλο της σύγχρονης μηχανής που υλοποιήθηκε στο ANSYS δεν έχει περιοχές που αντιστοιχούν στο ατσάλι, συνεπώς δεν ορίστηκε και τέτοιο υλικό στο ANSYS.

## 5.6 Υλικά στο δισδιάστατο μοντέλο.

Ο ορισμός των υλικών είναι ακριβώς ο ίδιος και στο δισδιάστατο μοντέλο καθώς η θεωρία και η διαδικασία για τον ορισμό των υλικών (αέρας, μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά και μαγνήτες) είναι ίδιος τόσο στο τρισδιάστατο όσο και στο δισδιάστατο μοντέλο.

Τα υλικά όμως στο δισδιάστατο μοντέλο ανατίθενται σε περιοχές που είναι επίπεδες επιφάνειες (areas) και όχι όγκοι (volumes) όπως συμβαίνει στο τρισδιάστατο μοντέλο. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι περιοχές από τις οποίες αποτελείται το δισδιάστατο μοντέλο της σύγχρονης μηχανής.



**Εικόνα 5.6-1**

Δισδιάστατο μοντέλο όπου φαίνονται οι επίπεδες επιφάνειες (areas) από τις οποίες απαρτίζεται.

Στις περιοχές A1, A2, A3, A5, και A6 ανατίθεται ο αέρας, στις περιοχές A7, A8 ανατίθεται ο σιδηροπυρήνας και τέλος στην επιφάνεια A4 ανατίθεται ο μαγνήτης. Τα παραπάνω ισχύουν για την εν κενώ λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας.

### 5.6.1 Χαλκός.

Ο χαλκός στο δισδιάστατο μοντέλο (στην περίπτωση που εξετάζεται η λειτουργία υπό φορτίο) μπορεί να εξομοιωθεί από ένα υλικό που έχει σχετική μαγνητική διαπερατότητα ίση με την μονάδα. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Material Properties.
- Επιλέγουμε Material Models.
- Επιλέγουμε Electromagnetics.
- Επιλέγουμε Relative Permeability.
- Τέλος επιλέγουμε Constant και θέτουμε στο αντίστοιχο πεδίο (το πεδίο MURX εφόσον ο χαλκός θεωρείται ισοτροπικό μέσο) την τιμή 1 (δηλαδή μονάδα την τιμή της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας).

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

ΠΛΕΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ  
ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ  
ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ



## **6.1 Εισαγωγή.**

Η επιτυχής λύση του προβλήματος δεν εξαρτάται τόσο από το ίδιο το πρόγραμμα όσο από τον κατάλληλο χειρισμό του από τον χρήστη. Κρίσιμη είναι η επιλογή του κατάλληλου φυσικού μοντέλου καθώς και του κατάλληλου πλέγματος (meshing) διότι οι δύο αυτοί παράγοντες επηρεάζουν αποφασιστικά την λύση του προβλήματος. Ατυχής επιλογή τόσο του φυσικού μοντέλου όσο και του πλέγματος θα οδηγήσει σε λάθος αποτελέσματα χωρίς αυτό να σημαίνει ότι το πρόγραμμα έκανε λάθη.

Αρκετοί παράγοντες παίζουν ρόλο στην επιτυχή επίλυση του προβλήματος, παράγοντες όμως οι οποίοι πολλές φορές αντιτίθενται ο ένας στον άλλο με αποτέλεσμα ο χειριστής του προγράμματος να οδηγείται αναγκαστικά σε ένα συμβιβασμό κάνοντας κάθε φορά και ανάλογα με τη φύση του προβλήματος μια συγκεκριμένη επιλογή των τιμών των επιμέρους παραμέτρων. Χαρακτηριστικό είναι το εξής παράδειγμα που αφορά την επιλογή της κατάλληλης ακρίβειας για το πλέγμα. Όσο πιο πυκνό πλέγμα επιλέξουμε τόσο πιο ακριβής θα είναι η λύση. Από την άλλη μεριά όμως όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα τόσο μεγαλύτερος θα είναι ο χρόνος κατασκευής του πλέγματος από το πρόγραμμα και τόσο μεγαλύτερος θα είναι ο χρόνος για την επίλυση του προβλήματος. Επίσης υπάρχει ο κίνδυνος κατά την κατασκευή του πλέγματος να έχουμε υπέρβαση του μέγιστου επιτρεπόμενου αριθμού στοιχείων (elements) που μπορεί να έχει η κάθε έκδοση του προγράμματος που χρησιμοποιούμε, είτε το πρόγραμμα να απαιτεί μεγαλύτερη μνήμη από όση διαθέτει ο υπολογιστής (της τάξης των εκατοντάδων Mbytes RAM) προκειμένου να κατασκευάσει το πυκνό αυτό πλέγμα. Τέλος άμα επιλέξουμε αραιό πλέγμα προκειμένου να απαλλαγούμε από τα παραπάνω μειονεκτήματα, η λύση που θα προκύψει (έστω και αν το πρόγραμμα δεν έχει κάνει λάθη κατά την λύση του προβλήματος) μπορεί να μας οδηγήσει σε λάθος συμπεράσματα λόγω της μικρής ακρίβειας της λύσης. Τα παραπάνω μας αναγκάζουν να κάνουμε ένα συμβιβασμό για το πόσο πυκνό θα είναι το πλέγμα που σαφώς εξαρτάται από την φύση του προβλήματος καθώς επίσης και από τους περιορισμούς που θέτει το πρόγραμμα εξομοίωσης και ο ηλεκτρονικός υπολογιστής.

Ανάλογα προβλήματα έπρεπε να αντιμετωπιστούν κατά την κατασκευή του φυσικού μοντέλου του δοκιμίου της σύγχρονης 24-πολικής γεννήτριας. Η δυσκολία για την απόκτηση μιας σωστής λύσης στην περίπτωση του συγκεκριμένου προβλήματος οφείλεται στην πολύπλοκη γεωμετρία του φυσικού μοντέλου καθώς και στο ότι έχουμε ένα τρισδιάστατο πρόβλημα. Στην περίπτωση ενός τρισδιάστατου προβλήματος το πλέγμα θα αποτελείται από ένα σημαντικό αριθμό στοιχείων έστω και στην περίπτωση που το πλέγμα είναι αραιό (συνήθως παραπάνω από δέκα χιλιάδες elements). Αυτό σαφώς οφείλεται στο ότι το μοντέλο έχει τρεις διαστάσεις, έχει και την διάσταση του βάθους δηλαδή. Αντίθετα στην περίπτωση ενός δισδιάστατου φυσικού μοντέλου ο αριθμός των στοιχείων είναι μικρός ακόμα και στην περίπτωση ενός πυκνού πλέγματος (συνήθως μερικά εκατοντάδες ή χιλιάδες elements), οπότε η κατασκευή του πλέγματος και η επίλυση του προβλήματος είναι εύκολη και γίνεται χωρίς προβλήματα εφόσον δεν έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους. Μπορούμε επίσης, στην περίπτωση του δισδιάστατου μοντέλου, να επιλέξουμε ένα πυκνό πλέγμα χωρίς να παρουσιαστούν προβλήματα, όπως να ξεπεραστεί το ανώτερο όριο των elements που θέτει το πρόγραμμα ή να παρουσιαστούν προβλήματα μνήμης, και να πάρουμε μία πολύ ακριβή λύση του δισδιάστατου προβλήματος. Συνεπώς στην περίπτωση του τρισδιάστατου προβλήματος θα οδηγηθούμε αναγκαστικά σε κάποιο συμβιβασμό λόγω του μεγάλου αριθμού των στοιχείων από τα οποία θα αποτελείται το πλέγμα έστω και αν το τελευταίο είναι αραιό. Θα πρέπει η επιλογή της ακρίβειας κατασκευής του πλέγματος

καθώς και η σχεδίαση του φυσικού μοντέλου να γίνεται πολύ προσεκτικά και σύμφωνα με τις εκάστοτε απαιτήσεις του προβλήματος.

## **6.2 Διαφορές μεταξύ πραγματικού και φυσικού μοντέλου και πως η κατασκευή του πλέγματος καθορίζει την σχεδίαση του φυσικού μοντέλου.**

Το φυσικό μοντέλο είναι αυτό το οποίο κατασκευάζεται στον υπολογιστή στο σχεδιαστικό περιβάλλον του ANSYS ενώ το πραγματικό μοντέλο είναι το ακριβές αντίγραφο της ηλεκτρικής μηχανής που αντιστοιχεί στα ακριβή γεωμετρικά χαρακτηριστικά και διαστάσεις αυτής. Το φυσικό και πραγματικό μοντέλο δεν θα πρέπει να θεωρηθεί ότι είναι το ένα και το αυτό, εφόσον στις περισσότερες περιπτώσεις το φυσικό μοντέλο πρέπει να διαφέρει από το πραγματικό. Αυτό είναι αναγκαίο για την σωστή επίλυση του προβλήματος και προκειμένου να προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα. Οι διαφορές του φυσικού με το πραγματικό μοντέλο στην περίπτωση της σύγχρονης 24-πολικής μηχανής είναι οι παρακάτω.

- Στο φυσικό μοντέλο δεν θα περιληφθούν περιοχές οι οποίες δεν μας ενδιαφέρουν και οι οποίες δεν θα επηρεάζουν την λύση του προβλήματος. Έτσι στο φυσικό μοντέλο του δοκιμίου της 24-πολικής μηχανής οι περιοχές (επιφάνειες για το δισδιάστατο μοντέλο και όγκοι για το τρισδιάστατο) που αντιστοιχούν σε ασάλι δεν θα περιληφθούν σε αυτό εφόσον η μαγνητική επαγωγή στις συγκεκριμένες περιοχές είναι αμελητέα. Επομένως για να κατασκευαστεί το πλέγμα του μοντέλου θα απαιτηθούν λιγότερα στοιχεία (elements) κάτι το οποίο είναι πολύ σημαντικό εφόσον ο μέγιστος αριθμός των στοιχείων από τα οποία αποτελείται το πλέγμα στην συγκεκριμένη έκδοση του ANSYS είναι μικρός (μόλις 32.000 elements).
- Συνήθως στο φυσικό μοντέλο περιοχές σιδηροπυρήνα ή αέρα, οι οποίες στο πραγματικό μοντέλο είναι ενιαίες, πρέπει να κατασκευαστούν από δύο η περισσότερα τμήματα ο συνδυασμός των οποίων δίνει την αντίστοιχη περιοχή του πραγματικού μοντέλου. Αυτό επιβάλλεται για να προκύψει μια πιο ακριβή λύση σε περιοχές που μας ενδιαφέρουν και αυτό πετυχαίνεται με το να έχουμε ένα πολύ πιο πυκνό πλέγμα στις περιοχές ενδιαφέροντος για αυτόν ακριβώς τον λόγο χωρίζουμε τις περιοχές σε περισσότερα του ενός τμήματα. Για το δοκίμιο της σύγχρονης 24-πολικής μηχανής μας ενδιαφέρει η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο. Επομένως το πλέγμα θα πρέπει να είναι πολύ πιο πυκνό στο διάκενο. Αυτό θα επιτευχθεί με το να χωρίσουμε το διάκενο σε δύο τμήματα.
- Στην συγκεκριμένη έκδοση του ANSYS ο μέγιστος αριθμός στοιχείων από τα οποία θα αποτελείται το πλέγμα ενός μοντέλου είναι μόλις 32.000. Οπότε το πλέγμα το οποίο θα αντιστοιχούσε στο πραγματικό μοντέλο θα ήταν πολύ αραιό με αποτέλεσμα η λύση του προβλήματος να ήταν ανακριβής. Το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να λυθεί σχεδιάζοντας το φυσικό μοντέλο της 24-πολικής σύγχρονης μηχανής για ένα μόνο πόλο. Έτσι το πλέγμα του φυσικού μοντέλου με ένα μόνο πόλο, θα είναι πολύ πιο πυκνό και η λύση που θα προκύψει θα είναι πιο ακριβής.

Από τα παραπάνω φαίνεται καθαρά ότι η κατασκευή του πλέγματος καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την μορφή του φυσικού μοντέλου και την σχεδίαση αυτού. Περιοχές που δεν μας ενδιαφέρουν δεν συμπεριλαμβάνονται στο φυσικό μοντέλο και αυτό γίνεται για να μειώσουμε τον αριθμό των απαιτούμενων στοιχείων από τα οποία θα αποτελείται το πλέγμα. Άλλες περιοχές που μας ενδιαφέρουν χωρίζονται σε περισσότερα του ενός τμήματα για να προκύψει έτσι σε αυτές ένα πιο πυκνό πλέγμα που θα μας βοηθήσει στο να πάρουμε μια πιο ακριβή λύση. Τέλος, εκμεταλλευόμενοι



και τις συμμετρίες του προβλήματος σχεδιάζουμε μόνο ένα μικρό μέρος του πραγματικού μοντέλου, για να προκύψει ένα πολύ πιο πυκνό πλέγμα (και επομένως μια καλύτερη λύση) δεδομένου του περιορισμού στον μέγιστο αριθμό στοιχείων, από το οποίο θα αποτελείται το πλέγμα, που επιβάλλει το πρόγραμμα.

### **6.3 Επιλογή της μεθόδου ανάλυσης.**

Είναι προφανές ότι για το δοκίμιο της σύγχρονης 24-πολικής γεννήτριας πρέπει να λύσουμε ένα μαγνητοστατικό πρόβλημα και αυτό επειδή το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής θα είναι χρονικά αμετάβλητο τόσο στο δισδιάστατο όσο και στο τρισδιάστατο μοντέλο.

Για το δισδιάστατο μοντέλο θα μελετηθεί η εν κενώ αλλά και η υπό φορτίο λειτουργία. Στην περίπτωση της εν κενώ λειτουργίας το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής θα παράγεται από τους μόνιμους μαγνήτες (θα είναι μόνο η διέγερση παρούσα δηλαδή) συνεπώς το πεδίο θα είναι στατικό, χρονικά αναλλοίωτο. Στην περίπτωση της υπό φορτίο λειτουργίας το μαγνητικό πεδίο θα συνίσταται από αυτό των μόνιμων μαγνητών καθώς επίσης και από το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τους ρευματοφόρους αγωγούς του τυλίγματος της σύγχρονης μηχανής. Επειδή όμως εξετάζουμε το μαγνητικό πεδίο της μηχανής σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή, το ρεύμα που θα διαρρέει τους αγωγούς θα έχει συγκεκριμένο μέγεθος και μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι αγωγοί αυτοί διαρρέονται από συνεχές ρεύμα. Οπότε συμπεραίνουμε ότι και στην υπό φορτίο λειτουργία το μαγνητικό πεδίο θα είναι και πάλι στατικό.

Στο τρισδιάστατο μοντέλο θα μελετηθεί μόνο η εν κενώ λειτουργία οπότε πάλι το μαγνητικό πεδίο θα είναι χρονικά αμετάβλητο.

Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι θα χρησιμοποιηθεί μία μαγνητοστατική ανάλυση για να λυθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα. Για το δισδιάστατο και το τρισδιάστατο μοντέλο όμως θα χρησιμοποιηθούν διαφορετικές μέθοδοι μαγνητοστατικής ανάλυσης.

Η μέθοδος της ανάλυσης δεν επιλέγεται άμεσα στο ANSYS (δεν υπάρχει δηλαδή ένα dialog box από το οποίο άμεσα να επιλέξουμε ποια μέθοδο θέλουμε) αλλά έμμεσα μέσω της επιλογής του τύπου του στοιχείου (element type) από το οποίο θα αποτελείται το πλέγμα του μοντέλου. Για να γίνει η επιλογή όμως του κατάλληλου τύπου στοιχείου για κάθε μοντέλο θα πρέπει να έχει αποφασιστεί πρώτα ποια μέθοδος ανάλυσης θα εφαρμοστεί στο δισδιάστατο και στο τρισδιάστατο μοντέλο.

Προκειμένου για δισδιάστατα μαγνητοστατικά (2-D static) προβλήματα η μέθοδος ανάλυσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η μέθοδος του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού (Magnetic Vector Potential Formulation, MVP) στην οποία υπολογίζεται η κάθετη στο X-Y επίπεδο συνιστώσα του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού (AZ). Αυτό σημαίνει ότι η σχεδίαση του δισδιάστατου φυσικού μοντέλου πρέπει να γίνει στο X-Y επίπεδο.

Για τρισδιάστατα μαγνητοστατικά (3-D static) προβλήματα μπορεί να γίνει η επιλογή μεταξύ δύο μεθόδων. Την μέθοδο του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού MVP, όπου τώρα υπολογίζονται όλες οι συνιστώσες του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού (AX, AY, AZ), ή την μέθοδο του μαγνητικού βαθμωτού δυναμικού (Magnetic Scalar Potential Formulation, MSP) όπου υπολογίζεται μόνο ένα μέγεθος (και όχι τρία όπως στην περίπτωση της MVP formulation) η τιμή (MAG) του βαθμωτού δυναμικού. Η μέθοδος του βαθμωτού μαγνητικού δυναμικού MSP συνίσταται στην περίπτωση μαγνητοστατικών προβλημάτων εφόσον έχει μόνο ένα βαθμό ελευθερίας (degree of freedom), δηλαδή την τιμή του μαγνητικού βαθμωτού

δυναμικού. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να υπολογιστεί μόνο μία παράμετρος και όχι τρεις όπως στην περίπτωση της μεθόδου του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού όπου πρέπει να υπολογιστούν οι τρεις συνιστώσες του διανυσματικού δυναμικού (AX, AY, AZ). Το παραπάνω είναι σημαντικό διότι μειώνεται ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος. Επίσης στο τρισδιάστατο μοντέλο της σύγχρονης 24-πολικής γεννήτριας δεν μελετάται η υπό φορτίο λειτουργία, δηλαδή δεν υπάρχουν πηγές ρεύματος στο μοντέλο. Εάν υπήρχαν τότε μία προσέγγιση με την MVP μέθοδο θα ήταν καλύτερη εφόσον οι πηγές ρεύματος θα είναι τμήμα του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων και όχι ανεξάρτητα απλά στοιχεία (primitives) όπως στην MSP μέθοδο όπου απλώς το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από αυτά θα συμβάλλει στο μαγνητικό πεδίο του μοντέλου. Αλλά και η μέθοδος του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού έχει μειονεκτήματα καθώς η λύση που προκύπτει μεταξύ περιοχών με διαφορετική μαγνητική διαπερατότητα δεν είναι ακριβής όποτε μία συνδυασμένη μέθοδος μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού και μαγνητικού βαθμωτού δυναμικού (coupled MVP-MSP) πιθανόν να είναι προτιμότερη. Οι δύο παραπάνω μέθοδοι είναι βασισμένες στους κόμβους των στοιχείων που σχηματίζουν το πλέγμα του μοντέλου (nodal based methods) εφόσον οι βαθμοί ελευθερίας, δηλαδή οι πρωταρχικοί άγνωστοι παράμετροι που υπολογίζονται από το πρόγραμμα, αποδίδονται στους κόμβους. Εφόσον θα χρησιμοποιηθούν τόσο για το δισδιάστατο όσο και για το τρισδιάστατο μοντέλο της σύγχρονης μηχανής, μέθοδοι ανάλυσης βασισμένοι στους κόμβους των στοιχείων (nodal based methods), γι' αυτό επιλέχθηκε και το πεδίο Magnetic-nodal στο Preferences dialog box (3<sup>ο</sup> κεφάλαιο, παράγραφος 3.2).

Όσον αφορά μαγνητοστατικά και μη μαγνητοστατικά τρισδιάστατα προβλήματα υπάρχει και μία άλλη μέθοδος η οποία μπορεί να δώσει καλύτερα αποτελέσματα από την μέθοδο ανάλυσης MVP ιδιαίτερα όταν το φυσικό μοντέλο περιλαμβάνει και περιοχές σιδήρου (iron regions). Η μέθοδος αυτή δεν βασίζεται στους κόμβους των στοιχείων (elements nodes) αλλά στις ακμές των στοιχείων (element edges). Αυτό σημαίνει ότι οι βαθμοί ελευθερίας, δηλαδή οι πρωταρχικοί άγνωστοι, αποδίδονται στις ακμές των στοιχείων παρά στους κόμβους αυτών. Στην συγκεκριμένη μέθοδο ανάλυσης ο βαθμός ελευθερίας είναι το ολοκλήρωμα της εφαπτομενικής συνιστώσας, κατά μήκος της ακμής του στοιχείου, του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού. Αθροίζοντας συνεπώς τις τιμές του βαθμού ελευθερίας των ακμών του στοιχείου σε μία κλειστή καμπύλη που σχηματίζεται από αυτές τις ακμές, προκύπτει η ροή που περνάει μέσα από την συγκεκριμένη κλειστή καμπύλη.

#### **6.4 Επιλογή του τύπου του στοιχείου (element type) από το οποίο θα αποτελείται το πλέγμα του φυσικού μοντέλου.**

Η επιλογή του τύπου του στοιχείου από το οποίο θα αποτελείται το πλέγμα του φυσικού μοντέλου, καθορίζεται από το πρόβλημα το οποίο θέλουμε να επιλύσουμε καθώς επίσης και από το φυσικό μέγεθος το οποίο θέλουμε να προσδιορίσουμε. Για το δοκίμιο της σύγχρονης 24-πολικής μηχανής το πρόβλημα είναι μαγνητοστατικό, δισδιάστατο αλλά και τρισδιάστατο, ενώ το φυσικό μέγεθος που πρέπει να προσδιοριστεί είναι η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο της μηχανής. Επίσης στην προηγούμενη παράγραφο (παράγραφος 6.3) έγινε και η επιλογή, καθώς και η αιτιολόγηση αυτής, των μεθόδων ανάλυσης που θα ακολουθηθούν για το δισδιάστατο και το τρισδιάστατο πρόβλημα. Η μέθοδος ανάλυσης θα βοηθήσει σημαντικά στην κατάλληλη επιλογή του τύπου του στοιχείου τόσο για το δισδιάστατο όσο και για το τρισδιάστατο πρόβλημα.

Το ANSYS διαθέτει μία βιβλιοθήκη με πάνω από εκατό τύπους στοιχείων που το καθένα χρησιμοποιείται για διαφορετικό είδος ανάλυσης και έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά. Κάθε στοιχείο προσδιορίζεται από ένα σύνολο παραμέτρων που είναι κοινό για τους περισσότερους τύπους στοιχείων. Οι παράμετροι αυτοί αναλύονται παρακάτω.

- Κάθε τύπος στοιχείου αναγνωρίζεται από το όνομα του το οποίο είναι ο συνδυασμός του χαρακτηρισμού της ομάδας στην οποία ανήκει και ενός μοναδικού αριθμού.
- Κάθε στοιχείο αποτελείται από κόμβους οι οποίοι χαρακτηρίζονται από τα γράμματα I, J, K κ.τ.λ.
- Κάθε στοιχείο έχει ένα σύνολο βαθμών ελευθερίας το οποίο συνιστά τους πρωταρχικούς αγνώστους που θα καθοριστούν από την ανάλυση. Άλλα φυσικά μεγέθη μπορούν να προσδιοριστούν έμμεσα από αυτό το σύνολο βαθμών ελευθερίας. Αυτοί οι πρωταρχικοί άγνωστοι αποδίδονται στους κόμβους των στοιχείων.
- Διάφορες ιδιότητες υλικών χρησιμοποιούνται για κάθε τύπο στοιχείου. Όλες οι ιδιότητες υλικών μπορούν να εισαχθούν ως συναρτήσεις της θερμοκρασίας.
- Κάθε τύπος στοιχείου έχει συγκεκριμένη γεωμετρία. Ένα στοιχείο μπορεί να είναι μονοδιάστατο, δισδιάστατο ή τρισδιάστατο.

#### **6.4.1 Τύπος στοιχείου για το δισδιάστατο μοντέλο (PLANE13).**

Στην περίπτωση του δισδιάστατου φυσικού μοντέλου θα απαιτηθεί ο τύπος ενός στοιχείου με τα παρακάτω χαρακτηριστικά.

- Πρέπει να είναι κατάλληλο για μαγνητοστατική ανάλυση και για την MVP μέθοδο ανάλυσης.
- Θα πρέπει να έχει την δυνατότητα εφαρμογής σε αυτό πυκνότητας ρεύματος για την υπό φορτίο ανάλυση καθώς και περιοριστικών εξισώσεων (constraint equations) στους κόμβους των στοιχείων.
- Ο συγκεκριμένος τύπος του στοιχείου θα πρέπει να έχει μη γραμμική μαγνητική δυνατότητα για την μοντελοποίηση των μη γραμμικών B-H χαρακτηριστικών των σιδηρομαγνητικών υλικών καθώς και των χαρακτηριστικών απομαγνήτισης των μόνιμων μαγνητών.
- Επίσης ο τύπος του στοιχείου πρέπει να έχει δισδιάστατη γεωμετρία εφόσον το δισδιάστατο φυσικό μοντέλο θα σχεδιαστεί στο X-Y επίπεδο.

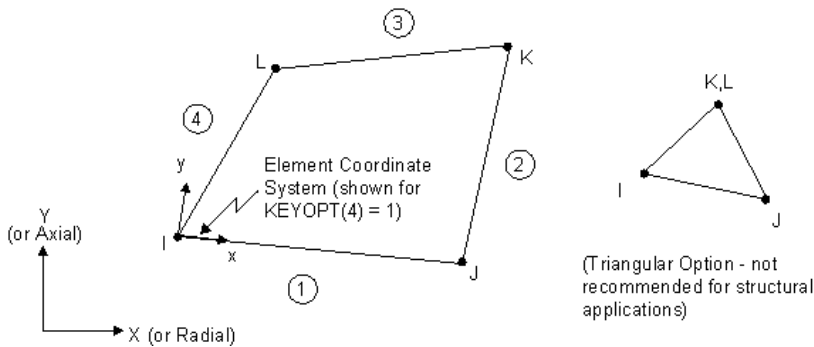
Ένας τύπος στοιχείου με τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι το PLANE13. Το PLANE13 είναι ένα στοιχείο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περισσότερες των μία αναλύσεων όπως θερμική, μηχανική, πιεζοηλεκτρική αλλά και ηλεκτρομαγνητική ενώ έχει δυνατότητα και συνδυασμένης ανάλυσης (coupled field analyses). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί όμως μόνο σε δισδιάστατα προβλήματα. Έχει μη γραμμική μαγνητική ικανότητα και μπορεί να μοντελοποιήσει μη γραμμικές B-H χαρακτηριστικές αλλά και χαρακτηριστικές απομαγνήτισης μόνιμων μαγνητών. Ο συγκεκριμένος τύπος στοιχείου καθορίζεται από τέσσερις κόμβους (I,J,K,L) όπου σε κάθε κόμβο μπορούν να αποδοθούν μέχρι τέσσερις βαθμοί ελευθερίας. Για το συγκεκριμένο είδος προβλήματος και ανάλυσης, δηλαδή μαγνητοστατικό και MVP αντίστοιχα, μόνο ένας βαθμός ελευθερίας είναι απαραίτητος και αυτός είναι η κάθετη στο X-Y επίπεδο συνιστώσα του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού AZ. Το στοιχείο αυτό έχει περισσότερους από έναν βαθμούς ελευθερίας γιατί χρησιμοποιείται και για συνδυασμένη ανάλυση. Επίσης αρκετές ιδιότητες υλικών

είναι διαθέσιμες για τον συγκεκριμένο τύπο στοιχείου. Αυτές που θα χρειαστούν στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι οι παρακάτω οι οποίες αναλύθηκαν στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο.

- Η μαγνητική διαπερατότητα του κενού. Στο ANSYS συμβολίζεται ως MUZERO και για το MKS σύστημα μέτρησης (που είναι το εξ' ορισμού σύστημα μέτρησης στο ANSYS) είναι ίση με  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ .
- Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού. Μπορούμε να ορίσουμε ισοτροπικά υλικά αλλά και ορθοτροπικά οπότε στο ANSYS χρησιμοποιούνται δύο παράμετροι οι οποίοι συμβολίζονται ως MURX, MURY και οι οποίοι απαιτούνται για τον ορισμό των ορθοτροπικών υλικών. Προκειμένου για ισοτροπικά υλικά αρκεί να χρησιμοποιηθεί μόνο η παράμετρος MURX.
- Η απομαγνητίζουσα δύναμη (Coercive Force). Ορίζεται μέσω δύο παραμέτρων, τις MGXX και MGY, η οποίες αντιστοιχούν στις δύο διανυσματικές συνιστώσες της απομαγνητίζουσας δύναμης.

Ενώ υπάρχει τύπος στοιχείων κατάλληλος μόνο για ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα, το PLANE53, και όχι για συνδυασμένα προβλήματα όπως το PLANE13, το τελευταίο προτιμήθηκε διότι έχει μόνο τέσσερις κόμβους, ενώ το PLANE53 έχει οκτώ κόμβους και είναι τύπος στοιχείου ανώτερης τάξης (higher order element).

Η γεωμετρία του στοιχείου PLANE13 καθώς και οι κόμβοι από τους οποίους αποτελείται φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.



**Σχήμα 6.4.1-1**

Τύπος στοιχείου PLANE13. Φαίνεται το σύστημα συντεταγμένων του στοιχείου οι κόμβοι και οι ακμές του καθώς και η γεωμετρία.

### **6.4.2 Τύπος στοιχείου για το τρισδιάστατο μοντέλο (SOLID96).**

Η επιλογή του τύπου του στοιχείου από το οποίο θα αποτελείται το πλέγμα του τρισδιάστατου μοντέλου είναι πολύ πιο απλή εφόσον δεν θα μελετηθεί η υπό φορτίο λειτουργία στην περίπτωση του τρισδιάστατου φυσικού μοντέλου και επιπροσθέτως οι διαθέσιμοι τύποι στοιχείων για την MSP μέθοδο ανάλυσης είναι πολύ λιγότεροι από ότι στην περίπτωση του δισδιάστατου προβλήματος και της MVP ανάλυσης. Οπότε, κατ' αναλογία με το δισδιάστατο μοντέλο, για το τρισδιάστατο μοντέλο θα απαιτηθεί ο τύπος ενός στοιχείου με τα παρακάτω χαρακτηριστικά.

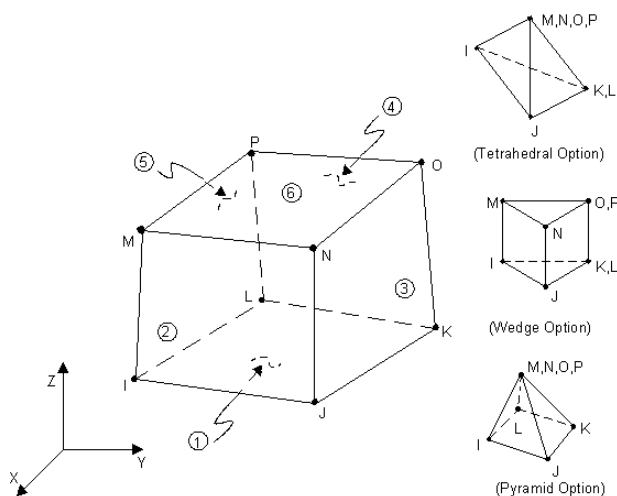
- Πρέπει να είναι κατάλληλο για μαγνητοστατική ανάλυση και για την MSP μέθοδο ανάλυσης.
- Θα πρέπει να έχει την δυνατότητα εφαρμογής στους κόμβους του περιοριστικών εξισώσεων (constraint equations).
- Ο συγκεκριμένος τύπος του στοιχείου θα πρέπει να έχει μη γραμμική μαγνητική ικανότητα για την μοντελοποίηση των μη γραμμικών B-H χαρακτηριστικών των σιδηρομαγνητικών υλικών καθώς και των χαρακτηριστικών απομαγνητίσης των μόνιμων μαγνητών.

- Είναι σαφές ότι ο τύπος του στοιχείου αυτού πρέπει να έχει τρισδιάστατη γεωμετρία εφόσον πρόκειται για ένα τρισδιάστατο φυσικό μοντέλο.

Ο συγκεκριμένος τύπος στοιχείου που έχει τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι το SOLID96. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε τρισδιάστατα ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα, ενώ είναι κατάλληλο μόνο για την μέθοδο ανάλυσης του μαγνητικού βαθμωτού δυναμικού. Διαθέτει και αυτό μη γραμμική μαγνητική ικανότητα και μπορεί να μοντελοποιήσει μη γραμμικές B-H χαρακτηριστικές αλλά και χαρακτηριστικές απομαγνήτισης μόνιμων μαγνητών. Ο συγκεκριμένος τύπος στοιχείου καθορίζεται από οκτώ κόμβους (I,J,K,L,M,N,O,P) όπου σε κάθε κόμβο μπορεί να αποδοθεί μόνο ένας βαθμός ελευθερίας. Αυτός είναι η τιμή του μαγνητικού βαθμωτού δυναμικού, MAG, όπου είναι και ο πρωταρχικός άγνωστος που θα υπολογιστεί από το πρόγραμμα. Άλλα φυσικά μεγέθη, όπως η μαγνητική επαγωγή, θα υπολογιστούν έμμεσα από το παραπάνω μέγεθος. Οι ιδιότητες υλικών οι οποίες είναι διαθέσιμες για τον συγκεκριμένο τύπο στοιχείου είναι οι παρακάτω οι οποίες αναλύονται και στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο.

- Η μαγνητική διαπερατότητα του κενού. Στο ANSYS συμβολίζεται ως MUZERO και για το MKS σύστημα μέτρησης (που είναι το εξ' ορισμού σύστημα μέτρησης στο ANSYS) είναι ίση με  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ .
- Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού. Μπορούμε να ορίσουμε ιστροπικά υλικά αλλά και ορθοτροπικά οπότε στο ANSYS χρησιμοποιούνται τρεις παράμετροι οι οποίοι συμβολίζονται ως MURX, MURY και MURZ και οι οποίοι απαιτούνται για τον ορισμό των ορθοτροπικών υλικών. Προκειμένου για ιστροπικά υλικά αρκεί να χρησιμοποιηθεί μόνο η παράμετρος MURX.
- Η απομαγνητίζουσα δύναμη (Coercive Force). Ορίζεται μέσω τριών παραμέτρων, των MGXX, MGYZ και MGZZ η οποίες αντιστοιχούν στις τρεις διανυσματικές συνιστώσες της απομαγνητίζουσας δύναμης. Μέσω αυτών μπορούμε να καθορίσουμε το μέτρο καθώς και την κατεύθυνση στον χώρο της απομαγνητίζουσας δύναμης. Η κατεύθυνση της απομαγνητίζουσας δύναμης αντιστοιχεί με αυτήν του συστήματος συντεταγμένων των στοιχείων (element coordinate system).

Η γεωμετρία του στοιχείου SOLID96 καθώς και οι κόμβοι από τους οποίους αποτελείται φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.



**Σχήμα 6.4.2-1**

Τύπος στοιχείου SOLID96. Φαίνεται το σύστημα συντεταγμένων του στοιχείου οι κόμβοι και οι έδρες του.

## **6.5 Κατασκευή του πλέγματος.**

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή οι περιορισμοί που θέτει το πρόγραμμα όσον αφορά στον μέγιστο αριθμό στοιχείων από το οποίο θα αποτελείται το πλέγμα του μοντέλου (32.000 elements) οδηγεί στο να γίνουν ορισμένοι συμβιβασμοί για το τρισδιάστατο μοντέλο. Η κατασκευή του πλέγματος πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε το πλέγμα στο διάκενο να είναι πυκνό αλλά και το πλέγμα να είναι κατοπτρικό ως προς το X-Z επίπεδο. Το πλέγμα στο διάκενο πρέπει να είναι πυκνό για να πάρουμε μία αξιόπιστη λύση και για να υπολογιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο της σύγχρονης μηχανής. Επίσης το πλέγμα πρέπει να είναι κατοπτρικό ως προς το X-Z επίπεδο προκειμένου να εφαρμοστούν σωστά οι περιοριστικές εξισώσεις, δηλαδή να εισαχθούν ορθά οι αντιπεριοδικές συνθήκες, για να προκύψει έτσι μία σωστή λύση. Το παραπάνω θα εξηγηθεί εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο (7<sup>ο</sup> κεφάλαιο εφαρμογή συντοριακών συνθηκών) σε αυτό το σημείο όμως αρκεί να είναι γνωστό ότι το πλέγμα πρέπει να είναι κατοπτρικό ως προς το X-Z επίπεδο. Τέλος είναι σαφές ότι πρέπει να κατασκευαστεί το πλέγμα με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε ο αριθμός των στοιχείων που το αποτελούν να είναι όσο πιο κοντά γίνεται στο μέγιστο όριο που θέτει το πρόγραμμα προκειμένου να αξιοποιηθούν στο έπακρο οι δυνατότητες του προγράμματος.

Αρχικά θα αναλυθεί η πλεγματοποίηση του τρισδιάστατου μοντέλου και αυτό διότι η πλεγματοποίηση του δισδιάστατου μοντέλου θα γίνει βάσει των ρυθμίσεων που θα γίνουν για την πλεγματοποίηση του τρισδιάστατου μοντέλου. Αυτό πρέπει να γίνει προκειμένου το πλέγμα του δισδιάστατου μοντέλου να είναι ανάλογο με αυτό του τρισδιάστατου.

### **6.5.1 Πλεγματοποίηση του τρισδιάστατου μοντέλου.**

Το πλέγμα του τρισδιάστατου μοντέλου είναι δυνατό να αποτελείται από στοιχεία με γεωμετρία τετράεδρου εφόσον δεν πρόκειται για ένα πρόβλημα μηχανικής (structural) αλλά για ένα μαγνητοστατικό πρόβλημα. Οπότε ο εκφυλισμός των στοιχείων από ορθογώνια παραλληλεπίπεδα ή εξάεδρα (hexahedral) σε τετράεδρα (tetrahedral) δεν θα δημιουργήσει κανένα πρόβλημα αλλά θα οδηγήσει και σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Επίσης μία χαρτογραφημένη πλεγματοποίηση (mapped mesh) θα χρησιμοποιήσει στοιχεία με εξάεδρη γεωμετρία (hexahedron) και ενώ το πλέγμα που θα προκύψει θα έχει ένα συγκεκριμένο σχέδιο (pattern) και θα είναι και συμμετρικό, στο συγκεκριμένο πρόβλημα δεν γίνεται να εφαρμοστεί εφόσον η γεωμετρία του τρισδιάστατου μοντέλου της σύγχρονης μηχανής είναι πολύπλοκη.

Από τα παραπάνω συνεπάγεται ότι πρέπει να υιοθετηθεί η ελεύθερη πλεγματοποίηση (free meshing). Το πλέγμα θα αποτελείται συνεπώς από στοιχεία (elements) με γεωμετρία τετράεδρου, δεν θα έχει συγκεκριμένο σχέδιο και συμμετρία ενώ το σχήμα των στοιχείων θα διαφέρει σημαντικά από στοιχείο σε στοιχείο. Παρ' όλα αυτά είναι δυνατό με κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων της πλεγματοποίησης, το πλέγμα να είναι κατοπτρικό ως προς το X-Z επίπεδο.

Το ANSYS διαθέτει μία λειτουργία για την πλεγματοποίηση η οποία καλείται Smart Sizing και η οποία έχει σκοπό την δημιουργία αρχικών μεγεθών για τα στοιχεία του πλέγματος. Αυτή η λειτουργία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ελεύθερη πλεγματοποίηση, προκειμένου να προκύψουν στοιχεία με καλύτερη γεωμετρία και σχήμα. Τα στοιχεία δηλαδή που θα προκύψουν, με χρήση της παραπάνω λειτουργίας, θα έχουν όλες τις ακμές τους με περίπου το ίδιο μήκος. Η λειτουργία Smart Sizing έχει ένα σύνολο παραμέτρων μέσω των οποίων καθορίζεται η ακρίβεια με την οποία

θα γίνει η πλεγματοποίηση. Έτσι μπορούμε να επιλέξουμε μεταξύ ενός πυκνού ή αραιού πλέγματος. Το πλεονέκτημα αυτής της λειτουργίας είναι ότι το πλέγμα που θα προκύψει σε όγκους (volumes) που έχουν μικρό βάθος, δηλαδή μία από τις διαστάσεις τους πολύ μικρότερη από τις υπόλοιπες δύο, θα είναι πολύ πιο πυκνό από ότι σε όγκους με μεγάλο βάθος. Στην περίπτωση δηλαδή του φυσικού μοντέλου της σύγχρονης μηχανής το πλέγμα του διακένου θα είναι πολύ πιο πυκνό από ότι αυτό του στάτη ή του δρομέα. Εφόσον το πλέγμα στο διάκενο θα είναι πυκνό θα προκύψει και μια πιο ακριβής λύση στην περιοχή αυτή. Επειδή όμως το πλέγμα θα είναι στις υπόλοιπες περιοχές αραιό θα είναι ιδιαίτερα ακανόνιστο και δεν θα είναι συμμετρικό ως προς το X-Z επίπεδο. Το παραπάνω πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί μεταβάλλοντας τις παραμέτρους της λειτουργίας Smart Sizing για να προκύψει ένα πιο ακριβές πλέγμα αλλά στο συγκεκριμένο φυσικό μοντέλο ο αριθμός των στοιχείων του πλέγματος ξεπερνάει το μέγιστο όριο, που τίθεται από το πρόγραμμα, πολύ πριν το πλέγμα γίνει συμμετρικό ως προς το X-Z επίπεδο.

Προκειμένου να είναι πυκνό το πλέγμα στο διάκενο, συμμετρικό ως προς το X-Z επίπεδο αλλά και να μην ξεπερνάει το μέγιστο αριθμό στοιχείων, δεν πρέπει να γίνει χρήση της λειτουργίας Smart Sizing. Αρκεί μόνο να περιοριστεί το μέγιστο μήκος των ακμών των στοιχείων σε μία κατάλληλη τιμή η οποία δεν θα ξεπεραστεί κατά την πλεγματοποίηση. Δηλαδή αρκεί να τεθεί ένα μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος το οποίο καμία ακμή των στοιχείων δεν θα το ξεπεράσει. Έτσι σε όγκους με μεγάλο βάθος τα στοιχεία θα έχουν όλες τις ακμές τους με ίδιο μήκος και ίσο με το μέγιστο όριο μήκους που θα τεθεί, ενώ σε όγκους με μικρό βάθος ορισμένες από τις ακμές του στοιχείου θα έχουν μήκος ίσο με το βάθος του συγκεκριμένου όγκου ενώ οι υπόλοιπες ίσο με το μέγιστο επιτρεπόμενο. Με την παραπάνω μέθοδο θα προκύψει ένα πυκνό πλέγμα στο διάκενο του φυσικού μοντέλου της σύγχρονης μηχανής, ενώ το πλέγμα στις υπόλοιπες περιοχές θα είναι αρκετά πυκνό έτσι ώστε να είναι και συμμετρικό ως προς το X-Z επίπεδο. Με κατάλληλη επιλογή του μέγιστου μήκους των ακμών των στοιχείων είναι δυνατό να προσεγγιστεί, αλλά να μην ξεπεραστεί, το μέγιστο όριο στον αριθμό των στοιχείων που θέτει το ANSYS προκειμένου έτσι να αξιοποιηθούν στο έπακρο και οι δυνατότητες της συγκεκριμένης έκδοσης του προγράμματος. Είναι σημαντικό πάντως να σημειωθεί πως το πλέγμα που θα προκύψει στο διάκενο δεν θα είναι τόσο πυκνό όσο αυτό που θα προέκυπτε κάνοντας χρήση της λειτουργίας Smart Sizing. Είναι απαραίτητο όμως να μην γίνει χρήση της λειτουργίας αυτής εφόσον θα υπάρχει πρόβλημα κατά την εφαρμογή των αντιπεριδικών συνθηκών και επίσης επειδή είναι δύσκολο να αξιοποιηθούν στο έπακρο οι δυνατότητες της συγκεκριμένης έκδοσης του προγράμματος και αυτός ακριβώς είναι ο συμβιβασμός που γίνεται στην περίπτωση του τρισδιάστατου μοντέλου.

Η κατασκευή του πλέγματος γίνεται ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία.

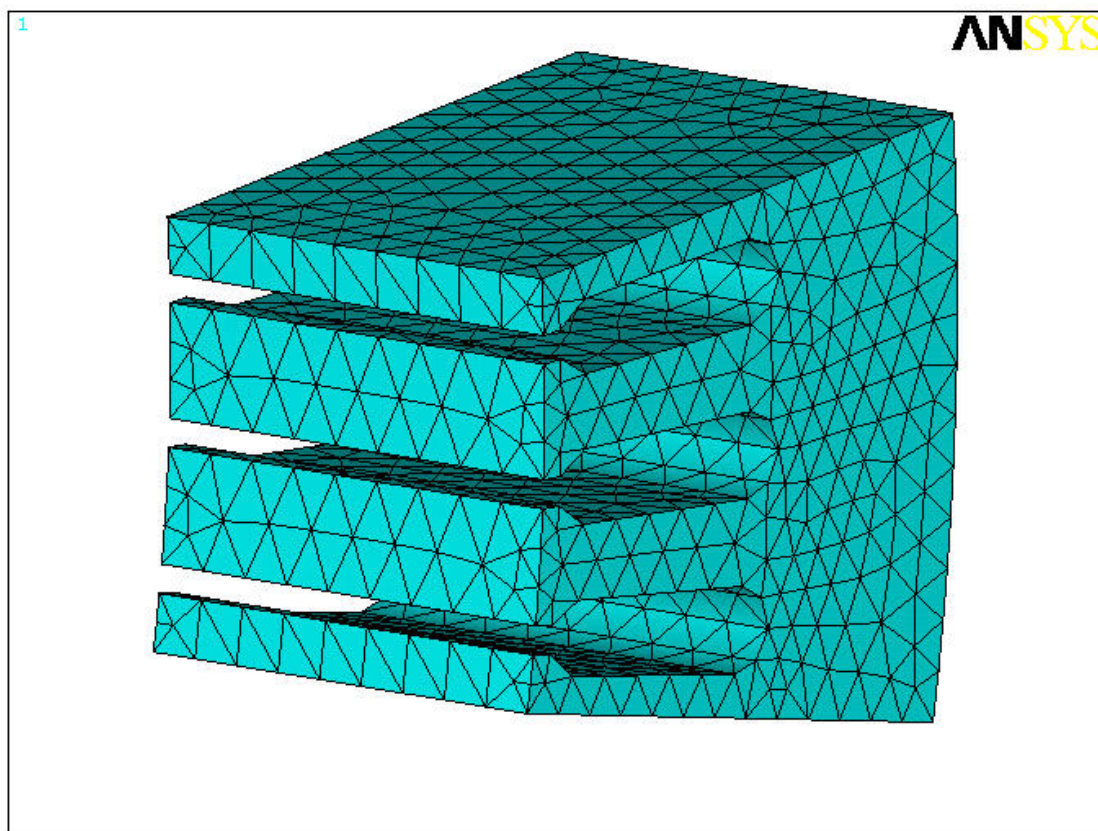
- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Mesh Tool.
- Από το παράθυρο που προκύπτει επιλέγουμε Element Attributes, μετά επιλέγουμε Volumes και Set. Από το νέο παράθυρο που προκύπτει μπορούμε να επιλέξουμε τις περιοχές (όγκους) που έχουν μία συγκεκριμένη ιδιότητα υλικού. Αυτές οι περιοχές για κάθε υλικό (αέρα, σιδηροπυρήνα και μόνιμου μαγνήτη) έχουν καθοριστεί στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Αφού γίνει η επιλογή των κατάλληλων περιοχών επιλέγουμε OK και από το παράθυρο που προκύπτει θέτουμε στο πεδίο MAT Material number την κατάλληλη τιμή που αντιπροσωπεύει το υλικό που αντιστοιχεί στις προεπιλεγμένες περιοχές και μετά επιλέγουμε OK. Τα παραπάνω έχουν αναλυθεί στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο απλώς η απόδοση των ιδιοτήτων των υλικών

στους όγκους του φυσικού μοντέλου της σύγχρονης μηχανής γίνεται στο συγκεκριμένο στάδιο.

- Επιλέγουμε Size Controls, μετά επιλέγουμε Global και τέλος Set. Από το παράθυρο που προκύπτει μπορούμε να θέσουμε το μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος της ακμής των στοιχείων. Αυτό γίνεται με το να θέσουμε στο πεδίο SIZE Element edge length την τιμή 0.004 (δηλαδή  $4 \cdot 10^{-3} \text{m}$  ή 4mm). Επιλέγουμε OK για την επιστροφή στο προηγούμενο παράθυρο.
- Στην συνέχεια επιλέγουμε Mesh και Volumes. Έπειτα επιλέγουμε Shape και Tet.
- Σε αυτό το στάδιο έχει ολοκληρωθεί η ρύθμιση των παραμέτρων της πλεγματοποίησης. Προκειμένου να αρχίσει η κατασκευή του πλέγματος απλώς επιλέγουμε Mesh.

Στις επόμενες εικόνες φαίνεται το πλέγμα για τις διάφορες περιοχές του τρισδιάστατου μοντέλου του δοκιμίου της σύγχρονης μηχανής τόσο με μαγνήτες χωρίς κλίση αλλά και με μαγνήτες με κλίση. Για την σύγχρονη μηχανή με μαγνήτες με κλίση δίνεται το πλέγμα των περιοχών αυτών που δεν είναι κοινές με το μοντέλο της μηχανής με μαγνήτες χωρίς κλίση, δηλαδή ο δρομέας, ο μαγνήτης και το τμήμα του διακένου που εφάπτεται στο μαγνήτη.

Το πλέγμα του φυσικού μοντέλου με μαγνήτη χωρίς κλίση αποτελείται συνολικά από 28.970 στοιχεία ενώ το πλέγμα του μοντέλου με μαγνήτη με κλίση αποτελείται από 28.966 στοιχεία.

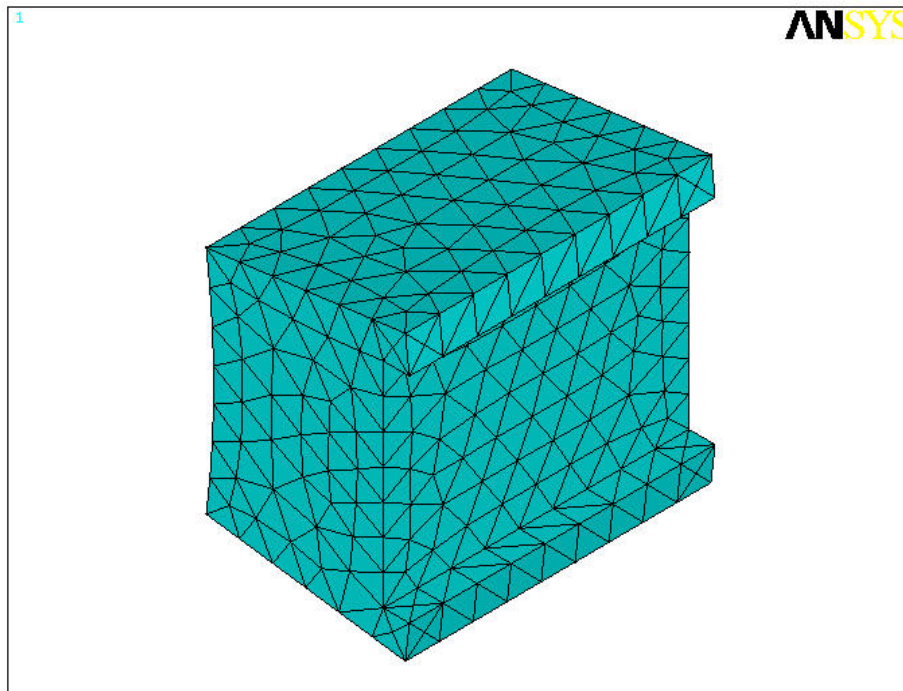


**Εικόνα 6.5.1-1**

Πλέγμα του στάτη του τρισδιάστατου μοντέλου. Αποτελείται από 8.633 στοιχεία και 2.150 κόμβους. Είναι κοινό τόσο για το φυσικό μοντέλο με μαγνήτες χωρίς κλίση όσο και για το μοντέλο με μαγνήτες με κλίση.

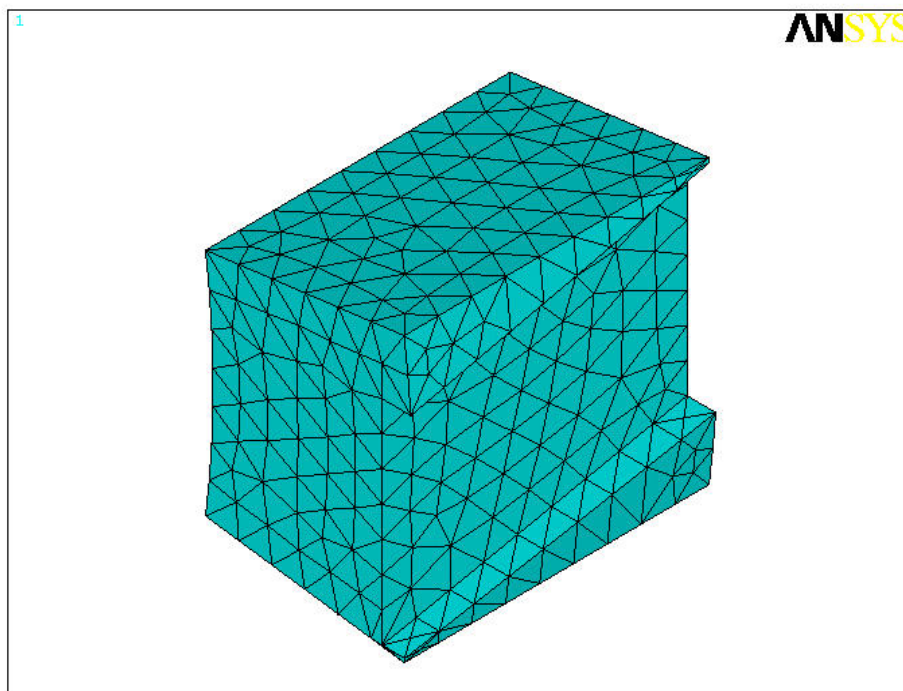


Στις επόμενες δύο εικόνες φαίνεται το πλέγμα του δρομέα της σύγχρονης μηχανής με μαγνήτες χωρίς κλίση και με μαγνήτες με κλίση όπου φαίνονται και οι μεταξύ τους διαφορές.



**Εικόνα 6.5.1-2**

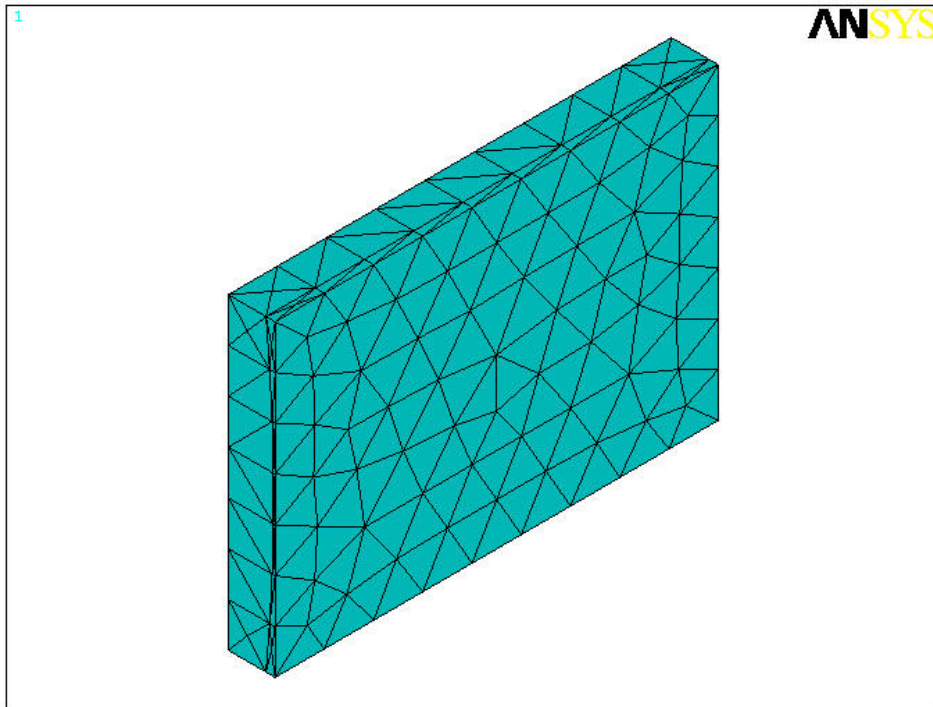
Πλέγμα του δρομέα του τρισδιάστατου μοντέλου με μαγνήτες χωρίς κλίση. Αποτελείται από 2.976 στοιχεία και 718 κόμβους.



**Εικόνα 6.5.1-3**

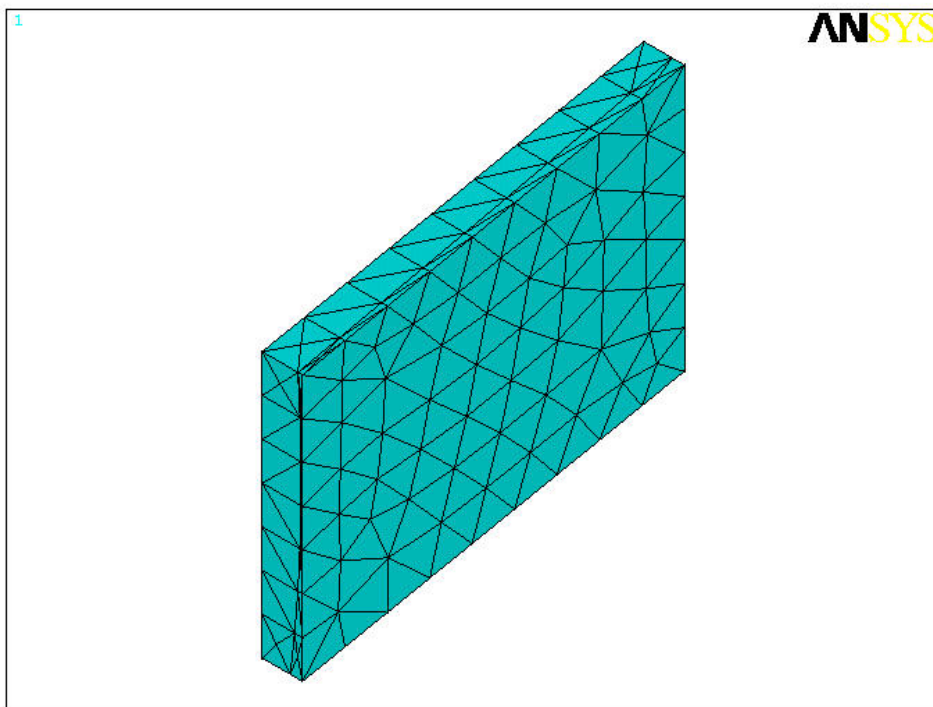
Πλέγμα του δρομέα του τρισδιάστατου μοντέλου με μαγνήτες με κλίση. Αποτελείται από 3.015 στοιχεία και 726 κόμβους.

Στις επόμενες δύο εικόνες φαίνεται το πλέγμα του μαγνήτη χωρίς κλίση και του κεκλιμένου μαγνήτη της σύγχρονης μηχανής όπου φαίνονται και οι μεταξύ τους διαφορές.



**Εικόνα 6.5.1-4**

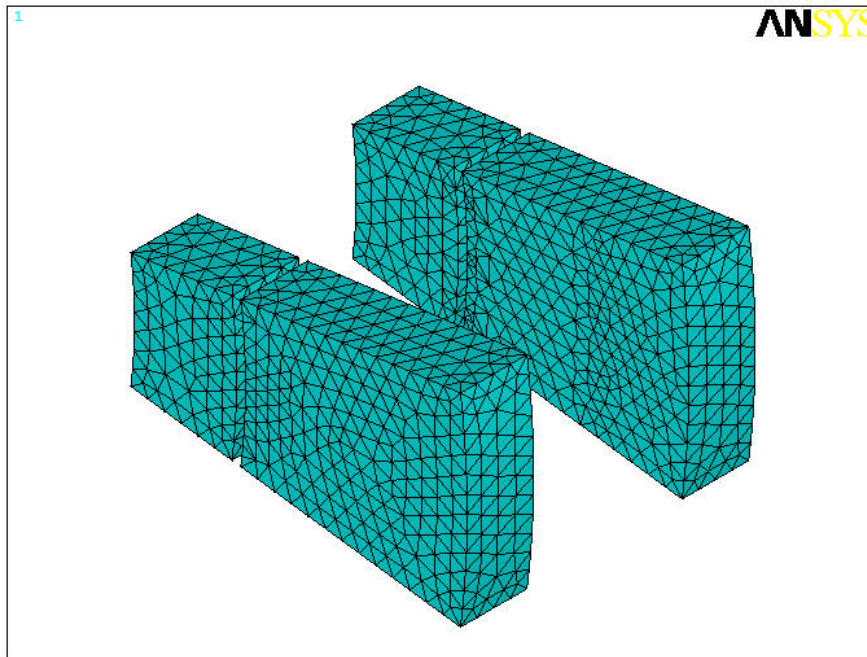
Πλέγμα του χωρίς κλίση μαγνήτη του τρισδιάστατου μοντέλου. Αποτελείται από 586 στοιχεία και 289 κόμβους.



**Εικόνα 6.5.1-5**

Πλέγμα του κεκλιμένου μαγνήτη του τρισδιάστατου μοντέλου. Αποτελείται από 558 στοιχεία και 219 κόμβους.

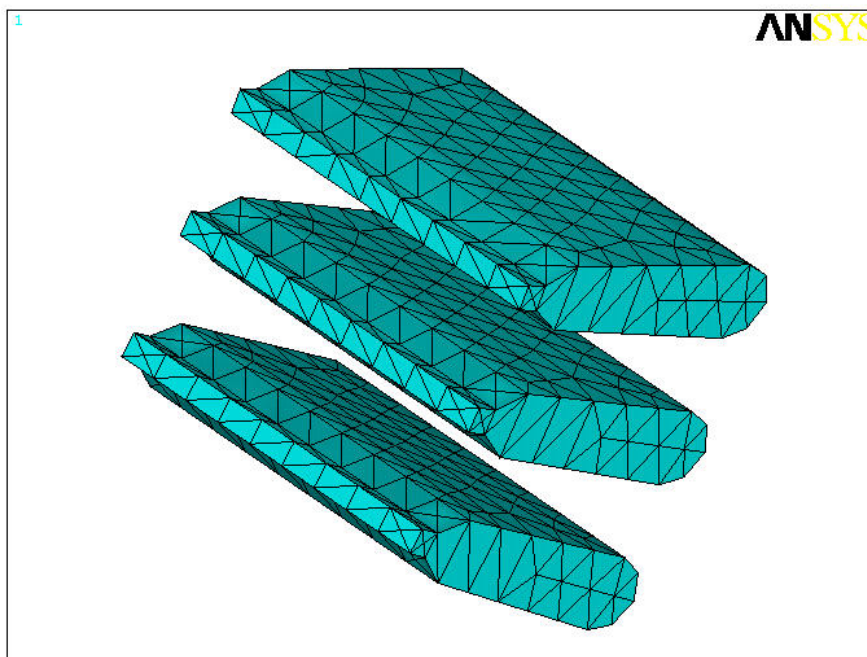
Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το πλέγμα των περιοχών του αέρα που περιβάλλει την σύγχρονη μηχανή. Το πλέγμα αυτό είναι κοινό τόσο για το φυσικό μοντέλο με μαγνήτες χωρίς κλίση όσο και για το μοντέλο με μαγνήτες με κλίση.



**Εικόνα 6.5.1-6**

Πλέγμα των τεσσάρων όγκων αέρα που περιβάλλουν το τρισδιάστατο μοντέλο της σύγχρονης μηχανής. Αποτελείται από 11.976 στοιχεία και 2.906 κόμβους.

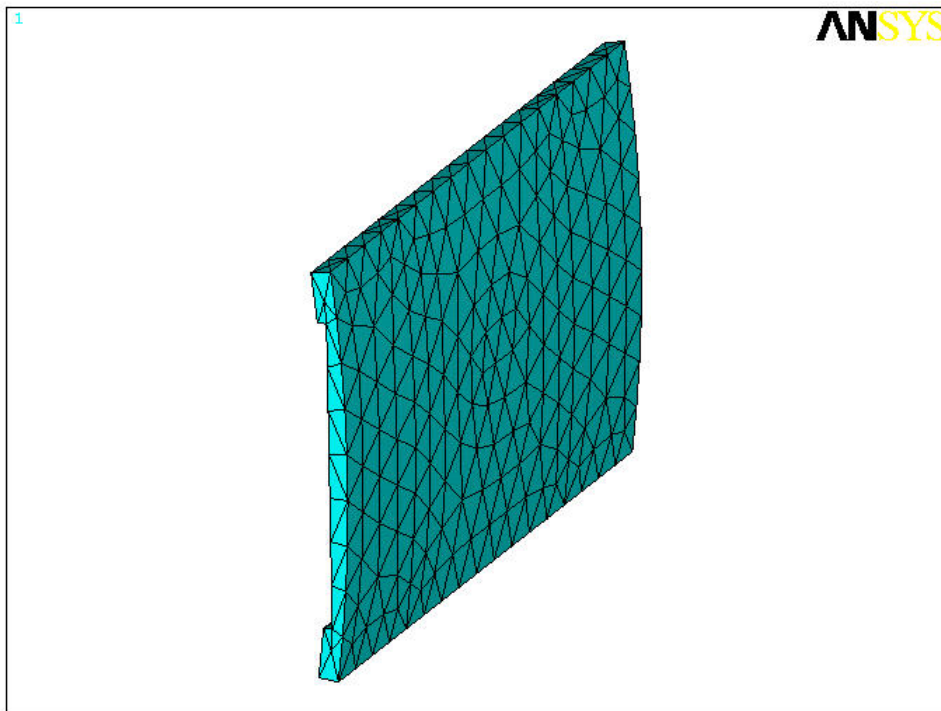
Παρακάτω απεικονίζεται το πλέγμα των περιοχών του αέρα που βρίσκεται μεταξύ των οδοντώσεων του στάτη. Και αυτό είναι κοινό για τα δύο φυσικά μοντέλα.



**Εικόνα 6.5.1-7**

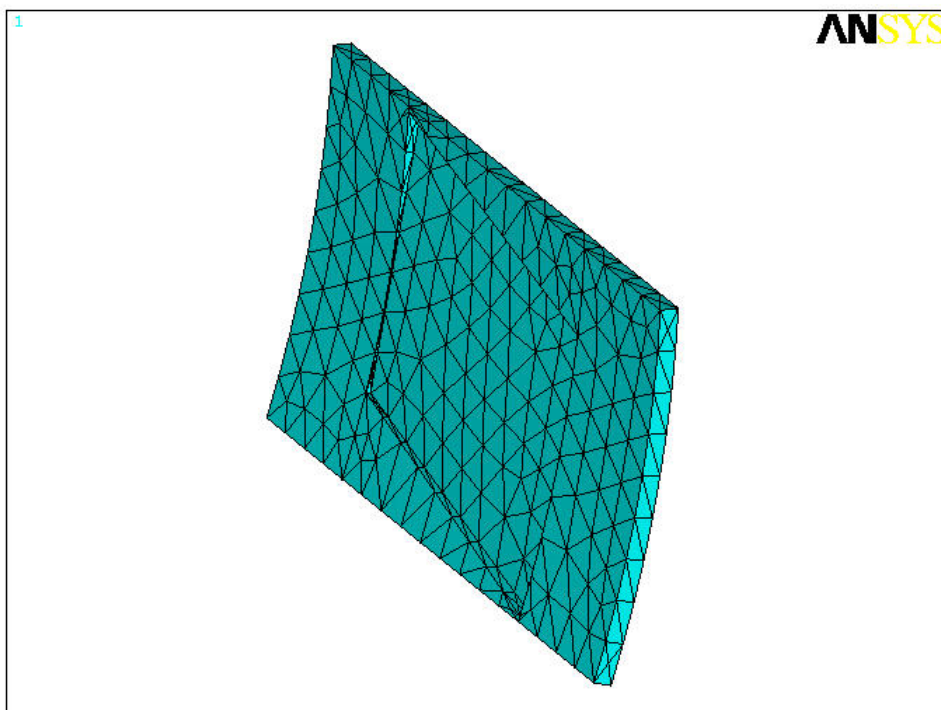
Πλέγμα των αυλακών του στάτη. Αποτελείται συνολικά από 2.328 στοιχεία και 789 κόμβους.

Στις επόμενες δύο εικόνες εικονίζεται το πλέγμα του πρώτου τμήματος του διακένου αέρα της μηχανής, που εφάπτεται στον μαγνήτη χωρίς κλίση και στον κεκλιμένο μαγνήτη αντίστοιχα όπου φαίνονται και οι μεταξύ τους διαφορές.



**Εικόνα 6.5.1-8**

Πλέγμα του όγκου του διακένου αέρα που εφάπτεται στον χωρίς κλίση μαγνήτη.  
Αποτελείται συνολικά από 1.281 στοιχεία και 476 κόμβους.

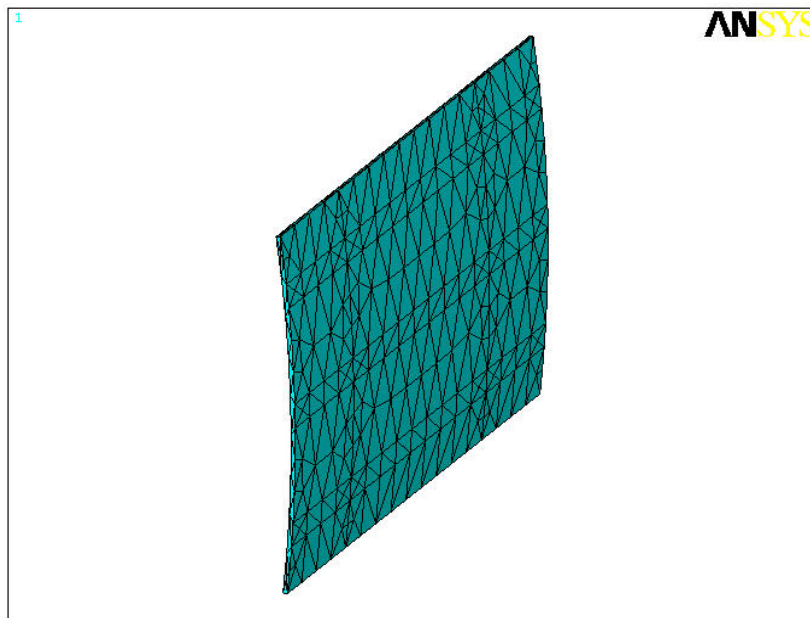


**Εικόνα 6.5.1-9**

Πλέγμα του όγκου του διακένου αέρα που εφάπτεται στον κεκλιμένο μαγνήτη.  
Αποτελείται συνολικά από 1.266 στοιχεία και 467 κόμβους.



Τέλος στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το πλέγμα του δεύτερου τμήματος του διακένου του αέρα που είναι το ίδιο και για τα δύο τρισδιάστατα μοντέλα. Από την συγκεκριμένη εικόνα φαίνεται το πολύ μικρό πάχος της συγκεκριμένης περιοχής. Αυτό έγινε για να προκύψει ένα πυκνό πλέγμα καθώς και στοιχεία με μικρές διαστάσεις προκειμένου να προκύψει μια ακριβής λύση στο διάκενο και επιπροσθέτως για να ληφθούν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Τα παραπάνω θα εξηγηθούν στο 9<sup>ο</sup> κεφάλαιο.



**Εικόνα 6.5.1-10**

Πλέγμα του όγκου του δεύτερου τμήματος του διακένου αέρα της σύγχρονης μηχανής. Αποτελείται συνολικά από 1.190 στοιχεία και 460 κόμβους.

### **6.5.2 Πλεγματοποίηση του δισδιάστατου μοντέλου.**

Για την πλεγματοποίηση του δισδιάστατου μοντέλου θα χρησιμοποιηθούν οι ίδιες ρυθμίσεις όπως για την πλεγματοποίηση του τρισδιάστατου μοντέλου και αυτό για να προκύψουν ανάλογα πλέγματα προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων που θα εξαχθούν από τις λύσεις για τα δύο φυσικά μοντέλα. Το παραπάνω συνεπάγεται ότι το σχήμα των στοιχείων στο δισδιάστατο μοντέλο θα είναι τριγωνικό, ενώ και εδώ θα τεθεί το ίδιο μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος για τις ακμές των στοιχείων που θα αποτελούν το πλέγμα.

Το πλέγμα του δισδιάστατου μοντέλου είναι δυνατό να αποτελείται από στοιχεία με γεωμετρία τριγώνου εφόσον δεν πρόκειται για ένα πρόβλημα μηχανικής (structural) αλλά για ένα μαγνητοστατικό πρόβλημα. Οπότε ο εκφυλισμός των στοιχείων από τετράπλευρα (quadrangle) σε τρίγωνα (triangular) δεν θα δημιουργήσει κανένα πρόβλημα αλλά θα οδηγήσει και σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα όπως και στην περίπτωση του τρισδιάστατου μοντέλου.

Η κατασκευή του πλέγματος του δισδιάστατου μοντέλου γίνεται ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία.

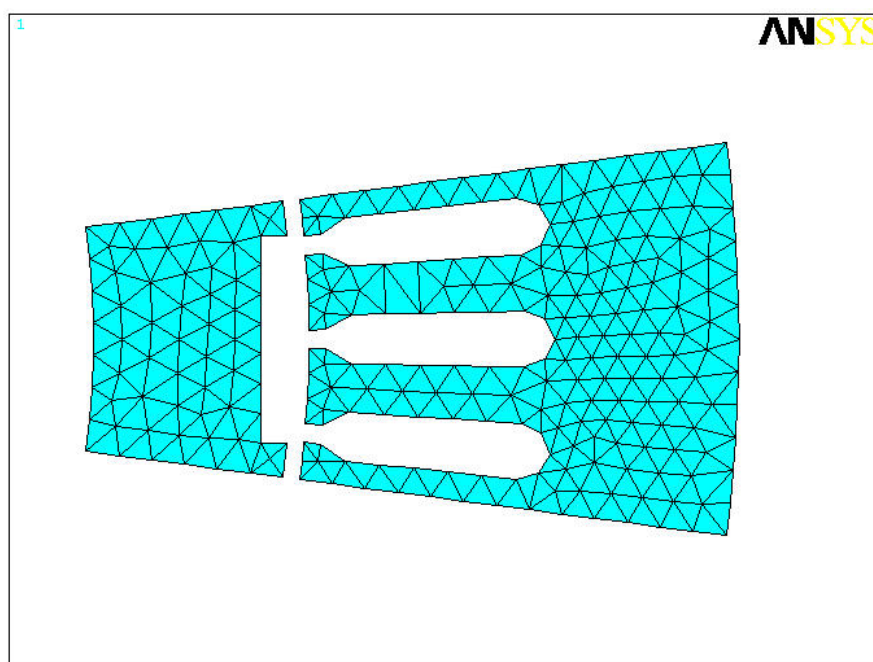
- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Mesh Tool.
- Από το παράθυρο που προκύπτει επιλέγουμε Element Attributes, μετά επιλέγουμε Areas και Set. Από το νέο παράθυρο που προκύπτει μπορούμε να επιλέξουμε τις περιοχές (επιφάνειες) που έχουν μία συγκεκριμένη ιδιότητα

υλικού. Αυτές οι περιοχές για κάθε υλικό (αέρα, σιδηροπυρήνα και μόνιμου μαγνήτη) έχουν καθοριστεί στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Αφού γίνει η επιλογή των κατάλληλων περιοχών επιλέγουμε OK και από το παράθυρο που προκύπτει θέτουμε στο πεδίο MAT Material number την κατάλληλη τιμή που αντιπροσωπεύει το υλικό που αντιστοιχεί στις προεπιλεγμένες περιοχές. Τέλος επιλέγουμε OK. Τα παραπάνω έχουν αναλυθεί στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο, απλώς η απόδοση των ιδιοτήτων των υλικών στις επιφάνειες του δισδιάστατου φυσικού μοντέλου της σύγχρονης μηχανής γίνεται στο συγκεκριμένο στάδιο.

- Επιλέγουμε Size Controls, μετά επιλέγουμε Global και τέλος Set. Από το παράθυρο που προκύπτει μπορούμε να θέσουμε το μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος της ακμής των στοιχείων. Αυτό γίνεται με το να θέσουμε στο πεδίο SIZE Element edge length την τιμή 0.004 (δηλαδή  $4 \cdot 10^{-3}$  m ή 4mm). Επιλέγουμε OK για την επιστροφή στο προηγούμενο παράθυρο.
- Στην συνέχεια επιλέγουμε Mesh και Areas. Έπειτα επιλέγουμε Shape και Tri.
- Σε αυτό το στάδιο έχει ολοκληρωθεί η ρύθμιση των παραμέτρων της πλεγματοποίησης. Προκειμένου να αρχίσει η κατασκευή του πλέγματος επιλέγουμε Mesh.

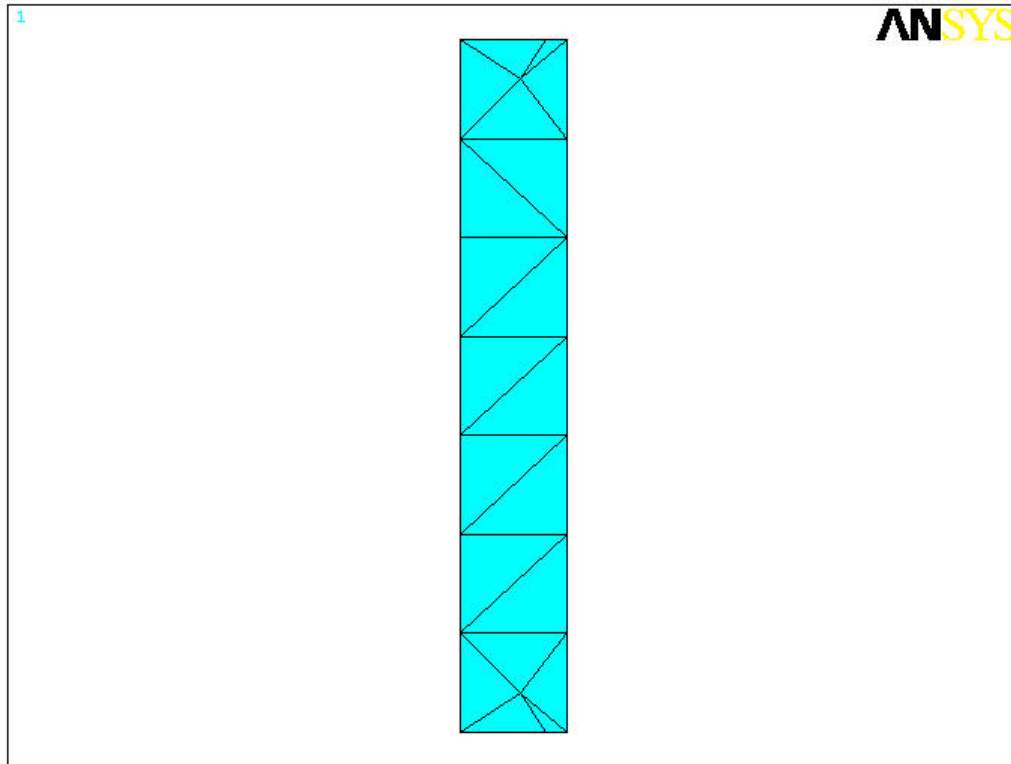
Στις επόμενες τέσσερις εικόνες απεικονίζεται το πλέγμα των διάφορων περιοχών του δισδιάστατου μοντέλου ενώ στην τελευταία (εικόνα 6.5.2-5) φαίνεται το συνολικό πλέγμα του φυσικού μοντέλου της σύγχρονης μηχανής το οποίο αποτελείται από 555 στοιχεία.

Επίσης από τις επόμενες εικόνες φαίνεται καθαρά ότι το πλέγμα είναι αραιό. Είναι δυνατόν με την επιλογή μιας πολύ μικρότερης τιμής για το μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος της ακμής των στοιχείων να προκύψει ένα πολύ πιο πυκνό πλέγμα για το δισδιάστατο μοντέλο. Αυτό δεν έγινε όμως για να προκύψει ένα ανάλογο με αυτό του τρισδιάστατου μοντέλου πλέγμα προκειμένου να είναι άμεσα συγκρίσιμα τα αποτελέσματα που θα ληφθούν από την λύση του δισδιάστατου και του τρισδιάστατου μοντέλου.



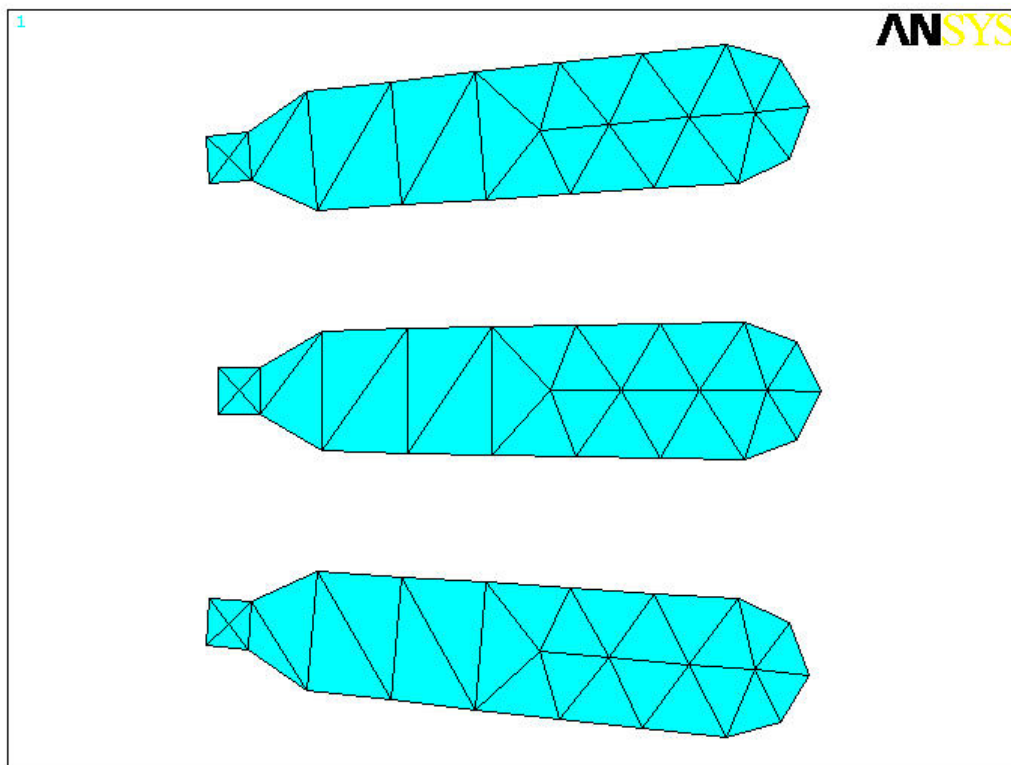
**Εικόνα 6.5.2-1**

Πλέγμα του στάτη και του δρομέα του δισδιάστατου μοντέλου. Αποτελείται συνολικά από 404 στοιχεία και 270 κόμβους.



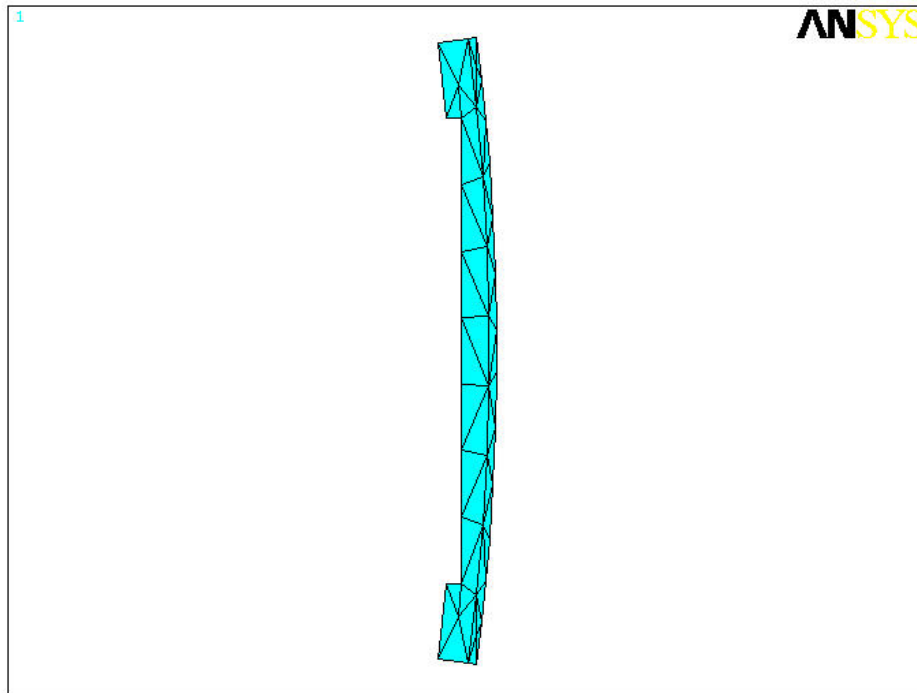
**Εικόνα 6.5.2-2**

Πλέγμα της περιοχής του μαγνήτη του δισδιάστατου μοντέλου. Αποτελείται από 20 στοιχεία και 20 κόμβους.



**Εικόνα 6.5.2-3**

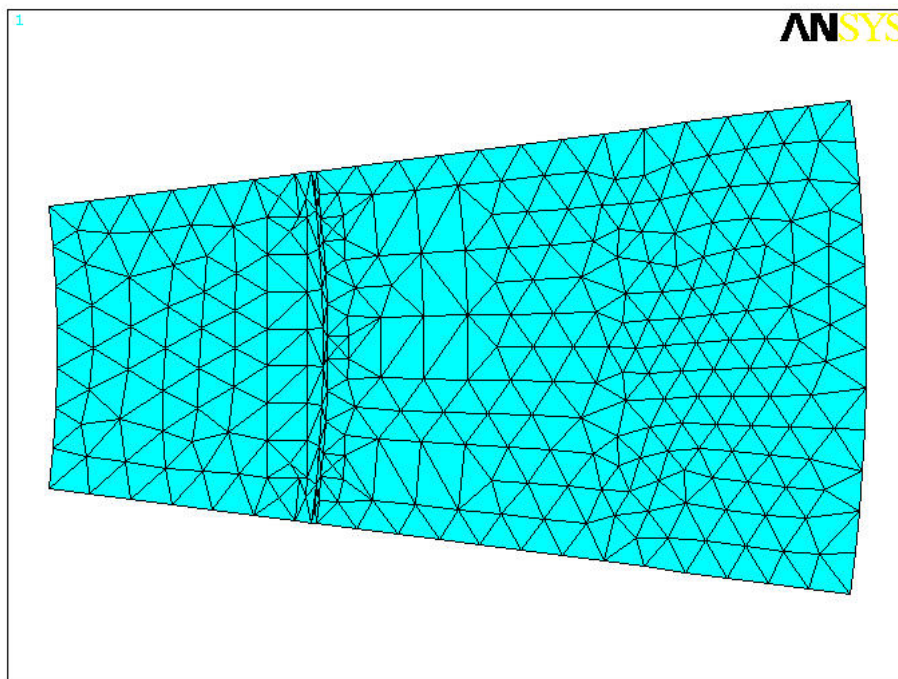
Πλέγμα των περιοχών του αέρα μεταξύ των οδοντώσεων του σιάτη για το δισδιάστατο μοντέλο. Αποτελείται συνολικά από 81 στοιχεία και 72 κόμβους.



**Εικόνα 6.5.2-4**

Πλέγμα της περιοχής του διάκενου του αέρα του δισδιάστατου μοντέλου. Αποτελείται συνολικά από 50 στοιχεία και 40 κόμβους.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το πλέγμα του δισδιάστατου μοντέλου. Διακρίνεται το πλέγμα στο διάκενο το οποίο είναι πολύ πιο πυκνό από το υπόλοιπο πλέγμα του μοντέλου. Αυτό είναι σημαντικό εφόσον η λύση πρέπει να είναι ακριβής στο διάκενο.



**Εικόνα 6.5.2-5**

Πλέγμα του δισδιάστατου μοντέλου. Αποτελείται συνολικά από 555 στοιχεία.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ  
ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΩΝ



## **7.1 Εισαγωγή.**

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (6<sup>ο</sup> κεφάλαιο κατασκευή του πλέγματος), οι περιορισμοί που θέτει το ANSYS στον μέγιστο αριθμό στοιχείων από το οποίο θα αποτελείται το πλέγμα του μοντέλου καθορίζει αποφασιστικά την σχεδίαση του φυσικού μοντέλου. Για να προκύψει μία ακριβής λύση το πλέγμα θα πρέπει να είναι πυκνό. Όμως ένα πλέγμα που θα αντιστοιχούσε στο πραγματικό μοντέλο και που δεν θα ξεπερνούσε τον μέγιστο αριθμό στοιχείων θα ήταν πολύ αραιό. Πρακτικά, λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας της σύγχρονης γεννήτριας και του μέγιστου ορίου που θέτει το πρόγραμμα στον αριθμό των στοιχείων, δεν γίνεται από το ANSYS η πλεγματοποίηση του πλήρους τρισδιάστατου μοντέλου της σύγχρονης 24-πολικής γεννήτριας. Αντιθέτως το πρόγραμμα μπορεί να κατασκευάσει το πλέγμα του πλήρους δισδιάστατου μοντέλου.

Τα παραπάνω οδηγούν στο να σχεδιαστεί το φυσικό μοντέλο μόνο για ένα μικρό τμήμα της σύγχρονης μηχανής. Συγκεκριμένα το φυσικό μοντέλο θα σχεδιαστεί μόνο για ένα πόλο. Με αυτόν τον τρόπο το πλέγμα που θα προκύψει για το συγκεκριμένο φυσικό μοντέλο θα είναι πολύ πιο πυκνό με αποτέλεσμα να προκύψει και μια πιο ακριβής λύση. Έτσι τα αποτελέσματα που θα ληφθούν θα είναι πολύ πιο αξιόπιστα.

Είναι σαφές ότι το φυσικό μοντέλο για έναν μόνο πόλο έχει διαφορετική γεωμετρία από ότι το πραγματικό μοντέλο οπότε και θα πρόκειται για ένα διαφορετικό πρόβλημα. Προκειμένου όμως να προκύψει η σωστή λύση θα πρέπει το φυσικό μοντέλο να είναι ισοδύναμο με το πραγματικό μοντέλο. Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή κατάλληλων συνοριακών συνθηκών. Αυτές οι συνοριακές συνθήκες εξαρτώνται από την συμμετρία του προβλήματος η οποία δεν προκύπτει μόνο από την γεωμετρία της σύγχρονης μηχανής αλλά και από τις ιδιότητες των περιοχών αυτής.

Από τα παραπάνω γίνεται εύκολα αντιληπτό πως οι συνοριακές συνθήκες είναι πολύ σημαντικές. Χωρίς την εφαρμογή αυτών, το φυσικό μοντέλο του ενός μαγνήτη θα ήταν απλώς ένα διαφορετικό πρόβλημα και όχι ισοδύναμο με την πραγματική σύγχρονη μηχανή. Έτσι η λύση που θα προέκυπτε δεν θα ήταν η σωστή.

Τέλος στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα εφαρμοστούν και φορτία (loads), συγκεκριμένα πυκνότητα ρεύματος στο δισδιάστατο μοντέλο, για την μελέτη της υπό φορτίο λειτουργίας της σύγχρονης μηχανής.

## **7.2 Συμμετρίες του προβλήματος.**

Είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη οι συμμετρίες ενός προβλήματος και αυτό γιατί το φυσικό μοντέλο που θα προκύψει θα είναι πιο μικρό και απλό με αποτέλεσμα να είναι εύκολη η κατασκευή και η πλεγματοποίηση αυτού. Επίσης η λύση για ένα μικρότερο και πιο απλό φυσικό μοντέλο θα είναι λιγότερο χρονοβόρα καθώς και λιγότερο απαιτητική σε υπολογιστικούς πόρους.

Για το συγκεκριμένο πρόβλημα του δοκιμίου της σύγχρονης 24-πολικής γεννήτριας μόνιμων μαγνητών, λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας αυτής καθώς και του περιορισμού στον μέγιστο αριθμό στοιχείων που θέτει το ANSYS, επιβάλλεται η εκμετάλλευση των συμμετριών του προβλήματος αφού αλλιώς δεν θα μπορεί να μοντελοποιηθεί η μηχανή και να λυθεί το πρόβλημα.

Προκειμένου να σχεδιαστεί η σύγχρονη γεννήτρια στο ANSYS υιοθετήθηκε ένα κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων (στο ANSYS τα συστήματα συντεταγμένων είναι ορθογωνικά και δεξιόστροφα). Το R-φ επίπεδο του κυλινδρικού συστήματος συντεταγμένων είναι κάθετο στον Z άξονα και συμπίπτει με το X-Y επίπεδο του

καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων. Επίσης είναι σαφές ότι το τρισδιάστατο μοντέλο σχεδιάστηκε κάνοντας χρήση του κυλινδρικού συστήματος συντεταγμένων ενώ το δισδιάστατο μοντέλο σχεδιάστηκε κάνοντας χρήση του πολικού συστήματος συντεταγμένων. Τέλος το R-φ επίπεδο του πολικού συστήματος συντεταγμένων συμπίπτει με το X-Y επίπεδο στο ANSYS.

Η σύγχρονη μηχανή έχει συνολικά  $P = 24$  πόλους. Ο αριθμός των ζευγών πόλων αυτής είναι  $P = P / 2 = 12$ . Εάν περιστρέψουμε την σύγχρονη μηχανή περί τον Z άξονα κατά μία συγκεκριμένη γωνία  $\phi$ , ή κατά ακέραια πολλαπλάσια αυτής, τότε θα προκύψει πάλι η ίδια ακριβώς γεωμετρία, δηλαδή η σύγχρονη μηχανή έχει περιστροφική συμμετρία. Η γωνία αυτή δίνεται από την κάτωθι σχέση.

$$\phi = \frac{360^\circ}{P} = \frac{360^\circ}{24} = 15^\circ$$

Περαιτέρω λοιπόν την σύγχρονη γεννήτρια περί των Z άξονα, χωρίς να λαμβάνονται όμως υπόψη οι ιδιότητες των περιοχών της μηχανής, όπως η πολικότητα των μόνιμων μαγνητών, κατά γωνία:

$$\phi = k \cdot 15^\circ, \quad k = 0,1,2,\dots$$

θα προκύψει ακριβώς η ίδια γεωμετρία. Για αυτόν τον λόγο είναι δυνατή η σχεδίαση του φυσικού μοντέλου μόνο για ένα πόλο, ή για δύο πόλους, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να προκύψει ένα πολύ πιο μικρό και απλό μοντέλο που θα διευκολύνει σημαντικά στην πλεγματοποίηση και την λύση του προβλήματος.

Αν ληφθούν όμως υπόψη και οι ιδιότητες των υλικών των περιοχών της σύγχρονης μηχανής και συγκεκριμένα η πολικότητα των μόνιμων μαγνητών τότε προκύπτουν αλλαγές στην περιστροφική συμμετρία του προβλήματος. Αυτές οι αλλαγές θα καθορίσουν και την εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών. Έτσι αν περιστρέψουμε την σύγχρονη μηχανή περί τον άξονα Z κατά γωνία:

$$\phi = 2 \cdot k \cdot 15^\circ, \quad k = 0,1,2,\dots$$

δεν θα είναι μόνο πανομοιότυπη η γεωμετρία αλλά και η εναλλαγή στην πολικότητα των μαγνητών, πρόκειται δηλαδή για άρτια συμμετρία.

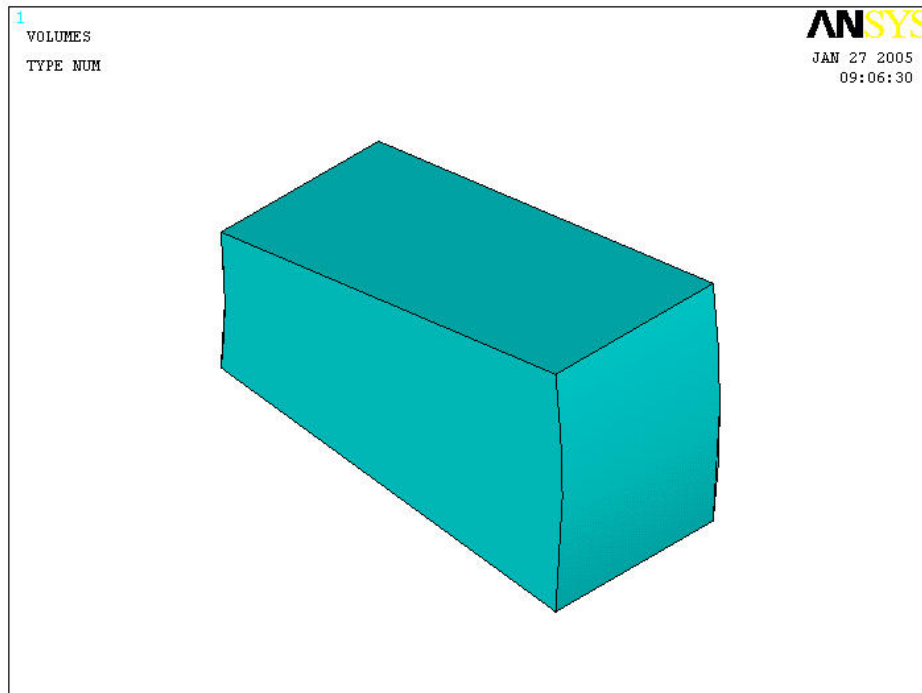
Αν όμως περιστρέψουμε την σύγχρονη μηχανή περί τον άξονα Z κατά γωνία:

$$\phi = (2 \cdot k + 1) \cdot 15^\circ, \quad k = 0,1,2,\dots$$

τότε ενώ η γεωμετρία που προκύπτει είναι πανομοιότυπη με πριν, η εναλλαγή στην πολικότητα των μόνιμων μαγνητών έχει αντιστραφεί. Στην περίπτωση αυτή η συμμετρία είναι περιττή.

Τα παραπάνω οδηγούν στην εφαρμογή διαφορετικών συνοριακών συνθηκών για τις περιπτώσεις ενός φυσικού μοντέλου ενός πόλου (που αντιστοιχεί σε γωνία  $15^\circ$ ) και ενός άλλου με δύο πόλους (που αντιστοιχεί σε γωνία  $30^\circ$ ).

Επίσης το πρόβλημα για την σύγχρονη μηχανή έχει κυλινδρική συμμετρία. Το φυσικό μοντέλο για ένα πόλο εκτείνεται μεταξύ ενός ελάχιστου και μέγιστου ορίου της ακτίνας R, της γωνίας  $\phi$  και της διάστασης Z. Αυτό απεικονίζεται στην εικόνα της επόμενης σελίδας (εικόνα 7.2-1).

**Εικόνα 7.2-1**

Συνολική γεωμετρία του φυσικού τρισδιάστατου μοντέλου. Είναι ισοδύναμη με το τμήμα ενός κοίλου κυλίνδρου.

Το στερεό που απεικονίζεται στην παραπάνω εικόνα μπορεί να οριστεί σαν τον γεωμετρικό τόπο των σημείων με συντεταγμένες  $(R, \phi, Z)$  όπου:

$$R_2 \leq R \leq R_1, \quad R_1 > R_2 > 0$$

$$\phi_2 \leq \phi \leq \phi_1, \quad \phi_2 = -\phi_1 \neq 0$$

$$Z_2 \leq Z \leq Z_1$$

Το παραπάνω στερεό περικλείεται από έξι επιφάνειες, οι οποίες αποτελούν τα όρια του στερεού, που μπορούν να περιγραφούν σαν τον γεωμετρικό τόπο των σημείων με συντεταγμένες  $(R, \phi, Z)$  όπου:

$$R = R_2, \quad \phi_2 \leq \phi \leq \phi_1, \quad Z_2 \leq Z \leq Z_1, \quad \text{Επιφάνεια 1}$$

$$R = R_1, \quad \phi_2 \leq \phi \leq \phi_1, \quad Z_2 \leq Z \leq Z_1, \quad \text{Επιφάνεια 2}$$

$$Z = Z_2, \quad \phi_2 \leq \phi \leq \phi_1, \quad R_2 \leq R \leq R_1, \quad \text{Επιφάνεια 3}$$

$$Z = Z_1, \quad \phi_2 \leq \phi \leq \phi_1, \quad R_2 \leq R \leq R_1, \quad \text{Επιφάνεια 4}$$

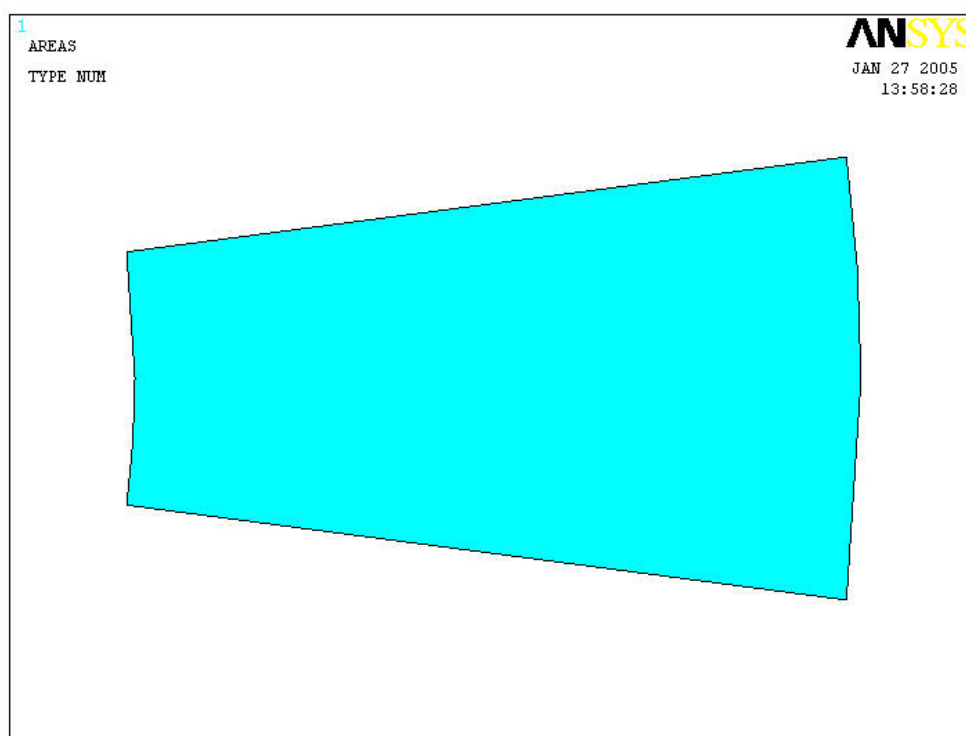
$$\phi = \phi_2, \quad Z_2 \leq Z \leq Z_1, \quad R_2 \leq R \leq R_1, \quad \text{Επιφάνεια 5}$$

$$\phi = \phi_1, \quad Z_2 \leq Z \leq Z_1, \quad R_2 \leq R \leq R_1, \quad \text{Επιφάνεια 6}$$

Η πρώτη επιφάνεια στην σύγχρονη μηχανή είναι σε επαφή με το ατσάλι ενώ η δεύτερη η τρίτη και η τέταρτη επιφάνεια είναι σε επαφή με τον αέρα. Επειδή τόσο ο αέρας όσο και το ατσάλι έχουν πολύ μικρότερη σχετική μαγνητική διαπερατότητα ( $\mu_r = 1$ ) από αυτή του σιδηροπυρήνα η μαγνητική ροή θα είναι παράλληλη σε αυτές τις περιοχές. Οπότε αυτή θα είναι και η συνοριακή συνθήκη που πρέπει να τεθεί στις επιφάνειες αυτές.

Όπως έχει αναφερθεί, ο πρωταρχικός άγνωστος που θα υπολογιστεί από το πρόγραμμα για το τρισδιάστατο πρόβλημα είναι η τιμή του βαθμωτού μαγνητικού δυναμικού. Στην περίπτωση του φυσικού μοντέλου με ένα πόλο η συνοριακή συνθήκη που θα τεθεί στις επιφάνειες 5 και 6 είναι η τιμή του μαγνητικού βαθμωτού δυναμικού να είναι στην μία επιφάνεια ίση και αντίθετη με την τιμή του βαθμωτού δυναμικού στην άλλη. Αντιθέτως για το φυσικό μοντέλο των δύο πόλων η συνοριακή συνθήκη που τίθεται είναι η τιμή του μαγνητικού βαθμωτού δυναμικού να είναι ίση και στις δύο επιφάνειες.

Κατ' αναλογία με το τρισδιάστατο μοντέλο, το δισδιάστατο μοντέλο έχει πολική συμμετρία και εκτείνεται μεταξύ ενός ελάχιστου και μέγιστου ορίου της ακτίνας  $R$  και της γωνίας  $\phi$  και περιγράφεται από ανάλογες εξισώσεις. Το παραπάνω απεικονίζεται στην πιο κάτω εικόνα.



**Εικόνα 7.2-2**

Συνολική γεωμετρία του δισδιάστατου μοντέλου.

Η επιφάνεια που απεικονίζεται στην παραπάνω εικόνα μπορεί να οριστεί σαν τον γεωμετρικό τόπο των σημείων με συντεταγμένες  $(R, \phi)$  όπου:

$$R_2 \leq R \leq R_1, \quad R_1 > R_2 > 0$$

$$\phi_2 \leq \phi \leq \phi_1, \quad \phi_2 = -\phi_1 \neq 0$$

Η επιφάνεια αυτή έχει όρια τέσσερις γραμμές (δύο ευθείες και δύο καμπύλες) που μπορούν να περιγραφούν σαν τον γεωμετρικό τόπο των σημείων με συντεταγμένες  $(R, \phi)$  όπου:

$$R = R_2, \phi_2 \leq \phi \leq \phi_1, \text{ Γραμμή 1}$$

$$R = R_1, \phi_2 \leq \phi \leq \phi_1, \text{ Γραμμή 2}$$

$$\phi = \phi_2, R_2 \leq R \leq R_1, \text{ Γραμμή 3}$$

$$\phi = \phi_1, R_2 \leq R \leq R_1, \text{ Γραμμή 4}$$

Η πρώτη γραμμή στην σύγχρονη μηχανή είναι σε επαφή με το ατσάλι ενώ η δεύτερη είναι σε επαφή με τον αέρα. Επειδή τόσο ο αέρας όσο και το ατσάλι έχουν πολύ μικρότερη σχετική μαγνητική διαπερατότητα ( $\mu_r=1$ ) από αυτή του σιδηροπυρήνα η μαγνητική ροή θα είναι παράλληλη σε αυτές τις περιοχές. Οπότε αυτή θα είναι και η συνοριακή συνθήκη που πρέπει να τεθεί σε αυτές τις γραμμές.

Ο πρωταρχικός άγνωστος που θα υπολογιστεί από το πρόγραμμα στην περίπτωση του δισδιάστατου προβλήματος είναι η τιμή της κάθετης στο  $X$ - $Y$  (ή  $R$ - $\phi$ ) επίπεδο συνιστώσας του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού. Στην περίπτωση του φυσικού μοντέλου με ένα πόλο η συνοριακή συνθήκη που θα τεθεί στις γραμμές 3 και 4 είναι η τιμή του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού να είναι στην μία γραμμή ίση και αντίθετη με την τιμή του διανυσματικού δυναμικού στην άλλη. Αντιθέτως για το φυσικό μοντέλο των δύο πόλων η συνοριακή συνθήκη που τίθεται είναι η τιμή του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού να είναι ίση και στις δύο γραμμές.

### **7.3 Κατοπτρική περί το $X$ - $Z$ επίπεδο συμμετρία του πλέγματος.**

Στην κατασκευή του πλέγματος (6<sup>ο</sup> κεφάλαιο) καταβλήθηκε προσπάθεια για να είναι το πλέγμα κατοπτρικό ως προς το  $X$ - $Z$  επίπεδο. Αυτό πρέπει να ισχύει τόσο στο τρισδιάστατο μοντέλο όσο και στο δισδιάστατο. Απλώς στο δισδιάστατο φυσικό μοντέλο το πλέγμα πρέπει να είναι κατοπτρικό ως προς τον  $X$  άξονα. Το πλέγμα πρέπει να είναι κατοπτρικό ως προς το  $X$ - $Z$  επίπεδο προκειμένου να εφαρμοστούν σωστά οι συνοριακές συνθήκες στις επιφάνειες 5 και 6 του τρισδιάστατου μοντέλου και στις γραμμές 3 και 4 του δισδιάστατου μοντέλου. Εφόσον πρόκειται για φυσικά μοντέλα με ένα μόνο πόλο η συνοριακή συνθήκη που θα τεθεί είναι η τιμή του πρωταρχικού αγνώστου να είναι ίση και αντίθετη στην μία επιφάνεια, ή γραμμή, με την τιμή του αγνώστου στην άλλη επιφάνεια, ή γραμμή.

Κατά την πλεγματοποίηση του φυσικού μοντέλου δημιουργούνται από το πρόγραμμα τα στοιχεία τα οποία απαρτίζουν το μοντέλο. Πάνω σε μία γραμμή θα βρίσκονται οι ακμές διαφόρων στοιχείων (element edges) καθώς και οι κόμβοι (nodes) αυτών των ακμών. Κατ' αναλογία με τις γραμμές, πάνω σε μία επιφάνεια θα βρίσκονται οι έδρες των διαφόρων στοιχείων και οι κόμβοι αυτών. Οι κόμβοι αυτοί βρίσκονται σε συγκεκριμένη θέση και οι συντεταγμένες του κάθε κόμβου είναι  $(R, \phi, Z)$  σε σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων και  $(R, \phi)$  σε σύστημα πολικών συντεταγμένων. Όλοι οι κόμβοι που ανήκουν στην επιφάνεια 5 αποτελούν ένα σύνολο που περιγράφεται ως εξής.

$$A = \{(R, \phi_2, Z) / \mu\epsilon R_2 \leq R \leq R_1, Z_2 \leq Z \leq Z_1\}$$

Όλοι οι κόμβοι που ανήκουν στην επιφάνεια 6 αποτελούν ένα σύνολο που περιγράφεται παρακάτω.

$$B = \{(R, \phi_1, Z) / \mu\epsilon R_2 \leq R \leq R_1, Z_2 \leq Z \leq Z_1\}$$

Ας υποθεθεί επίσης η γενική περίπτωση που το πλέγμα στην επιφάνεια 6 είναι πιο πυκνό από αυτό στην επιφάνεια 5. Έστω επίσης το σύνολο  $\Gamma$  το οποίο αποτελείται από τους αντίστοιχους κατοπτρικούς κόμβους του συνόλου  $B$  με συντεταγμένες  $(R', \phi', Z')$ , αυτούς δηλαδή όπου:

$$R' = R, \phi' = -\phi_1 = \phi_2, Z' = Z$$

Όλοι αυτοί οι κόμβοι σχηματίζουν το σύνολο  $\Gamma$  που περιγράφεται ως εξής:

$$\Gamma = \{(R, \phi_2, Z) / \mu\epsilon R_2 \leq R \leq R_1, Z_2 \leq Z \leq Z_1\}$$

Τότε για να είναι το πλέγμα κατοπτρικό ως προς το  $X-Z$  επίπεδο πρέπει να είναι το σύνολο  $A$  γνήσιο υποσύνολο του  $\Gamma$ , δηλαδή:

$$A \subset \Gamma$$

Στην απλούστερη περίπτωση, που ισχύει για το πλέγμα των συγκεκριμένων φυσικών μοντέλων, όπου το πλέγμα στις δύο επιφάνειες είναι εξίσου πυκνό τότε τα δύο σύνολα  $A$  και  $\Gamma$  είναι ίσα.

Όλα τα παραπάνω έχουν την εξής απλή ερμηνεία. Προκειμένου να εφαρμοστούν σωστά οι αντιπεριοδικές συνθήκες πρέπει για κάθε κόμβο με συντεταγμένες  $(R, \phi, Z)$  στην μία επιφάνεια, να υπάρχει ένας άλλος κόμβος με συντεταγμένες  $(R' = R, \phi' = -\phi, Z' = Z)$  στην άλλη επιφάνεια. Δηλαδή για κάθε κόμβο που ανήκει στην μία επιφάνεια πρέπει να υπάρχει ένας κατοπτρικός ως προς το  $X-Z$  επίπεδο κόμβος στην άλλη επιφάνεια.

Ανάλογα ισχύουν και στην περίπτωση του δισδιάστατου μοντέλου. Όλοι οι κόμβοι που ανήκουν στην γραμμή 3 και έχουν συντεταγμένες έστω  $(R, \phi)$  αποτελούν ένα σύνολο που περιγράφεται ως εξής.

$$\Delta = \{(R, \phi_2) / \mu\epsilon R_2 \leq R \leq R_1\}$$

Όλοι οι κόμβοι που ανήκουν στην γραμμή 4 αποτελούν ένα άλλο σύνολο που περιγράφεται ως εξής.

$$E = \{(R, \phi_1) / \mu\epsilon R_2 \leq R \leq R_1\}$$

Έστω επίσης το σύνολο  $\Sigma\Gamma$  το οποίο αποτελείται από τους αντίστοιχους κατοπτρικούς κόμβους του συνόλου  $E$  με συντεταγμένες  $(R', \phi')$ , όπου:

$$R' = R, \phi' = -\phi_1 = \phi_2$$



Όλοι αυτοί οι κόμβοι σχηματίζουν το σύνολο ΣΤ που περιγράφεται ως εξής:

$$\Sigma T = \{(R, \phi_2) / \mu \varepsilon R_2 \leq R \leq R_1\}$$

Στην περίπτωση που το πλέγμα θα είναι εξίσου πυκνό στις δύο γραμμές (3 και 4) τότε θα πρέπει τα σύνολα Δ και ΣΤ να είναι ίσα προκειμένου να εφαρμοστούν σωστά οι αντιπεριοδικές συνθήκες.

#### **7.4 Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών στο τρισδιάστατο μοντέλο.**

Για τα τρισδιάστατα προβλήματα οι εξ' ορισμού συνοριακές συνθήκες που τίθενται από το πρόγραμμα εξομοίωσης είναι η ροή να είναι παράλληλη προς τις επιφάνειες που αποτελούν τα όρια του τρισδιάστατου μοντέλου. Έτσι για τις επιφάνειες 1, 2, 3 και 4 δεν χρειάζεται να τεθούν συνοριακές συνθήκες. Αντιθέτως για τις επιφάνειες 5 και 6 πρέπει να τεθούν από τον χρήστη του προγράμματος οι συνοριακές συνθήκες. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η συνοριακή συνθήκη που πρέπει να τεθεί στις επιφάνειες 5, 6 είναι η τιμή του μαγνητικού βαθμωτού δυναμικού στην μία επιφάνεια να είναι ίση και αντίθετη με αυτή της άλλης επιφάνειας. Η τιμή του μαγνητικού βαθμωτού δυναμικού είναι ο πρωταρχικός άγνωστος που αποδίδεται στους κόμβους των στοιχείων που αποτελούν το πλέγμα. Έτσι η παραπάνω συνοριακή συνθήκη μπορεί να τεθεί μέσω περιοριστικών εξισώσεων στους κόμβους που βρίσκονται πάνω στις επιφάνειες 5 και 6.

Για να εισάγουμε μία περιοριστική εξίσωση στο ANSYS ακολουθούμε την παρακάτω πορεία.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Coupling / Eqn.
- Επιλέγουμε Constraint Eqn.
- Από το παράθυρο που θα προκύψει, θέτουμε στο πεδίο NEQN Equation reference no. τον αριθμό της εξίσωσης ο οποίος πρέπει να είναι μοναδικός για κάθε περιοριστική εξίσωση. Στα πεδία NODE1 και NODE2 node number θέτουμε τους αριθμούς των κόμβων που πρέπει να έχουν τιμή βαθμωτού δυναμικού ίση και αντίθετη. Στα πεδία Lab1 και Lab2 Degree of freedom επιλέγουμε τον βαθμό ελευθερίας δηλαδή τον πρωταρχικό άγνωστο που στην περίπτωση της τρισδιάστατης MSP ανάλυσης είναι η τιμή του μαγνητικού βαθμωτού δυναμικού (MAG). Στα πεδία C1 και C2 Coefficient θέτουμε την τιμή 1. Τέλος στο πεδίο CONST Constant term θέτουμε την τιμή 0.

Η περιοριστική εξίσωση έχει την παρακάτω γενική μορφή:

$$CONST = C1 \cdot Lab1(NODE1) + C2 \cdot Lab2(NODE2)$$

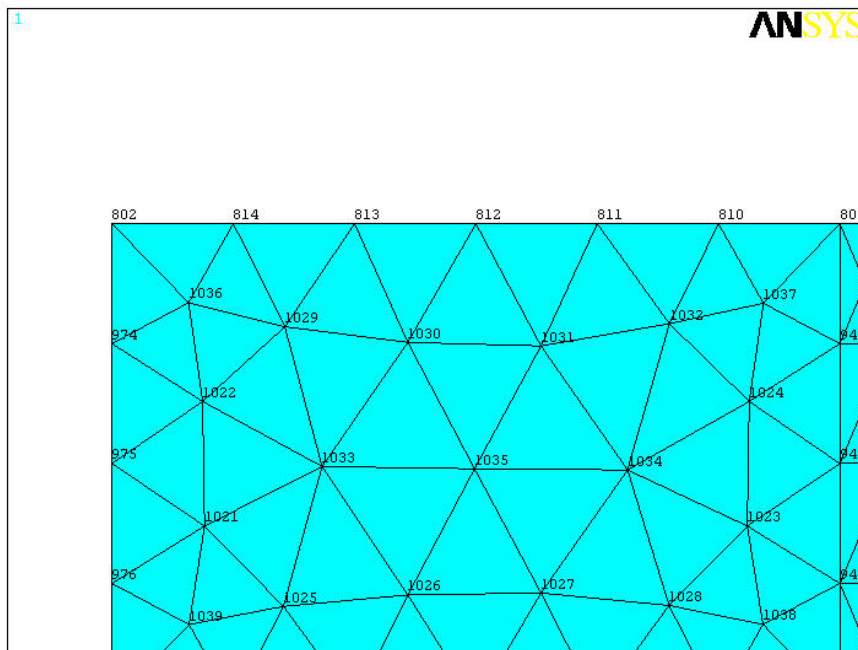
Με τις προηγούμενες ρυθμίσεις η παραπάνω περιοριστική εξίσωση παίρνει την πιο κάτω μορφή:

$$0 = 1 \cdot MAG(NODE1) + 1 \cdot MAG(NODE2) \Rightarrow MAG(NODE1) = -MAG(NODE2)$$

Δηλαδή η τιμή του μαγνητικού βαθμωτού δυναμικού στον έναν κόμβο είναι ίση και αντίθετη με την τιμή του βαθμωτού δυναμικού στον άλλο κόμβο.

Η εισαγωγή των περιοριστικών εξισώσεων στο τρισδιάστατο μοντέλο παρατίθεται παρακάτω. Στην εικόνα της επόμενης σελίδας (εικόνα 7.4-1) φαίνεται ένα τμήμα της

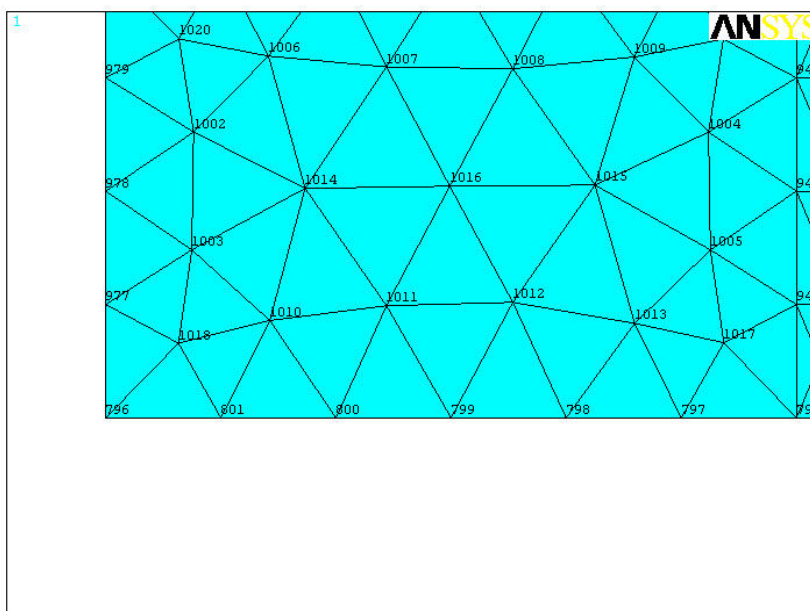
επιφάνειας 5. Επίσης φαίνονται οι αριθμημένοι κόμβοι που βρίσκονται πάνω στο συγκεκριμένο τμήμα της επιφάνειας 5 (το ANSYS αποδίδει έναν αριθμό σε κάθε κόμβο αλλά και σε κάθε στοιχείο).



**Εικόνα 7.4-1**

Τμήμα της επιφάνειας 5 του τρισδιάστατου μοντέλου καθώς και τους κόμβους που υπάρχουν πάνω σε αυτή.

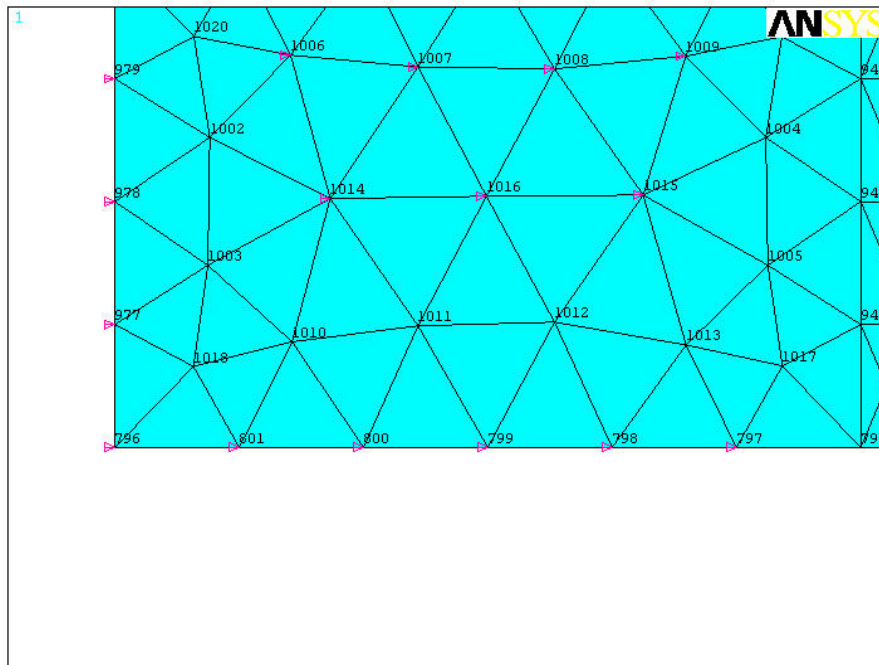
Περιστρέφοντας το τρισδιάστατο μοντέλο περί τον X άξονα κατά  $180^\circ$  προκύπτει το κατοπτρικό της επιφάνειας 5 τμήμα που απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.



**Εικόνα 7.4-2**

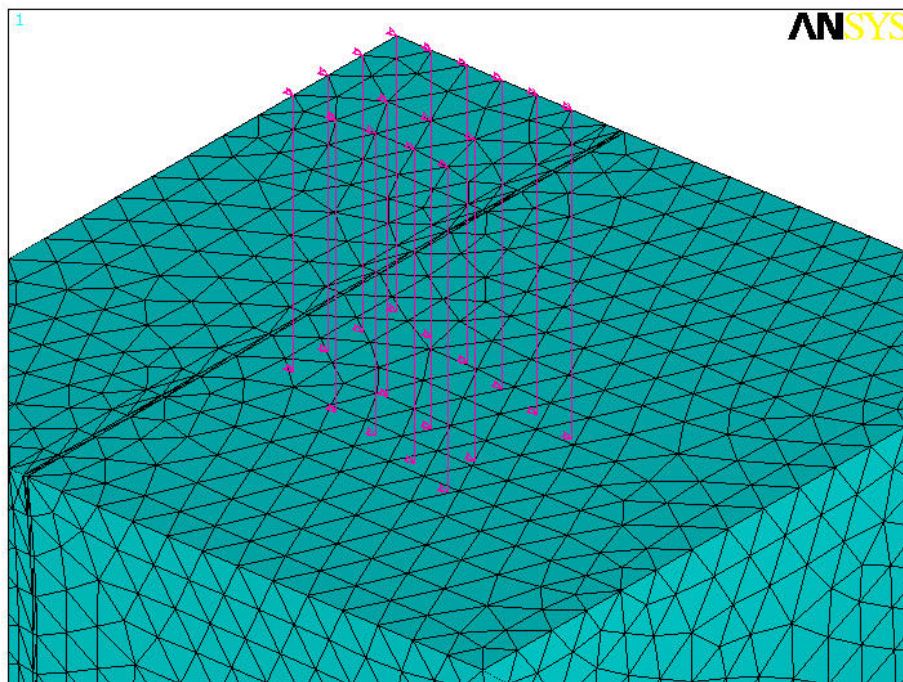
Τμήμα της επιφάνειας 6 του τρισδιάστατου μοντέλου το οποίο είναι το κατοπτρικό ως προς το X-Z επίπεδο του τμήματος που φαίνεται στην εικόνα 5.4-1.

Οι κόμβοι 802, 814, 813, 812, 811, 810, βρίσκονται στην επιφάνεια 5 (εικόνα 7.4-1). Οι αντίστοιχοι κατοπτρικοί κόμβοι στην επιφάνεια 6 (εικόνα 7.4-2) είναι οι 796, 801, 800, 799, 798, 797. Από αυτά τα έξι ζεύγη κόμβων προκύπτουν και οι αντίστοιχες έξι περιοριστικές εξισώσεις. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται μερικές αντιπεριοδικές συνθήκες



**Εικόνα 7.4-3**

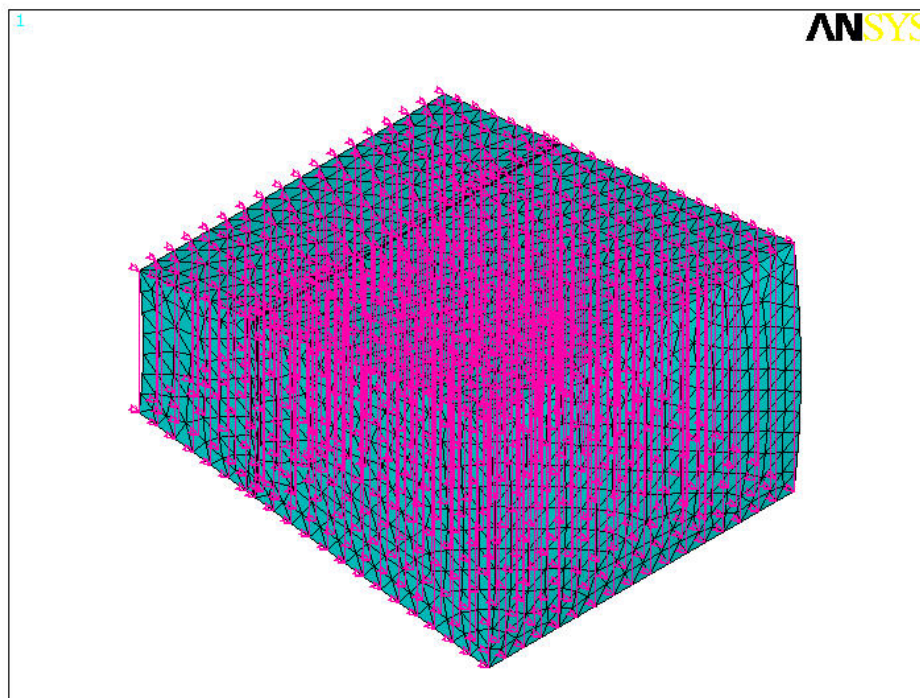
Περιοριστικές εξισώσεις που έχουν εισαχθεί για μερικά ζεύγη κόμβων.



**Εικόνα 7.4-4**

Περιοριστικές εξισώσεις στις τρεις διαστάσεις.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται όλες οι αντιπεριοδικές συνθήκες του τρισδιάστατου μοντέλου της σύγχρονης μηχανής με μαγνήτες με κλίση. Είναι συνολικά 427 περιοριστικές εξισώσεις. Για το αντίστοιχο μοντέλο με μαγνήτες χωρίς κλίση οι περιοριστικές εξισώσεις είναι 442. Οι διαφορές αυτές στον αριθμό των εφαρμοζόμενων περιοριστικών εξισώσεων οφείλονται σε μικρές διαφορές στο πλέγμα των δύο μοντέλων.



**Εικόνα 7.4-5**

Απεικονίζεται το σύνολο των αντιπεριοδικών συνθηκών του τρισδιάστατου μοντέλου με κεκλιμένους μαγνήτες.

### **7.5 Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών στο δισδιάστατο μοντέλο.**

Στην περίπτωση του δισδιάστατου μοντέλου, οι συνοριακές συνθήκες που τίθενται στις γραμμές 1 και 2 είναι η μαγνητική ροή να είναι παράλληλη προς αυτές τις γραμμές. Για να εισάγουμε την παραπάνω συνοριακή συνθήκη στο ANSYS ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Loads.
- Επιλέγουμε Loads και Apply.
- Στην συνέχεια επιλέγουμε Magnetic και Boundary.
- Επιλέγουμε Flux Par' 1 και On Lines.
- Από το παράθυρο που προκύπτει επιλέγουμε με το mouse τις γραμμές 1 και 2 και τέλος επιλέγουμε OK.

Η συνοριακή συνθήκη που πρέπει να τεθεί στις γραμμές 3 και 4, είναι η τιμή της κάθετης στο X-Y επίπεδο συνιστώσας του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού να είναι ίση και αντίθετη στην μία γραμμή με αυτή της άλλης γραμμής. Αυτή η συνοριακή συνθήκη μπορεί να τεθεί πάλι μέσω περιοριστικών εξισώσεων όπως στην περίπτωση του τρισδιάστατου μοντέλου. Απλώς τώρα αλλάζει ο βαθμός ελευθερίας των κόμβων.

Για να εισάγουμε μία περιοριστική εξίσωση στο δισδιάστατο μοντέλο ακολουθούμε την παρακάτω πορεία.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Coupling / Ceqn.
- Επιλέγουμε Constraint Eqn.
- Από το παράθυρο που θα προκύψει, θέτουμε στο πεδίο NEQN Equation reference no. τον αριθμό της εξίσωσης ο οποίος πρέπει να είναι μοναδικός για κάθε περιοριστική εξίσωση. Στα πεδία NODE1 και NODE2 node number θέτουμε τους αριθμούς των κόμβων που πρέπει να έχουν τιμή της κάθετης στο X-Y επίπεδο συνιστώσας του διανυσματικού δυναμικού ίση και αντίθετη. Στα πεδία Lab1 και Lab2 Degree of freedom επιλέγουμε τον βαθμό ελευθερίας δηλαδή τον πρωταρχικό άγνωστο που στην περίπτωση της δισδιάστατης MVP ανάλυσης είναι η τιμή της κάθετης στο X-Y επίπεδο συνιστώσας του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού (AZ). Στα πεδία C1 και C2 Coefficient θέτουμε την τιμή 1. Τέλος στο πεδίο CONST Constant term θέτουμε την τιμή 0.

Η περιοριστική εξίσωση έχει την παρακάτω γενική μορφή:

$$CONST = C1 \cdot Lab1(NODE1) + C2 \cdot Lab2(NODE2)$$

Με τις παραπάνω ρυθμίσεις η παραπάνω περιοριστική εξίσωση παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$0 = 1 \cdot AZ(NODE1) + 1 \cdot AZ(NODE2) \Rightarrow AZ(NODE1) = -AZ(NODE2)$$

Δηλαδή η τιμή της κάθετης στο X-Y επίπεδο συνιστώσας του διανυσματικού δυναμικού στον έναν κόμβο είναι ίση και αντίθετη με αυτήν στον άλλο κόμβο.

Υπάρχει και άλλος τρόπος εισαγωγής των αντιπεριοδικών συνθηκών, ο οποίος είναι πιο σύντομος και πιο εύκολος, και στηρίζεται στο ότι το δισδιάστατο μοντέλο έχει πολική συμμετρία και εκτείνεται μεταξύ ενός ελάχιστου και μέγιστου ορίου της ακτίνας R και της γωνίας φ, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 7.2. Για το δισδιάστατο φυσικό μοντέλο του δοκιμίου της σύγχρονης 24-πολικής μηχανής μονίμων μαγνητών το μέγιστο και το ελάχιστο όριο της ακτίνας R και της γωνίας φ είναι (τα παρακάτω ισχύουν φυσικά και στο τρισδιάστατο μοντέλο):

$$R_2 \leq R \leq R_1, \quad R_2 = 0,1m \quad R_1 = 0,175m$$

$$\phi_2 \leq \phi \leq \phi_1, \quad \phi_2 = -7,5^\circ \quad \phi_1 = 7,5^\circ$$

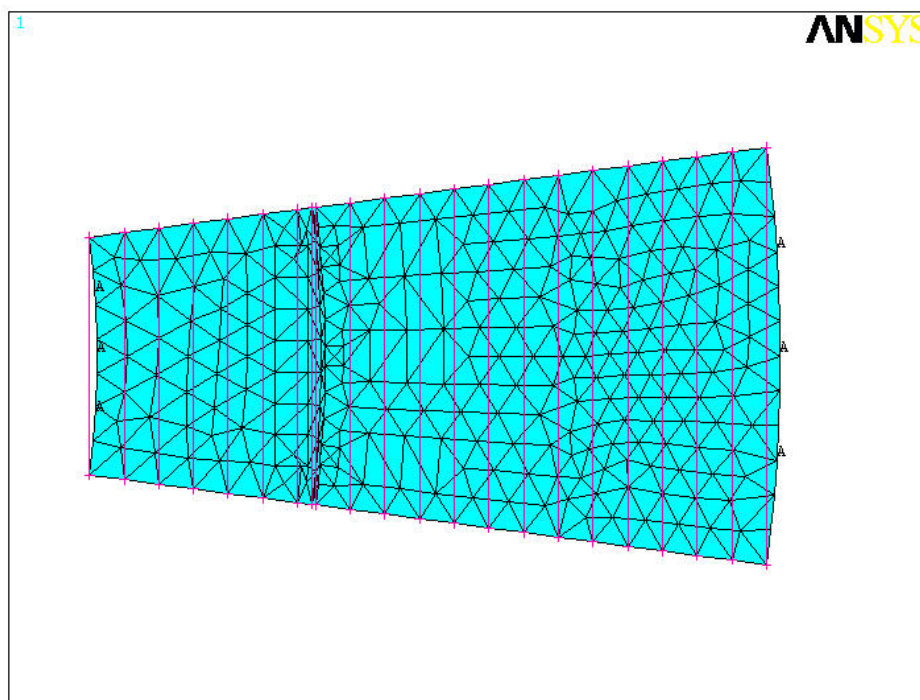
Για να εισάγουμε στο δισδιάστατο μοντέλο, τις αντιπεριοδικές συνθήκες με τον παραπάνω τρόπο ακολουθούμε την πιο κάτω διαδικασία.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Loads.
- Επιλέγουμε Loads και Apply.
- Στην συνέχεια επιλέγουμε Magnetic και Boundary.
- Επιλέγουμε Periodic BCs.
- Από το παράθυρο που προκύπτει θέτουμε στο πεδίο PLNOPT Symmetry plane option την επιλογή Circumferential και τέλος επιλέγουμε OK.



- Από το παράθυρο που προκύπτει θέτουμε στα πεδία LOC1, LOC2 node pair angle το μέγιστο και το ελάχιστο όριο της γωνίας  $\varphi$ . Στα πεδία R1, R2 Radius of node θέτουμε το μέγιστο και το ελάχιστο όριο της ακτίνας R. Τέλος στο πεδίο OPT Periodic option θέτουμε Odd symmetry.

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται όλες οι συνοριακές συνθήκες για το δισδιάστατο φυσικό μοντέλο. Είναι συνολικά 22 αντιπεριοδικές συνθήκες και οι συνοριακές συνθήκες (παράλληλη προς γραμμές ροή) στις γραμμές 1 και 2 του μοντέλου.



**Εικόνα 7.5-1**

Συνοριακές συνθήκες του δισδιάστατου μοντέλου.

## **7.6 Εφαρμογή φορτίων στο δισδιάστατο μοντέλο.**

Για την υπό φορτίο μελέτη της σύγχρονης μηχανής πρέπει να εφαρμοστούν επιφανειακά φορτία (body loads) στις περιοχές του δισδιάστατου φυσικού μοντέλου που βρίσκονται μεταξύ των οδοντώσεων του στάτη. Αυτές οι περιοχές, στην υπό φορτίο μελέτη, αντιστοιχούν στον χαλκό του τυλίγματος του στάτη και έχουν σχετική μαγνητική διαπερατότητα ίση με αυτή του αέρα, δηλαδή  $\mu_r=1$ . Τα επιφανειακά αυτά φορτία είναι η χωρική πυκνότητα ρεύματος. Η χωρική πυκνότητα ρεύματος στην περίπτωση του δισδιάστατου μοντέλου είναι κάθετη στο X-Y επίπεδο δηλαδή είναι παράλληλη στον άξονα Z οπότε και θα δίνεται από την σχέση:

$$\vec{J} = J \cdot \vec{i}_z$$

Παρακάτω παρατίθενται τα χαρακτηριστικά, καθώς και κάποιοι υπολογισμοί βασικών μεγεθών της σύγχρονης μηχανής. Βάσει των μεγεθών αυτών είναι δυνατή η σχεδίαση του τυλίγματος του στάτη της σύγχρονης 24-πολικής μηχανής καθώς και η εύρεση της χωρικής πυκνότητας ρεύματος.

- Το τύλιγμα της μηχανής είναι κυματοειδές τύλιγμα μονής στρώσης και πλήρους βήματος.
- Η σύγχρονη μηχανή είναι τριφασική, συνεπώς ο αριθμός των φάσεων είναι  $m = 3$ .
- Ο αριθμός των πόλων της σύγχρονης μηχανής είναι  $P = 24$ , συνεπώς το πλήθος των ζευγών των πόλων είναι  $P = P / 2 \Rightarrow P = 12$ .
- Ο αριθμός των αυλακών του στάτη είναι  $Q = 72$ .
- Ο αριθμός των στρωμάτων του τυλίγματος σε κάθε αύλακα του στάτη είναι  $\sigma = 1$ , δηλαδή ένα στρώμα ανά αύλακα.
- Ο αριθμός των αυλακών, ανά πόλο και ανά φάση, υπολογίζεται από την κάτωθι σχέση:

$$q = \frac{Q}{m \cdot P} = \frac{72}{3 \cdot 24} \Rightarrow q = 1$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η σύγχρονη μηχανή στον στάτη της, έχει μία αύλακα ανά πόλο και ανά φάση, δηλαδή  $q = 1$ . Αυτός είναι και ο αριθμός των ατομικών πηνίων ανά ομάδα, δηλαδή η συγκεκριμένη σύγχρονη μηχανή έχει  $q = 1$  πηνίο ανά ομάδα.

- Ο αριθμός των παράλληλων κλάδων είναι  $\alpha = 1$ .
- Το τύλιγμα του στάτη έχει πηνία με  $N_c = 100$  σπείρες (100 ελίγματα) ανά αύλακα και ανά στρώση.
- Εφόσον το τύλιγμα είναι μονού στρώματος, δηλαδή  $\sigma = 1$ , ο συνολικός αριθμός των ομάδων πηνίων του τυλίγματος είναι:

$$\text{Αριθμός ομάδων πηνίων} = (m \cdot P) / 2 = m \cdot P = 3 \cdot 12 = 36 \text{ ομάδες πηνίων.}$$

Επομένως ο αριθμός των ομάδων πηνίων ανά φάση θα είναι 12, και ο αριθμός των πηνίων ανά φάση θα είναι πάλι 12 εφόσον έχουμε ένα πηνίο σε κάθε ομάδα πηνίων.

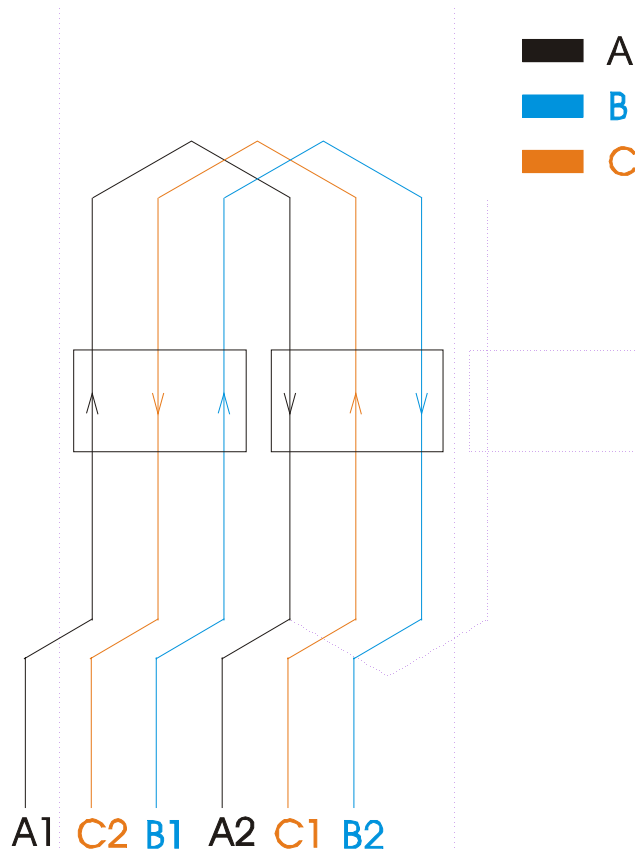
- Στο τύλιγμα της μηχανής, κυματοτύλιγμα μονής στρώσεως, όλες οι ομάδες πηνίων ανά φάση συνδέονται μεταξύ τους εν σειρά. Οπότε, εφόσον έχουμε 12 πηνία ανά φάση και το κάθε πηνίο έχει 100 ελίγματα, ο συνολικός αριθμός των εν σειρά ελιγμάτων ανά φάση είναι:

$$N_s = 12 \cdot N_c = 12 \cdot 100 \Rightarrow N_s = 1200$$

- Το ονομαστικό ρεύμα της μηχανής είναι  $I_{ov} = 4,73A$  και η τιμή κορυφής αυτού είναι  $I_{ov-p} = 6,7A$
- Η μηχανή έχει ονομαστική ισχύς  $2,5kW$ , και ονομαστική φασική τάση  $220V$ .
- Ο στάτης είναι συνδεδεμένος σε αστέρα, οπότε η πολική τάση θα είναι  $380V$  και η φασική τάση  $220V$ . Το πολικό και το φασικό ονομαστικό ρεύμα θα είναι  $4,73A$ .
- Η ηλεκτρική γωνία,  $\gamma$ , μεταξύ δύο διαδοχικών αυλακών δίνεται από την κάτωθι σχέση (σε ηλεκτρικές μοίρες):

$$\gamma = \frac{180^\circ}{\text{3αυλάκια / πόλο}} = 60^\circ$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι δυνατή η σχεδίαση του κυματοειδούς, μονής στρώσεως, πλήρους βήματος τυλίγματος, το οποίο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 7.6-1**

Κυματοειδές τύλιγμα μονής στρώσης πλήρους βήματος, του στάτη της σύγχρονης 24-πολικής μηχανής, [12].

Η ένταση του ρεύματος και η χωρική πυκνότητα ρεύματος συνδέονται με την παρακάτω σχέση:

$$I = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S}, \quad d\vec{S} = \vec{i}_z \cdot dS$$

Αν θεωρηθεί ότι η χωρική πυκνότητα ρεύματος είναι σταθερή τότε η παραπάνω σχέση απλοποιείται ως εξής:

$$I = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = \iint_S J \cdot \vec{i}_z \cdot \vec{i}_z \cdot dS = \iint_S J \cdot dS = J \cdot \iint_S dS = J \cdot S \Leftrightarrow I = J \cdot S$$

Όπου S είναι το εμβαδόν της αύλακας, της περιοχής που βρίσκεται μεταξύ δύο οδοντώσεων του στάτη, και I είναι ίσο με το άθροισμα των ρευμάτων που ρέει στους ρευματοφόρους αγωγούς που περικλείονται από την γραμμή που αποτελεί το όριο της παραπάνω επιφάνειας. Σε κάθε αύλακα του στάτη υπάρχει η πλευρά ενός πηνίου οπότε το συνολικό ρεύμα ανά αύλακα είναι:

$$I = I_{ov-\rho} \cdot N_c \Rightarrow I = \sqrt{2} \cdot I_{ov} \cdot N_c$$



Το εμβαδόν μίας αύλακας, δηλαδή της περιοχής μεταξύ δύο διαδοχικών οδοντώσεων του στάτη, μπορεί να βρεθεί ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Mesh Tool.
- Από το παράθυρο που προκύπτει επιλέγουμε Element Attributes και Areas και τέλος επιλέγουμε Set.
- Από το επόμενο παράθυρο που προκύπτει επιλέγουμε με το mouse μία από τις τρεις περιοχές που βρίσκονται μεταξύ των οδοντώσεων του στάτη και επιλέγουμε OK.
- Από το παράθυρο που προκύπτει επιλέγουμε την κατάλληλη ιδιότητα υλικού στο πεδίο MAT Material number, δηλαδή το υλικό που έχει οριστεί με σχετική μαγνητική διαπερατότητα ίση με την μονάδα και τέλος επιλέγουμε OK.
- Αφού κλείσει το παραπάνω παράθυρο, από το Mesh Tool επιλέγουμε Size Controls και Global και από το παράθυρο που εμφανίζεται θέτουμε στο πεδίο SIZE Element edge length την τιμή 0,004.
- Πάλι από το Mesh Tool επιλέγουμε διαδοχικά Mesh και Areas, Shape και Tri, Free και τέλος Mesh. Σε αυτό το στάδιο γίνεται δηλαδή η πλεγματοποίηση της περιοχής της αύλακας.

Κατόπιν προχωρούμε στην λύση, η οποία αφορά μόνο την παραπάνω περιοχή.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Solution.
- Μετά επιλέγουμε Electromagnet.
- Επιλέγουμε Static Analysis και Opt&Solv.
- Από το παράθυρο που εμφανίζεται απλώς επιλέγουμε OK για να ξεκινήσει η λύση.

Σε αυτό το στάδιο έχει ολοκληρωθεί και η λύση και προχωρούμε στην εύρεση του εμβαδού της συγκεκριμένης περιοχής.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε General Postproc.
- Επιλέγουμε List Results.
- Στην συνέχεια επιλέγουμε Element Solution.
- Από το παράθυρο που προκύπτει επιλέγουμε Geometry και Elem volume VOLU.

Με τον παραπάνω τρόπο προκύπτει ένας πίνακας με πλήθος γραμμών ίσο με τον αριθμό των στοιχείων που αποτελούν την περιοχή και με δύο στήλες. Η πρώτη στήλη αντιστοιχεί στον αριθμό του κάθε στοιχείου ενώ η δεύτερη στο εμβαδόν του στοιχείου. Γνωρίζοντας έτσι το εμβαδόν του κάθε στοιχείου της περιοχής μπορούμε να βρούμε το συνολικό εμβαδόν της μίας αύλακας το οποίο είναι ίσο με το άθροισμα των εμβαδών όλων των στοιχείων. Σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία βρίσκεται ότι το εμβαδόν της κάθε αύλακας είναι ίσο με  $S = 1,55 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ .

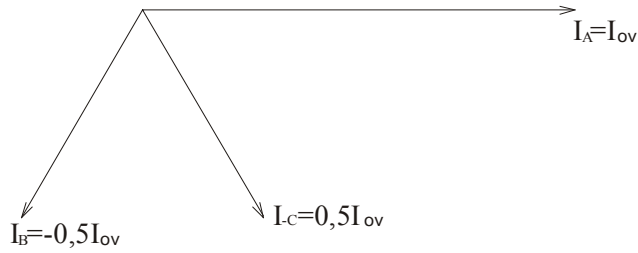
Στην περίπτωση που ο κινητήρας λειτουργεί υπό πλήρες φορτίο (δηλαδή για ενεργό τιμή ρεύματος 4,73A) και για  $\omega t = 90^\circ$ , τα ρεύματα των τριών φάσεων θα είναι αντίστοιχα:

$$I_A = I_{ov} \cdot \sin(\omega \cdot t) = I_{ov} \cdot \sin(90^\circ) = I_{ov}$$

$$I_{-C} = -I_C = -I_{ov} \cdot \sin(\omega \cdot t + 120^\circ) = -I_{ov} \cdot \sin(90^\circ + 120^\circ) = -I_{ov} \sin(210^\circ) = 0,5 \cdot I_{ov}$$

$$I_B = I_{ov} \cdot \sin(\omega \cdot t + 240^\circ) = I_{ov} \cdot \sin(90^\circ + 240^\circ) = I_{ov} \cdot \sin(330^\circ) = -0,5 \cdot I_{ov}$$

Τα παραπάνω φαίνονται στο διανυσματικό διάγραμμα της επόμενης σελίδας.

**Σχήμα 7.6-2**

Διανυσματικό διάγραμμα των ρευμάτων των φάσεων A, -C και B για  $\omega t = 90^\circ$ .

Οπότε για πλήρες φορτίο και την χρονική στιγμή  $\omega t = 90^\circ$  το ρεύμα στην φάση A θα είναι ίσο με το ονομαστικό ( $I_A = 4,73A$ ), το ρεύμα στην φάση -C θα είναι το μισό του ονομαστικού ( $I_C = 2,365A$ ) και τέλος στην φάση B το ρεύμα θα είναι πάλι το μισό και αρνητικό ( $I_B = -2,365A$ ).

Από την εικόνα 6.5.2-3 του 6<sup>ου</sup> κεφαλαίου και επιλέγοντας αριστερόστροφη φορά (από κάτω προς τα πάνω) στην πρώτη αύλακα θα εφαρμοστεί η χωρική πυκνότητα ρεύματος για την φάση A ενώ στην δεύτερη και στην τρίτη αύλακα θα εφαρμοστεί η χωρική πυκνότητα ρεύματος για την φάση -C και B αντίστοιχα. Η τιμή της χωρικής πυκνότητας ρεύματος για τις φάσεις A, -C και B αντίστοιχα είναι:

$$I = J_A \cdot S \Rightarrow \sqrt{2} \cdot I_A \cdot N_c = J_A \cdot S \Rightarrow J_A = \frac{\sqrt{2} \cdot I_A \cdot N_c}{S} \Rightarrow J_A = \frac{\sqrt{2} \cdot 4,73A \cdot 100}{1,55 \cdot 10^{-4} m^2} = 4.322.580 \frac{A}{m^2}$$

$$I = J_{-C} \cdot S \Rightarrow \sqrt{2} \cdot I_{-C} \cdot N_c = J_{-C} \cdot S \Rightarrow J_{-C} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{-C} \cdot N_c}{S} \Rightarrow$$

$$J_{-C} = \frac{\sqrt{2} \cdot 2,365A \cdot 100}{1,55 \cdot 10^{-4} m^2} = 2.161.290 \frac{A}{m^2}$$

$$I = J_B \cdot S \Rightarrow \sqrt{2} \cdot I_B \cdot N_c = J_B \cdot S \Rightarrow J_B = \frac{\sqrt{2} \cdot I_B \cdot N_c}{S} \Rightarrow J_B = -\frac{\sqrt{2} \cdot 2,365A \cdot 100}{1,55 \cdot 10^{-4} m^2} = -2.161.290 \frac{A}{m^2}$$

Η εφαρμογή της χωρική πυκνότητας ρεύματος γίνεται ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Preprocessor.
- Μετά επιλέγουμε Loads.
- Επιλέγουμε Loads και Apply.
- Επιλέγουμε Excitation.
- Επιλέγουμε Curr Density και On Areas.
- Από το παράθυρο που προκύπτει επιλέγουμε με το mouse την περιοχή στην οποία θα εφαρμοστεί η πυκνότητα ρεύματος και επιλέγουμε OK.
- Τέλος στο παράθυρο που προκύπτει θέτουμε στο πεδίο VAL3 Curr density value (JSZ) την τιμή της χωρικής πυκνότητας ρεύματος.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΛΥΣΗ ΤΟΥ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ  
ΚΑΙ ΤΟΥ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ



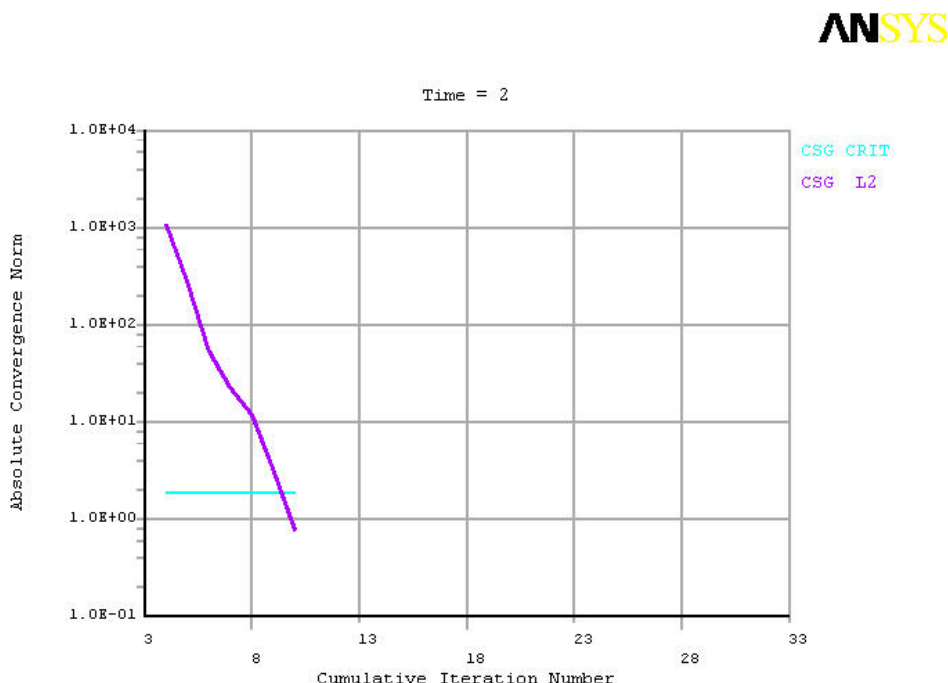
## 8.1 Εισαγωγή.

Μετά την ολοκλήρωση της σχεδίασης και της πλεγματοποίησης του φυσικού μοντέλου καθώς και την εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών και των φορτίων ακολουθεί η επίλυση του προβλήματος. Αρχικά θα γίνει η λύση για το δισδιάστατο πρόβλημα για την εν κενώ και την υπό φορτίο λειτουργία καθώς και για την περίπτωση που δεν είναι παρούσα η διέγερση. Επίσης θα γίνει η λύση για την εν κενώ λειτουργία του πλήρους δισδιάστατου φυσικού μοντέλου. Τέλος θα γίνει η λύση για την εν κενώ λειτουργία του τρισδιάστατου φυσικού μοντέλου με μαγνήτες χωρίς κλίση αλλά και του αντίστοιχου με κεκλιμένους μαγνήτες.

## 8.2 Λύση του δισδιάστατου φυσικού μοντέλου.

Η επίλυση του δισδιάστατου προβλήματος θα γίνει με την μέθοδο ανάλυσης του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού (Magnetic Vector Potential analysis MVP). Όπως εξηγήθηκε στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο, η επιλογή της μεθόδου αυτής έγινε με την κατάλληλη επιλογή του τύπου του στοιχείου από το οποίο αποτελείται το πλέγμα του δισδιάστατου φυσικού μοντέλου. Η λύση για το δισδιάστατο πρόβλημα γίνεται ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Solution.
  - Μετά επιλέγουμε Electromagnet.
  - Επιλέγουμε Static Analysis και Opt&Solv.
  - Από το παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε OK. Δεν γίνονται αλλαγές στις εξ' ορισμού ρυθμίσεις του συγκεκριμένου dialog box.
- Όταν ολοκληρωθεί η λύση προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα.



**Γράφημα 8.2-1**

Απόλυτη σύγκλιση των τύπων L1 και L2 συναρτήσει του αριθμού των επαναλήψεων για την εν κενώ λειτουργία του δισδιάστατου μοντέλου.

Το διάγραμμα της προηγούμενης σελίδας απεικονίζει την απόλυτη σύγκλιση δύο τύπων, των L1 και L2, συναρτήσει του αριθμού των επαναλήψεων. Το ANSYS παρέχει συνολικά τρεις διαφορετικούς διανυσματικούς τύπους για τον έλεγχο της σύγκλισης της λύσης. Ο L1 τύπος συγκρίνει το κριτήριο σύγκλισης με το άθροισμα των απόλυτων τιμών της δυσαναλογίας των μαγνητικών ρευμάτων (magnetic current segments CSG) για όλους τους βαθμούς ελευθερίας. Ο L2 τύπος πραγματοποιεί τον έλεγχο σύγκλισης χρησιμοποιώντας την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των δυσαναλογιών των μαγνητικών ρευμάτων.

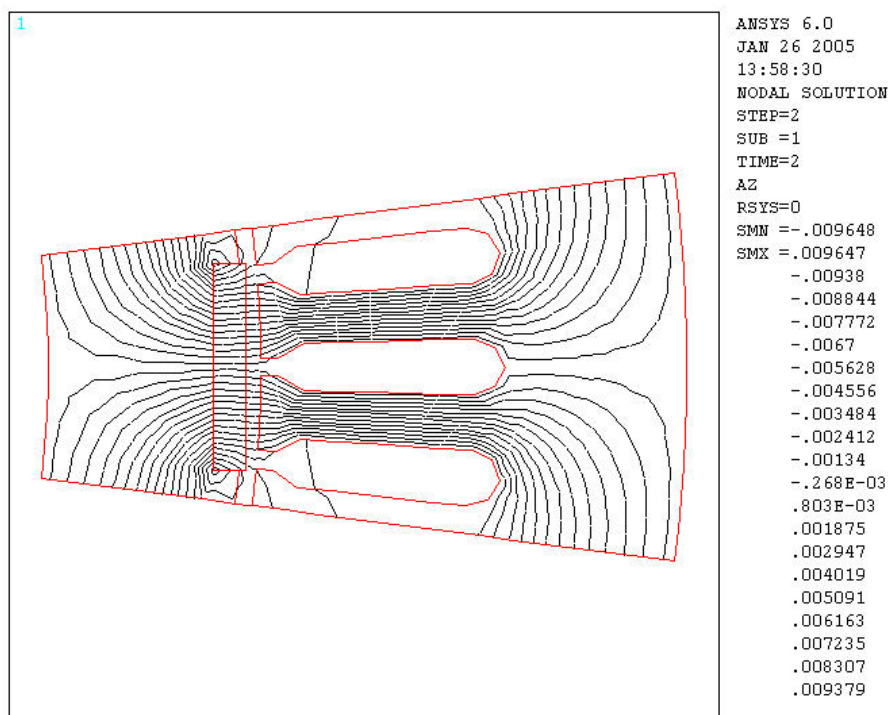
### **8.2.1 Λύση του δισδιάστατου μοντέλου στην εν κενώ λειτουργία.**

Στην εν κενώ λειτουργία είναι παρούσα μόνο η διέγερση, δηλαδή το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της σύγχρονης μηχανής παράγεται μόνο από τον μόνιμο μαγνήτη. Στο συγκεκριμένο μοντέλο συνεπώς δεν έχουν εφαρμοστεί χωρικές πυκνότητες ρεύματος στις περιοχές μεταξύ των οδοντώσεων του στάτη.

Αφού ολοκληρωθεί η λύση από το πρόγραμμα μπορούμε μέσω του γενικού μετεπεξεργαστή (General Postprocessor) του ANSYS να απεικονίσουμε γραφικά την λύση. Αυτό γίνεται ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε General Postproc.
- Μετά επιλέγουμε Plot Results.
- Επιλέγοντας Contour Plot και 2D Flux Lines είναι δυνατή η απεικόνιση των ισοδυναμικών γραμμών του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό της σύγχρονης μηχανής.

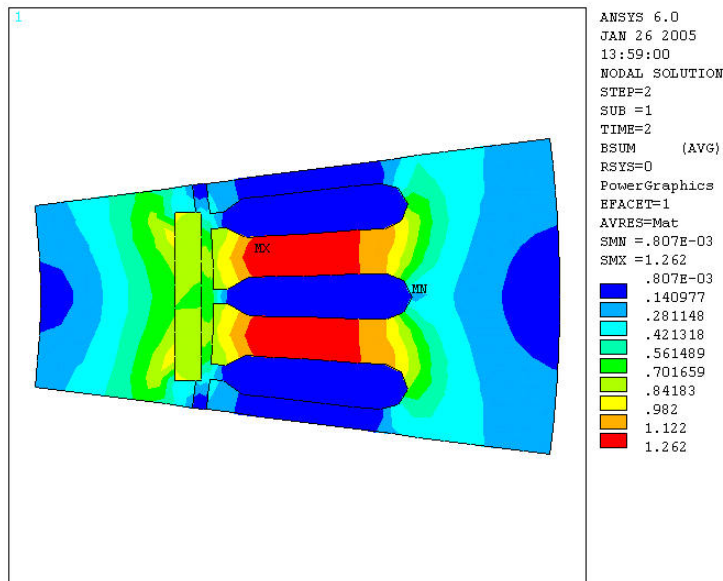
Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται οι δυναμικές γραμμές της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό της σύγχρονης μηχανής. Απεικονίζονται συνολικά 40 δυναμικές γραμμές η κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχεί σε μία σταθερή τιμή της κάθετης στο X-Y επίπεδο συνιστώσας του διανυσματικού δυναμικού AZ.



**Εικόνα 8.2.1-1**

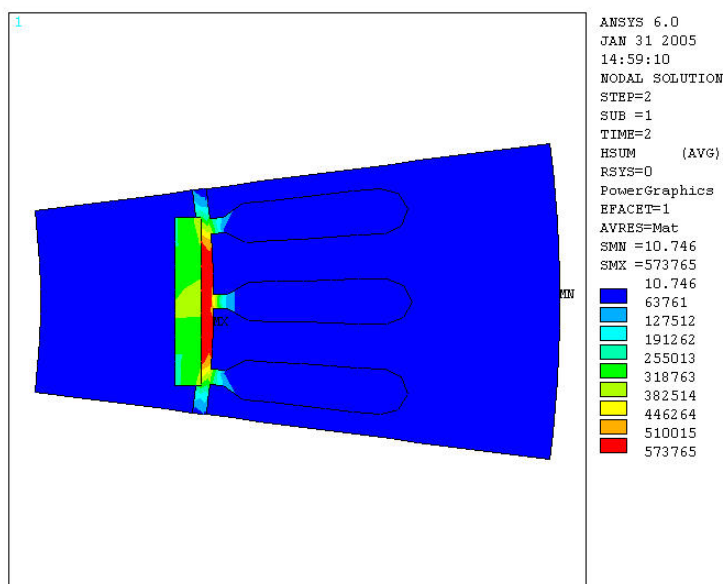
Δυναμικές γραμμές του διανυσματικού δυναμικού στο δισδιάστατο φυσικό μοντέλο του ενός πόλου για την εν κενώ λειτουργία.

- Από τον γενικό μετεπεξεργαστή, επιλέγοντας Contour Plot και Nodal Solu προκύπτει ένα νέο παράθυρο. Επιλέγοντας από αυτό το παράθυρο Flux & gradient και BSUM προκύπτει η γραφική απεικόνιση της κατανομής της μαγνητικής επαγωγής ενώ επιλέγοντας HSUM προκύπτει η γραφική απεικόνιση της κατανομής της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Τέλος επιλέγοντας DOF Solution και AZ προκύπτει η κατανομή του βαθμού ελευθερίας του δισδιάστατου μοντέλου δηλαδή της κάθετης στο X-Y επίπεδο συνιστώσας του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού AZ. Τα παραπάνω φαίνονται στις επόμενες τρεις εικόνες.



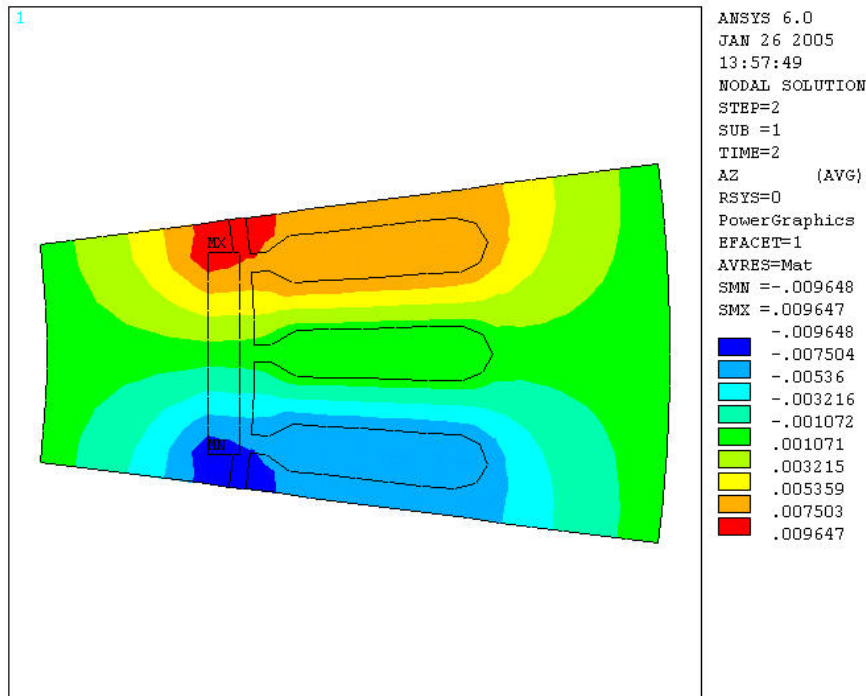
**Εικόνα 8.2.1-2**

Κατανομή της μαγνητικής επαγωγής του δισδιάστατου μοντέλου για την εν κενώ λειτουργία.



**Εικόνα 8.2.1-3**

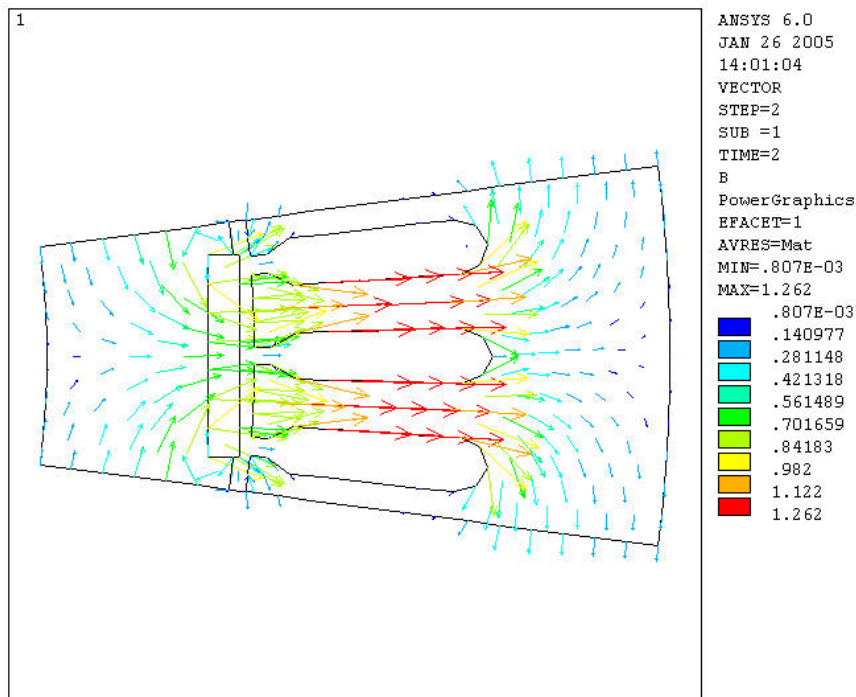
Κατανομή της έντασης του μαγνητικού πεδίου στην εν κενώ λειτουργία. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι πολύ πιο έντονη στο διάκενο.



**Εικόνα 8.2.1-4**

Κατανομή της κάθετης στο X-Y επίπεδο συνιστώσας του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού.

- Πάλι από τον γενικό μετεπεξεργαστή, επιλέγοντας Vector Plot και Predefined εμφανίζεται ένα παράθυρο από το οποίο αν επιλέξουμε Flux & gradient και BSUM προκύπτει η διανυσματική κατανομή της μαγνητικής επαγωγής.



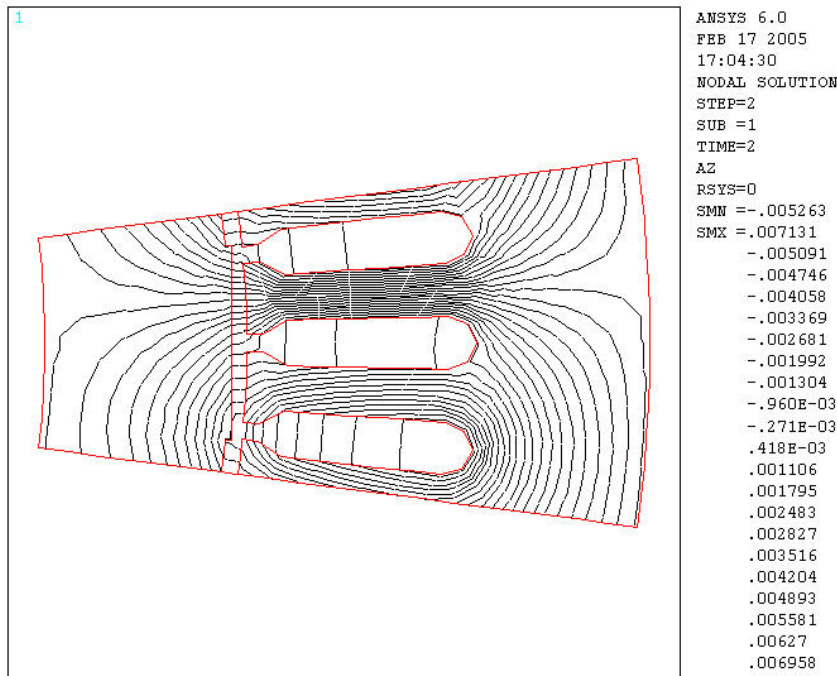
**Εικόνα 8.2.1-5**

Διανυσματική κατανομή της μαγνητικής επαγωγής.



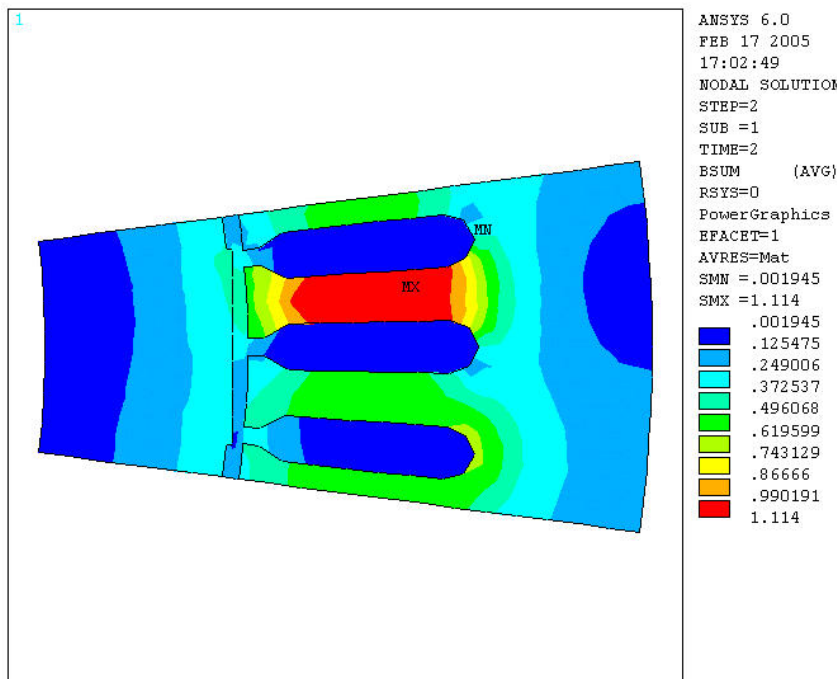
**8.2.2 Λύση του δισδιάστατου μοντέλου με μηδενική διέγερση.**

Παρακάτω εξετάζουμε η περίπτωση που είναι μηδενική η διέγερση της σύγχρονης μηχανής και το μαγνητικό πεδίο στην μηχανή παράγεται μόνο από το τύλιγμα του στάτη. Στην περίπτωση αυτή στην περιοχή του μαγνήτη αποδίδεται υλικό με ιδιότητα σιδηροπυρίνα. Στις επόμενες πέντε εικόνες παρουσιάζεται η λύση.



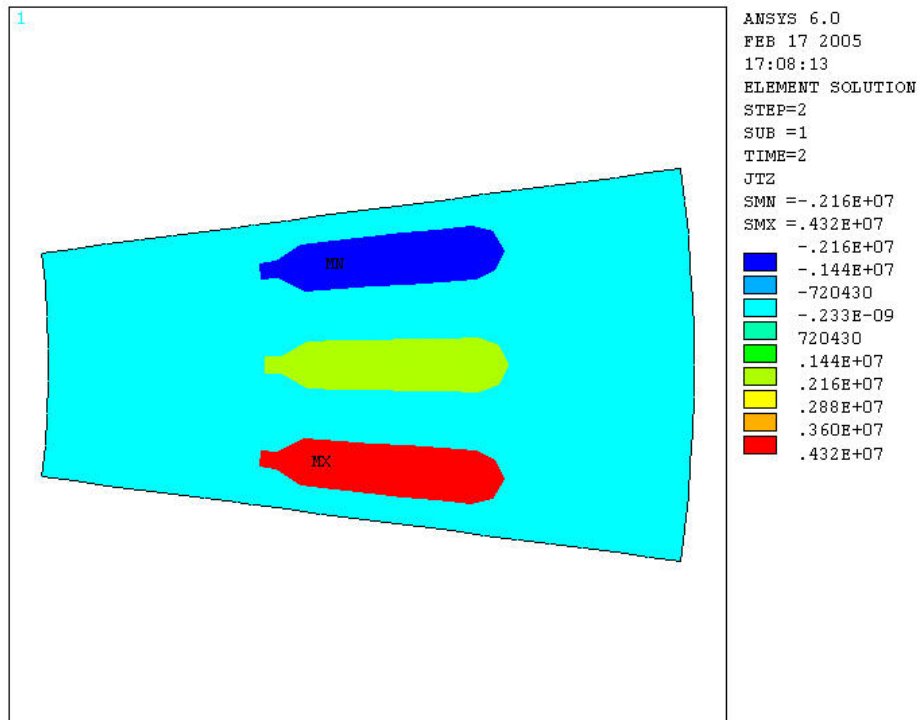
**Εικόνα 8.2.2-1**

Ισοδυναμικές γραμμές του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού για μηδενική διέγερση.



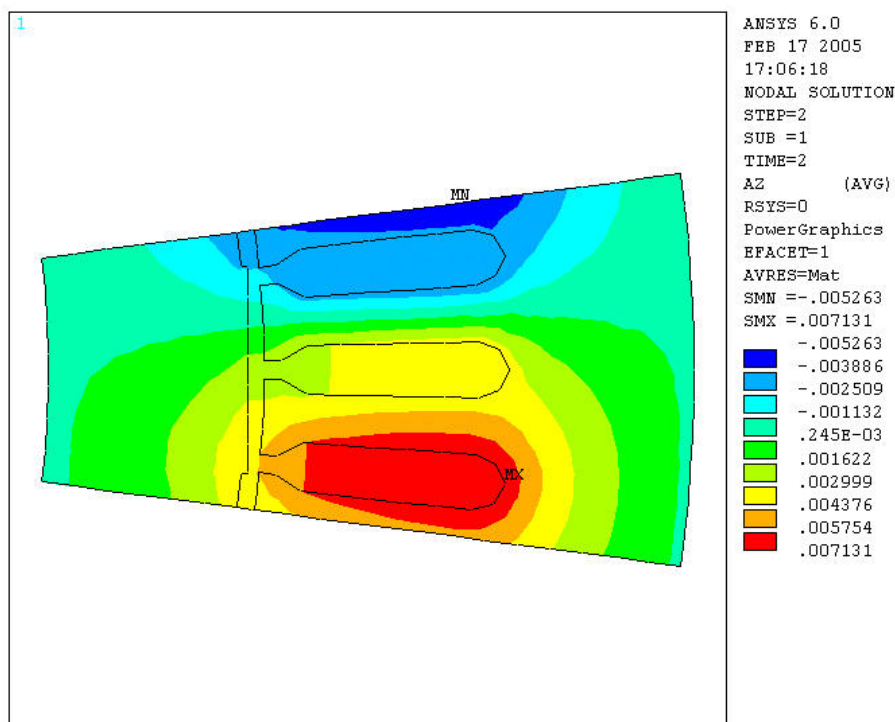
**Εικόνα 8.2.2-2**

Κατανομή του πλάτους της μαγνητικής επαγωγής του δισδιάστατου μοντέλου για την περίπτωση που η διέγερση είναι μηδενική.



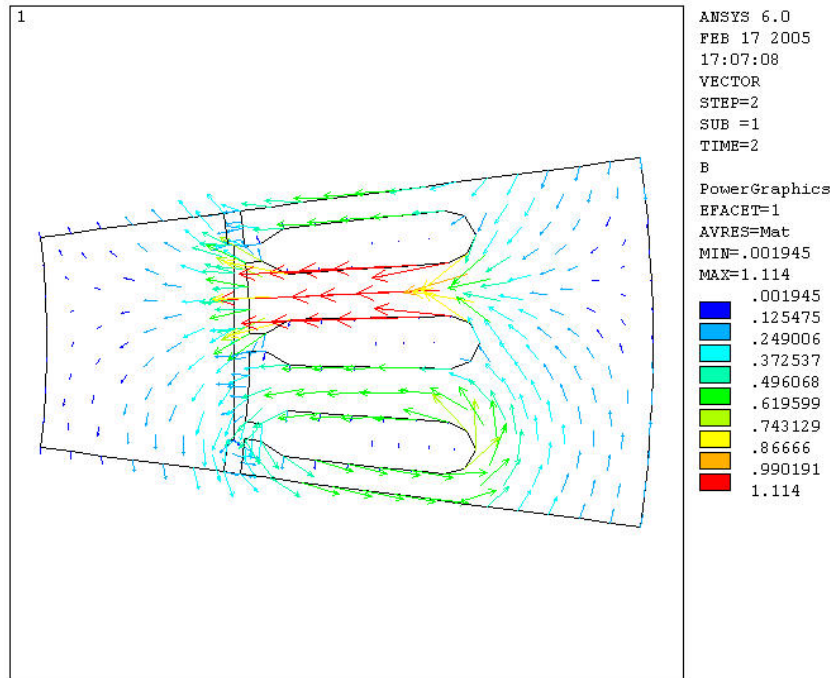
**Εικόνα 8.2.2-3**

Κατανομή της χωρικής πυκνότητας ρεύματος στις τρεις αύλακες του στάτη. Με φορά από κάτω προς τα πάνω (αριστερόστροφα), στην πρώτη αύλακα παρουσιάζεται η μεγαλύτερη πυκνότητα ρεύματος που αντιστοιχεί στην φάση A, στην δεύτερη αύλακα η χωρική πυκνότητα είναι η μισή, φάση -C, και τέλος στην τρίτη αύλακα η χωρική πυκνότητα είναι ίση και αντίθετη με αυτή στην δεύτερη αύλακα, φάση B.



**Εικόνα 8.2.2-4**

Κατανομή της κάθετης στο X-Y επίπεδο συνιστώσας του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού στην περίπτωση λειτουργίας της σύγχρονης μηχανής όπου η διέγερση είναι μηδέν.

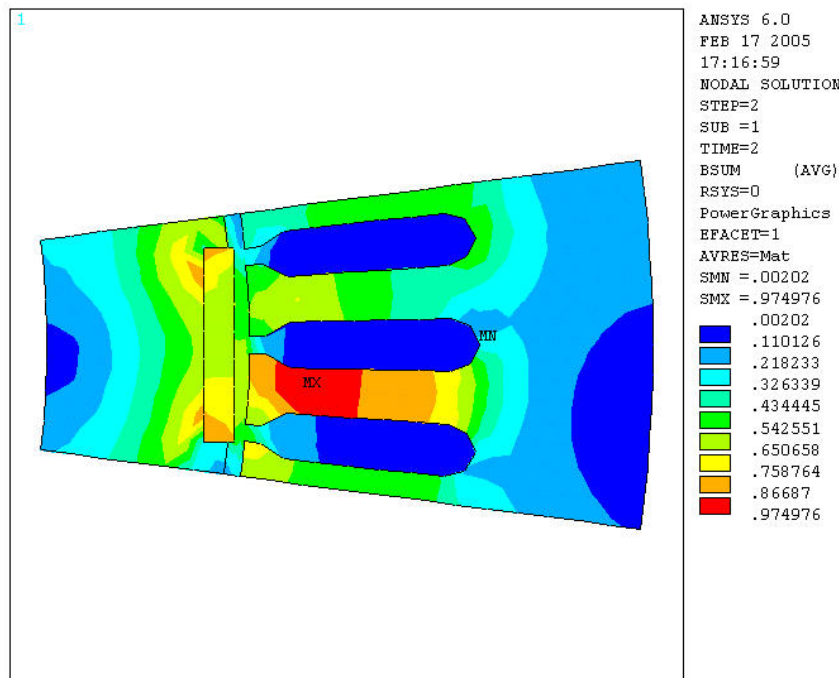


**Εικόνα 8.2.2-5**

Διανυσματική κατανομή της μαγνητικής επαγωγής στην υπό μηδενική διέγερση λειτουργία της σύγχρονης μηχανής.

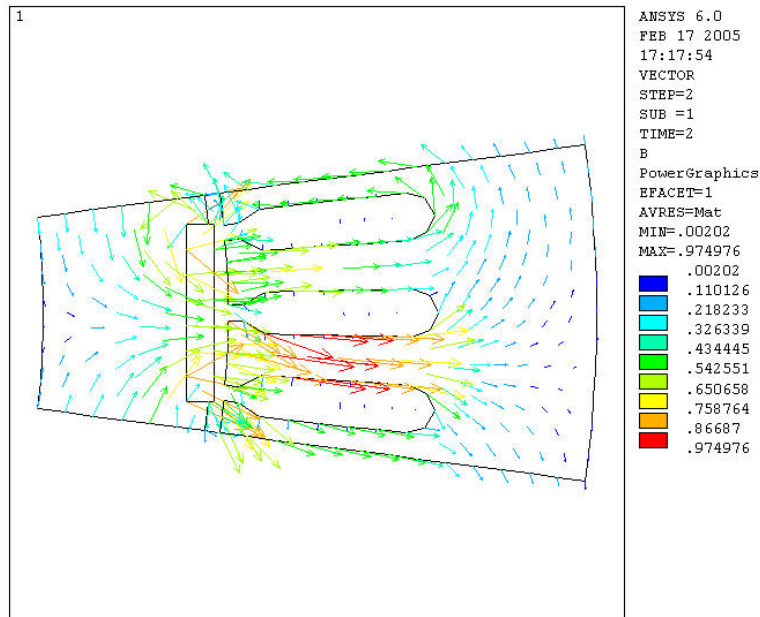
**8.2.3 Λύση του δισδιάστατου μοντέλου στην υπό φορτίο λειτουργία.**

Στην υπό πλήρες φορτίο λειτουργία είναι παρών τόσο το μαγνητικό πεδίο του μόνιμου μαγνήτη όσο και το μαγνητικό πεδίο του τυλίγματος του στάτη. Η κατανομή του συνιστάμενου μαγνητικού πεδίου απεικονίζεται στις επόμενες δύο εικόνες.



**Εικόνα 8.2.3-1**

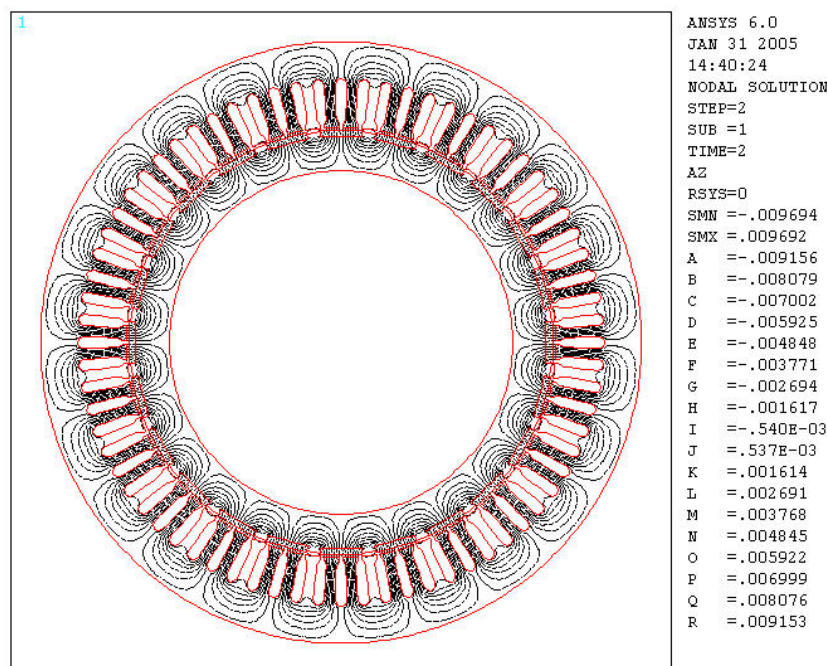
Κατανομή της μαγνητικής επαγωγής του δισδιάστατου μοντέλου στην υπό φορτίο λειτουργία.

**Εικόνα 8.2.3-2**

Διανυσματική κατανομή της μαγνητικής επαγωγής στην υπό φορτίο λειτουργία της σύγχρονης μηχανής.

### **8.2.4 Λύση του πλήρους δισδιάστατου μοντέλου στην εν κενώ λειτουργία.**

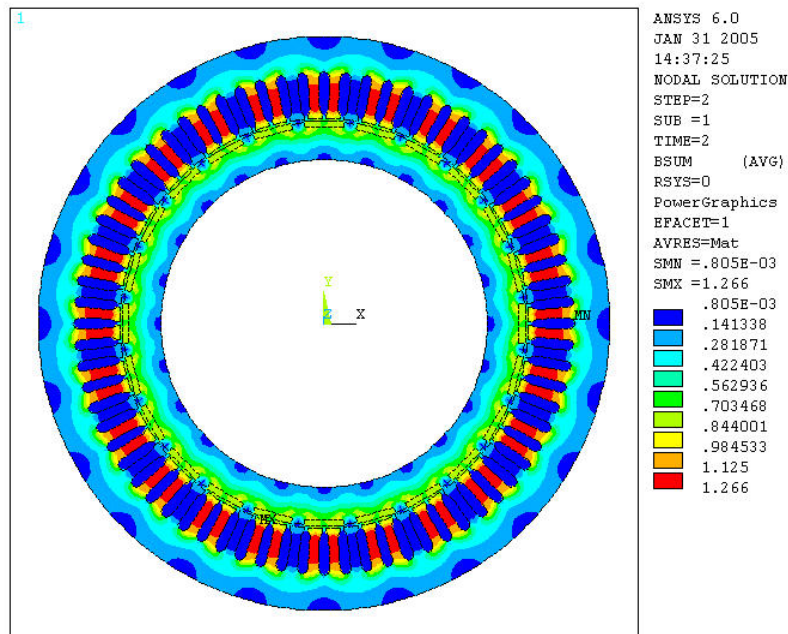
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η λύση του πλήρους δισδιάστατου φυσικού μοντέλου στην εν κενώ λειτουργία. Το συγκεκριμένο φυσικό μοντέλο αντιστοιχεί στην γεωμετρία του πραγματικού μοντέλου της σύγχρονης 24-πολικής μηχανής, δεν είναι δηλαδή απλώς ένα τμήμα του πραγματικού μοντέλου. Η μοναδική συντομία που τέθηκε στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι η μαγνητική ροή να είναι παράλληλη στις γραμμές που αποτελούν τα όρια του μοντέλου.

**Εικόνα 8.2.4-1**

Δυναμικές γραμμές του πλήρους δισδιάστατου μοντέλου.

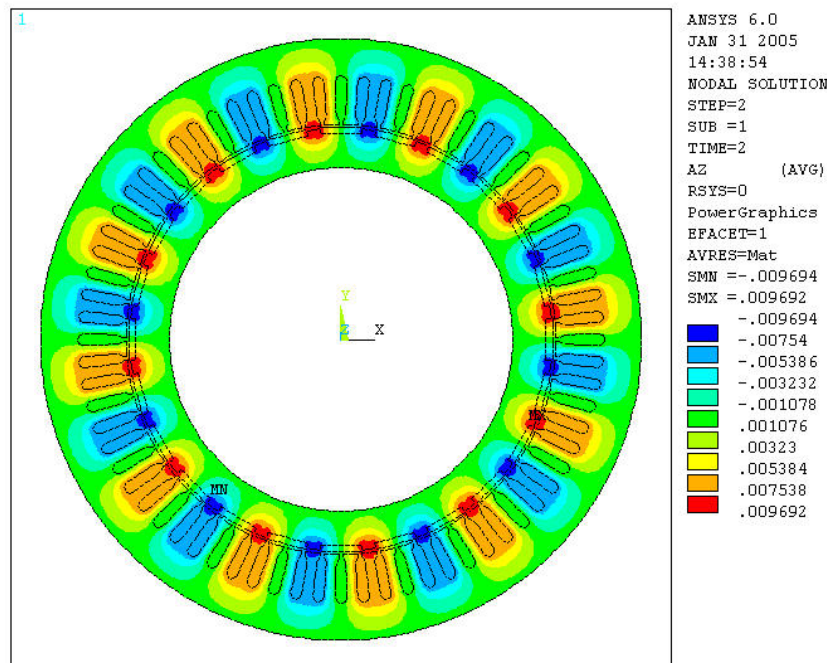


Από την λύση του πλήρους δισδιάστατου μοντέλου φαίνεται καθαρά ότι η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής είναι πανομοιότυπη με αυτή του δισδιάστατου μοντέλου του ενός πόλου. Αυτό είναι αποτέλεσμα των αντιπεριοδικών συνθηκών που εφαρμόστηκαν στο μοντέλο του ενός πόλου. Χωρίς τις συγκεκριμένες συνοριακές συνθήκες η κατανομή που θα προέκυπτε δεν θα αντιστοιχούσε στην κατανομή της σύγχρονης 24-πολικής μηχανής. Τα παραπάνω εξηγήθηκαν στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο.



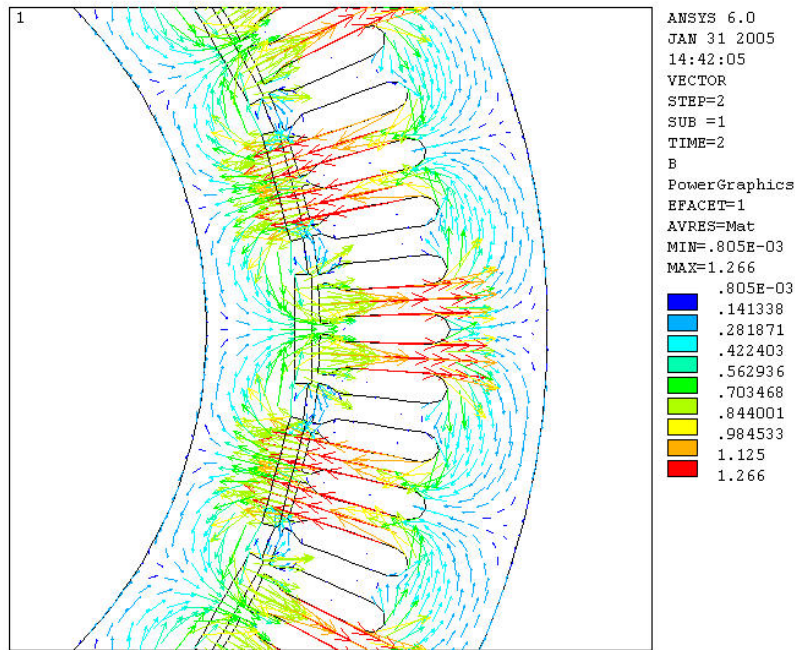
**Εικόνα 8.2.4-2**

Κατανομή της μαγνητικής επαγωγής του πλήρους δισδιάστατου μοντέλου.



**Εικόνα 8.2.4-3**

Κατανομή της κάθετης στο X-Y επίπεδο συνιστώσας του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού του πλήρους δισδιάστατου μοντέλου.

**Εικόνα 8.2.4-4**

Τμήμα της διανυσματικής κατανομής της μαγνητικής επαγωγής του πλήρους δισδιάστατου μοντέλου της σύγχρονης μηχανής για την εν κενώ λειτουργία.

### **8.3 Λύση του τρισδιάστατου φυσικού μοντέλου.**

Η επίλυση του τρισδιάστατου προβλήματος θα γίνει κάνοντας χρήση της μεθόδου ανάλυσης του μαγνητικού βαθμωτού δυναμικού (Magnetic Scalar Potential analysis MSP). Η επιλογή της μεθόδου αυτής έγινε, κατ' αναλογία με το δισδιάστατο μοντέλο, με την κατάλληλη επιλογή του τύπου του στοιχείου από το οποίο αποτελείται το πλέγμα του τρισδιάστατου φυσικού μοντέλου.

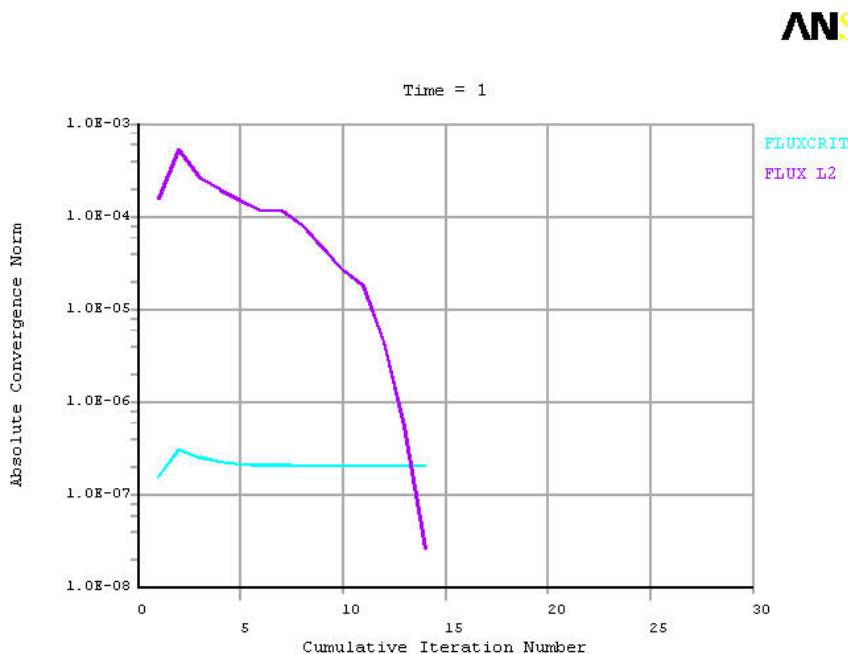
Για την επίλυση του τρισδιάστατου προβλήματος μπορεί να γίνει χρήση μία εκ των τριών παραλλαγών της MSP μεθόδου. Αυτές είναι η μέθοδος του μειωμένου βαθμωτού δυναμικού RSP (Reduced Scalar Potential), η μέθοδος του διαφορικού βαθμωτού δυναμικού DSP (Difference Scalar Potential) και τέλος η μέθοδος του γενικού βαθμωτού δυναμικού GSP (Generalized Scalar Potential). Η RSP μέθοδος είναι κατάλληλη σε μοντέλα που δεν περιέχουν περιοχές σιδηροπυρήνα. Είναι επίσης κατάλληλη για μοντέλα που αποτελούνται μεν από περιοχές σιδηροπυρήνα αλλά δεν έχουν πηγές ρεύματος. Για αυτό τον λόγο η μέθοδος αυτή είναι η πιο κατάλληλη για την λύση του συγκεκριμένου τρισδιάστατου προβλήματος και αυτό επειδή στο τρισδιάστατο μοντέλο της σύγχρονης μηχανής δεν υπάρχουν πηγές ρεύματος ενώ περιλαμβάνονται περιοχές με μη γραμμική B-H χαρακτηριστική. Οι δύο άλλες μέθοδοι είναι κατάλληλες για μοντέλα στα οποία περιλαμβάνονται τόσο πηγές ρεύματος όσο και περιοχές σιδηροπυρήνα. Η DSP μέθοδος είναι κατάλληλη για μοντέλα που έχουν περιοχές σιδηροπυρήνα οι οποίες δεν παρέχουν κλειστό δρόμο για την μαγνητική ροή ενώ η GSP μέθοδος είναι κατάλληλη για μοντέλα που έχουν περιοχές σιδηροπυρήνα οι οποίες παρέχουν κλειστό δρόμο για την μαγνητική ροή.

Η λύση για το τρισδιάστατο πρόβλημα γίνεται ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε Solution.
- Μετά επιλέγουμε Electromagnet.
- Επιλέγουμε Static Analysis και Opt&Solv.

- Από το παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε OK. Δεν γίνονται αλλαγές στις ρυθμίσεις του συγκεκριμένου dialog box εφόσον στο πεδίο Option Formulation option η εξ' ορισμού ρύθμιση είναι RSP δηλαδή η μέθοδος ανάλυσης που πρέπει να ακολουθηθεί προκειμένου να λυθεί το συγκεκριμένο τρισδιάστατο μαγνητοστατικό πρόβλημα .

Όταν ολοκληρωθεί η λύση προκύπτει ένα διάγραμμα σαν το παρακάτω.



**Γράφημα 8.3-1**

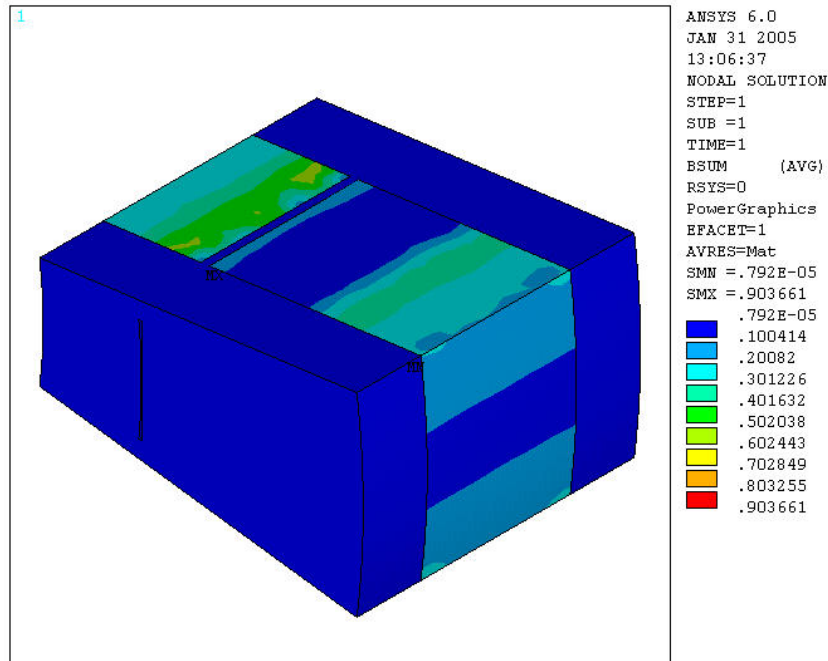
Απόλυτη σύγκλιση των τύπων L1 και L2 συναρτήσει του αριθμού των επαναλήψεων για το τρισδιάστατο μοντέλο με μαγνήτες με κλίση. Ανάλογο γράφημα προκύπτει και για το τρισδιάστατο μοντέλο με μαγνήτες χωρίς κλίση.

Το παραπάνω διάγραμμα απεικονίζει την απόλυτη σύγκλιση δύο τύπων, των L1 και L2, συναρτήσει του αριθμού των επαναλήψεων. Κατ' αναλογία με το δισδιάστατο πρόβλημα, ο L1 τύπος συγκρίνει το κριτήριο σύγκλισης με το άθροισμα των απόλυτων τιμών της δυσαναλογίας της μαγνητικής ροής (scalar magnetic flux, FLUX) για όλους τους βαθμούς ελευθερίας ενώ ο L2 τύπος εκτελεί τον έλεγχο σύγκλισης χρησιμοποιώντας την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των δυσαναλογιών της μαγνητικής ροής.

Έχουν σχεδιαστεί δύο τρισδιάστατα φυσικά μοντέλα ενός πόλου. Το ένα είναι με μαγνήτη χωρίς κλίση ενώ το άλλο με μαγνήτη με κλίση. Μέσω του γενικού μετεπεξεργαστή είναι δυνατή η γραφική απεικόνιση της λύσης των δύο μοντέλων. Σε αντίθεση όμως με το δισδιάστατο μοντέλο η γραφική απεικόνιση του τρισδιάστατου μοντέλου δεν είναι ικανοποιητική εφόσον δεν μπορεί να απεικονιστεί η τρισδιάστατη κατανομή των διαφόρων μεγεθών όπως η μαγνητική επαγωγή και το βαθμωτό δυναμικό. Έτσι στην περίπτωση που απεικονίζεται η κατανομή του μαγνητικού βαθμωτού δυναμικού αυτή θα είναι ορατή μόνο στις επιφάνειες που αποτελούν το όριο του μοντέλου. Η μόνη απεικόνιση που δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα είναι η διανυσματική κατανομή των μεγεθών. Τα παραπάνω φαίνονται στις επόμενες δύο υποπαραγράφους όπου στην πρώτη δίνεται η λύση του μοντέλου με μαγνήτες χωρίς κλίση και στην δεύτερη η λύση του μοντέλου με μαγνήτες με κλίση.

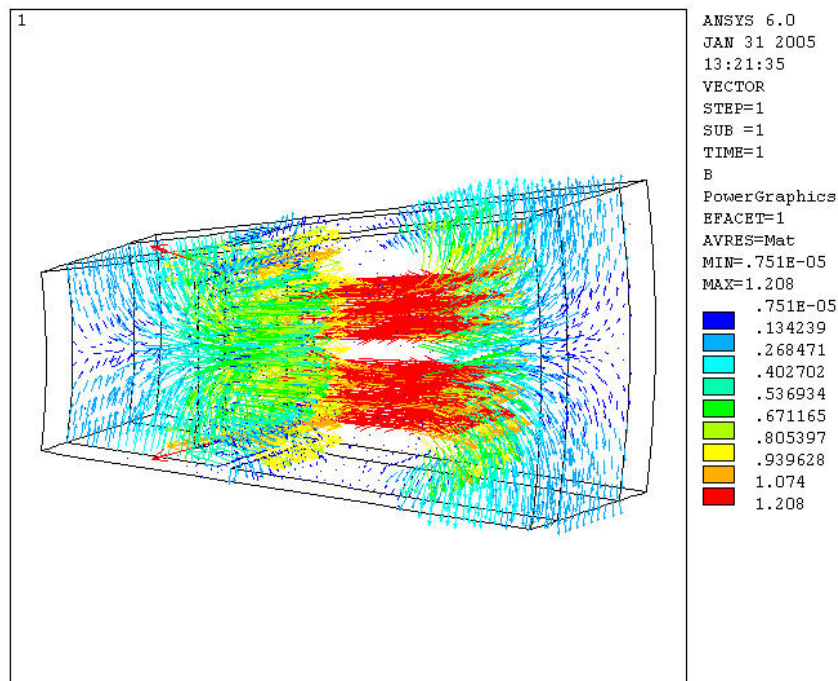
### 8.3.1 Λύση του τρισδιάστατου μοντέλου με μαγνήτες χωρίς κλίση.

Στις επόμενες δύο εικόνες παρουσιάζεται η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής για την εν κενώ λειτουργία της σύγχρονης 24-πολικής μηχανής με μόνιμους μαγνήτες χωρίς κλίση.



**Εικόνα 8.3.1-1**

Κατανομή της μαγνητικής επαγωγής του τρισδιάστατου μοντέλου με μαγνήτες χωρίς κλίση για την εν κενώ λειτουργία.



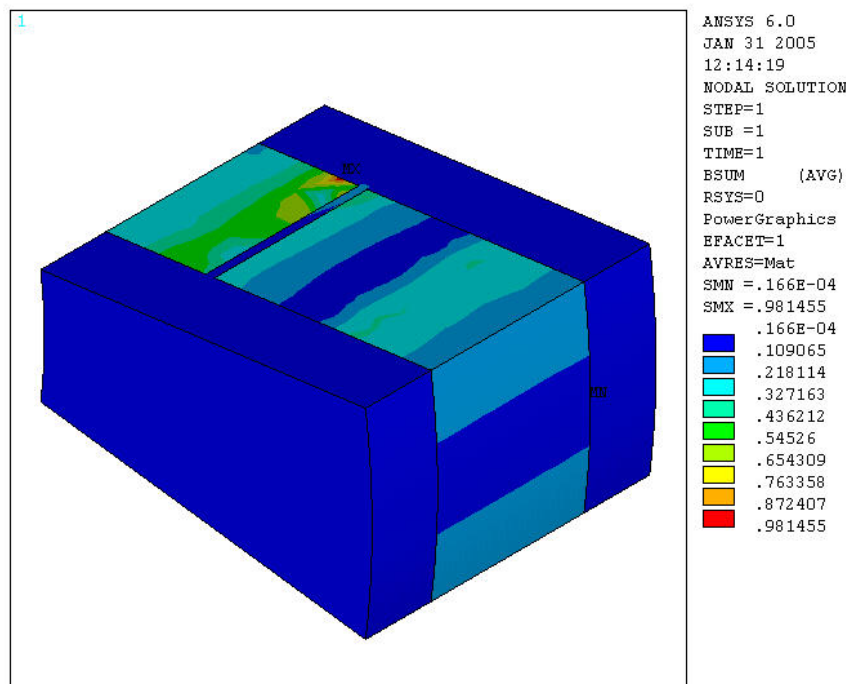
**Εικόνα 8.3.1-2**

Διανυσματική κατανομή της μαγνητικής επαγωγής του τρισδιάστατου μοντέλου με μαγνήτες χωρίς κλίση. Η κατανομή απεικονίζεται πιο ικανοποιητικά και είναι ορατή σε όλο το μοντέλο και όχι απλώς στις εξωτερικές επιφάνειες του μοντέλου.



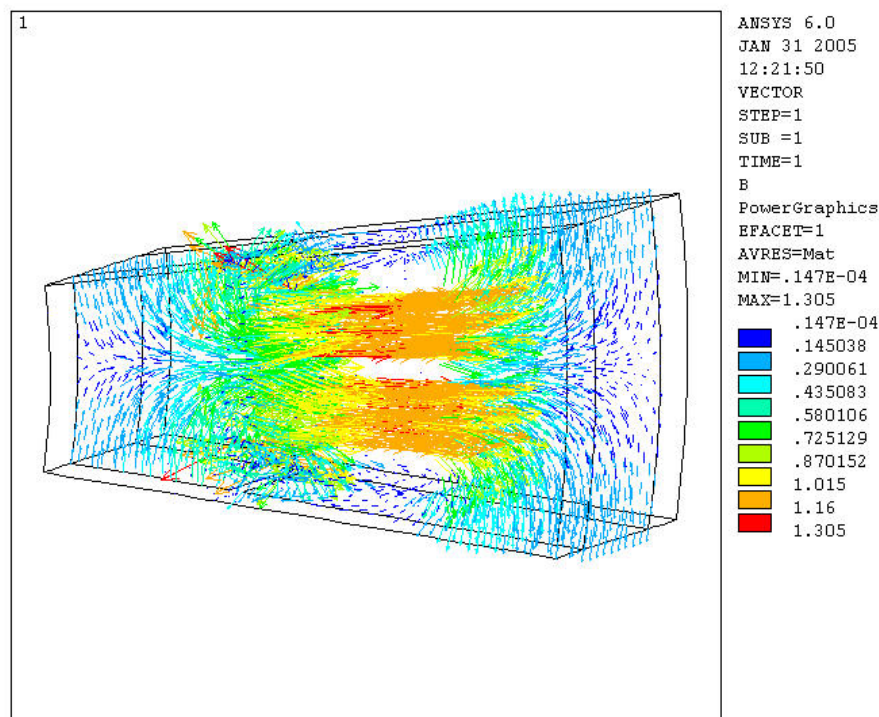
**8.3.2 Λύση του τρισδιάστατου μοντέλου με μαγνήτες με κλίση.**

Παρακάτω απεικονίζεται η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής του τρισδιάστατου μοντέλου με κεκλιμένους μαγνήτες για την εν κενώ λειτουργία.



**Εικόνα 8.3.2-1**

Κατανομή της μαγνητικής επαγωγής του τρισδιάστατου μοντέλου με μαγνήτες με κλίση για την εν κενώ λειτουργία.



**Εικόνα 8.3.2-2**

Διανυσματική κατανομή της μαγνητικής επαγωγής του τρισδιάστατου μοντέλου με μαγνήτες με κλίση.



# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9**

**ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**



## **9.1 Εισαγωγή.**

Η γραφική απεικόνιση των διαφόρων πεδιακών μεγεθών από το ANSYS δεν προσφέρει ποσοτικές πληροφορίες για την κατανομή αυτών στο διάκενο. Επίσης δεν είναι ικανοποιητική στην περίπτωση του τρισδιάστατου μοντέλου, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 8.3, όπου μόνο μέσω της διανυσματικής κατανομής μπορεί να παρατηρήσει κάποιος την κατανομή των διαφόρων πεδιακών μεγεθών στο εσωτερικό του μοντέλου. Επιπλέον οι δυνατότητες που προσφέρει το πρόγραμμα προκειμένου να κατασκευαστεί μία χαρακτηριστική για το δισδιάστατο μοντέλο της μορφής  $B = f(\phi)$  κατά μήκος ενός τόξου στο διάκενο, όπου  $B$  είναι το πλάτος της μαγνητικής επαγωγής και  $\phi$  είναι η ηλεκτρική γωνία, είναι μικρές όπως θα δειχτεί παρακάτω, στην παράγραφο 9.3. Στην περίπτωση του τρισδιάστατου μοντέλου, όπου το δισδιάστατο μοντέλο έχει επεκταθεί κατά τον  $Z$  άξονα, η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο θα πρέπει να υπολογιστεί πάνω σε μία κυρτή επιφάνεια, όχι σε ένα τόξο όπως στην περίπτωση του δισδιάστατου και θα έχει την μορφή  $B = f(\phi, Z)$ , δηλαδή η κατανομή θα περιγράφεται όχι από μία καμπύλη αλλά από μία επιφάνεια στον χώρο. Αυτό ξεφεύγει από τις δυνατότητες του προγράμματος ANSYS και για αυτό το λόγο προτείνεται σε αυτό το κεφάλαιο ένας αλγόριθμος μέσω του οποίου τα δεδομένα από την λύση του προβλήματος να μετασχηματίζονται με κατάλληλο τρόπο προκειμένου να προκύψει η χαρακτηριστική  $B = f(\phi, Z)$ . Η συγκεκριμένη χαρακτηριστική θα δίνει πολλές πληροφορίες για την κατανομή του πλάτους της πυκνότητας ροής στο διάκενο της σύγχρονης μηχανής. Μέσω της χαρακτηριστικής αυτής θα είναι εύκολη η σύγκριση μεταξύ του τρισδιάστατου μοντέλου με μαγνήτες χωρίς κλίση και αυτού με κεκλιμένους μαγνήτες. Επίσης θα είναι δυνατή και η παρατήρηση της επίδρασης του αέρα, που περιβάλλει την πραγματική μηχανή, στην κατανομή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο.

Αρχικά θα δοθεί ο αλγόριθμος στην περίπτωση του δισδιάστατου μοντέλου στην παράγραφο 9.4 και μετά θα προκύψει από αυτόν και ο αλγόριθμος για την περίπτωση του τρισδιάστατου μοντέλου, στην παράγραφο 9.5.

## **9.2 Καθορισμός του τόξου και της επιφάνειας στο μέσον του διακένου του δισδιάστατου και του τρισδιάστατου μοντέλου αντίστοιχα.**

Όπως αναφέρθηκε στο 4<sup>ο</sup> και στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο, η περιοχή του διακένου στο φυσικό μοντέλο χωρίστηκε σε δύο περιοχές προκειμένου να προκύψει, μετά την κατασκευή του πλέγματος, ένα πιο πυκνό πλέγμα στο διάκενο. Με αυτό τον τρόπο θα είναι και πιο ακριβής η λύση στο διάκενο, κάτι σημαντικό εφόσον ενδιαφέρει η κατανομή του πλάτους της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο τόσο για το δισδιάστατο όσο και για τα δύο τρισδιάστατα μοντέλα. Στην περίπτωση του δισδιάστατου μοντέλου η περιοχή του διακένου αποτελείται από δυο επίπεδες επιφάνειες (εικόνα 6.5.2-4). Το όριο μεταξύ των δύο αυτών επιφανειών είναι μία γραμμή η οποία είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων, σε πολικές συντεταγμένες, όπου:

$$R = 0,1246m, \quad -7,5^\circ \leq \phi \leq 7,5^\circ, \quad \text{Τόξο διακένου} \quad (9.2.1)$$

Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι κάθε σημείο που ανήκει στο τόξο του διακένου απέχει από την αρχή των αξόνων του δισδιάστατου κυλινδρικού συστήματος συντεταγμένων 0,1246m. Η απόσταση αυτή επιλέχθηκε ως εξής. Από το 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο υπολογίστηκε το μήκος διακένου και βρέθηκε ίσο με 0,001m. Επίσης, από το ίδιο κεφάλαιο, η εσωτερική ακτίνα του στάτη βρέθηκε ότι πρέπει να είναι ίση

με 0,125m. Η κατανομή του πλάτους της μαγνητικής επαγωγής πρέπει να βρεθεί στο μέσον του διακένου. Έτσι η ακτίνα του τόξου πρέπει να είναι ίση με:

$$\text{Ακτίνα τόξου στο μέσο του διακένου} = 0,125m - \frac{0,001}{2}m = 0,1245m$$

Επειδή όμως οι μόνιμοι μαγνήτες έχουν γεωμετρία ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου, και όχι τμήματος κοίλου κυλίνδρου, ένα τόξο με την παραπάνω ακτίνα θα πέρναγε μέσα από τον μαγνήτη και συγκεκριμένα θα έτεμνε τον μαγνήτη στις άκρες του. Αυτό θα δημιουργούσε προβλήματα στην σχεδίαση του μοντέλου, εφόσον ο μαγνήτης θα χωριζόταν σε περισσότερες των μία περιοχές, καθώς επίσης και κάποια τμήματα της κατανομής του πλάτους της πυκνότητας ροής κατά μήκος ενός τέτοιου τόξου δεν θα αντιστοιχούσαν στο διάκενο. Για τους παραπάνω λόγους επιλέχθηκε μία λίγο μεγαλύτερη ακτίνα και ίση με:

$$\text{Ακτίνα τόξου στο μέσο του διακένου} = 0,1246m$$

Με την επιλογή της παραπάνω ακτίνας, το τόξο στο μέσον του διακένου δεν τέμνει την περιοχή που αντιστοιχεί στον μαγνήτη.

Για τα δύο τρισδιάστατα μοντέλα, κατά αναλογία με το δισδιάστατο, η περιοχή του διακένου αποτελείται από δυο όγκους (εικόνες 6.5.1-8, 6.5.1-9, 6.5.1-10). Το όριο μεταξύ των δύο αυτών όγκων είναι μία επιφάνεια η οποία είναι ο γεωμετρικός τύπος των σημείων, σε κυλινδρικές συντεταγμένες, όπου:

$$R = 0,1246m, \quad -7,5^\circ \leq \phi \leq 7,5^\circ, \quad -0,05 \leq Z \leq 0,015, \quad \text{Επιφάνεια διακένου} \quad (9.2-2)$$

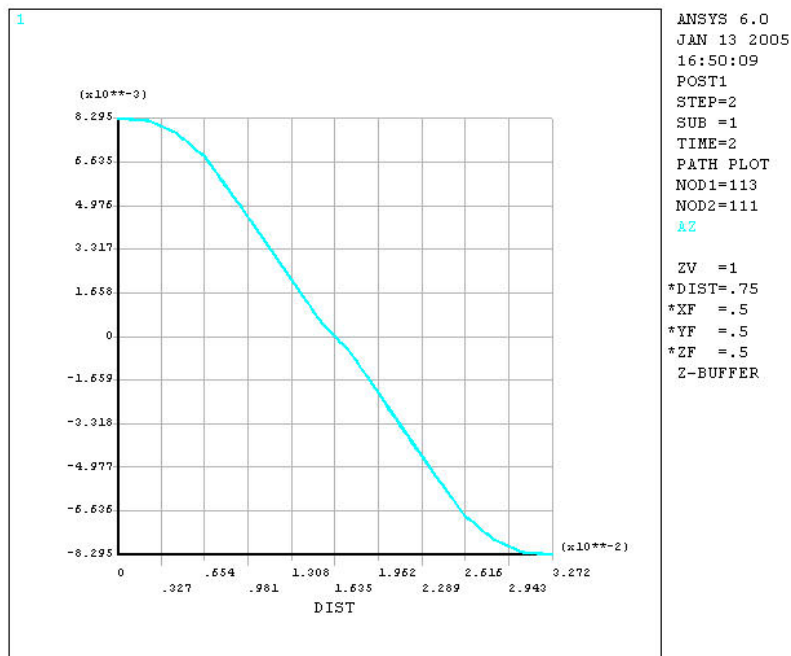
Έτσι, για τα δύο τρισδιάστατα μοντέλα, η κατανομή του πλάτους της πυκνότητας ροής θα υπολογιστεί στην παραπάνω επιφάνεια.

### **9.3 Εύρεση της χαρακτηριστικής πεδιακών μεγεθών, συναρτήσεως του μήκους του τόξου στο μέσον του διακένου του δισδιάστατου μοντέλου, μέσω του προγράμματος ANSYS.**

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, οι δυνατότητες που προσφέρει το ANSYS προκειμένου να κατασκευαστεί μία χαρακτηριστική της μορφής  $B = f(\phi)$  κατά μήκος ενός τόξου στο διάκενο του δισδιάστατου μοντέλου δεν είναι ικανοποιητικές. Θα πρέπει πρώτα να οριστεί μία διαδρομή είτε επιλέγοντας κόμβους με το mouse είτε κατασκευάζοντας ένα πίνακα τα στοιχεία του οποίου θα είναι οι πολικές συντεταγμένες των κόμβων που αποτελούν την διαδρομή αυτή. Η πρώτη διαδικασία έχει δυσκολίες εφόσον είναι δύσκολη η επιλογή των κόμβων με το mouse ενώ η δεύτερη είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα εφόσον θα πρέπει να είναι γνωστή εκ των προτέρων η θέση του κάθε κόμβου και επειδή η εισαγωγή των συντεταγμένων στον πίνακα γίνεται από το πληκτρολόγιο. Αφού οριστεί η διαδρομή, θα πρέπει μετά να καθοριστεί και το μέγεθος του οποίου ζητείται η κατανομή κατά μήκος της συγκεκριμένης διαδρομής.

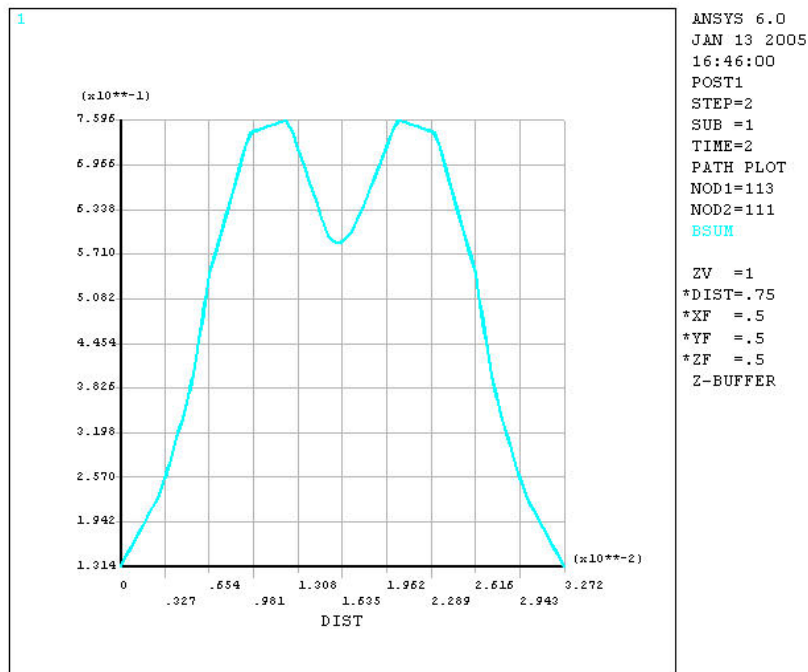
Στα δύο γραφήματα της επόμενης σελίδας (γραφήματα 9.3-1 και 9.3-2) φαίνεται αντίστοιχα η κατανομή της κάθετης στο X-Y επίπεδο συνιστώσας του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού συναρτήσεως του μήκους του τόξου του διακένου και η χαρακτηριστική του πλάτους της μαγνητικής επαγωγής συναρτήσεως του μήκους του

τόξου του διακένου. Η συγκεκριμένη διαδρομή ορίστηκε με την επιλογή οκτώ κόμβων, με το mouse, κατά μήκος του τόξου που ορίστηκε στην σχέση 9.2.1. Συνεπώς κάθε χαρακτηριστική αποτελείται από οκτώ μόνο σημεία. Έτσι οι χαρακτηριστικές που παρουσιάζονται στα δύο παρακάτω γραφήματα δεν παρουσιάζουν μεγάλη ακρίβεια.



**Γράφημα 9.3-1**

Χαρακτηριστική της κάθετης στο X-Y επίπεδο συνιστώσας του διανυσματικού δυναμικού συναρτήσει του μήκους του τόξου.



**Γράφημα 9.3-2**

Χαρακτηριστική του πλάτους της πυκνότητας ροής συναρτήσει του μήκους του τόξου στο μέσον του διακένου.

Στην περίπτωση δε των δύο τρισδιάστατων μοντέλων, με μαγνήτες χωρίς κλίση και με κεκλιμένους μαγνήτες, δεν μπορεί να οριστεί μία επιφάνεια στο μέσον του διακένου, όπως στην περίπτωση του δισδιάστατου που ορίστηκε μία διαδρομή, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η κατασκευή από το ANSYS της χαρακτηριστικής  $B = f(\varphi, Z)$ . Δεν είναι δηλαδή δυνατή η εύρεση της κατανομής της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο της σύγχρονης μηχανής, για τα δύο τρισδιάστατα μοντέλα, κάνοντας χρήση του προγράμματος ANSYS.

#### **9.4 Εύρεση της χαρακτηριστικής πεδιακών μεγεθών συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας, στο μέσον του διακένου του δισδιάστατου μοντέλου, μέσω κατάλληλου αλγορίθμου.**

Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε αντιληπτό, ότι οι χαρακτηριστικές της κατανομής των διαφόρων πεδιακών μεγεθών στο διάκενο, που προέκυψαν κάνοντας χρήση του προγράμματος ANSYS, δεν είναι ούτε λεπτομερείς αλλά ούτε και εύκολο να κατασκευαστούν. Για αυτόν τον λόγο προτείνεται στην παρούσα παράγραφο ένας αλγόριθμος μέσω του οποίου θα προκύψουν πιο λεπτομερείς χαρακτηριστικές. Επιπροσθέτως ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να επεκταθεί και για τα τρισδιάστατα μοντέλα για τα οποία η προκύπτουσα χαρακτηριστική δεν θα είναι μία καμπύλη, όπως στην περίπτωση του δισδιάστατου μοντέλου, αλλά μία επιφάνεια στον χώρο.

Μετά την λύση του προβλήματος, τόσο του δισδιάστατου όσο και του τρισδιάστατου, το πρόγραμμα υπολογίζει τον βαθμό ελευθερίας στους κόμβους των στοιχείων. Ο βαθμός ελευθερίας για το δισδιάστατο πρόβλημα είναι η κάθετη στο X-Y επίπεδο συνιστώσα του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού ενώ για το τρισδιάστατο η τιμή του μαγνητικού βαθμωτού δυναμικού. Επίσης το πρόγραμμα υπολογίζει και άλλα μεγέθη όπως τις συντεταγμένες των κόμβων και του γεωμετρικού κέντρου των στοιχείων (element centroid), το εμβαδόν και τον όγκο των στοιχείων, το πλάτος της μαγνητικής επαγωγής και της έντασης του μαγνητικού πεδίου στους κόμβους και στο γεωμετρικό κέντρο των στοιχείων καθώς και άλλα μεγέθη που δεν ενδιαφέρουν στο παρόν κεφάλαιο.

Μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι κόμβοι του πλέγματος του φυσικού μοντέλου, προκειμένου να κατασκευαστεί ένας πίνακας τα στοιχεία του οποίου θα είναι οι πολικές συντεταγμένες του κάθε κόμβου, ή οι κυλινδρικές συντεταγμένες στην περίπτωση του τρισδιάστατου μοντέλου, και η τιμή του πεδιακού μεγέθους, του οποίου ζητείται η κατανομή, στην θέση του κάθε κόμβου. Κάτι τέτοιο είναι όμως δύσκολο εφόσον ο παραπάνω πίνακας δεν μπορεί να κατασκευαστεί άμεσα και εύκολα από το ANSYS. Επιπλέον επειδή ο αριθμός των κόμβων είναι γενικά μικρότερος από τον συνολικό αριθμό των στοιχείων του πλέγματος του μοντέλου, θα προκύψει μία χαρακτηριστική που θα αποτελείται από λιγότερα σημεία και θα είναι επομένως λιγότερο ακριβής.

Από τα παραπάνω βγαίνει το συμπέρασμα ότι πρέπει να χρησιμοποιηθούν τα στοιχεία του πλέγματος προκειμένου να κατασκευαστεί ο πίνακας και αυτό γιατί είναι πολύ πιο εύκολη και άμεση η κατασκευή του πίνακα αυτού από το ANSYS και επειδή ο συνολικός αριθμός των στοιχείων είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των κόμβων από τους οποίους αποτελείται το πλέγμα του μοντέλου. Τα στοιχεία του συγκεκριμένου πίνακα θα είναι οι πολικές συντεταγμένες, ή οι κυλινδρικές συντεταγμένες για το τρισδιάστατο μοντέλο, του γεωμετρικού κέντρου των στοιχείων του πλέγματος και η τιμή του πεδιακού μεγέθους, του οποίου ζητείται η κατανομή, στη θέση του γεωμετρικού κέντρου του κάθε στοιχείου.



Η κατασκευή του εν λόγω πίνακα γίνεται ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία, αφού φυσικά έχει πρώτα ολοκληρωθεί η λύση του προβλήματος.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε General Postproc.
- Κατόπιν επιλέγουμε Element Table.
- Επιλέγουμε Define Table.
- Από το παράθυρο που προκύπτει επιλέγουμε Add.
- Από το νέο παράθυρο επιλέγουμε διαδοχικά Geometry, Elem loc και CENTX, Apply.
- Ξανά, επιλέγουμε διαδοχικά Geometry, Elem loc και CENTY, Apply.
- Τέλος επιλέγουμε διαδοχικά Flux & gradient, MagFluxDens και BSUM, OK.
- Μόλις γίνουν τα παραπάνω επιστρέφουμε στο προηγούμενο παράθυρο και επιλέγουμε Close.
- Πάλι από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε General Postproc.
- Επιλέγουμε List Results.
- Επιλέγουμε Elem Table Data.
- Από το παράθυρο που προκύπτει επιλέγουμε διαδοχικά CENTX, CENTY, BSUM και τέλος OK.
- Ακολουθώντας τα παραπάνω προκύπτει ένα αρχείο, με επέκταση \*.lis (lister files), το οποίο μπορούμε να το αποθηκεύσουμε σε όποιο φάκελο θέλουμε και να το μετονομάσουμε. Τα περιεχόμενα του αρχείου αυτού μπορούμε να τα δούμε μέσω ενός editor όπως το notepad.

Το αρχείο που προκύπτει, ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, είναι ένας πίνακας, έστω  $[D]$ , διαστάσεων  $n \times 3$  με την παρακάτω μορφή:

$$[D] = n \left\{ \begin{array}{ccc} \overbrace{R_1 \quad \phi_1 \quad B_1}^3 \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ R_i \quad \phi_i \quad B_i \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ R_n \quad \phi_n \quad B_n \end{array} \right.$$

Ο παραπάνω πίνακας έχει τρεις στήλες και  $n$  γραμμές, όπου  $n$  είναι το πλήθος των στοιχείων που αποτελούν το πλέγμα του δισδιάστατου μοντέλου και ισχύει  $n=555$  (εικόνα 6.5.2-5). Πρόκειται δηλαδή για ένα πίνακα διαστάσεων  $555 \times 3$ .  $R_i$  και  $\phi_i$  είναι η ακτίνα και η γωνία αντίστοιχα, δηλαδή οι πολικές συντεταγμένες, του γεωμετρικού κέντρου του  $i$ -οστού στοιχείου του πλέγματος του δισδιάστατου μοντέλου και  $B_i$  είναι το πλάτος της μαγνητικής επαγωγής στο σημείο με πολικές συντεταγμένες  $(R_i, \phi_i)$ , δηλαδή στο γεωμετρικό κέντρο του  $i$ -οστού στοιχείου του πλέγματος. Μέσω κατάλληλου αλγορίθμου ο παραπάνω πίνακας θα μετασχηματιστεί σε δύο πίνακες με τους οποίους θα είναι δυνατή η κατασκευή της χαρακτηριστικής  $B = f(\phi)$  με την χρήση προγραμμάτων όπως το excel ή το matlab.

Η χαρακτηριστική  $B = f(\phi)$ , ή ακριβέστερα η γραφική παράσταση του πλάτους της πυκνότητας ροής συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας, μπορεί να οριστεί σαν το σύνολο των σημείων που την αποτελούν. Κάθε σημείο της συγκεκριμένης

χαρακτηριστικής ορίζεται σαν το ζεύγος των πραγματικών αριθμών  $(\phi, B)$  πάνω στο καρτεσιανό επίπεδο. Δηλαδή η χαρακτηριστική  $B = f(\phi)$  ορίζεται σαν το σύνολο  $G$  όπου:

$$G = \{(\phi, B) / \mu\epsilon \quad -7,5^\circ \leq \phi \leq 7,5^\circ, \quad B = f(\phi)\}$$

Η χαρακτηριστική  $B = f(\phi)$  θα υπολογιστεί κατά μήκος της γραμμής που περνάει από το μέσον του διακένου και περιγράφεται από την σχέση 9.2-1. Δηλαδή θα πρέπει, από τον πίνακα [D], να βρεθούν τα ζεύγη  $(\phi, B)$  για τα οποία ισχύει  $R=0,1246m$ . Η συγκεκριμένη όμως γραμμή, το τόξο δηλαδή στο μέσον του διακένου, αποτελείται από τις ακμές των στοιχείων του πλέγματος εκατέρωθεν της γραμμής αυτής. Επομένως ενώ μερικοί κόμβοι των στοιχείων εκατέρωθεν του τόξου του διακένου βρίσκονται πάνω σε αυτό δεν συμβαίνει το ίδιο και για τα γεωμετρικά κέντρα των συγκεκριμένων στοιχείων. Αν ο πίνακας [D] είχε προκύψει χρησιμοποιώντας τους κόμβους των στοιχείων του πλέγματος του μοντέλου τότε η χαρακτηριστική  $B = f(\phi)$  θα μπορούσε να κατασκευαστεί από τα ζεύγη  $(\phi, B)$  για τα οποία η αντίστοιχη ακτίνα είναι  $R=0,1246m$ . Επειδή όμως ο πίνακας [D] έχει προκύψει χρησιμοποιώντας τα στοιχεία του πλέγματος, η χαρακτηριστική  $B = f(\phi)$  θα κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας τα ζεύγη  $(\phi, B)$  για τα οποία η ακτίνα βρίσκεται μεταξύ ενός κάτω και άνω ορίου περί την ακτίνα του τόξου στο μέσον του διακένου δηλαδή:

$$0,1246 - \Delta R_2 \leq R \leq 0,1246 + \Delta R_1$$

Η παραπάνω επιλογή της ακτίνας πρέπει να γίνει γιατί πάνω στο τόξο που περνάει από το μέσον του διακένου δεν βρίσκεται κανενός στοιχείου το γεωμετρικό κέντρο. Το εύρος  $\Delta R_1$  και  $\Delta R_2$  περί την ακτίνα του τόξου στο μέσον του διακένου, εξαρτάται από το πόσο πυκνό είναι το πλέγμα στο διάκενο, εξαρτάται δηλαδή από τις διαστάσεις των στοιχείων του πλέγματος εκατέρωθεν του τόξου. Οπότε το  $\Delta R_2$  πρέπει να επιλεγεί μεγαλύτερο από το  $\Delta R_1$  λόγω των διαφορών στις διαστάσεις των στοιχείων όπως φαίνεται και από την εικόνα 6.5.2-4.

Επιλέγοντας το παραπάνω εύρος ακτίνας προκύπτει ένας πίνακας [E], διαστάσεων  $k \times 2$  τα στοιχεία του οποίου είναι τα ζεύγη  $(\phi, B)$  από τα οποία θα προκύψει η χαρακτηριστική,  $B = f(\phi)$ , του πλάτους της πυκνότητας ροής συναρτήσεως της μηχανικής γωνίας στο μέσον του διακένου. Επίσης ο πίνακας αυτός πρέπει να ταξινομηθεί ως προς την γωνία,  $\phi$ , δηλαδή ως προς τα στοιχεία της πρώτης στήλης, με αύξουσα σειρά. Ο πίνακας [E] έχει την παρακάτω μορφή:

$$[E] = k \begin{matrix} \overbrace{\left[ \begin{array}{cc} \phi_1 & B_1 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \phi_k & B_k \end{array} \right]}^2 \end{matrix}$$

Εισάγοντας τον ταξινομημένο πίνακα [E] στο excel προκύπτει η χαρακτηριστική  $B = f(\phi)$  όπου  $\phi$  είναι η μηχανική γωνία. Το παραπάνω όμως δεν αρκεί στην περίπτωση των τρισδιάστατων μοντέλων. Πρέπει από τον παραπάνω πίνακα να προκύψουν δύο πίνακες στήλες με ίδιες διαστάσεις, δηλαδή δύο πίνακό-διανύσματα,

όπου τα στοιχεία του πρώτου πίνακα, έστω  $[A]$ , θα είναι η μηχανική γωνία ενώ τα στοιχεία του δεύτερου πίνακα, έστω  $[F]$ , θα είναι το πλάτος της πυκνότητας ροής για τις αντίστοιχες τιμές της μηχανικής γωνίας του πίνακα  $[A]$ . Οι δύο πίνακες έχουν την παρακάτω μορφή:

$$[A] = m \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \phi_i \\ \cdot \\ \cdot \\ \phi_m \end{bmatrix}, \quad [F] = m \begin{bmatrix} B_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ B_i \\ \cdot \\ \cdot \\ B_m \end{bmatrix}$$

Ο πίνακας  $[A]$  κατασκευάζεται ως εξής. Το φυσικό μοντέλο εκτείνεται μεταξύ ενός μέγιστου και ελάχιστου ορίου της γωνίας,  $\phi$ . Το συνολικό εύρος της γωνίας του φυσικού μοντέλου, του δισδιάστατου και φυσικά και των δύο τρισδιάστατων, είναι ίσο με:

$$\begin{aligned} \text{Συνολικό εύρος γωνίας} &= \phi_{\text{άνω όριο}} - \phi_{\text{κάτω όριο}} \\ \text{όπου } \phi_{\text{άνω όριο}} &= 7,5^\circ, \quad \phi_{\text{κάτω όριο}} = -7,5^\circ \end{aligned} \quad (9.4-1)$$

Επιλέγεται ένα εύρος γωνίας  $\Delta\phi$  η τιμή του οποίου εξαρτάται από τις διαστάσεις των στοιχείων του πλέγματος. Ο πίνακας στήλη  $[A]$ , τα στοιχεία του οποίου θα είναι η μηχανική γωνία, θα είναι διαστάσεως  $m \times 1$  όπου το  $m$  θα είναι ίσο με:

$$m = \frac{\phi_{\text{άνω όριο}} - \phi_{\text{κάτω όριο}}}{\Delta\phi} \quad (9.4-2)$$

Φυσικά και ο πίνακας στήλη  $[F]$ , τα στοιχεία του οποίου θα είναι το πλάτος της πυκνότητας ροής, θα είναι διαστάσεως  $m \times 1$ . Τα  $\phi_1$ ,  $\phi_i$  και  $\phi_m$  είναι αντίστοιχα ίσα με:

$$\phi_1 = \frac{2 \cdot \phi_{\text{κάτω όριο}} + \Delta\phi}{2} \quad (9.4-3)$$

$$\phi_i = \phi_1 + (i-1) \cdot \Delta\phi \quad (9.4-4)$$

$$\begin{aligned} \phi_m &= \phi_1 + (m-1) \cdot \Delta\phi \Rightarrow \phi_m = \frac{2 \cdot \phi_{\text{κάτω όριο}} + \Delta\phi}{2} + \left( \frac{\phi_{\text{άνω όριο}} - \phi_{\text{κάτω όριο}}}{\Delta\phi} - 1 \right) \Delta\phi \Rightarrow \\ \phi_m &= \frac{2 \cdot \phi_{\text{κάτω όριο}} + \Delta\phi}{2} + \frac{2 \cdot (\phi_{\text{άνω όριο}} - \phi_{\text{κάτω όριο}} - \Delta\phi)}{2} \Rightarrow \\ \phi_m &= \frac{2 \cdot \phi_{\text{κάτω όριο}} + \Delta\phi + 2 \cdot \phi_{\text{άνω όριο}} - 2 \cdot \phi_{\text{κάτω όριο}} - 2 \cdot \Delta\phi}{2} \Rightarrow \phi_m = \frac{2 \cdot \phi_{\text{άνω όριο}} - \Delta\phi}{2} \end{aligned} \quad (9.4-5)$$

Ορίζεται επίσης και η κεντρική τιμή της γωνίας,  $\phi_{\text{κεντρική τιμή}}$ , η οποία δίνεται από την επόμενη σχέση, και η χρησιμότητα της οποίας θα εξηγηθεί παρακάτω.

$$\phi_{\text{κεντρική τιμή}} = \frac{\phi_{\text{άνω όριο}} + \phi_{\text{κάτω όριο}}}{2} \quad (9.4-6)$$

Στην περίπτωση που τα στοιχεία του πίνακα [A] θα είναι η ηλεκτρική γωνία και όχι η μηχανική τότε θα ισχύουν τα εξής:

$$\phi_1 = \frac{\Delta\phi'}{2} \quad (9.4-7)$$

$$\phi_i = \phi_1 + (i-1) \cdot \Delta\phi', \quad \text{όπου } \Delta\phi' = \frac{\Delta\phi \cdot 180^\circ}{\text{Συνολικό εύρος γωνίας}} \quad (9.4-8)$$

Ο πίνακας [F], τα στοιχεία του οποίου είναι το πλάτος της πυκνότητας ροής για την αντίστοιχη γωνία από τον πίνακα [A], προκύπτει ως εξής. Το  $i$ -στο στοιχείο του πίνακα [F] είναι το  $B_i$  όπου είναι το πλάτος της πυκνότητας ροής για γωνία  $\phi_i$  στο μέσον του διακένου. Από τον πίνακα [E] και για γωνία, η οποία κυμαίνεται μεταξύ δύο τιμών που διαφέρουν μεταξύ τους κατά  $\Delta\phi$ , και δίνεται από την κάτωθι σχέση:

$$\phi_{\text{κάτω όριο}} + (i-1) \cdot \Delta\phi \leq \phi \leq \phi_{\text{κάτω όριο}} + i \cdot \Delta\phi \quad (9.4-9)$$

βρίσκονται οι αντίστοιχες τιμές του πλάτους της πυκνότητας ροής. Διακρίνονται τώρα τρεις περιπτώσεις οι οποίες αναλύονται παρακάτω.

- Από τον πίνακα [E] βρέθηκε μόνο μία τιμή, έστω  $B_g$ , η οποία αντιστοιχεί στο παραπάνω εύρος γωνίας. Τότε  $B_i = B_g$ .
- Από τον πίνακα [E] βρέθηκαν  $v$  τιμές, έστω  $B_1 \dots B_v$ , η οποίες αντιστοιχούν στο παραπάνω εύρος γωνίας. Τότε το  $i$ -στο στοιχείο,  $B_i$ , του πίνακα [F] θα δίνεται από την σχέση:

$$B_i = \frac{\sum_{g=1}^v B_g}{v} \quad (9.4-10)$$

- Τέλος από τον πίνακα [E] δεν βρέθηκε καμία τιμή η οποία να αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο εύρος γωνίας. Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει στην δημιουργία σφαλμάτων στην κατασκευή της χαρακτηριστικής  $B = f(\phi)$ . Διακρίνονται τότε οι παρακάτω δύο υποπεριπτώσεις στις οποίες γίνεται χρήση της κεντρικής τιμής της γωνίας προκειμένου να αποφευχθούν σφάλματα στην γενική περίπτωση της υπό φορτίου λειτουργίας.

$$B_i = B_{i-1} \quad \text{αν ισχύει } \phi_{\text{κάτω όριο}} \leq \phi_i \leq \phi_{\text{κεντρική τιμή}} \quad (9.4-11)$$

$$B_i = B_{i+1} \quad \text{αν ισχύει } \phi_{\text{κεντρική τιμή}} \leq \phi_i \leq \phi_{\text{άνω όριο}} \quad (9.4-12)$$

Η κεντρική τιμή της γωνίας πρέπει να χρησιμοποιηθεί εφόσον η χαρακτηριστική  $B = f(\varphi)$  στην υπό φορτίο λειτουργία δεν είναι συμμετρική ως προς την γωνία αυτή. Μόνο στην εν κενώ λειτουργία η χαρακτηριστική  $B = f(\varphi)$  είναι συμμετρική ως προς την κεντρική γωνία. Το πλάτος της πυκνότητας ροής, στην υπό φορτίο λειτουργία, για δύο τιμές γωνίας  $\varphi_1, \varphi_2$  για τις οποίες ισχύει:

$$|\phi_1 - \phi_{\text{κεντρική τιμή}}| = |\phi_2 - \phi_{\text{κεντρική τιμή}}|$$

θα είναι διαφορετικό και μόνο στην περίπτωση της εν κενώ λειτουργίας θα είναι ίσο λόγω συμμετρίας.

Κάνοντας χρήση του παραπάνω αλγορίθμου, προκύπτουν από το αρχικό αρχείο-πίνακα, [D], το οποίο κατασκευάζεται μέσω του ANSYS μετά την λύση την λύση του προβλήματος, δύο πίνακες στήλες [A] και [F]. Τα στοιχεία του πίνακα [A] είναι οι τιμές της γωνίας, μηχανικής ή ηλεκτρικής, ενώ τα αντίστοιχα στοιχεία του δεύτερου πίνακα [F] είναι οι τιμές του πλάτους της πυκνότητας ροής. Τα στοιχεία των δύο πινάκων, διαστάσεων  $m \times 1$ , συνιστούν  $m$  ζεύγη  $(\varphi, B)$  μέσω των οποίων κατασκευάζεται η χαρακτηριστική  $B = f(\varphi)$  για το δισδιάστατο μοντέλο.

Η επιλογή του εύρους της ακτίνας  $\Delta R_1, \Delta R_2$  και του εύρους της γωνίας  $\Delta\varphi$  αναφέρθηκε παραπάνω ότι εξαρτάται από τις διαστάσεις των στοιχείων του πλέγματος, δηλαδή από το πόσο πυκνό είναι το πλέγμα. Το προαναφερθέν ισχύει τόσο για το δισδιάστατο όσο και για τα δύο τρισδιάστατα μοντέλα. Αν επιλεγθεί μία μικρή τιμή για τα  $\Delta R_1, \Delta R_2$  θα προκύψει και μία χαρακτηριστική πιο ακριβής εφόσον θα αποτελείται από τα ζεύγη  $(\varphi, B)$  εκείνα τα οποία αντιστοιχούν σε στοιχεία του πλέγματος με το γεωμετρικό κέντρο τους κοντά στο μέσον του διακένου. Από την άλλη όμως αν επιλεγεί μικρή τιμή για τα  $\Delta R_1, \Delta R_2$  θα προκύψουν λιγότερα ζεύγη  $(\varphi, B)$  με αποτέλεσμα η χαρακτηριστική  $B = f(\varphi)$  να αποτελείται από λιγότερα σημεία και να μην είναι λεπτομερής. Αν επιλεγθεί μία μεγάλη τιμή για τα  $\Delta R_1, \Delta R_2$  τότε θα ισχύουν τα ακριβώς αντίθετα με τα παραπάνω. Επιλέγοντας μία μικρή τιμή για το εύρος της γωνίας  $\Delta\varphi$  θα προκύψει μία χαρακτηριστική με πολλά σημεία, εφόσον από την σχέση 9.4-2 το  $m$  θα είναι αντίστοιχα μεγάλο. Μικρή όμως τιμή της  $\Delta\varphi$  θα έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία αρκετών σφαλμάτων εφόσον θα αυξάνεται η πιθανότητα να μην βρίσκεται καμία τιμή της μαγνητικής επαγωγής, η οποία να αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο εύρος γωνίας, από τον πίνακα [E]. Επιλέγοντας μεγάλη τιμή για την  $\Delta\varphi$  θα έχει ως αποτέλεσμα να προκύψει μία χαρακτηριστική λιγότερη λεπτομερής, αφού θα αποτελείται από λιγότερα σημεία. Το πλεονέκτημα όμως της επιλογής μία μεγάλης τιμής για την  $\Delta\varphi$  είναι ότι από τον πίνακα [E] θα βρίσκεται τουλάχιστον μία τιμή της μαγνητικής επαγωγής η οποία να αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο εύρος γωνίας. Γενικά για να προκύψει μία ακριβής και αξιόπιστη χαρακτηριστική  $B = f(\varphi)$  θα πρέπει να επιλεγεί μία όσο το δυνατόν μικρότερη τιμή για τα  $\Delta R_1, \Delta R_2$  και  $\Delta\varphi$ . Θα πρέπει όμως και το πλέγμα να είναι πολύ πυκνό έτσι ώστε να μην δημιουργηθούν σφάλματα κατά την εφαρμογή του συγκεκριμένου αλγορίθμου. Κάτι τέτοιο όμως, όπως εξηγήθηκε και στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο, δεν είναι δυνατό για τα τρισδιάστατα μοντέλα εφόσον ακόμα και ένα αραιό πλέγμα αποτελείται από αρκετές δεκάδες χιλιάδες στοιχεία. Επίσης η πλεγματοποίηση του δισδιάστατου μοντέλου έγινε κάνοντας χρήση των ίδιων ρυθμίσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην πλεγματοποίηση των τρισδιάστατων μοντέλων και αυτό για προκύψει ένα ανάλογο πλέγμα και για να γίνουν έτσι πιο εύκολα οι οποιεσδήποτε συγκρίσεις και παρατηρήσεις. Εφόσον το πλέγμα στο δισδιάστατο και στα δύο τρισδιάστατα μοντέλα είναι αραιό, ακόμα και στην περιοχή του διακένου, πρέπει η

επιλογή του εύρους της ακτίνας και της γωνίας να γίνει με προσοχή για να προκύψουν χαρακτηριστικές που θα αποτελούνται από πολλά σημεία, δηλαδή πιο λεπτομερείς χαρακτηριστικές, αλλά και για να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα από την εφαρμογή του αλγορίθμου.

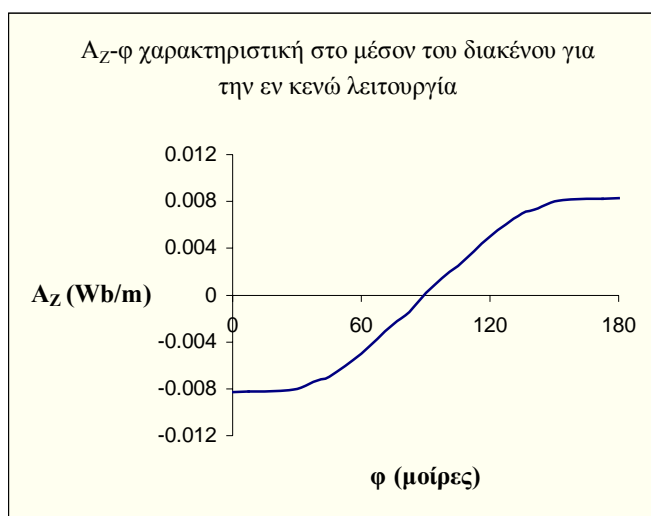
Για το δισδιάστατο φυσικό μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας η επιλογή του εύρους της ακτίνας έγινε ως εξής. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 6.2 το διάκενο χωρίστηκε σε δύο περιοχές. Στο δισδιάστατο μοντέλο, η περιοχή του διακένου που βρίσκεται σε επαφή με τον στάτη είναι μία επιφάνεια που ορίζεται σαν τον γεωμετρικό τόπο των σημείων σε πολικές συντεταγμένες όπου:

$$0,1246 \leq R \leq 0,125, \quad -7,5^\circ \leq \phi \leq 7,5^\circ$$

Οπότε η χαρακτηριστική  $B = f(\phi)$  θα μπορούσε να κατασκευαστεί από τα ζεύγη  $(\phi, B)$  για τα οποία η αντίστοιχη ακτίνα είναι:

$$0,1246 \leq R \leq 0,125 \Rightarrow 0,1248 - 0,0002 \leq R \leq 0,1248 + 0,0002, \quad \Delta R_1 = \Delta R_2 = 0,0002$$

Στην συγκεκριμένη περίπτωση τα  $\Delta R_1$  και  $\Delta R_2$  είναι ίσα εφόσον όλα τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται η επιφάνεια του διακένου που βρίσκεται σε επαφή με τον στάτη έχουν περίπου τις ίδιες διαστάσεις. Για το εύρος της γωνίας,  $\Delta\phi$ , επιλέχθηκε η τιμή  $0,625^\circ$ , που αυτό σημαίνει ότι η προκύπτουσα χαρακτηριστική θα αποτελείται από 24 σημεία. Η επιλογή του συγκεκριμένου εύρους γωνίας οδήγησε στην κατασκευή λεπτομερών χαρακτηριστικών και συγχρόνως στην ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων. Στα επόμενα τέσσερα γραφήματα απεικονίζονται αντίστοιχα οι χαρακτηριστικές της κάθετης στο X-Y επίπεδο συνιστώσας του διανυσματικού δυναμικού και του πλάτους της μαγνητικής επαγωγής συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας για την εν κενώ λειτουργία καθώς και οι χαρακτηριστικές του πλάτους της μαγνητικής επαγωγής συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας για την υπό μηδενική διέγερση λειτουργία και για την υπό πλήρες φορτίο λειτουργία. Οι χαρακτηριστικές αυτές προέκυψαν με χρήση του αλγορίθμου που αναλύθηκε στην παρούσα παράγραφο και του προγράμματος excel.

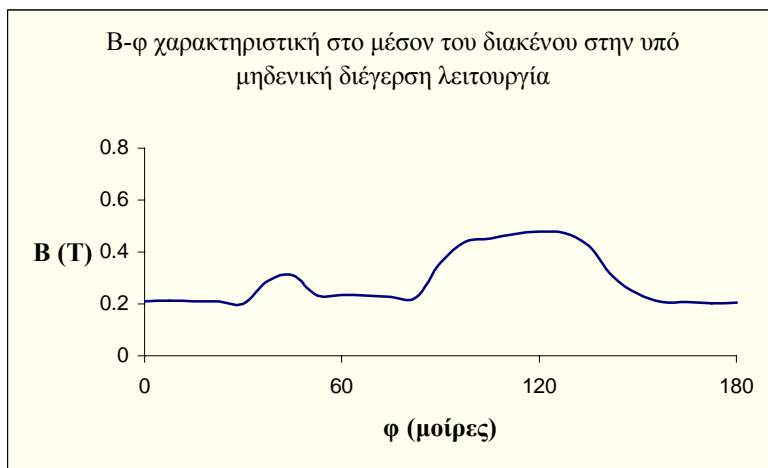


**Γράφημα 9.4-1**

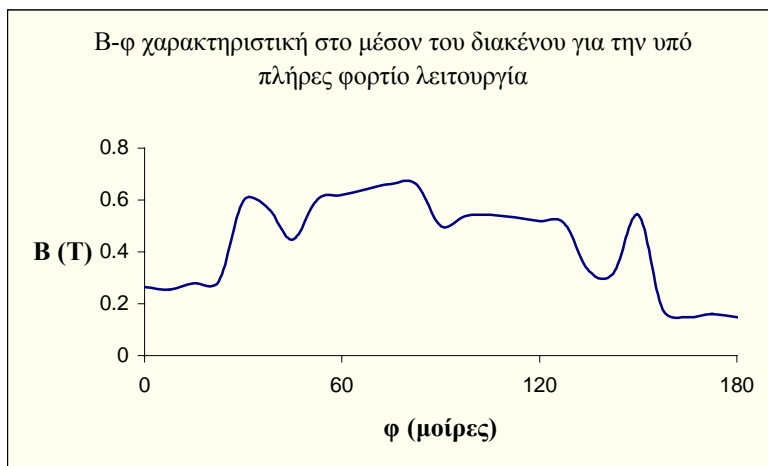
Χαρακτηριστική της κάθετης στο X-Y επίπεδο συνιστώσας του διανυσματικού δυναμικού συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας, στο μέσον του διακένου του δισδιάστατου μοντέλου.

**Γράφημα 9.4-2**

Χαρακτηριστική του πλάτους της πυκνότητας ροής συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας, στο μέσον του διακένου για την εν κενώ λειτουργία.

**Γράφημα 9.4-3**

Χαρακτηριστική του πλάτους της πυκνότητας ροής συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας, στο μέσον του διακένου για την υπό μηδενική διέγερση λειτουργία.

**Γράφημα 9.4-4**

Χαρακτηριστική του πλάτους της πυκνότητας ροής συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας, στο μέσον του διακένου για την υπό φορτίο λειτουργία.

### **9.5 Εύρεση της χαρακτηριστικής του πλάτους της πυκνότητας ροής συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας και του αξονικού μήκους, στο διάκενο του τρισδιάστατου μοντέλου, μέσω κατάλληλου αλγορίθμου.**

Στα τρισδιάστατα μοντέλα, με μόνιμους μαγνήτες χωρίς κλίση και με κεκλιμένους μαγνήτες, η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής θα υπολογισθεί στην επιφάνεια που περιγράφεται από την σχέση 9.2-2. Η κατανομή του πλάτους της πυκνότητας ροής συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας και του αξονικού μήκους, δηλαδή η χαρακτηριστική  $B = f(\varphi, Z)$ , δεν θα περιγράφεται από μία καμπύλη, όπως στην περίπτωση του δισδιάστατου μοντέλου, αλλά από μία επιφάνεια στον χώρο. Στην παρούσα παράγραφο θα επεκταθεί ο αλγόριθμος που δόθηκε στην παράγραφο 9.4 και μέσω αυτού θα κατασκευαστούν οι χαρακτηριστικές  $B = f(\varphi, Z)$  για τα δύο τρισδιάστατα μοντέλα.

Κατ' αναλογία με το δισδιάστατο μοντέλο, θα κατασκευαστεί μέσω του προγράμματος ANSYS, αφού ολοκληρωθεί η λύση του τρισδιάστατου προβλήματος, ένας πίνακας τα στοιχεία του οποίου θα είναι οι κυλινδρικές συντεταγμένες του γεωμετρικού κέντρου όλων των στοιχείων του πλέγματος και το πλάτος της μαγνητικής επαγωγής στη θέση του γεωμετρικού κέντρου του κάθε στοιχείου.

Η κατασκευή του εν λόγω πίνακα γίνεται ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία.

- Από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε General Postproc.
- Κατόπιν επιλέγουμε Element Table.
- Επιλέγουμε Define Table.
- Από το παράθυρο που προκύπτει επιλέγουμε Add.
- Από το νέο παράθυρο επιλέγουμε διαδοχικά Geometry, Elem loc και CENTX, Apply.
- Επιλέγουμε διαδοχικά Geometry, Elem loc και CENTZ, Apply.
- Ξανά, επιλέγουμε διαδοχικά Geometry, Elem loc και CENTY, Apply.
- Τέλος επιλέγουμε διαδοχικά Flux & gradient, MagFluxDens και BSUM, OK.
- Μόλις γίνουν τα παραπάνω επιστρέφουμε στο προηγούμενο παράθυρο και επιλέγουμε Close.
- Πάλι από το Main Menu του ANSYS επιλέγουμε General Postproc.
- Επιλέγουμε List Results.
- Επιλέγουμε Elem Table Data.
- Από το παράθυρο που προκύπτει επιλέγουμε διαδοχικά CENTX, CENTZ, CENTY, BSUM και τέλος OK.
- Ακολουθώντας τα παραπάνω προκύπτει ένα αρχείο, με επέκταση \*.lis (lister files), το οποίο μπορούμε να το αποθηκεύσουμε σε όποιο φάκελο θέλουμε και να το μετονομάσουμε. Τα περιεχόμενα του αρχείου αυτού μπορούμε να τα δούμε μέσω ενός editor όπως το notepad.

Το αρχείο που προκύπτει, ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, είναι ένας πίνακας, έστω [D], διαστάσεων  $n \times 4$  όπου  $n$  είναι ο συνολικός αριθμός των στοιχείων του πλέγματος του τρισδιάστατου μοντέλου. Για το τρισδιάστατο μοντέλο με μαγνήτες χωρίς κλίση θα προκύψει ένας πίνακας [D] διαστάσεως  $28.970 \times 4$  ενώ για το τρισδιάστατο μοντέλο με μαγνήτες με κλίση θα προκύψει ένας πίνακας [D] διαστάσεως  $28.966 \times 4$  (υποπαράγραφος 6.5.1). Ο εν λόγω πίνακας φαίνεται στην επόμενη σελίδα. Από τον πίνακα [D],  $R_i$ ,  $\varphi_i$ , και  $Z_i$  είναι οι κυλινδρικές συντεταγμένες του γεωμετρικού κέντρου του  $i$ -οστού στοιχείου του πλέγματος και  $B_i$  είναι το πλάτος της πυκνότητας ροής στην θέση του γεωμετρικού κέντρου του  $i$ -οστού στοιχείου.



$$[D] = n \left\{ \begin{array}{cccc} \overbrace{R_1 \quad Z_1 \quad \phi_1 \quad B_1}^4 & & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ R_i & Z_i & \phi_i & B_i \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ R_n & Z_n & \phi_n & B_n \end{array} \right.$$

Προκειμένου να κατασκευασθεί η χαρακτηριστική  $B = f(\varphi, Z)$  στο μέσον του διακένου, θα πρέπει να βρεθούν από τον παραπάνω πίνακα  $[D]$  οι τριάδες  $(Z, \varphi, B)$  για τις οποίες ισχύει:

$$0,1246 - \Delta R_2 \leq R \leq 0,1246 + \Delta R_1, \quad \text{όπου } \Delta R_2 = \Delta R_1 = 0,0002 \quad (9.5-1)$$

Τα μεγέθη  $\Delta R_1$  και  $\Delta R_2$  επιλέχθηκαν να είναι ίσα αλλά και να έχουν τέτοια τιμή, έτσι ώστε από την μία μεριά η προκύπτουσα χαρακτηριστική  $B = f(\varphi, Z)$  να αντιστοιχεί όσον το δυνατόν πιο κοντά στο μέσον του διακένου και από την άλλη να αποτελείται από αρκετά σημεία για να είναι λεπτομερής και να προσφέρει ικανοποιητική πληροφορία. Αφού ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία προκύπτει ένας πίνακας, έστω  $[H]$ , τα στοιχεία του οποίου είναι οι τριάδες  $(Z, \varphi, B)$  του πίνακα  $[D]$  για τις οποίες ισχύει η σχέση 9.5-1. Ο πίνακας αυτός πρέπει να ταξινομηθεί με αύξουσα σειρά ως προς τα στοιχεία της πρώτης στήλης, δηλαδή ως προς την διάσταση  $Z$ , είναι διαστάσεως  $h \times 3$  και έχει την παρακάτω μορφή:

$$[H] = h \left\{ \begin{array}{ccc} \overbrace{Z_1 \quad \phi_1 \quad B_1}^3 & & \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_h & \phi_h & B_h \end{array} \right.$$

Σε αντίθεση με το δισδιάστατο μοντέλο, όπου εισάγοντας τον πίνακα  $[E]$  στο excel είναι δυνατή η κατασκευή της χαρακτηριστικής  $B = f(\varphi)$ , δεν είναι δυνατό να κατασκευαστεί η χαρακτηριστική  $B = f(\varphi, Z)$  κατευθείαν από τον πίνακα  $[H]$ , κάνοντας χρήση των προγραμμάτων excel ή matlab. Προκειμένου να κατασκευαστεί η χαρακτηριστική  $B = f(\varphi, Z)$  πρέπει να οριστεί με ένα διαφορετικό τρόπο και συγκεκριμένα μέσω τριών πινάκων έστω  $[A]$ ,  $[B]$  και  $[C]$ . Η μορφή των πινάκων αυτών φαίνεται στην επόμενη σελίδα.

Τα στοιχεία του πίνακα-στήλη  $[A]$  είναι η μηχανική γωνία, τα στοιχεία του πίνακα-στήλη  $[B]$  είναι η διάσταση  $Z$ , δηλαδή το αξονικό ή ενεργό μήκος της σύγχρονης μηχανής και τέλος τα στοιχεία του πίνακα  $[C]$  είναι το πλάτος της πυκνότητας ροής για τις αντίστοιχες τιμές της μηχανικής γωνίας του πίνακα  $[A]$  και τις αντίστοιχες τιμές του αξονικού μήκους του πίνακα  $[B]$ .

$$[A] = m \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \phi_i \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \phi_m \end{bmatrix}, \quad [B] = l \begin{bmatrix} Z_1 \\ \cdot \\ Z_j \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ Z_l \end{bmatrix}, \quad [C] = m \begin{bmatrix} B_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & B_{1l} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & B_{ij} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ B_{m1} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & B_{ml} \end{bmatrix}$$

Το στοιχείο  $B_{ij}$  του πίνακα  $[C]$  είναι το πλάτος της πυκνότητας ροής για γωνία  $\phi_i$ , αξονικό μήκος  $Z_j$  και για ακτίνα  $R$  που δίνεται από την σχέση 9.5-1, δηλαδή σε μια στενή περιοχή εκατέρωθεν του μέσου του διακένου. Ο πίνακας-στήλη  $[A]$  είναι διαστάσεως  $m \times 1$ , ο πίνακας  $[B]$  είναι διαστάσεως  $l \times 1$  και τέλος ο πίνακας  $[C]$  είναι διαστάσεως  $m \times l$ . Ο παραπάνω ορισμός της χαρακτηριστικής  $B = f(\phi, Z)$  μέσω των τριών πινάκων, έχει την εξής απλή ερμηνεία. Η χαρακτηριστική  $B = f(\phi, Z)$  συνίσταται από ένα πλήθος, συνολικά  $l$ , χαρακτηριστικών  $B = f(\phi)$  διατεταγμένες στον χώρο, παράλληλα η μία στην άλλη και σε απόσταση μεταξύ τους  $\Delta Z$ . Ή αλλιώς, η χαρακτηριστική  $B = f(\phi, Z)$  συνίσταται από ένα πλήθος, συνολικά  $m$ , χαρακτηριστικών  $B = f(Z)$  διατεταγμένες στον χώρο, παράλληλα η μία στην άλλη και σε απόσταση μεταξύ τους  $\Delta \phi$ .

Αρχικά θα προκύψει ο πίνακας  $[B]$  ως εξής. Το αξονικό μήκος της σύγχρονης γεννήτριας, από το 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο, είναι ίσο με 0,035m. Στα δύο τρισδιάστατα μοντέλα έχουν προστεθεί δύο περιοχές αέρα, 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο, οι οποίες περιβάλλουν το μοντέλο και έχουν αξονικό μήκος η καθεμία ίσο με 0,015m. Έτσι το συνολικό αξονικό μήκος των τρισδιάστατων μοντέλων, δηλαδή το συνολικό εύρος της διάστασης  $Z$  είναι ίσο με:

$$\text{Συνολικό εύρος } Z = Z_{\text{άνω όριο}} - Z_{\text{κάτω όριο}}, \text{ όπου } Z_{\text{άνω όριο}} = 0,015m, Z_{\text{κάτω όριο}} = -0,05m$$

Επιλέγεται ένα εύρος αξονικού μήκους,  $\Delta Z$ , το οποίο εξαρτάται από τις διαστάσεις των στοιχείων του πλέγματος του τρισδιάστατου μοντέλου. Γενικά, όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα τόσο πιο μικρή τιμή μπορεί να επιλεγεί για το εύρος  $\Delta Z$ , για να προκύψει έτσι μία πιο ακριβής χαρακτηριστική  $B = f(\phi, Z)$ . Παρακάτω θα αναλυθεί περαιτέρω το πώς επηρεάζει την ακρίβεια της χαρακτηριστικής  $B = f(\phi, Z)$  η επιλογή της τιμής του εύρους  $\Delta Z$ . Η διάσταση και τα στοιχεία του πίνακα  $[B]$  προκύπτουν από τις τέσσερις ακόλουθες σχέσεις:

$$l = \frac{Z_{\text{άνω όριο}} - Z_{\text{κάτω όριο}}}{\Delta Z}$$

$$Z_1 = \frac{2 \cdot Z_{\text{κάτω όριο}} + \Delta Z}{2}$$

$$Z_i = Z_1 + (i-1) \cdot \Delta Z$$

$$\begin{aligned}
Z_i &= Z_1 + (i-1) \cdot \Delta Z \Rightarrow Z_i = \frac{2 \cdot Z_{\text{κάτω όριο}} + \Delta Z}{2} + \left( \frac{Z_{\text{άνω όριο}} - Z_{\text{κάτω όριο}}}{\Delta Z} - 1 \right) \Delta Z \Rightarrow \\
Z_i &= \frac{2 \cdot Z_{\text{κάτω όριο}} + \Delta Z}{2} + \frac{2 \cdot (Z_{\text{άνω όριο}} - Z_{\text{κάτω όριο}} - \Delta Z)}{2} \Rightarrow \\
Z_i &= \frac{2 \cdot Z_{\text{κάτω όριο}} + \Delta Z + 2 \cdot Z_{\text{άνω όριο}} - 2 \cdot Z_{\text{κάτω όριο}} - 2 \cdot \Delta Z}{2} \Rightarrow Z_i = \frac{2 \cdot Z_{\text{άνω όριο}} - \Delta Z}{2}
\end{aligned}$$

Τα στοιχεία του πίνακα [B] είναι σε μέτρα. Για την μετατροπή σε εκατοστά απλώς πολλαπλασιάζουμε κάθε στοιχείο του πίνακα με το εκατό.

Αφού έχει κατασκευαστεί ο πίνακας [B] ο αλγόριθμος συνεχίζει στο επόμενο βήμα το οποίο είναι το εξής. Από τον πίνακα [H] και για αξονικό μήκος, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ δύο τιμών που διαφέρουν μεταξύ τους κατά  $\Delta Z$ , και δίνεται από την κάτωθι σχέση:

$$Z_{\text{κάτω όριο}} + (i-1) \cdot \Delta Z \leq Z \leq Z_{\text{κάτω όριο}} + i \cdot \Delta Z$$

αναζητούνται και βρίσκονται τα αντίστοιχα ζεύγη ( $\phi$ , B) τα οποία τοποθετούνται σε έναν νέο πίνακα, έστω  $[E_i]$ , διαστάσεως  $k_i \times 2$ . Ο νέος πίνακας πρέπει να ταξινομηθεί κατά αύξουσα σειρά ως προς την πρώτη του στήλη, δηλαδή ως προς την μηχανική γωνία. Είναι ευνόητο ότι η παραπάνω διαδικασία θα εφαρμοστεί 1 φορές, δηλαδή για  $i=1$  μέχρι  $i=1$ . Έτσι θα προκύψουν συνολικά 1 ταξινομημένοι πίνακες. Οι πίνακες αυτοί θεωρείται ότι έχουν διαφορετικές διαστάσεις, δηλαδή ίδιο αριθμό στηλών αλλά διαφορετικό αριθμό γραμμών. Αυτό συμβαίνει λόγω της ανομοιομορφίας του πλέγματος του τρισδιάστατου μοντέλου. Βέβαια οι διαφορές στις διαστάσεις δεν είναι πολύ μεγάλες και όλοι οι πίνακες έχουν έναν αριθμό ζευγών ( $\phi$ , B) ίσο ή λίγο μεγαλύτερο από ένα όριο. Οι εν λόγω πίνακες έχουν την παρακάτω μορφή.

$$[E_1] = k_1 \left\{ \begin{array}{cc} \phi_1 & B_1 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \phi_{k_1} & B_{k_1} \end{array} \right\}, \dots, [E_i] = k_i \left\{ \begin{array}{cc} \phi_1 & B_1 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \phi_{k_i} & B_{k_i} \end{array} \right\}, \dots, [E_l] = k_l \left\{ \begin{array}{cc} \phi_1 & B_1 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \phi_{k_l} & B_{k_l} \end{array} \right\}$$

Η επιλογή μίας μεγάλης τιμής για το εύρος  $\Delta Z$  θα έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός πίνακα [B] με μικρή διάσταση, δηλαδή το 1 θα είναι μικρό. Αυτό σημαίνει ότι θα προκύψει και μικρός αριθμός πινάκων  $[E_i]$  οι οποίοι όμως θα έχουν πολλά ζεύγη ( $\phi$ , B). Δηλαδή η χαρακτηριστική  $B = f(\phi, Z)$  θα αποτελείται από λίγες χαρακτηριστικές  $B = f(\phi)$  η κάθε μία από τις οποίες όμως θα αποτελείται από πολλά σημεία, θα είναι δηλαδή λεπτομερείς. Ανάλογα αν επιλεγεί μία μικρή τιμή για το εύρος  $\Delta Z$  θα προκύψει μία χαρακτηριστική  $B = f(\phi, Z)$  η οποία θα αποτελείται από πολλές χαρακτηριστικές  $B = f(\phi)$  η κάθε μία από τις οποίες όμως θα αποτελείται από λίγα σημεία. Επειδή για τα τρισδιάστατα μοντέλα της σύγχρονης 24-πολικής μηχανής είναι σημαντικό να προκύψει μία χαρακτηριστική  $B = f(\phi, Z)$  η οποία να αποτελείται από λεπτομερείς χαρακτηριστικές  $B = f(\phi)$ , επιλέχθηκε μία μεγάλη τιμή για το εύρος  $\Delta Z$  και ίση με 0,005m. Η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από το μέγιστο επιτρεπόμενο

μήκος της ακμής των στοιχείων του πλέγματος, η οποία καθορίστηκε στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο και είναι ίση με 0,004m.

Ο πίνακας [A] κατασκευάζεται ακριβώς όπως στην παράγραφο 9.4, σύμφωνα με τις σχέσεις 9.4.-1 μέχρι και 9.4-5.

Αφού κατασκευαστεί και ο πίνακας [A] θα πρέπει να κατασκευαστεί και ο πίνακας [C]. Εφαρμόζονται οι σχέσεις 9.4-6 μέχρι και 9.4-12, από την παράγραφο 9.4, για τους πίνακες [E<sub>i</sub>], όπου i=1...l. Δηλαδή οι συγκεκριμένες σχέσεις εφαρμόζονται συνολικά l φορές για τους l στο πλήθος πίνακες [E<sub>i</sub>] και προκύπτουν l αντίστοιχοι πίνακες - στήλες [F<sub>i</sub>] διαστάσεως mx1 ο καθένας. Ο πίνακας [C] θα είναι ίσος με:

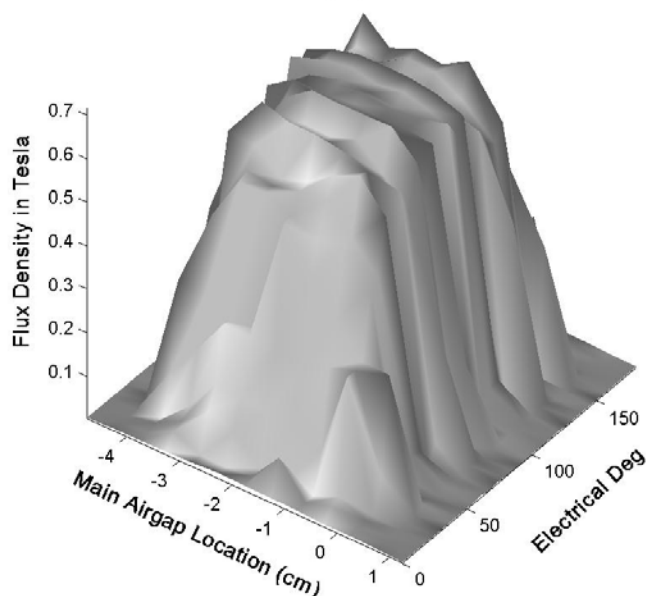
$$[C] = \begin{bmatrix} [F_1] & \cdot & \cdot & [F_l] \end{bmatrix}$$

Εφόσον οι πίνακες - στήλες [F<sub>i</sub>] είναι διαστάσεως mx1, ο πίνακας [C] είναι διαστάσεως mxl.

Με την εισαγωγή των πινάκων [A], [B] και [C] στο πρόγραμμα matlab και κάνοντας χρήση της εντολής SURFL, του συγκεκριμένου προγράμματος, είναι δυνατή η κατασκευή της χαρακτηριστικής του πλάτους της πυκνότητας ροής συναρτήσει της μηχανικής ή ηλεκτρικής γωνίας και του αξονικού μήκους της μηχανής.

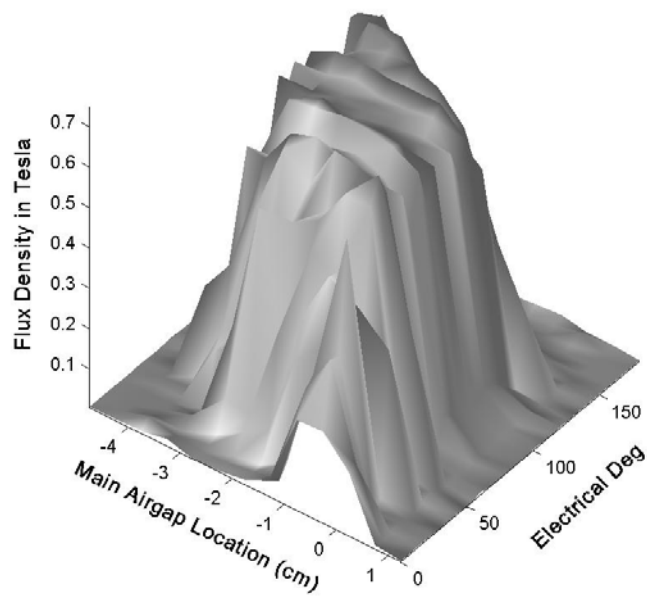
Παρακάτω παρατίθενται οι χαρακτηριστικές  $B = f(\varphi, Z)$  για τα δύο τρισδιάστατα μοντέλα, με μαγνήτες χωρίς κλίση και με κεκλιμένους μαγνήτες, της σύγχρονης 24-πολικής μηχανής, οι οποίες προέκυψαν κάνοντας χρήση του συγκεκριμένου αλγόριθμου και του προγράμματος matlab.

### B Distribution in Main Airgap



**Γράφημα 9.5-1**

Χαρακτηριστική του πλάτους της πυκνότητας ροής συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας και του αξονικού μήκους της σύγχρονης 24-πολικής μηχανής με μαγνήτες χωρίς κλίση για την εν κενώ λειτουργία.

**B Distribution in Main Airgap****Γράφημα 9.5-2**

Χαρακτηριστική του πλάτους της πυκνότητας ροής συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας και του αξονικού μήκους της σύγχρονης 24-πολικής μηχανής με κεκλιμένους μαγνήτες για την εν κενώ λειτουργία.

Η χαρακτηριστική του γραφήματος 9.5-1 είναι κατασκευασμένη από  $l = 13$  καμπύλες  $B = f(\varphi)$  όπου καθεμία από αυτές αποτελείται από  $m = 30$  σημεία. Δηλαδή η συγκεκριμένη επιφάνεια έχει προκύψει από 390 συνολικά σημεία. Τα ίδια ισχύουν και για την χαρακτηριστική του γραφήματος 9.5-2.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΚΑΙ  
ΕΞΑΓΩΓΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ





### **10.1 Εισαγωγή.**

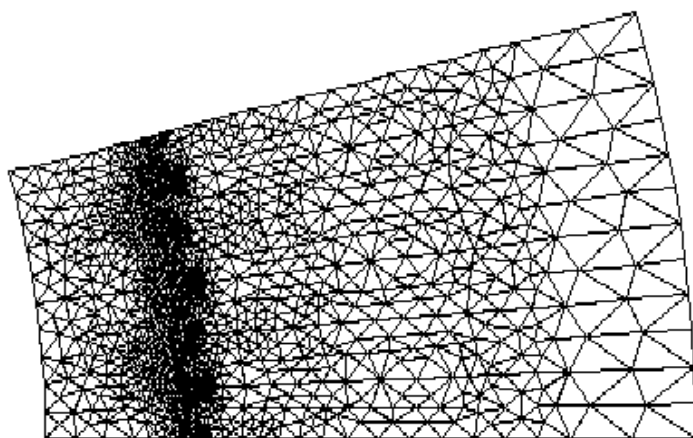
Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αρχικά η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το δισδιάστατο μοντέλο που υλοποιήθηκε στο πρόγραμμα ANSYS και αυτών που προέκυψαν από δισδιάστατα μοντέλα που υλοποιήθηκαν κάνοντας χρήση άλλων προγραμμάτων στα πλαίσια προγενέστερων εργασιών και δημοσιευμένων άρθρων. Κατόπιν γίνονται συγκρίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα διάφορα δισδιάστατα μοντέλα με τα αποτελέσματα των τρισδιάστατων μοντέλων που υλοποιήθηκαν στο ANSYS. Αναλύονται επίσης τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτή την σύγκριση, τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η τρισδιάστατη ανάλυση καθώς και το πως τα αποτελέσματα αυτής συμπίπτουν με τα πειραματικά δεδομένα. Τέλος θα γίνει η σύγκριση μεταξύ των δύο τρισδιάστατων μοντέλων με μαγνήτες χωρίς κλίση και με κεκλιμένους μαγνήτες.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονισθεί ότι κύριος σκοπός της διπλωματικής δεν ήταν η χρήση του προγράμματος ANSYS για την σχεδίαση της σύγχρονης γεννήτριας ή για την βελτιστοποίηση αυτής, με την χρήση μεθόδων τρισδιάστατης αριθμητικής ανάλυσης. Η συγκεκριμένη διπλωματική αφορά κυρίως τα πρακτικά προβλήματα που προκύπτουν από μία τρισδιάστατη ανάλυση, λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας του προβλήματος, των περιορισμών που τίθενται από το πρόγραμμα ANSYS και τους υπολογιστικούς πόρους των προσωπικών υπολογιστών, καθώς επίσης και την ανάπτυξη ενός αλγορίθμου για την κατασκευή χαρακτηριστικών, μίας ή δύο ανεξάρτητων μεταβλητών, για την απεικόνιση του πλάτους της πυκνότητας ροής στο διάκενο του δισδιάστατου και του τρισδιάστατου μοντέλου του δοκιμίου.

### **10.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ διάφορων δισδιάστατων αναλύσεων.**

Στην παρούσα παράγραφο γίνεται μία σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων του δισδιάστατου μοντέλου, που προέκυψε κάνοντας χρήση του προγράμματος ANSYS και του αλγορίθμου που αναλύθηκε στο 9<sup>ο</sup> κεφάλαιο, με αυτά που προέκυψαν από προηγούμενες δισδιάστατες αναλύσεις της σύγχρονης 24-πολικής γεννήτριας. Οι τελευταίες έγιναν με την χρήση διαφορετικών προγραμμάτων εξομοίωσης.

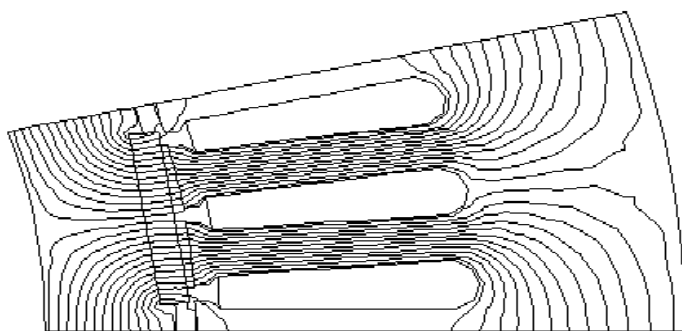
Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το πλέγμα του δισδιάστατου μοντέλου του δοκιμίου των 2,5kW, η σχεδίαση του οποίου έγινε με χρήση του προγράμματος MAGNET (διπλωματική και μεταπτυχιακή εργασία Γ.Ι. Τσεκούρα [10], [11]).



**Εικόνα 10.2.-1**

Πλέγμα του δισδιάστατου μοντέλου του δοκιμίου. Αποτελείται από 1.300 κόμβους και 2.478 στοιχεία. [10], [11].

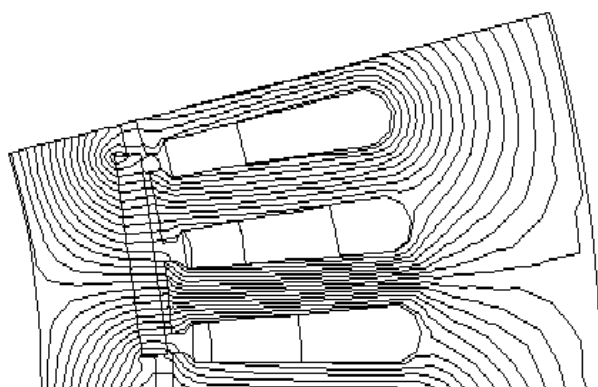
Το παραπάνω πλέγμα (εικόνα 10.2.-1) είναι αρκετά πυκνό, ιδιαίτερα στην περιοχή του διακένου, σε σύγκριση με αυτό του δισδιάστατου μοντέλου που σχεδιάστηκε στο ANSYS και αποτελείται μόνο από 555 στοιχεία. Υπενθυμίζεται όμως ότι το πλέγμα του δισδιάστατου μοντέλου που υλοποιήθηκε στο ANSYS επιλέχθηκε να έχει την συγκεκριμένη μορφή για να είναι ανάλογο με αυτό του τρισδιάστατου μοντέλου, που σχεδιάστηκε επίσης στο ANSYS, για να είναι έτσι πιο άμεση και σωστή η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Το πλέγμα του δισδιάστατου μοντέλου στο ANSYS θα μπορούσε να έχει κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να αποτελείται από αρκετές χιλιάδες στοιχεία χωρίς να δημιουργηθεί κάποιο πρόβλημα. Αναμένεται, εφόσον το πλέγμα του μοντέλου στο MAGNET είναι αρκετά πυκνό, τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την συγκεκριμένη ανάλυση να είναι πιο ακριβή από αυτά που προέκυψαν από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο ANSYS. Στις δύο επόμενες εικόνες παρουσιάζεται η κατανομή των ισοδυναμικών γραμμών του διανυσματικού δυναμικού για το δισδιάστατο μοντέλο που πραγματοποιήθηκε μέσω του MAGNET, [10] και [11], για την εν κενώ και την υπό φορτίο λειτουργία αντίστοιχα.



**Εικόνα 10.2-2**

Πεδιακή κατανομή των ισοδυναμικών σε τμήμα της σύγχρονης μηχανής που αντιστοιχεί σε ένα πολικό βήμα της γεννήτριας για την εν κενώ λειτουργία, [10], [11].

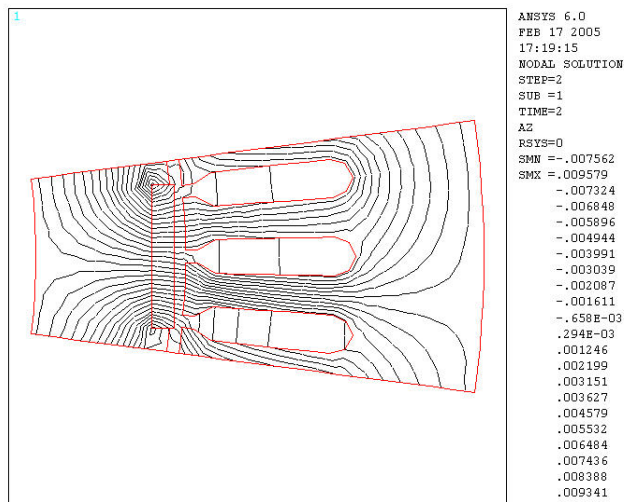
Η αντίστοιχη πεδιακή κατανομή που προέκυψε με το ANSYS για την εν κενώ λειτουργία του δισδιάστατου μοντέλου φαίνεται στην εικόνα 8.2.1-1. Παρατηρούμε ότι είναι μεν λιγότερη ακριβής αλλά έχει την ίδια ακριβώς μορφή.



**Εικόνα 10.2-3**

Πεδιακή κατανομή των ισοδυναμικών σε τμήμα που αντιστοιχεί σε ένα πολικό βήμα της γεννήτριας με συνθήκες λειτουργίας 150% ονομαστικής ροπής και  $\Sigma.1. = 1$ , [10] και [11].

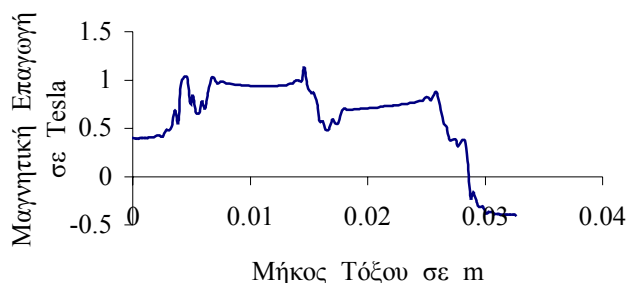
Στην εικόνα 10.2.-3 απεικονίζεται η πεδιακή κατανομή να είναι ομαλή και ομοιόμορφη μέσα στο σιδηροπυρήνα του δρομέα. Αντίθετα στο στάτη οι ισοδυναμικές γραμμές είναι συγκεντρωμένες στον ένα εκ των τριών οδοντώσεων του. Επίσης φαίνεται ότι υπάρχει μη αμελητέα ροή σκέδασης στο στάτη, καθώς ορισμένες ισοδυναμικές σχηματίζουν κλειστές διαδρομές χωρίς να περνούν από το διάκενο και κατ' επέκταση από το δρομέα. Ακόμη στο διάκενο οι ισοδυναμικές περνούν κυρίως από την περιοχή που αντιστοιχεί στο μαγνήτη επιλέγοντας τη μικρότερη δυνατή διαδρομή εντός του αέρα, [11]. Η αντίστοιχη πεδιακή κατανομή που προέκυψε με το ANSYS για την υπό πλήρους φορτίο λειτουργία του δισδιάστατου μοντέλου φαίνεται στην επόμενη εικόνα. Παρατηρούμε ότι είναι μεν λιγότερη ακριβής αλλά έχει την ίδια ακριβώς μορφή. Αποτελείται συνολικά από 40 ισοδυναμικές γραμμές.



**Εικόνα 10.2-4**

Δυναμικές γραμμές της μαγνητικής ροής στο δισδιάστατο φυσικό μοντέλο του ενός πόλου για την υπό πλήρους φορτίο λειτουργία.

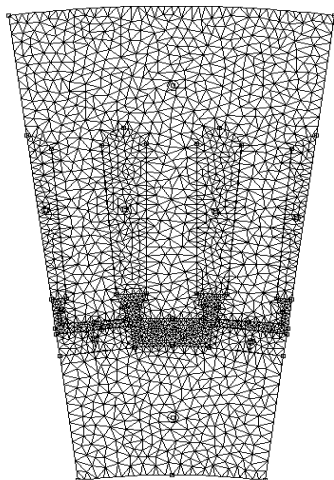
Στο επόμενο διάγραμμα, [10] και [11], παρουσιάζεται η μαγνητική επαγωγή συναρτήσει του μήκους του τόξου του διακένου για την υπό φορτίο λειτουργία, με υπερφόρτιση 50%. Το αντίστοιχο διάγραμμα του δισδιάστατου μοντέλου που υλοποιήθηκε στο ANSYS, και προέκυψε κάνοντας χρήση του αλγορίθμου που δόθηκε στην παράγραφο 9.4, φαίνεται στο γράφημα 9.4-4. Παρατηρούμε ότι τα δύο γραφήματα έχουν παρόμοια μορφή.



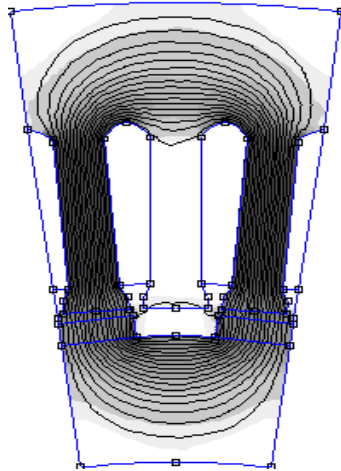
**Γράφημα 10.2-1**

Εφαπτομενικής επαγωγή σε συνάρτηση με το μήκος του τόξου που περνά από το μέσο του διακένου, για ονομαστική ροπή και  $\Sigma.I. = 1$ , πρόγραμμα MAGNET, [11].

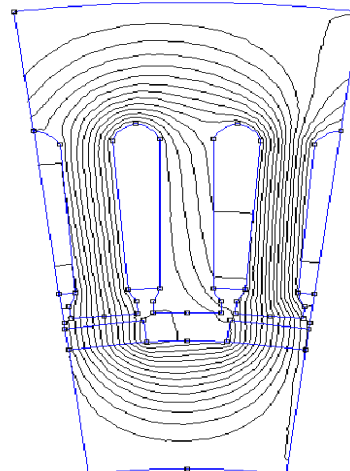
Στις παρακάτω τρεις εικόνες, [16], παρουσιάζεται αντίστοιχα το πλέγμα και η κατανομή των ισοδυναμικών, για το δισδιάστατο μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας που υλοποιήθηκε βάσει του προγράμματος feem. Ισχύουν ακριβώς τα ίδια με το πρόγραμμα MAGNET.



10.2-5



10.2-6



10.2-7

**Εικόνες 10.2-5, 10.2-6, 10.2-7**

Απεικονίζουν αντίστοιχα το πλέγμα, την κατανομή των ισοδυναμικών για την εν κενώ λειτουργία και την κατανομή των ισοδυναμικών για την υπό φορτίο λειτουργία, δισδιάστατου μοντέλου της σύγχρονης γεννήτριας που υλοποιήθηκε με το πρόγραμμα feem, [16].

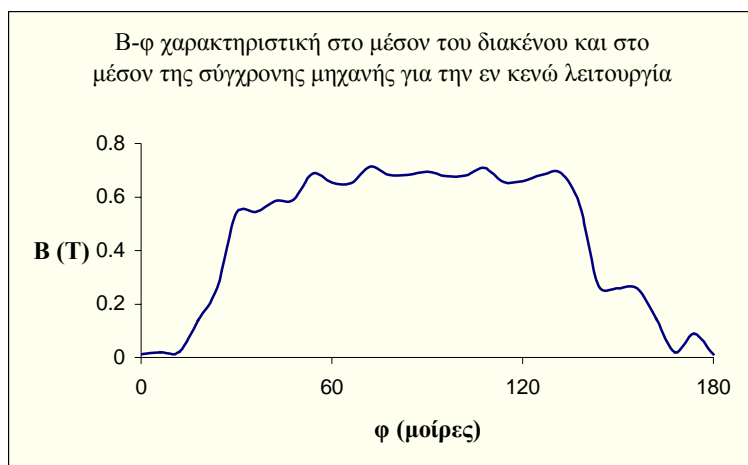
### **10.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των δισδιάστατων και των τρισδιάστατων αναλύσεων.**

Στην συγκεκριμένη παράγραφο θα γίνει μία σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δισδιάστατων και των τρισδιάστατων αναλύσεων και θα αναλυθεί πως η τρισδιάστατη ανάλυση εξηγεί μερικές μικρές διαφορές που προκύπτουν μεταξύ των δισδιάστατων αναλύσεων και των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Στο επόμενο γράφημα 10.3-1, απεικονίζεται η χαρακτηριστική του πλάτους της πυκνότητας ροής συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας, στο μέσον του διακένου. Η χαρακτηριστική αυτή προέκυψε από την ανάλυση του τρισδιάστατου μοντέλου, με μαγνήτες χωρίς κλίση για την εν κενώ λειτουργία, και τον αλγόριθμο που δόθηκε στην παράγραφο 9.5. Αντιστοιχεί δε στο μέσον της σύγχρονης μηχανής, δηλαδή για αξονικό μήκος ίσο με  $Z = -1,75\text{cm}$ . Μπορεί να ειπωθεί ότι η συγκεκριμένη χαρακτηριστική  $B = f(\varphi)$  προέκυψε από την γενική χαρακτηριστική  $B = f(\varphi, Z)$  της τρισδιάστατης ανάλυσης για μία σταθερή τιμή της δεύτερης ανεξάρτητης μεταβλητής  $Z$ , δηλαδή του αξονικού μήκους της γεννήτριας. Παρατίθεται επίσης ξανά, για άμεση σύγκριση, η χαρακτηριστική  $B = f(\varphi)$ , γράφημα 9.4-2, που προέκυψε από την δισδιάστατη ανάλυση του ANSYS και τον αλγόριθμο που δόθηκε στην παράγραφο 9.4.

Από την σύγκριση των δύο χαρακτηριστικών παρατηρούμε ότι έχουν περίπου την ίδια μορφή. Διαφορές στην μορφή των συγκεκριμένων χαρακτηριστικών έχουν παρατηρηθεί και σε προηγούμενες εργασίες, [14]. Ένα σημαντικό όμως συμπέρασμα που προκύπτει από την σύγκριση των δύο συγκεκριμένων χαρακτηριστικών είναι το εξής. Από την χαρακτηριστική που προέκυψε από την τρισδιάστατη ανάλυση, γράφημα 10.3-1, φαίνεται ότι το πλάτος της πυκνότητας ροής είναι μικρότερο από το

αντίστοιχο που προέκυψε με την δισδιάστατη ανάλυση. Αυτό οφείλεται στο ότι, στο τρισδιάστατο μοντέλο έχουν συμπεριληφθεί περιοχές αέρα που περιβάλλουν το μοντέλο και σκοπό έχουν την εξομοίωση της επίδρασης του αέρα που περιβάλλει την πραγματική μηχανή, στο πλάτος της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο. Στην πραγματική μηχανή παρουσιάζονται φαινόμενα σκέδασης στο διάκενο τα οποία προβλέπονται ικανοποιητικά από την τρισδιάστατη ανάλυση.



**Γράφημα 10.3-1**

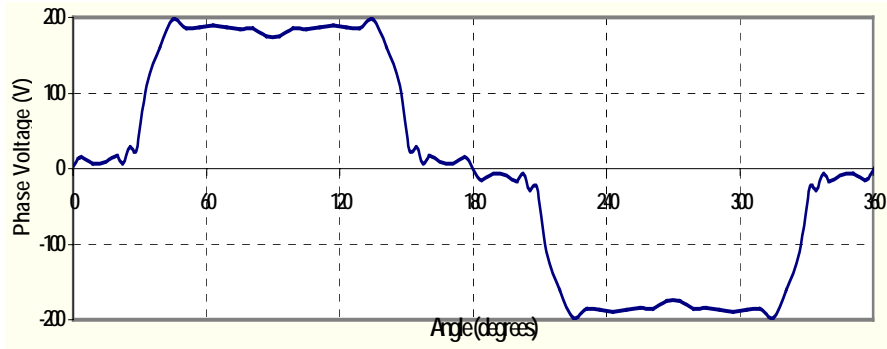
Πλάτος της πυκνότητας ροής συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας, στο μέσον του διακένου και για αξονικό μήκος  $-1,75\text{cm}$ , του τρισδιάστατου μοντέλου.



**Γράφημα 9.4-2**

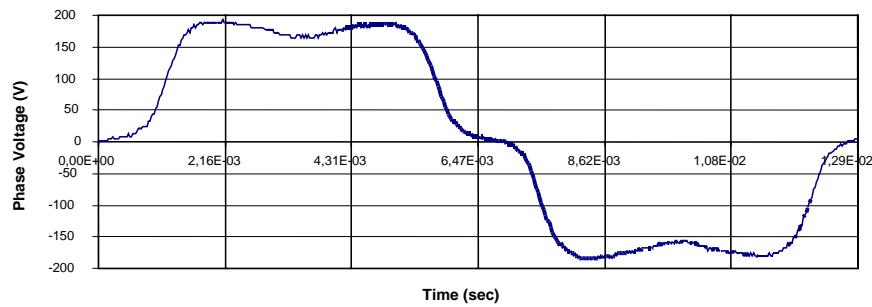
Πλάτος της πυκνότητας ροής συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας, στο μέσον του διακένου του δισδιάστατου μοντέλου.

Το μέγιστο πλάτος της πυκνότητας ροής, που προκύπτει από την δισδιάστατη ανάλυση, είναι  $0,735$  Tesla, ενώ το αντίστοιχο στην τρισδιάστατη ανάλυση είναι  $0,71$  Tesla. Επειδή η ενεργός τιμή της επαγόμενης τάσης είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής,  $\Phi$ , προκύπτει το συμπέρασμα ότι το πλάτος της τάσης εξόδου που θα μετρηθεί πειραματικά θα είναι πιο μικρό από αυτό που προβλέπεται από τις δισδιάστατες αναλύσεις. Αυτό φαίνεται στα επόμενα τέσσερα γραφήματα όπου απεικονίζονται η φασική τάση που προκύπτει από δισδιάστατες αναλύσεις και από πειραματικές μετρήσεις για την εν κενώ και την υπό φορτίο λειτουργία της σύγχρονης 24-πολικής γεννήτριας.



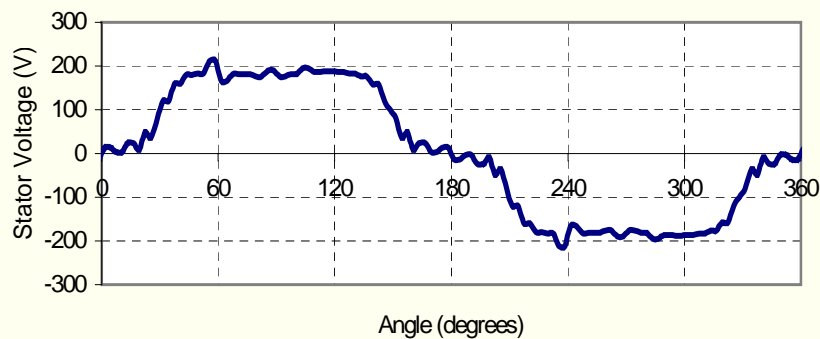
**Γράφημα 10.3-2**

Φασική τάση εξόδου, στην εν κενώ λειτουργία της γεννήτριας μονίμων, χωρίς κλίση, μαγνητών (2D fem simulation), [16].



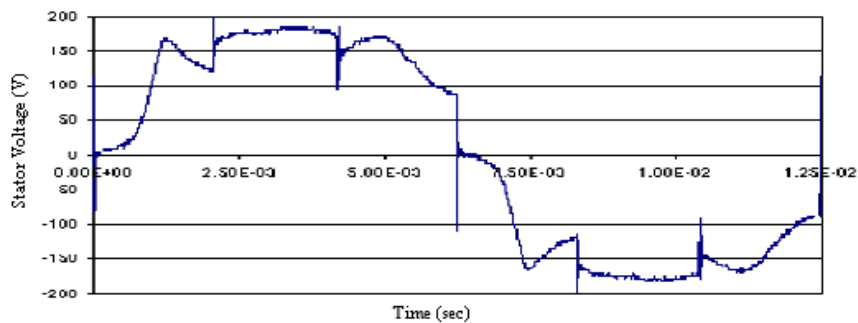
**Γράφημα 10.3-3**

Φασική τάση εξόδου, στην εν κενώ λειτουργία της γεννήτριας μονίμων, χωρίς κλίση, μαγνητών (πείραμα), [16].



**Γράφημα 10.3-4**

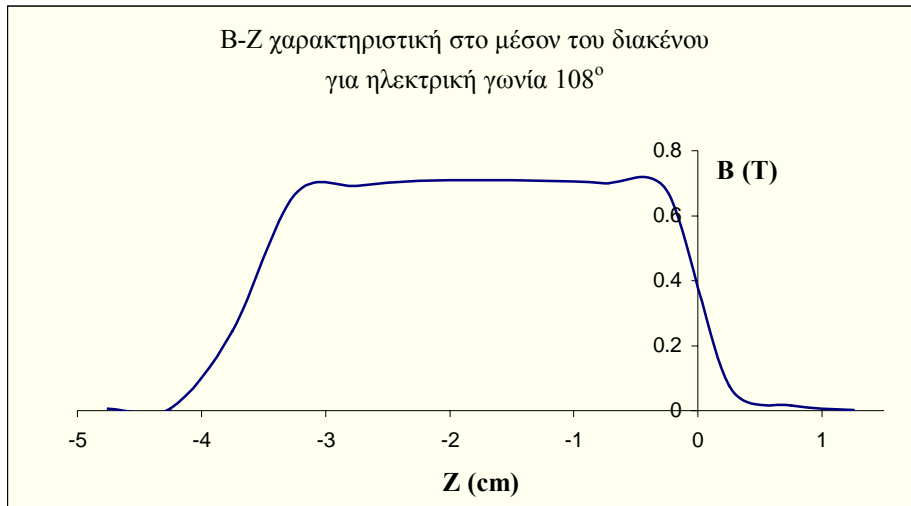
Φασική τάσης εξόδου, στην υπό φορτίο λειτουργία της γεννήτριας μονίμων, χωρίς κλίση, μαγνητών (2D fem simulation), [16].



**Γράφημα 10.3-5**

Φασική τάση εξόδου, στην υπό φορτίο λειτουργία της γεννήτριας μονίμων, χωρίς κλίση, μαγνητών (πείραμα), [16].

Το πλάτος της πυκνότητας ροής είναι ακόμα μικρότερο για αξονικό μήκος διάφορο αυτού που αντιστοιχεί στο μέσον της σύγχρονης μηχανής. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα στα άκρα της μηχανής. Πρέπει όμως να ειπωθεί πως το πλάτος της πυκνότητας ροής δεν είναι μηδενικό εκτός της μηχανής αλλά έχει μία αρκετά υψηλή τιμή η οποία όμως μειώνεται γρήγορα σε μικρή απόσταση από τα άκρα της μηχανής (της τάξης των 1,5cm). Αυτό φαίνεται στο παρακάτω γράφημα το οποίο προέκυψε από τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης ανάλυσης, της σύγχρονης γεννήτριας με μαγνήτες χωρίς κλίση, και την εφαρμογή του αλγορίθμου που αναλύθηκε στο 9<sup>ο</sup> κεφάλαιο.



**Γράφημα 10.3-6**

B-Z χαρακτηριστικής, για σταθερή τιμή της ηλεκτρικής γωνίας, του τρισδιάστατου μοντέλου με χωρίς κλίση μαγνήτες, στην εν κενώ λειτουργία.

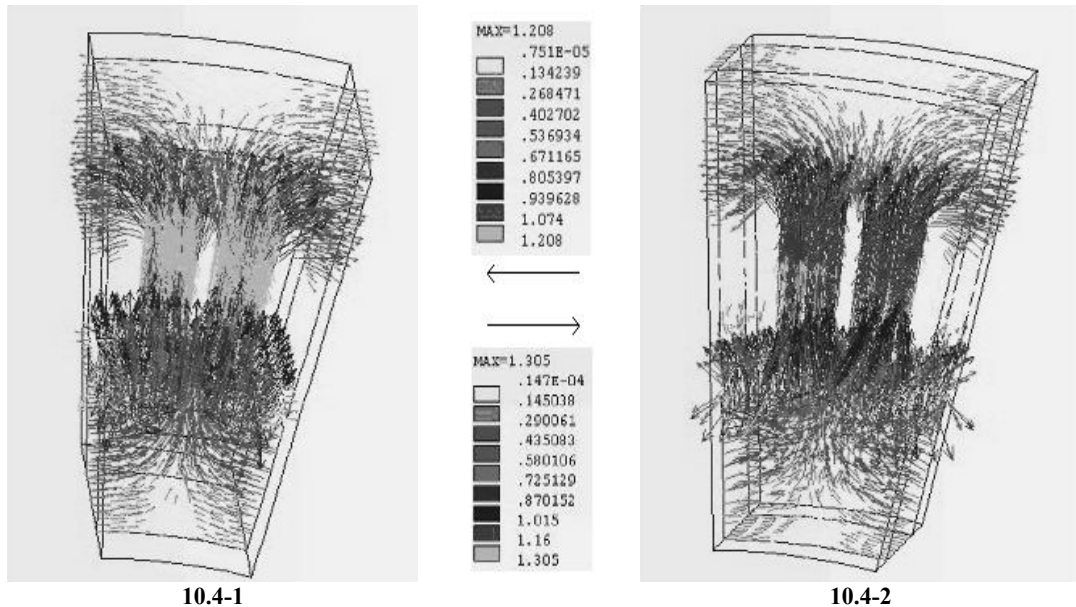
Από το παραπάνω γράφημα παρατηρούμε ότι στα άκρα της μηχανής, δηλαδή για αξονικό μήκος  $-3,5\text{cm}$  και  $0\text{cm}$ , το πλάτος της πυκνότητας ροής έχει ελαττωθεί στα 0,4 Tesla. Από το ίδιο γράφημα φαίνεται ότι το πλάτος της πυκνότητας ροής είναι μη μηδενικό εκτός της μηχανής και μηδενίζεται μετά από 1,5cm.

#### **10.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των τρισδιάστατων μοντέλων με μαγνήτες χωρίς κλίση και με κεκλιμένους μαγνήτες.**

Στο 9<sup>ο</sup> κεφάλαιο έγινε σαφές ότι δεν αρκεί η γραφική απεικόνιση της κατανομής της μαγνητικής επαγωγής για να γίνει η σύγκριση μεταξύ των δύο τρισδιάστατων μοντέλων. Για αυτό τον λόγο δόθηκε στο ίδιο κεφάλαιο ένας αλγόριθμος μέσω του οποίου να προκύψει η χαρακτηριστική του πλάτους της πυκνότητας ροής συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας και του αξονικού μήκους. Η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής στο εσωτερικό των δύο τρισδιάστατων μοντέλων φαίνεται στις εικόνες 10.4-1 και 10.4-2. Παρατηρούμε ότι υπάρχουν διαφορές στην κατανομή της μαγνητικής επαγωγής των δύο τρισδιάστατων μοντέλων οι οποίες οφείλονται στην κλίση του μαγνήτη.

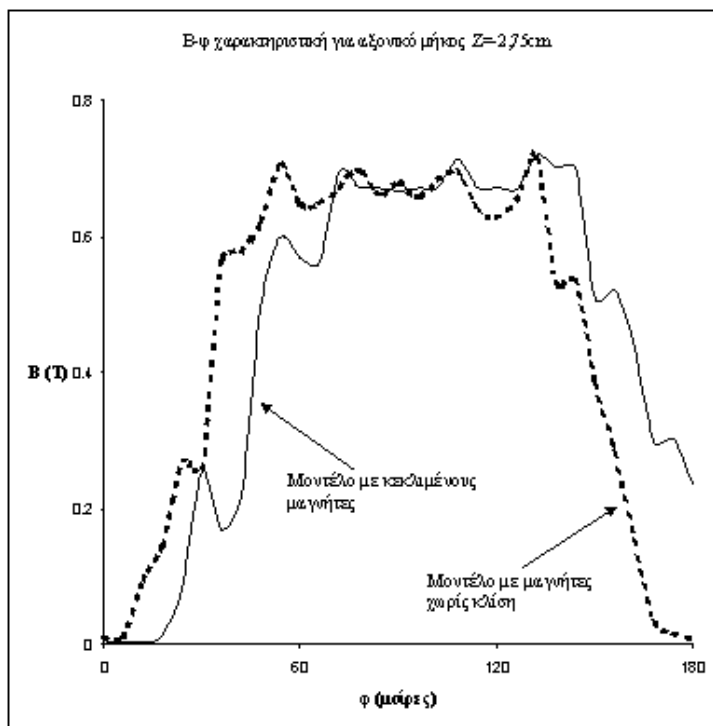
Οι διαφορές αυτές στην κατανομή μπορούν να παρατηρηθούν πιο ικανοποιητικά από τις χαρακτηριστικές  $B = f(\varphi)$  που αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές της διάστασης  $Z$ , δηλαδή του αξονικού μήκους και οι οποίες προκύπτουν μέσω του αλγορίθμου της παραγράφου 9.5. Από τα γραφήματα 10.4-1 και 10.4-2 παρατηρούμε ότι ενώ η χαρακτηριστικές που αντιστοιχούν στο τρισδιάστατο μοντέλο με μαγνήτες

χωρίς κλίση έχουν την ίδια μορφή, οι αντίστοιχες χαρακτηριστικές για το τρισδιάστατο μοντέλο με κεκλιμένους μαγνήτες είναι διαφορετικές. Αυτό οφείλεται στην κλίση των μαγνητών της οποίας αποτέλεσμα είναι κάθε χαρακτηριστική της πυκνότητας ροής συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας να είναι διαφορετική για κάθε τιμή της διάστασης  $Z$ , δηλαδή για κάθε τιμή του ενεργού μήκους της σύγχρονης γεννήτριας.



**Εικόνες 10.4-1, 10.4-2**

Διανυσματική κατανομή του πλάτους της πυκνότητας ροής για το τρισδιάστατο μοντέλο με μαγνήτες χωρίς κλίση (10.4-1) και του αντίστοιχου με κεκλιμένους μαγνήτες (10.4-2) στην εν κενώ λειτουργία, [17].

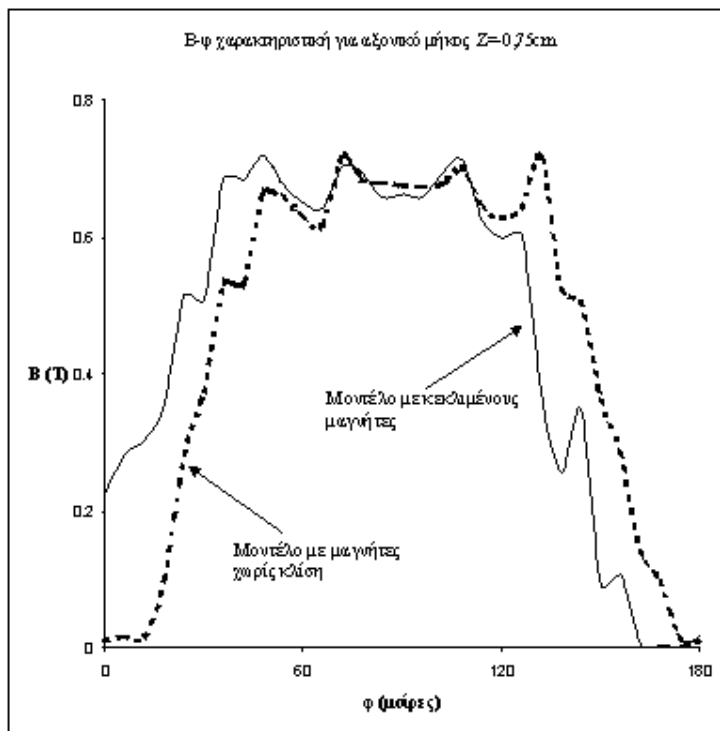


**Γράφημα 10.4-1**

Πλάτος της πυκνότητας ροής συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας, στο μέσον του διακένου και για αξονικό μήκος  $-2,75\text{cm}$ , των δύο τρισδιάστατων μοντέλων.

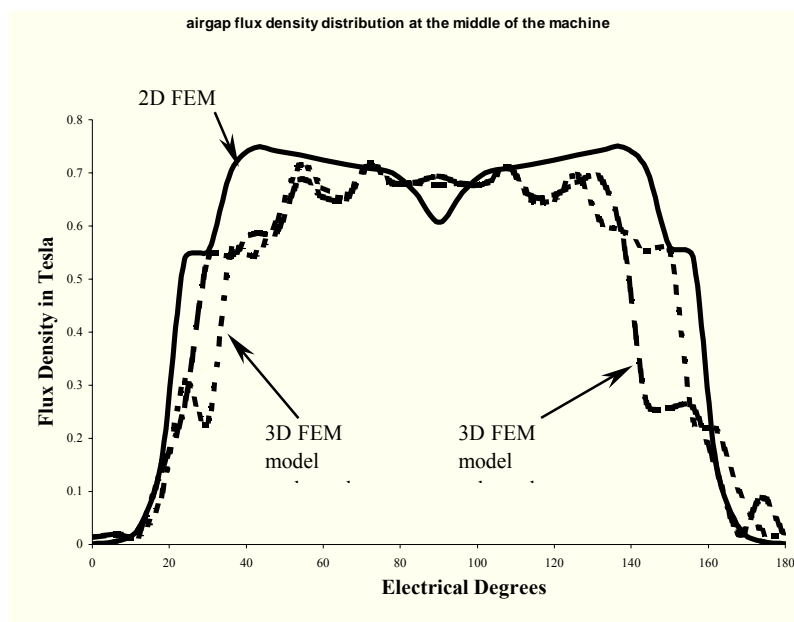


Επίσης στο γράφημα 10.4-3 φαίνονται οι χαρακτηριστικές της πυκνότητας ροής συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας στο μέσον του διακένου και στο μέσον της μηχανής για τα δύο τρισδιάστατα μοντέλα και για το δισδιάστατο μοντέλο όπου φαίνονται και οι μεταξύ τους διαφορές. Από το συγκεκριμένο γράφημα είναι φανερό ότι το πλάτος της πυκνότητας ροής το οποίο υπολογίζεται από τις τρισδιάστατες αναλύσεις είναι μικρότερο από το αντίστοιχο μίας τυπικής δισδιάστατης ανάλυσης.



**Γράφημα 10.4-2**

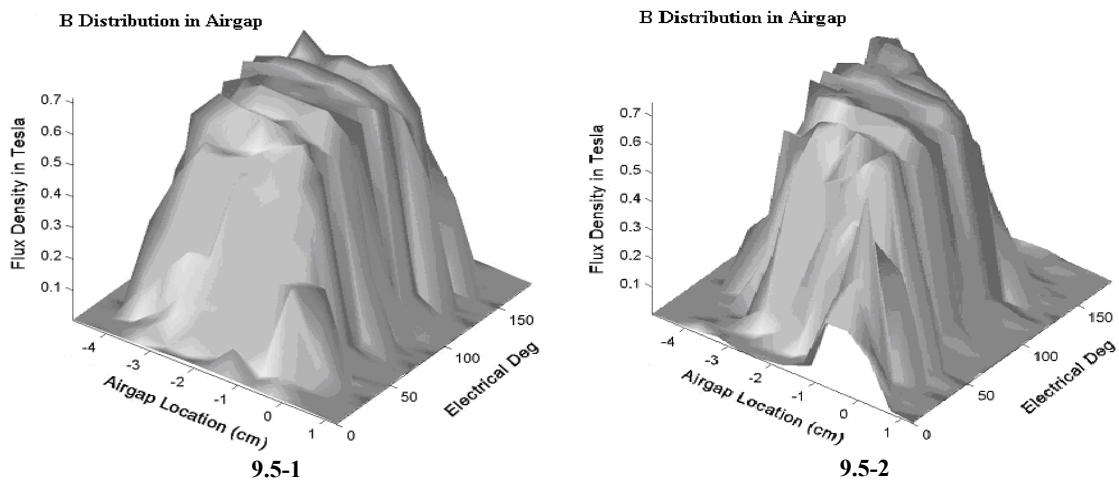
Πλάτος της πυκνότητας ροής συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας, στο μέσον του διακένου και για αξονικό μήκος  $-0,75\text{cm}$ , των δύο τρισδιάστατων μοντέλων.



**Γράφημα 10.4-3**

Πυκνότητα ροής στο διάκενο και στο μέσον της μηχανής (3D & 2D fem simulation), [16], [17].

Η διαφορά στην κατανομή της πυκνότητας ροής της σύγχρονης μηχανής με μαγνήτες χωρίς κλίση και της σύγχρονης μηχανής με κεκλιμένους μαγνήτες φαίνεται καθαρά αν συγκριθούν οι αντίστοιχες χαρακτηριστικές  $B = f(\varphi, Z)$  που προκύπτουν από την τρισδιάστατη ανάλυση και την εφαρμογή του αλγορίθμου της παραγράφου 9.5. Αυτές δόθηκαν στο 9<sup>ο</sup> κεφάλαιο και παρατίθενται ξανά στην επόμενη σελίδα. Παρατηρούμε ότι δεν πρόκειται απλώς για καμπύλες, αλλά για επιφάνειες στο χώρο και αυτό γιατί, η μαγνητική επαγωγή είναι συνάρτηση όχι μίας αλλά δύο μεταβλητών, της γωνίας και της διάστασης  $Z$ . Από την σύγκριση αυτών φαίνονται καθαρά οι διαφορές στην κατανομή που οφείλονται στην κλίση των μαγνητών. Επίσης διακρίνεται και η επίδραση του αέρα, που περιβάλλει την πραγματική μηχανή, στην κατανομή της μαγνητικής επαγωγής. Η τελευταία έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του πλάτους της πυκνότητας ροής, η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη στα άκρα της μηχανής.



**Γραφήματα 9.5-1, 9.5-2**

Χαρακτηριστική εν κενώ, του πλάτους της πυκνότητας ροής συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας και του αξονικού μήκους της σύγχρονης 24-πολικής μηχανής με μαγνήτες χωρίς κλίση (9.5-1) και της σύγχρονης 24-πολικής μηχανής με κεκλιμένους μαγνήτες (9.5-2).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, «Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας», Πρώτη Έκδοση, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, 1999.
- [2] Ι.Α. Τεγόπουλος, «Ηλεκτρικές Μηχανές», Μέρος Β', Δεύτερη Έκδοση, Εκδόσεις Συμμετρία, 1991.
- [3] Ι.Α. Τεγόπουλος, «Σημειώσεις για το μάθημα Κατασκευή Ηλεκτρικών Μηχανών», Εκδόσεις Ε.Μ.Π, 1998.
- [4] Ι.Α. Βομβορίδης, «Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία Ι, Εισαγωγή», Πρώτη Έκδοση, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, 1997.
- [5] Ι.Α. Ρουμेलιώτη, Ι.Α. Τσαλαμέγκα, «Σημειώσεις Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων», Πρώτη Έκδοση, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, 2001.
- [6] Σ.Γ. Ευριπιώτης, «Θέματα Ανάλυσης, Τεύχος Α», Πρώτη Έκδοση, Εκδόσεις Πατάκη, 1993.
- [7] Α. Καταλειφού, «Ανώτερα Μαθηματικά», Πρώτη Έκδοση, Εκδόσεις Ίων, 1991.
- [8] Α.Θ. Παπαϊωάννου, «Ανύσματα και Τανυστές», Πρώτη Έκδοση, 1993.
- [9] S. Chapman: «Electrical Machines DC-AC», second edition, McGraw-Hill, 1991.
- [10] Γ. Ι. Τσεκούρας, «Μελέτη Κατασκευής, Ανάλυση Κυκλωματικής & Πεδιακής Συμπεριφοράς Δοκιμίου Ανεμογεννήτριας 2,5kW», Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Μάιος 1999.
- [11] Γ. Ι. Τσεκούρας, «Μελέτη Κατασκευής, Ανάλυση Κυκλωματικής & Πεδιακής Συμπεριφοράς Δοκιμίου Ανεμογεννήτριας 2,5kW & Ανεμογεννήτριας 25kW», Μεταπτυχιακή Εργασία, Αθήνα, Φεβρουάριος 2000.
- [12] Θ. Κεφάλας, «Αναλυτική και Αριθμητική Ανάλυση Σύγχρονης Μηχανής», Προπτυχιακή Εργασία στο μάθημα «Κατασκευή Ηλεκτρικών Μηχανών», Αθήνα, Φεβρουάριος 2003.
- [13] M. A. Alhamadi, N. Demerdash, "Three dimensional magnetic field computation by a coupled vector-scalar potential method in brushless dc motors with skewed permanent magnet mounts - the formulation and FE grids", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 9/1, 1994 pp. 1-14.
- [14] M. A. Alhamadi, N. Demerdash, "Three dimensional magnetic field computation by a coupled vector-scalar potential method in brushless dc motors with skewed permanent magnet mounts - the no load and load result", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 9/1, 1994 pp. 15-25
- [15] M. A. Alhamadi, N. Demerdash, "Modeling and experimental verification of the performance of a skew mounted permanent magnet brushless dc motor drive with parameters computed from 3D FE magnetic field solutions", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 9/1, 1994 pp. 26-35.
- [16] T.D. Kefalas, G.D. Kalokiris, A.G. Kladas, J.A. Tegopoulos, "Design of skewed mounted permanent magnet synchronous generators based on 2D and 3D finite element techniques", Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic and Superconducting Materials, accepted for publication in the Journal of Material Processing Technology, Elsevier.
- [17] G.D. Kalokiris, T.D. Kefalas, A.G. Kladas and J.A. Tegopoulos, "Special air-gap element for 2D FEM analysis of electrical machines accounting for rotor skew", Proceedings of CEFC 2004, 6-9 June 2004, Seoul, Korea, accepted for publication in IEEE Transactions on Magnetics, May 2005.



ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

Παρακάτω παρατίθενται οι συμβολισμοί που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική. Κάποια σύμβολα έχουν περισσότερες από μία ερμηνείες.

A	Εμβαδόν διακένου
A, B, Γ, ...	Συμβολισμοί συνόλων
A1, A2, A3, ...	Συμβολισμοί επιφανειών στο ANSYS
ac	Ειδική ηλεκτρική φόρτιση
$A_{cu}$	Εμβαδόν διατομής χαλκού
AX, AY, AZ, ...	Συμβολισμός των τριών συνιστωσών του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού
$A_{\text{αύλακας}}$	Εμβαδόν της αύλακας του στάτη
$\bar{B}$	Ειδική μαγνητική φόρτιση
B	Πλάτος μαγνητικής επαγωγής
$B_n$	Κάθετη συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής
$B_r$	Παραμένουσα μαγνήτιση
$B_t$	Εφαπτομενική συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής
$B_\delta$	Πλάτος μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο
cosφ	Συντελεστής ισχύος
D	Διάμετρος (εσωτερική ή εξωτερική του δρομέα ή του στάτη)
$D_{\text{δοκιμίου}}$	Διάμετρος δοκιμίου (εσωτερική ή εξωτερική του δρομέα ή του στάτη)
DSP	Διαφορική μέθοδος ανάλυσης του μαγνητικού βαθμωτού δυναμικού
E	Ενεργός τιμή επαγόμενης τάσης
f	Ηλεκτρική συχνότητα
F	Φυγόκεντρος δύναμη
$F_t$	Μαγνητική δύναμη
GSP	Γενική μέθοδος ανάλυσης του μαγνητικού βαθμωτού δυναμικού
H	Πλάτος έντασης μαγνητικού πεδίου ή πίεση
$H_c$	Συνεχούσα, απομαγνητίζουσα δύναμη
$H_t$	Εφαπτομενική συνιστώσα της έντασης του μαγνητικού πεδίου
I	Ρεύμα
I, J, K, ...	Χαρακτηρισμοί κόμβων (nodes)
$I_{\text{max}}$	Ενεργός τιμή του μέγιστου ρεύματος
$I_{\text{max-p}}$	Τιμή κορυφής του μέγιστου ρεύματος
$I_{\text{ov}}$	Ενεργός τιμή του ονομαστικού ρεύματος
$I_{\text{ov-p}}$	Τιμή κορυφής του ονομαστικού ρεύματος
$I_{\text{ov-πολικό}}$	Πολική ενεργός τιμή του ονομαστικού ρεύματος
$I_{\text{ov-φασικό}}$	Φασική ενεργός τιμή του ονομαστικού ρεύματος
$\vec{i}_x$	Μοναδιαίο διάνυσμα στον άξονα X του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων
$\vec{i}_y$	Μοναδιαίο διάνυσμα στον άξονα Y του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων
$\vec{i}_z$	Μοναδιαίο διάνυσμα στον άξονα Z του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων
J	Χωρική πυκνότητα ρεύματος
$J_A$	Χωρική πυκνότητα ρεύματος που αντιστοιχεί στην φάση A
$J_B$	Χωρική πυκνότητα ρεύματος που αντιστοιχεί στην φάση B
$J_C$	Χωρική πυκνότητα ρεύματος που αντιστοιχεί στην φάση -C
k	Ακέραιος αριθμός
$k_w$	Συντελεστής τυλίγματος
L	Αξονικό μήκος, ενεργό μήκος της σύγχρονης γεννήτριας
L1	Διανυσματικός τύπος για έλεγχο σύγκλισης της λύσης στο ANSYS
L2	Διανυσματικός τύπος για έλεγχο σύγκλισης της λύσης στο ANSYS

$L_m$	Διάσταση μόνιμου μαγνήτη κατά μήκους διακένου
$L_\delta$	Πλάτος διακένου
$L_{\text{μαγνήτη}}$	Περιφερειακό μήκος μαγνήτη
$m$	Αριθμός των φάσεων ή μάζα
MAG	Συμβολισμός της τιμής του μαγνητικού βαθμωτού δυναμικού στο ANSYS
ΜΕΔ	Μαγνητεγερτική δύναμη
MSP	Μέθοδος ανάλυσης του μαγνητικού βαθμωτού δυναμικού
MVP	Μέθοδος ανάλυσης του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού
$n$	Ταχύτητα περιστροφής
$n_{\text{δοκιμίου}}$	Ταχύτητα περιστροφής δοκιμίου
$N_c$	Αριθμός ελιγμάτων, σπειρών ανά πηνίο
$N_s$	Αριθμός ελιγμάτων, σπειρών ανά φάση
$P$	Αριθμός πόλων
$P$	Αριθμός ζευγών πόλων
$P_{el}$	Ηλεκτρική ισχύς
$P_m$	Μηχανική ισχύς
$P_{max}$	Μέγιστη ισχύς
$P_t$	Μέση εφαπτομενική πίεση
$P_{\text{απ}}$	Ισχύς απωλειών
$P_{\text{ov}}$	Ονομαστική ισχύς
$q$	Αριθμός αυλακών του στάτη ανά πόλο και ανά φάση
$Q$	Αριθμός αυλακών του στάτη ή παροχή αέρα
$R$	Ακτίνα
RSP	Μειωμένη μέθοδος ανάλυσης του μαγνητικού βαθμωτού δυναμικού
$S$	Εμβαδόν ή φαινόμενη ισχύς
$S_1$	Εμβαδόν μαγνήτη
$T$	Θερμοκρασία
$T_e$	Ηλεκτρομαγνητική ροπή διακένου
$T_{e\text{-στιγμιαία}}$	Στιγμιαία ηλεκτρομαγνητική ροπή διακένου
$v$	Ειδική μαγνητική αντίσταση
$V$	Τάση
$V_{\text{ον-πολικό}}$	Ονομαστική ενεργός τιμή πολικής τάσης
$V_{\text{ον-φασικό}}$	Ονομαστική ενεργός τιμή φασικής τάσης
$\gamma$	Ηλεκτρική γωνία μεταξύ δύο αυλακών του στάτη
$\theta_{kr}$	Θερμοκρασία κρύας σύγχρονης μηχανής
$\theta_{\mu\chi}$	Θερμοκρασιακή αύξηση της σύγχρονης μηχανής
$\mu$	Μαγνητική διαπερατότητα
$\mu_0$	Μαγνητική διαπερατότητα του κενού
$\mu_r$	Σχετική μαγνητική διαπερατότητα
$\varphi$	Γωνία
$\Phi$	Μαγνητική ροή
$\Phi_\delta$	Μαγνητική ροή που αντιστοιχεί στην μαγνητική επαγωγή στο διάκενο
$\Phi_r$	Μαγνητική ροή που αντιστοιχεί στην παραμένουσα μαγνήτιση
$\omega$	Γωνιακή συχνότητα
$\omega_{rm}$	Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής δρομέα